Universität Bremen*

i | ö | w INSTITUT FÜR ÖKOLOGISCHE WIRTSCHAFTSFORSCHUNG

RESYSTRA

Auf dem Weg zu Resilienten Energiesystemen!

Resiliente Gestaltung der Energiesysteme am Beispiel der Transformationsoptionen „EE-Methan-System“ und „Regionale Selbstversorgung“

Schlussbericht des vom BMBF geförderten Projektes RESYSTRA (FKZ:01UN1219A-B)

Urte Brand, Bernd Giese, Arnim von Gleich, Katharina Heinbach, Ulrich Petschow, Christian Schnülle, Sönke Stührmann, Torben Stührmann, Pablo Thier, Jakob Wachsmuth, Henning Wigger

FONA Sozial-ökologische Forschung BMBF

GEFÖRDERT VOM Bundesministerium für Bildung und Forschung

Impressum

Universität Bremen
Prof. Dr. Arnim von Gleich
Fachbereich Produktionstechnik
Fachgebiet Technikgestaltung und Technologieentwicklung
Badgasteiner Str. 1
28359 Bremen

artec | Forschungszentrum Nachhaltigkeit
Enrique-Schmidt-Str. 7
28359 Bremen

Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IOW) gGmbH
Ulrich Petschow
Potsdamer Str. 105
10785 Berlin

Autoren
Urte Brand, ehem. Universität Bremen
Bernd Giese, ehem. Universität Bremen
Arnim von Gleich, Universität Bremen
Katharina Heinbach, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung
Ulrich Petschow, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung
Christian Schnülle, Universität Bremen
Sönke Stührmann, ehem. Universität Bremen
Torben Stührmann, Universität Bremen
Pablo Thier, Universität Bremen
Jakob Wachsmuth, ehem. Universität Bremen
Henning Wigger, ehem. Universität Bremen

Kooperationspartner
TU Delft: Igor Nikolic
Universität Groningen: Gerald P.J. Dijkema, Kasper H. Kisjes
Universität Stuttgart: Ulrike Fettke, Gerhard Fuchs
Steinbeis Institut Bremen: Jorg Thöming
Fachgebiet Resiliente Energiesysteme, Universität Bremen: Stefan Gößling-Reisemann

Praxispartner
Stadt Wolfhagen
Landkreis Osterholz

Des Weiteren waren am Projekt Resystra aktiv beteiligt:
Nina Böcker, Universität Bremen
Sascha Dickel, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung
Marcel Eichler, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung
Timo Hemmers, Universität Bremen
Regula Hess, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung
Nicole Klaja, Universität Bremen
Mariane Kljajic, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung
Konstantin Kubina, Universität Bremen
Viola Logemann, Universität Bremen
Christine Osterndorfer, Universität Bremen
Eugen Pissarskoi, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung
Thalea Nehomi Stuckenberg, Universität Bremen
Steffen Tinnemeyer, Universität Bremen

Sowie über 150 Teilnehmerinnen und Teilnehmer, die an den während der Projektlaufzeit veranstalteten Veranstaltungen, wie Workshops, Vorlesungsreihe und Treffen teilgenommen haben.
Zu den Veranstaltungen und Workshops zählen je zwei Workshops zu den regionalen Fallstudien, drei Workshops zu Power-to-Gas/Fuel, eine Vernetzungsveranstaltung der Transformationsforschung im Norddeutschen Raum, Kick-Off und Abschluss-Workshop sowie ein Workshop zu konkurrierenden Konzeptionen von Innovationssystemen.

Für aufschlussreiche Gespräche und Feedback danken wir ganz besonders unseren Praxis- und Kooperationspartnern sowie den TeilnehmerInnen und ReferentInnen im Rahmen unserer Veranstaltungen.

Das Projekt Resystra wurde gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Schwerpunktprogramm "Umwelt- und gesellschaftsverträgliche Transformation des Energiesystems" im Rahmen der Sozial-ökologischen Forschung (SÖF; Förderkennzeichen: 01UN1219A-B).

Laufzeit von Resystra: 01.06.2013 - 30.11. 2016

Der vorliegende Bericht wurde im Rahmen des Forschungsverbundes RESYSTRA – Resiliente Gestaltung des Energiesystems am Beispiel der Transformationsoptionen „EE-Methan-System“ und „Regionale Selbstversorgung“ erstellt. Für den Inhalt sind die genannten Autorinnen und Autoren verantwortlich.

Diese Publikation ist im Internet als pdf-Datei abrufbar unter: www.resystra.de.

Kontakt:
Pablo Thier, Universität Bremen
Telefon: 0421-218-64895
Email: thier@uni-bremen.de

Bremen, September 2017 (Version 2)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis 10
Tabellenverzeichnis 19
Abkürzungsverzeichnis 27
Executive Summary 29
Kurzfassung 42

1 Einleitung: Resiliente Energiesysteme als Vorsorge gegenüber Unsicherheiten und Überraschungen im Fortgang der Energiewende 59

1.1 Voraussetzungen und Zugang des Projekts 59
1.2 Systemdynamik und Phasenübergänge 61
1.3 Energiewende als Transformationsprozess bzw. systemische Innovation 66
1.4 Umgang mit Unsicherheiten im Transformationsprozess 68
1.5 Resiliente Systeme als Gestaltungsperspektive 70
1.6 Thesen und Ziele des Projektes Resystra 75
1.7 Methoden und Heuristiken 77
1.8 Einordnung der Fallstudien im Projekt 83
1.9 Literatur Kapitel 1 85

2 Die Leitkonzepte Resilientes System, Resilientes Sozio-Technisches System und Resilientes Energiesystem 89

2.1 Resiliente Systeme als biomimetisches Leitkonzept 89
2.1.1 Resilienz als biomimetisches Konzept 90
2.1.2 Resilienz als Vorbereitung auf Überraschungen 91
2.1.3 Resilienz in der Evolutions- und Ökosystemtheorie 92
2.1.4 Resilienz im biomimetischen Abstraktionsprozess 95
2.1.5 Grundlegende Fähigkeiten eines Resilienten Systems zum Umgang mit Störereignissen 98

2.2 Resiliente Sozio-Technische Systeme – Erfahrungen aus dem Risikomanagement Kritischer Infrastrukturen 101
2.2.1 Prinzipien zum Umgang mit Störereignissen im Supply Chain Management (SCM) 103
2.2.2 Prinzipien zum Umgang mit Störereignissen im Informations- und Kommunikationstechnologiebereich (ICT-Bereich) 107

2.3 Resilienz fördernde Prinzipien in sozio-technischen Systemen 111
2.3.1 Systemkomponenten 111
2.3.2 Systemkonstitution und Zusammenstellung von Systemsegmenten 116
2.3.3 Resilienz-fördernde Prinzipien mit Blick auf Akteure 118
2.3.4 Gestaltungsprinzipien und -elemente Resilienter sozio-technischer Systeme – Erkenntnisse aus dem Risikomanagement 122

2.4 Das Leitkonzept Resiliente Energiesysteme 126

2.4.1 Diversität ... 127
2.4.2 Redundanz ... 128
2.4.3 Modularität ... 129
2.4.4 Speicher, Puffer und Dämpfer ... 130
2.4.5 Reserven, unverplante Ressourcen ... 130
2.4.6 Effizienz ... 131
2.4.7 Information und Kommunikation ... 131
2.4.8 Balance von Rückkopplungsmechanismen ... 132
2.4.9 Kopplungsarten ... 133
2.4.10 Der Vernetzungsgrad von Energiesystemen ... 135
2.4.11 Zellularität ... 136
2.4.12 Subsidiarität ... 136
2.4.13 Das Verhältnis von Zentralität und Dezentralität ... 137
2.4.14 Neue Geschäftsmodelle und Märkte ... 138

2.5 Fähigkeiten und Gestaltungsprinzipien Resilienter Energiesysteme ... 138

2.6 Literatur Kapitel 2 ... 139

3 Das Gestaltungsleitbild Resiliente Energiesysteme ... 144

3.1 Allgemeine Vorgehensweise bei der Erstellung von Gestaltungsleitbildern ... 144

3.2 Systemabgrenzung und Systemleistungen ... 146

3.2.1 Systemleistungen des sozio-technischen Energiesystems ... 148

3.3 Systemanalyse und Beschreibung von Energiesystemen ... 153

3.3.1 Skizze des vorfindbaren Energiesystems in Deutschland ... 153
3.3.2 Derzeitiger Aufbau des Energiesystems zur Versorgung von Regionen ... 158
3.3.3 Analyse von Transformationspfaden aus vier ausgewählten Studien mit Blick auf Resilienz steigernde Gestaltungselemente (Bauprinzipien) – Ermittlung von Gestaltungsoptionen ... 159
3.3.4 Herausforderungen mit Blick auf Zentralität, Dezentralität und Subsidiarität im Energiesystem ... 162

3.4 Konkretisierung der Gestaltungselemente für das Gestaltungsleitbild Resiliente Energiesysteme mit erneuerbaren Energien ... 163

3.4.1 Grundlagen Resilienter Steuerung und Regelung von Energiesystemen ... 163
3.4.2 Forschungsstand zu Microgrids und zellularen Ansätzen ... 167
3.4.3 Konzept des zellularen Systems mit subsidiärer Regelung ... 168
3.4.4 Bewertung des zellularen Systems aus Resilienzsicht ... 171

3.5 Annäherung an das Gestaltungsleitbild Resilientes Energiesystem über das Konzept des zellularen Systems mit subsidiärer Regelung ... 175

3.5.1 Ein möglicher Ansatz für die zellulare Strukturierung der Energieversorgung in Deutschland ... 175
3.5.2 Der Aufbau regionaler Zellen als Gestaltungsleitbild des zellularen Systems ... 179

3.6 Literatur Kapitel 3 ... 182

4 Vorstellung des Schildkrötenmodells und des MLA und deren Integration ... 185

4.1 Theorien und Modelle der gerichteten Transformation bzw. der Systemischen Innovation ... 185

4.1.1 Die Entwicklung der Innovationsmodelle ... 185
4.1.2 Innovationssystemansätze ... 187
4.1.3 Innovationen und Innovationsrichtung ... 192
4.1.4 Skizzierung der Ansätze mit Blick auf die Innovationsrichtung ... 195
4.1.5 Vergleich der Innovationssystemansätze MLP und Schildkröten-Modell ... 197
4.1.6 Fazit ... 207

4.2 Richtungsgebender Einflussfaktor: Zukunftsvorstellungen mit Fokus auf Leitkonzepte ... 208

4.2.1 Dreiebenenmodell von Leitorientierungen ... 210
4.2.2 Wirksamkeitsfaktoren ... 212
4.2.3 Einsatz und Überprüfung des Analyserahmens und Maßnahmenkonzepts im Rahmen von RESYSTRA ... 222

4.3 Zusammenfassung der Innovationssystemansätze MLP und Schildkröten-Modell: Akteure und deren Handlungsmöglichkeiten auf unterschiedlichen Ebenen ... 223

4.3.1 Das Schildkröten-Modell ... 223
4.3.2 Multi-Level-Perspektive (MLP) ... 224
4.3.3 Fallstudien ... 227

4.4 Literatur Kapitel 4 ... 230

5 Methoden ... 235

5.1 Einleitung ... 235

5.2 Erhebungsmethoden für die Analyse des Transformationsprozesses in den Fallstudien ... 236

5.2.1 Dokumentenanalysen ... 236
5.2.2 Partizipationsprozesse - Workshops und Treffen mit Akteuren in den Fallstudien ... 236
5.2.3 Leitfadeninterviews ... 237

5.3 Auswertungsmethoden für die Leitorientierungsanalyse, Akteursanalyse und Ermittlung der Richtungsgebenden Einflussfaktoren ... 239

5.4 Wertschöpfungsanalyse ... 242

5.4.1 Methodische Grundlagen - Kurzdarstellung des WeBEE-Modells ... 242
5.4.2 Regionalspezifische Anpassung des WeBEE-Modells ... 248
5.4.3 Ermittlung von Eingangsdaten und Modellparametern für den Status quo (2013) ... 248
5.4.4 Ermittlung von Eingangsdaten und Modellparametern für die Zukunftsszenarien 2030 ... 250
5.4.5 Ermittlung der Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte für den Status quo und das Zukunftsszenario ... 251

5.5 Energiesystemanalysen und Modellierung mit OEMOF ... 252

5.6 Vulnerabilitätsanalyse ... 256

5.6.1 Die Methode der ereignisbezogenen und der strukturellen Vulnerabilitätsanalyse ... 257
5.6.2 Potentielle innere Ausfälle, Indikatoren und Wirkmechanismen für Energiesysteme zur Operationalisierung der strukturellen Vulnerabilitätsanalyse ... 260
5.6.3 Konkretisierung der Anwendung der Vulnerabilitätsanalyse für die Fallstudien ... 264

5.7 Agentenbasierte Modellierung ... 274

5.7.1 Einleitung ... 274

5.7.2 Methodik ... 275
5.7.3 Handlungs- und Systemtheorien ... 276
5.7.4 Vorteile der ABM ... 280
5.7.5 Bestandteile agentenbasierter Modelle ... 281
5.7.6 Agent ... 282
5.7.7 Umgebung ... 284

5.8 Zwischenfazit ... 286

5.9 Literatur Kapitel 5 ... 287

6 Fallstudien ... 292

6.1 Einleitung der Fallstudien Regionale Selbstversorgung und strombasierte synthetische Kraftstoffe ... 292

6.2 Fallstudie resiliente regionale Selbstversorgung im Landkreis Osterholz ... 294

6.2.1 Systembeschreibung Landkreis Osterholz ... 294
6.2.2 Akteursanalyse - Beschreibung des Landkreises Osterholz ... 309
6.2.3 Leitorientierungsanalyse im Landkreis Osterholz ... 318
6.2.4 Szenarien für die Energieversorgung in den Jahren 2030 und 2040 ... 333
6.2.5 Wertschöpfungsanalyse des Landkreises Osterholz für das Jahr 2013 und 2030 ... 343
6.2.6 Strukturelle Vulnerabilitätsanalyse für den Landkreis Osterholz für die Jahre 2013 und 2030 ... 368
6.2.7 Gestaltungsleitbild „Resilientes regionales Energiesystem im Landkreis Osterholz“ ... 400
6.2.8 Richtungsgebende Einflussfaktoren "Schildkröte" ... 413
6.2.9 Zusammenfassung und Fazit der Fallstudie Landkreis Osterholz ... 428

6.3 Fallstudie resiliente regionale Selbstversorgung der Stadt Wolfhagen ... 432

6.3.1 Sozioökonomische Hintergrund der Stadt Wolfhagen ... 432
6.3.2 Politische Gegebenheiten ... 433
6.3.3 Ziele und Motivation der Energiewende in Wolfhagen ... 433
6.3.4 Historie der Energiewende in Wolfhagen ... 435
6.3.5 Stand der Energiewende ... 437
6.3.6 Anlagen zur Elektroenergiegewinnung — Szenario für 2030 ... 443
6.3.7 Strukturelle Vulnerabilitätsanalyse des Elektroenergiesystems ... 444
6.3.8 Wertschöpfungsanalyse ... 470
6.3.9 Akteure der Energiewende in Wolfhagen ... 501
6.3.10 Leitorientierungsanalyse ... 508
6.3.11 Gestaltungsleitbild regionale Selbstversorgung ... 519
6.3.12 Richtungsgebende Einflussfaktoren ... 528
6.3.13 Zusammenfassung und Fazit der Fallstudie Wolfhagen ... 536

6.4 Vergleich der Ergebnisse der regionalen Fallstudien Landkreis Osterholz und Wolfhagen ... 539

6.4.1 Vergleich der Wertschöpfung ... 544
6.4.2 Vergleich der strukturellen Vulnerabilität der Energieversorgung in den Fallstudien-Regionen ... 548
6.4.3 Vergleich der Gestaltungsleitbilder ‚resilientes regionales Energiesystem‘ in den Fallstudien ... 551
6.4.4 Vergleich der Innovationssysteme ... 555
6.4.5 Perspektiven für die zukünftige Entwicklung ... 559
6.4.6 Ausblick und Fazit zu den regionalen Fallstudien ... 562

6.5 Synthetische, strombasierte Kraftstoffe – Power-to-Fuel ... 564

6.5.1 Systembeschreibung Power-to-Fuel ... 570
6.5.2 Richtungsgebende Einflussfaktoren „Schildkröte“ und Transformationspfade „Szenarien“ ... 596
6.5.3 Entwicklung, Aufbau und Ergebnisse des agentenbasierten Modells zur Identifizierung ökonomischer Pfade für Power-to-Fuel ... 620
6.5.4 Strukturelle Vulnerabilitätsanalyse für die Transformationsoption P2F ... 647
6.5.5 Beiträge von P2F zur resilienten Energiesystemgestaltung ... 667

6.6 Handlungsempfehlungen für Transformationsoptionen ... 670

6.6.1 Schritte in Richtung eines resilienteren Energiesystems im Landkreis Osterholz ... 670
6.6.2 Handlungsempfehlungen für Wolfhagen ... 673
6.6.3 Handlungsempfehlungen für die Integration der Systeminnovation P2F in das deutsche Energiesystem ... 674

6.7 Literatur Kapitel 6 ... 677

7 Erfahrungen mit ausgewählten methodischen Ansätzen ... 695

7.1 Leitkonzept Resilienz: Wirksamkeit von Leitkonzepten und Wirksamkeitsfaktoren ... 695

7.2 Schildkrötenmodell der richtungsgebenden Einflussfaktoren ... 697

7.3 Agentenbasierte Modellierung ... 698

8 Ergebnisse und Schlussfolgerungen ... 700

8.1 Gestaltung eines Resilienten Energiesystems als Vorbereitung aufkommender Turbulenzen ... 700

8.2 Umsetzung des Leitkonzepts *Resilientes Energiesystem* in Gestaltungsleitbilder in den Fallbeispielen ... 704

8.2.1 Zum Gelingen des Transformationsprozesses ... 708
8.2.2 Schildkrötenmodell der richtungsgebenden Einflussfaktoren ... 709
8.2.3 Impulse für ein Resilientes Energiesystem der Stadt Wolfhagen ... 712
8.2.4 Impulse für ein Resilientes Energiesystem im Landkreis Osterholz ... 713
8.2.5 Impulse in Richtung auf Power-to-Fuel ... 714
8.2.6 Erfahrungen mit Schritten zur Umsetzung der Gestaltungsleitbilder in den Fallstudien ... 716

8.3 Literatur Kapitel 8 ... 719

9 Handlungsempfehlungen und Forschungsbedarf ... 722

10 Anhang ... 1

10.1 Veranstaltungen, Konferenzen und Publikationen ... 1

10.1.1 Durchgeführte Transferveranstaltungen und Maßnahmen ... 1
10.1.2 Im Projekt vergebene Unteraufträge ... 5
10.1.3 Lehre: Ringvorlesung ‚Internet der Energie‘ im WS 13/14 „ ... 5
10.1.4 Abschlussarbeiten und Veröffentlichungen ... 6

10.2 Erhebungsmethoden ... 9

10.2.1 Landkreis Osterholz – Fragebogen zur Erfassung von Netzdaten und dem Umgang mit Störungen ... 9
10.2.2 Fragenkatalog für die ersten Workshops in den Regionen (Landkreis Osterholz (04.12.2015), Stadt Wolfhagen(08.12.2015)) ... 10

10.2.3 Interview-Leitfäden und Codetabellen für Interviewauswertung 12

10.3 Dokumentation zum RESYSTRA P2F Stakeholder-Workshop am 10.09.2015 28

10.4 RESYSTRA Agent-Based Model description 50

10.5 Abschluss-Workshops Resystra um 15./16.09.2016 in Bremen: Programm, Teilnehmerliste und Protokoll mit Fazit 84

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Anforderungen der 2°C und 1,5°C-Szenarien (Fischedick 2017).....62

Abbildung 1.2: Schematische Darstellung möglicher Entwicklungspfade des Energiesystems (eigene Darstellung).....67

Abbildung 1.3: Schildkrötenmodell der richtungsgebenden Einflussfaktoren (Brand 2016 in Anlehnung an Ahrens et al. 2004; Ahrens et al. 2006; Brand 2013; Brand, Gleich et al. 2015; Fichter 2005; Stührmann et al. 2012).....79

Abbildung 1.4: Zum Zeitpunkt Herbst 2015 schon existierende richtungsgebende Einflussfaktoren zur Etablierung von Power-to-Fuel Anlagen.....80

Abbildung 1.5 Transformationsprozess zu einem ‚Resilienten Energiesystem' im Rahmen der Multi-Level-Perspektive.....81

Abbildung 1.6: Dreiebenenmodell von Leitorientierungen (in Anlehnung an Brand 2016).....82

Abbildung 2.1: Fähigkeiten und biomimetische Gestaltungsprinzipien Resilienter Systeme (eigene Darstellung).....101

Abbildung 2.2: Fähigkeiten und Gestaltungsprinzipen Resilienter sozio-technischer Systeme (Quelle Risikomanagement, eigene Darstellung).....125

Abbildung 2.3: Fähigkeiten sowie Gestaltungsprinzipien und –elemente, die das Leitkonzept Resilientes Energiesystem bilden (eigene Darstellung).....139

Abbildung 3.1: Vereinfachende Darstellung. die die bekannten erneuerbaren Energieträger den jeweiligen Sektoren zuordnet. Die Darstellnug suggiert für ein Energiesystem welches auf 100% EE basiert eine stärkere Abhängigkeit vom Stromsystem. 153

Abbildung 3.2: Bruttostromerzeugung nach Energieträgern (BMWi 2012) 154

Abbildung 3.3: Netzebenen in Deutschland (Energieagentur NRW 2015).....155

Abbildung 3.4: Schema des Einsatzes der unterschiedlichen Regelleistungsarten zur Stabilisierung der Stromversorgung (DF5GO 2013) 156

Abbildung 3.5: Energieflussbild der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2015 (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. 2015) 158

Abbildung 3.6: Vereinfachte Übersicht eines regionalen Energiesystems mit Strom, Gasnetz sowie die erneuerbaren Erzeuger Windkraft, Solarenergie und Biogas. (Quelle: Eigene Darstellung von Nina Böcker, Icons: all-free-download.com) 159

Abbildung 3.7: Darstellung eines einfachen Regelkreises. Obere Abbildung Regelstrecke, unten Regelkreis (closed loop control) (Abbildung: Prof. Dr.-Ing. Tim J. Nosper, ursprünglich: Nordmann).....164

Abbildung 3.8: Fähigkeiten und Prinzipien Zellularer Energiesysteme (Eigene Abbildung).173

Abbildung 3.9: Aufbau und Komponenten einer regionalen Zelle mit Schwerpunkt Stromversorgung und Wandler zur Kopplung mit den Sektoren Wärme und Kraftstoffe. (Eigene Darstellung , Icons: all-free-download.com) 181

Abbildung 4.1: Forschungs- und Analyseansätze im Forschungsfeld der „sustainability transition studies“. (Quelle: Markard et al. 2012, S. 957.) 198

Abbildung 4.2: Multi-Level-Perspektive und mögliche Entwicklungspfade im Energiesystem. (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Geels und Schot 2007) 201

Abbildung 4.3: Schildkrötenmodell der Einflussfaktoren für sozio-technische Systeme. (Quelle: Darstellung in Anlehnung an Ahrens et al. 2002; Hemmelskamp 1999; Fichter 2005; Brand 2013.) 203

Abbildung 4.4: Kombination der Multi-Level-Perspektive und des Schildkrötenmodells. (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Geels und Schot 2007; Ahrens et al. 2002; Hemmelskamp 1999; Fichter 2005; Brand 2013) 205

Abbildung 4.5: Dreiebenenmodell von Leitorientierungen. (Quelle: Darstellung in Anlehnung an Beucker/Brand et al. 2011; Brand, Petschow et al. 2015; Brand 2016; Brand und Gleich 2012; u. a. Gleich/Brand et al. 2010b) 211

Abbildung 5.1: Wertschöpfungsdefinition des WeBEE-Modells (Quelle: Eigene Darstellung) 245

Abbildung 5.2: Darstellung des theoretischen Rahmens der Ereignisbezogenen Vulnerabilitätsanalyse (EVA) (Darstellung in Anlehnung an Schuchardt und Wittig 2009 und (Gleich, Gößling-Reisemann, Stührmann, Lutz-Kunisch et al. 2010)). 259

Abbildung 5.3: Schematische Darstellung der bei Resystra benutzten Vorgehensweise bei der Strukturellen Vulnerabilitätsanalyse (SVA) (Darstellung in Anlehnung an Schuchardt und Wittig 2009 und Gleich et al. 2010). 259

Abbildung 5.4: Darstellung der Schritte zur Ermittlung der Vulnerabilität von Transformationspfaden von Energiesystemen. 266

Abbildung 5.5: Schematische Darstellung der Interaktion von Agenten und weiteren Systemkomponenten in einem ABM (aus Nikolic und Kasmire 2013). 282

Abbildung 6.1: Landkreis Osterholz (Koordinierungsstelle GDI-NI beim Landesbetrieb Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen 2009) 295

Abbildung 6.2: Flächennutzungsstruktur im Landkreis Osterholz nach Katasterfläche zum 31.12.2014 (Landkreis Osterholz 2014b) 296

Abbildung 6.3: Zusammensetzung Kreistag (17. Wahlperiode) (Landkreis Osterholz 2016c) 296

Abbildung 6.4: Darstellung des Netzgebietes der Osterholzer Stadtwerke (orange hinterlegt) sowie der übrigen Gemeinden des Landkreises Osterholz (grau hinterlegt) deren Strom- und Gasnetz von der EWE betrieben werden. (Osterholzer Stadtwerke 2015) 297

Abbildung 6.5: Aufschlüsselung des Stromverbrauchs nach Abnehmern für das Jahr 2013 (Landkreis Osterholz 2014d) 298

Abbildung 6.6: Regionale Wertschöpfungseffekte durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen (Quelle: Eigene Darstellung.) 347

Abbildung 6.7: Regionale Wertschöpfungseffekte durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen (Quelle: Eigene Darstellung).....349

Abbildung 6.8: Regionale Wertschöpfungseffekte durch erneuerbare Energien nach Technologiebereichen im Landkreis Osterholz im Jahr 2013 für den Status quo und die Szenarien 1 und 2 (Quelle: Eigene Darstellung).....354

Abbildung 6.9: Beschäftigungseffekte (Vollzeitäquivalente) durch erneuerbare Energien nach Technologiebereichen im Landkreis Osterholz im Jahr 2013 für den Status quo und die Szenarien 1 und 2 (Quelle: Eigene Darstellung).....355

Abbildung 6.10: Regionale Wertschöpfungseffekte durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Jahr 2013 und im Zukunftsszenario a für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen (Quelle: Eigene Darstellung).....359

Abbildung 6.11: Beschäftigungseffekte (Vollzeitäquivalente) durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Jahr 2013 und im Zukunftsszenario a für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen (Quelle: Eigene Darstellung).....360

Abbildung 6.12: Regionale Wertschöpfungseffekte durch erneuerbare Energien nach Technologiebereichen im Landkreis Osterholz im Zukunftsszenario a für das Jahr 2030 und die Szenarien 1 und 2 (Quelle: Eigene Darstellung). 363

Abbildung 6.13: Beschäftigungseffekte (Vollzeitäquivalente) durch erneuerbare Energien nach Technologiebereichen im Landkreis Osterholz im Zukunftsszenario für das Jahr und die Szenarien 1 und 2 (Quelle: Eigene Darstellung).....364

Abbildung 6.14: Vereinfachtes Netzschema für die Elektrizitätsversorgung einer Gemeinde im Landkreis Osterholz. Abkürzungen: HS = Hochspannung, MS = Mittelspannung, Kopplung = Transformatorenstation zur Spannungswandlung zwischen Netzebenen, BHKW = Blockheizkraftwerk, WKA = Windenergieanlage, PV = Photovoltaikanlage (Quelle: Eigene Darstellung) 370

Abbildung 6.15: Darstellung des Mittelspannungsnetzes des Landkreises Osterholz und Unterteilung in 5 Regionen. Legende: Blau: Mittelspannungsleitungen, Rot (Punkte): Überregionale Leitungen; Eingefärbte Flächen: Gelb: Region 1, Grün: Region 2, Violett: Region 3, Rot: Region 4, Blau: Region 5, (Kubina 2016).....374

Abbildung 6.16: Vereinfachte Modelldarstellung für eine Region mit Einspeiseebenen, Erzeugern und Verbraucher (Wandler). (Quelle: Eigene Darstellung).....375

Abbildung 6.17: Residuallastkurve der Elektrizitätsversorgung auf dem Gebiet des Landkreises Osterholz für das Jahr 2013 (Eigene Darstellung).....379

Abbildung 6.18: Darstellung der stündlichen Erzeugung und des Verbrauchs im Landkreis Osterholz im Jahr 2013; Aus Verbrauchsdaten ermittelte Datengrundlage und mit Reallastgängen aus dem Netzgebiet der Osterholzer Stadtwerke kalibriert (Eigene Darstellung).....379

Abbildung 6.19: Residuallastkurve für die elektrische Energieversorgung des Landkreises Osterholz in den Jahren 2013 einschließlich der Szenarien 2030 a und 2030 b (verstärkter PV Ausbau) mit Berücksichtigung der Wärmeversorgung und Mobilität, die mit dem Elektrizitätsnetz gekoppelt wurden (Eigene Darstellung).....380

Abbildung 6.20: Stündliche Auflösung der Erzeugung und des Verbrauchs im Landkreis Osterholz für das Szenario 2030b; Datengrundlage simuliert, Erzeugungslastgänge für PV und Wind auf Grundlage der Realerzeugung im Jahr 2015 (Quelle Eigene Darstellung basierend auf Daten von REON AG 2016) 380

Abbildung 6.21: Residuallastkurve der Simulation des Osterholzer Landkreises als regionale Zelle, die einen externen Strombezug von 5% und Gasbezug von 10% zulässt. (Quelle: Eigene Darstellung).....382

Abbildung 6.22: Darstellung der Erzeugung und des Verbrauchs im Landkreis Osterholz im Modell der regionalen Zelle für das Jahr 2040 (Quelle: Eigene Darstellung).....383

Abbildung 6.23: Darstellung der Häufigkeit von Strom-Import und Exportereignissen über die Stunden des Tages für den Landkreis Osterholz im Szenario 2040 (regionale Zelle)..383

Abbildung 6.24: Vergleich der Residuallastkurven für die Szenarien der Jahre 2030 a, 2030 b und 2040 (regionale Zelle) mit dem status quo im Jahr 2013 (Quelle: Eigene Darstellung). 384

Abbildung 6.25: Zusammenfassende Bewertung der Vulnerabilität des Elektrizitätssystems im Landkreis Osterholz bei einem Ausfall der unterschiedlichen Komponenten (Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage eigener Analysen). 390

Abbildung 6.26:Veränderung des Kapazitätsfaktors (rechte Achse) für Photovoltaik unter Klimawandel (aus NordWest2050 VA Bericht).....395

Abbildung 6.27: Saisonaler Kapazitätsfaktor für Windenergie in der Metropolregion Bremen-Oldenburg (Inlandstandorte) unter Bedingungen des Klimawandels. Die Ungleichverteilung des Erzeugungsanteils im Winter wird zum Ende des Jahrhunderts hin deutlicher. (Wachsmuth et al. 2013) 395

Abbildung 6.28: Residuallastkurven für das Jahr 2013 und die Szenarien 2030a 2030 b und 2040 (Quelle: Eigene Darstellung) 398

Abbildung 6.29: Gestaltungsleitbildelemente für ein ‚Resilientes Regionales Energiesystem Osterholz‘ (grün) zugeordnet zu den Fähigkeiten (blau) eines Resilienten Energiesystems (Quelle: eigene Darstellung) 402

Abbildung 6.30: Schildkrötenmodell mit Impulsen in Richtung auf ein resilienteres Energiesystem des Landkreises Osterholz; Richtungsimpulse schwarz: bereits vorhanden, rot: zukünftig notwendig (in Anlehnung an (Brand 2016) 427

Abbildung 6.31: Gemeindewahl 2011 in Wolfhagen (Quelle: Wolfhagen 2015) 433

Abbildung 6.32: Vereinfachtes Netzschema für die Elektrizitätsversorgung von Wolfhagen. Abkürzungen: HS = Hochspannung, MS = Mittelspannung, Kopplung = Transformatorenstation zur Spannungswandlung zwischen Netzebenen, BHKW = Blockheizkraftwerk, WKA = Windenergieanlage, PV = Photovoltaikanlage.....447

Abbildung 6.33: Ganglinien der realen (blau) und der modellierten Residuallast (rot) im Netz der SWW Wolfhagen. Die reale Residuallast wurde unter Annahme des Status quo für 2013 und unter Berücksichtigung des modellierten theoretischen Erzeugungslastganges des Windparks Rödeser Berg berechnet. 455

Abbildung 6.34: Geordnete Jahresdauerlinie der realen (blau) und der modellierten Residuallast (rot) im Netz der SWW Wolfhagen. Die reale Residuallast wurde unter

Annahme des Status quo für 2013 und unter Berücksichtigung des modellierten theoretischen Erzeugungslastganges des Windparks Rödeser Berg berechnet. 456

Abbildung 6.35: Jahresgang der geordneten Residuallastkurven für das Minimalszenario 2030 (blau) und den Status quo (rot). 457

Abbildung 6.36: Jahresgang der geordneten Residuallastkurven für das Maximalszenario 2030 (blau) und den Status quo (rot). 458

Abbildung 6.37: Überlagerte Ganglinien der modellierten Residuallast im Netz der SWW für den Status quo (2013) (rote Linie) sowie das Maximalszenario für 2030 (blaue halbtransparente Linie). 459

Abbildung 6.38: Jahresgang der geordneten Residuallastkurven für das Maximalszenario 2030 (inkl. einer Speicherleistung von 2,25 MW) (blau) und den Status quo (rot). Für die Szenario Modellierung wurde eine synchrone Steuerung der dezentralen PV-Speicher zur Reduktion der Unterspeisung im regionalen Netz angenommen. 460

Abbildung 6.39: Veränderung von Windgeschwindigkeit und Bedeckungsgrad in Hessen (Szenario A1B, regionales Klimamodell Cosmo-CLM, Mittelwerte für Zeitraum 2020-2050; Quelle: Umweltatlas Hessen (2016), Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie) (Annahmen für Szenario A1B: rasches Wirtschaftswachstum, rasche Einführung neuer, effizienter Technologien, nach 2050 rückläufige Weltbevölkerung, ausgewogene Nutzung aller Energiequellen) 461

Abbildung 6.40: Jahresgang der geordneten Residuallastkurven für den Status quo inkl. eines 12 MW-Speichers (blau) sowie den unveränderten Status quo (rot). 463

Abbildung 6.41: Jahresgang der geordneten Residuallastkurven für den Status quo inkl. bedarfsabhängig gesteuertem Erdgas-BHKW mit einer Gesamtleistung von 1,76 MW zur Verringerung der Residuallast (blau) im Vergleich zum unveränderten Status quo (rot). 464

Abbildung 6.42: Jahresgang der geordneten Residuallastkurven für den Status quo inkl. bedarfsabhängig gesteuerten Biomasse- und Erdgas-BHKWs mit einer Gesamtleistung von 2,56 MW zur Verringerung der Residuallast (blau) im Vergleich zum unveränderten Status quo (rot). 465

Abbildung 6.43: Jahresgang der geordneten Residuallastkurven für den Status quo inkl. bedarfsabhängig gesteuertem 3 MW-Speicher und Erdgas-BHKWs mit 1,76 MW zur Verringerung der Residuallast (blau) sowie dem unveränderten Status quo (rot). 466

Abbildung 6.44: Darstellung der modellierten jährlichen Einspeisung aller Erzeuger des Elektrizitätsnetzes Wolfhagens sowie der jährlichen Unter- und Überspeisung unter Berücksichtigung verschiedener Optionen zur netzdienlichen Integration von Speichern und Stromerzeugern. 469

Abbildung 6.45: Darstellung des modellierten jährlichen zeitgleichen Eigenversorgungsgrades der Elektrizitätsversorgung Wolfhagens unter Berücksichtigung verschiedener Optionen zur netzdienlichen Integration von Speichern und Stromerzeugern. 470

Abbildung 6.46: Regionale Wertschöpfungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen (Quelle: Eigene Darstellung des IÖW).....475

Abbildung 6.47: Regionale Wertschöpfungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen (Quelle: eigene Darstellung des IÖW.) 477

Abbildung 6.48: Regionale Wertschöpfungseffekte durch erneuerbare Energien nach Technologiebereichen in Wolfhagen im Jahr 2013 (Quelle: eigene Darstellung des IÖW.) 482

Abbildung 6.49: Beschäftigungseffekte (Vollzeitäquivalente) durch erneuerbare Energien nach Technologiebereichen in Wolfhagen im Jahr 2013 für den Status quo und die Szenarien 1 und 2 (Quelle: Eigene Darstellung des IÖW) 483

Abbildung 6.50: Regionale Wertschöpfungseffekte durch erneuerbare Energien in der Stadt Wolfhagen im Jahr 2013 und im Zukunftsszenario für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen (Quelle: Eigene Darstellung des IÖW) 491

Abbildung 6.51: Beschäftigungseffekte (Vollzeitäquivalente) durch erneuerbare Energien in der Stadt Wolfhagen im Jahr 2013 und im Zukunftsszenario für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen (Quelle: Eigene Darstellung des IÖW) 492

Abbildung 6.52: Regionale Wertschöpfungseffekte durch erneuerbare Energien nach Technologiebereichen in Wolfhagen im Zukunftsszenario für das Jahr 2030 und die Szenarien 1 und 2. (Quelle: Eigene Darstellung des IÖW) 495

Abbildung 6.53: Beschäftigungseffekte (Vollzeitäquivalente) durch erneuerbare Energien nach Technologiebereichen in Wolfhagen im Zukunftsszenario für das Jahr und die Szenarien 1 und 2. (Quelle: Eigene Darstellung des IÖW) 496

Abbildung 6.54: Residuallast im Netz der SWW, inkl. der modellierten Leistung des Windparks Rödeser Berg am 10.April 2013. Grau = Residuallast, hellgrau = Residuallastgradient viertelstündlich 522

Abbildung 6.55. Schildkrötenmodell mit Impulsen in Richtung auf ein resilienteres Energiesystem der Stadt Wolfhagen für die Zeit nach dem EEG 2012; Richtungsimpulse schwarz: bereits vorhanden, rot: zukünftig notwendig (aufbauend auf (Brand 2016)) ..534

Abbildung 6.56: Schildkrötenmodell des regionalen Innovationssystems Wolfhagen (nach EEG 2012) mit den im Gestaltungsleitbild formulierten Vorschlägen zur Erhöhung der Resilienz der Energieversorgung (grün) sowie notwendigen unterstützenden Änderungen und Maßnahmen im Bereich der richtungsgebenden Einflussfaktoren sowie im System selbst (rot) (aufbauend auf (Brand 2016)). 535

Abbildung 6.57: Darstellung des bilanziellen Eigenversorgungsgrads in % für den Landkreis Osterholz im Jahr 2013 und die Stadt Wolfhagen in den Jahren 2013 und 2015 (Fertiggestellung Windpark). 549

Abbildung 6.58: Geordnete Residuallastkurve für die elektrische Energieversorgung des Landkreises Osterholz in den Jahren 2013 einschließlich der Szenarien 2030 a und 2030 b (verstärkter PV Ausbau) mit Berücksichtigung der Wärmeversorgung und Mobilität, die mit dem Elektrizitätsnetz gekoppelt wurden (Eigene Darstellung). 550

Abbildung 6.59:Geordnete Residuallastkurve für die elektrische Energieversorgung der Stadt Wolfhagen im Jahre 2013 (rot) einschließlich des Maximalszenario 2030 (blau) (Eigene Darstellung). 550

Abbildung 6.60: Gestaltungsleitbildelemente für ein ‚Resilientes Regionales Energiesystem Osterholz' (grün) zugeordnet zu den Fähigkeiten (blau) eines Resilienten Energiesystems (Eigene Darstellung) 552

Abbildung 6.61: Gestaltungsleitbildelemente für ein ‚Resilientes Regionales Energiesystem Wolfhagen' (grün) zugeordnet zu den Fähigkeiten (blau) eines Resilienten Energiesystems (Eigene Darstellung).....553

Abbildung 6.62: PV-Ausschreibungen (Quelle*:* Morris, C. (2016, June 16). EEG: Umstieg von Einspeisevergütung auf Ausschreibungen verdrängt Bürgerenergie - IASS Potsdam Blog.).....561

Abbildung 6.63: Schematisches Zielviereck einer 100 % EE-Versorgung (links) und Ansprüche bzw. strategische Ziele für ein resilientes Energiesystem (rechts). 566

Abbildung 6.64: Prozessschema des P2F-Konzepts. Synthetische, strombasierte Kraftstoffe können Erdgas und -öl subsituieren und somit einen entscheidenden Beitrag zur Sektor übergreifenden Energiewende leisten (eigene Darstellung). 572

Abbildung 6.65: Gegenüberstellung der Potentiale zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen (Kreyenberg et al. 2015). 573

Abbildung 6.66: Schematische Darstellung von Varianten der Sektorkopplung (Sterner 2014). 574

Abbildung 6.67: Schematischer Aufbau einer alklaischen Elektrolysezelle und Darstellung der Reaktion (nach (Smolinka et al. 2011; Stolten und Emonts 2016).....576

Abbildung 6.68: Allgemeine schematische Darstellung einer atmosphärischen alkalischen Elektrolyseanlage (Sterner, Thema, Eckert, Lenck, Götz 2015b). 578

Abbildung 6.69: Schematische Darstellung des Aufbaus und der Reaktion in einer PEM-Elektrolysezelle (nach (Smolinka et al. 2011; Stolten und Emonts 2016)).....578

Abbildung 6.70: Schematischer Aufbau und Reaktion in einer H-T-Elektrolysezelle (nach (Ishihahra et al. 2009; Stolten und Emonts 2016)).....579

Abbildung 6.71: Darstellung eines P2F-Konzepts zur Herstellung von Flüssigkraftstoffen über die Fischer-Tropsch Synthese (Fasihi et al. 2016b).....583

Abbildung 6.72: Übersicht Power-to-Fuel Pilotprojekte in Deutschland und deren Status. Darstellung der Deutschen Energieagentur (aus (Deutsche Energie-Agentur 2015b)). 586

Abbildung 6.73: Gestehungskosten für synthetisches Methan unter der Berücksichtigung von Volllaststunden und Strombezugspreisen (aus Zuberbühler 2015). 591

Abbildung 6.74: Gegenüberstellung der Gestehungskosten für erneuerbaren Wasserstoff und Methan unter Berücksichtigung verschiedener Strombezugspreise und unterschiedlicher Vollauslastung (Purr, Osiek et al. 2016).....592

Abbildung 6.75: Annahme zur Reduktion der Investitionskosten für Power-to-X Technologien in Bezug auf die installierte Kapazität und Annahmen für die Jahre 2023, 2033 und 2050 (Fürstenwerth et al. 2014). 593

Abbildung 6.76: Schildkrötenmodell der richtungsgebenden Einflussfaktoren: Sechs externe Einflussfaktoren, unterteilt in destabilisierende Push- und selektierende Pull-Faktoren, wirken richtungsgebend auf Innovationsprozesse in sozio-technischen Systemen. 597

Abbildung 6.77: Richtungsgebende Einflussfaktoren zur Etablierung von P2F-Anlagen. Die erfolgreiche Integration dieser Systeminnovation hängt maßgeblich von Einflussfaktoren ab, welche im ‚Schildkrötenmodell der richtungsgebenden Einflussfaktoren' in Form von Push- (Hinterbeine und Schwanz) und Pull-Faktoren (Vorderbeine und Kopf) dargestellt sind. 600

Abbildung 6.78: Verhältnis der Endenergieträger Strom, Methan und Flüssigkraftstoff. Wasserstoff wird in diesem Szenario nicht als Endenergieträger angenommen. 606

Abbildung 6.79: Vergleich der Energiebedarfe in 2010 und 2050 im THGND Szenario. 611

Abbildung 6.80: Vergleich der Studienergebnisse zu den P2F-Erzeugungsmengen im Verkehr. 612

Abbildung 6.81: Darstellung der Entwicklung erneuerbarer Energien bis 2050 für 100% EE-Strom und aus dem Zubau resultierende Überschüsse. 613

Abbildung 6.82: Studienvergleich zur benötigten P2F-Kapazität für eine nahezu treibhausgasneutrale Energieversorgung in Deutschland 613

Abbildung 6.83: Weiterentwickelte Einflussfaktoren für einen Markteintritt von P2F.....618

Abbildung 6.84: Zeitliche Perspektive der P2F-Schildkröten. Mithilfe der ermittelten Einflussfaktoren kann P2F voraussichtlich der Schritt aus der Nische gelingen und somit zu einem resilienteren und nahezu klimaneutralen Energiesystem beitragen. 619

Abbildung 6.85: Fragestellungen, die auf dem ersten Workshop entwickelt und diskutiert wurden. 621

Abbildung 6.86: Konzeptuelles Diagramm zum finalen Modellentwurf. 624

Abbildung 6.87: Schematischer Aufbau des agentenbasierten Modells, angelehnt an die Systemstruktur des Schildkrötenmodells der richtungsgebenden Einflussfaktoren. Grüne Pfeile indizieren Interaktionen zwischen Agenten, orange Pfeile auf Systemebene gesteuerte Einflüsse. 625

Abbildung 6.88: Übersicht über die im Modell abgebildeten aktiven Akteursgruppen (Agenten) und passiven Systemelemente (Objekte). 626

Abbildung 6.89: Simulationsergebnisse des Referenzszenarios (Werte kumuliert dargestellt). Für eine Kalibrierung des Modells wurde unter gegebenen Marktbedingungen der Zubau von P2F-Anlagen von 2009 bis 2016 simuliert. Unter konstanten Bedingungen wurde zudem die weitere Entwicklung der P2F-Kapazität bis zum Jahr 2029 berechnet. 638

Abbildung 6.90: Entwicklung des Zubaus bis 2035 bei einem Preisanstieg fossiler Energieträger von 2% bzw. 4% und einer Vollauslastung von 3000 bzw. 6000 Stunden pro Jahr. 639

Abbildung 6.91: Zubau im Basisszenario mit einem Preisanstieg von jährlich 2% für fossile Energieträger und einer Befreiung von der EEG-Umlage durch Änderung des Letztverbraucher-Status im Energiewirtschaftsgesetz sowie einem

Emissionszertifikatspreis von 25 €/$t_{CO2Äq}$ ab 2020 (links). Verhältnis der Investitionen und Subventionen im Jahr 2035 (rechts). 641

Abbildung 6.92: Zubau nach Anerkennung als Biokraftstoff (links). Insbesondere der Zubau von Elektrolyse-Wasserstoff für Raffinerien steigt stark an. Zusammensetzung der Gesamtkapazität zur Erzeugung der Endprodukte im Jahr 2035 (rechts). 642

Abbildung 6.93: Erhöhte Akzeptanz mit höherer Zahlungsbereitschaft führt zu einem deutlichen Wachstum der P2F-Kapazität. 643

Abbildung 6.94: Implementierung einer starken Förderung in der früheren Entwicklungsphase und von strengeren Klimaschutzvorgaben für Industrieunternehmen. 644

Abbildung 6.95: Schematische Darstellung zur Vorgehensweise bei einer strukturellen Vulnerabilitätsanalyse (eigene Darstellung). 650

Abbildung 8.1: Fähigkeiten und Gestaltungsprinzipien Resilienter Energiesysteme (Eigene Darstellung) 703

Abbildung 8.2: Gestaltungsleitbild Resilientes Regionales Energiesystem für den Landkreis Osterholz (Eigene Darstellung) 706

Abbildung 8.3: Gestaltungsleitbild Resilientes Regionales Energiesystem für die Stadt Wolfhagen (Eigene Darstellung) 707

Abbildung 8.4: Schildkrötenmodell der richtungsgebenden Einflussfaktoren (Brand 2016 in Anlehnung an Ahrens et al. 2004; Ahrens et al. 2006; Brand 2013; Brand und Gleich 2015; Fichter 2005; Stührmann et al. 2012) 710

Abbildung 8.5: Schildkrötenmodell mit Impulsen in Richtung eines Resilienten Regionalen Energiesystems der Stadt Wolfhagen; Richtungsimpulse schwarz: bereits vorhanden, rot: zukünftig notwendig 713

Abbildung 8.6: Schildkrötenmodell mit Impulsen in Richtung eines Resilienten Regionalen Energiesystems des Landkreises Osterholz; Richtungsimpulse schwarz: bereits vorhanden, rot: zukünftig notwendig 714

Abbildung 8.7: Schildkrötenmodell mit Impulsen in Richtung Power-to-Fuel; Richtungsimpulse schwarz: bereits vorhanden, rot: zukünftig notwendig 715

Abbildung 8.8: Schematischer Aufbau des agentenbasierten Modells, angelehnt an die Systemstruktur des Schildkrötenmodells der richtungsgebenden Einflussfaktoren. Grüne Pfeile indizieren Interaktionen zwischen Agenten, orange Pfeile auf Systemebene gesteuerte Zusammenhänge. 716

Abbildung 1: Veranschaulichung der Wechselwirkung zwischen Agenten (Nikolic 2015) 34

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Beziehung zwischen Resilienz und Nachhaltigkeit (Brand 2016) 73

Tabelle 2.1: Die Strukturierung von vier Fähigkeiten eines Resilienten sozio-technischen Systems über die zu bewältigenden Herausforderungen 102

Tabelle 2.2: Übersicht Resilienz fördernder Maßnahmen im Supply Chain Management (Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Christopher und Peck (2004), Tang (2006), Iakovou et al. (2007) und Barroso et al. (2010) 106

Tabelle 2.3: Angewandte Resilienzprinzipien im Bereich des Lieferkettenmanagements (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Christopher und Peck 2004; Tang 2006; Iakovou et al. 2007; Barroso et al. 2010) 108

Tabelle 2.4: Einordnung von Maßnahmen im ICT Bereich nach Sterbenz (2010) und Jackson (2013). (Quelle: Eigene Darstellung nach Sterbenz (2010) und Jackson (2013)) 112

Tabelle 2.5: Einordnung der Prinzipien physischer Redundanz, funktioneller Redundanz und Diversität der Systemantworten in die Matrix der Störereignisse. 115

Tabelle 2.6: Einordnung des Prinzips der geografischen Dispersion in die Matrix der Störereignisse in Abgrenzung zum Prinzip der Vermeidung risikobehafteter Standorte 115

Tabelle 2.7: Einordnung der Prinzipien Gutmütigkeit und sicheres Fehlverhalten in die Matrix der Störereignisse 116

Tabelle 2.8: Einordnung des Prinzips der Modularität in die Matrix der Störereignisse 118

Tabelle 3.1: Darstellung der Systemleistungen und zugehörigen Qualitätskriterien von Energiesystemen für die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr 151

Tabelle 4.1: Phasenmodell eines idealtypischen Leitorientierungsprozesses (Quelle: Darstellung in Anlehnung an Brand 2016) 221

Tabelle 5.1: Übersicht der Befragten in den Fallstudienregionen (eigene Darstellung) 238

Tabelle 5.2: Im WeBEE-Modell des IÖW abgebildete Wertschöpfungsketten der erneuerbaren Energien nach Technologien und Größen- bzw. Brennstoffdifferenzierung (Quelle: Eigene Darstellung) 243

Tabelle 5.3: Indikatoren für Sensitivität und Anpassungskapazität bei Ausfall von Anlagen (Erzeugung, Wandlung, Verarbeitung) 261

Tabelle 5.4: Indikatoren für Sensitivität und Anpassungskapazität bei Ausfall von Steuerung und Regelung: (Netzsteuerung, IT Infrastruktur, Kommunikation) 261

Tabelle 5.5: Indikatoren für Sensitivität und Anpassungskapazität bei Ausfall von Infrastruktur (Umspannwerk / Transformator / Leitung) 262

Tabelle 5.6: Indikatoren für Sensitivität und Anpassungskapazität bei Ausfall von Marktakteuren 262

Tabelle 5.7: Indikatoren für Sensitivität und Anpassungskapazität bei zunehmender Prognoseunsicherheit 262

Tabelle 5.8: Indikatoren für Sensitivität und Anpassungskapazität bei Mangel an Ressourcen 262

Tabelle 5.9: Indikatoren für Sensitivität und Anpassungskapazität bei Skandalisierung des Ausbaus von EE.....263

Tabelle 5.10 Schema für die Bestimmung der Vulnerabilität aus potenziellen Auswirkungen und Anpassungskapazität 274

Tabelle 6.1: EE-Anlagen im Landkreis Osterholz im Jahr 2013 und 2014 (Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks 2014; Landkreis Osterholz 2014a, 2014d; TenneT TSO GmbH 2014).....299

Tabelle 6.2: Wärmeversorgung aus EEG (Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks 2014) 300

Tabelle 6.3: Aufschlüsselung des Energiebedarfs im Landkreis Osterholz für das Jahr 2013 (Dawid 2011; Landkreis Osterholz 2013c); eigene Schätzung / Hochrechnung auf Basis der Verkehrsmitte).....301

Tabelle 6.4: Darstellung der Durchschnitts-Verbräuche je Haushalt im Landkreis Osterholz (Quelle: Eigene Berechnung und Schätzung auf Grundlage des Gesamtverbrauchs im Landkreis (Kubina 2016) 301

Tabelle 6.5: Darstellung einer möglichst realistischen Entwicklung des Windkraftanlagenbestandes im Landkreis Osterholz gemäß den Angaben des Bauordnungsamtes. Ein Repowering wurde 18 Jahren nach der Inbetriebnahme der Windkraftanlagen angesetzt. (Quelle zu Daten der Inbetriebnahme: (Landkreis Osterholz)) 335

Tabelle 6.6: Vergleich des Zubauszenarios für Photovoltaik für den Landkreis Osterholz und für Deutschland für die Jahre 2013 und 2030 in MW (BNetzA 2015; Landkreis Osterholz 2013c, 2014d). 336

Tabelle 6.7: Darstellung des Bestandes an Biogasanlagen in 2013 aufgeschlüsselt nach Gemeinden und nach Szenario 2030 a und b für den Zubau im Jahr 2030. 337

Tabelle 6.8: Volllaststunden der Erzeugungsanlagen im Landkreis Osterholz gemäß dem Szenario 2030 sowie Gesamtenergiebedarf aufgeschlüsselt nach Haushalten und Gewerbe (REON AG 2016).....338

Tabelle 6.9: Darstellung der Durchschnitts-Verbräuche je Haushalte im Landkreis Osterholz (Quelle: eigene Berechnung auf Grundlage des Gesamtverbrauchs im Landkreis).....338

Tabelle 6.10: Darstellung der Aufteilung der Ansässigkeit für Windkraftanlagen im Jahr 2013 und 2030. 339

Tabelle 6.11: Aufstellung der Daten des Bestandsszenarios 2013 und des Zukunftsszenario 2030 a für die Berechnung der Wertschöpfungsstufen im Landkreis Osterholz (Eigene Erhebung) 340

Tabelle 6.12: Volllaststunden der Erzeugungsanlagen im Landkreis Osterholz gemäß dem Szenario 2040 sowie Gesamtenergiebedarf aufgeschlüsselt nach Haushalten und Gewerbe (REON AG 2016).....341

Tabelle 6.13: Investitionskosten der Komponenten einer regionalen Zelle die im Modell berücksichtigt wurden. (Für eine detaillierte Ausführung siehe Kubina 2016.) 342

Tabelle 6.14: Darstellung der Durchschnittes-Verbräuche je Haushalt im Landkreis Osterholz im Szenario des Jahres 2040 (Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage des Gesamtverbrauchs im Landkreis) 343

Tabelle 6.15: Bestand und Zubau an EE-Anlagen im Landkreis Osterholz (Quellen: Erhebung des Fachgebiets Technikgestaltung, Universität Bremen 2015, vgl. Kapitel 6.2.4.2) ...345

Tabelle 6.16: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen (Quelle: Eigene Berechnungen). 346

Tabelle 6.17: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen (Quelle: Eigene Berechnungen) 348

Tabelle 6.18: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen – Szenario 1 Quelle: Eigene Berechnungen.....350

Tabelle 6.19: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen – Szenario 1 (Quelle: Eigene Berechnungen).....351

Tabelle 6.20: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen – Szenario 2 (maximale Wertschöpfung) (Quelle: Eigene Berechnungen).....352

Tabelle 6.21: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen – Szenario 2 (maximale Wertschöpfung) (Quelle: Eigene Berechnungen).....353

Tabelle 6.22: Bestand und Zubau an EE-Anlagen im Landkreis Osterholz im Jahr 2013 und im Zukunftsszenario für das Jahr 2030 (Quellen: Erhebung des Fachgebiets Technikgestaltung, Universität Bremen 2015) 356

Tabelle 6.23: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien in Osterholz im Jahr 2013 und im Zukunftsszenario a für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen (Quelle: Eigene Berechnungen) 358

Tabelle 6.24: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Zukunftsszenario a für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen (Quelle: Eigene Berechnungen).....361

Tabelle 6.25: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Zukunftsszenario a für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen, (Quelle: Eigene Berechnungen)...362

Tabelle 6.26: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Zukunftsszenario a für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen – Szenario 1 (Quelle: Eigene Berechnungen).....365

Tabelle 6.27: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Zukunftsszenario a für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen – Szenario 1 (Quelle: Eigene Berechnungen).....366

Tabelle 6.28: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Zukunftsszenario a für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen – Szenario 2 (maximale Wertschöpfung) (Quelle: Eigene Berechnungen). 367

Tabelle 6.29: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Zukunftsszenario a für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen – Szenario 2 (maximale Wertschöpfung) (Quelle: Eigene Berechnungen). 368

Tabelle 6.30: Diversität der Anteile der Energieerzeugung am Gesamtelektrizitätsbedarf im Landkreis Osterholz für das Jahr 2013 und in den Szenarien 2030a/b und 2040 (regionale Zelle). 372

Tabelle 6.31: Darstellung des Bestandsszenarios für das Jahr 2013 und der beiden Zukunftsszenarien für 2030 a (normaler PV Ausbau) und 2030 b (sehr starker PV Ausbau) für die Modellierungen.....376

Tabelle 6.32: Darstellung der von der Modellierung vorgeschlagenen Erweiterungen der Energieerzeuger-Komponenten des Energiesystems für das Szenario 2030 a/b. Die Werte sind jeweils in MWel bzw. bei der Biogaserzeugung in MWgas angegeben. (Quelle: Eigene Darstellung, angelehnt an Kubina 2016).....377

Tabelle 6.33: Darstellung der von der Simulation vorgeschlagenen Erweiterungen der Energieerzeuger-Komponenten des Energiesystems für das Szenario 2040. Die Werte sind jeweils in MWel bzw. bei der Biogaserzeugung in MWgas angegeben. (Quelle: Eigene Darstellung).....378

Tabelle 6.34: Darstellung der Komponenten, die vom Modell berücksichtigt werden. 381

Tabelle 6.35: Installierte Leistung der Erzeugungsanlagen und Speicherkapazitäten von Speichern gemäß den Modellierungsergebnissen für Szenario 2040, in dem das Energiesystem des Landkreises als Zelle konfiguriert ist. 382

Tabelle 6.36: Übersicht verschiedener Lastindikatoren für die Szenarien 2013, 2030 a, 2030 b und 2040 ermittelt aus den modellierten Zeitreihen für Verbrauch und Erzeugung im Landkreis Osterholz (Quelle: Eigene Berechnungen). 384

Tabelle 6.37: Veränderung ausgewählter Klimaparameter in den nordwest2050-Klimaszenarien, n.a. = nicht anzugeben, n.v. = nicht verfügbar. (Quelle: Vulnerabilitätsanalyse NW2050, Darstellung nach Schuchardt et al. 2010b) 394

Tabelle 6.38: Gestaltungselemente, die von Teilnehmern auf dem 1. Workshop im Landkreis Osterholz genannt wurden. In Klammern ist die Zuordnung zum jeweiligen Gestaltungselement dargestellt. (Universität Bremen 2015).....404

Tabelle 6.39: Darstellung der Modellierungsergebnisse für die regionale Zelle – Landkreis Osterholz. Die benötigte installierte Leistung der Erzeuger in MW und Speicherkapazität in MWh stellt die Erfordernisse einer regionalen Zelle mit lokaler Erzeugung dar (Quelle: Eigene Berechnungen). 405

Tabelle 6.40: Darstellung des Bestandes an Windkraftanlagen im Landkreis Osterholz im Jahr 2013, des benötigten Zubaus sowie der Gesamtleistung im Jahre 2040. Alle Angaben in MW. (Eigene Zuordnung gemäß unserem Modell und den entwickelten Szenarien) ...406

Tabelle 6.41: EE-Anlagen in Wolfhagen 2013 (Windpark Rödeser Berg mit 4 Anlagen à 3.000 kWel kam 2014 hinzu) (Universität Bremen 2015). *Wertschöpfung und Beschäftigung durch regionale Selbstversorgung mit erneuerbaren Energien.)* 439

Tabelle 6.42. Wärmeversorgung in Wolfhagen (Quelle: Universität Bremen und IÖW 2015). *Wertschöpfung und Beschäftigung durch regionale Selbstversorgung mit erneuerbaren Energien.)*.....439

Tabelle 6.43: Szenarien für die Entwicklung der Stromerzeugung und Speicherung in Wolfhagen. 443

Tabelle 6.44: Schema der Bewertung von potenziellen Auswirkungen auf die Systemleistungen im Rahmen der Vulnerabilitätsanalyse (Gößling-Reisemann, Wachsmuth et al. 2013). 445

Tabelle 6.45: Schema zur qualitativen Bestimmung der Vulnerabilität als Funktion von potenziellen Auswirkungen der Anpassungskapazität des betroffenen Systems (Gößling-Reisemann et al. 2013) 445

Tabelle 6.46: Diversitäts- und Lastindikatoren der Wolfhagener Elektrizitätsversorgung 448

Tabelle 6.47: Diversität der Energieerzeugung der Wolfhagener Elektrizitätsversorgung ...449

Tabelle 6.48: Zusammenfassende Bewertung der Vulnerabilität im Elektrizitätssystem Wolfhagen 453

Tabelle 6.49: Leistungssummen in der Jahresbilanz für die Modellierung des Netzes der SWW im Vergleich mit den realen Werten aus 2013. Die reale Residuallast wurde unter Berücksichtigung des modellierten theoretischen Erzeugungslastganges des Windparks Rödeser Berg berechnet. 456

Tabelle 6.50: Gesamtergebnis der Modellierung von Netzlasten und Bedarfsdeckung unter Berücksichtigung verschiedener Optionen zur netzdienlichen Integration von Speichern und Stromerzeugern 468

Tabelle 6.51 Bestand und Zubau an EE-Anlagen in Wolfhagen im Jahr 2013. Der Bestand im Jahr 2013 ergibt sich aus dem Bestand zum Jahresende 2012 zzgl. der Hälfte des Zubaus im Jahr 2013. (Quellen: Erhebung des Fachgebiets Technikgestaltung, Universität Bremen 2015.) 471

Tabelle 6.52: Bestand und Zubau an Windenergieanlagen in Wolfhagen im Jahr 2014. Der Bestand im Jahr 2014 ergibt sich aus dem Bestand zum Jahresende 2013 zzgl. der in 2014 zugebauten Anlagen. (Quellen: Erhebung des Fachgebiets Technikgestaltung, Universität Bremen 2015.) 472

Tabelle 6.53: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen (Quelle: Eigene Berechnungen des IÖW.) 474

Tabelle 6.54: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen (Quelle: eigene Berechnungen des IÖW) 476

Tabelle 6.55: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen – Szenario 1 (Quelle: eigene Berechnungen des IÖW.) 478

Tabelle 6.56: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen – Szenario 1 (Quelle: Eigene Berechnungen des IÖW.).....479

Tabelle 6.57: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen – Szenario 2 (maximale Wertschöpfung) (Quelle: Eigene Berechnungen des IÖW).....480

Tabelle 6.58: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen – Szenario 2 (maximale Wertschöpfung) (Quelle: Eigene Berechnungen des IÖW.).....481

Tabelle 6.59: Vereinfachte Abschätzung der regionalen Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte in Wolfhagen nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen unter Berücksichtigung des Windparks „Rödeser Berg“ (Quelle: Eigene Berechnungen des IÖW).....484

Tabelle 6.60: Vereinfachte Abschätzung der regionalen Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte in Wolfhagen im Jahr 2014 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen unter Berücksichtigung des Windparks „Rödeser Berg“ (Quelle: Eigene Berechnungen des IÖW) 485

Tabelle 6.61: Bestand und Zubau an EE-Anlagen in Wolfhagen im Jahr 2013 und im Zukunftsszenario für das Jahr 2030. Der Bestand im Jahr 2013/2030 ergibt sich aus dem Bestand zum Jahresende 2012/2029 zzgl. der Hälfte des Zubaus im Jahr 2013/2030. (Quellen: Erhebung des Fachgebiets Technikgestaltung, Universität Bremen 2015.)..486

Tabelle 6.62: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen im Jahr 2013 und im Zukunftsszenario für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen (Quelle: Eigene Berechnungen des IÖW) 490

Tabelle 6.63: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen im Zukunftsszenario für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen (Quelle: Eigene Berechnungen)....493

Tabelle 6.64: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen im Zukunftsszenario für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen (Quelle: Eigene Berechnungen des IÖW) 494

Tabelle 6.65: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen im Zukunftsszenario für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen – Szenario 1 (Quelle: Eigene Berechnungen des IÖW).....498

Tabelle 6.66: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen im Zukunftsszenario für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen – Szenario 1 (Quelle: Eigene Berechnungen des IÖW).....499

Tabelle 6.67: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen im Zukunftsszenario für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen – Szenario 2 (maximale Wertschöpfung) (Quelle: Eigene Berechnungen des IÖW) 500

Tabelle 6.68: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen im Zukunftsszenario für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen – Szenario 2 (maximale Wertschöpfung) (Quelle: Eigene Berechnungen des IÖW) 501

Tabelle 6.69: Zuordnung der für Wolfhagen vorgeschlagenen Maßnahmen (grün) zu den Fähigkeiten und Designprinzipien resilienter Systeme. 527

Tabelle 6.70: Anlagenbestand und -zubau je Einwohner im Jahr 2013 nach EE-Technologien in Wolfhagen und dem Landkreis Osterholz (Quelle: Eigene Berechnungen).....546

Tabelle 6.71: Regionale Wertschöpfung und Beschäftigung durch erneuerbare Energien je Einwohner im Jahr 2013 nach Technologiebereichen (Quelle: Eigene Berechnungen). 547

Tabelle 6.72: Diversität der Anteile der Energieerzeugung am Gesamtelektrizitätsbedarf für den Landkreis Osterholz und die Stadt Wolfhagen im Jahr 2013 sowie für die Szenarien 2030 a und b. 548

Tabelle 6.73:: Vergleich der Daten von Elektrolyseverfahren (Daten aus: Smolinka et al. 2011; Graf et al. 2014a; Kasten et al. 2013; Noack et al. 2015; Vanhoudt et al. 2016; P. Schmidt et al. 2016; Müller-Syring et al. 2013; Gandia et al. 2013) 5311.....589

Tabelle 6.74: Die Spannweiten der Wirkungsgrade für die Verfahren der Methanisierung und Fischer-Tropsch-Synthese sowie die kumulierten Wirkungsgrade für die Herstellung der finalen Produkte (Sterner und Stadler 2014; Graf et al. 2014a; P. Schmidt et al. 2016; Sterner 2009a; Müller-Syring et al. 2013). 590

Tabelle 6.75: Übersicht zum Endenergieverbrauch im Jahr 2050 im UBA THGND 2050 Szenario, aufgelistet nach Sektoren (nach Benndorf, Bernicke, Bertram, Butz, Dettling et al. 2013). 604

Tabelle 6.76: Nachfragevolumen und Preise für fossile Energieträger und Biokraftstoffe im Basisjahr 2015 (BMWi 2015; DWV 2015; BNA 2016; MWV 2015; UFOP 2015).....630

Tabelle 6.77: Wesentliche Modellannahmen und Zuordnung der miteinander handelnden Betreiber- und Kundengruppen. Quantitative Angaben beziehen sich auf das Basisjahr 2015. 632

Tabelle 6.78: Entwicklung der Investitions- und Produktionskosten in der Modellumgebung im Optimierungsszenario. 645

Tabelle 6.79: Beurteilungsschema der Auswirkungen von potentiellen Störungen auf die Erbringung von den Systemleistungen. 663

Tabelle 6.80: Schema für die Bestimmung der Vulnerabilität anhand der Beurteilung von potentiellen Auswirkungen von Störungen und der Anpassungskapazität des Energiesystems.....664

Tabelle 6.81: Gegenüberstellung des Bedarfs an unterschiedlichen Energieträgern und deren Speicherkapazitäten.....670

Abkürzungsverzeichnis

a Jahr

AEE Agentur für Erneuerbare Energien

BAFA Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle

BGA Biogasanlage

BHKW Blockheizkraftwerk

BImSchG Bundesimmissionsschutzgesetz

BMU Bundesumweltministerium

CCS Carbon Capture Storage

EE Erneuerbare Energien

EEG Erneuerbaren Energien Gesetz

EnWG Energiewirtschaftsgesetz

EVA Ereignisbezogene Vulnerabilitätsanalyse

EW Einwohner/innen

EWE EWE AG (ehemals Energieversorgung Weser-Ems)

GasNV Gasnetzverordnung

GW Gigawatt

GWh Gigawatt Stunden (Energiemenge)

HS Hochspannung

KapG Kapitalgesellschaft

kW Kilowatt

kWth Kilowatt thermisch

kWel Kilowatt elektrisch

LK Landkreis

MLP Multi-Level-Perspektive

MS Mittelspannung

MW Megawatt (Leistung)

MWh Megawatt Stunde (Energiemenge)

MWth Megawatt thermisch

NS Niederspannung

SVA Strukturelle Vulnerabilitätsanalyse

SWB Stadtwerke Bremen

SWW Stadtwerke Wolfhagen

OEMOF Open Energy Modelling Framework

OHZ Landkreis Osterholz

P2F Power-to-Fuel: strombasierte Kraftstoffe (P2G und P2F)

P2G Power-to-Gas: Die strombasierte Erzeugung von Wasserstoff oder Methan

P2L Power-to-Liquid: Die strombasierte Erzeugung von Flüssigkraftstoffen

P2X Power-to-X: Die Umwandlung von Strom zu diversen Quellen

PersU Personenunternehmen

PV Photovoltaik

THG Treibhausgas

Trm Trassenmeter

UBA Umweltbundesamt

WH Stadt Wolfhagen

VA Vulnerabilitätsanalyse

VGR Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung

VZÄ Vollzeitäquivalente

WeBEE Wertschöpfung und Beschäftigung durch Erneuerbare Energien

WH Stadt Wolfhagen

WKA Windkraftanlage

WS Wertschöpfung

Executive Summary

RESYSTRA

On the way to resilient energy systems!

Two recent developments require a reorientation of the German Energiewende ("Energy Change" / "Energy Revolution") as well as the accompanying and supporting research. On the one hand, the energy transition has reached a new phase: the formerly contested switch to renewable sources has by now become a widely accepted consensus, especially with regard to the electricity sector. Wind power, photovoltaics and, albeit to a lesser extent, biogas and hydropower, are the basis for this transition. However, moving forward requires us to direct our attention from the technological aspects of power generation to the architecture of the entire energy system. Thus, systemic questions such as sector integration, sector coupling, security of supply and a necessary remodeling towards resilient energy systems are appearing increasingly on the agenda. In addition to energy production (renewable) and consumption (efficient), energy conversion, storage, control, distribution as well as new business models are also included in this new agenda. In concrete terms that requires the development of intelligent forms of sectoral coupling (electricity, heat and mobility), contracting and regional marketing. Further, we believe synthetic fuels to play an important role in those areas of mobility that cannot be easily switched to electricity.

Secondly, the Paris Climate Change Agreement reinforced an impetus of change that might serve to revive the energy transition in the heating and transport sector, where it was rather stagnating. We need a new dynamism in that field comparable to the changes in the electricity sector after the Renewable Energy Act. However, at the moment it remains unclear by what means this can be achieved. An important lever could be a drastic cost increase for emissions of fossil CO_2 by raising certificate prices, or implementing a CO_2 tax.

The core of the project "RESYSTRA" was both to outline different transformation options towards resilient energy systems and the analysis of the factors and impulses for a successful transition towards these options. We emphasized the role of civil society actors (participants) and in this context the important function of guiding concepts and visions.

We distinguish guiding concepts like 'Resilient System' and 'Resilient Energy System which take place at a medium abstraction level and illustrate the pursued direction from guiding design principles. They are specified and operationalized in view of a certain object and sphere of activity (see figure 1).

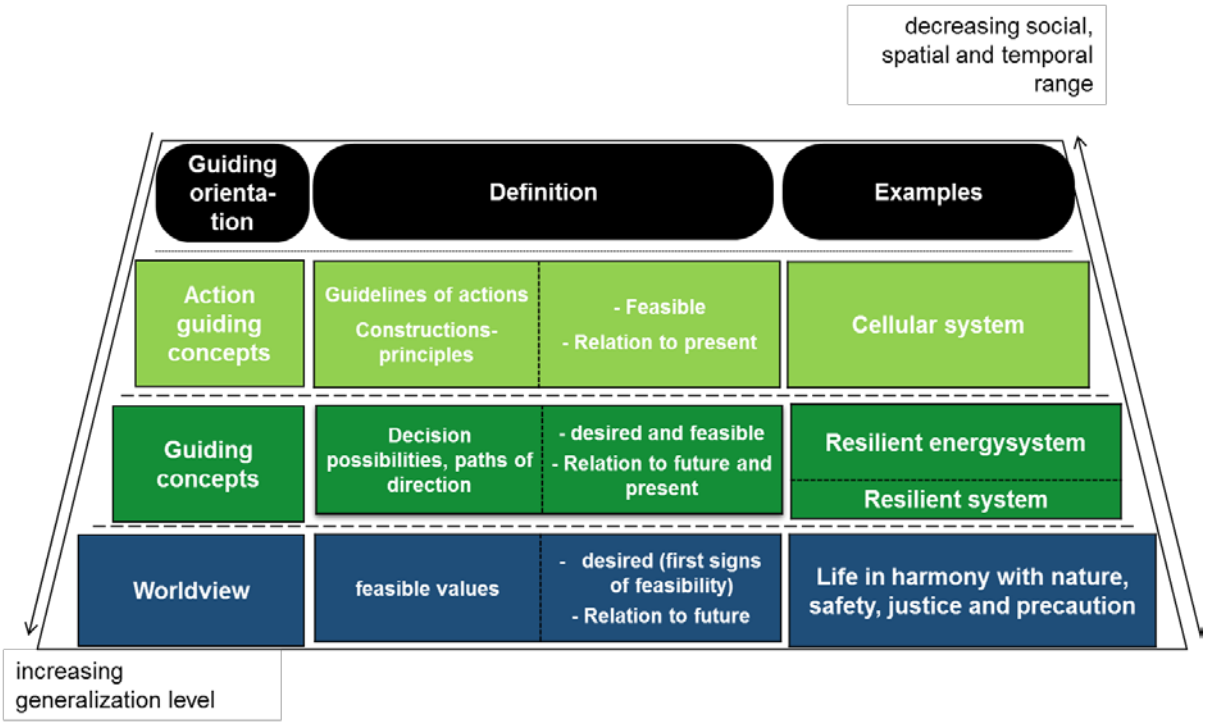


Figure 1: Three-level model of guiding orientations (own representation)

A guiding concept "resilient energy systems" was developed for the national level as well as more specific and operationalized concepts for 'resilient regional energy systems' of the administrative districts of Osterholz and Wolfhagen. "Resilient energy systems" are characterized by their ability to sustain their system services even in the face of unexpected events and turbulent external conditions. This can be achieved through certain capabilities (such as resistance, adaptability, innovation and improvisation) and distinct design principles and elements (such as diversity, redundancy, loose coupling and self-organization). Both 'resilient regional energy concepts' put an emphasis on electricity. Yet, in order to foster the discussion on the hitherto rather neglected mobility sector, the project took up the concept "power-to-fuel" (P2F) and developed it further.

The specified and operationalized resilient regional energy concepts, as well as the resilient energy concept based on power-to-fuel, where developed in cooperation with the respective actors (participants) in the fields. As for many of these participants the concept of "resilient energy systems" was new, this concept had to prove its capability to generate resonance and access to their already established guiding principles like "regional self-sufficiency", "local value added creation", "100% Renewable Energy" or "Methane and Synthetic Fuels as Storage Options".

Guiding concepts and guiding design principles

We distinguish guiding concepts, taking place at a medium abstraction level. They are ethically and emotionally fueled by world views (like 'in tune with nature' or 'precaution') which are at a higher abstraction level and obtain a more general validity. Guiding design principles are more

specific than guiding concepts and related to certain object areas like ‘the energy system of Wolfhagen’ or ‘synthetic fuels’, and they are highly operationalized.

The formulation of the guiding concept “resilient energy system” and the specific guiding design principles was structured into four steps. Each of them integrated our findings based on different methods. In the first step, we apply “resilient energy system” to socio-technical systems and develop it as a biomimetic concept. The approach “learning from nature” tries to make the impossible possible in that it allows preparation for any kind of surprises. By definition, such precaution cannot be based on experience. One possible way is to draw upon evolutionary processes. Over millions of years, recurrent, random recombination and mutation produced a multitude of design options for organisms, populations and ecosystems from which natural selection brought out the fittest. Thus, ecosystem and evolutionary theory offer some success strategies and design elements that help systems to prevail in complex and dynamic environments which are to a large extent uncontrollable by the specific organisms. (See figure 2).

Diversity, redundancy, loose coupling and self-organization are crucial determinants for the success of organisms, populations and ecosystems. The relations between the organisms - and not only the food nets - are designed in such a way that losses can be absorbed and cascade effects can be avoided. Flow equilibria (homeostasis) are an example for a dynamic form of stability. Memory and self-organization allow learning (innovation). Modularity allows for the construction of complex systems and hierarchically structured materials. Generally, organisms use what is directly available in their surroundings as basis for life (water, CO_2, low-exergy sources, lime, etc.). They use those resources efficiently, yet efficiency is not the dominant principle.

As a second step, principles for the design of resilient systems were taken from experience in risk-management: especially with respect to critical infrastructures (such as supply-chain management, energy systems, and IT and communication systems). The results are outlined in figure 3.

Without any doubt, the integration of (human) participants and the principle of subsidiarity (i.e. devolving decisions to the lowest practical level of a system) are the major additions in comparison to figure 1. Of special interest are the topics that are missing in the experiences of risk management: the capabilities of complex and dynamic systems, self-healing, homeostasis, all of them regarding autopoiesis, the capability of self-creation and stabilization. Also missing are the cautious and humble aspects of dealing with complex systems that are expressed in the principles of resource opportunism and circular economy. Apparently, risk-management is still much too engaged in the reduction-

ist attempt of domination and isolation. This is easy to understand: the issues of controllable technologies and technical containment have dominated discussions in risk-management over decades. Even in risk-management publications dealing with resilience, the paradigm shift from control to guided self-organization has not taken place yet.

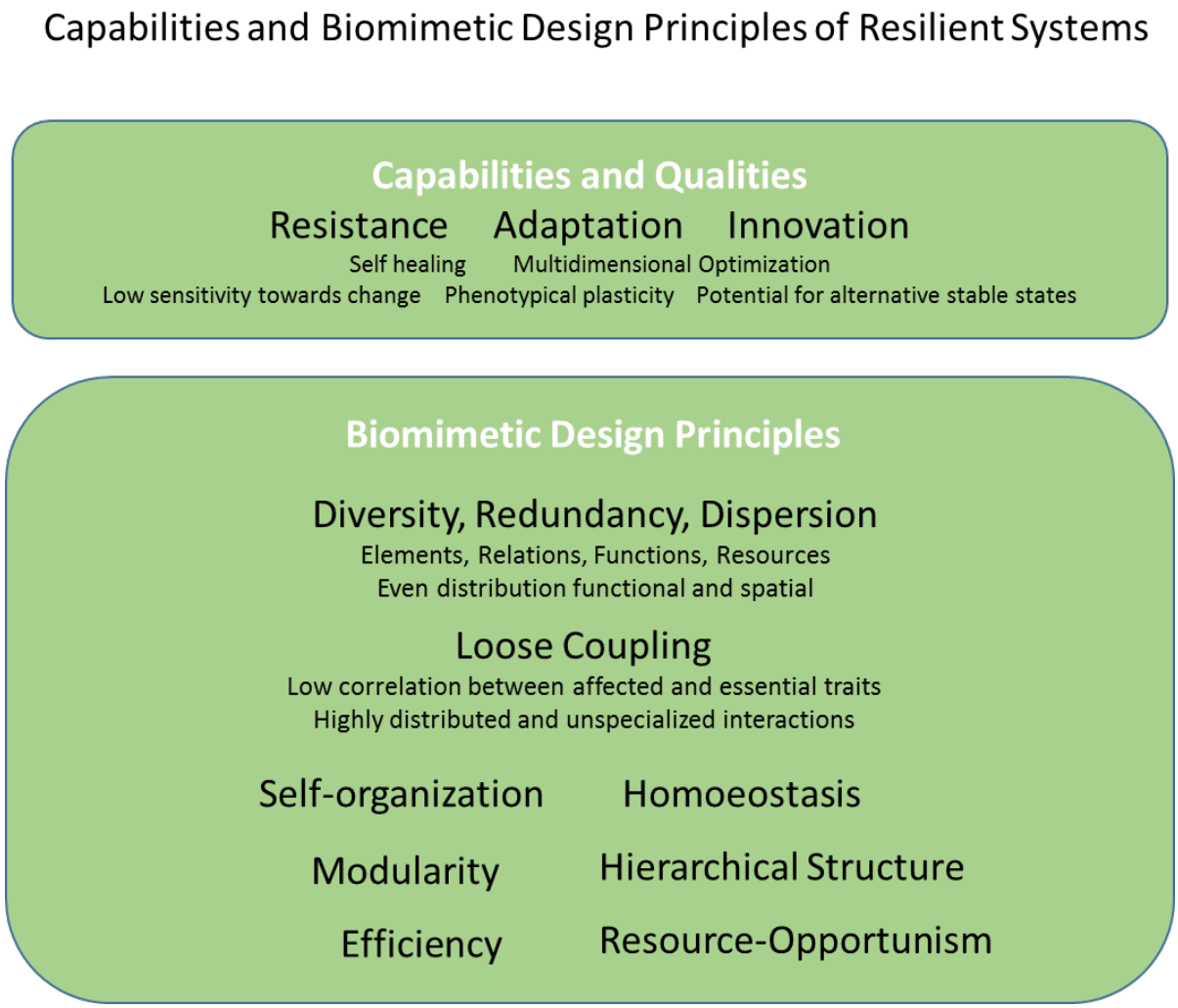


Figure 2: Capabilities and biomimetic design principles for resilient systems (own representation)

As a third step, the guiding concepts of “Resilient Systems” and ‘Resilient Socio-Technical Systems’ were merged and further specified and developed into the guiding concept of “Resilient Energy Systems”. In the current debate, the concept of “cellular systems” points in a similar direction. An energy infrastructure in a demarcated area, which can be temporarily self-sufficient and self-regulated and follows the principle of subsidiarity in regulating supply and demand at the lowest system level, shows several similarities with a ‘Resilient Energy Systems’. In this way, coupling to the main grid remains important but is not necessary at all times.

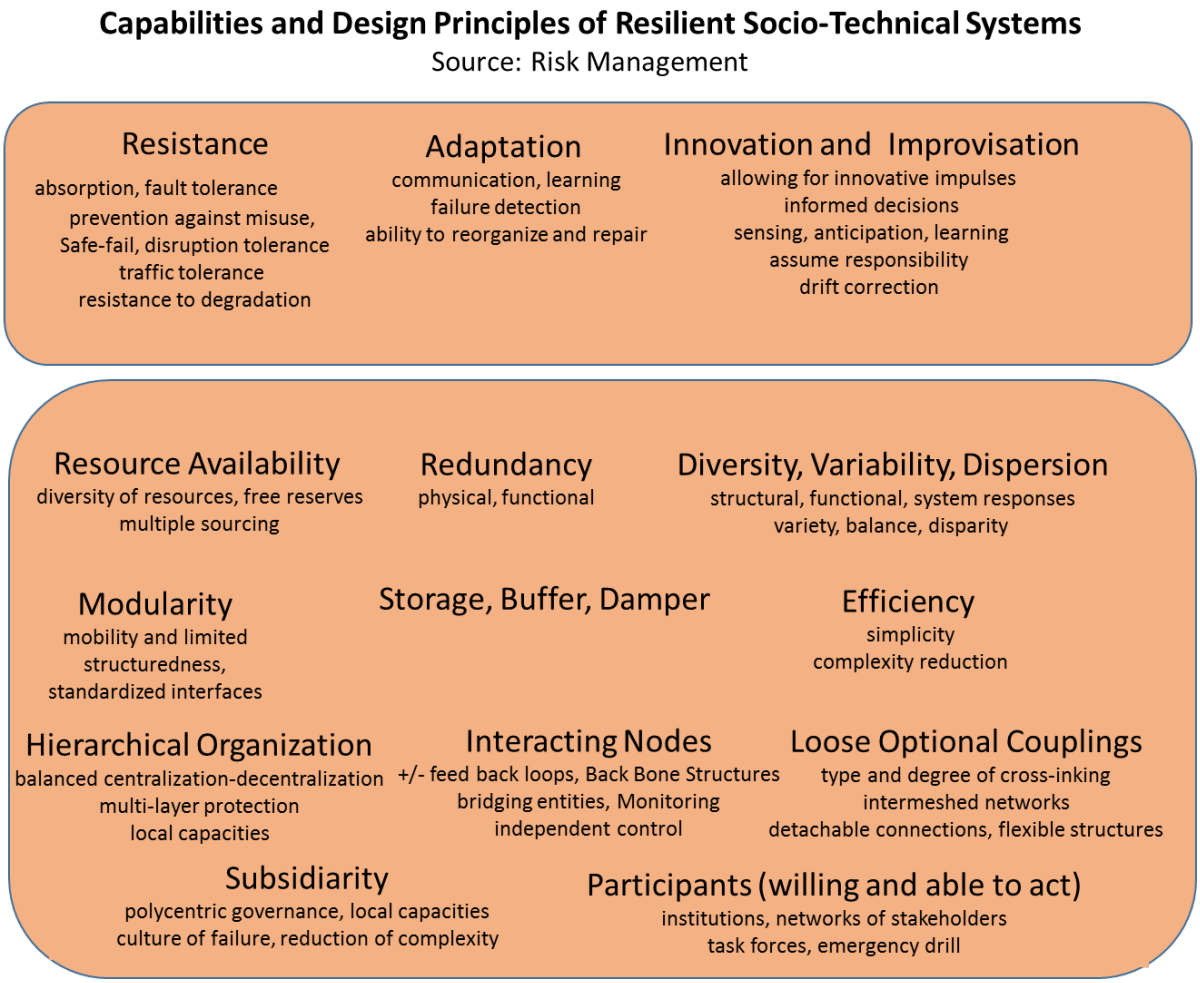


Figure 3: Capabilities and Design Principles for Resilient Socio-Technical Systems (adapted from risk management, own representation)

During various expert interviews and workshops, the participants laid out their often-diverging ideas for the future and it became apparent that one main divide appears along the line of centralization vs. decentralization. Further, it was evident that these debates do not focus on the need for extended security of supply. In this context, the guiding concept ‘cellular system’ could bridge the divide. On the one hand, it relates to the available guiding concepts among the participants on the ground (self-supply with energy, self-reliance) and, on the other hand, to the guiding concept "Resilient Energy System". The guiding concept is represented in figure 4. The proposed scheme already indicates that the different design principles and elements can be realized by concrete technical measures led by the guiding design principles. This includes different types of storage, local grid transformers, the role of power-to-fuel in coupling different energy sectors, marketing of ‘regional electricity’ and emergency drill.

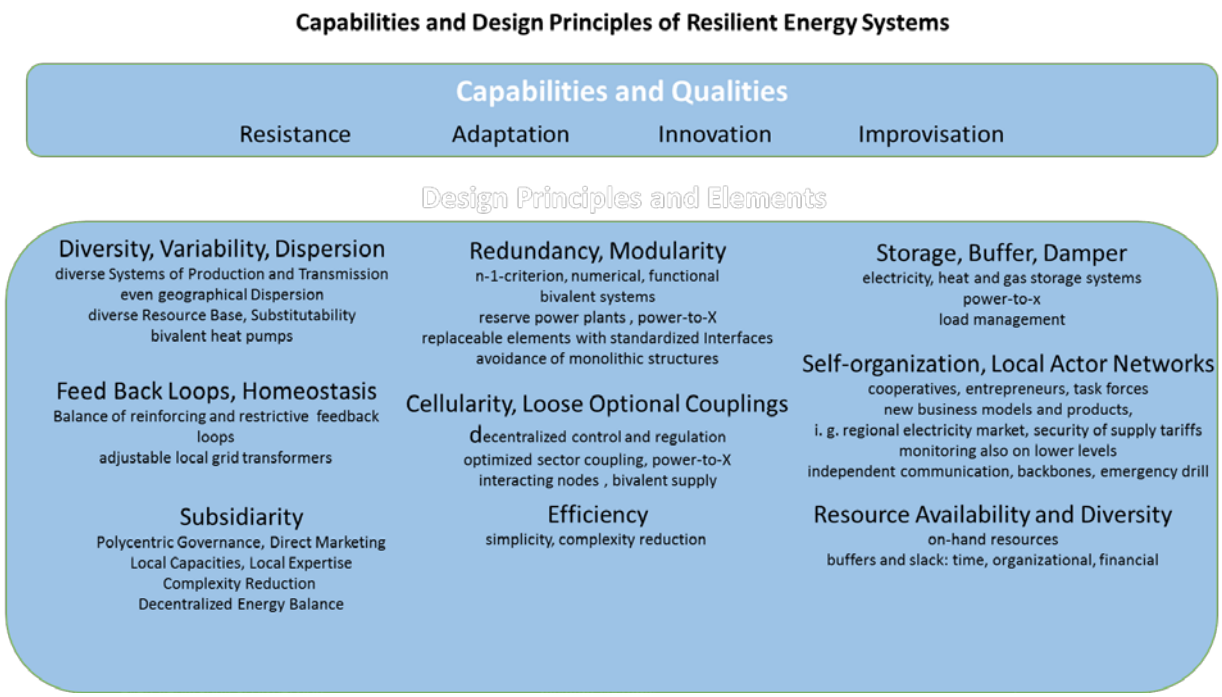


Figure 4: Capabilities and design principles and elements forming the guiding concept "Resilient Energy System" (own representation)

As a fourth and last step, guiding design principles for the different case studies were elaborated. First: the "resilient regional energy system for the administrative district of Osterholz" was developed along with the "resilient regional energy system for the administrative district of Wolfhagen". Further, the concept of "Power-to-Fuel" was formulated for the aviation sector and heavy-duty traffic for which electric drive currently appears not to be feasible. Each conceptualization was based on the guiding concept of 'Resilient Energy Systems' on the one hand, and on the respective realities in the field on the other hand (system description, system analysis by means of modelling, actor analysis, scenarios, recent and prospective supply chain analyses). Further, results of a partly-prospective vulnerability analyses (either based on checklists or models) were incorporated.

Figures 5 and 6 show possible guiding design principles for the regional energy systems in which the perspective of a cellular system was integrated.

The differences between the two regions are not serious. They were chosen for the same reason: their strong involvement in energy self-reliance with focus on electricity. Wolfhagen was more successful in keeping the local value added within the region because of a higher degree of organization among the local participants, with the municipal energy supplier and an energy cooperative in leading roles. In the region of Osterholz, the energy cooperative still has to be founded and the cooperation with the municipal energy supplier and

EWE needs to be improved. In Wolfhagen a Demand Side Management pilot project has already started and the operation of a CHP plant for demand-peaks seems to be realizable in the midrange term.

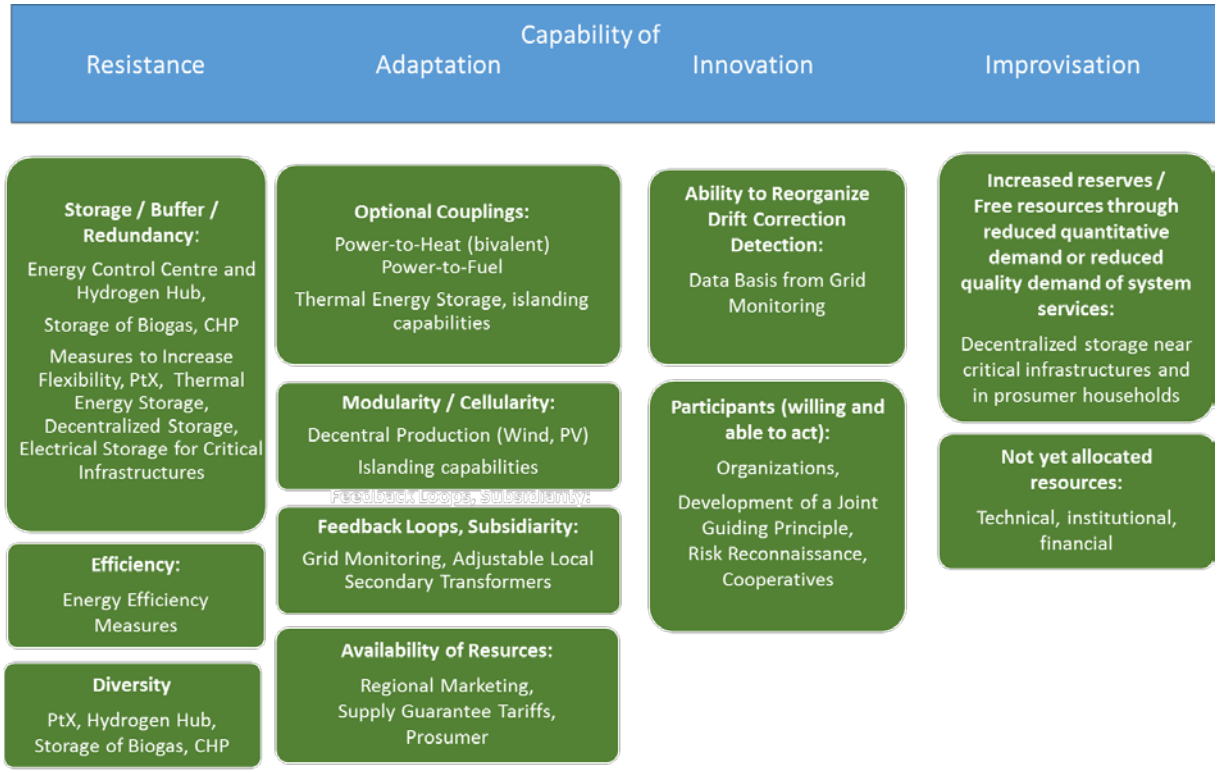


Figure 5: Guiding design principles for the "Resilient Regional Energy System Osterholz" (own representation)

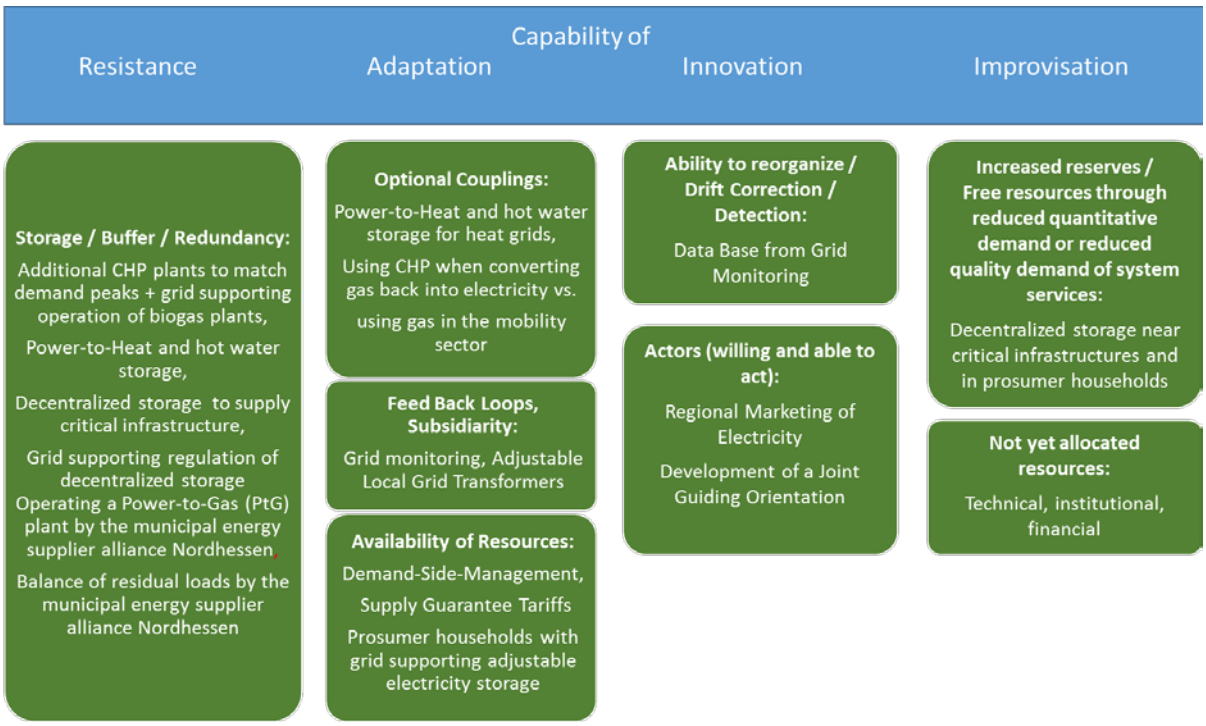


Figure 6: Guiding design principles for the "Resilient Regional Energy System Wolfhagen" (own representation)

For the concept power-to-fuel, the guiding design principle already existed (see figure 7). The first task was to understand how to exploit its potential for an increased resilience within the energy system. The second task was to understand and show how synthetic fuels can be integrated into the market. The integration of P2F into the energy system offers huge potentials to improve its resilience. If it is technically feasible to run the electrolysers (and if needed the fischer-tropsch plants) in a dynamic way without serious losses in efficiency, they could very well be used in load-management (to absorb excess electricity). In addition, P2F offers interesting possibilities for coupling of the sectors electricity, mobility and heat. In an intelligent form of coupling, they could stabilize each other. Finally, the concepts of power-to-gas as well as power-to fuel offer interesting solutions for high-volume and long-term energy storage in already existing infrastructures (underground gas reservoirs, fuel depots). The possibility to change gas or fuel back into electricity played a huge role in the beginning of the debate. It is confronted with high losses in efficiency. The role of this option will depend on the future design of the energy system.

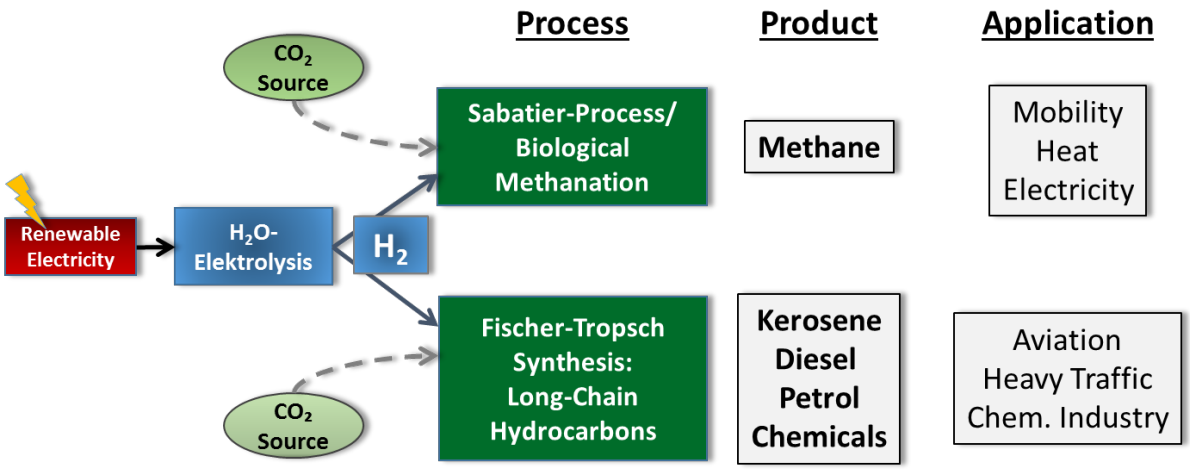


Figure 7: Guiding design principles Power-to-Fuel (own representation)

Critical factors for success of transformation

In order to understand which factors are key to a successful and target-oriented transformation of energy systems, we focused on the long-neglected role of civil society participants in innovation and transformation research. Besides their power to prevent and block through scandalization, their potential to inspire change through guidance and commitment were investigated. In the course of the case studies, it was possible to show which configurations are particularly promising for a successful transformation. It was also possible to elucidate the fact that their role is subject to change during the transformation process.

The analysis of the two regions (Osterholz County, City of Wolfhagen), showed that an expanded regional production of renewable energy does not necessarily meet the regional parties' expectation of increased value added in the region. In Wolfhagen, however, it was possible to keep the newly established value added in the region. This was mainly due to certain participants' who were able to promote initiatives and self-organization.

In Wolfhagen the guiding concept "Resilient Regional Energy System" found much more support than in Osterholz. Furthermore, the guiding design principle 'Resilient Regional Energy System in Wolfhagen' and the guiding concept 'cellular system', which is currently debated as a preliminary step, found more support. In both cases, local parties' readiness to embrace topics such as extended supply security and resilience was the key determinant for the level of support. The discussion on security of supply was a sensitive subject among those involved. Supporters of the energy transition suspected a general attack and rejection of renewables by the concerns over the future security of supply. The volatility of renewable sources of energy and its potential threat to the security of supply have long been used as pretext to fend them off the energy market. The energy providers were emotionally affected since - according to their understanding – they are already keeping the promise of supply guarantee. The risk of future uncertainties and possible surprises, for instance due to climate change, terror, cybercrime or in the context of the upcoming systemic transformations in the energy sector, were ignored all too often. The idea of a "regional resilient energy system" could at least gain increasing support among the participants of Wolfhagen and Osterholz by showing how it relates to already existing principles such as local value added, and by working with the bridging concept of a cellular system.

The methodological approaches to analyze the different cases ranged from value chain analysis and interview-based participant analysis to a structural vulnerability analysis. Additionally, during the various workshops participatory processes were employed. Working with two actual models of innovation-research, the results show the crucial role which an alliance of civil society and an informed public can play in promoting systemic change and transformation. This holds true for the driving force of shared principles and beliefs (100% renewables, regional self-sufficiency) as well as for the scandalizing power of organized protest (e.g. food vs. fuel debate, "monster transmission lines", destruction of landscapes). Short descriptions of results, structured with the help of the 'turtle model' are shown in figures 8 and 9. The turtle model represents relevant determinants for the development of a more resilient energy system as push factors (tail, rear legs) and pull factors (forelegs and head)

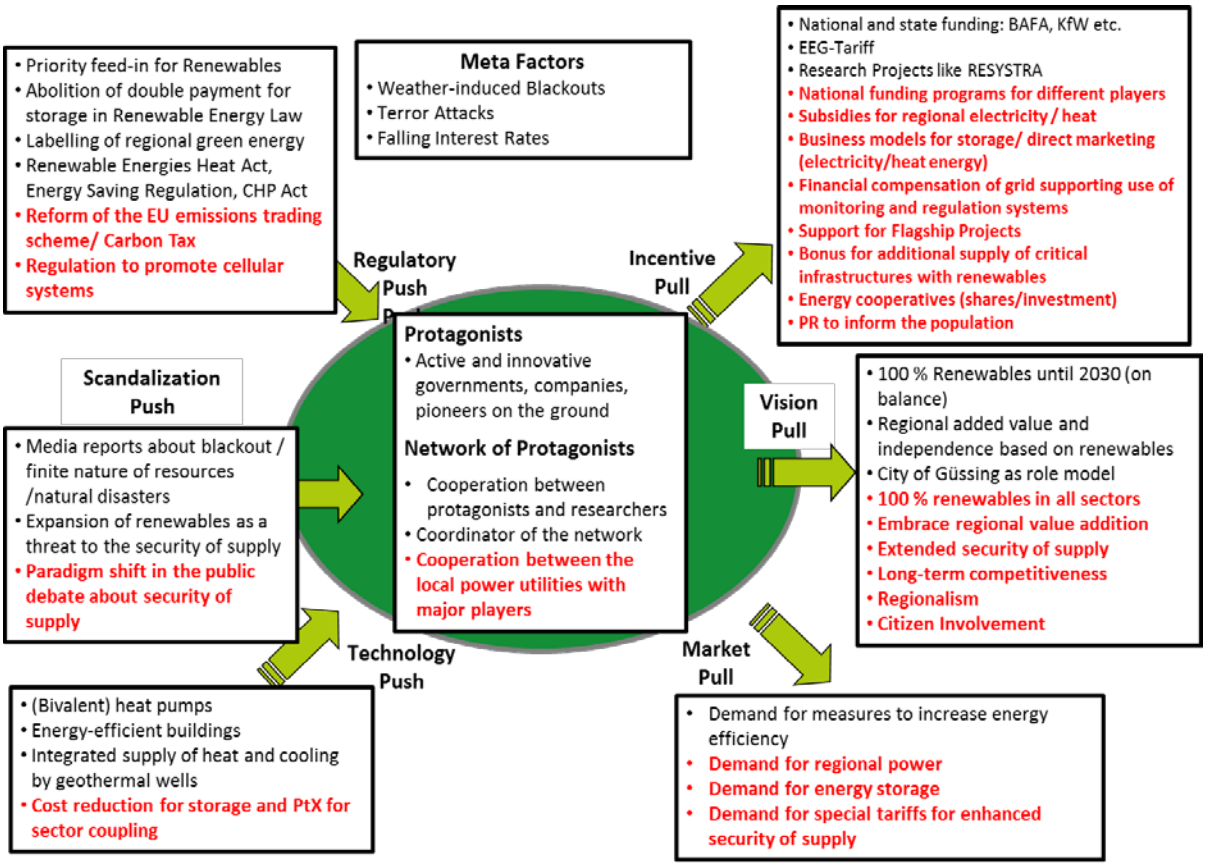


Figure 8: Turtle model with impulses towards a resilient energy system in Osterholz (existing impulses in black, required impulses in red) (own representation)

As expected, the regional case studies showed that the potentials for controlling electrical energy at the regional level are very limited (grid management / energy balance). Therefore, the coupling of the regional to the major grid is of central importance. In addition, it was clear that federal regulations were and are paramount for the examined "self-supply regions". In the future, additional incentive systems are necessary. Against the background of the Paris decisions to limit climate change, a drastic increase in prices and levies for CO_2 emissions from fossil sources is likely to be a high priority. This is particularly clear for the implementation of power-to-fuel (see figure 10). However, the ability to act regionally should also not be underestimated, both for the development of regional economic potential and for the implementation of resilience strategies. A spatial congruence between county administrations and energy management areas is quite conducive to this; yet a spatial fixation of cell sizes is clearly ineffective. The cells in the 'cellular system' must be primarily defined functionally and not spatially. Within the scope of the case studies, we had to refer to the administrative boundaries for pragmatic reasons (e.g. data availability). Innovative steps towards a more resilient energy system at the regional level would be, for example, special tariffs for regional electricity, or for increased security of supply as well as the supply of critical infrastructures with regional electricity. (See figures 8 and 9)

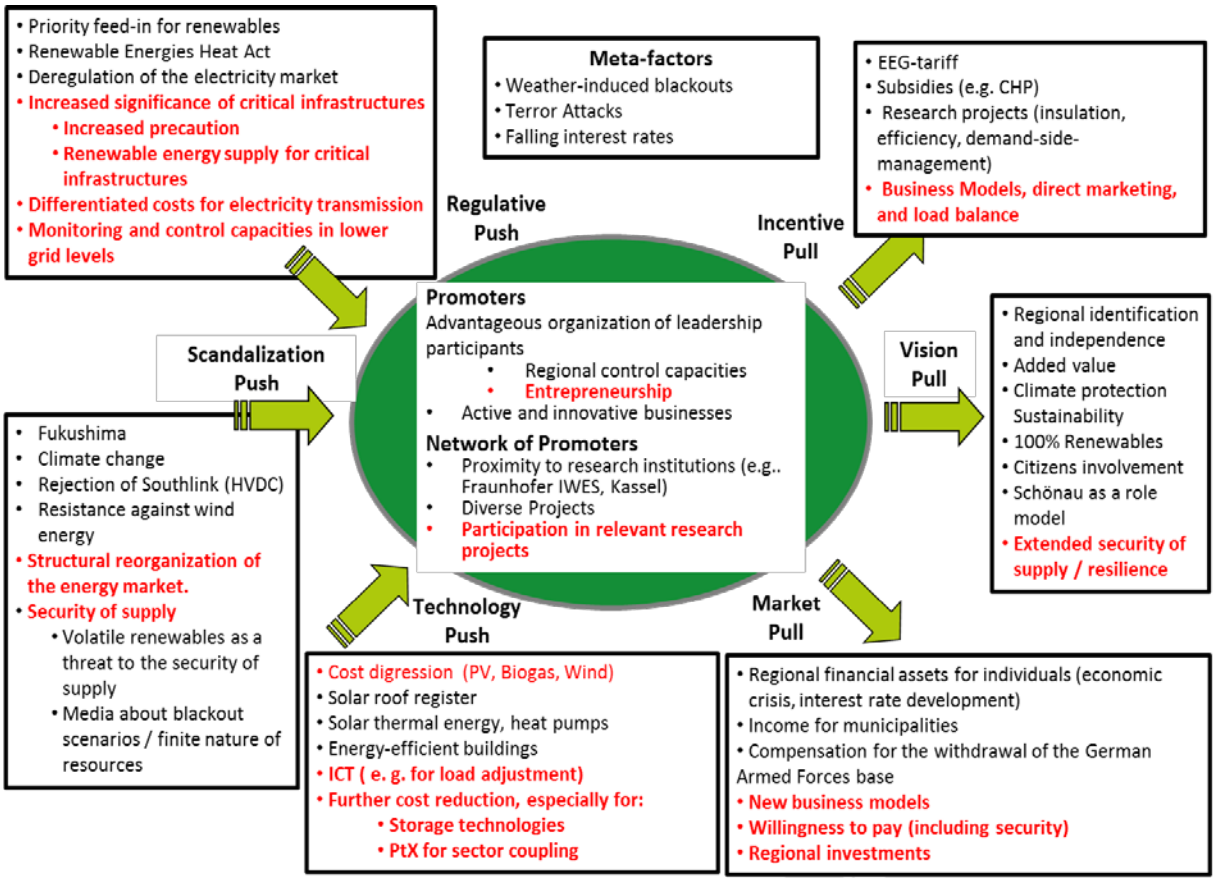


Figure 9: Turtle with impulses towards a resilient energy system in the city of Wolfhagen (existing impulses in black, required impulses in red) (own representation)

However, it has to be acknowledged that it was not easily feasible for civil society actors to adopt the guiding concept 'Resilient Regional Energy Systems' and put it into action. Part of the difficulty could be overcome with the help of the guiding concept of "Cellular Systems" which bridged the gap between the existing guiding concepts of a "Regional Energy Self-Sufficiency" towards a "Resilient Regional Energy System". Eventually, a successful transformation in the energy sector will depend on which guiding orientations gain influence. The guiding concept "Resilient Systems" has received increasing public attention worldwide in the last years. However, the concept remains cumbersome and abstract. And the most controversial issue, namely the conflict between resilience and efficiency has yet to be addressed.

In order to bring about a transformation of the socio-technical energy systems into "Resilient Energy Systems" major changes in the external conditions, especially regarding incentives and legal regulations, are necessary. This became particularly apparent in the case study P2F.

Due to a lacking political support or even impedimental regulation, the production of synthetic fuels based on electricity is currently not profitable. Therefore, the potential of P2F to contribute to increased resilience (through load-management, intelligent sector coupling, existing long-term storage and infrastructure) has not been pursued further. Yet in the light of the Paris Agreement, there is a growing consensus that electricity-

based synthetic fuels are necessary to promote CO_2-neutral mobility, especially in the aviation sector and heavy-duty traffic which cannot easily be switched to electricity. In order to understand under which conditions the P2F technology could be guided from a technological and economic niche into a larger scope of application, we developed an agent-based model. Through simulations based on that model, we identified certain measures, configurations, and external conditions, which could bring about a successful market integration. At the starting point of the agent-based model, there were two models of innovation and transformation processes, which played a central role in the research project: on the one hand, the multi-level perspective helped to focus on the necessary path from the technological niche to the market. On the other hand, the turtle model served to structure relevant determinants for a successful market integration as push and pull factors (see figure 10).

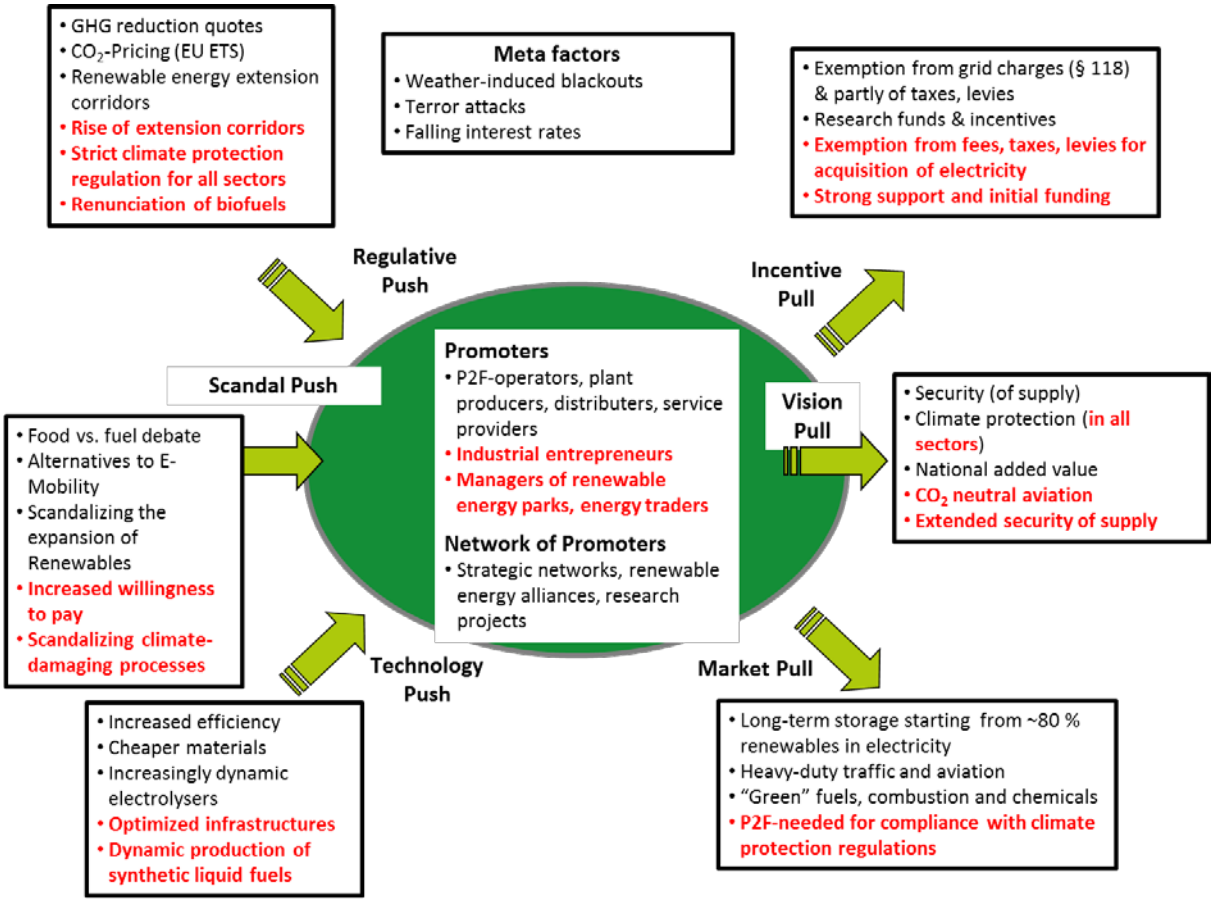


Figure 10: Determinants for the Establishment of Power-to-Fuel-facilities. (Existing impulses in black, required impulses in red) (Own representation)

In a nutshell, our research approach to analyze the "energy transition" as a transformation, as well as systemic innovation process of socio-technical systems and thereby focus on guiding concepts and–civil society actors, has proved to be very fruitful. The turtle model made it possible to identify both the current and the future push and pull factors necessary in the respective innovation systems. Further, it served to promote understanding between all parties at the different levels and to develop guidelines with

respect to the energy transition towards “Resilient Energy Systems". This also applies to the multi-level model, which, in the case of Power-to-Fuel, provided a possible roadmap for a market integration.

The guiding orientations of the project demonstrate our ambition to take climate protection targets seriously for all energy sectors and to shed light on the structural requirements of a future energy system. Building on biomimetic design principles and principles extracted from risk-management in critical infrastructures, the guiding concept of “Resilient Energy Systems” was developed. During three case studies, this guiding concept was specified and operationalized into guiding design principles in close cooperation with the local participants. Thereby we could demonstrate that the guiding concept "Resilient Energy System" can be incorporated into existing initiatives through the mediating step of "cellular energy systems" and thus can generate resonance and support. Cooperation with all interested parties on the ground fosters further increased practical relevance of the guiding design principles.

Kurzfassung

RESYSTRA

Auf dem Weg zu resilienten Energiesystemen!

Insbesondere zwei Entwicklungen in der jüngeren Vergangenheit erfordern eine Neuausrichtung der Energiewende und der sie begleitenden und unterstützenden Forschung. Zum einen beginnt eine neue Phase in der Energiewende. Der Umstieg auf Erneuerbare Energiequellen wird insbesondere im Elektrizitätsbereich nicht mehr infrage gestellt, auch nicht die Vorstellung, dass er im Wesentlichen auf Windkraft, Photovoltaik und – deutlich begrenzter – auf Biogas und Wasserkraft basiert. In der neuen Phase schwenkt der Fokus vom Technologischen zum Systemischen und damit kommen verstärkt die Sektorintegration und Sektorkopplung sowie die Versorgungssicherheit und damit die Notwendigkeit des Umbaus in Richtung auf Resiliente Energiesysteme auf die Tagesordnung. Neben Erzeugung (regenerativ) und Verbrauch (effizient) rücken Wandlung, Speicherung, Regelung, Verteilung und neue Geschäftsmodelle in den Vordergrund. Intelligente Formen der Sektorkopplung (Elektrizität, Wärme und Mobilität) müssen entwickelt werden. Contracting und regionale Vermarktung – auch von Strom - wird an Bedeutung gewinnen. Und nach unserer Überzeugung werden synthetische Treibstoffe in denjenigen Mobilitätsbereichen eine wichtige Rolle spielen, die nicht so ohne weiteres elektrifiziert werden können.

Zum zweiten geht ein neuer starker Veränderungsimpuls vom Pariser Klimaabkommen aus. Wärme und Verkehr sind bislang in der Energiewende eher stagnierende Bereiche. Sie müssen eine ähnliche Veränderungsdynamik erfahren, wie dies im Stromsektor durch das Erneuerbare Energiengesetz gelungen ist. Durch welche Maßnahmen dies erreicht werden kann, ist derzeit noch unklar. Ein wichtiger Hebel liegt in der Verteuerung der Emissionen von fossilem CO_2 durch Anhebung der Zertifikatspreise oder durch eine CO_2-Steuer.

Im Zentrum des Projekts RESYSTRA stand sowohl die Erarbeitung von Transformationsoptionen in Richtung auf Resiliente Energiesysteme als auch die Herausarbeitung von Ansatzpunkten und Faktoren der Richtungsgebung zur erfolgreichen Umsetzung dieser Transformationen. Bei den letztgenannten betonen wir die Rolle von zivilgesellschaftlichen Akteuren und in diesem Zusammenhang die wichtige Funktion von Leitbildern und Zukunftsvorstellungen. Wir unterscheiden Leitkonzepte wie ‚Resilientes System' und ‚Resilientes Energiesystem', die auf einer mittleren Abstraktionsebene die angestrebte Richtung verdeutlichen sowie Gestaltungsleitbilder, in denen diese Konzepte

auf einen bestimmten Gegenstands- und Handlungsbereich hin spezifiziert und operationalisiert wurden (vgl. Abbildung 1).

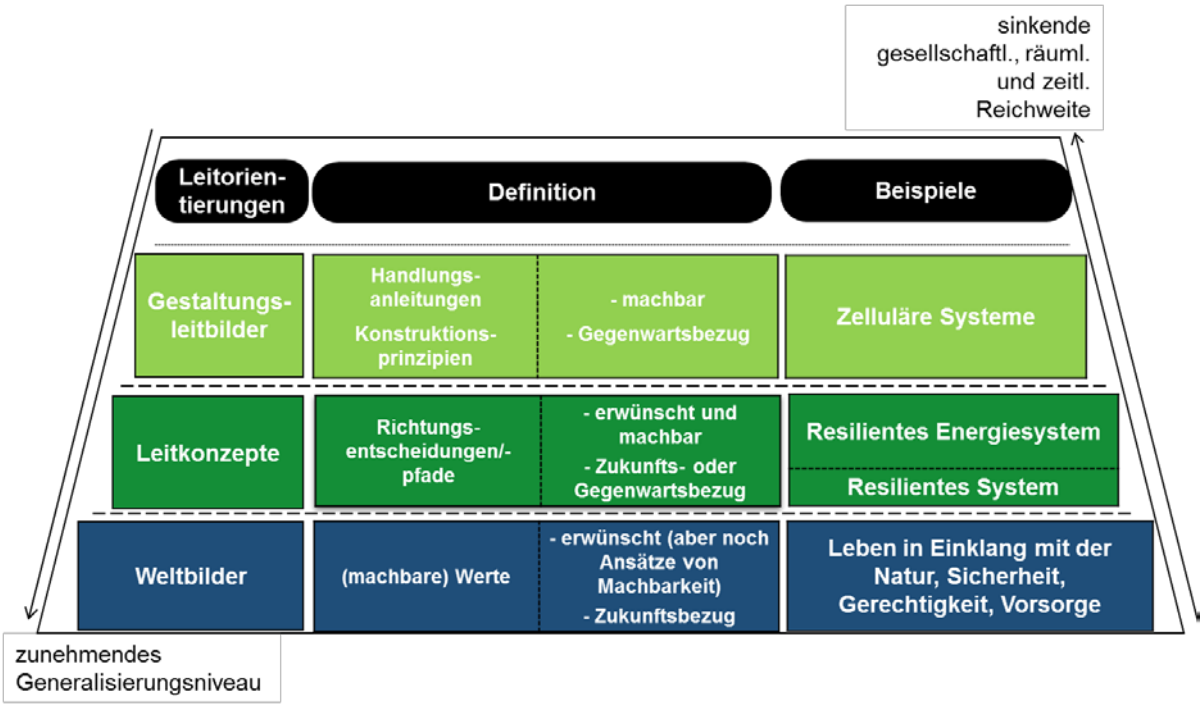


Abbildung 1: Dreiebenenmodell von Leitorientierungen (eigene Darstellung)

Im Rahmen des Projekts wurden die Leitkonzepte ‚Resilientes Energiesystem' (auf nationaler Ebene) sowie die Gestaltungsleitbilder ‚Resilientes Regionales Energiesystem für den Landkreis Osterholz' und ‚Resilientes Regionales Energiesystem für die Stadt Wolfhagen' ausgearbeitet. ‚Resiliente Energiesysteme' sollen in der Lage sein, auch angesichts von unerwarteten Ereignissen und in turbulenten Rahmenbedingungen ihre Systemleistungen aufrecht zu erhalten. Durch Fähigkeiten wie Widerstands-, Anpassungs-, Innovations- und Improvisationsfähigkeit sowie durch bestimmte Gestaltungsprinzipien und –elemente wie Diversität, Redundanz, lose Kopplung und Selbstorganisation, sind sie dazu in der Lage. Die beiden regionalen Gestaltungsleitbilder haben ihren Fokus im Bereich der Elektrizität. Für den bisher viel zu wenig diskutierten Mobilitätsbereich wurde zudem das Gestaltungsleitbild Power-to-Fuel (P2F) aufgegriffen und weiter entwickelt.

Die Gestaltungsleitbilder wurden in Kooperation mit den jeweiligen Akteuren in den Regionen und im Handlungsfeld P2F spezifiziert und operationalisiert. Dabei musste das für viele Akteure neue Leitkonzept ‚Resilientes Energiesystem' seine Fähigkeit zur Erzeugung von Resonanz und seine Anschlussfähigkeit an die bei den Akteuren vorfindbaren Leitkonzepte wie „Regionale Selbstversorgung und Wertschöpfung", „100% Erneuerbare Energie" oder „Methan und synthetische Treibstoffe als Speicheroptionen" beweisen.

Leitkonzepte und Gestaltungsleitbilder

Die Leitkonzepte, die auf einer mittleren Abstraktionsebene angesiedelt sind, erhalten ihre ethisch-emotionale Aufladung von Weltbildern und Normen (wie z.B. Einklang mit der Natur oder Vorsorge), die auf einer höheren Abstraktionsebene angesiedelt sind und einen breiteren Geltungsbereich haben (vgl. Abbildung 1). Gestaltungsleitbilder hingegen sind konkreter, enger und spezifischer auf einen bestimmten Gegenstandsbereich ausgerichtet (z.B. das Energiesystem in Wolfhagen oder Synthetische Treibstoffe), und sie sind so weitgehend operationalisiert, dass sie als Handlungsanleitungen dienen können.

Abbildung 2: Fähigkeiten und biomimetische Gestaltungsprinzipien Resilienter Systeme (eigene Darstellung)

Die Erarbeitung des Leitkonzepts ‚Resilientes Energiesystem' und der Gestaltungsleitbilder erfolgte in vier Schritten, wobei in jedem Schritt Erkenntnisse aus unterschiedlichen methodischen Ansätzen integriert wurden. Im ersten Schritt beziehen wir das Leitkonzept ‚Resilientes System' auf sozio-technische Systeme und entwickeln es als biomimetisches Konzept. Durch 'Lernen von der Natur' soll das eigentlich Unmögliche bewältigt werden, eine Vorbereitung auf völlige Überraschungen. Eine solche Vorbereitung kann nicht erfahrungsbasiert sein. Mutationen und Rekombinationen haben im Rahmen

des Jahrmillionen langen Evolutionsprozesses völlig zufallsbasiert unzählige ‚Gestaltungsvorschläge' für Organismen, Populationen und Ökosysteme hervorgebracht, aus denen die Selektion die erfolgreichsten herausfilterte. Aus der Evolutions- und Ökosystemtheorie lassen sich damit Erfolgsprinzipien und Gestaltungselemente für Systeme extrahieren, die sich in komplexen, dynamischen und für die Organismen weitgehend unkontrollierbaren Umgebungen bewähren (vgl. Abbildung 2).

Eine zentrale Rolle für erfolgreiche Organismen, Populationen und Ökosysteme spielen Diversität, Redundanz, lose Kopplungen und Selbstorganisation. Die Beziehungen zwischen den Organismen – nicht nur aber auch der Nahrungsnetze – sind so ausgestaltet, dass Verluste verkraftet und Kaskadeneffekte vermieden werden. Eine dynamische Form von Stabilität wird in Form von Fließgleichgewichten (Homöostase) realisiert. Gedächtnis und Selbstorganisation ermöglicht Lernen (Innovation), Modularität den Aufbau komplexer Systeme und hierarchisch strukturierter Materialien. Organismen nutzen in der Regel das unmittelbar Vorhandene als Ressource (Wasser, CO_2, niederexergetische Energiequellen, Kalk usw.). Sie nutzen sie auch effizient, aber Effizienz ist nicht das dominierende Prinzip.

Im zweiten Schritt wurden aus den Erfahrungen im Risikomanagement, insbesondere Kritischer Infrastrukturen (Lieferkettenmanagement, Energiesysteme, Informations- und Kommunikationssysteme), Konsequenzen für die Gestaltung Resilienter sozio-technischer Systeme gezogen. Das Ergebnis ist in Abbildung 3 dargestellt.

Abbildung 3: Fähigkeiten und Gestaltungsprinzipien Resilienter sozio-technischer Systeme (Quelle Risikomanagement, eigene Darstellung)

Zu den wichtigsten Ergänzungen zählt ohne Zweifel die Integration der (menschlichen) Akteure sowie der Subsidiarität, der zufolge alles was auf den unteren Systemebenen geregelt werden kann auch dort geregelt werden soll. Interessanter als die Ergänzungen ist aber vor allem das, was in den Erfahrungen aus dem Risikomanagement im Vergleich zum biomimetischen Ansatz fehlt. Es sind die Fähigkeiten komplexer dynamischer Systeme wie Selbstorganisation, Selbstheilung und Homöostasis, es ist die Autopoiesis, die Fähigkeit, sich selbst zu erschaffen und dynamisch stabil zu halten. Und es fehlen die behutsamen und ‚demütigen' Aspekte des Umgangs mit komplexen Systemen, die sich in den Prinzipien des Ressourcenopportunismus und der Kreislaufwirtschaft ausdrücken. Das Risikomanagement ist offenbar noch zu sehr mit dem reduktionistischen Versuch der Beherrschung und Isolation beschäftigt. Das ist nicht verwunderlich, schließlich haben die Themen ‚Beherrschbare Technologien' und Versuche des technischen ‚Containments' jahrelang den Risikodiskurs beherrscht. Der Paradigmenwechsel von der Kontrolle zur ‚gelenkten Selbstorganisation' konnte offenbar im Risikodiskurs selbst dort noch nicht vollzogen werden, wo er immerhin schon Resilienz thematisiert. Im dritten Schritt ging es um die Fusion der beiden Leitkonzepte ‚Resiliente Systeme' und ‚Resiliente sozio-technische Systeme' sowie um ihre Spezifizierung zum Leitkonzept ‚Resili-

ente Energiesysteme‘ (Abbildung 4). Diesem Leitkonzept kommt das Leitkonzept ‚Zellulares System‘ in vielen Punkten entgegen. Eine energetische Infrastruktur in einem abgegrenzten Gebiet, welche sich zeitweise autonom versorgen und regeln lässt, in der also Systemdienstleistungen erbracht werden können, und in der Energieausgleich und Grundfunktionalitäten dem Subsidiaritätsprinzip folgen, weist etliche Gemeinsamkeiten auf mit dem Leitkonzept ‚Resilientes Energiesystem‘. Eine Kopplung an das übergelagerte Netz bleibt zwar wichtig, wird aber nicht jederzeit benötigt.

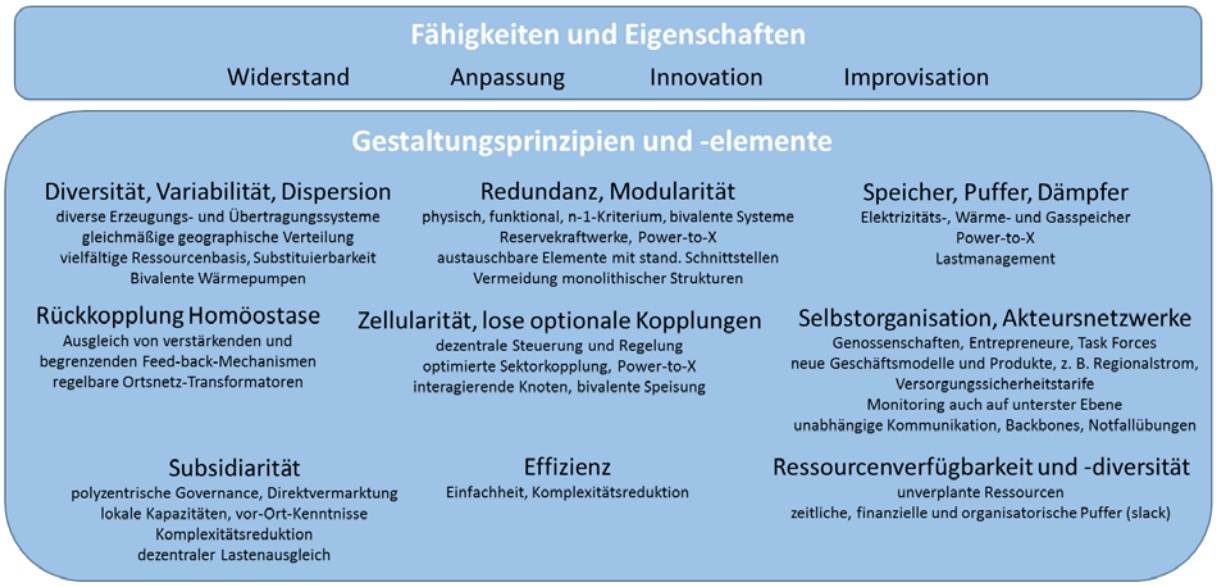


Abbildung 4: Fähigkeiten sowie Gestaltungsprinzipien und –elemente, die das Leitkonzept Resilientes Energiesystem bilden (eigene Darstellung)

Im Rahmen von Experteninterviews und Workshops zur Erarbeitung eines Gestaltungsleitbildes, basierend auf diesem Leitkonzept, wurden die aktuellen und durchaus divergierenden Zukunftsvorstellungen deutlich, die sich oft an der Diskussionslinie zentral vs. dezentral orientierten. Es wurde aber auch klar, dass diese Debatten die Notwendigkeit einer erweiterten Versorgungssicherheit nicht im Fokus haben. Das Leitkonzept ‚Zellulares System‘ könnte in diesem Zusammenhang eine Brücke bilden, einerseits zu den vorfindbaren Leitkonzepten bei den Akteuren vor Ort und andererseits zum Leitkonzept ‚Resilientes Energiesystem‘. Das Leitkonzept ‚Resilientes Energiesystem‘ ist in Abbildung 4 dargestellt. In ihm wird schon erkennbar wie seine Gestaltungsprinzipien und –elemente in konkrete technische Elemente und Maßnahmen im Rahmen von Gestaltungsleitbildern umgesetzt werden können, diese reichen von verschiedenen Speichertypen und regelbaren Ortsnetztransformatoren über die Option Power-to-X in der Sektorkopplung bis hin zur Regionalstromvermarktung und zu Notfallübungen.

Als vierter und letzter Schritt stand die Erarbeitung der Gestaltungsleitbilder für die Fallbeispiele an, also der Gestaltungsleitbilder ‚Resilientes Regionales Energiesystem im Landkreis Osterholz‘, ‚Resilientes Regionales Gestaltungleitbild für die Stadt Wolfhagen‘

und das ‚Gestaltungsleitbild Powert-to-Fuel' für die nicht ohne weiteres elektrifizierbaren Mobilitätsbereiche Flug- und Schwerlastverkehr.

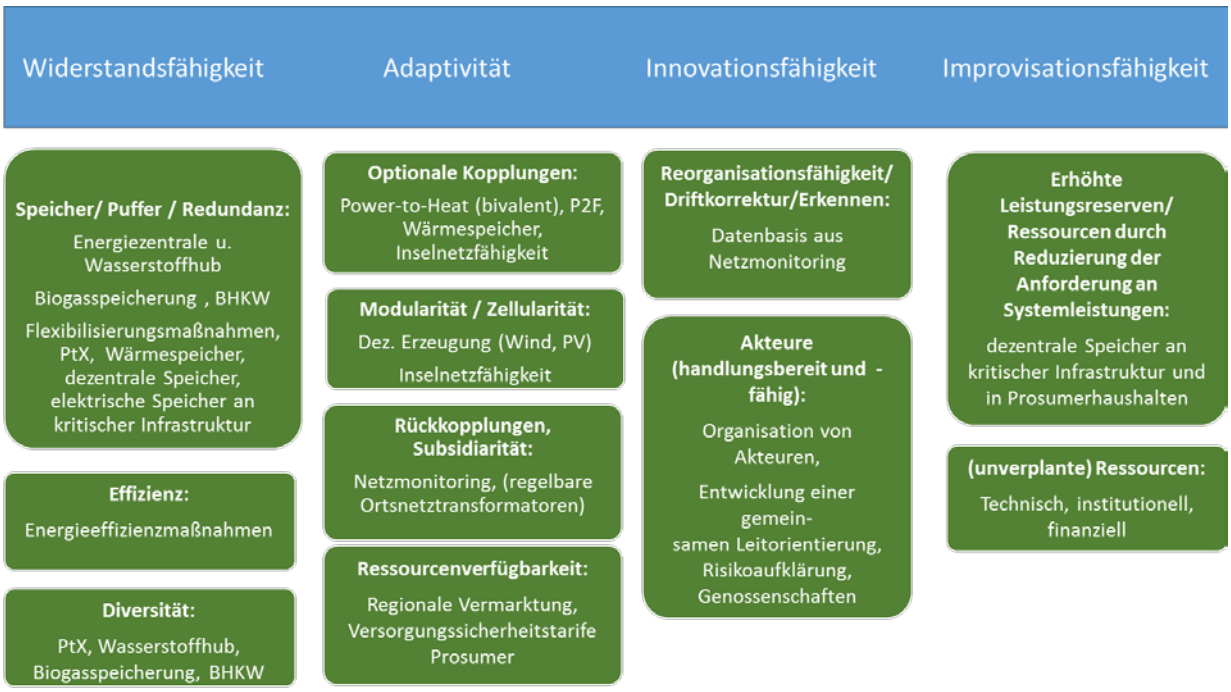


Abbildung 5: Gestaltungsleitbildelemente für ein ‚Resilientes Regionales Energiesystem Osterholz' (eigene Darstellung)

Wissensquellen für diese Gestaltungsleitbilder waren neben dem Leitkonzept Resilientes Energiesystem, die im jeweiligen Gegenstandsbereich vorfindbaren Realitäten (Systembeschreibung, Systemanalysen mit Hilfe von Systemmodellen, Akteursanalysen, Szenarien), die Ergebnisse der sowohl auf Checklisten als auch auf Modellen und Szenarien basierenden teilweise prospektiven Vulnerabilitätsanalysen sowie die Ergebnisse der aktuellen und prospektiven Wertschöpfungskettenanalysen. Die Abbildung 5 bis 6 zeigen mögliche Gestaltungsleitbildelemente, in die auch die Perspektive eines zellularen Systems integriert wurde.

Abbildung 6: Gestaltungsleitbildelemente ‚Resilientes Regionales Energiesystem Wolfhagen' (eigene Darstellung)

Die Unterschiede zwischen den beiden Regionen sind nicht gravierend, da beide Fallbeispiele aus dem gleichen Grund ausgewählt wurden. Sie sind schon seit längerem in Richtung auf eine energetische Selbstversorgung mit Fokus auf Elektrizität engagiert. Wobei die Wolfhagener nicht zuletzt aufgrund eines höheren Organisationsgrades der Akteure vor Ort, mit einer Führungsrolle der Stadtwerke und einer Energiegenossenschaft, wesentlich erfolgreicher waren, beim Versuch damit auch die Wertschöpfung in der Region zu halten. In Osterholz muss die landkreisübergreifende Energiegenossenschaft erst noch gegründet und die Zusammenarbeit mit den Stadtwerken und der EWE verbessert werden. In Wolfhagen ist bereits ein von den Stadtwerken organisierter Pilotversuch zum Demand-Side-Management angelaufen und mittelfristig erscheint der Betrieb eines Bedarfsspitzen-BHKW durchaus als möglich.

Im Fall des Konzepts Power-to-Fuel lag das Gestaltungsleitbild schon vor (vgl. Abbildung 7). Hier konzentrierte sich die Arbeit zunächst auf die Frage, wie dieses Gestaltungsleitbild seinen Beitrag zur Steigerung der Resilienz des Energiesystems leisten und sodann auf die Frage wie dieses Leitkonzept erfolgreich in die Realität überführt werden kann.

Die Integration von P2F in das Energiesystem eröffnet enorme Potenziale zur Verbesserung der Resilienz des Gesamtsystems. Wenn es technisch gelingt, die Elektrolyseure (und ggf. auch die Fischer-Tropsch-Anlagen) ohne große Wirkungsgradverluste dynamisch zu fahren, können sie sehr gut im Lastmanagement (zur Abschöpfung von Über-

schussstrom) eingesetzt werden. Mit ihnen eröffnen sich zudem hoch interessante Möglichkeiten zur intelligenten Kopplung der Sektoren Strom, Wärme und Mobilität, die sich gegenseitig stabilisieren können. Und schließlich ermöglicht das Konzept sowohl als Power-to-Gas, als auch als Power-to-Fuel interessante großvolumige und langfristige Speichermöglichkeiten auf der Basis schon existierender Infrastrukturen (Gasspeicher, Tanklager). Welches Ausmaß die Rückverstromung, die zu Beginn der Debatte über Power-to-X noch eine große Rolle spielte, nehmen wird ist, wegen der damit verbundenen Wirkungsgradverluste, derzeit nicht abzusehen und abhängig vom Systemdesign.

Erfolgsfaktoren für die Transformation

Unsere Frage nach entscheidenden Erfolgsfaktoren für eine gelingende zielgerichtete Transformation der Energiesysteme konzentrierte sich auf die in der Innovations- und Transformationsforschung lange vernachlässigte Rolle von zivilgesellschaftlichen Akteuren.

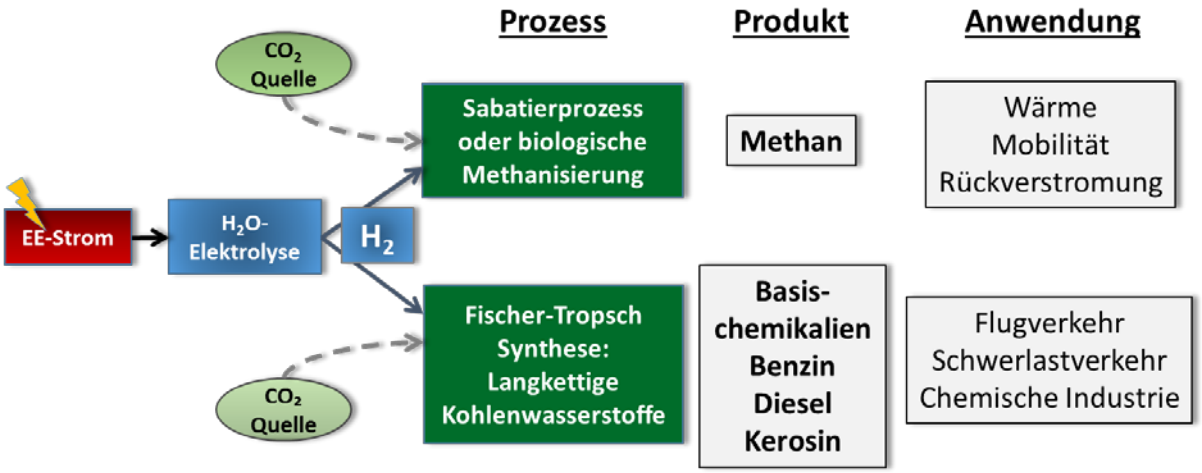


Abbildung 7: Gestaltungsleitbildelemente Power-to-Fuel (eigene Darstellung)

Dabei standen sowohl ihre Verhinderungs- und Blockademöglichkeiten durch Skandalisierung, als auch ihre Zugkraft durch Leitorientierungen und Engagement im Zentrum. Im Projekt konnte im Rahmen der Fallbeispiele aufgezeigt werden, welche Konstellationen besonders erfolgversprechend für eine gelingende Transformation sind. Es konnte auch herausgearbeitet werden, dass deren Rolle sich im Laufe des Transformationsprozesses wandelt.

Bei der Analyse der beiden ausgewählten Selbstversorgungsregionen (Landkreis Osterholz, Stadt Wolfhagen) wurde deutlich, dass der regionale Ausbau erneuerbarer Energien nicht automatisch mit der von den Akteuren vor Ort erwarteten Erhöhung der regionalen Wertschöpfung einherging. Aufgrund der Selbstorganisationsfähigkeit und der Aktivitäten überzeugter Promotoren ist es zumindest in Wolfhagen gelungen, die mit

dem Ausbau der Erneuerbaren Energien verbundene Wertschöpfung weitgehend in der Region zu halten.

Auch das Gestaltungsleitbild ‚Resilientes Regionales Energiesystem' und die Annäherung an dieses Gestaltungsleitbild durch das aktuell in der Diskussion befindliche Leitkonzept ‚Zellulares System' wurde in Wolfhagen deutlich stärker unterstützt als in Osterholz. Entscheidend war dabei jeweils, inwiefern sich die regionalen Akteure auf das Thema vertiefte Versorgungssicherheit und Resilienz überhaupt einlassen konnten. Akteure der Energiewende empfanden das Thema Versorgungssicherheit immer noch als Angriff auf den Ausbau der vermeintlich so unsicheren Erneuerbaren und die Energieversorger als Angriff auf die von ihnen bisher tatsächlich garantierte aktuelle Versorgungssicherheit. Zukünftige Unsicherheiten und mögliche Überraschungen, z. B. als Folge des Klimawandels, von Terror und Cyberkriminalität oder im Rahmen der aktuell nicht überschaubaren, kommenden systemischen Phasen der Energiewende, wurden allzu oft noch ausgeblendet. Die Vorstellung eines resilienten regionalen Energiesystems fand bei den Akteuren in Wolfhagen Resonanz, als die Verbindung zu bestehenden Ansätzen wie „Wertschöpfung in der Region" aufgezeigt und mit dem Brückenkonzept ‚Zellulares System' gearbeitet wurde.

Methodisch standen im Rahmen der Fallbeispiele zudem eine Wertschöpfungskettenanalyse, eine auf Interviews basierende Akteursanalyse, eine strukturelle Vulnerabilitätsanalyse sowie – hauptsächlich im Rahmen von Workshops – auch Partizipationsprozesse im Zentrum der Arbeiten. Im Kontext der angewendeten innovationstheoretischen Ansätze konnte die These von der kaum zu überschätzenden Bedeutung der Zivilgesellschaft in Verbindung mit der (medialen) Öffentlichkeit für systemische Innovationen bzw. für weit reichende Transformationsprozesse gestützt werden. Dies gilt nicht nur für die Kraft, die von geteilten Leitorientierungen ausgeht (100% Erneuerbare, regionale Selbstversorgung), sondern in nicht minderem Maße für die skandalisierende Kraft negativer Orientierungen (Tank vs. Teller, Verspargelung der Landschaft, Monstertrassen etc.). Kurze Darstellungen der Ergebnisse, strukturiert mit Hilfe des Schildkrötenmodells, sind in den Abbildungen 8 und 9 zu sehen. Das Schildkrötenmodell zeigt die wichtigsten Einflussfaktoren für die Entwicklung eines resilienteren Energiesystems als Push- (Hinterbeine und Schwanz) und Pull-Faktoren (Vorderbeine und Kopf).

Erwartungsgemäß zeigte sich in den regionalen Fallbeispielen, dass die Steuerungsmöglichkeiten mit Blick auf elektrische Energie auf regionaler Ebene sehr begrenzt sind (Netzsteuerung / Energieausgleich) und somit die Art der Kopplung zum vorgelagerten Netz von zentraler Bedeutung ist. Zudem war klar, dass die bundesdeutschen Regulierungen auch für die untersuchten „Selbstversorgungsregionen" essentiell waren und sind. Auch

in Zukunft werden die vorhandenen sowie zusätzliche Anreizsysteme nötig sein. Vor dem Hintergrund der Pariser Beschlüsse zur Begrenzung des Klimawandels dürfte einer drastischen Erhöhung der Preise bzw. Abgaben für CO2-Emissionen aus fossilen Quellen ein hoher Stellenwert zukommen. Besonders deutlich ist dies bei der Umsetzung von Power-to-Fuel (vgl. Abbildung 10). Aber auch die Handlungsfähigkeit in den Regionen sollte, sowohl für die Erschließung der regional-wirtschaftlichen Potenziale als auch für die Umsetzung von Resilienzstrategien, nicht unterschätzt werden. Eine räumliche Kongruenz von politischen und energietechnischen Verwaltungsbereichen ist dafür durchaus förderlich, auch wenn betont werden muss, dass eine räumliche Fixierung von Zellengrößen nicht zielführend ist. Die Zellen müssen im ‚Zellularen System' vornehmlich funktionell und nicht räumlich definiert werden. Im Rahmen der Fallstudien mussten wir uns aus pragmatischen Gründen (nicht zuletzt der Datenverfügbarkeit) auf die verwaltungstechnischen Grenzen beziehen. Innovative Schritte in Richtung auf ein resilienteres Energiesystem auf regionaler Ebene wären zum Beispiel spezielle Tarife für Regionalstrom oder für eine erhöhte Versorgungssicherheit sowie die Versorgung von Kritischen Infrastrukturen mit Regionalstrom mit denen die Integration der Erzeugung in der Region angekurbelt werden könnte (vgl. die Abbildung 8 und 9).

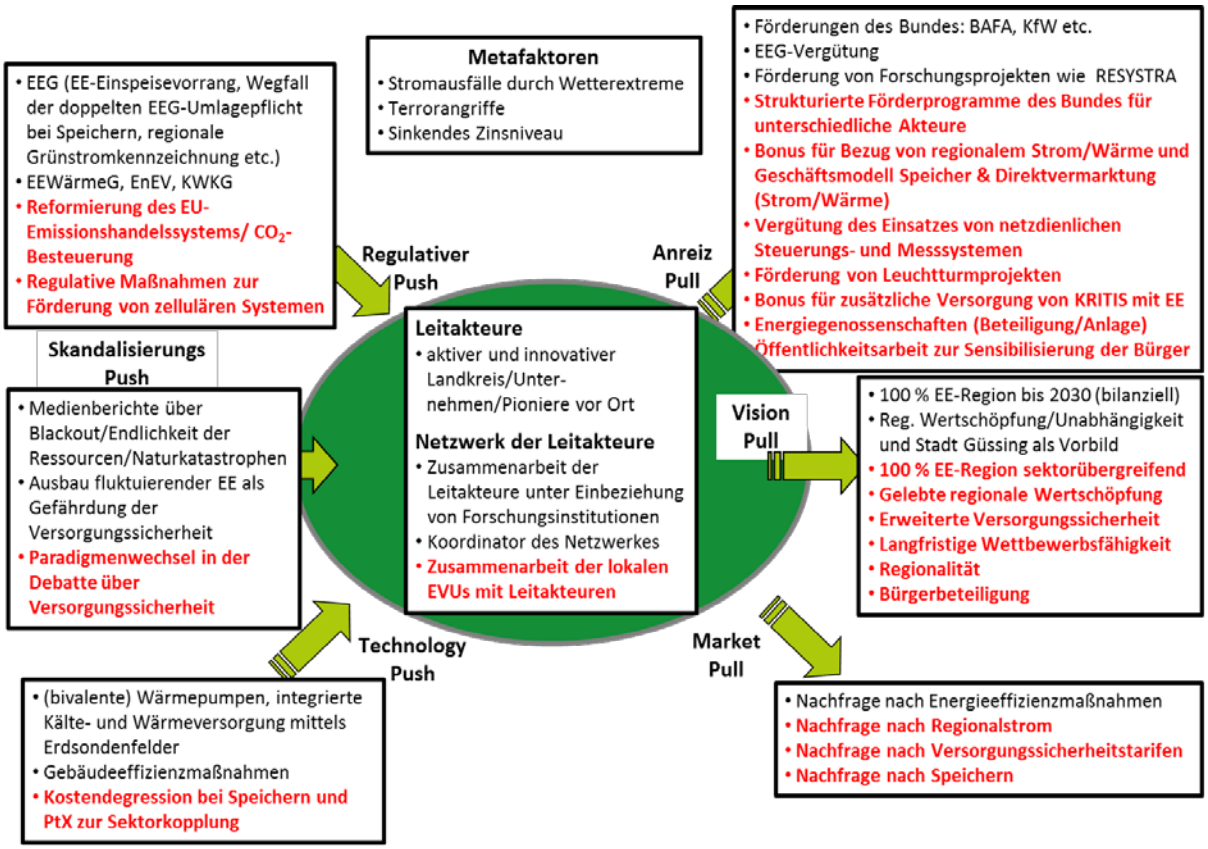


Abbildung 8: Schildkrötenmodell mit Impulsen in Richtung eines resilienteren Energiesystems des Landkreises Osterholz; Richtungsimpulse schwarz: bereits vorhanden, rot: zukünftig notwendig (eigene Darstellung)

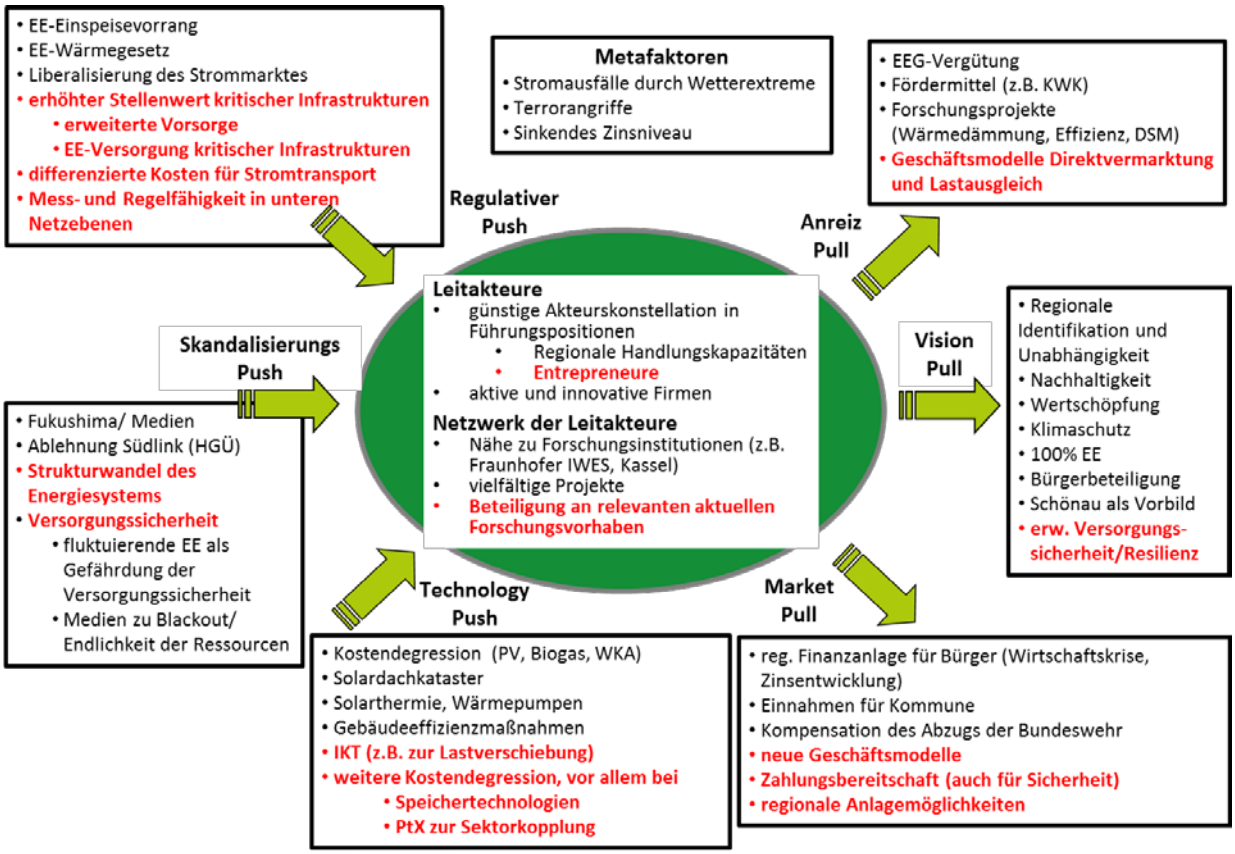


Abbildung 9: Schildkrötenmodell mit Impulsen in Richtung eines resilienteren Energiesystems der Stadt Wolfhagen; Richtungsimpulse schwarz: bereits vorhanden, rot: zukünftig notwendig (eigene Darstellung)

Anzumerken ist allerdings, dass das Leitkonzept Resiliente Energiesysteme für zivilgesellschaftliche Akteure nicht so ohne weiteres handlungsorientiert anschlussfähig war. Der Schritt von der ‚Regionalen Selbstversorgung mit Energie' zum ‚Resilienten Energiesystem' konnte allerdings durch das Konzept des ‚Zellularen Systems' geebnet werden. Der Erfolg der Transformation der Energiesysteme wird ganz maßgeblich davon abhängen, welche Leitorientierungen letztlich die Oberhand gewinnen. Das Leitkonzept Resiliente Systeme entfaltete zwar in den vergangenen Jahren eine erstaunliche Karriere. Dennoch bleibt es sperrig, und das brisanteste an ihm, der Konflikt zwischen Resilienz und Ressourceneffizienz, wird noch nicht einmal ansatzweise thematisiert.

Um einen Umbau der sozio-technischen Energiesysteme in Richtung auf ‚Resiliente Energiesysteme' verwirklichen zu können, sind weit reichende Änderungen auch im Bereich der Rahmenbedingungen, der Anreizsysteme und der Regulierung notwendig, was sich insbesondere bei der Fallstudie P2F zeigt.

Zum derzeitigen Zeitpunkt ist eine Herstellung von strombasierten synthetischen Kraftstoffen aufgrund von fehlenden bzw. hinderlichen staatlichen Regulierungen nicht wirtschaftlich und ihr möglicher Beitrag zur Resilienzsteigerung (Lastmanagement, intelligente Sektorkopplung, schon existierende Langzeitspeicher und Infrastruktur) wird nicht

weiter verfolgt. Insbesondere vor dem Hintergrund der Pariser Beschlüsse zum Klimaschutz findet jedoch die Position, dass strombasierte synthetische Kraftstoffe für eine CO_2-neutrale Mobilität, insbesondere in den nicht so ohne weiteres elektrifizierbaren Bereichen Flugverkehr und Schwerlastverkehr, benötigt werden, wachsende Zustimmung. Mit Hilfe von Simulationen auf der Basis eines für diesen Zweck erarbeiteten agentenbasierten Modells konnten die Maßnahmen, Konstellationen und Rahmenbedingungen identifiziert werden, unter denen die Herausführung der Power-to-Fuel-Technologie aus der Nische und ihre erfolgreiche Integration in den Markt gelingen kann.

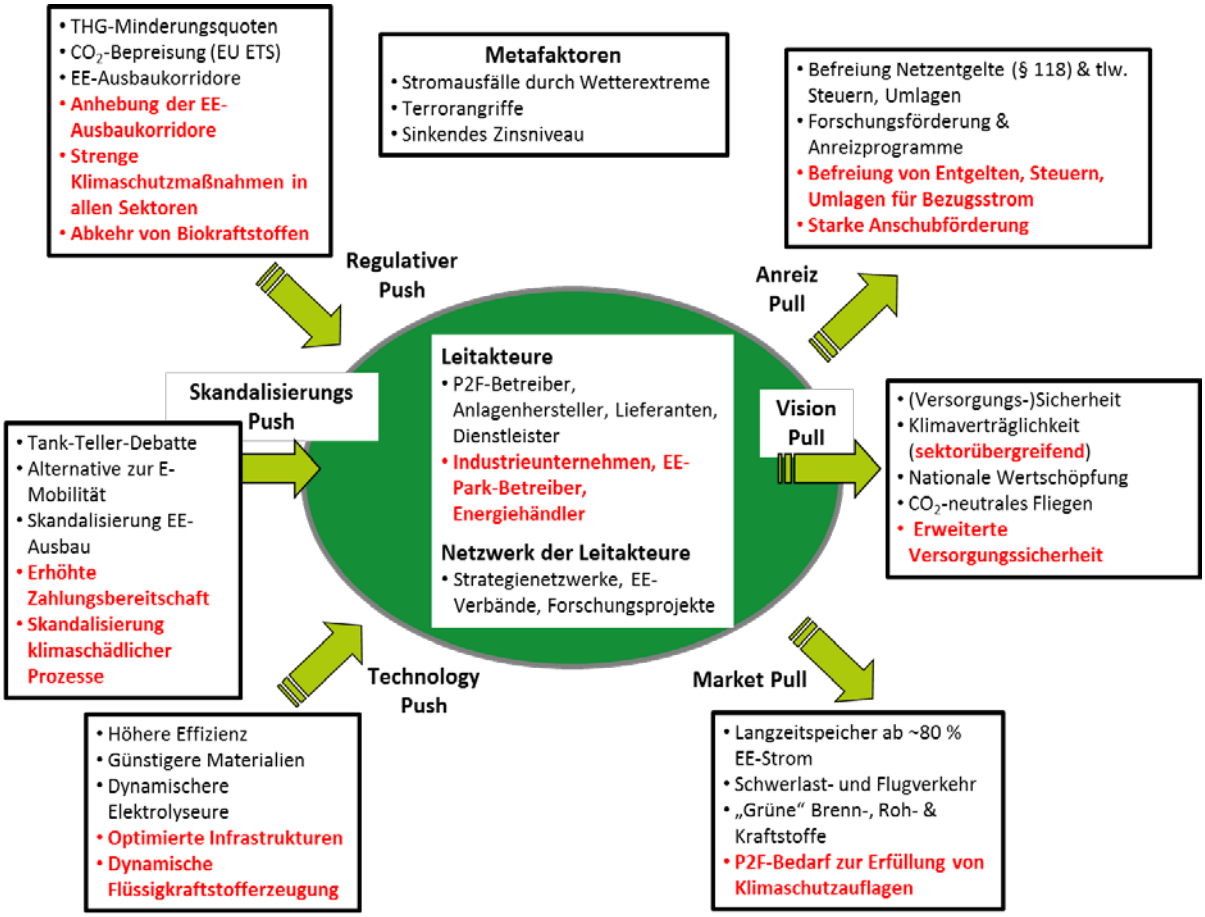


Abbildung 10: Richtungsgebende Einflussfaktoren zur Etablierung von Power-to-Fuel-Anlagen. Richtungsimpulse schwarz: bereits vorhanden, rot: zukünftig notwendig (eigene Darstellung)

Ausgangspunkt für das agentenbasierte Modell waren zwei Modelle von Innovations- und Transformationsprozessen, die im Projekt eine zentrale Rolle gespielt haben, die Multi-Level-Perspektive für die Entwicklung aus der Nische und das Schildkrötenmodell zur Strukturierung richtungsgebender Einflussfaktoren. Das Schildkrötenmodell zeigt die maßgeblichen Einflussfaktoren (vgl. Abbildung 10) von denen eine erfolgreiche Integration dieser Systeminnovation, also Marktetablierung, abhängt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen

Der Forschungsansatz die Energiewende als Transformation bzw. als an Leitorientierungen ausgerichteten systemischen Innovationsprozess von sozio-technischen Systemen zu analysieren, hat sich als sehr fruchtbar erwiesen. Das Schildkrötenmodell ermöglichte es, sowohl die aktuellen als auch die zukünftig notwendigen, Push- und Pullfaktoren in den jeweiligen Innovationssystemen zu identifizieren und im Sinne der Energiewende und des Leitkonzepts ‚Resilientes Energiesystem' Verständigungsprozesse zwischen den Akteuren auf den verschiedenen Handlungsebenen zu initiieren und Handlungsorientierungen zu entwickeln. Dies gilt auch für das Multi-Level-Modell, das im Fallbeispiel Power-to-Fuel den Rahmen für die Modellierung eines Auswegs aus der Nische vorgab.

Die Leitorientierungen des Vorhabens nehmen die Erreichung der Klimaschutzziele in allen Energiesektoren ernst und lenkten den Blick auf die zukünftigen Systemstrukturen. Aufbauend auf biomimetischen sowie aus dem Kontext kritischer Infrastrukturen entwickelten Gestaltungsprinzipien wurde das ‚Leitkonzept Resilientes Energiesystem' erarbeitet. Für drei Fallstudien wurde dieses Leitkonzept in enger Kooperation mit den Akteuren zu Gestaltungleitbildern spezifiziert und operationalisiert. Damit konnte gezeigt werden, dass das Leitkonzept ‚Resilientes Energiesystem' nicht zuletzt über den Vermittlungsschritt ‚Zellulares System' anschlussfähig ist, Resonanz erzeugen und durch die Kooperation mit den Akteuren vor Ort Praxisrelevanz erlangen kann.

Handlungsempfehlungen und Forschungsbedarf

Aus den Arbeiten im Rahmen von RESYSTRA lassen sich die folgenden Handlungsempfehlungen mit entsprechendem Forschungsbedarf ableiten:

Zur zukünftigen Struktur eines Resilienten Energiesystems

- Rasche Integration der Konsequenzen der Pariser Beschlüsse zum Klimaschutz in die Strategie der Energiewende. Die derzeit festgelegten Ausbaukorridore für Erneuerbare Energien müssen deutlich angehoben werden. Gefordert ist eine Verfünf- bis Verzwanzigfachung der aktuell installierten EE-Leistung (je nach erzielbaren Einsparpotenzialen).

- Transparente Informationen und eine Einbindung der Menschen vor Ort (z. B. über Bürgerdialoge), die ökonomische Beteiligung regionaler Akteure (z. B. mittels Energiegenossenschaften) und ein Nutzen-Lastenausgleich sind zentrale Faktoren dafür, dass der erforderliche EE-Ausbau gelingt und vor Ort auch eine Akzeptanz für die Aktivitäten besteht

- Konzentration auf die systemischen Fragen der Energiewende, auf alle drei Sektoren (Strom, Wärme, Mobilität) und insbesondere auf Formen der Sektorkopplung.
- Erarbeitung eines integrierten Gestaltungsleitbilds ‚Resilientes Energiesystem der Bundesrepublik Deutschland', von dem ausgehend jeweils skalenbezogen und gegenstandsbezogen Schritte der Spezifizierung und Operationalisierung unternommen werden können.
- Schritte in Richtung auf einen zellularen Aufbau und subsidiäre Steuerung insbesondere der leitungsgebundenen Systeme (z. B. Komplexitätsreduktion, Teilautonomie, Kontextangemessenheit). Die primär funktionelle (nicht primär geographische) Abgrenzung von Zellen bedarf der weiteren Präzisierung.
- Ausgewogenes Verhältnis von Dezentralisierung (Subsidiaritätsprinzip) und systemübergreifender Verantwortung auf nationaler und internationaler Ebene (Versorgung der Städte und infrastrukturellen und industriellen Großverbraucher, internationale Systemkonfigurationen z. B. Desertec).
- Ausbau von (Langzeit)Speichern und von Dämpfern (als Alternative zu den bisher dämpfenden rotierenden Massen) im Elektrizitätsnetz Kein vorschneller Abschied von Verbrennungsmotor (zumindest bei Schwerlast- und Schiffsverkehr) und Flugzeugturbine.
- Power-to-Fuel erhöht in dreifacher Funktion die Resilienz des Energiesystems: 1. Treibstoff für nicht elektrifizierbare Mobilitätsbereiche als Beitrag zur Diversität und funktionellen Redundanz 2. Option für intelligente Formen der Sektorkopplung und des Lastmanagements 3. Langzeitspeicher für das gesamte Energiesystem (nicht nur Elektrizität).
- Power-to-Fuel hat nur eine Chance für die volle Integration in den Markt (Auszug aus der Nische, Wettbewerbsfähigkeit mit fossilen Treibstoffen) durch ambitionierte Klimaschutzmaßnahmen (strenge Treibhausgasminderungs-Quoten, CO_2-Zertifikate/CO_2-Steuern). Hilfreich wäre auch eine intensive staatliche Unterstützung in der jetzigen frühen Innovationsphase.
- Behutsame Digitalisierung (smart systems) und Verknüpfung mit Kommunikationsnetzen (Diversifizierung in Hard- und Software, unabhängige Datenkanäle und Stromversorgung).
- Konzentration auf funktionale und strukturelle Diversität und Redundanz in den Netzen. Angesichts der enormen Komplexität ist in etlichen Bereichen mehr als das n-1 Prinzip gefordert.
- Kreislaufwirtschaft und Diversifizierung der Rohstoffquellen (seltene Metalle, Gasversorgung durch Biogas und Power-to-Gas).

- Investition in Vorsorgemaßnahmen und Maßnahmen zur Regeneration nach Zusammenbrüchen (unverplante Ressourcen, Notvorräte, Task-Forces, Notfallübungen, Schwarzstartfähigkeit).
- Vorbereitung auf unterschiedliche Qualitätsniveaus der Systemleistungen, z.B. Bevorzugung kritischer Infrastrukturen bei gefährdeter Stromversorgung oder unterschiedliche Strompreise für Privatabnehmer je nach Versorgungssicherheit und akzeptierter Variationsbreite von Spannung und Frequenz (Sicherheitstarif).
- Regionalisierung bzw. Raumbindung des Strommarkts, Regionalstrom als Produkt, Regionalisierung der Netzentgelte, Entwicklung eines Ansatzes für einen regionalen peer-to-peer Markt z.B. auf der Basis von block-chains (Regionaltarif).
- Nach Möglichkeit Vermeidung neuer großer Pfadabhängigkeiten

Zum Transformationsprozess

- Intensive Weiterführung der öffentlichen Debatte über Versorgungsunsicherheiten und mögliche Überraschungen in der Zukunft, nicht zuletzt auch im Prozess der Transformation des Energiesystems selbst. Vorbereitung darauf, dass diese ‚erweiterte Versorgungssicherheit' und Resilienz keinesfalls zum Nulltarif zu haben sein wird.
- Verankerung von Resilienz als viertem Nachhaltigkeitsprinzip neben Effizienz, Suffizienz und Konsistenz.
- Ausarbeitung eines skalenübergreifenden Leitkonzepts ‚Resilientes Energiesystem' unter Einschluss der nationalen und internationalen Ebene. Zusätzlich: Ausarbeitung von spezifizierten und operationalisierten Gestaltungsleitbildern.
- Bezug zu existierenden (gelebten) Leitorientierungen herstellen und in Gestaltungsleitbilder einbeziehen oder zumindest berücksichtigen.
- Weitere Unterfütterung des Leitkonzepts und der Erarbeitung von Gestaltungsleitbildern durch Szenarien und Modelle des Innovationssystems (Schildkröte), des sozio-technischen Energiesystems (physikalische und dynamische) sowie des Transformationsprozesses (agentenbasierte). Erarbeitung einer Handreichung zur partizipativen Entwicklung von Gestaltungsleitbildern im Wechselspiel zwischen Leitkonzept und Vulnerabilitätsanalyse des jeweiligen Gegenstandsbereichs (Skalenebenen bzw. Zellen des Energiesystems, Technologiebereiche).
- Aufzeigen und Umsetzen von Resilienz steigernden Leuchtturmprojekten, welche als Praxisbeispiele und Vorbilder für (regionale) Akteure dienen können.

- Nutzung von unterschiedlichen, zielgruppenspezifischen und adressatengerechten Kommunikationsmitteln unter Berücksichtigung möglichst aller potenziellen Adressaten zur Verbreitung der Gestaltungsleitbilder.
- Verstetigung von Gestaltungsleitbildern einleiten z.B. in Form von Institutionalisierungen (Institutsgründungen, schriftliche und öffentlich beschlossene Leitlinien, Gesetzgebungen etc.) und Benennung von Verantwortlichkeiten.
- Frühzeitige Identifizierung und Einbindung von potenziellen Leitakteuren und Diffusionsintermediären[1], die bei der Verbreitung und Umsetzung der Gestaltungsleitbilder unterstützen.
- Unterstützung von Genossenschaften, Bürgerbeteiligung (auch zur Spezifizierung der Gestaltungsleitbilder) und Eigenverbrauch.

[1] Solche Akteure, die nicht selbst Adressat, sondern Vermittler des Gestaltungsleitbildes sind.

1 Einleitung: Resiliente Energiesysteme als Vorsorge gegenüber Unsicherheiten und Überraschungen im Fortgang der Energiewende

1.1 Voraussetzungen und Zugang des Projekts

Die Energiewende ist in eine neue Phase getreten[2]. Es geht nicht mehr hauptsächlich darum, ob und wie ein Energiesystem gestaltet werden kann, das zu 100% auf Erneuerbaren Energiequellen basiert, und die fast ausschließliche Konzentration auf den Elektrizitätssektoren ist nun auch nicht mehr vorherrschend. Stattdessen sind die Umstellung des Mobilitätssektors – und hier nicht nur des motorisierten Individualverkehrs, sondern auch des Flug-, Schwerlast- und Schiffsverkehrs – sowie die Wärmeversorgung auf Basis zu 100% Erneuerbarer Energiequellen und nicht zuletzt die Abkehr von fossil produzierten Basischemikalien in den Fokus gerückt[3]. In der aktuellen Phase der Energiewende stehen ‚systemische' Fragen im Zentrum. Wie sind Produktion und Verbrauch aufeinander abzustimmen? Wie kann das gesamte Energiesystem als ‚komplexes System' so gestaltet und gemanagt werden, dass es seine Dienstleistungen nachhaltig, sicher und ökonomisch effizient erbringen kann? Damit gewinnen Themen wie die Kopplung der Energiesektoren Elektrizität, Mobilität und Wärme sowie die Gewährleistung von Versorgungssicherheit angesichts neuer Unsicherheiten an Bedeutung. Zu diesen neuen und zusätzlichen Unsicherheiten zählen insbesondere[4].

a) Eine sehr hohe Dynamik der Transformation des Energiesystems, die weiterhin zu großen Turbulenzen führen dürfte. Insbesondere Preisentwicklungen zählen aus heutiger Sicht zu den kaum abschätzbaren Variablen.

b) Eine hohe und weiter zunehmende Komplexität des Energiesystems. Sie bringt Gefahr von zunehmend nicht-linearen Entwicklungen (Überraschungen) mit sich. In dieser Hinsicht dürfte die zunehmende Dezentralität sowie die Verknüpfung von Produzenten und Konsumenten (Prosumer) das Management des Gesamtsystems erschweren.

c) Eine zunehmende Vernetzung (Sektorkopplung) und Digitalisierung des Energiesystems, die, je nach Form ihrer konkreten Ausgestaltung (Form der Kopplung), eine zunehmende Robustheit oder auch eine zunehmende Verletzlichkeit des Gesamtsystems nach sich ziehen wird (Gefahr von Kaskadeneffekten). Die zunehmende Smartheit des Systems dürfte neue Unsicherheiten und Sicherheitslücken mit sich bringen.

[2] Zum Phasenkonzept vgl. Henning et al. (2015)

[3] Dies ist zumindest als Grundorientierung in den Energiewendeszenarien festzustellen. Gleichwohl unterstellen einige der publizierten Szenarien noch unterschiedliche „Zielzustände" u.a. auch Nutzung fossiler Energieträger gerade im Industriebereich bei gleichzeitigem Einsatz von CCS.

[4] Aufzählung in Anlehnung an (Renn 2017).

d) Eine weiter zunehmende Zahl unterschiedlicher Akteure im Energiesystem, die ihre jeweiligen Einflussmöglichkeiten auf die Entwicklung des Systems nutzen, wodurch die Abschätzung einer erwartbaren ‚Resultante' all dieser Einflüsse immer schwieriger wird.

e) Neue Bedrohungsszenarien, z.B. durch den Klimawandel, durch Terrorismus oder durch Hackerangriffe.

Jede dieser Unsicherheiten birgt das Potenzial für echte Überraschungen, also für Entwicklungen, denen nicht mehr angemessen mit einem konventionellen Risikomanagement begegnet werden kann. Bei echten Überraschungen (unknown unknowns), die auch oft als ‚schwarze Schwäne' bezeichnet werden Taleb (2008), liegen vorab weder konkrete Vorstellungen über etwaige Schadensbilder und die Schadenshöhe vor, noch können Eintrittswahrscheinlichkeiten bestimmt werden. Für eine angemessene Vorbereitung auf derartige unbekannte Ereignisse bleibt nur der Blick weg von den möglichen Störereignissen und hin zu dem betroffenen System. Es gilt dieses System so zu gestalten, dass es mit Überraschungen angemessen umgehen kann. Konventionelle Risikoanalyse und Risikomanagement werden ergänzt durch eine ereignisunabhängige Systemanalyse (strukturelle Vulnerabilitätsanalyse) [5] (vgl. Kapitel 5.6) und ein resilientes Systemdesign über das Gestaltungsleitbild Resilientes Energiesystem (vgl. Kapitel 3.5).

Hier setzt das Projekt RESYSTRA an, indem es im Wesentlichen drei Problemkomplexe bzw. Fragen verfolgt:

1. Wie genau muss ein ‚Resilientes Energiesystem' gestaltet werden, das in der Lage ist, seine Leistungen auch angesichts von extremen Unsicherheiten und völligen Überraschungen nachhaltig, sicher und ökonomisch effizient zu erbringen? In das Design sollen dabei sowohl verschiedene Skalenebenen (insb. national und regional) integriert werden, als auch alle Energiesektoren einschließlich ihrer Form der Kopplung.
2. Wie kann die Umstellung auf 100% Erneuerbare im Mobilitätssektor auch in den Bereichen Flug-, Schwerlast- und Schiffsverkehr gelingen, in denen eine Elektrifizierung nach heutigem Wissen nicht absehbar ist? Wir verfolgen hier die Option ‚synthetische Treibstoffe' (Power-to-Fuel).
3. Wie kann eine gerichtete Transformation des komplexer werdenden Energiesystems überhaupt gelingen? Welche wesentlichen Einflussfaktoren gilt es zu berücksichtigen? Und welche Rolle kann in dieser anstehenden gerichteten Transformation insbesondere Leitorientierungen zugemessen werden?

[5] Ein beide Ansätze verbindendes Vorgehen besteht in sogenannten ‚Stresstests'. Dabei wird mit Hilfe von simulierten Stressszenarien versucht herauszufinden, an welchen Stellen Schwachstellen im System existieren. Diese sollen dann beseitigt werden, verbunden mit der Hoffnung, auf diese Weise das System auch gegenüber noch unbekannten Stressoren resilienter zu gestalten (vgl. Renn (2017)). Für die Erarbeitung derartiger Stressszenarien bieten sich kreative multistakeholder Prozesse an.

1.2 Systemdynamik und Phasenübergänge

Die Energiewende in Deutschland impliziert einen radikalen Umbau des sozio-technischen Energiesystems. Es wird ein Transformationsprozess vollzogen, wie er bislang politikgetrieben im Energiebereich noch nicht zu beobachten war (Fouquet und Pearson 2012).

Das Energiesystem soll seine Dienstleistungen erbringen und dabei zumindest vier Kriterienkomplexen genügen: Vorsorge und Versorgungsicherheit, Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit, Umweltverträglichkeit und Klimaschutz sowie Akzeptanz und Akzeptabilität vgl. BMWi o.J.). Diese Zieldimensionen stehen teilweise in einem Spannungsverhältnis zueinander, und sie sind durchaus unterschiedlich interpretierbar.

Die Energiewende ist wohl nicht mehr umkehrbar und mit Blick auf die Klimaziele bis 2050 auch weitgehend Konsens (in Bandbreiten der Emissionsminderung von 80% bis 95% und unter Ausschluss der Kernenergie). Differenzen gibt es mit Blick auf die Geschwindigkeit des Umbaus. Vor allem das Pariser Klimaschutzabkommen mit dem Ziel, die globale Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C, wenn möglich sogar unter 1,5 °C, zu beschränken, verschärft die Anforderungen und das nötige Tempo des Umbaus enorm[6]. Es gibt bisher noch kaum ausgearbeitete Szenarien, wie diese Anforderungen in Deutschland tatsächlich erfüllt werden können (interessante Ansätze sind in Quaschning 2016d (Sektorkopplungsstudie), Höhne et al. 2016 (Greenpeace Studie) und Nitsch 2016b zu finden).

Anhand der Abbildung 1.1 kann die Herausforderung des Klimaschutzes typisierend verdeutlicht werden, auch unabhängig von der Festlegung auf ein spezifisches Energiewendeszenario. In dieser Abbildung wird auf globaler Ebene die zur Erreichung dieses Ziels notwendige Reduktion des Ausstoßes von Treibhausgasen als gestrichelte Linie am unteren Rand des Zukunftstrichters dargestellt. Zu erkennen ist, dass eine rasche und deutliche Reduktion schon bis 2020 erforderlich ist, und dass ab 2070 negative Beiträge – also Entnahmen aus der Atmosphäre geleistet werden müssen.

Das Pariser Klimaschutzabkommen verlangt nicht nur eine höhere Geschwindigkeit der Reduktionsmaßnahmen, sondern insbesondere auch im Bereich der Mobilität, in dem sich zwischen 1990 und 2014 wenig bewegt hat, radikalere einschneidende Maßnahmen. Diese sind bisher in die politische Agenda noch nicht ausreichend integriert. Der Deutsche Klimaschutzplan fordert hier bis 2030 nur – bzw. immerhin – eine Reduktion der CO_2eq Emissionen zwischen 40 und 42 % (BMUB - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2016). Auch in den Bereichen Energieeffizienz und Wärmedämmung gehen die Aktivitäten nur schleppend voran. Die in Paris vereinbarten Maßnahmen (intended national determined contributions INDC) und die Maßnahmen des aktuell vorgelegten Klimaschutzplans

[6] Umstritten ist allerdings, ob die bisher vereinbarten Mechanismen des Abkommens für die Erreichung der Ziele hinreichend sind.

für Deutschland reichen dafür nicht aus (BMUB - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2016).

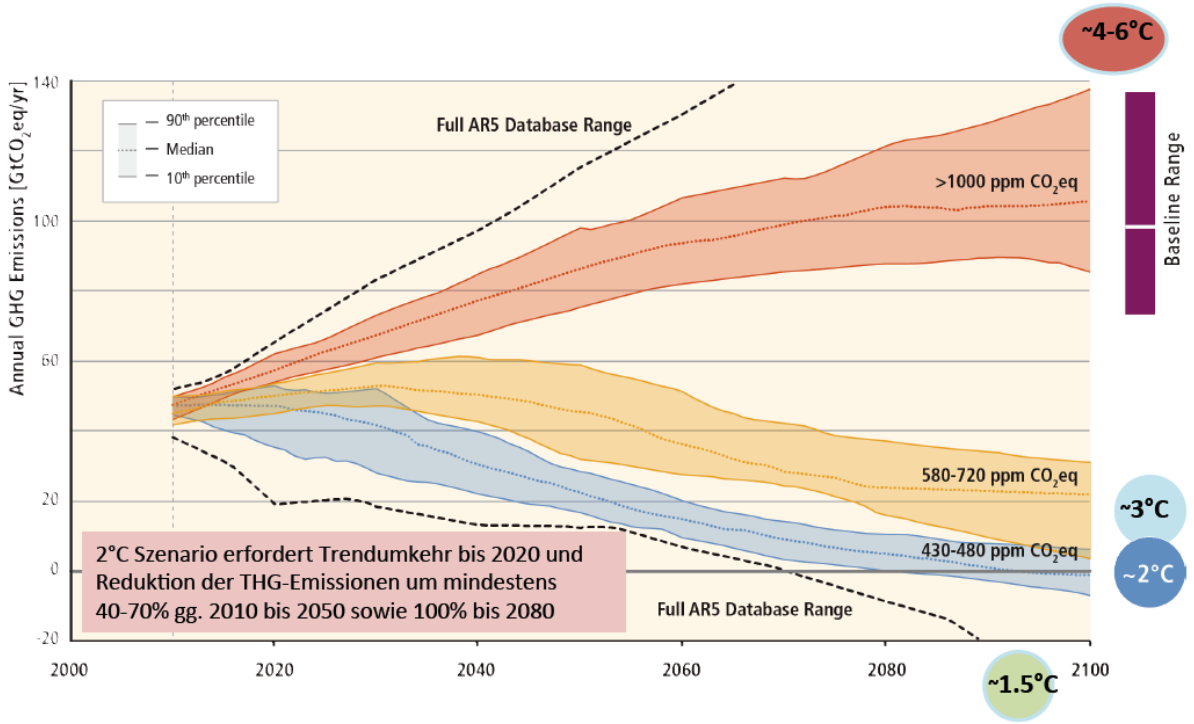


Abbildung 1.1: Anforderungen der 2°C und 1,5°C-Szenarien (Fischedick 2017)

Es ist davon auszugehen, dass sich ohne weitergehende politische Maßnahmen und insbesondere ohne deutlich höhere CO_2-Preise im Emissionshandel oder eine entsprechende CO_2-Steuer die Anforderungen des Klimaschutzabkommens aus heutiger Sicht kaum erreichen lassen werden.

Unterschiedliche Auffassungen bestehen auch hinsichtlich der zukünftigen Rolle einzelner Energieträger, hinsichtlich des notwendigen Netzausbaus und auch des regulatorischen Rahmens. Dies betrifft u.a. das Spannungsverhältnis zwischen dem EEG und der Regulierung auf EU-Ebene, Akzeptanzprobleme beim Netzausbau und nicht zuletzt die Frage der Bezahlbarkeit von Energie, skandalisiert mit dem Schlagwort Energiearmut. Die Diskussion über die zukünftige Struktur des Energiesystems als Ganzem nimmt derzeit Fahrt auf. Die Dynamiken der Teilelemente der Energiewende sind allerdings hochgradig unterschiedlich. So erweist sich die Förderung der Erneuerbaren Energien im Strombereich als dynamisch und weitgehend erfolgreich, während der Netzausbau deutlich hinter den Planungen zurückliegt. Zudem sind die Notwendigkeiten und die Ausgestaltung des Netzausbaus durchaus umstritten. Wichtige Teilelemente der Energiewende sind auch konzeptionell bisher noch kaum entwickelt (bspw. das Thema Sektorkopplung), und genauso offen ist die Frage, wie in Zukunft der Flug-, Schwerlast- und Schiffsverkehr betrieben werden soll, auf den in Deutschland immerhin ca. 40% des Energieverbrauchs im Verkehrssektor entfällt (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer ISI 2015).

Insofern kann die Energiewende derzeit als eine Art politikgetriebenes Reallabor interpretiert werden, in welchem die erforderlichen Wandlungsprozesse evolutiv, also mehr oder weniger inkrementell, bzw. step-by-step, entwickelt werden. Der Ausbau der Erneuerbaren und die Marktgestaltung stehen im Fokus, einschließlich der Entwicklung der Nischen und der Bereitstellung der Systemdienstleistungen. Ohne ausgearbeitete Orientierungen vollzieht sich ein trial und error Prozess, beeinflusst von unterschiedlichsten Ereignissen, Interessen, Techniken und sozio-technischen Konstellationen. Ein solches ‚Fahren auf Sicht' ist nicht die schlechteste Option für Orientierung und Bewegungen in hoch komplexen Systemen. Aber definierte Pfade in die Zukunft sind als Orientierung genauso wichtig, selbst wenn sie im realen Prozess dann doch wieder angepasst werden müssen. Zudem muss die Gefahr von möglichen Pfadverfestigungen im Blick behalten werden. Vor diesem Hintergrund sind nicht nur Leitkonzepte, sondern auch spezifizierende und auf die praktische Umsetzung vorbereitende Gestaltungsleitbilder erforderlich, durchaus verbunden mit dem Bewusstsein, dass auch diese angesichts einer prinzipiell offenen Zukunft nicht einfach in dieser Form umgesetzt werden, sondern vornehmlich der Orientierung dienen.

Um diese Unsicherheiten zu illustrieren, sollen einige Annahmen und Erwartungen mit Blick auf die Energiewende aufgeführt werden, die sich als falsch erwiesen haben.

- Die Förderung der EE (via Einspeisevergütungen) war als lernendes System angelegt, in welchem technikspezifische Förderungen vorgenommen wurden. Im Falle der Solarförderung kam es, im Vergleich zu den ursprünglichen Erwartungen, zu einem deutlichen Überschreiten der quantitativen Förderziele, mit einerseits erheblichen Kostensteigerungen und andererseits einer deutlichen Zunahme des Beitrags von Solaranlagen zur Energiebereitstellung. Die Anpassung der Förderung an diese induzierte Marktdynamik ist nicht geglückt.
- Mit der Energiewende wurden Erwartungen verbunden, dass Erneuerbare die Dezentralität stärken und damit die Notwendigkeiten des Netzausbaus eher begrenzen würden. Derzeit wird der Netzausbau von der Bundesnetzagentur aber als essentiell angesehen, um bspw. den Offshore Windstrom in den Süden zu transportieren. Ebenso wird auf die Flexibilitätsoptionen verwiesen, die mit dem Netzausbau verbunden sind. Allerdings gibt es auch Stimmen, dass die angestrebten Dimensionen des Ausbaus bei „richtiger" Gestaltung der Rahmenbedingungen nicht erforderlich seien (Kemfert et al. 2016).
- Die Förderung von Biogasanlagen und deren Folgen für die landwirtschaftliche Produktion (Maisanbau in großflächiger Monokultur) wurden erst spät erkannt, wodurch wesentliche Teilziele in Frage gestellt wurden.

- Die Förderung von Biokraftstoffen wurde von der ‚Teller versus Tankdebatte' völlig unvorbereitet überrascht.
- In der Diskussion um Reservekraftwerke verwiesen die Incumbents (konventionelle Energieversorger, insb. Big 4) darauf, dass Gefährdungen der Versorgungssicherheit gegeben seien, wenn die Vorhaltekosten für die Kraftwerke nicht finanziert würden.

Besondere Aufmerksamkeit verdienen sogenannte „Phasenübergänge" im Rahmen der Energiewende bis zum Jahr 2050. Henning et al. (2015) unterschieden vier Phasen:

Phase 1: Entwicklung EE (1990 – 2010)

Phase 2: Systemintegration 2010 – 2030

Phase 3: Synthetische Kraftstoffe (2030 – 2050)

Phase 4: EE-Import (nach 2050).

Wobei wir uns gegenwärtig im ersten Phasenübergang bzw. am Beginn der zweiten Phase befinden. Im Rahmen von RESYSTRA beschäftigen wir uns aber auch schon intensiv mit dem charakterisierenden Thema der 3. Phase.

Die verschiedenen Phasen der Energiewende sind mit jeweils neuen Herausforderungen für das sozio-technische Energiesystem verbunden. Neue Technologien der Energiewandlung auf Basis erneuerbarer Ressourcen (Wind, Photovoltaik) kamen in der Phase 1 aus der Nische in den Mainstream und bilden in Phase 2 den Kern des sozio-technischen Systems der Elektrizität. Die damit verbundene Problematik der fluktuierenden Einspeisung gilt es zu lösen. Die Architektur des gesamten Energiesystems und die Integration des Wärme- und Verkehrsbereichs werden zur Hauptaufgabe in der zweiten Phase. Die Sektorkopplung auf Basis des Elektrizitätsbereichs wird dabei eine wichtige Rolle spielen (Power-to-X insb. Power-to-Heat mit Wärmepumpen, Power-to-Gas und Power-to-Fuel). Im Bereich Power-to-X dürfte auch der Lösungsansatz liegen für den mit zunehmendem EE-Anteil drastisch steigenden Bedarf an Langzeitspeichern. In Phase drei ab 2030 steht in diesem Zusammenhang die Ergänzung der Elektrifizierung im Mobilitätsbereich durch die Integration der bisherigen Nischentechnologie Power-to-Fuel an. Der im Inland nicht mehr zu deckende Energiebedarf für ein treibhausgasneutrales Deutschland, der zwischen 1.320 TWh bei hohen Effizienzgewinnen und 3.000 TWh bei nur geringen Effizienzgewinnen liegen dürfte (vgl. Quaschning 2016c und Benndorf, Bernicke, Bertram, Butz, Dettling 2013) kann den Szenarien zufolge in der vierten Phase nur noch durch EE-Importe gedeckt werden.

Die Abbildung 1.2 zeigt mögliche Verläufe der Transformationsprozess des Energiesystems. Es wird unterstellt, dass bis 2050 die Klimaziele erreicht werden und sehr unterschiedliche Transformationspfade (mit unterschiedlichsten Kompositionen) zur Erreichung dieses Ziels

denkbar sind. Legt man nun zusätzlich Kriterien für ein ‚Resilientes Energiesystem' an, so müssen bestimmte Pfade präferiert werden. Der Möglichkeitsraum wird eingeschränkt.

Das Energiesystem wird schon 2030 aus anderen Komponenten und geänderten Beziehungen zwischen diesen Komponenten bestehen, wobei insbesondere der veränderten Kopplung der drei Energiebereiche Strom, Wärme und Mobilität eine hohe Bedeutung zukommt. Das bestehende System löst sich auf (einschließlich der Erfahrungen mit Systemeigenschaften und schon existierenden Resilienzkomponenten). Im Transformationsprozess bildet sich ein neues sozio-technisches Energiesystem heraus, welches nicht zuletzt auf neuen Kombinationen bisheriger Nischentechnologien basiert, in Verbindung mit den vielfältigen Steuerungsoptionen durch den Einsatz der Informations- und Kommunikationstechnologien. Die Entwicklungsrichtung mit Blick auf Nachhaltigkeit im Sinne von Reduktion der CO_2-Emissionen ist im Grundsatz gesetzt, die Entwicklungsrichtung Resilienz ist noch wesentlich unbestimmter. Das Leitkonzept ‚Resilientes Energiesystem' sowie spezifizierende und auf die praktische Umsetzung vorbereitende Gestaltungsleitbilder können die Richtung vorgeben.

Unbefriedigend ist, dass die meisten bisherigen Szenarien der Energiewende der erforderlichen Radikalität der anstehenden Veränderungen nichtgerecht werden. So wird die Energiewende nur begrenzt im Sinne eines weitgehenden auch wirtschaftlichen Strukturwandels gedacht. Die wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Strukturen werden im Ergebnis einer erfolgreichen Energiewende aber nicht mehr oder weniger ähnlich bleiben. Typisierend lässt sich dies im Bereich Verkehr festmachen: Der aktuelle Bundesverkehrswegeplan (2030) berechnet das Verkehrsaufkommen entlang der üblichen Modellierungen. Es wird unterstellt, dass sich das Verkehrsverhalten nicht wesentlich ändert und die Transportleistung (z.B. Anteil und Aufkommen an PKW-Nutzern) weiter steigt. Mit alleinigem Fokus auf technischen Innovationen sollen die elektrifizierten Fahrzeuge (auch Oberleitungen für den LKW Verkehr) die Minderungsziele im Verkehr erbringen (BMVI - Bundesministerum für Verkehr und digitale Infrastruktur 2016).

Die in den unterschiedlichen Szenarien zum Aus- und Umbau der Stromnetze (bspw. die UBA-Studien von Klaus et al. 2010, Peter 2013; Samadi et al. 2014) verfolgten Strategien kommen überwiegend zu dem Ergebnis, dass, aufbauend auf den bestehenden (Leitungs-) Infrastrukturen, ein weiterer Netzausbau und vor allem auch eine verstärkte internationale Vernetzung erforderlich seien, um einen großräumigen Ausgleich zu ermöglichen. Dies wird u.a. mit dem Potenzial des Binnenmarktes für Energie begründet, welcher den weiträumigen Austausch von Energie ermöglicht und damit zugleich die Notwendigkeit, Speicherkapazitäten vorzuhalten, verringert. Damit werden insbesondere auch weitreichende Kosteneinsparungen erwartet (bspw. Koch et al. 2012).

Im Vordergrund der Diskussionen und der analytischen Zugänge stehen bisher die Fragen der Effizienz und der Kosten (des Umbaus) des Energiesystems. Fragen der Resilienz spielen bisher eine geringe Rolle mit Ausnahme der Debatte über kritische (Energie-)Infrastrukturen vor allem aus der Sicht des Katastrophenschutzes.

1.3 Energiewende als Transformationsprozess bzw. systemische Innovation

Die Energiewende wird überwiegend politisch und gesellschaftlich vorangetrieben. Die anstehende große Transformation (vgl. WBGU 2011) kann angesichts ihrer Komplexität, ihrer Eingriffstiefe in gesellschaftliche und technische Zusammenhänge sowie der existierenden Pfadabhängigkeiten nicht allein durch staatlich-regulative Steuerungsimpulse bewältigt werden. Vielmehr ist eine umfassende gesellschaftliche Mobilisierung erforderlich. Die bisher erfolgreiche Mobilisierung für die ‚Energiewende', für den Ausstieg aus der Kernenergie und für den Klimaschutz mit dem Ziel ‚100% Erneuerbare' reicht hierfür nicht mehr aus. Es sind zusätzliche mobilisierende Leitorientierungen mit Blick auf die Struktur des zukünftigen Energiesystems nötig. Eine Möglichkeit hierfür eröffnet, angesichts der zunehmenden gesellschaftlichen Wahrnehmung und Thematisierung von Unsicherheiten und Risiken, das Leitkonzept ‚Resiliente Systeme'. Wir unterscheiden im Rahmen des übergreifenden Terms Leitorientierungen *Leitkonzepte* wie ‚Resilientes System', ‚Resilientes sozio-technisches System' oder ‚Resilientes Energiesystem'. Leitkonzepte verdeutlichen auf einer mittleren Abstraktionsebene die angestrebte Richtung und erhalten ihre weltanschauliche und ethische Aufladung aus der darunterliegenden Ebene der *Weltbilder* (z.B. Sicherheit, Gerechtigkeit, Vorsorge, Leben im Einklang mit der Natur). Auf der darüber liegenden konkreteren Ebene sind die *Gestaltungsleitbilder* angesiedelt. Durch sie werden die Leitkonzepte auf einen bestimmten Gegenstands- und Handlungsbereich hin spezifiziert und auf die Umsetzung vorbereitet.

Die beginnende zweite systemische Phase der Energiewende kann nur erfolgreich bewältigt werden, wenn die politischen, ökonomischen, wissenschaftlich-technischen und zivilgesellschaftlichen Akteure und Institutionen diese Transformation aktiv mittragen und gestalten. Dazu muss regulativer Druck um intensiven (zivil)gesellschaftlichen Zug ergänzt bzw. durch ihn überhaupt erst ermöglicht werden. Es geht schließlich um weit mehr als nur eine technische Wende, es geht um eine weitreichende sozio-technische und sozioökonomische Umwälzung, um die integrierte Gestaltung der sozio-technischen Systeme der Energiebereitstellung und -nutzung in den Sektoren Elektrizität, Mobilität und Wärme. Diese Transformation greift tief in die Lebensgewohnheiten und Ansprüche der BürgerInnen ein.

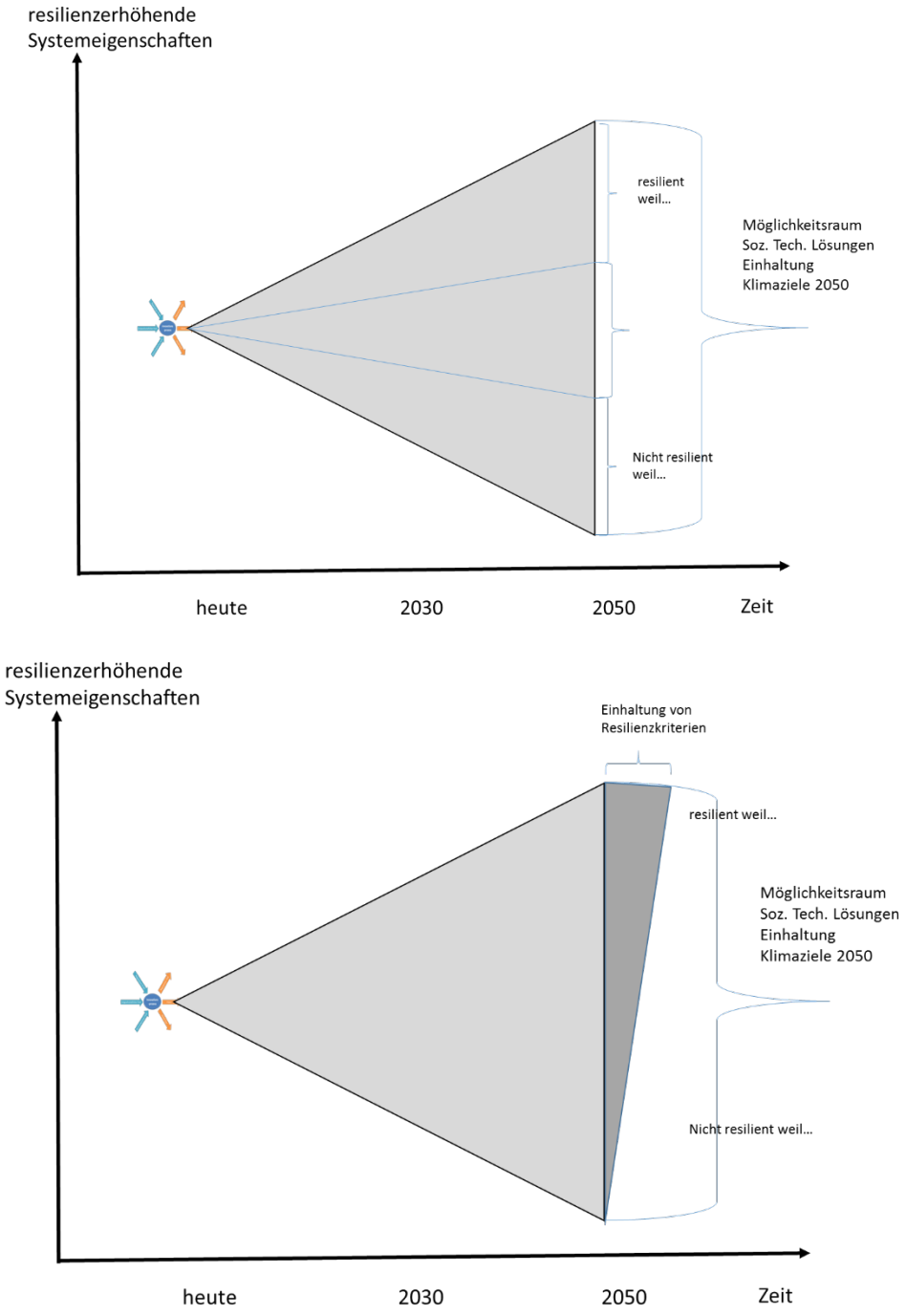


Abbildung 1.2: Schematische Darstellung möglicher Entwicklungspfade des Energiesystems (eigene Darstellung)

Im Rahmen von RESYSTRA wird die Transformation des Energiesystems deshalb als systemische Innovationsaufgabe betrachtet, und es wird versucht herauszufinden, wie diese Aufgabe erfolgreich bewältigt werden kann. Neben der Aufgabe der Verbesserung der Innovationsfähigkeit, z.B. der Überwindung der immensen Pfadabhängigkeiten und der Einhaltung der Mindestbedingungen der gesellschaftlichen Akzeptanz bzw. Akzeptabilität der Prozesse und ihrer Ergebnisse, stellt sich genauso dringend die Frage nach den Möglichkeiten und Grenzen zur Beeinflussung der Innovationsrichtung. Es geht also nicht nur darum, das ‚verdrahtete' mit enormen Pfadabhängigkeiten bestückte Energiesystem überhaupt in Bewegung zu versetzen,

sondern auch darum, ihm dabei die adäquaten Richtungsimpulse auf den Weg zu geben. In dieser Hinsicht wird den Leitorientierungen und den Einflussmöglichkeiten zivilgesellschaftlicher Akteure besondere Aufmerksamkeit gewidmet.

Vor dem Hintergrund begrenzter Planbarkeiten in komplexen Systemen ist mit dem soziotechnischen Transformationsprozess und der Dynamisierung der gesellschaftlichen und technischen Systeme im Rahmen der Energiewende verbunden, dass Unsicherheiten im Transformationsprozess eher die Regel als die Ausnahme darstellen. Mit dem Leitkonzept ‚Resiliente Systeme' wird versucht, einen Beitrag zur Bewältigung dieser Unsicherheiten zu leisten (siehe Kapitel 2).

1.4 Umgang mit Unsicherheiten im Transformationsprozess

Fundamentale Unsicherheiten existieren mit Blick auf die gesellschaftliche und politische Willensbildung und die unkoordinierte Vermittlung von Zug- und Schubkräften im Innovationsprozess (unklare bzw. volatile Resultante). Unsicherheiten existieren auch durch den enormen aktuellen Handlungsdruck bei gleichzeitigem Verfolgen sehr langfristiger und in sich konfligierender Ziele. Neben Transformationswissen ist für einen solchen Umbau im laufenden Betrieb insbesondere auch Orientierungswissen gefragt. Nötig ist ein Suchprozess, in welchem Erwartungen konkretisiert und abgestimmt werden müssen. Welche sozioökonomischen Bedarfe sind in welcher Form in Zukunft durch das Energiesystem zu befriedigen? Dies muss in einer Situation geschehen, in der die Systeme, die diese Systemleistungen in Zukunft erbringen sollen, bislang nur in Konturen erkennbar sind. Dies gilt insbesondere für die Energiewendephasen drei und vier nach 2030.

Die existierenden Netzinfrastrukturen wurden seinerzeit auf die zentralisierten Erzeuger zugeschnitten. Wenn man die Netzplanung für die zukünftig erforderliche Struktur des Energiesystems am Reißbrett gestalten könnte (greenfield planning), würde heute eine völlig andere Netz-Architektur vorgeschlagen werden, Stichwort: Zellularer Ansatz (vgl. Benz et al. 2015). Aber auch ein schrittweiser Umbau steckt voller Unsicherheiten. Durchbrüche bei dezentralen Speichertechnologien können etwaige Ausbaupläne radikal in Frage stellen. Der Übergang zur Elektromobilität dürfte auf jeden Fall einen erheblichen Zubau der Netze erfordern, der in den bisherigen Planungen noch nicht angemessen berücksichtigt ist. In dieser Situation wird ein Leitkonzept benötigt (aktuell lautet es wohl: So dezentral wie möglich und so zentral wie nötig) sowie ein Umsetzungsplan, in dem nicht nur die Pfadabhängigkeiten durch die bestehende Struktur, sondern auch die Grenzen der gesellschaftlichen Akzeptanz angemessen berücksichtigt werden. Eine solche Neuausrichtung für die Netzplanung – und erst Recht ein Umbau in Richtung auf ein ‚Resilientes Energiesystem' – müsste zeitnah in den der Netzplanung zu Grunde liegenden Szenariorahmen einfließen, was bisher allerdings noch unzureichend geschieht (Übertragungsnetzbetreiber 2016).

Durch den aktuellen Klimaschutzplan 2050 (BMUB - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2016) werden die stofflichen Minderungsziele (80 bis 95 prozentige Minderung der Treibhausgasemissionen) klar formuliert. Wie und im Rahmen welcher Struktur diese Ziele realisiert werden können, ist hingegen sehr viel weniger klar, sei es mit Blick auf die eingesetzten Technologien, sei es mit Blick auf die (Netz-) Infrastrukturen oder auf die Frage der (Sektor-) Kopplungen bislang getrennter Infrastruktursysteme. Auch die Herausforderungen im Bereich der Wärme, insbesondere bei der Gebäudeisolierung, sind enorm hoch.

Die Strukturen des zukünftigen Energiesystems sind bisher nur in groben Zügen vorgedacht. Es wird davon ausgegangen, dass Strom zu der zentralen Energieform (zum zentralen exergetischen, in alle anderen Formen umwandelbaren, Energieträger) wird und damit andere Bereiche sukzessive in das Stromsystem integriert werden. Ob dies wirklich so kommen wird, ist offen. Wir gehen davon aus, dass Verbrennungsprozesse basierend auf synthetischem Gas und synthetischen Treibstoffen auch in Zukunft im Wärme- und Mobilitätsbereich eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielen werden. Erkennbar ist auf jeden Fall die Tendenz zu einer zunehmenden Vernetzung bisher eher getrennter Infrastruktursysteme (Elektrizität, Wärme, Mobilität, Information und Kommunikation) hin zu einer ‚Mega-Infrastruktur' (Grunwald 2016). Es steht also ein Übergang von einem Energiesystem an, über dessen Systemeigenschaften und -strukturen weitgehende Kenntnisse vorlagen, und in welchem auch schon einige (Bau-) Prinzipen ‚Resilienter Systeme' verwirklicht sind, hin zu einem System, dessen Systemeigenschaften sich im Transformationsprozess kontinuierlich ändern, und in dem über das Zusammenspiel der Systemkomponenten bisher kaum Erfahrungen vorliegen.

Die Governanceprozesse im Energiebereich haben sich bereits deutlich verändert. In den kommenden Phasen der Energiewende werden die Erneuerbaren zunehmend weitere (netzdienliche) Systemdienstleistungen erbringen müssen (u.a. Schwarzstartfähigkeit, Umgang mit fluktuierender Erzeugung bei immer höheren Anteilen der Erneuerbaren). Mit der Liberalisierung wurden bisherige Monopole in Frage gestellt. Die überschießenden Dynamiken einzelner technologischer Pfade, die zunehmenden Redispatch Maßnahmen und nicht zuletzt die vielfältigen Unsicherheiten über die Entwicklungen der Infrastrukturen verstärken den Managementbedarf. Es wird davon ausgegangen, dass spätestens ab einem Anteil von über 80% an volatiler Einspeisung, der Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch vor großen Problemen steht. Mit Blick auf die neuen Formen der (Markt-) Steuerung, wie sie im Kontext der Entwicklung der Digitalisierung möglich werden (z.B. peer-to-peer Märkte), ergeben sich neue Probleme der Sicherung der Kohärenz und des Zusammenspiels der unterschiedlichen (Teil-) Elemente.

Der Transformationsprozess findet vor dem Hintergrund weiterer vielfältiger und höchst dynamischer Entwicklungen statt. Zu nennen sind v.a. die Europäisierung und die damit verbundene Liberalisierung der Energiemärkte, volatile Energiepreise sowie weitreichende technologische Veränderungen, z.B. neue Energietechnologien (Wandler und Speicher) und insbesondere die Digitalisierung. Auch in den kommenden Phasen muss die Energiewende als der Umbau eines sich bereits in Bewegung befindlichen komplexen sozio-technischen Systems betrachtet werden, in welchem zahlreiche Akteure in mehreren Ebenen und über mehrere Ebenen hinweg interagieren.

Als angemessene Reaktion auf diese und die schon im ersten Abschnitt genannten Unsicherheiten, auf die Dynamik und die absehbaren Zielkonflikte wird im Rahmen von RESYSTRA das Leitkonzept eines ‚Resilientes Energiesystems' ausgearbeitet. Die Priorisierung dieses Leitkonzepts und der darauf aufbauenden spezifizierten und operationalisierten Gestaltungsleitbilder ist allerdings auch mit einem angemessenen Maß an ‚Demut' im Umgang mit komplexen Systemen verbunden. Es soll nicht auf *den einen* langfristig zu verfolgenden Entwicklungspfad gesetzt werden, sondern auf Optionenvielfalt, die selbst ein wichtiges Element von Resilienz ist. Es gilt die Flexibilitätsoptionen zu erhalten und zu nutzen, die sich z.B. durch unterschiedliche Formen und Ausgestaltungen der Sektorkopplung eröffnen (dabei geht es um weit mehr als um Elektrofahrzeuge als Speicher). Je nach Ausgestaltung dieser Sektorkopplungen können durch sie sowohl Flexibilitätsoptionen eröffnet als auch im negativen Sinn, im Falle von Störungen, Kaskadeneffekte ausgelöst werden. Dies ist angesichts unserer zunehmenden Abhängigkeit von Infrastrukturen von enormer Bedeutung.

1.5 Resiliente Systeme als Gestaltungsperspektive

Ziel ist es, das Energiesystem so zu gestalten, dass es nicht nur auf bekannte Risiken, sondern auch auf unbemerkte schleichende Veränderungen und überraschende Schocks angemessen reagieren und seine Systemdienstleistungen aufrechterhalten kann. Das System soll die zu diesem Zweck nötigen Fähigkeiten besitzen. Es sollte sowohl widerstandsfähig als auch anpassungsfähig sein und zusätzlich innovations- und improvisationsfähig (Gleich und Gößling-Reisemann 2015). Wobei zu beachten ist, dass diese Fähigkeiten durchaus in einem Spannungsverhältnis zueinander stehen können. Ein extrem widerstandsfähiges, robustes System kann diese Fähigkeiten z.B. durch Panzerung und damit auf Kosten seiner Anpassungs- und Innovationsfähigkeit erworben haben (vgl. auch Brand 2016). Eine resiliente Gestaltung des Systems als Vorbereitung auf völlige Überraschungen (schwarze Schwäne, unknown unknowns) ist nämlich ohne Zweifel ein Alleinstellungsmerkmal aber bei weitem nicht der einzige Grund für das Leitkonzept ‚Resiliente Systeme'. Es geht auch um die Fähigkeit neu sich eröffnende Chancen nutzen zu können. Die Innovationsfähigkeit und damit die Zukunfts- und Veränderungsoffenheit sind mindestens genauso wichtig.

Die Diskussionen um die schwarzen Schwäne erhielten insbesondere in der Folge des Zusammenbruchs der Sowjetunion, der jüngeren ökonomischen und Finanzkrisen und schließlich durch die gleichnamige Publikation von Taleb (2008) erheblichen Auftrieb. Beispiele für ‚schwarzen Schwäne' oder ‚unknown unknowns' waren in den vergangenen Jahrzehnten insbesondere die ozonzerstörenden Wirkungen von FCKWS, die hormonähnlichen Wirkungen von Industriechemikalien sowie das Auftreten von AIDS und BSE. Entscheidend ist, dass Schwarze Schwäne nicht vorhersehbar sind, sich also einer ex-ante Identifikation entziehen. Diese Debatten über Schwarze Schwäne haben zugleich auch die Debatte um Vulnerabilität und Resilienz befördert. Mit den genannten Krisen und ihren Auslösern war schlicht nicht gerechnet worden. Zudem waren gefühlte Sicherheiten und Überzeugungen der 1960er und 70er Jahre (Planungseuphorie, Prozesskontrolle) verloren gegangen. Stattdessen haben Konzepte der Selbstorganisation, Systemdynamik und Emergenz in komplexen Systemen an Bedeutung gewonnen. Hinzu kamen Verunsicherungen durch Terroranschläge, Kriege, durch Verletzlichkeiten im Zuge der Digitalisierung (Hackerangriffe), durch Naturkatastrophen wie Erdbeben, Tsunamis, Extremwetterereignisse und nicht zuletzt durch den Klimawandel. Erst vor diesem Hintergrund einer zunehmenden gesellschaftlichen Verunsicherung ist die erstaunliche Karriere des Leitkonzeptes ‚Resilientes System' zu verstehen. Es verspricht Lösungsmöglichkeiten angesichts von Ereignissen, die ein (soziales, technisches oder gesellschaftliches) System irreparabel zerstören können, mit denen nicht ‚gerechnet' werden konnte, die durch Risikoabschätzungen nicht erfasst werden und gegen die eine gezielte ereignisorientierte Vorsorge deshalb nicht möglich war. Die Gestaltung ‚Resilienter Systeme' basiert auf einer Blickwende. Sie löst sich von der Betrachtung oder Antizipation bestimmter Störereignisse und konzentriert sich stattdessen auf die Architektur und die Fähigkeiten der betroffen Systeme. Diese Form der Vorsorge folgt nicht mehr nur dem Prinzip ‚Was wäre wenn?', sondern darüber hinaus dem Prinzip ‚(Fast) Egal was kommt!' (vgl. auch Brand 2016).

Allerdings sind die derzeit diskutierten Verständnisse und Definitionen von Resilienz noch sehr heterogen (vgl. Kapitel 2.1). Wir verfolgen einen eher ingenieurswissenschaftlichen Ansatz und begreifen ‚Resiliente Systeme' als Leitkonzept der Systemgestaltung. Bei Leitkonzepten sind Unschärfen nicht nur verkraftbar, sondern sogar eher fruchtbar, so wie beim Leitkonzept Nachhaltigkeit, von dem es ja auch keine allgemein geteilte Definition gibt, jenseits der recht allgemeinen Formulierungen im Brundtland-Report[7]. Wir verstehen unter Resilienz die Fähigkeit von Systemen, auch unter turbulenten Rahmenbedingungen, trotz massiver äußerer Störungen und innerer Ausfälle, ihre Systemleistungen erbringen zu können (vgl. Gleich, Gößling-Reisemann, Stührmann, Woizeschke 2010). Wir siedeln, auf der Ebene ‚Leitkonzepte', das

[7] „Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs." (WCED - World Commission on Environment and Development (1987, S. 41).

Leitkonzept Resilienz unterhalb des Leitkonzepts Nachhaltigkeit an. Und wir ordnen dort die Resilienz als vierte Orientierung auf der Strategieebene der Nachhaltigkeit ein, neben Effizienz, Konsistenz und Suffizienz (vgl. Brand 2016), siehe Kapitel 2.2. Resilienz ergänzt das um Tragekapazitäten und Naturverbräuche kreisende Leitkonzept Nachhaltigkeit um die Vorsorge gegenüber ‚systemischen Risiken'. Wobei wir ganz bewusst das Leitkonzept Nachhaltigkeit defensiv interpretieren, als ein Weg in die Zukunft, auf dem zumindest weitreichende Zusammenbrüche in den ökologischen, sozialen und ökonomischen Systemen vermieden werden[8].

Nachhaltigkeit ist in unserem Verständnis nicht identisch mit dem ‚Guten Leben' oder gar der Erfüllung aller unserer Wünsche[9]. Nachhaltiges Wirtschaften beschreibt in unserem Verständnis einen Weg in die Zukunft, bei dem zumindest große Zusammenbrüche in den ökologischen, sozialen und ökonomischen Subsystemen vermieden werden. Wissenschaftliche Forschung zur Nachhaltigkeit sollte sich demzufolge auf die Erfassung der Tragekapazitäten von ökologischen, sozialen und ökonomischen Systemen konzentrieren sowie auf Strategien und Wege zu deren Berücksichtigung. Wobei der Fokus nicht nur auf Output-Tragekapazitäten für Emissionen aus der Technosphäre in die Ökosphäre liegt, wie z.B. auf dem Ausstoß von Treibhausgasen, sondern auch auf den Input-Tragekapazitäten also der Bereitstellung von Ressourcen der Ökosphäre für die Technosphäre.

Mit dem Leitkonzept ‚Resiliente Systeme' gehen unsere Gestaltungsansprüche und -aufgaben nun noch ein Stück weiter. Es geht darum die Systeme so zu gestalten, dass sie nicht nur höhere Tragekapazitäten mit Blick auf schon bekannte Belastungen aufweisen. Sie sollen darüber hinaus so gestaltet werden, dass mit ihnen auch der Vorsorgegedanke im umfassenden Sinn umgesetzt wird. Es geht darum, dass die Systeme auch mit derzeit noch unbekannten Belastungen und Überraschungen in einer Art und Weise fertig werden, in der sie in der Lage sind ihre Systemdienstleistungen aufrecht zu erhalten.

In der gegenwärtigen Literatur sind unterschiedliche Ansätze zum Verhältnis der Begriffe Resilienz und Nachhaltigkeit zu finden. So fassen einige Arbeiten Resilienz als eigenständiges Begriffskonzept ohne Beziehung zur Nachhaltigkeit auf, andere Autoren verbinden mit Resilienz ein viel weitreichenderes Konzept als Nachhaltigkeit (Endreß und Maurer 2015; Wink 2016).

[8] Dieses Verständnis folgt der in der Nachhaltigkeitsdebatte verbreiteten Orientierung an Tragekapazitäten, die nicht überschritten werden dürfen, und zwar nicht nur in Bezug auf Stoff- und Energieströme (mit Blick auf Quellen: z.B. Ressourcenreichweiten, mit Blick auf Senken: z.B. das 2 Grad-Ziel im Klimaschutz), sondern auch mit Bezug auf die Tragekapazitäten ökonomischer und sozialer Systeme. Weniger im Fokus steht bisher, wie diese Systeme auf dem Pfad der nachhaltigen Entwicklung gestaltet werden sollten und zwar sowohl mit Blick auf die Tragekapazitäten, die ja keineswegs fix sind, als auch mit Blick auf ihre Belastungen.

[9] Obwohl das die ‚sustainable development goals' der Agenda 2030 der Vereinten Nationen leider zunehmend suggerieren (http://www.un.org/sustainabledevelopment/development-agenda/)

Im Rahmen des Projektes RESYSTRA wird Resilienz als eine weitere Strategie mit dem Ziel der Nachhaltigkeit verstanden, neben den drei bisher vor allem diskutierten Nachhaltigkeitsstrategien Effizienz, Suffizienz und Konsistenz (Huber 1995) (vgl. Tabelle 1.1).

Tabelle 1.1: Beziehung zwischen Resilienz und Nachhaltigkeit (Brand 2016)

Nachhaltigkeit			
Effizienz	**Konsistenz**	**Suffizienz**	**Resilienz**
Effizienter Umgang mit Ressourcen	Einklang der wirtschaftlichen und menschlichen Aktivitäten mit Naturkreisläufen	Einhaltung von sozial- und umweltverträglichen Obergrenzen; Selbstbeschränkung	Risikovorsorge; Vorsorge gegenüber bekannten/unbekannten und schleichenden/ abrupten inneren sowie äußeren Störungen
Minimierung des Ressourcenaufwandes bei gleichbleibendem Nutzen	Kreislaufwirtschaft; Nutzung von umweltfreundlichen Energien und Stoffen	Sparsamer Konsum; Postwachstumsökonomie; Genügsamkeit	Widerstandsfähigkeit; Anpassungsfähigkeit; Innovationsfähigkeit; Improvisationsfähigkeit

In der Strategie der Resilienz wird eine wichtige Ergänzung zur Effizienz (Erhöhung der Ressourcenproduktivität bei gleichbleibendem Nutzen), Konsistenz (Einpassung der menschlichen und wirtschaftlichen Aktivitäten und deren Stoff- und Energieströme in Naturkreisläufe) und Suffizienz (Einhaltung von sozial- und umweltverträglichen Obergrenzen des Konsums) gesehen. Denn mit der durch Resilienz intendierten Erhöhung der Widerstands-, Anpassungs-, Innovations- und Improvisationsfähigkeit gegenüber Gefahren und Risiken wird ein wesentlicher Beitrag zum zukünftigen Fortbestand von Systemen bzw. zur Aufrechterhaltung ihrer Systemdienstleistungen geleistet und Nachhaltigkeit mit dem bedeutenden Bereich der Risikovorsorge komplettiert (Brand 2016).

Durch die Ergänzung der Resilienzstrategie wird noch deutlicher, dass die vier Nachhaltigkeitsstrategien nicht einfach harmonieren, sondern in einem Spannungsverhältnis zueinanderstehen können. Dies gilt insbesondere für die Strategien der Resilienz und Effizienz. Wenn im Rahmen der Resilienzstrategie vorgeschlagen wird, Redundanzen aufzubauen und Pufferkapazitäten vorzuhalten, sinkt zumindest die kurzfristig analysierte Effizienz der Systeme. Eine vermehrte Einspeisung von erneuerbaren Energien im Sinne der Konsistenz kann zu einer verminderten Resilienz des Energiesystems führen, indem das Stromnetz durch intermittierende Energien belastet wird. Damit werden Problemstellungen angesprochen, die mit Blick auf Resilienz in der gegenwärtigen Literatur bspw. bei Löhr (2009) und Borgert (2013) diskutiert werden. Nicht zuletzt aus dem Grund, dass der Effizienzstrategie im Rahmen der Nachhaltigkeitsstrategien und insbesondere auch im Rahmen der Energiewende bisher die höchste Aufmerksamkeit und Priorität gewidmet wurde, wird das Spannungsverhältnis zwischen Effizienz und Resilienz an mehreren Stellen in diesem Projektbericht thematisiert. In einigen Fällen

hilft allerdings auch schon eine Erweiterung der Effizienzperspektive weiter. Kurzfristige Effizienzsteigerungen können sich als nachteilig im Sinne einer längerfristigen Effizienzperspektive erweisen, wenn – weil nicht langfristig eingeplant – mit exorbitantem Aufwand plötzlich auftretende Ressourcenlücken geschlossen werden müssen. Und wie schon bei der Debatte über ‚lean production' deutlich wurde, verliert ein System ohne Schlupf (slack) schnell seine Stabilität und Innovationsfähigkeit.

Die von uns verwendete, an den Fähigkeiten zur Aufrechterhaltung der Systemleistungen orientierte Definition des Leitkonzepts ‚Resilientes System' ist natürlich nur ein erster Schritt. In den Folgeschritten geht es darum, dass die Nutznießer der Systeme sich auf die erwünschten und geteilten Systemleistungen nach Quantität und Qualität verständigen (siehe Kapitel 3.2.1). Zudem muss in zunehmenden Spezifizierungsstufen die Architektur ‚Resilienter Systeme' skizziert werden. D.h. es müssen die notwendigen Komponenten und ihre Relationen bestimmt werden, die die Systeme in die Lage versetzen, diese Leistungen zu erbringen, sie also zu ‚Resilienten Systemen' machen.

Wobei hier nicht der Eindruck vermittelt werden soll, als sei die resiliente Gestaltung des (Energie-) Systems eine völlig neue Fragestellung. Mit Blick auf den verallgemeinerten Grundwert der Versorgungssicherheit, der schon seit den ersten Fassungen des Energiewirtschaftsgesetzes in den 1930er Jahren zu den wichtigsten Zielen der Energiewirtschaft gehört, wurden schon einige Konstruktionsprinzipien umgesetzt, die Beiträge auch zur Resilienz leisten (z.B. das Redundanz-Prinzip ‚n-1'). Ebenso wurden in Diskursen der Technikfolgenabschätzung eine Reihe grundsätzlicher Kriterien entwickelt, deren Umsetzung dazu beiträgt, die Systeme resilienter zu machen (Fehlerfreundlichkeit, Modularität, etc.). Heute und erst Recht in Zukunft werden diese Ansätze und Erfolge aufgrund der Zunahme der Komplexität, der hinzu gekommenen Unsicherheiten und hohen Dynamiken in der Systemtransformation allerdings nicht mehr ausreichen.

Das Strategieelement der Resilienz ergänzt also das Leitkonzept der Nachhaltigkeit um den Risiko- und Vorsorgeaspekt. Dies geschieht nicht zuletzt mit Blick auf mittel- und langfristige Zeithorizonte und die in diesen stattfindenden Dynamiken, also mit Blick auf die Nachhaltigkeitspfade und die Transformation des Energiesystems. Dabei geht es nicht um Resiliente Systeme als anzustrebende (End-)Zustände. Massive Risiken und Unsicherheiten liegen gerade auch im Transformationsprozess. Es gilt also vor allem auch diese Transformationsprozesse resilient zu gestalten.

Als Zwischenfazit kann festgehalten werden, dass die Relevanz des Leitkonzeptes ‚Resilientes System' in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen hat, weil:

- die Vorstellungen der Planbarkeit, wie sie insbes. die 1960er und Teile der 1970er Jahre geprägt haben, zunehmend in Frage gestellt wurden (van Laak 2010);

- der Begriff der Risikogesellschaft auf diese neuen Konstellationen verweist (Beck 1986);
- vielfältige und neue Dynamiken in den unterschiedlichsten Bereichen im Gange sind (u.a. Digitalisierung, Strukturbrüche, …) (bspw. mit Blick auf Städte: WBGU 2016);
- die Dynamisierung und Beschleunigung der Prozesse dazu führen, dass die Systeme einem schnelleren Wandel unterliegen, sodass das Lernen über die Systeme und Systemeigenschaften deutlich herausfordernder wird[10]. Die zunehmende Verschränkung unterschiedlichster Systeme, wie sie gegenwärtig mit Blick auf die Digitalisierungsprozesse zunehmend ermöglicht werden (z.B. Steuerungsmöglichkeiten), führen zu neuen Komplexitäten und Interdependenzen (systems of systems);
- u.a. im Kontext der Energiewende zudem bislang getrennte Infrastrukturbereiche miteinander zunehmend enger verbunden werden und tendenziell zu einem ‚Megainfrastruktursystem' verschmelzen (Grunwald 2016);
- generell festzustellen ist, dass einerseits die Vorhersehbarkeit von Bedrohungen abnimmt und andererseits unvorhergesehene (und nicht vorhersehbare) Ereignisse zunehmen (Terror, Finanzkrisen, Klimawandel);
- das sozio-technische Energiesystem gerade auch im Transformationsprozess stark durch politische Regulierungen beeinflusst wird, angefangen von der Technologieförderung bis hin zum Marktdesign. Innovationsdynamiken hängen also in starkem Maße vom politischen Prozess ab, sind aber in bestimmten Bereichen auch selbst Treiber. So können bspw. Durchbrüche bei der Speicherentwicklung ein enormes wirtschaftliches Potenzial generieren und dadurch wiederum die Regulierung beeinflussen (bspw. befreit die aktuelle EEG Reform Mieter in Häusern mit Photovoltaikanlagen von der Ökostromumlage).

1.6 Thesen und Ziele des Projektes Resystra

Ein Fokus des Projekts lag auf der Zielperspektive der Energiewende mit dem Leitkonzept „Resilientes Energiesystem" und hatte von daher *erstens* die Aufgabe dieses Leitkonzept auszuarbeiten. Dies vollzog sich in vier Schritten. Zunächst wurde das Leitkonzept ‚Resilientes System' als biomimetisches Leitkonzept ausgearbeitet. Auf diese Weise sollte das an sich Unmögliche bewältigt werden, die vorsorgeorientierte Vorbereitung auf völlige Überraschungen. Diese Version der Umsetzung des Vorsorgeprinzips kann sich nicht vornehmlich auf das

[10] Bspw. konnte das vergleichsweise einfach und hierarchisch aufgebaute, auf fossilen Energieträgern basierende, bundesdeutsche Stromsystem vielfältige Lernprozesse durchlaufen, mit der Konsequenz, dass die Resilienz des Systems als hoch einzustufen war.

Lernen aus Erfahrung konzentrieren. Das wäre nur ‚Lernen aus schlechter Erfahrung', insgesamt auch wichtig, aber für dieses Ziel nicht hinreichend. Der Ausweg besteht im ‚Lernen von der Natur'. Im Zuge des Jahrmillionen langen Evolutionsprozesses hat die Natur völlig ungerichtet unzählige extrem vielfältige Formen und Prozesse hervorgebracht, aus diesen zufälligen Innovationen hat anschließend die Selektion das Überlegene und das auch längerfristig im Rahmen dynamischer und turbulenter Umgebungen Überlebensfähige ausgelesen. Von dieser evolutionären Kreativität und Vielfalt versuchten wir im biomimetischen Ansatz zu lernen, was zu einer ersten Formulierung der Fähigkeiten und Komponenten ‚Resilienter Systeme' führte (vgl. Kapitel 2.1). Im nächsten Schritt wurden Erfahrungen aus dem Risikomanagement ausgewertet mit Fokus auf Kritische Infrastrukturen. Hierdurch wurden insbesondere die Möglichkeiten menschlicher Akteure in das Tableau der Fähigkeiten und Bauelemente ‚Resilienter Systeme' integriert (vgl. Kapitel 2.3). Anschließend ging es darum, das Ganze auf Energiesysteme zu beziehen, indem das Leitkonzept ‚Resiliente Energiesysteme' erarbeitet wurde (vgl. Kapitel 2.4). Und schließlich wurden im vierten Schritt im Rahmen der Fallstudien die realen Gegebenheiten vor Ort und insbesondere die durch die z.T. prospektiven Vulnerabilitätsanalysen erfassten Verletzlichkeiten erfasst. Es wurden diejenigen Elemente und Maßnahmen zur Steigerung der Resilienz integriert, auf denen im Feld aufgebaut werden kann einschließlich derjenigen, die die vorgefundenen Verletzlichkeiten mildern oder gar beseitigen können. Dies war die Basis für die Erarbeitung der spezifizierten und operationalisierten Gestaltungsleitbilder auf regionaler (Osterholz und Wolfhagen) und nationaler Ebene (Power-to-Fuel) im Rahmen der drei Fallstudien (vgl. Kapitel 6).

Ein zweiter Fokus lag auf der Frage, wie eine derartige Transformation bewerkstelligt und welcher Stellenwert dabei zivilgesellschaftlichen Akteuren und Leitorientierungen zugemessen werden kann. Besonders interessierten uns die Möglichkeiten und Grenzen gerichteten systemischer Innovationen (bzw. Transformationen) und in diesem Zusammenhang besonders die Rolle von Leitkonzepten und Gestaltungsleitbildern. Diese Fragen wurde auf zwei recht unterschiedliche Teilprozesse bezogen, zum einen auf regionaler Ebene auf einen eher inkrementellen sozio-ökonomisch geprägten Innovationsprozess in zwei Regionen, die sich bisher schon der Selbstversorgung durch Erneuerbare Energiequellen verschrieben haben (mit engem Fokus auf Elektrizität) und zum anderen auf einen eher disruptiven technologisch geprägten Innovationsprozess im Bereich Power-to-Fuel (P2F). In beiden Teilprozessen wurden System- und Akteursanalysen durchgeführt, Wertschöpfungseffekte erfasst und Modelle erarbeitet, in denen die wichtigsten Einflussfaktoren einer gerichteten Transformation (Schildkrötenmodell) erfasst und dargestellt werden konnten. Im Fallbeispiel P2F wurde ein agentenbasiertes Modell erarbeitet, mit dessen Hilfe auf nationaler Ebene die nötigen technischen, sozialen, ökonomischen und regulativen Voraussetzungen ermittelt werden konnten, unter denen syn-

thetische Treibstoffe als nachhaltige Lösung zumindest für die absehbar kaum elektrifizierbaren Bereiche Flug-, Schwerlast- und Schiffsverkehr erfolgreich in den Markt eingeführt werden können.

Zwei Thesen standen somit im Zentrum des Projekts:

1. Wenn sich der Risikodiskurs im Zuge der Energiewende weg von den technologiespezifischen Risiken (Kernenergie, Ressourcenendlichkeit, Klimawandel) und hin zu den in Zukunft stark zunehmenden Versorgungsrisiken verschiebt, stellt sich als ganz wesentliche Gestaltungsaufgabe die Transformation des Energiesystems hin zu einem ‚Resilienten Energiesystem'.
2. Die Transformation des Energiesystems stellt eine Systeminnovation von enormer Komplexität dar. Wenn sie gelingen soll, muss neben den in den Innovationssystemen wirkenden Pushfaktoren (insb. Regulativer Push, Technology Push und Skandalisierungs Push) auch den Pullfaktoren besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden (insb. Market Pull, Anreiz Pull, aber vor allem auch Vision Pull mit Szenarien, Leitkonzepten und Gestaltungsleitbildern).

Das Projekt zielte deshalb insbesondere auf folgende Ergebnisse:

1. Ein Leitkonzept ‚Resilientes Energiesystem' und aufbauend auf diesem in Kooperation mit den Akteuren vor Ort Gestaltungsleitbilder auf der regionalen Ebene für den Landkreis Osterholz und die Stadt Wolfhagen, die schon in der Vergangenheit durch ihr Engagement in Richtung auf eine Selbstversorgung durch 100% Erneuerbare bekannt geworden waren sowie ein Gestaltungsleitbild auf nationaler Ebene für die Option Power-to-Fuel.
2. Ein besseres Verständnis der Erfolgsfaktoren gerichteter Transformationen, dargestellt in einem erweiterten Modell der Einflussfaktoren gerichteter Transformationen (Schildkrötenmodell), aber auch in Form von spezifizierten Schildkrötenmodellen, in denen die wichtigsten Einflussfaktoren für die anstehenden Transformationen in den drei Fallbeispielen dargestellt werden mit konkreten Hinweisen auf relevante Akteure und deren Einflussmöglichkeiten auf die Transformation der Energiesysteme.
3. Handlungsempfehlungen für die Transformation hin zu ‚Resilienten Energiesystemen'.

1.7 Methoden und Heuristiken

Ausgehend von einem weit ausgelegten Modellbegriff können die im Projekt RESYSTRA eingesetzten wissenschaftlichen Methoden im Wesentlichen als modellbasiert charakterisiert werden. Drei methodische Ansätze standen dabei im Zentrum:

1. Die theoretische Weiterentwicklung und Integration zweier innovationstheoretischer Modelle, a) des Schildkrötenmodells wesentlicher Einflussfaktoren für gerichtete Systeminnovationen sowie b) des von Geels (2004) und anderen entwickelten Modells des Transition Managements vor dem Hintergrund der Multi-Level-Perspektive (MLP). Beide Modelle dienten auch als Heuristiken für die empirischen Analysen in den Fallbeispielen.

2. Die teilweise partizipative Erarbeitung von vier Modellen eines zukünftigen Energiesystems auf unterschiedlichen Abstraktions- und Skalenebenen: a) das Leitkonzept Resiliente Energiesysteme, b) die spezifizierenden und operationalisierenden Gestaltungsleitbilder in den beiden Modellregionen sowie c) auf nationaler Ebene das Gestaltungsleitbild Power-to-Fuel.

3. In Kooperation mit Kollegen aus Delft und Groningen die partizipative Erarbeitung eines agentenbasierten Modells zur Simulation der nötigen Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Integration von Power-to-Fuel in den deutschen Energiemarkt.

Schildkrötenmodell und Multi-Level-Perspektive

Die Energiewende wird als Transformation bzw. in den Begriffen der Innovationsforschung als Systeminnovation verstanden. Beim Verfolgen der Frage, wie ein solch weitreichender gerichteter Umbau des komplexen Energiesystems gelingen kann, wurde an zwei theoretischen Modellen angeknüpft, einerseits an dem von Geels (2004) entwickelten Transition Management und der damit verbundenen Multi-Level-Perspektive (MLP) und andererseits aufbauend auf der Multi-Impuls-Hypothese (Klemmer et al. 1999; Lehr und Löbbe 1999, S. 13) am sogenannten Schildkrötenmodell (Ahrens et al. 2004; Ahrens et al. 2006; Brand 2013; Brand, Gleich et al. 2015; Fichter 2005; Hemmelskamp 1999; Stührmann et al. 2012). Dabei wurde insbesondere das Schildkrötenmodell weiterentwickelt (vgl. Brand 2016) und anschließend versucht, die beiden Modelle zu kombinieren. Das Schildkrötenmodell zeigte sich als besonders dafür geeignet, die Zug- und Schubkräfte im Innovationssystem zu einem bestimmten Zeitpunkt zu identifizieren, übersichtlich darzustellen und damit kommunizierbar zu machen. Im Rahmen des Projekts hat sich zudem herausgestellt, dass mit diesem Modell auch ein guter Analyserahmen für die Fallbeispiele existiert, und dass darüber hinaus die Einträge in das Schildkrötenmodell einen sehr guten Ausgangspunkt bildeten für die Kommunikation unserer Ergebnisse und nicht zuletzt für die agentenbasierte Modellierung im dritten Fallbeispiel. Wenn ein Ziel in Form von Leitkonzepten oder Gestaltungsleitbildern formuliert ist (z.B. das 2 Grad-Ziel aus dem Klimaschutz oder das Strukturziel ‚Resilientes Energiesystem'), können mit Hilfe des Schildkrötenmodells die zu deren Umsetzung notwendigen kompatiblen und komplementären Treiber dargestellt werden, die entscheidend sind, um das komplexe Energiesystem in diese Richtung zu bewegen (vgl. Abbildung 1.3). Ebenso können Hemmnisse abgebildet werden. Wobei berücksichtigt werden muss, dass selbst wenn mit Blick auf die Erreichung der Klimaziele

relativ große Übereinstimmungen bei den Akteuren existieren, die unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeitsleitplanken verfolgten Entwicklungspfade höchst divers sein können.

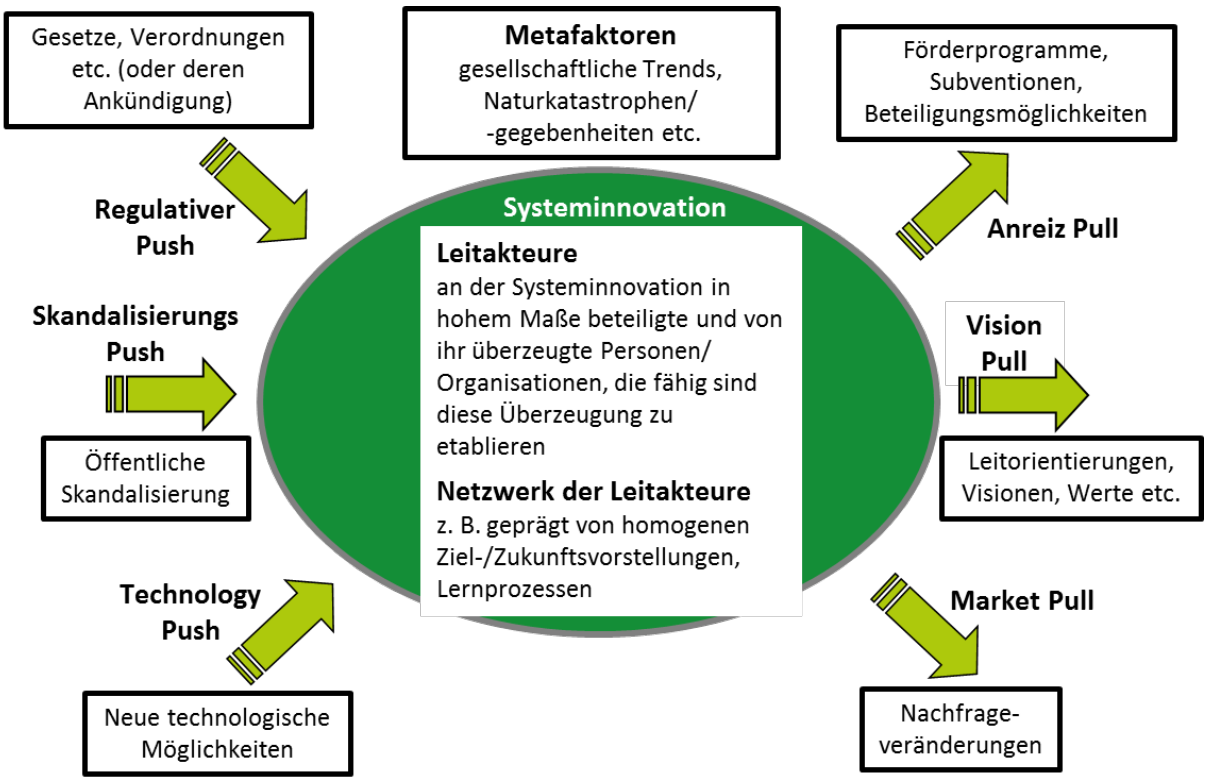


Abbildung 1.3: Schildkrötenmodell der richtungsgebenden Einflussfaktoren (Brand 2016 in Anlehnung an Ahrens et al. 2004; Ahrens et al. 2006; Brand 2013; Brand, Gleich et al. 2015; Fichter 2005; Stührmann et al. 2012).

Die Multi-Level-Perspektive eröffnet dagegen mit ihrem Blick auf Veränderungen in den Konstellationen zwischen Landschaft, Regimen und Nischen einen besseren Zugang zur zeitlichen Dynamik sowie zu den Grenzen der Innovationsfähigkeit. Das Schildkrötenmodell fokussiert auf Erfolgsbedingungen von gerichteten systemischen Innovationsprozessen. Mit seinem Fokus auf die Innovationsrichtung wurde bewusst über den bisher in der Innovationsforschung dominierenden Fokus auf die Innovationsfähigkeit hinausgegangen. Die im Schildkrötenmodell nicht abgebildeten retardierenden und widerstrebenden Aspekte im Innovationsprozess wie Pfadabhängigkeiten, Zielkonflikte und Gegenbewegungen **im Zeitablauf** sind dagegen in der Multi-Level-Perspektive angemessen repräsentierbar.

Im Fallbeispiel Power-to-Fuel wurden die Relevanz und das Zusammenspiel beider Zugänge besonders deutlich. Der Ausgangspunkt der Analyse war der Entwicklungsstand von P2F als Nischentechnologie. P2F konnte sich in der Nische entwickeln und hat seine Funktionsfähigkeit längst bewiesen. Dies war verbunden mit der Überzeugung, dass diese Technologie für das Gelingen der Energiewende im Mobilitätsbereich in Ergänzung der Elektrifizierung nötig ist und ihre Etablierung zur Steigerung der Resilienz des gesamten Energiesystems beitragen kann. Die ganz im Sinne der Multi-Level-Analyse zu klärende Fragestellung lautete demzufolge: Wie müssen die Rahmenbedingungen ausgestaltet werden, damit diese Technologie

aus der Nische herauskommt und erfolgreich in den Markt integriert werden kann? Im Fokus der Analyse stand damit sowohl der Status quo (einschließlich der gegenwärtigen Zug- und Schubkräfte) dargestellt im Schildkrötenmodell als auch die Zukunft, mit der Auslotung der technologischen Entwicklungsdynamiken und erforderlicher Fördersysteme zur Überwindung der retardierenden Elemente der Landschaft und des Regimes, dargestellt in der MLP.

Das Schildkrötenmodell strukturiert die Darstellung der richtungsgebenden Triebkräfte für den Transformationsprozess, gegliedert nach jeweils drei Push- (Regulativer, Skandalisierungs- und Technology Push) und drei Pullfaktoren (Anreiz, Vision und Market Pull), ergänzt um Metafaktoren und Leitakteure bzw. Netzwerk der Leitakteure (Brand 2016). In der Abbildung 1.4 sind die zum Zeitpunkt 2015 schon wirksamen Einflussfaktoren für das Fallbeispiel Power-to-Fuel exemplarisch dargestellt.

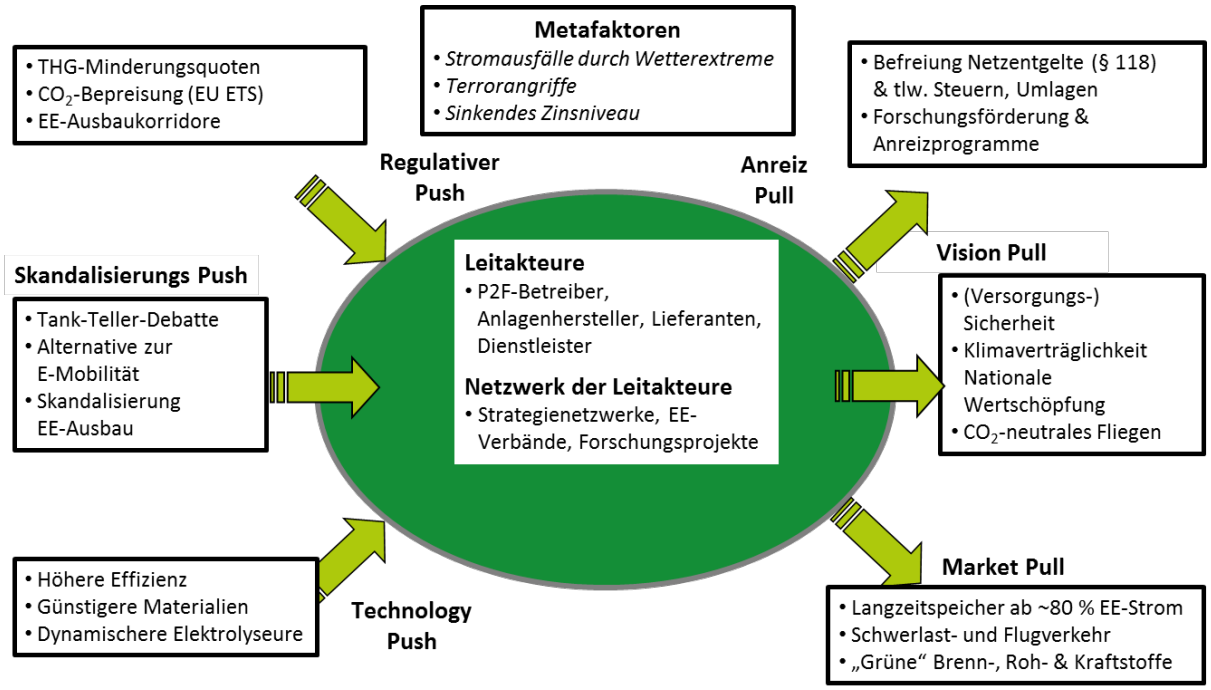


Abbildung 1.4: Zum Zeitpunkt Herbst 2015 schon existierende richtungsgebende Einflussfaktoren zur Etablierung von Power-to-Fuel Anlagen

Mithilfe der MLP konnte darüber hinaus dargestellt werden, wie eine Nischentechnologie sich in das sozio-technische Gesamtsystem hineinentwickeln kann („aus der Nische in den Mainstream“). Die Bedeutung, die dieses Upscaling für das Gesamtsystem hat, wird in der Innovationsforschung bisher vor allem dahingehend betrachtet, dass andere sozio-technische Systeme und Akteure (bspw. Incumbents) auf diese Newcomer reagieren, ein typischer Fall von ‚strategic niche management‘ (Kemp et al. 1998).

Vor dem Hintergrund der Langfristigkeit des Umbauprozesses des Energiesystems ist die MLP geeignet, sowohl die Grobstrukturen der Veränderung des Energiesystems, als auch eine Grobabschätzung des Entwicklungspfades des Energiesystems in Richtung auf mehr Resilienz

darzustellen[11]. In der folgenden Abbildung 1.5 wurden in diese Darstellung die Momentaufnahmen der treibenden Kräfte mit Hilfe des Schildkrötenmodells integriert.

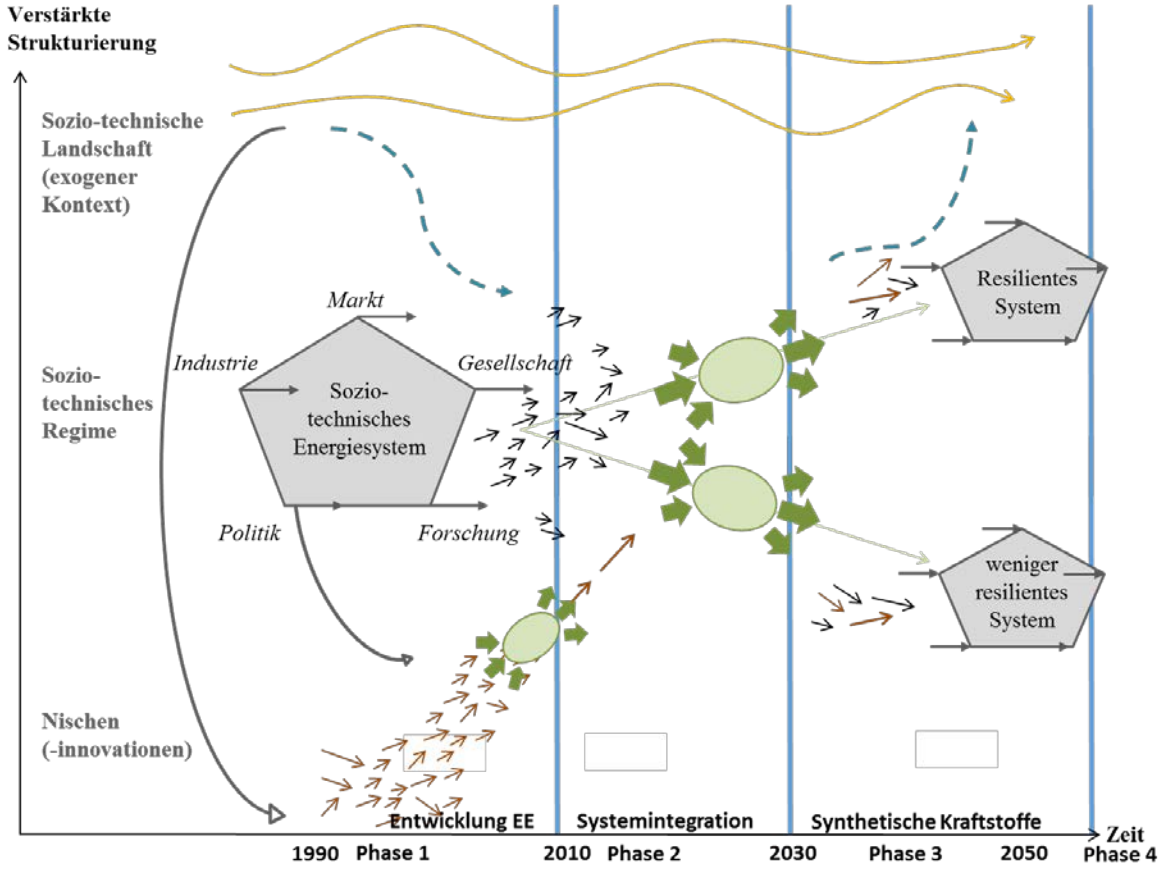


Abbildung 1.5 Transformationsprozess zu einem ‚Resilienten Energiesystem' im Rahmen der Multi-Level-Perspektive

In dieser Abbildung wird der Transformationsprozess des bestehenden (nicht nachhaltigen) Energiesystems skizziert. Es wird erkennbar, dass das soziotechnische System sich grundlegend wandeln muss, weil sich die Anforderungen an die Energiesysteme geändert haben. Wobei hier die Klimaziele und die Resilienz als Vorgaben aus der Landschaft heraus im Zentrum stehen. Sozusagen auf Vorrat entwickelte Nischentechnologien, wie z.B. Power-to-Fuel, wachsen dabei in die Rolle eines wesentlichen Bausteins dieses Prozesses hinein.

Dreiebenenmodell von Leitorientierungen – Weltbilder, Leitkonzepte und Gestaltungsleitbilder

Schon im Schildkrötenmodell der richtungsgebenden Einflussfaktoren wurde ein besonderes Augenmerk auf die Einflussmöglichkeiten zivilgesellschaftlicher Akteure gelegt und zwar sowohl negativ durch Skandalisierung und Dystopien, als auch positiv durch Leitkonzepte und Utopien. Leitkonzepte können in komplexen systemischen Innovationsprozessen Komplexität

[11] Im Kontext der MLP wird insbesondere die zeitliche Dimension des Wandels (auch der Strukturen) adressiert, die im Kontext der „Schildkröte", als eher zeitpunktorientierte Betrachtung der Transformationsdynamiken, nicht adäquat abgebildet werden kann.

reduzieren, Orientierung geben und motivieren sowie die Aktivitäten der verschiedenen Akteure zusammenführen und synchronisieren (Brand 2016). Gegenstand der innovationstheoretischen Untersuchung war die Frage, auf welche Weise Leitkonzepte in komplexen Innovationsprozessen wirken, und ob bzw. wie sie sich für das Gelingen der großen Transformation Energiewende einsetzen lassen. Hierfür bedienten wir uns eines weiteren Modells das von Brand (2016) entwickelt wurde:

Es handelt sich um das **Drei-Ebenen-Modell von Leitorientierungen**. Es lässt aus guten Gründen den eingeführten Begriff des Leitbildes hinter sich und nimmt eine Differenzierung in drei unterschiedliche Ebenen von Leitorientierungen entlang der Kriterien Generalisierungsniveau, zeitlicher Bezug, Realitätsbezug sowie räumliche, zeitliche und gesellschaftliche Reichweite vor (vgl. Abbildung 1.6).

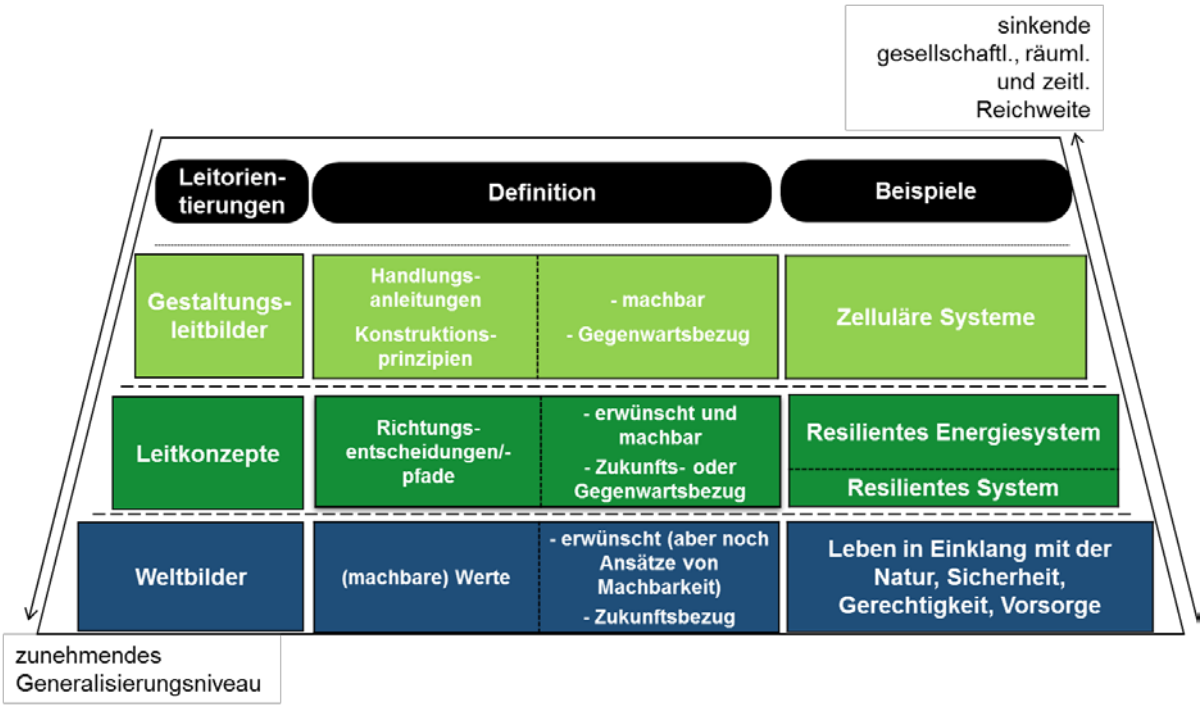


Abbildung 1.6: Dreiebenenmodell von Leitorientierungen (in Anlehnung an Brand 2016)

Die Möglichkeiten und Grenzen einer ‚leitorientierungsgestützten Technologie- bzw. Systemgestaltung' lassen sich nur angemessen erfassen, wenn die dahinter liegenden drei Ebenen, differenziert nach Weltbildern, Leitkonzepten und Gestaltungsleitbildern, in ihren Interaktionen zwischen emotionaler Aufladung und praktikabler Spezifizierung verstanden werden. Leitkonzepte zeichnen sich durch die Verbindung von Wünschbarkeit und Machbarkeit aus und unterscheiden sich dadurch von Visionen oder Utopien. In Weltbildern ist im Vergleich dazu die Wünschbarkeit und in den Gestaltungsleitbildern die Machbarkeit stärker akzentuiert.

Agentenbasierte Modellierung

Es wurde schon erwähnt, dass mit dem zukunftsorientierten ausgefüllten Schildkrötenmodell für das Fallbeispiel Power-to-Fuel eine sehr gute Ausgangsposition geschaffen werden konnte

für die agentenbasierte Modellierung (ABM) als drittem Modelltyp. Die ABM hatte zum Ziel, die erforderlichen Rahmenbedingungen zu identifizieren und zu strukturieren, um mit Hilfe von Simulationen die erfolgversprechendsten Bedingungen herauszufinden für die Entwicklung dieser Technologie heraus aus der Nische bis zu ihrer Etablierung auf dem Markt. Das Systemverständnis, welches mithilfe des Schildkrötenmodells, seinen Einflussfaktoren und Schlüsselakteuren erlangt wurde, konnte mit dem partizipativ erarbeiteten Modell quantitativ dargestellt und die jeweilige ‚Gewichtung' bzw. die Macht dieser Einflüsse in Simulationen geprüft werden (vgl. Kapitel 6.5.3). Anhand der Simulationen konnte so identifiziert werden, welche der Einflussfaktoren von besonderer Relevanz sind, um einen ökonomischen Erfolg dieser Nischentechnologie zu ermöglichen und welche Rolle ein sich änderndes Akteursverhalten spielen kann. Durch die gleichzeitige Berücksichtigung aller Einflussfaktoren (d.h. technischer, regulativer, sozialer und ökonomischer Natur) und die als realistisch erachtete Handlungszuweisung von bestehenden und möglicherweise neuen Marktakteuren konnten potentielle Entwicklungspfade für eine erfolgreiche ökonomische Etablierung skizziert werden.

1.8 Einordnung der Fallstudien im Projekt

Von heute aus mag es so aussehen, als ob die Entscheidung für die Fallstudien maßgeblich durch das Phasenmodell der Energiewende von Henning et al. (2015) bestimmt wurde. Die beiden regionalen Fallbeispiele, mit dem in ihnen verfolgten Ziel einer regionalen Selbstversorgung, passen sehr gut zum Beginn der zweiten Phase. Dort blicken sowohl zivilgesellschaftliche als auch ökonomische und politische Akteure auf Erfolge in der ersten Phase auf dem Weg zu ihrem Ziel 100% Erneuerbare im Bereich der Elektrizitätsversorgung zurück und stellen sich nun den Aufgaben der zweiten Phase, der Systemintegration. Das Fallbeispiel Power-to-Fuel konzentriert sich ergänzend schon auf die in der dritten Phase anstehenden Aufgaben der Sektorkopplung und der Umstellung auf Erneuerbare auch in denjenigen Mobilitätsbereichen, für die derzeit keine Elektrifizierungslösungen absehbar sind, also für den Schwerlast-, Schiffs- und Flugverkehr.

Tatsächlich wurde das Projekt RESYSTRA drei Jahre vor der Veröffentlichung des Phasenmodells geplant. Und tatsächlich entspricht auch heute noch Vieles von dem, was die Akteure in den Regionen Osterholz und Wolfhagen bewegt, weitgehend der Phase eins, also der Etablierung von Energiewandlungsanlagen auf der Basis erneuerbarer Energien und damit dem Ersetzen der fossilen Stromerzeugung. Und tatsächlich stand in der Antragsphase vor fünf Jahren auch noch nicht Power-to-Fuel, sondern Power-to-Gas auf der Agenda, mit Fokus auf die damit verbundenen Möglichkeiten der Speicherung von überschüssigem Windstrom. Erst im Laufe des Projekts wurde immer deutlicher, dass eine Rückverstromung aufgrund des schlechten Gesamtwirkungsgrads nur ausnahmsweise sinnvoll sein dürfte, und dass für den Einsatz von synthetischen Kraftstoffen in den nach heutigem Wissen kaum elektrifizierbaren

Bereichen ein erwartbarer Überschussstrom bei weitem nicht ausreichen wird. Für diesen Zweck wird vielmehr ein neuer gewaltiger Ausbauschub der EE-Anlagen nötig sein.

Von Anfang an standen die möglichen Beiträge der Fallbeispiele zu einem resilienteren Energiesystem im Vordergrund, insbesondere eine Resilienz steigernde hohe Selbstversorgung in den Regionen, eine intelligente Kopplung der leitungsgebundenen Energiesysteme und nicht zuletzt auch die guten Speichermöglichkeiten von Treibstoffen (und Methan) im Vergleich zu Wasserstoff insbesondere für Mobilität und Wärmezwecke. Es wurden in den Fallbeispielen also folgende Fragen verfolgt:

Wie müssen die sozio-technischen Energiesysteme (i) konzipiert werden und wie müssen (ii) die Transformationen in den unterschiedlichen Phasen der Energiewende gestaltet werden, damit sich ‚Resiliente Energiesysteme' sowohl in den Fallbeispiel-Regionen als auch mit Fokus auf Mobilität auf nationaler Ebene herausbilden können?

In der *Fallstudie Power-to-Fuel* wurde ausgelotet, unter welchen Bedingungen die synthetischen Treibstoffe marktfähig werden können, wobei unterstellt wurde, dass die Diversifizierung der Energieträger, ihre Speicherfähigkeit sowie eine intelligente Kopplung zwischen den leitungsgebundenen Energieinfrastrukturen einen Beitrag zur Resilienzsteigerung im gesamten Energiesystem leisten können. Im Rahmen der Fallstudie wurde herausgearbeitet, welche Bedingungen für eine erfolgreiche Entwicklung und letztlich auch Durchsetzung entsprechender Technologien erforderlich sind, und welche Rolle den Regulierungs- und Fördersystemen dabei zukommt. Darüber hinaus wurde mit einer strukturellen Vulnerabilitätsanalyse überprüft, ob Power-to-Fuel den gestellten Anforderungen, also den zu erbringenden Systemleistungen, langfristig überhaupt gerecht werden kann. Dabei ging es einerseits insbesondere um die Überprüfung der Machbarkeit dynamischer, dezentraler Konzepte zur Überschussstromverwertung sowie andererseits um die Auslotung der Möglichkeiten und Grenzen einer Hoch-Skalierung für die bundesweite Brenn-, Kraft- und Rohstoffversorgung.

Regionale Fallstudien: In ähnlicher Form gilt dies auch für die Fallstudien zur regionalen Selbstversorgung, in denen über den Selbstversorgungsgedanken und den Dezentralisierungsansatz hinaus im Projektverlauf zunehmend das Subsidiaritätsprinzip und der Aufbau eines zellularen Energiesystems[12] als Beitrag zur Resilienzsteigerung des regionalen Energiesystems in den Fokus gerieten.

Im Bereich dieser Fallstudien wurde im Verlauf des Projekts immer deutlicher, dass der zellulare Ansatz ein Stück weit weg führt von den räumlichen Abgrenzungen der Beispielregionen. Die Ausdehnung der Zellen kann nicht angemessen durch die räumliche Dimension definiert

[12] Vgl. die Publikation des VDE zu diesem Thema („Der zellulare Ansatz", siehe Benz et al. (2015)), in der mit einem greenfield planning Ansatz (wie würde man im hier und heute ein System planen, wenn man von null anfangen könnte) ein entsprechender Vorschlag unterbreitet wird.

werden. Die Größe einer ‚Zelle' muss vielmehr nach dem Prinzip ‚scale follows function' durch die jeweils betrachtete Funktion definiert werden.

Alle drei Fallstudien standen aber nicht zuletzt auch im Fokus der Innovationsanalyse, also unter der Fragestellung, wie die große Transformation gelingen kann und welche Rolle dabei Leitkonzepte spielen können. Die beiden Fallbeispiele zur regionalen Selbstversorgung und das Fallbeispiel Power-to-Fuel unterscheiden sich nämlich deutlich im Innovationstyp. Die regionalen Fallbeispiele können eher als Market Pull- (bzw. sozio-ökonomische Innovation mit dezentralen z.T. neuen Akteuren) das Fallbeispiel Power-to-Fuel hingegen kann – zumindest zum gegenwärtigen Zeitpunkt – eher als Technology Push-Innovation (bzw. technische Innovation mit eher zentralen und z.T. etablierten Akteuren) eingestuft werden. Es ging also im Sinne der Innovationsforschung auch darum, im Rahmen der Dynamiken der Energiewende auf der regionalen und der nationalen Ebene fördernde und hemmende Faktoren auszuloten. Dabei ging es nicht nur um Rahmenbedingungen, vielmehr wurden insbesondere die handelnden Akteure, ihre Handlungsmöglichkeiten, ihre Motive bzw. Leitorientierungen sowie ihr tatsächliches Handeln in den Blick genommen.

1.9 Literatur Kapitel 1

Ahrens, A., Braun, A., Effinger, A., Gleich, A. von, Heitmann, K. & Lißner, L. (2004). *Risikominderung in der Wertschöpfungskette als Innovationsprozess. Rahmenbedingungen und Akteure der Gefahrstoffsubstitution* (BMBF-Projekt SubChem Endbericht), Bremen/Hamburg.

Ahrens, A., Braun, A., Gleich, A. von, Heitmann, K., Lißner, L., Effinger, A., Weiß, M. & Wölk, C. (2006). *Hazardous chemicals in products and processes. Substitution as an innovative process* (Sustainability and innovation). Heidelberg, New York: Physica-Verlag.

Beck, U. (1986). *Risikogesellschaft. Auf dem Weg in eine andere Moderne* (Edition Suhrkamp, 1365 = N.F., 365, Erstausg., 1. Aufl.). Frankfurt am Main: Suhrkamp.

Benndorf, R., Bernicke, M., Bertram, A., Butz, W. & Dettling, F. e. a. (2013). *Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Benz, T., Dickert, J., Erbert, M., Erdmann, N., Johae, C., Katzenbach, B., Glaunsinger, W., Müller, H., Schegner, P., Schwarz, J., Speh, R., Stagge, H. & Zdrallek, M. (Juni 2015). *Der zellulare Ansatz. Grundlage einer erfolgreichen, regionenübergreifenden Energiewende* (VDE ETG, Hrsg.), Frankfurt am Main.

BMVI - Bundesministerum für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.). (März 2016). *Bundesverkehrswegeplan 2030*, Berlin. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/BVWP/bvwp-2030-gesamtplan.pdf?__blob=publicationFile.

Borgert, S. (Hrsg.). (2013). *Resilienz im Projektmanagement. Bitte anschnallen, Turbulenzen! Erfolgskonzepte adaptiver Projekte*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Brand, U. (2013). *Abschlussbericht zum Umsetzungsbaustein 1: "Schaffung von gemeinsamer Identität und Verantwortung der Bewohner durch energie- und kosteneffiziente Sanierungs- und Entwicklungsplanung" – Teilprojekt: Analyse und prozessbegleitende Untersuchung der richtungsgebenden Einflussfaktoren. Projekt ZukunftsWerkStadt Leutkirch*. http://www.tecdesign.uni-bremen.de/typo3/fileadmin/user_upload/Ver%C3%B6ffentlichungen/ZukunftsWerkStadt_Leutkich_UniHB_VS2.pdf. Zugegriffen 01.04.2016.

Brand, U. (2016). *Leitkonzepte Nachhaltigkeit und Resilienz als Richtungsgeber in Transformationsprozessen von Energiesystemen*. Dissertation, Universität Bremen. Bremen.

Brand, U., Gleich, A. von & Wachsmuth, J. (2015). *Arbeitspapier zum Innovationsmodell Schildkröte 2.0* (Arbeitspapier Projekt Resystra), Bremen.

Endreß, M. & Maurer, A. (Hrsg.). (2015). *Resilienz im Sozialen. Theoretische und empirische Analysen*. Wiesbaden: Springer VS.

Fichter, K. (2005). *Interpreneurship. Nachhaltigkeitsinnovationen in interaktiven Perspektiven eines vernetzenden Unternehmertums* (Theorie der Unternehmung, Bd. 33). Marburg: Metropolis-Verl.

Fouquet, R. & Pearson, P. J. (2012). Past and prospective energy transitions. Insights from history. *Energy Policy 50,* 1–7. doi:10.1016/j.enpol.2012.08.014

Geels, F. W. (2004). Understanding system innovations: a critical literature review and a conceptual synthesis. In B. Elzen, F. W. Geels & K. Green (Hrsg.), *System innovation and the transition to sustainability: theory, evidence and policy* (S. 19–47). Cheltenham: Edward Elgar.

Gleich, A. von & Gößling-Reisemann, S. (2015). Resilienz als Leitkonzept für regionale Entwicklung und Klimaanpassung. In A. von Gleich & B. Siebenhüner (Hrsg.), *Regionale Klimaanpassung im Küstenraum* (S. 20–41). Marburg: Metropolis-Verlag.

Gleich, A. von, Gößling-Reisemann, S., Stührmann, S. & Woizeschke, P. (2010) Resilienz als Leitkonzept – Vulnerabilität als analytische Kategorie. In K. Fichter, A. von Gleich, R. Pfriem & B. Siebenhüner (Hrsg.), *Theoretische Grundlagen für Klimaanpassungsstrategien* (S. 13–49). Bremen/Oldenburg.

Grunwald, A. (2016, April). *Zukunft von Sicherheitslösungen: Technik als Garant der Sicherheit?* BMBF Workshop "Zivile Sicherheit", Berlin.

Hemmelskamp, J. (1999). *Umweltpolitik und technischer Fortschritt. Eine theoretische und empirische Untersuchung der Determinanten von Umweltinnovationen : mit 44 Tabellen*. Heidelberg: Physica-Verlag.

Henning, H.-M., Palzer, A., Pape, C., Borggrefe, F., Jachmann, H. & Fischedick, M. (2015). Phasen der Transformation des Energiesystems. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen 65* (1/2), 10–13. https://epub.wupperinst.org/files/5794/5794_Henning.pdf.

Höhne, N., Kuramochi, T., Sterl, S. & Röschel, L. (Februar 2016). *Was bedeutet das Pariser Abkommen für den Klimaschutz in Deutschland. Kurzstudie von NewClimate Institute im Auftrag von Greenpeace* (NewClimate, Hrsg.).

Huber, J. (1995). *Nachhaltige Entwicklung. Strategien für eine ökologische und soziale Erdpolitik*. Berlin: Ed. Sigma.

Kemfert, C., Gerbaulet, C. & Hirschhausen, C. von. (2016). Stromnetze und Speichertechnologien für die Energiewende - Eine Analyse mit Bezug zur Diskussion des EEG 2016 // Stromnetze und Speichertechnologien für die Energiewende. Eine Analyse mit Bezug zur Diskussion des EEG 2016; Gutachten im Auftrag der Hermann-Scheer-Stiftung *112*.

Kemp, R., Schot, J. W. & Hoogma, R. (1998). Regime shifts to sustainablilty through processes of niche formation: the approach of strategic niche management. *Technology analysis and strategic management 10* (2), 175–196.

Klaus, T., Vollmer, C., Werner, K., Lehmann, H. & Müschen, K. (Juli 2010). *Energiezeil 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen* (Umweltbundesamt, Hrsg.), Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/energieziel_2050.pdf.

Klemmer, P., Lehr, U. & Löbbe, K. (1999). *Umweltinnovationen. Anreize und Hemmnisse* (Innovative Wirkungen umweltpolitischer Instrumente, Bd. 2, 1. Aufl.). Berlin: Analytica.

Koch, M., Bauknecht, D. & Heinemann, C. (2012). Der zukünftige Wert von Smart Grids im deutschen Stromsystem–eine modellgestützte Szenarienanalyse von 2010 bis 2030. In VDE (Hrsg.), *Kongress Smart Grid.* VDE Verlag GmbH.

Lehr, U. & Löbbe, K. (1999). Umweltinnovationen - Anreize und Hemmnisse. Ein Überblick über die innovativen umweltpolitischen Instrumente. *Ökologisches Wirtschaften 99* (2), 13–15.

Löhr, D. (2009). Resilienz vs. Effizienz – ein kritischer Blick auf die Umweltökonomie. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung 21* (4), 393–406. doi:10.1007/s12302-009-0055-3

Nitsch, J. (2016, 17. Februar). *Die Energiewende nach COP 21. Aktuelle Szenarien der deutschen Energieversorgung*. Kurzstudie für den Bundesverband Erneuerbare Energien e.V., Stuttgart. https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Studien/Joachim_Nitsch_Energiewende_nach_COP21.pdf.

Öko-Institut e.V. & Fraunhofer ISI (Hrsg.). (2015, 18. Dezember). *Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht*. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Berlin. https://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf.

Peter, S. (September 2013). *Modellierung einer vollständig auf erneuerbaren Energien basierenden Stromerzeugung im Jahr 2050 in autarken, dezentralen Strukturen* (Umweltbundesamt, Hrsg.) (Climate Change Nr. 14), Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/climate_change_14_2013_modellierung_einer_vollstaendig_auf_erneuerbaren_energien.pdf.

Quaschning, V. (2016a). *Sektorkopplung durch die Energiewende. Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zum Erreichen der Pariser Klimaschutzziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung*. : Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin.

Quaschning, V. (2016b, 20. Juni). *Sektorkopplung durch die Energiewende. Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zum Erreichen der Pariser Klimaschutzziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung* (Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin, Hrsg.). : Ingenieurwissenschaften Energie und Information. http://pvspeicher.htw-berlin.de/.

Referat Öffentlichkeitsarbeit. (November 2016). *Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung* (1. Aufl.) (BMUB - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Hrsg.), Berlin. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf.

Renn, O. (Hrsg.). (2017). *Das Energiesystem resilient gestalten. Szenarien - Handlungsspielräume - Zielkonflikte* (Energiesysteme der Zukunft). München: Deutsche Akademie der Technikwissenschaften.

Samadi, S., Lechtenböhmer, S., Prantner, M. & Nebel, A. (August 2014). *Vollständig auf erneuerbaren Energien basierende Stromversorgung Deutschlands im Jahr 2050 auf Basis in Europa großtechnisch leicht erschließbarer Potentiale – Analyse und Bewertung anhand von Studien* (Umweltbundesamt, Hrsg.) (Climate Change Nr. 27), Dessau-Roßlau.

Stührmann, S., Gleich, A. von, Brand, U. & Gößling-Reisemann, S. (2012). Mit dem Leitkonzept Resilienz auf dem Weg zu resilienteren Energieinfrastrukturen. In M. Decker, A. Grunwald & M. Knapp (Hrsg.), *Der Systemblick auf Innovation - Technikfolgenabschätzung in der Technikgestaltung* (Gesellschaft – Technik – Umwelt, Bd. 16, S. 181–192). Berlin: Edition Sigma.

Taleb, N. N. (2008). *Der Schwarze Schwan. Die Macht höchst unwahrscheinlicher Ereignisse* (1. Aufl.). München: Hanser.

Übertragungsnetzbetreiber. (2016, 30. Juni). *Genehmigung des Szenariorahmens für die Netzentwicklungspläne Strom 2017-2030*. https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/szenariorahmen_2030_genehmigung.pdf.

van Laak, D. (Docupedia-Zeitgeschichten, Hrsg.). (2010). Planung, Planbarkeit und Planungseuphorie. Version 1.0. Docupedia-Zeitgeschichte: Begriffe, Methoden und Debatten der zeithistorischen Forschung. https://docupedia.de/images/b/b1/Planung.pdf.

WBGU. (2016). *Der Umzug der Menschheit. Die transformative Kraft der Städte : Zusammenfassung*.

WCED - World Commission on Environment and Development. (1987). *Our Common Future. Report of the World Commission on Environment and Development. Brundtland-Report.* (Oxford paperbacks). Oxford: Oxford University Press.

Wink, R. (Hrsg.). (2016). *Multidisziplinäre Perspektiven der Resilienzforschung*. Wiesbaden: Springer.

2 Die Leitkonzepte Resilientes System, Resilientes Sozio-Technisches System und Resilientes Energiesystem

Wie bei der Vorstellung des Dreiebenenmodells in der Einleitung schon erwähnt, sind die Leitkonzepte in der Mitte zwischen Werten/Weltbildern und Gestaltungsleitbildern angesiedelt. Leitkonzepte geben auf dieser mittleren Abstraktionsebene die Richtung vor und sind deutlich spezifischer und handlungsleitender als die darunterliegenden Werte und Weltbilder, von denen sie hauptsächlich ihre normative ‚Aufladung' erfahren. Leitkonzepte sind zudem der Ausgangspunkt für die Erarbeitung der darüber liegenden Gestaltungsleitbilder. Gestaltungsleitbilder sind auf bestimmte Gegenstandsbereiche bezogen und damit noch einmal sehr viel spezifischer. Und sie enthalten sehr viel präzisere Handlungsanleitungen bis hin zu Pflichtenheften. In den folgenden Kapiteln soll zunächst auf biomimetischem Wege das Leitkonzept „Resilientes System" erarbeitet werden. Sodann soll, basierend auf den Erfahrungen und Lernprozessen im Risikomanagement kritischer Infrastrukturen, das Leitkonzept „Resilientes Sozio-Technisches System" erarbeitet werden. Beide zusammen bilden die Grundlage für die Erarbeitung des Leitkonzepts „Resilientes Energiesystem". Die darauf wiederum aufbauende Erarbeitung der Gestaltungsleitbilder Resilientes Regionales Energiesystem für den Landkreis Osterholz und die Stadt Wolfhagen mit einer Zeitperspektive bis 2030 sowie des Gestaltungsleitbildes Power-to-Fuel auf nationaler Ebene mit einer Zeitperspektive bis 2050 erfolgt in den Kapiteln zu diesen Fallbeispielen.

2.1 Resiliente Systeme als biomimetisches Leitkonzept

Mit dem für die Gestaltung sozio-technischer Systeme geeigneten Leitkonzept „Resiliente Systeme" sollen Bauprinzipien und Leistungen beschrieben werden, die dazu beitragen, dass ein System zugleich resistent, adaptiv und innovationsfähig ist. Zur Erarbeitung entsprechender Gestaltungs- und Bauprinzipien können zwei Herangehensweisen gewählt werden: eine theoretische (sozusagen a priorische) und eine erfahrungsbasierte (a posteriori). Im theoretischen Zugang werden – top down auf der Basis von Evolutions- und Ökosystemtheorien - Erkenntnisse zu Resilienzprinzipien aus der Natur zusammengefasst. Im Zuge des ‚biomimetischen Abstraktionsprozesses' (vgl. Gleich, Pade, et al. 2010) werden sie hinsichtlich einer möglichen Übernahme als Resilienz steigernde Konstruktionsprinzipien für die Gestaltung sozio-technischer Systeme geprüft. Zum zweiten werden – bottom up – Erfahrungen aus dem Risikomanagement und aus Vulnerabilitätsanalysen in den Bereichen Lieferkettenmanagement, Informations- und Kommunikationstechnologien und Energiesysteme ausgewertet und ebenfalls auf ihre Tauglichkeit für die Formulierung von Resilienz steigernden Konstruktionsprinzipien geprüft.

2.1.1 Resilienz als biomimetisches Konzept

Zum Begriff der Resilienz gibt es verschiedene Definitionen, die sich auch auf unterschiedliche Gegenstandsbereiche (Systeme) beziehen. Wir arbeiten mit dem Resilienzkonzept in der evolutions- und ökosystemtheoretischen Tradition und wollen das Konzept für die Gestaltung sozio-technischer Systeme nutzen. Wobei wir Resilienz nicht auf die ‚Erhaltung von Systemen', sondern auf die ‚Aufrechterhaltung ihrer Systemdienstleistungen' beziehen. Dies hat den Vorteil, dass die partizipativen Diskurse über die Quantitäten und Qualitäten der erwarteten bzw. gesellschaftlich erwünschten Systemdienstleistungen ein Stück weit separiert werden können von den eher ingenieurswissenschaftlichen Diskursen über die ‚Architektur' resilienter Systeme, die solche Dienstleistungen erbringen sollen.

Die folgenden Beschreibungen skizzieren in diesem Sinne drei sehr verbreitete Verständnisse von Resilienz (Folke 2006):

- *Engineering Resilience* (auch gerne als „Stehaufmännchenprinzip" bezeichnet) bezieht sich auf die Wiederherstellung eines stabilen Gleichgewichts eines Systems und damit verbunden auf seine Regenerationszeit, die nach einer Störung notwendig ist, bis die Systemfunktionen (bzw. Dienstleistungen) wieder zur Verfügung stehen (Folke 2006; Oliver et al. 2015). Engineering Resilience zielt somit auf die Effizienz der Systemfunktionen („efficiency of function") (Gunderson und Holling 2002; Holling 1996).
- Frühe Definitionen Ö*kologischer Resilienz* verstanden Holling und Gunderson hingegen als die Fähigkeit von Ökosystemen, zukünftige, noch unbekannte Ereignisse absorbieren und verarbeiten zu können (Gunderson und Holling 2002; Holling 1973; Holling 1986). Im Unterschied zur Engineering Resilience ist Ecological Resilience weniger durch die Regenerationszeit, als vielmehr durch das Ausmaß der Störungen gekennzeichnet, welche ein System verkraften kann, ohne seine Systemfunktionen (bzw. Dienstleistungen) einzubüßen. Oliver et al. zufolge ist *Ökologische Resilienz* hinsichtlich der Systemstruktur keine konservative Definition, weil sie die Möglichkeit verschiedener Gleichgewichtszustände berücksichtigt und bei der Anpassung an veränderte Umgebungsbedingungen eine weit reichende Reorganisation des betroffenen Systems zulässt (Oliver et al. 2015). Aber auch Pufferkapazitäten oder ganz einfach die Robustheit (gegenüber Schocks) spielen eine Rolle.
- *Sozio-Ökologische Resilienz* umfasst, ebenso wie die Resilienz im Ökosystem, Widerstands- und adaptive Kapazitäten, versteht aber –nicht zuletzt aufgrund der Integration der menschlichen Akteure ins betrachtete System - auch die Lern- und Innovationsfähigkeit als notwendige Eigenschaften zur Aufrechterhaltung der Systemdienstleistungen (Folke 2006).

2.1.2 Resilienz als Vorbereitung auf Überraschungen

Die Gestaltung Resilienter Systeme soll etwas leisten, was zunächst als absolute Unmöglichkeit erscheint: Eine Vorbereitung auch auf echte Überraschungen, auf absolut Unbekanntes. Dieser Ansatz eröffnet eine völlig neue Dimension im Diskurs über das Vorsorgeprinzip. Unsicherheiten im Risikodiskurs beziehen sich bislang vor allem auf die Eintrittswahrscheinlichkeit eines möglichen Störereignisses bzw. einer Gefährdung. Der Vorsorgediskurs dreht sich damit vor allem um die Frage, wie weitgehend man sich auch auf extrem unwahrscheinliche Ereignisse vorbereiten muss, bzw. ab welcher Unwahrscheinlichkeit man besser das sprichwörtliche Restrisiko in Kauf nimmt. Die Beantwortung dieser Frage wird kompliziert, wenn die Anzahl der extrem unwahrscheinlichen Ereignisse so stark akkumuliert, dass die Wahrscheinlichkeit für eines dieser Ereignisse gegen eins geht. Wirklich spannend wird es allerdings erst, wenn man über die Wahrscheinlichkeit nichts aussagen kann, weil man gar nicht weiß was denn geschehen könnte. Dazu gehen wir auf die andere Seite im Risikoterm (Risiko definiert hier als Funktion von Eintrittswahrscheinlichkeit und potenzieller Schadenshöhe). Was ist, wenn bezüglich des möglichen Störereignisses bzw. der Gefährdungsdimension nicht nur große Unsicherheit herrscht, sondern sogar völlige Ahnungslosigkeit, wenn wir also gar keine Idee davon haben, was auf uns zukommen könnte? Im Umgang mit komplexen Systemen ist diese Situation an sich nichts Ungewöhnliches. Komplexe Systeme können völlig überraschend reagieren. Prognosen sind nicht möglich. Es gibt keinen Zugang zu Informationen über die möglichen Folgen von Eingriffen. Dann bleibt nur der Blick auf das System selbst, unabhängig von bestimmten Störereignissen.

Erkenntnisse über eine vorsorgeorientierte Gestaltung Resilienter Systeme versuchen wir vor allem auf drei Wegen zu erlangen, womit der oben angesprochene erfahrungsbasierte Ansatz aus dem Risikomanagement durch zwei Arten der Vulnerabilitätsanalyse noch einmal ausdifferenziert wird. Wir unterschieden eine ereignisbezogene und eine strukturelle Vulnerabilitätsanalyse (VA) (Gleich, Gößling-Reisemann, Stührmann, Woizeschke 2010; Gößling-Reisemann, Stührmann et al. 2013). Bei der ereignisbezogenen VA wird von einem möglichen Störereignis ausgegangen. Es wird untersucht, inwieweit das betroffene System sensitiv gegenüber dem Störereignis ist, welche möglichen Folgen daraus resultieren, und über welche Anpassungskapazitäten das System zur Verarbeitung bzw. Bewältigung des Störereignisses verfügt. Daraus ergibt sich seine Vulnerabilität, und man kann daraufhin Gestaltungsoptionen entwickeln zur Verminderung dieser erkannten Vulnerabilität. Die strukturelle Vulnerabilitätsanalyse ist insofern ‚theoretischer', als sie auf die Annahme eines bestimmten Störereignisses verzichtet. Sie setzt weniger auf Lernen durch Erfahrung, sondern mehr auf Lernen auf der Basis einer Strukturanalyse und steht damit dem biomimetischen Ansatz näher. Nach dem Vorbild von ingenieurwissenschaftlichen Methoden wie der ‚Failure Mode and Effect Analysis' (FMEA) und der ‚Fault Tree Analysis' (FTA) (vgl. z.B. Schilling 2009, Eberhardt 2013) oder

auch nach dem Vorbild von ‚Stresstests', wie sie inzwischen im Finanzsektor angewendet werden (vgl. z.B. Klauck und Stegmann 2006), konzentriert man sich auf das System und versucht herauszufinden, wo dieses System Schwachstellen hat. Welches sind die Punkte, an denen das System ‚nachgeben' wird, welche Komponenten bzw. Relationen könnten ausfallen, wenn das System unter starken Druck bzw. Stress gerät? Auch auf der Basis der Erkenntnisse einer solchen Vulnerabilitätsanalyse lassen sich dann, ebenfalls unter Berücksichtigung möglicherweise schon vorhandener Anpassungskapazitäten zur Kompensation etwaiger Ausfälle, weiter gehende vorsorgeorientierte Gestaltungsoptionen entwickeln.

Der dritte und hier zunächst im Zentrum stehende Ansatz ist der biomimetische. In ihm wird auf die Jahrmillionen lange Erprobtheit und mehrdimensionale Optimierung lebender Systeme gesetzt. Es besteht die Hoffnung auf diesem Wege Vorbilder für risikoarme Konstruktionen zu erkennen, die nicht auf erfahrener Vulnerabilität basieren. Nun könnte man einwenden, die Jahrmillionen lange Erprobtheit sei doch nichts anderes als ‚Lernen aus schlechter Erfahrung', nur dass eben der Lernprozess ungewöhnlich lang war. Aber dieser Einwand entspricht einem falschen – quasi lamarckistischen – Verständnis von Evolution. Neues ist in der Evolution nicht das Produkt von schlechter oder guter Erfahrung und auch nicht das Ergebnis von Selektion. Neues ist das Produkt einer völlig ungerichteten chaotischen Erzeugung von Vielfalt durch Mutation und Rekombination. Erst die Selektion wählt daraus das Überlebensfähige aus. Danach erst beginnt auch das ‚Lernen' für Organismen (inklusive Epigenetik), Populationen und Ökosysteme, welches in der Evolution – je nach Organisationsstufe - eine ähnlich bedeutende Rolle in der Anpassung spielt. Die Anpassung durch Variation und Selektion ist also zu unterscheiden von der Anpassung durch Lernen. Durch zufällige Variation und nicht durch Lernen entstanden insbesondere diejenigen Elemente, Erfolgsfaktoren und Strukturprinzipien, von denen wir im biomimetischen Ansatz lernen wollen. Vor allem auf diesem Weg erscheint das an sich Undenkbare, eine Vorbereitung auf völlige Überraschungen als möglich.

2.1.3 Resilienz in der Evolutions- und Ökosystemtheorie

Wegen ihrer besonderen Bedeutung für die Weiterentwicklung des Resilienzbegriffs im technischen Bereich, der vor allem von der Jahrmillionen langen Erprobtheit und Optimierung lebender Systeme profitieren möchte, soll die Bedeutung von Resilienz im Bereich der Evolutions- und Ökosystemtheorie im Folgenden etwas ausführlicher diskutiert werden. Resilienz bezieht sich, dem Verständnis Hollings zufolge, auf die Fähigkeit, Störungen zu überstehen, die eigene Selbstorganisation zu bewahren und Schwellenwerte irreversibler Schädigungen zu vermeiden. Stabile Gleichgewichtszustände stehen bei diesem Verständnis nicht mehr im Mittelpunkt, sondern eher ein evolutives Verständnis des Systemverhaltens (Molyneaux et al. 2016). Variabilität gehört somit zu den Kennzeichen eines resilienten Systems und manifestiert sich Holling zufolge prozedural in Form eines adaptiven Zyklus mit den Schritten a) Wachstum

und Ausnutzung, b) Konservierung und wachsende Anfälligkeit, c) Kollaps und Freisetzung sowie d) Umgestaltung im Sinne einer Erneuerung (Holling 1986).

In einem Review zu Biodiversität und Resilienz diskutieren Oliver et al. grundlegende Elemente und Funktionen von Ökosystemen auf unterschiedlichen Ebenen, angefangen von Organismen und Arten (Physiologie und Verhalten) über Gemeinschaften und Populationen bis hin zu Netzwerken und Interaktionen mit Landschaften. Ihr Verständnis von Resilienz konzentriert sich auf die für den Erhalt von Ökosystemfunktionen und –dienstleistungen grundlegenden Fähigkeiten zum Widerstand und zur Regeneration. “In this case the most relevant definition of resilience is the degree to which an ecosystem function can resist or recover rapidly from environmental perturbations, thereby maintaining function above a socially acceptable level” (Oliver et al. 2015 mit Bezug auf Brand 2009). Besonders interessant ist ihre Sicht auf Netzwerke: “In general highly connected nested networks dominated by generalized interactions are less susceptible to cascading extinction effects and provide more resistant ecosystem functions, in contrast to networks dominated by strong specialized interactions” (Oliver et al. 2015, S. 678).

Oliver et al. (2015) zufolge sind für die ökologische Resilienz in Ökosystemen vor allem folgende Eigenschaften von Bedeutung:

- Auf der Ebene der Arten durch:
    - geringe Sensitivität gegenüber Veränderungen
    - hohe Vermehrungsrate (Populationswachstum)
    - hohe Anpassungsfähigkeit durch phänotypische Plastizität
    - hohe genetische Variabilität und Dispersion (Portfolioeffekt)
    - keine Wachstumsreprimierung bei geringen Populationsdichten (Allee Effekt)
- auf der Ebene der Gemeinschaften von Arten durch:
    - geringe Korrelation zwischen den von Veränderungen betroffenen Eigenschaften (traits) und den für die Ökosystemfunktionen wichtigen Eigenschaften
    - hohe funktionelle Redundanz (verbunden mit unterschiedlichen Reaktionen auf Umweltstörungen)
    - Hohe Variabilität (α, β, γ-Variabilität, vgl. Wang und Loreau 2014)
- auf der Ebene der Netzwerke durch:
    - eng verbundene verschachtelte Netzwerke (nested networks) dominiert durch generalisierte Interaktionen
- auf der Ebene der Landschaften durch:

- große Heterogenität der Umgebung
- viele landschaftsräumliche Verbindungen
- möglichst gleichmäßige Verteilung
- Großräumigkeit, die meist auch Ressourcenreichtum verspricht
- Potenzial für die Existenz alternativer stabiler Zustände
- Geräumigkeit, die im Allgemeinen Ressourcenwohlstand verspricht.

Die Konzepte Diversität und Redundanz müssen in diesem Zusammenhang noch binnendifferenziert werden. Das ökosystemische Verständnis subsumiert unter dem Begriff der Diversität die *funktionelle Diversität* und die *Diversität der Systemantworten* (Bernhardt und Leslie 2013; Carpenter et al. 2012). Ersteres beschreibt die natürliche Variabilität der Funktionen der Objekte eines Ökosystems (Carpenter et al. 2012). Unter diesem Begriff können auch Biodiversität, räumliche Heterogenität und Überlebensstrategien als Beispiele angeführt werden (Biggs et al. 2012). Die Diversität der Systemantworten beschreibt dagegen ähnliche Objekte mit gleicher Systemfunktion, die jedoch unterschiedlich auf ein Ereignis reagieren (Carpenter et al. 2012). Stirling (2007) verweist auf die ubiquitäre Verwendung des Begriffs der Diversität und unterbreitet den Vorschlag, Diversität in die drei grundlegenden Elemente Vielfalt (Variety), Verhältnis (Balance) und Ungleichheit (Disparity) zu unterteilen. Die Vielfalt entspricht dabei der Anzahl der verschiedene Typen/Arten in einem System, die mit steigender Anzahl zur Höhe der Diversität betragen. Das Verhältnis beschreibt die Anteile der verschiedenen Arten in Relation zu einander, d.h. wie hoch ist der Anteil vom Typ A im System etc. Der Vergleich mit den Ausprägungen der Typen stellt dann die Möglichkeit zu Beurteilung der Diversität dar. Je gleichmäßiger die verschiedenen Typen vertreten sind, desto größer ist die Diversität. Der letzte Aspekt der Ungleichheit beschreibt die Unterschiede der Typen untereinander – je unterschiedlicher die Typen sind, desto höher ist die Diversität. (vgl. Stirling 2007).

Im Bereich der Redundanz wird zwischen physischer und funktioneller bzw. diversitärer Redundanz unterschieden. Auf der funktionellen Redundanz beruht die sogenannte „Versicherungshypothese“, nach der eine größere biologische Vielfalt in Ökosystemen auch eine stabilisierende Wirkung auf diese Systeme hat. Dabei wird davon ausgegangen, dass es zwischen den Arten überlappende Funktionsspektren gibt. Im Falle der Beeinträchtigung einer Art kann eine andere Art deren Funktion im Ökosystem übernehmen, weil sie nicht dieselben Abhängigkeiten von Umwelteigenschaften besitzt.

(Molyneaux et al. 2016) betonen unter Verweis auf Allen und Holling (2010), dass für die Aufrechterhaltung eines ökosystemaren Gleichgewichtszustandes unter sich verändernden Umgebungsbedingungen vor allem die evolutionäre Innovationsfähigkeit eine Schlüsselfunktion

für die notwendige Anpassungsfähigkeit darstellt. Die daraus resultierende Vielfalt und funktionelle Diversität der Spezies eines Ökosystems trägt vor allem wegen ihrer vielen möglichen Kombinationen, aber auch aufgrund der Möglichkeit zur Kompensation der Funktionen der Spezies untereinander (wegen ihrer überlappenden Funktionsspektren), zum Erhalt des Systems bei (Peterson et al. 1998 zitiert in Molyneaux et al. 2016). Biodiversität wird als notwendig für die Anpassung eines Ökosystems unter sich verändernden Umweltbedingungen angesehen, obwohl bei stabilen Umgebungsbedingungen bereits ein sehr geringes Maß an Diversität ausreicht, um die notwendigen Funktionen aufrecht zu erhalten (Oliver et al. 2015).

2.1.4 Resilienz im biomimetischen Abstraktionsprozess

Biomimetik verfolgt als Ziel das Lernen von der Natur. Als Vorteile eines biomimetischen Vorgehens und biomimetischer Lösungen werden oft genannt: 1. Eine enorme *kreative Ausweitung des Suchraums* nach Innovationen durch einen Blick auf Lösungen, die die Natur im Zuge ihres Evolutionsprozesses nach dem Prinzip von Versuch und Irrtum entwickelt hat. Dadurch konnten auch etliche kontra-intuitive Lösungen gefunden werden, die dominierenden ingenieurwissenschaftlichen Vorstellungen völlig widersprachen (z.B. nicht glatte sondern raue, nanostrukturierte Oberflächen zur Selbstreinigung und zur Reduktion von Strömungswiderständen). 2. *Nachhaltige Lösungen* durch a) die stoffliche und energetische Nutzung des unmittelbar Vorhandenen (Konzentration auf weit verbreitete Stoffe und niederexergetische Energiequellen) und b) den effizienten Umgang mit diesen Ressourcen sowie 3. *Risikoarme bewährte Lösungen* aufgrund ihrer Jahrmillionen langen evolutionären Erprobtheit.

Beim Versuch eines solchen ‚Lernens von der Natur' lassen sich drei Ebenen unterscheiden:

1. Das Lernen von den Ergebnissen der Evolution. Hier dominieren bisher Form-Funktions-Beziehungen (Flugzeugflügel für Auftrieb, Klettverschluss oder Geckofuß für Haftung, Lotusblatt für Selbstreinigung, …).

2. Das Lernen vom Evolutionsprozess als Prozess einer mehrdimensionalen Optimierung (topologische Optimierung, Computer Aided Optimization, ‚Soft Kill Option (Mattheck 1998) genetische Algorithmen, Ameisenalgorithmus, Evolutionstechnik, (Rechenberg 1994) etc.).

3. Das Lernen von den Erfolgsprinzipien der Evolution (Diversität, Homöostase, Selbstorganisation, Selbstheilung,… vgl. von Gleich, Pade, et al. 2010).

Vor allem diese Erfolgsprinzipien der Evolution liefern wichtige Hinweise für eine vorsorgeorientierte Gestaltung ‚Resilienter Systeme'. Zu nennen ist hier erstens der *Ressourcenopportunismus,* also die Nutzung des unmittelbar Vorhandenen (insb. Sonnenenergie sowie Rohstoffe aus der unmittelbaren Umgebung, Wasser, CO_2, Kalk usw.) und auch eine gewisse Ressourcenbreite und –varietät für den Fall, dass bestimmte Ressourcen ausfallen. Zum zweiten geht es um *Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft*, wobei die Effizienz nicht einseitig optimiert

wird. Die Natur ist oft auch ziemlich verschwenderisch. Drittens spielen *Modularität und Multifunktionalität* eine große Rolle (Moleküle, Zellen, Organe und Individuen als Module). Zum Vierten geht es um *Vielfalt, Diversität und Redundanz* und zwar in mehrfacher Hinsicht (funktional, strukturell und auf Ressourcen bezogen). Fünftens gehören *Fließgleichgewicht* (Homöostase, dynamisches Gleichgewicht, dynamische Stabilität), S*elbstorganisation, Adaptivität, Selbstheilung und Resilienz* zu den zentralen Erfolgsprinzipien der phylogenetischen und ontogenetischen Entwicklung. Hierher gehört auch die *hierarchische Strukturierung,* die als Erfolgsprinzip bei der Gestaltung multifunktionaler Werkstoffe wie Holz, Knochen, Perlmutt oder Spinnenseide eine so wichtige, scheinbar unvereinbare technische Eigenschaften vereinende, Rolle spielt. Und zum Schluss muss das Entwicklungsprinzip einer *Mehrdimensionalen Optimierung* herausgestellt werden. Organismen und Ökosysteme haben in der Regel nicht die Möglichkeit zur weitreichenden Gestaltung ihrer Umwelt und zum Ausschluss sogenannter Störfaktoren (derentwegen wir uns so gern in unsere Labore zurückziehen, wo all das möglich ist). Evolution und Entwicklung vollzieht sich in der unreduzierten vollen Komplexität der Wirklichkeit. Nichtberücksichtigung sogenannter Störfaktoren und einseitige Optimierungen unter Vernachlässigung anderer überlebenswichtiger Umstände sind in der Evolution letztendlich zum Scheitern verurteilt (vgl. Gleich, Pade, et al. 2010).

Der Übergang vom biologischen Vorbild zur biomimetischen Lösung ist allerdings ein ausgesprochen komplexes Unterfangen. Es geht um alles andere als eine ‚Kopie'. Vielmehr müssen mehrere Voraussetzungen gegeben sein bzw. Schritte bewältigt werden. Das biologische Vorbild muss naturwissenschaftlich erklärt und verstanden sein. Wie genau, aufgrund welcher physikalisch-chemischen bzw. biologisch-systemischen Prinzipien und Gesetzmäßigkeiten erzeugen bzw. nutzen die Organismen den interessanten Effekt? Wenn solche Erklärungen erarbeitet werden konnten, können sogar bessere als die evolutionär tatsächlich entwickelten Lösungen gefunden werden. Die Evolution ist schließlich in ihren eigenen Möglichkeiten durch enorme Pfadabhängigkeiten beschränkt. Des Weiteren müssen die Rahmenbedingungen und die Anforderungen an die ‚natürlichen' und an die ‚biomimetisch-technischen' Lösungen eine Übertragung zulassen. Unsere Vorstellungen von Risiko und Scheitern (genauer die dahinter stehenden Werte) sind z.B. keinesfalls identisch mit denen in der mitunter grausamen Natur. Und schließlich müssen unsere (system-)technischen Möglichkeiten eine (fertigungs-)technische und ökonomisch wettbewerbsfähige Umsetzung zulassen. An dieser letzten Hürde scheiterten schon etliche biomimetische Projekte, und dies hatte oft etwas mit ihrer inhärenten Komplexität zu tun.

Betont werden muss zudem, dass in der Natur, in Ökosystemen und der Evolution das Element der Ressourceneffizienz nicht alleine dominant ist. Die Evolution arbeitet vielmehr durchaus auch mit Vielfalt und Überfluss, aus denen dann selektiv das Passende sich durchsetzt oder herausgepickt wird. Dieses Phänomen finden wir nicht nur auf der Ebene der Populationen,

sondern auch auf der physiologisch-molekularen Ebene. Das Verhältnis von Resilienz und Effizienz lässt keine einseitige Dominanz eines der beiden Ziele zu, sie sind, wie etliche andere, Elemente in einer ‚mehrdimensionalen Optimierung'.

Auch dem Übergang der Resilienz von einer analytischen Kategorie aus der Ökosystemtheorie zu einem Leitkonzept der Systemgestaltung liegt eine komplexe Transformation im biomimetischen Abstraktionsprozess zugrunde. Ausgangspunkt war die nicht zuletzt von Holling beobachtete Fähigkeit von Ökosystemen ihre ‚Integrität' und ‚Funktion' auch unter turbulenten und sich ständig ändernden Rahmenbedingungen, massiven äußeren Störungen und inneren Ausfällen aufrecht zu erhalten (Holling 1973, 1986). Dann ging es darum, mit Hilfe biologischer Theorie (Evolutionstheorie, Systembiologie, Ökosystemtheorie, Physiologie usw.) in den Evolutions- und Entwicklungsprozessen (Phylogenie und Ontogenie) in diesen erfolgreichen biologischen Systemen Erfolgsprinzipien, Bauprinzipen, Elemente und Fähigkeiten und zu entdecken, die für die Erzeugung von Resilienz maßgeblich sind (z.B. Adaption, funktionelle und strukturelle Vielfalt, Selbstorganisation, Homöostase, Modularität, …). Eine wichtige Rolle bei der evolutionären Etablierung der ökosystemaren und organismischen Resilienz spielte die Tatsache, dass Organismen und Ökosysteme wenig Möglichkeiten und Chancen haben ihre Umgebung zu kontrollieren. Sie müssen sich im Wesentlichen anpassen. Einer solchen Orientierung an „Anpassung" im Vergleich zum „Versuch der Kontrolle" entspricht in der biomimetischen Übertragung ein bedeutender Paradigmenwechsel bei der Gestaltung sozio-technischer Systeme. Dieser Paradigmenwechsel vom ‚herrschaftlichen' Versuch der Kontrolle zur ‚demütigen' Anpassung ist eine wichtige Orientierung bei der Gestaltung Resilienter Systeme.

Ein wichtiger Schritt im biomimetischen Abstraktionsprozess war die Abkehr von der bei Holling anfangs noch so wichtigen ‚Erhaltung der Integrität und Funktion' der Systeme und die Hinwendung zur ‚Erhaltung ihrer Systemdienstleistungen'. Mit diesem Schritt ließ das Leitkonzept Resiliente Systeme evtl. noch vorhandene strukturkonservative Konnotationen des Hollingschen ökosystemaren Resilienzbegriffs hinter sich. Zum Erhalt der Systemdienstleistungen kann es schließlich erforderlich werden, die ganzen Systeme radikal umzubauen.

Der Übergang vom ökosystemaren Resilienzverständnis als ‚analytischer Kategorie' zum ‚Leitkonzept der Systemgestaltung' hat zudem zur Folge, dass das Resilienzkonzept als Leitkonzept seine analytische Funktion verliert. Damit verbietet es sich Resilienz in irgendwelchen Einheiten messen zu wollen. In dieser Hinsicht unterscheiden sich unsere Intentionen beträchtlich von den Zielen, die von Oliver et al. und Molyneuaux et al. verfolgt werden. Was für uns zählt sind Schritte zur Annäherung an das Ideal, Schritte zur Umsetzung des Leitkonzepts. Als Maß taugt also allenfalls die Entfernung vom / oder die Annäherung an das Ideal. Die analytische Funktion geht damit nicht verloren, sie geht nur an ein zweites Konzept über, an das Konzept der Vulnerabilität (vgl. für Details Gleich, Gößling-Reisemann, et al. 2010). Es

kommt darauf an, die beiden Konzepte Vulnerabilität und Resilienz klar auseinander zu halten. Die Verletzlichkeit von Systemen kann mit Hilfe der ereignisbezogenen und der strukturellen Vulnerabilitätsanalyse erfasst, verglichen und bis zu einem gewissen Grad auch gemessen werden. Dabei ist es wichtig, dass sich in die Definition von Vulnerabilität und in die Methodik der Vulnerabilitätsanalyse nicht plötzlich auch die Resilienz einschleicht, was in der Vergangenheit immer wieder geschah (vgl. Gleich, Gößling-Reisemann, et al. 2010). Der entscheidende Punkt liegt in der Definition der Anpassungskapazität[13]. Das Konzept ‚Resiliente Systeme' wird zum Leitkonzept der Systemgestaltung. Unser biomimetisches Verständnis von Resilienz umfasst mit seinem a priorischen Ansatz viel mehr als nur die Minimierung oder Vermeidung schon erkannter Vulnerabilitäten.

2.1.5 Grundlegende Fähigkeiten eines Resilienten Systems zum Umgang mit Störereignissen

Aufbauend auf dem Begriff der Ökologischen Resilienz (vgl. Oliver et al. 2015) liegt mit dem Ansatz der Sozio-Ökologischen Resilienz als Leitkonzept der Systemgestaltung ein Resilienzverständnis vor, das Systemfähigkeiten mit Gestaltungsprinzipien verbindet. Resilienz bezieht sich auf die „Fähigkeit eines Systems, seine qualitativ und quantitativ definierten Dienstleistungen auch unter Stress und in turbulenten Umgebungen (trotz massiver äußerer Störungen und interner Ausfälle) aufrecht zu erhalten" (Gleich, Gößling-Reisemann, Stührmann, Woizeschke 2010, S. 25). Resiliente Systeme sollen nicht nur auf bereits bekannte Herausforderungen „reagieren" können („Was-wäre- wenn-Ansatz"), sondern im Sinne der evolutionären Fitness bzw. des (Fast-)Egal-Was-Kommt-Ansatzes auch gegenüber extrem unwahrscheinlichen und auch völlig unerwarteten Störereignissen gewappnet sein (Gleich, Gößling-Reisemann, Stührmann, Woizeschke 2010; Gößling-Reisemann, Stührmann et al. 2013; Gößling-Reisemann et al. 2015). Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, müssen neben Widerstands- und Anpassungsfähigkeit auch Lern- und Innovationsfähigkeit im betroffenen System ausgeprägt sein. Das hier vorgestellte Resilienzverständnis schließt damit an die bereits im Sinne der Sozio-Ökologischen Resilienz identifizierten Systemfähigkeiten an (vgl. Folke 2006).

Resilienz basiert sowohl auf Strukturen, die bereits vor dem Eintreten eines Störereignisses angelegt worden sind (evolutionäre Produktion von Vielfalt), als auch auf den Reaktionsmöglichkeiten des betroffenen Systems im Sinne eines Lernens aus Erfahrung. In beiden Fällen sollte das betroffene System flexibel sein, um Abweichungen bzw. Variationen zu erlauben. Man kann diese Flexibilität als ‚produktive Instabilität' bezeichnen (vgl. Schmidt 2008). Im erst-

[13] Molyneaux et al. schreiben, dass sie die Messung der Resilienz als synonym zur Messung von Anpassungskapazität verstehen ("measuring resilience is synonymous with measuring adaptive capacity" Molyneaux et al. p. 21). Diese Ansicht teilen wir nicht. Für uns ist Anpassungskapazität ein Term im Rahmen der Vulnerabilitätsanalyse (vgl. Kap. 5.6). Nichtsdestotrotz ist es selbstverständlich sinnvoll, wenn Methoden zur Messung der Anpassungskapazität entwickelt werden.

genannten Fall hat diese Veränderung durch produktive Instabilität bereits Alternativen erzeugt, auf die im Bedarfsfall zurückgegriffen werden kann. Die Fähigkeit zur Veränderung durch zwei verschiedene Mechanismen der Innovation und Anpassung (Erzeugung von Vielfalt einerseits und Lernen andererseits) ist also ein charakteristisches Merkmal resilienter biologischer Systeme.

Mit den durch Mutation und Rekombination bereits entstandenen Alternativen und Doppellungen, also durch Diversität, Redundanz und Dispersion ergibt sich eine räumliche Dimension von Resilienz, für die keine Ausbildung neuer Systemstrukturen notwendig ist. Anstelle der beeinträchtigten Elemente können die vorhandenen Alternativen genutzt werden (Lovins und Lovins 2001). Dies trägt in erster Linie zur **Widerstandsfähigkeit** des Systems bei.

Die Möglichkeit zur Veränderung eines Systems während und nach einer Störung, also seine Anpassungsfähigkeit ist eine weitere wichtige Voraussetzung für eine der aktuellen Störung entsprechende Antwort des Systems und ergeben die zeitliche Dimension der Resilienz. Die Veränderung, mithilfe derer eine solche Antwort des Systems möglich wird, sollte allerdings nach Möglichkeit nur die Struktur bzw. Organisation des Systems betreffen. Seine Dienstleistungen sollten in ihrer Qualität von den Veränderungen des Systems nicht wesentlich beeinträchtigt werden. Wenn diese Bedingung erfüllt ist, trägt sie zur **Anpassungsfähigkeit** eines Systems bei.

Falls ein System zudem fähig ist, Informationen über den Erfolg oder Misserfolg seiner Reaktionen zu sammeln[14] und künftige Reaktionen auf Störungen an den bisher erfolgreichen eigenen oder auch fremden Systemveränderungen zu orientieren – falls ein System also evolutions- und lernfähig – und zudem in der Lage ist, Kombinationen erfolgreicher Strategien zu entwickeln, dann sind neben seiner reinen Anpassungsfähigkeit auch wichtige Grundlagen für die **Innovationsfähigkeit** des Systems gelegt, weit über die bloße Anpassungsfähigkeit hinaus.

Widerstandsfähigkeit, Anpassungsfähigkeit und Innovationsfähigkeit stellen somit die drei grundlegenden Fähigkeiten eines Resilienten Systems dar.

Als auf biomimetischem Wege entdeckte Gestaltungsprinzipien und Gestaltungselemente von Resilienten Systemen halten wir – insbesondere aufbauend auf Oliver et al 2015 und von Gleich, Pade et al 2010 (in kursiver Schreibweise) - folgende Elemente fest:

Fähigkeiten und Qualitäten

Geringe Sensitivität gegenüber Veränderungen

Hohe Anpassungsfähigkeit durch phänotypische Plastizität

[14] In der Evolution ist dies grob gesprochen die Funktion von Genen (Evolution) und Gehirnen (Lernen).

Potenzial für die Existenz alternativer stabiler Zustände

Selbstheilung

Mehrdimensionale Optimierung

Bauprinzipien

Hohe Vermehrungsrate (Populationswachstum)

Keine Wachstumsreprimierung bei geringen Populationsdichten (Allee-Effect)

Hohe genetische Variabilität und Dispersion (Portfolioeffekt)

Geringe Korrelation zwischen den von Veränderungen betroffenen Eigenschaften und den für die Ökosystemfunktionen wichtigen Eigenschaften (traits)

Hohe insbesondere funktionelle bzw. diverse Redundanz

Intensive gleichmäßig verteilte Vernetzung auf der Basis wenig spezialisierter Interaktionen zwischen den Spezies/Arten

Große Heterogenität der Umgebung

Viele landschaftsräumliche Verbindungen

Großräumigkeit, die meist auch Ressourcenreichtum verspricht

Ressourcenopportunismus

Ressourcenbreite und –varietät

Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft

Modularität und Multifunktionalität

Vielfalt, Diversität und Redundanz

Fließgleichgewicht, Selbstorganisation, Adaptivität,

Hierarchische Strukturierung

Sie lassen sich vereinfacht in einer Grafik zusammenfassen (siehe Abbildung 2.1).

Abbildung 2.1: Fähigkeiten und biomimetische Gestaltungsprinzipien Resilienter Systeme (eigene Darstellung)

2.2 Resiliente Sozio-Technische Systeme – Erfahrungen aus dem Risikomanagement Kritischer Infrastrukturen

In einem zweiten Schritt versuchen wir nun bottom up in den bisherigen Erfahrungen mit dem Risikomanagement Kritischer Infrastrukturen (KRITIS) Gestaltungsprinzipien und Elemente Resilienter sozio-technischer Systeme zu entdecken. Der wichtigste Unterschied zum biomimetischen Ansatz besteht darin, dass wir es im Betrachtungsbereich nun mit sozio-technischen Systemen und damit auch mit menschlichen Akteuren und gesellschaftlichen Institutionen zu tun haben, die über weitreichende Möglichkeiten des Lernens aus (schlechter) Erfahrung verfügen. Für diese Zusammenstellung von Fähigkeiten und Gestaltungsprinzipien Resilienter Sozio-technischer Systeme basierend auf den Erfahrungen aus dem Risikomanagement angesichts von Stör- und Versagensereignissen in den Bereichen Supply-Chain-Management, Informations- und Kommunikationstechnologien und dem Energiesektor sollen zunächst die Fähigkeiten Resilienter sozio-technischer Systeme zum Umgang mit verschiedenen Arten von Störereignissen systematisiert werden. Dazu werden die Störereignisse nach den Kriterien „Bekanntheit“, unterteilt in „vorhergesehen“ und „unvorhergesehen“, sowie „zeitliche Skala“, unterteilt in „abrupt“ und „schleichend“ unterschieden, weil sich beim Umgang mit die-

sen jeweils andere Ansprüche an die Systemgestaltung ergeben. So erfordern unvorhergesehene Störereignisse andere Vorsorgeprinzipien als vorhergesehene, denen in der Regel spezifischer begegnet werden kann. Angesichts schleichender Störereignisse, wie z.B. dem Klimawandel, bedarf es sowohl einer graduellen, als auch einer massiven Transformation der Systeme, wohingegen bei abrupten Störereignissen des Systems evtl. spontan nur auf eine Änderung der Betriebsparameter zurückgreifen kann.

Aus der Kombination der jeweils zwei Typen in den zwei Kategorien ergeben sich vier grundlegende Arten von Störereignissen, deren Bewältigung im Leitkonzept „Resiliente Sozio-technische Systeme“ thematisiert werden soll. Ihnen werden vier Fähigkeiten eines Resilienten Sozio-technischen Systems, Widerstands-, Anpassungs-, und Innovationsfähigkeit sowie die Improvisationsfähigkeit, die nicht aus biomimetischen Prinzipien folgt, sondern durch die Untersuchung sozio-technischer Systeme neu hinzukommt, zugeordnet (siehe nachfolgende Tabelle). Die Improvisationsfähigkeit basiert im Wesentlichen auf einem kreativen Umgang mit den vorhandenen Mitteln und erfordert dafür ein Mindestmaß an nicht verplanten freien Ressourcen (Reserven, slack) sowie ein gewisses Maß an Multifunktionalität der Komponenten.

Tabelle 2.1: Die Strukturierung von vier Fähigkeiten eines Resilienten sozio-technischen Systems über die zu bewältigenden Herausforderungen

Herausforderungen	abrupt	schleichend
Erwartet	Widerstandsfähigkeit	Anpassungsfähigkeit
Unerwartet	Improvisationsfähigkeit	Innovationsfähigkeit

Für die Fähigkeit zur Improvisation sollen also beispielsweise Systemstrukturen zusammengestellt werden, die zum Umgang mit zugleich abrupten und unvorhergesehen Störereignissen befähigen – seien sie organisatorisch wie das Bereitstehen eines Krisenteams (Task Force) oder materiell wie das Vorhalten freier Reserven.

Eine Differenzierung nach Systemebenen ist ggf. nötig, wenn bei der ereignisorientierten Vulnerabilitätsanalyse die Verwundbarkeit gegenüber den verschiedenen Arten von Störereignissen systematisch untersucht werden soll. Von Interesse bleibt zudem eine Differenzierung in der Zeitskala. Insbesondere wird es im Kontext von Systemtransformationen wichtig, die Vulnerabilität der Transformationspfade selbst zu untersuchen. Eine Vorbereitung auf unvorhergesehene Ereignisse kann im Rahmen einer strukturellen Vulnerabilitätsanalyse erfolgen. Mit ihr wird untersucht, was passiert, wenn das System extrem belastet wird, wenn es durch inneren oder äußeren (nicht weiter spezifizierten) Stress unter Druck gerät.

Prinzipien, die zur Bewältigung von Störereignissen beitragen und der Aufrechterhaltung der Dienstleistungen eines Systems dienen, sind in den meisten sozio-technischen Systemen bereits vorhanden. Sie fußen auf dem Erfahrungswissen, das bei den bisher erlebten Störungen

oder gar Systemzusammenbrüchen gesammelt wurde und setzen voraus, dass auch in Zukunft mit ähnlichen Störereignissen zu rechnen ist. Wichtig dafür ist, dass solche Ereignisse offen kommuniziert, dokumentiert und aufgearbeitet werden. Eine wichtige Quelle sind dabei auch sogenannte ‚Beinahe-Unfälle', die z.B. in Kernkraftwerken und in der Flugzeugbranche dokumentiert werden müssen. Die Betrachtung der Risikomanagementerfahrung mehrerer Kritischer Infrastruktursysteme dient dem Zweck, eine Sammlung von Prinzipien und Elementen zu erstellen, die einen Beitrag zur Steigerung der Resilienz dieser Systeme leisten. Inwieweit diese Prinzipien über die Bewältigung bekannter Störereignisse hinausreichen und auch gegenüber unerwarteten Veränderungen Schutz bieten können, bleibt einer abschließenden Untersuchung der gesammelten Prinzipien vorbehalten (vgl. Kapitel 2.3.4). Nachstehend werden KRITIS im Bereich des Managements von Lieferketten (Supply Chain Management, SCM), der Informations- und Kommunikationstechnologie (Information and Communication Technology, ICT) sowie der Energiesysteme nach den in ihnen bereits implementierten Bewältigungsstrategien für Störereignisse untersucht. SCM und ICT wurden gewählt, weil in diesen Bereichen schon ein expliziter Bezug auf Resilienz in den Publikationen zum Risikomanagement existiert und weil sich beide Bereiche auf die Zurverfügungstellung eines Produkts beziehen (im Falle der ICT besteht das Produkt in der übertragenen Information) und dafür auf Transportstrukturen bzw. Übertragungsnetze angewiesen sind.

2.2.1 Prinzipien zum Umgang mit Störereignissen im Supply Chain Management (SCM)

Die Supply Chain entspricht der Lieferkette und umfasst die Zulieferung von Materialien und Informationen für den nachfolgenden Prozessschritt. Die Systemleistungen sind im Prinzip der „5r" zusammengefasst:

- die richtige Ware,
- in der richtigen Qualität,
- zur richtigen Zeit,
- zu den richtigen Kosten und
- zum richtigen Ort zu liefern.

Supply Chains (SC) können mittlerweile aufgrund der Auslagerung (Outsourcing) an globale Zulieferer und die damit verbundenen Abnehmerketten vermehrt als Netzwerk betrachtet werden. Diese Lieferanten- und Kundennetzwerke sind verschiedenen Einflüssen ausgesetzt, die zu einem Abbruch der Lieferung mit ökonomischen Nachteilen führen können. Im letzten Jahrzehnt wurden deshalb vermehrt Supply Chain Risk Management (SCRM)-Ansätze entwickelt, die darauf abzielen, Risiken in der SC zu entdecken, zu verstehen und ihnen mit entsprechenden Maßnahmen zu begegnen (Hillman und Keltz 2007; Ponis und Koronis 2012). In diesem

Zusammenhang wurden auch verschiedene Ansätze zur Bestimmung der Vulnerabilität von SC diskutiert (Revilla und Sáenz 2014). Neben der Vulnerabilität wurde auch die Resilienz von SC thematisiert. Seit Mitte der 2000er Jahre hat dabei neben dem Verständnis einer *Engineering Resilience* auch der aus der Ökosystemtheorie bzw. der sozio-ökologischen Theorie stammende und weiter gefasste Resilienzbegriff Einzug gehalten (Fiksel 2003, 2006; Pettit 2008).

Resilienz in SC wird als multidisziplinäre und multiskalare Gestaltungsaufgabe im oder als separate Aufgabe neben dem SCRM gesehen (Ponis und Koronis 2012). Interessant ist dabei vor allem auch die Möglichkeit, Resilienz nicht nur als ein rein risikoorientiertes Konzept zu verstehen, sondern als Chance zur Transformation des betroffenen Netzwerkes in einen besseren Zustand. Dabei werden die Störung und ihre Folgen als Möglichkeit zur innovativen Umgestaltung verstanden.

Wichtig ist auch hier die Unterscheidung von Risiko, Unsicherheit und Vulnerabilität. Bei Risiken können in der Regel Eintrittswahrscheinlichkeiten den jeweiligen Gefährdungen zugeordnet werden. Unsicherheiten hinsichtlich der Eintrittswahrscheinlichkeiten von Gefährdungen oder gar hinsichtlich der Art der Gefährdungen selbst beeinträchtigen die Möglichkeit zur Bestimmung von Risiken bzw. verhindern sie gänzlich. Weil zur Begründung eines Risikos nicht nur die Gefährdung, sondern auch die Exposition – also das „Ausgesetzt sein“ gegenüber der Gefährdung gehört, kann bei unbekannter Art der Gefährdung auch die Bestimmung des erwartbaren Ausmaßes einer Exposition wichtige Anhaltspunkte im Sinne des Vorsorgeprinzips liefern. Des Weiteren können Anpassungskapazitäten zur Minimierung von Expositionen erfasst werden.

Auftretende Störereignisse im SCM werden hauptsächlich anhand dreier Hauptkriterien unterschieden. Zum einen werden sie anhand ihrer *Stärke* in ‚Disruptions’, ‚Crisis’ oder ‚Disaster’ unterteilt (Jüttner und Maklan 2011). Tendenziell werden im SCM Extremereignisse betrachtet, die in der Regel unerwartet und mit schwerwiegendem Wirkungsausmaß eintreffen. Revilla und Saenz bezeichnen daher diese Störereignisse als unerwartete und nicht vorhergesehene Ereignisse (Revilla und Sáenz 2014). Die *Bekanntheit* eines Störereignisses stellt das zweite Unterscheidungskriterium im Bereich des SCM dar. Für eine exakte Risikobestimmung müssen die beiden Komponenten des Risikos, die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Wirkung (das Schadensausmaß) bekannt sein. Wenn hingegen von Unsicherheiten gesprochen wird, dann ist eine der beiden Risikokomponenten (oder es sind beide) unsicher bis hin zu nicht bekannt. Das dritte Hauptkriterium zur Einteilung und Unterscheidung von Störereignissen in SCs ist der Ort des Ereignisses innerhalb der Lieferkette. Abhängig von den jeweils exponierten Stellen in dieser Kette wird von Versorgungs- (Supply), Prozess- und Nachfragerisiken gespro-

chen (Pettit 2008; Tang und Tomlin 2008). Es ist also von Risiken die Rede, die an der jeweiligen Stelle in der Lieferkette zu einem Ausfall der Versorgung, zu Störungen im eigenen Unternehmensprozess oder letztendlich auf der Nachfrageseite durch den Kunden zu unbekannten Herausforderungen für das Unternehmen führen können.

Das Supply Chain Risk Management gewann mit der Jahrtausendwende zunehmend an Bedeutung. Vor allem, weil das vermehrt angewandte „Lean Management“ und die Globalisierung der Wertschöpfungskette die Vulnerabilität der Lieferketten erhöhten und in diesem Zusammenhang Strategien und Strukturen zur Verringerung der damit verbundenen Risiken immer wichtiger wurden.

Risiken innerhalb der Lieferkette betreffen alle eingangs genannten Systemleistungen von Lieferketten. Der Trend der Globalisierung machte zudem bewusst, dass mehr als nur die klassischen Risiken beachtet werden müssen. So unterteilen Rao und Goldsby (2009) Unsicherheiten der betrieblichen Umwelt in politische, makroökonomische, soziale und natürliche Unsicherheiten und betonen die Notwendigkeit, potenzielle Risiken in diesen Gebieten zu identifizieren (Rao und Goldsby 2009).

Zeitgleich zur Risikobetrachtung wurden auch Resilienz fördernde Maßnahmen in Lieferketten diskutiert. Im Folgenden werden die Arbeiten von Christopher und Peck (2004), Tang (2006), Iakovou et al. (2007) und Barroso et al. (2010), die sich mit den Resilienz fördernden Maßnahmen im Bereich der Lieferketten beschäftigen, nach den dafür notwendigen Maßnahmen ausgewertet.

Die in Tabelle 2.2 vorgestellten Resilienz fördernden Maßnahmen können den SCM-Bereichen a) Belieferung bzw. Beschaffungsmanagement, b) Prozess und c) Nachfrage zugeordnet werden. In diesen Bereichen dienen sie der Vorbereitung bzw. Reaktion auf Störereignisse, die im Wesentlichen zu den Typen Lieferantenausfall, Qualitätsmangel, Transportstörung, Produktionsausfall oder Nachfrageänderung gehören (vgl. Tabelle 2.3). Die Maßnahmen können den Systemfähigkeiten i) Widerstandsfähigkeit, ii) Anpassungsfähigkeit und iii) Innovationsfähigkeit zugeordnet werden.

Allein die Improvisationsfähigkeit wird nicht von den dargestellten Maßnahmen des SCM abgedeckt. Der Grund dafür liegt vermutlich in den Einbußen an Produktqualität, die mit improvisierten Lösungen höchstwahrscheinlich einhergehen und bei den untersuchten, eher zum Standardrepertoire gehörenden, Maßnahmen nicht in Kauf genommen werden.

Tabelle 2.2: Übersicht Resilienz fördernder Maßnahmen im Supply Chain Management (Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Christopher und Peck (2004), Tang (2006), Iakovou et al. (2007) und Barroso et al. (2010)

Typ der Maßnahme	Christopher und Peck (2004)	Tang (2006)	Iakovou et al. (2007)	Barroso et al. (2010)
Informationsaustausch, Verstehbarkeit/Transparenz, Rückkopplung	visibility of upstream and downstream inventories, of demand and supply conditions, and production and purchasing schedules		total SC visibility process and knowledge back up demand-based management	demand visibilty responsiveness
Lernen			process and knowledge back up	strategic inventory
Diversität und Redundanz	selecting supply chain strategies that keep several options open efficiency vs. redundancy trade-off collaborative working across SC (mitigating risk)	flexible supply base flexibler Transport	flexible sourcing	multiple Sourcing flexible transportation risk sharing
Flexible Strukturen **Lose Kopplungen**		make-and-buy trade-off dynamic assortment planning postponement		
Puffer, Speicher			strategic safety stock	
Modularität				rapid configuration
Effizienz	improving supply chain velocity: through streamlined processes, reduced in-bound lead-times and non-value-added time reduction	Ökonomisches Lieferantenanreizsystem Ertrags-management silent product rollover	•	•

2.2.2 Prinzipien zum Umgang mit Störereignissen im Informations- und Kommunikationstechnologiebereich (ICT-Bereich)

In der Literatur zum Informations- und Kommunikationstechnologiebereich (ICT-Bereich) sind verschiedene Bedeutungen von Resilienz zu finden. In neueren Publikationen ist immerhin ein Bezug zur Dienstleistung des Netzwerks erkennbar. So definieren Sterbenz et al. (2010) Resilienz als Aufrechterhaltung von Dienstleistungen unter Schwierigkeiten:

„[…] resilience [is] the ability of the network to provide and maintain an acceptable level of service in the face of various faults and challenges to normal operation“ (Sterbenz et al. 2010, S. 1246)

Im ICT-Bereich spielt das Internet eine zentrale Rolle. Der resilienten Gestaltung des Internets kommt deshalb eine große Bedeutung zu, nicht zuletzt, weil auch einige kritische Infrastrukturen über das Internet kommunizieren. Im Rahmen des EU-Projekts ‚resumeNet' sowie einer Reihe anderer Projekte wurden wichtige Vorarbeiten für eine resiliente Netzwerkgestaltung geleistet. Eine Taxonomie der Herausforderungen (Challenges) im ICT-Bereich wurde kürzlich von Cetinkaya und Sterbenz 2013 vorgestellt.

In einer Publikation aus dem Jahre 2010 werden von Sterbenz et al. die Herausforderungen und deren Auswirkungen in Komponenten- und Systemausfälle sowie in Unterbrechung von Kommunikationspfaden und Verkehrseinleitungen (Traffic Tolerance) unterteilt. Dabei wird Fehlertoleranz durch physische Redundanz erreicht (z.B. N-Version Programing), die auf Hardware und Software anwendbar ist, jedoch nicht bei korrelierten Fehlern weiter hilft (Sterbenz et al. 2010).

Die für die Resilienz von Netzwerken der Datenverarbeitung wichtigen Fähigkeiten können nach Sterbenz et al. 2010 in Eigenschaften unterteilt werden, die a) zur Toleranz gegenüber Herausforderungen und b) zur Zuverlässigkeit beitragen.

Zu a) gehören

1. Fehlertoleranz durch physische Redundanz. Gegen korrelierte Ursachen ist diese Form der Fehlertoleranz allerdings nicht wirksam.
2. Überlebensfähigkeit durch Diversität. Die Überlebensfähigkeit ist auch gegen korrelierte Ursachen sowie beim Ausfall großer Systemstrukturen noch wirksam und damit ein der eben genannten Form der Fehlertoleranz übergeordnetes Prinzip. Funktionelle bzw. diverse Redundanz hilft hier weiter.
3. Unterbrechungstoleranz, die besagt, dass ein System in der Erbringung seiner Leistungen tolerant ist gegenüber Verbindungsausfällen oder Verzögerungen der Kommunikation oder Versorgung seiner Elemente.

4. Verkehrstoleranz. Hiermit ist die Fähigkeit gemeint, unvorhergesehene Verkehrslasten ohne Zusammenbruch in der Übertragung sowie ohne störende Veränderungen des Verkehrsflusses zu integrieren.

Tabelle 2.3: Angewandte Resilienzprinzipien im Bereich des Lieferkettenmanagements (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Christopher und Peck 2004; Tang 2006; Iakovou et al. 2007; Barroso et al. 2010)

SCM-Bereich	Ereignis	Maßnahme/Bauprinzip	Systemfähigkeit
Belieferung/Beschaffungsmanagement	Lieferantenausfall	Diversität durch „Multiple Sourcing“ (mehrere Bezugsquellen für Produkt vorhanden)	Widerstandsfähigkeit
		Rückkopplung durch Informationsaustausch	Widerstandsfähigkeit/ Anpassungsfähigkeit
	Qualitätsmängel	Modularität durch modulare Bauweise des Produkts	Anpassungsfähigkeit
		Funktionelle Redundanz durch „Multiple Sourcing“ (mehrere Bezugsquellen für Produkt vorhanden)	Widerstandsfähigkeit
		Funktionelle Redundanz durch alternative(s) Bauteil(e)	Widerstandsfähigkeit
	Transportstörung	Diversität durch alternative Wege	Anpassungsfähigkeit
		Puffer für Primär- oder Sekundärressourcen durch Lagerhaltung	Widerstandsfähigkeit
Prozess	Produktionsausfall	Modularität durch modulare Bauweise des Produkts	Anpassungsfähigkeit
		Physische oder Funktionelle Redundanz durch alternative Fertigungsstraßen	Widerstandsfähigkeit
		Funktionelle Redundanz durch Zukauf anstelle von Eigenfertigung („Make or Buy“-Entscheidung)	Anpassungsfähigkeit
Nachfrage	Nachfrageänderung	„Postponement“ durch Produkt- bzw. Prozessmodularität	Anpassungsfähigkeit
		Puffer durch Lagerhaltung	Widerstandsfähigkeit
		Diversität durch Preis-differenzierung (entsprechend den Marktsegmenten)	Anpassungsfähigkeit
		Modularität durch Produktwechsel	Innovationsfähigkeit
		Rückkopplung durch Nachfragemanagement	Anpassungsfähigkeit
	Transportstörung	Diversität durch alternative Wege	Anpassungsfähigkeit

Zuverlässigkeit (b) wird erreicht durch:

1. Systemstabilität mit den zwei Haupteigenschaften Verfügbarkeit und Verlässlichkeit (i.S.v. Kontinuität),

2. Sicherheit gegenüber unautorisiertem Gebrauch oder Veränderung sowie
3. einem angemessenen Verhältnis der Systemleistung gegenüber den Qualitätsansprüchen.

In einem zusammenfassenden Artikel zu den für den ICT-Bereich wichtigen Resilienz erhöhenden Prinzipien nennt Scott Jackson eine Reihe von abstrakten, hinter konkreten Realisierungen stehenden, Prinzipien, mithilfe derer a) eine Gefährdung erkannt und vermieden, b) eine eintretende Störung durchgestanden und c) nach der Störung wieder ein normaler Betrieb erreicht werden kann (Jackson 2013). Einige dieser Prinzipien bauen dabei auf der Wirksamkeit anderer Prinzipien auf. Im Folgenden werden die Prinzipien einschließlich der für ihre Realisierung notwendigen weiteren Prinzipien zusammenfassend aufgelistet:

1. Das Prinzip der interagierenden Knoten, demzufolge möglichst jedes Element eines Systems die Möglichkeit haben sollte, mit den anderen Elementen zu kommunizieren und zu kooperieren. Dabei ist auch die zusätzliche Bedingung mit eingeschlossen, dass es möglichst keine technischen oder administrativen Hindernisse für die Kommunikation und Kooperation zwischen den Elementen des Systems geben sollte. Zudem muss jedes Element die Absicht der anderen Elemente verstehen können. Das Prinzip der interagierenden Knoten wird von Jackson et al. als das übergeordnete Prinzip des ICT-Bereiches bezeichnet. Folgende Prinzipien helfen dabei, das Resilienzprinzip der interagierenden Knoten zu verwirklichen:
   a. Feedbackloops unterschiedlicher Länge als Element der Kommunikationsstrukturen.
   b. Das Resilienzprinzip der losen Kopplung und die damit einhergehende Vermeidung zu großer zentraler Verteiler.
   c. Das Resilienzprinzip der physischen sowie der funktionellen Redundanz.
   d. Puffer und Dämpfer, die zu einer Verzögerung und Sammlung von Informationen führen, um störende Schwankungen im Informationsfluss zu vermindern.
2. Absorptionsfähigkeit, die allerdings nur auf vorhersagbare Gefahren hin entwickelt werden kann. Ein wichtiges Subprinzip ist die
   a. Degradationsresistenz, d.h. die Funktionalität ist gegenüber Alterungsprozessen und ausbleibender Wartung gesichert.
3. Physische Redundanz
4. Funktionelle Redundanz
5. Mehrschichtiger Schutz bzw. Abwehr, wobei jede Schicht auf andere Weise wirksam ist, ihre Schwachstellen sich also unterscheiden.
6. Integration von Menschen als Kontroll- und Entscheidungsinstanzen in Prozesse, bei denen eine Gefährdung durch unbekannte Ereignisse angenommen werden muss.

7. Komplexitätsreduktion, d.h., die Anzahl der Komponenten und ihrer Schnittstellen sollte möglichst reduziert werden.
8. Reorganisationsfähigkeit, d.h. das System kann sich im Falle einer Gefährdung umstrukturieren. Hierfür ist
   a. eine gewisse Mobilität seiner Elemente sowie
   b. eine begrenzte Strukturiertheit (die noch genügend Adaptivität ermöglicht) notwendig.
9. Reparaturfähigkeit, die wiederum (wie eine Reihe anderer Prinzipien) auf das übergeordnete Prinzip der interagierenden Knoten, also funktionsfähige Kommunikationsstrukturen sowie die Integration von Menschen in die Systemstruktur angewiesen ist.
10. Lokale Kapazität. Diese, auch als Prinzip der modularen oder verteilten Fähigkeit bezeichnete, Regel besagt, dass jeder einzelne Knoten des Systems über einen möglichst hohen Grad an Systemfunktionalität verfügt.
11. Lose Kopplungen, damit Ausfälle sich nicht über die Knoten des Systems in alle seine Bereiche ausbreiten können. Notwendig sind dazu folgende Resilienzprinzipien:
    a. interagierende Knoten,
    b. lokale Kapazitäten und
    c. physische Redundanz.
12. Driftkorrektur zur Verhinderung des (schleichenden) Abgleitens in instabile bzw. unsichere Systemzustände. Hierfür sollten folgende Resilienzprinzipien bzw. Subprinzipien angewandt werden:
    a. Reorganisationsfähigkeit,
    b. interagierende Knoten,
    c. Detektions- und Korrekturfähigkeiten (Subprinzip),
    d. unabhängige Kontrolle (Subprinzip).
13. Das Prinzip der informierten Entscheidung, d.h. eine Verzögerung des Prozesses, bis aufgrund umfassenderer Informationen eine begründetere Entscheidung möglich ist. Hierfür sind die Resilienzprinzipien der
    a. interagierenden Knoten sowie
    b. der Integration von Menschen in Entscheidungsprozesse notwendig.
14. Der Ausschluss bzw. die Reduktion verborgener Interaktionen zwischen den Elementen eines Systems, wozu

a. interagierende Knoten
b. Komplexitätsreduktion sowie
c. unabhängige Kontrolle (als Subprinzip) nötig sind.

Die in den Arbeiten von Sterbenz (2010) und Jackson (2013) angesprochenen Prinzipien für den ICT-Sektor können den allgemeinen Systemfähigkeiten eines Resilienten sozio-technischen Systems zugeordnet werden (vgl. Tabelle 2.4).

2.3 Resilienz fördernde Prinzipien in sozio-technischen Systemen

Dieses Kapitel soll auf Basis der vorangegangenen Darstellungen die Betrachtung einiger herausgegriffener Prinzipien vertiefen, die nach dem Stand der Literatur für die Resilienz eines sozio-technischen Systems förderlich sind. Zunächst werden die vornehmlich bei den *Systemkomponenten und der Systemarchitektur* angewendeten Prinzipien vorgestellt. Abschließend werden diejenigen Prinzipien betrachtet, die beim Betrieb von Infrastrukturen im Rahmen des Zusammenspiels zwischen Mensch und Technik zur Resilienz dieser Systeme beitragen.

2.3.1 Systemkomponenten

In nahezu allen Fallbeispielen ist die Diversität ein Schlüsselprinzip für erhöhte Resilienz. In jedem Anwendungsbereich sind jedoch verschiedene Aspekte unter diesem Prinzip zusammengefasst. Prinzipiell sind darunter die Anzahl der verschiedenen Elemente, deren Gewichtung und deren generelle Unterschiedlichkeit zueinander zu fassen (Biggs et al. 2012). Hier ist die Stirlingsche Unterscheidung zwischen Vielfalt (Variety), Verhältnis (Balance) und Ungleichheit (Disparity) wieder zu erkennen (vgl. Stirling 2007).

Diversität ist eine Antwort auf die Nachteile von Abhängigkeiten. Farell bringt in diesem Zusammenhang den Begriff der infrastrukturellen gegenseitigen Abhängigkeit (interdependency) ins Spiel (Farrell et al. 2004). Aufgrund der Optionenvielfalt eines diversitär gestalteten Systems mit seinen unterschiedlichen Grundlagen und Funktionsmechanismen, können mithilfe von Diversität Pfadabhängigkeiten vermieden werden (Farrell et al. 2004), weil bei der Beeinträchtigung einer dieser Grundlagen oder der Benachteiligung eines Mechanismus Alternativen zur Verfügung stehen. Diversität kann jedoch mit einem erhöhten finanziellen Aufwand verbunden sein und ist Farell et al. zufolge auch keine automatische Folge von Politik oder Marktkräften. Zu ergänzen ist die unter Resilienzgesichtspunkten ebenfalls relevante räumliche bzw. geographische Gleichverteilung, die wir mit dem Begriff der Dispersion fassen.

Des Weiteren ist mit der Diversität auch der Begriff der Redundanz verknüpft. Jedoch muss an dieser Stelle genau unterschieden werden. Diversität kann zur Redundanz beitragen. Redundanz muss jedoch nicht unbedingt mit Diversität einhergehen. Wir unterscheiden *physische Redundanz* die Dopplung oder mehrfaches Vorhandensein einer Systemkomponente und *funktionelle bzw. diverse Redundanz* die u.a. im SCM und bei den sozioökonomischen

Tabelle 2.4: Einordnung von Maßnahmen im ICT Bereich nach Sterbenz (2010) und Jackson (2013).[15] (Quelle: Eigene Darstellung nach Sterbenz (2010) und Jackson (2013))

Bauprinzip/Leistung	Zur Realisierung notwendige Prinzipien	Systemfähigkeit
Interagierende Knoten	Feedbackloops, lose Kopplung, funktionelle Redundanz, Puffer und Dämpfer	Anpassungsfähigkeit, Widerstandsfähigkeit
Absorptionsfähigkeit	Degradationsresistenz	Widerstandsfähigkeit
Physische Redundanz		Widerstandsfähigkeit
Funktionelle Redundanz		Anpassungsfähigkeit
Mehrschichtiger Schutz mit unterschiedlichem Aufbau bzw. unterschiedlicher Wirkungsweise		Widerstandsfähigkeit
Integration von Menschen		Anpassungsfähigkeit, Improvisations- und Innovationsfähigkeit
Komplexitätsreduktion		Widerstandsfähigkeit
Reorganisationsfähigkeit	Mobilität, begrenzte Strukturiertheit	Anpassungsfähigkeit
Reparaturfähigkeit	interagierende Knoten, Integration von Menschen	Anpassungsfähigkeit, Improvisationsfähigkeit
Lokale Kapazität		Widerstandsfähigkeit, Anpassungsfähigkeit
Lose Kopplung	interagierende Knoten, lokale Kapazitäten, physische Redundanz	Anpassungsfähigkeit
Driftkorrektur	Reorganisationsfähigkeit, interagierende Knoten, Detektions- und Korrekturfähigkeiten (Subprinzip), unabhängige Kontrolle (Subprinzip)	Anpassungsfähigkeit
Informierte Entscheidung	interagierende Knoten, Integration von Menschen in Entscheidungsprozesse	Anpassungsfähigkeit
Reduktion verborgener Interaktionen	interagierende Knoten, Komplexitätsreduktion, unabhängige Kontrolle (als Subprinzip)	Anpassungsfähigkeit, Improvisationsfähigkeit
Unterbrechungstoleranz		Widerstandsfähigkeit
Verkehrstoleranz		Widerstandsfähigkeit
Sicherheit vor unautorisiertem Gebrauch oder Veränderung		Widerstandsfähigkeit
Systemleistungsreserve		Widerstandsfähigkeit, Anpassungsfähigkeit

[15] Inhaltliche Überschneidungen zwischen den Ergebnissen von Sterbenz (2010) und Jackson (2013) wurden berücksichtigt und entsprechende Wiederholungen entfernt.

Systemen diskutiert wird (Biggs et al. 2012; Bernhardt und Leslie 2013). Die physische Redundanz entspricht dem gleichartigen Ersatz, d.h. dasselbe Objekt in gleicher Ausführung, in einem System, das im Falle eines Komponentenausfalls die Funktion auf dieselbe Art und Weise ausüben kann (Biggs et al. 2012). In Strom(-übertragungs-) netzen wird diese Redundanz als (n-1) - Kriterium bezeichnet, welches beschreibt, dass bei Ausfall einer Komponente der Betrieb nicht beeinträchtigt wird, weil eine zweite Komponente die Funktion wirksam substituiert. Daher wirkt die physische Redundanz als widerstandserhöhend gegenüber einem (Stör-)Ereignis, ehe die Systemleistung zusammenbricht. Im Vergleich dazu ist die funktionelle bzw. diverse Redundanz anpassungsorientiert, da obsolete oder beschädigte Objekte durch andere Objekte mit gleicher Systemfunktion aber basierende auf einem anderen Funktionsprinzip ersetzt werden können. Einzig die Art und Weise, wie die tragende Funktion ausgeführt wird, differiert. Sofern die Begriffe von Stirling (2007) zur Beurteilung der physischen und funktionellen Redundanz aufgegriffen werden, lässt sich feststellen, dass die physische Redundanz tendenziell keine Diversität besitzt, da alle drei Kategorien die kleinste Ausprägung annehmen würden. Dennoch wird im Bereich der Ökosystemdienstleistungen davon ausgegangen, dass beide Ausprägungen, die physische und die funktionelle bzw. diverse Redundanz für ein resilientes sozio-technisches System benötigt werden. Immerhin kann es selbst bei einer hohen Diversität bei einer gleichzeitig geringen physischen und funktionellen Redundanz zur Erhöhung der Vulnerabilität kommen (Biggs et al. 2012).

In diesem skizzierten Zusammenhang wird häufig auch von Flexibilität gesprochen und der Begriff teilweise synonym mit Diversität verwendet. Dies ist beispielsweise bei einigen Veröffentlichungen im SCM der Fall (Carvalho et al. 2012; Jayant und Ghagra 2013). Allerdings ist dabei zumeist die Reaktion des Systems auf ein Störereignis im Fokus: Wie reagiert das System darauf bzw. wie kann es reagieren (vgl. Jayant und Ghagra 2013)? Ein wichtiges Beispiel im SCM ist mit Blick auf die Beschaffungsseite von Supply Chains das Strategie-Dilemma von Multiple-Sourcing vs. Single Sourcing, also der Bezug von Ressourcen von einem oder mehreren Lieferanten. Single Sourcing verfügt bei der Kosteneffizienz über Vorteile gegenüber dem Multiple Sourcing. Allerdings ist damit die Erhöhung der Abhängigkeit von dem einen Lieferanten verbunden. Im Fall des Lieferantenausfalls (egal ob Qualität, Insolvenz etc.) kann bei der Single-Sourcing Strategie nicht auf andere Lieferanten umgeschwenkt werden, sofern es sich um speziell gefertigte und keine Standardteile handelt. Beim Multiple Sourcing substituieren sich die Akteure durch ihre (gleichen) Funktionen. Ein weiteres Beispiel ist der Transport, d.h. die Distribution der Ware vom Zulieferer zum Bestimmungsort. Redundanz wäre in diesem Fall, wenn im Fuhrpark mehrere LKWs vorhanden sind, die den fälligen Transport durchführen können. Eine Alternative im Sinne der Diversität wäre ein Transport über Schiene oder Flugzeug, die zwar die gleiche Funktion „Transport“ ausführen können, aber aufgrund ihrer Eigenschaften diese auf andere Art und Weise bewerkstelligen. Ein ähnliches Vorgehen,

das sich Path Diversification nennt, ist auch im Bereich des Internets zu erkennen (Rohrer et al. 2014). Dabei wird zwar nicht die Transportart diversifiziert, aber die Transportwege, um eine verlässliche Kommunikation zwischen zwei Endpunkten herstellen zu können.

Die Einordnung der Prinzipien der funktionellen Diversität lässt sich folgendermaßen nachvollziehen. Den Herausforderungen, die aus abrupten und erwarteten Störereignissen herrühren, kann mit der physischen Redundanz entgegnet werden, die durch mehrfaches Vorhandensein der gleichen Komponente(n) die Widerstandsfähigkeit des Systems erhöht. Darüber hinaus hilft es, einen optimalen Mix in Bezug auf die verschiedenen Funktionen und Systemantworten anzustreben. Eine generelle Erhöhung der funktionellen Diversität und Diversität der Systemantworten erhöht primär die Bandbreite der Reaktionsmaßnahmen bei unerwarteten und abrupten Ereignissen. Gleiches gilt für den Bereich erwarteter und unerwarteter, schleichender Herausforderungen, weil die funktionelle Diversität einen Vorteil gegenüber physischen Redundanzen besitzt. Die Bandbreite der Anpassungsmöglichkeiten begünstigt durch die Diversität eine zweckmäßige Anpassung der Strukturen, wohingegen einfache physische Redundanzen diesen Spielraum nicht besitzen. Dieser Nachteil der physischen Redundanz kommt auch bei dem dritten und vierten Feld zur Geltung, das hauptsächlich durch die unvorhergesehenen Ereignisse charakterisiert ist. Die Diversität erhöht die Möglichkeiten der Systeme den Ereignissen mit Improvisation und Innovation zu begegnen.

Diversität und Redundanz stehen allerdings in einem Spannungsverhältnis zur Effizienz von Systemen, denn sie beanspruchen zu ihrer Etablierung und ihrem Erhalt Steuerungskapazitäten und Ressourcen. Zwischen dem Aufwand zur Erhaltung von Diversität und Redundanz und ihrem Nutzen bei der Überwindung von Störungen muss eine Lösung gefunden werden, die auch unvorhersehbare Störereignisse berücksichtigt.

Zur besseren Abgrenzung des recht umfassenden Konzepts der Diversität wird im Rahmen der Diskussion von Energieinfrastrukturen die geografische Diversität nach Lovins und Lovins als geografische Dispersion bezeichnet werden (Lovins und Lovins 2001). Damit ist das Ausmaß der geografischen Verteilung von Systemkomponenten gemeint, das den Vorteil besitzt, weniger verwundbar gegenüber lokalen Störereignissen zu sein. Allerdings kommt zu diesem Vorteil der Nachteil des notwendigen Transports des Versorgungsguts über längere Distanzen, zumindest dann, wenn der zugehörige Bedarf nicht in ähnlicher Weise verteilt ist.

Die geografische Dispersion dient primär dazu, die Wirkung abrupt auftretender Störereignisse zu begrenzen. Zum Umgang mit schleichenden Störereignissen stellt sie eher ein Hindernis dar, weil sich Anpassungen der Systemstruktur aufwendiger gestalten. Da die Dispersion in Bezug auf eine geografische Skala erfolgen muss, werden dabei gewisse Annahmen über die geografische Skala typischer Störereignisse gemacht. Nichtsdestotrotz kann die Dispersion nützlich sein angesichts einer großen Bandbreite auch unvorhergesehener Störereignisse.

Tabelle 2.5: Einordnung der Prinzipien physischer Redundanz, funktioneller Redundanz und Diversität der Systemantworten in die Matrix der Störereignisse.

Herausforderungen	Abrupt	Schleichend
Erwartet	• Physische Redundanz • Optimaler Mix der Funktionen • Optimaler Mix der Systemantworten	• Physische Redundanz • Funktionelle Redundanz • Diversität der Systemantworten
Unerwartet	• Funktionelle Redundanz • Diversität der Systemantworten	• Funktionelle Redundanz • Diversität der Systemantwort

Dadurch unterscheidet sie sich vom Prinzip der Vermeidung risikobehafteter Standorte. Um letzteres anwenden zu können, sind Kenntnisse über die geografische Verteilung von Schadensereignissen nötig, sodass dadurch nur eine Vorbereitung auf erwartete Störereignisse erfolgt. Entsprechend wird daher die geografische Dispersion in Bezug auf die Matrix der Störereignisse in Abgrenzung zur Vermeidung risikobehafteter Standorte wie folgt eingeordnet:

Tabelle 2.6: Einordnung des Prinzips der geografischen Dispersion in die Matrix der Störereignisse in Abgrenzung zum Prinzip der Vermeidung risikobehafteter Standorte

Herausforderungen	*abrupt*	*schleichend*
Erwartet	Vermeidung risikobehafteter Standorte	
unerwartet	Geografische Dispersion	

Die Auswirkungen von Störereignissen lassen sich in einem Systemverbund umso leichter begrenzen, je weniger starr die einzelnen Komponenten des Systems miteinander gekoppelt sind (Lovins und Lovins 2001, S. 195). Falls die noch unbeeinträchtigten Komponenten über eine gewisse Unabhängigkeit in ihrer Funktion verfügen, kann eine lose, bzw. schnell lösbare Kopplung die Ausbreitung von Störungen verhindern. Gerade im Zusammenhang mit abrupten und sogar unvorhergesehen eintretenden Störereignissen weisen Lovins und Lovins zudem auch auf die Bedeutung von Speicher- bzw. Pufferkapazität hin, die, wie im Abschnitt zum Lieferkettenmanagement vorgestellt, mithilfe von Lagerhaltung realisiert werden kann (Lovins und Lovins 2001, S. 201). Mithilfe von Puffern kann auch die in der IKT notwendige Unterbrechungstoleranz erreicht werden. Puffer und Speicher führen zur Überbrückung oder, im Falle starker Störungen, zu einer geringen und zeitlich verzögerten Reaktion des Systems bzw. seiner Komponenten. Diese inhärente Trägheit in der Reaktion, die Lovins und Lovins auch als ‚gutmütig' („forgiving") bezeichnen, verschafft Spielraum für Maßnahmen, mit denen die Auswirkungen des Versagens abgemildert werden können (Lovins und Lovins 2001, S. 201). Da-

mit ist das Prinzip der Gutmütigkeit bei der Gestaltung von Systemen bzw. Systemkomponenten prädestiniert zur Abmilderung der Auswirkungen abrupter Ereignisse, unabhängig davon, ob es sich dabei um erwartete oder unerwartete Ereignisse handelt. Schließlich geht es nur darum, den System- bzw. Komponentenausfall als finale Folge von Störereignissen abzumildern.

Eine zweite Eigenschaft, das von Lovins und Lovins hervorgehobene Prinzip des sicheren Versagens, ist bei abrupten Störungen von Bedeutung (Lovins und Lovins 2001, S. 193). Diesem Prinzip zufolge sollten Systeme so konstruiert sein, dass im Falle eines Fehlers bzw. ihres Versagens immer eine Reaktion ausgelöst wird, die weitreichende Schädigungen minimiert („fail-safe“). Da hierbei neben bekannten Ursachen ebenfalls unbekannte Störeffekte in ihrer Wirkung abgemildert werden, kann auch das sichere Fehlverhalten als Vorsorge gegenüber beiden Arten von plötzlichen Ereignissen, die bekannten wie die unbekannten, als ein angemessenes Gestaltungsprinzip angesehen werden. Park et al. (2011) weisen allerdings darauf hin, dass das fail-safe-Design in den diskutierten Fällen Fukushima, Deep Water Horizon und Hurricane Katrina die Zuständigen zu sehr in Sicherheit gewiegt hat. Sie empfehlen angesichts von unerwarteten und unbekannten Störereignissen ein safe-fail Design (Park et al. 2011, S. 398).

Tabelle 2.7: Einordnung der Prinzipien Gutmütigkeit und sicheres Fehlverhalten in die Matrix der Störereignisse

Herausforderungen	*abrupt*	*schleichend*
Erwartet	Lose Kopplung Gutmütigkeit Sicheres Versagen fail-safe	
unerwartet	Lose Kopplung Gutmütigkeit safe-fail	

2.3.2 Systemkonstitution und Zusammenstellung von Systemsegmenten

Neben den Resilienz steigernden Beiträgen der Systemkomponenten, die im vorherigen Abschnitt diskutiert wurden, liefert insbesondere auch die Art und Weise der Systemarchitektur einen wichtigen Beitrag zur Steigerung der Resilienz eines Systems. Nachfolgend werden die Prinzipien der Modularität und die damit eng verbundenen Prinzipien der hierarchischen Struktur, der Dezentralität und Zentralität sowie die Vernetzungsart, der Vernetzungsgrad und verschiedene Kopplungsformen erläutert.

Auf der Ebene der Systemanordnung stellt die **Modularität** ein wichtiges Designprinzip dar, das Resilienz fördernd wirken kann. Eine übereinstimmende Definition für Modularität besteht bisher nicht, jedoch ist vielen Definitionsansätzen gemein, dass die Modularität durch Subsegmente, so genannte Module, konstituiert wird (Gershenson et al. 2003). Lovins und Lovins

bezeichnen ein derartiges Modul als kleinste, einem Arbeitsgang bzw. einer Funktion zugeordnete Einheit eines Prozesses (Lovins und Lovins 2001, S. 192). Die Grundvoraussetzung für die Umsetzung dieses Prinzips ist eine gewisse Standardisierung der Module und insbesondere ihrer Schnittstellen (Huang und Kusiak 1998), um eine problemlose Interaktion zu ermöglichen (Lovins und Lovins 2001). Standardisierung fördert die Austauschbarkeit der Systemelemente, allerdings sollten die jeweiligen Elemente nicht für einen zu engen Arbeitsbereich ausgelegt sein, sondern einen möglichst breiten Bereich von Eigenschaften, wie beispielsweise der Spannung oder der Frequenz im Stromsystem, tolerieren können (Lovins und Lovins 2001). Die Standardisierung sollte zudem so ausgelegt sein, dass keine systematischen Fehler auftreten können oder gefördert werden.

Generell kann ein Modul zumeist eine oder mehrere vom Gesamtsystem unabhängige Funktionen erfüllen, die zusammengenommen einen Beitrag zur Gesamtfunktion leisten und diese dadurch ermöglichen. Die unabhängige Funktionsfähigkeit eines Moduls entspricht dem im Abschnitt zur IKT erwähnten Prinzip der lokalen Kapazität.

Im SCM wird dieses Prinzip auf der Produktebene verwendet, um „Postponement Strategien“ umsetzen zu können (Gualandris und Kalchschmidt 2013). Das Ziel der *Produkt*modularität ist dabei die möglichst späte Einbindung der Kundenbestellung und der Produktspezifikation in der Herstellungskette. Die Kombination verschiedener Produktmodule ermöglicht verschiedene Produktvarianten. Im Vergleich dazu, fokussiert die *Prozess*modularität auf den Herstellungs- und Bearbeitungsprozess des Produktes, welcher in kleine standardisierte Teilprozesse untergliedert sein muss. Dadurch kann zum einen die Bearbeitungssequenz umgeordnet und zum anderen können auch die Kundenspezifikationen relativ spät im Produktionsprozess eingebracht werden (Gualandris und Kalchschmidt 2013). Modularität ist also auch auf Fabrikebene realisierbar.

In ökologischen Systemen kann diese Modularisierung, bspw. In der Waldwirtschaft, durch die Bepflanzung einzelner „Waldmodule“ die Ausbreitung potenzieller Waldbrände (Kaskadenereignis) eindämmen (Carpenter et al. 2012). Die Vorteile der modularen Anordnung liegen in der Risikominimierung insbesondere bei Kaskadenfehlern, dem leichten Austausch beschädigter Module und der funktionellen Erweiterung durch neue Module (Gershenson et al. 2003).

Modularisierung setzt eine gewisse funktionelle Unabhängigkeit zwischen den einzelnen Modulen voraus. Sie benötigt daher eine erhöhte Flexibilität bei der Funktionsintegration, was auf eine eher lose Vernetzung hinausläuft (Bate und Kelly 2003). Zumindest müssten die Verbindungen der Module untereinander stark standardisiert und lose gekoppelt sein, so dass ein Umbau (z.B. andere Designparameter) oder Austausch des Moduls die umliegenden Einheiten nicht beeinträchtigt. Eine lose Kopplung wird von Lovins und Lovins als Vorteil angesehen, da sie einer schnellen Isolierbarkeit im Schadensfalle zugutekommt (Lovins und Lovins 2001).

Mit dem Blick auf den potenziellen Beitrag der Modularität zu einem Leitkonzept „Resilientes sozio-technisches System“, lässt sich zunächst feststellen, dass Modularität nur schwer einer Kategorie in der Matrix der Störereignisse zugeordnet werden kann. Für bekannte Herausforderungen, die sich abrupt oder schleichend ereignen, kann sie einerseits die Widerstandsfähigkeit (erwartet, abrupt) erhöhen, indem die Auswirkungen von Störereignissen durch modulare Bauweise lokal begrenzt werden. Andererseits wird die Anpassungsfähigkeit durch die Standardisierung der Module erhöht. Eng verbunden mit der Unabhängigkeit eines Moduls von einem benachbarten Modul ist auch die Begrenzung der tendenziellen Fehlerfortpflanzung.

Durch den einfachen Austausch von Modulen und damit die Vermeidung komplizierter Austauschprozesse, bieten Module weiterhin auch ein Potenzial zum Umgang mit nicht vorhersagbaren Herausforderungen.

Tabelle 2.8: Einordnung des Prinzips der Modularität in die Matrix der Störereignisse

Herausforderungen	Abrupt	Schleichend
Erwartet	Modularität	
Unerwartet		

Im Sinne eines Resilienz-steigernden Systemdesigns wird häufig auch eine Hierarchisierung der Systemebenen empfohlen. Als Argument wird der Vorteil einer Begrenzung von Störereignissen auf tiefer liegende Systemebenen genannt, so dass deren Ausfall ohne Einfluss auf die Systemleistungen des Gesamtsystems, d.h. der übergeordneten Ebenen bleibt (Lovins und Lovins 2001). Die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems würde dadurch größer sein, als die Zuverlässigkeit der verschiedenen Systemebenen (Lovins und Lovins 2001). In den zuvor betrachteten Beispielen von ICT, SCM und auch bei Strom bzw. Energieinfrastrukturen sind derartige Hierarchien Bestandteil der Systemarchitektur. ICT und Energieinfrastrukturen besitzen beide eine Backbonestruktur, die zur Daten bzw. Strom-/Energieübertragung dient und an den jeweiligen Orten in mehrere Ebenen untergliedert ist. Gleiches ist bei Supply Chains der Fall, die vor allem in der Automobil- und Maschinenbauindustrie, entsprechend den Bau(unter)gruppen untergliedert sind und bei denen unterschiedliche Akteure an der Wertschöpfungskette auf verschiedenen Stufen beteiligt sind.

2.3.3 Resilienz-fördernde Prinzipien mit Blick auf Akteure

Während die zuvor diskutierten Prinzipien und Ausgestaltungen eher auf die ökonomisch-technischen Aspekte sozio-technischer Systeme abzielen, bietet der Fokus auf die Akteursseite der sozio-technischen Systeme eine Schnittstelle, an welcher ebenfalls relevante Aspekte für die Gestaltung Resilienter sozio-technischer Systeme erörtert werden können. Die Tatsache, dass eine Systemleistung immer verschiedene Akteure beschäftigt, die zwangsläufig miteinander interagieren, verweist auf die Interdependenzen zwischen Akteuren und Technik. Als

Grundvoraussetzung für ein Reagieren und Agieren im Sinne eines Resilienten sozio-technischen Systems sind somit nicht nur das Vorhandensein von Ressourcen und Optionen auf der technischen Seite nötig, sondern auch die Bereitschaft und die Fähigkeit zum angemessenen Handeln auf der Seite der Akteure. Für letzteres ist es nötig, grundlegende Prinzipien innerhalb des Systems zu integrieren. Im Folgenden sollen die grundlegenden Anforderungen vorgestellt und erläutert werden. Insgesamt sind vier Aspekte zu beachten (Kallaos et al. 2014; Park et al. 2013):

1.) das Erkennen, Antizipieren und Vorbereitet sein,
2.) die Kommunikation,
3.) die notwendigen Verantwortlichkeiten sowie
4.) das Zulassen von innovativen Impulsen aus dem System und auf das System.

Im Resilienzkonzept spielen die ersten beiden Punkte vor dem Eintritt eines Störereignisses eine wichtige Rolle. Die Punkte zwei und drei sind auch während des Störereignisses von Bedeutung. Der vierte Aspekt dient der Wiederherstellung und Verbesserung der Systemleistungen. Alle vier Aspekte gelten sowohl für die Bewältigung erwarteter als auch unerwarteter Störereignisse.

Als Voraussetzung für die Bewältigung von Störungen und Ausfällen wird das *Erkennen, das Antizipieren und das Vorbereitet sein* erachtet (Lovins und Lovins 2001; Folke et al. 2010; Sterbenz et al. 2010; Kallaos et al. 2014). Park et al. (2013) fassen diese Fähigkeiten im rekursiven Prozess von (1) sensing, (2) anticipation, (3) adaptation, and (4) learning zusammen.

Unabhängig von der Charakteristik des Störereignisses, ist es zwingend notwendig, das Ereignis und dessen Einfluss auf die Systemleistung möglichst früh zu erkennen. Sofern Abweichungen erkennbar sind, werden diese mithilfe einer Datenbank (Gedächtnis) und bekannten Gefährdungsmodellen in einem bestimmten Kontext abgeglichen und eventuelle Gegenmaßnahmen ausgelöst (Christopher und Peck 2004; Sterbenz et al. 2010; Carpenter et al. 2012). Es wird somit auf die Erfahrungen und das Wissen aus vergangenen Ereignissen zurückgegriffen und kombiniert, worauf Smith und Stirling (2008) sowie Carpenter et al. (2012) verweisen. Unabdingbar für die Fähigkeit des Erkennens ist ein geeignetes Monitoring-System, das den Systemleistungen entsprechend (in Echtzeit/Status oder prospektive Trends) kontrolliert und überwacht (vgl. Sterbenz et al. 2010). Monitoring-Systeme sollten aber nicht zu komplex gestaltet sein, um Anfälligkeiten durch eine hohe Anzahl von Systemkomponenten zu vermeiden (Lovins und Lovins 2001). Zudem ist es wichtig, dass apparative Vorkehrungen immer auch durch Menschen überwacht und deren Entscheidungen korrigiert oder ergänzt werden können. Jackson et al. (2013) hatten darauf schon bei IKT-Systemen hingewiesen.

Für unerwartete Ereignisse gestaltet sich das Erkennen schwieriger, da nicht unbedingt die Voraussetzungen der Identifikation gegeben sind. Es besteht zudem die Gefahr, dass unwahrscheinliche Ereignisse zwar erkannt, aber falsch beurteilt bzw. sogar als Wahrnehmungsfehler eingeordnet werden, eben weil man sie für unmöglich hält, wie es Park et al. anhand der Entdeckung des antarktischen Ozonlochs im Jahre 1985 verdeutlichen:

„For example, the existence of the Antarctic ozone hole was detected by satellite measurements prior to discovery by land instruments in 1985. However, the satellite observations were ignored by the data processing algorithms that redacted near-zero readings as faulty" (Park et al. 2013, S. 362).

Die Ursachen liegen Park et al. zufolge nicht nur in der Wahrnehmung, sondern auch in den getroffenen Annahmen. Der Bereich, für den Ereignisse antizipiert werden, muss möglichst weit gefasst sein, um auch Ereignisse mit geringster Wahrscheinlichkeit noch mit zu erfassen. Entsprechend der Antizipation unwahrscheinlicher Ereignisse sollten auch die Vorbereitungsmaßnahmen möglichst universell sein, um im Falle einer wie auch immer gearteten Beeinträchtigung der Systemleistungen wirksam werden zu können (Kallaos et al. 2014). Als klassisches Mittel können dafür Notfallpläne entworfen werden, die in extremen Situationen zum Einsatz kommen. Generell dient das Erkennen, das Antizipieren und das Vorbereitet sein dazu, Transparenz im Sinne der Ursache-Wirkungs-Beziehung herzustellen. Auf der Basis dieser Erkenntnisse können Maßnahmen zur Verbesserung oder Stabilisierung ergriffen werden (Christopher und Peck 2004).

Die *Kommunikation* als zweiter Aspekt eines akteursseitigen Resilienzkonzepts knüpft nahtlos an den zuvor beschriebenen Part des Erkennens, Antizipierens und des Vorbereitet seins an. Nachdem ein Störereignis erkannt wurde, ist es wichtig, diese Erkenntnisse den Akteuren mitzuteilen. So wird beispielsweise im SCM erst dann eine entsprechende, abgestimmte und zweckmäßige Handlung ermöglicht, wenn die Glieder der Wertschöpfungskette untereinander kommunizieren und damit Rückkopplungen bzw. Korrekturen ermöglichen. So können beispielsweise durch die Umkehrung des Informationsflusses, d.h. heißt nicht traditionell in Flussrichtung mit dem Materialfluss, sondern entgegengesetzt, die möglichen Überraschungen (unter anderem der Bullwhip-Effekt[16]) reduziert und ein schnelleres Handeln ermöglicht werden. Insbesondere beim Just-In-Time oder dem Just-in-Sequence Logistikkonzept sind die Zulieferer und Kunden darauf angewiesen, Echtzeitinformationen zur Bestell-/Produktions- und Liefersituation austauschen zu können, um bei engen Zeitfenstern mit zum Teil hoher zeitlicher Auflösung zu kooperieren. Auch Farrell et al. gehen auf die Kommunikation als wichtigen Aspekt bei der Bewältigung von Störereignissen ein. Dabei weisen sie jedoch auch darauf hin,

[16] Der Bullwhip-Effekt (auch Peitscheneffekt genannt) bezeichnet das Phänomen, dass sich Nachfrageschwankungen zum Ursprung einer Lieferkette hin vergrößern (Forrester (1961)).

dass zwischen einzelnen Akteuren eines Systems Privatisierung und Konkurrenz die Kommunikation beeinträchtigen können und damit die Vorbereitung und im Ernstfall die Bewältigung von Krisensituationen erschweren (Farrell et al. 2004).

Der dritte akteursseitige Aspekt betrifft die *Verantwortlichkeiten* im Gesamtsystem und ist wiederum eng mit den bereits beschriebenen Voraussetzungen verknüpft. Relevant erscheint dabei die zugeschriebene Verantwortung im Falle (aber auch unabhängig) von Störereignissen und deren Auswirkungen. In den vergangenen Jahren wurde im Bereich der sozio-ökologischen Resilienz die *polyzentrische Führung* und der *Grad der Organisation* als relevante Eigenschaften für resilientes Handeln bezeichnet (Carpenter et al. 2012). Der Grundgedanke ist, dass das jeweilige Management für die jeweilige Herausforderung entsprechend skaliert und eingesetzt werden kann. Polyzentrische Führungen, also mehrere kleinere Führungseinheiten, besitzen im Gegensatz zu globalen Skalen den Vorteil, vor Ort die Gegebenheiten mit berücksichtigen zu können. Polyzentrische Führungen stehen zudem im Einklang mit dem *Subsidiaritätsprinzip*, als einer Resilienz erhöhenden Eigenschaft, der zufolge die Elemente der unteren Organisationsebenen eines Systems dasjenige regeln, das auf dieser Ebene geregelt werden kann und dabei möglichst ohne Rückgriff auf Entscheidungen oder Leistungen übergeordneter Ebenen auskommen. Sie besitzen die Fähigkeit, im Laufe der Zeit durch besseres Monitoring sowie Lernen Strategien zu entwickeln. Polyzentrische Führungen fördern dadurch Innovationen, das Vertrauen der lokalen Akteure und auch nachhaltigere Lösungsansätze (Ostrom 2010). Vertrauen und offene Kommunikation werden dabei als besonders wichtig erachtet, auch wenn Opportunismus nicht ganz verhindert werden kann (Ostrom 2010; Biggs et al. 2012; Carpenter et al. 2012).

Neben der polyzentrischen Führung wird der Aspekt der „*Bridging Organisation*“ im Rahmen des Wissensmanagements diskutiert. Insbesondere bei der Implementierung von polyzentrischen Einheiten ist die Grundvoraussetzung für eine (offene) Kommunikation und Feedback, die Einrichtung so genannter Brückeninstanzen, die im Fall von multiplen Akteuren eine Vermittlerrolle einnehmen können und den Wissenstransfer fördern. Sie schaffen damit in adaptiven Governance-Kontexten eine Grundvoraussetzung für das Lernen und auch Raum für die Vertrauensbildung (Carpenter et al. 2012; Crona und Parker 2012).

Der vierte Aspekt, das *Zulassen von innovativen Impulsen aus dem System und auf das System,* ist eher nach einer eingetretenen Beeinträchtigung der Systemleistungen angesiedelt und dient dem Ziel, den Normalbetrieb wiederherzustellen (Kallaos et al. 2014). Unabhängig von der Störereignisart ist in jedem Fall das Lernen sowie die Wissensspeicherung (und Verteilung) wichtig, um Maßnahmen zu evaluieren und gegebenenfalls anzupassen. Daher ist es ebenso relevant, nicht in starren Strukturen zu verharren, sondern innovativen Konzepten, auch über die eigenen Grenzen hinweg, den notwendigen Raum zur Entfaltung zu geben.

Lovins und Lovins machen einen pragmatischen Vorschlag, um nach Fehlern und Beeinträchtigungen ein System in Richtung auf einen höheren Grad von Resilienz weiter zu entwickeln: Sie weisen darauf hin, dass *Einfachheit, Reproduzierbarkeit und Verstehbarkeit* die Resilienz fördern, weil mehr Akteuren der Zugang zur Weiterentwicklung oder Verfeinerung der Komponenten des Energiesystems gewährt wird (Lovins und Lovins 2001) Reproduzierbarkeit meint dabei, dass keine hochspezialisierten Fertigungsstätten notwendig sind. Auf dieser Grundlage kann eine breitere Beteiligung an der Verbesserung des Systems und damit voraussichtlich eine größere Vielfalt von Lösungsmöglichkeiten erschlossen werden. Das kommt sowohl der Vorbereitung auf erwartete als auch auf unerwartete, schleichend eintretende Probleme, entgegen.

2.3.4 Gestaltungsprinzipien und -elemente Resilienter sozio-technischer Systeme – Erkenntnisse aus dem Risikomanagement

Die Erkenntnisse aus dem Risikomanagement für die Gestaltung Resilienter sozio-technischer Systeme lassen sich in den beiden folgenden Listen zu ‚Fähigkeiten und Qualitäten' sowie zu ‚Gestaltungsprinzipien und –elementen' zusammenfassen:

Fähigkeiten und Qualitäten Resilienter sozio-technischer Systeme:

- **Widerstandsfähigkeit**

  Absorptionsfähigkeit

  Gutmütigkeit

  Sicherheit gegenüber unautorisiertem Gebrauch und Veränderungen

  Sicheres Versagen (safe-fail)

  Unterbrechungstoleranz

  Verkehrstoleranz

  Degradationsresistenz

- **Adaptivität**

  Kommunikation

  Lernen

  Detektionsfähigkeit

  Reparaturfähigkeit

  Reorganisationsfähigkeit

- **Innovations- und Improvisationsfähigkeit**

  Zulassen innovativer Impulse von innen und außen

  Informierte Entscheidung (Erkennen, Antizipieren, Vorbereitet sein)

  Verantwortung übernehmen

  Driftkorrektur

Designprinzipien und Bauelemente Resilienter sozio-technischer Systeme

- **Ressourcenverfügbarkeit**
  Ressourcendiversität
  Multiple sourcing
  Leistungsreserven, Schlupf/slack
  Ungenutzte mobilisierbare Ressourcen (zeitlich, finanziell, organisatorisch
- **Redundanz**
  Physisch
  Funktional / diversitär
- **Diversität, Variabilität, geographische Dispersion**
  Variety (Typenvielfalt), Balance (Anteil der verschiedenen Typen), Disperity (Unterschiedlichkeit der Typen)
  Strukturell
  Funktional
  Diversität der Systemantworten
- **Modularität und Multifunktionalität**
  Mobilität der Elemente
  Begrenzte Strukturiertheit der Elemente
  Prozess- und Produktmodularität der Systemkomponenten
  Kompatible, standardisierte Schnittstellen
- **Dämpfer, Puffer und Speicher**
- **Effizienz**
  Ressourceneffizienz
  Einfachheit
  Komplexitätsreduktion
- **Hierarchischer Aufbau**
  Ausgewogenes Verhältnis von Zentralität und Dezentralität
  Mehrschichtiger Schutz
- **Interagierende Knoten**
  Ausgewogenes Verhältnis positiver und negativer Rückkopplungen

Kommunikation auch über unabhängige Kanäle (BOS) Backbonestrukturen
Brückeninstanzen
Verstehbare und transparente Kommunikation
Monitoring
Reduktion verborgener Interaktionen
Unabhängige Kontrolle

- **Lose optionale Kopplungen**
  Vernetzungsart und Vernetzungsgrad
  Vermaschte Netze
  Interagierende Knoten
  Lösbare Kopplungen
  Flexible Strukturen
  Existenz von Brückeninstanzen
- **Subsidiarität**
  Angemessenes Verhältnis von Dezentralität und Zentralität
  Polyzentrische Governance
  Hierarchische Strukturierung
  Lokale Kapazitäten (Vor-Ort-Kenntnisse)
  Fehlerkultur
  Einfachheit – Komplexitätsreduktion
- **Handlungsfähige und -bereite Akteure**
  Institutionen
  Akteursnetzwerke
  Task Forces
  Notfallübungen

Wenn wir diese Listen mit den Ergebnissen des biomimetischen Zugangs vergleichen, zeigen sich interessante Gemeinsamkeiten und Unterschiede. Ressourcenverfügbarkeit, Diversität, Redundanz und Modularität spielen eine ähnlich große Rolle in beiden Zugängen. Mit etwas Wohlwollen finden sich auch Entsprechungen zum Systemaufbau (lose Kopplungen interagierende Knoten), wobei die biomimetischen Aussagen präziser erscheinen: ‚hohe, gleichmäßig verteilte Vernetzung mit wenig spezialisierten Interaktionen zwischen den Spezies/Arten‘, ‚geringe Korrelation zwischen den von Veränderungen betroffenen Eigenschaften und den für die Ökosystemfunktionen wichtigen Eigenschaften‘.

Zusätzliche Aspekte kamen naheliegender Weise im erfahrungsbasierten Risikomanagement dort in den Blick, wo es um die Integration von Menschen bei der Gestaltung Resilienter Systeme geht. Hinzugekommen sind damit das Lernen mit ‚Erkennen, Antizipieren, Vorbereitet sein und Verantwortung übernehmen‘, die ‚Sicherheit gegenüber unautorisiertem Gebrauch

und Veränderungen‘ sowie die interessanten Systemfähigkeiten ‚Gutmütigkeit‘ und ‚sicheres Versagen/ safe fail‘.

Abbildung 2.2: Fähigkeiten und Gestaltungsprinzipen Resilienter sozio-technischer Systeme (Quelle Risikomanagement, eigene Darstellung).

Besonders interessant mit Blick auf die Unterschiede ist, dass die biomimetischen Aspekte der dynamischen Stabilität (Homöostase, Fließgleichgewicht), der Selbstorganisation, der Selbstheilung und der mehrdimensionalen Optimierung aber auch des ‚Ressourcenopportunismus‘ und der ‚Kreislaufwirtschaft‘ im erfahrungsbasierten Risikomanagement keine Entsprechung finden. Es entsteht der Eindruck, dass das Risikomanagement sozusagen nicht auf der Höhe der Theorie komplexer Systeme bzw. des Wissens über Umgangs mit komplexen Systemen agiert, und dies sogar selbst dort, wo im Risikomanagement Resilienz als Alternative zum klassischen Risikomanagement thematisiert wird (z.B. Park et al. 2011 und Park et al. 2013). Es fehlen die Aspekte der Autopoiesis und Emergenz (Maturana, Varela 1980) wie Homöostase, Selbstorganisation und Selbstheilung. Und es fehlten die behutsam adaptiven Aspekte im Umgang mit komplexen Systemen, der Ressourcenopportunismus und die eher ‚demütige‘ Form der Anpassung, also die Verabschiedung vom Anspruch der Kontrolle und der technischen Beherrschbarkeit. Es fehlt sozusagen die paradigmatische Wende im ‚resilience engineering‘. Und schließlich deutet auch das Fehlen der mehrdimensionalen Optimierung darauf

hin, dass das Einlassen auf die unreduzierte Komplexität der Gegenstandsbereiche im Risikomanagement noch zu wünschen übriglässt.

Eine Auswahl der Fähigkeiten und Gestaltungsprinzipien und –elemente Resilienter soziotechnischer Systeme ist in Abbildung 2.2 zusammengestellt.

2.4 Das Leitkonzept Resiliente Energiesysteme

Wenn es im nun folgenden Schritt um das Leitkonzept Resiliente Energiesysteme geht es zum einen um eine Spezifizierung auf den Gegenstands- und Handlungsbereich sozio-technisches Energiesystem. Zum anderen müssen die beiden bisherigen Leitkonzepte integriert und auf den Energiebereich bezogen werden. Dabei verdienen neben der Integration von Akteuren und Institutionen die Überlegungen zur Gestaltung der Systemstrukturen im Energiesystem besondere Aufmerksamkeit.

Die Energieversorgungsunternehmen (EVU) in der Bundesrepublik Deutschland sind nach Paragraph 11 sowie Paragraph 49 des Energiewirtschaftsgesetzes zur Absicherung gegenüber Risiken verpflichtet. Dazu werden die technischen Regeln des Verbands der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik e.V. (VDE) angewendet, die für das technische Sicherheitsmanagement (TSM) aufgestellt worden sind (BBK 2015).

Daneben sind auch die Regeln des Qualitätsmanagements (DIN EN ISO 9001:2008), des Umweltmanagements (DIN EN ISO 14001:2009) und des Arbeitsschutzmanagements (z.B. des Occupational Health and Risk Management System (OHRIS) oder der Occupational Health and Safety Assessment Series (OHSAS) zur Risikovermeidung von Bedeutung (BBK 2015).

Die vier Aufgaben

- Frequenzhaltung,
- Spannungshaltung,
- Versorgungswiederaufbau und
- Betriebsführung

repräsentieren für die EVUs die wichtigsten Bereiche, die für die Aufrechterhaltung der elementaren Systemdienstleistungen der Energieversorgung notwendig sind. Um diese Leistungen auch unter Druck und Störungen zu gewährleisten, wurden im bestehenden Energiesystem auf unterschiedlichsten Ebenen Vorkehrungen getroffen, die zur Resilienz des Systems beitragen (vgl. Kapitel 2.1.2).

In den folgenden Abschnitten werden die bereits implementierten Resilienz fördernden Mechanismen und Strukturen des Energiesystems[17] den von uns identifizierten Bauprinzipien eines Resilienten Systems (vgl. Kapitel 2.1.2) zugeordnet.

Hier ist zunächst die Diversität zu nennen, welche Stirling nach Variety, Balance und Disparity unterscheidet (Stirling 2007, vgl. Kapitel 2.3.1).

Eine funktionelle Diversität ist im deutschen Energiesystem durch die unterschiedlichen Erzeugungsanlagen gegeben. Verglichen mit der Situation vor dem Beginn des Ausbaus von Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien, als neben den thermischen Kraftwerken lediglich die Wasserkraft in nennenswertem Ausmaß genutzt wurde, gibt es mittlerweile einen Mix der größeren Erzeugungsanteile aus thermischen Kraftwerken, Windkraft, Solarstrom, Biomasseverwertung und Wasserkraft.

Auch die Ressourcendiversität hat sich mit dem Ausbau der auf Sonneneinstrahlung, Wasser, Wind, Biomasse sowie Geothermie zurückgreifenden Erneuerbaren Energien erhöht. Sie ergänzen die unterschiedlichen Brennstoffe der thermischen Kraftwerke, zu denen Stein- und Braunkohle, Gas sowie Uran zählen.

Der sogenannte Strommix, der Anteil der Energieträger an der deutschen Bruttostromerzeugung, setzte sich im Jahre 2014 aus 25,6 % Braunkohle, 18% Steinkohle, 15,9% Kernenergie, 9,6% Erdgas, 5,2% weiteren nicht erneuerbaren Energieträgern und 25,8% Erneuerbaren Energien zusammen. Die Erneuerbaren teilten sich in 8,4% Windkraft (onshore), 1,2% Windkraft (offshore), 8% Biomasse, 5,8% Photovoltaik und 3,4% Wasserkraft auf (BDEW 2014 zitiert in https://www.unendlich-viel-energie.de/strommix-deutschland-2014).

Neben der Vielfalt der Erzeugungsstrukturen und ihrer Ressourcen trägt auch die räumliche Verteilung der Anlagen zur Erzeugung und zur Verteilung von Energie zur Resilienz des Energiesystems bei. Diese Eigenschaft wird mit der räumlichen Dispersion ausgedrückt. Das deutsche Energiesystem weist, bis auf die Konzentrationen einer Reihe großer Kohlekraftwerke im Rheinland, an der Ruhr, der Saar sowie in der Lausitz eine relativ verteilte Struktur der Erzeugungsanlagen auf. Dies könnte sich mit dem Ausbau der Off-Shore-Windenergieanlagen wieder ändern.

2.4.1 Diversität

Wir unterscheiden nach Stirling (2007) drei verschiedene Ausprägungen von Diversität: 1. Vielfalt (Variety, wieviel verschiedene Typen gibt es?), Verhältnis (Balance, wie sind diese im System verteilt?) und Ungleichheit (Disparity, wie stark unterscheiden sich die Typen?). Zusätzlich

[17] Vgl. hierzu auch Resilienzmaßnahmen aus Appendix A in „Climate Change and the U.S. Energy Sector: Regional Vulnerabilities and Resilience Solutions“ (2015) des US Dept. of Energy

ist auf Dispersion zu achten, also auf die räumliche (geographische) Verteilung. Diversität verschiedenster Aspekte ist allen Fähigkeiten zuträglich. Allgemein ist darauf zu achten, dass diese sowohl funktional als auch strukturell Diversität bieten. Dies geschieht durch unterschiedliche Typen von Erzeugungsanlagen und vielfältige Ressourcenquellen mit breiter Ausgangsbasis. Im Falle eines regionalen Energiesystems mit geographisch festgelegten Potential, also begrenzten Diversifikationsmöglichkeiten, können Umwandlungstechnologien die Ressourcenbasis und Verwendungsmöglichkeiten vergrößern. Hierzu zählen neben Power to Gas / Fuel Systeme auch bivalente Wärmepumpen, durch welche Strom „speicherbar“ wird. Auch die direkte Nutzung von Sonnenenergie über solarthermische Systeme oder in gespeicherter Form als Biomasse in Kleinfeuerungsanlagen ist in der Region möglich und sollte genutzt werden. Der Verkehrsbereich bedarf ebenso einer Diversifizierung: sowohl der Antriebstechnologie und zugehörigen Energiequellen (elektrisch – Batterie, H_2-Brennstoffzelle, Verbrennungsmotor), als auch der Verkehrsträger und Nutzungsgewohnheiten. Intermodalität ist hier das Stichwort und bezieht sich auf die intelligente Vernetzung der existierenden Fortbewegungsarten, ohne dass einem Verkehrsträger per se, wie meistens dem PKW, ein Vorzug gegeben wird. Um eine Diversifizierung in der gesamten Fortbewegungskette (zu Fuß, Fahrrad, E-Bike, ÖPNV, Taxi, Carsharing (privat, Gewerbe), Privat-PKW, Transporter) zu erreichen, bieten sich Informationssysteme an, wie z.B. eine Mobilitätsapp. Eine Vielfalt an Akteuren kann dabei helfen die Dominanz einzelner Technologien zu unterbinden. Werden Bürger aus allen Bevölkerungsschichten beteiligt, wirkt sich dies häufig vorteilhaft auf die Akteursvielfalt aus. Ebenso ist bei Steuer- und Regelmechanismen darauf zu achten, dass diese nicht monolithisch aufgebaut sind, d.h. quasi aus einem Stück bestehen und nur im Ganzen adaptiert bzw. angepasst werden können. Eine verteilte Regelung, bei der die einzelnen Knoten, auch bei Ausfall der Kommunikation untereinander selbständig agieren können, ist meist modular aufgebaut und bietet sich deshalb an.

2.4.2 Redundanz

Wir unterscheiden physische und funktionelle bzw. diversitäre Redundanz. Die physische kann zudem noch in heiße und kalte Redundanz unterscheiden werden. Unter funktionalen bzw. diversitären Redundanzen wird dabei verstanden, dass eine Komponente unterschiedliche Funktionsweisen hat. Falls eine zusätzliche Anlage zur Energieerzeugung nicht der ausgefallenen Anlage entspricht, sondern auf andere Energiequellen zurückgreift und somit auf anderen Wirkprinzipien beruht, kann man von diversitärer Redundanz sprechen. Wenn diversitäre bzw. funktionelle Redundanz vorliegt, dann unterscheiden sich die Strukturen und Anlagen, die eine gewünschte Leistung erbringen. Die von ihnen erbrachte Dienstleistung bleibt jedoch gleich. Bivalente Systeme, bspw. Wärmepumpen, Hybrid-Fahrzeuge oder Multikraftstoffbrennofen können auch sehr gut in den Regionen umgesetzt werden. Redundanzen lassen sich in allen Bereichen, der Erzeugung, der Verteilung, Steuerung und Regelung, Kommunikation

aber auch bei weichen Faktoren wie Wissensmanagement, Personalplanung und Weiterbildungsmaßnahmen bilden. Die Trade-Offs zwischen Resilienz und Effizienz werden beim Thema Redundanzen besonders deutlich. Dabei hat eine physisch redundante Auslegung funktionsrelevanter Strukturen im gegenwärtigen Energiesystem schon eine recht lange Tradition. Sie drückt sich im sogenannten n-1 Prinzip aus. Bei Ausfall eines von n redundanten Systemelementen sind diesem Prinzip zufolge noch n-1 redundante Elemente vorhanden, die die Funktion des ausgefallenen Elements übernehmen können (Schwab 2009, S. 6f). Das Redundanzprinzip wird dabei in unterschiedlichen Formen angewendet. Einerseits als heiße Redundanz, bei der mehrere gleichartige Strukturen zur Verfügung und auch parallel betrieben werden, um eine bestimmte Funktion zu übernehmen (vgl. ebd.). Die parallele Anordnung von Übertragungsleitungen ist hierfür das sichtbarste Beispiel. Um im Sinne heißer Redundanz zu funktionieren, sind sie so ausgelegt, dass beim Ausfall einer Leitung auch die zweite Leitung allein noch die vorher über beide Leitungen übertragene Gesamtleistung bewältigen kann.

Wenn die im Bedarfsfall zur Verfügung stehenden gleichartigen Anlagen nicht parallel betrieben werden, sondern erst zugeschaltet werden, dann spricht man von kalter Redundanz. Zusätzliche Trafos in Umspannwerken oder auch eine zusätzliche Anlage zur Energieerzeugung (Notstromaggregat), auf die bei Bedarf zurückgegriffen werden kann, sind hierfür Beispiele. Die Umschaltzeit sollte bei der kalten Redundanz möglichst klein sein, um Unterbrechungen der jeweiligen Funktion und der entsprechenden Systemdienstleistung so kurz wie möglich zu halten.

Physische aber vor allem auch funktionale bzw. diverse Redundanzen erhöhen die Widerstandsfähigkeit von Systemen.

2.4.3 Modularität

Auch Merkmale von Modularität finden sich in gewissem Umfang im bestehenden Energiesystem wieder. Einerseits in standardisierten und somit leichter austauschbaren Elementen wie Transformatoren, Schaltern, Kupplungen und andererseits in den relativ konstanten Qualitäten der übertragenen Energie (Spannung, Frequenz und Blindleistung oder Druck in der Gasversorgung), die bspw. mittels Phasenschieber, regelbaren Transformatoren, Schwungrädern oder in der Gasversorgung mithilfe von Kompressorstationen erreicht wird. Aufgrund der somit ermöglichten nur sehr engen Schwankungsbreite der Strom- bzw. Gaseigenschaften können im Sinne einer Art modularer Verknüpfbarkeit in allen Teilen des jeweiligen Gesamtnetzes Elemente mit gleicher Auslegung in Bezug auf die Eigenschaften des Energieträgers eingesetzt werden.

2.4.4 Speicher, Puffer und Dämpfer

Kapazitäten zur Speicherung von Energie sind im gegenwärtigen Energiesystem in Form von Pumpspeicherkraftwerken, Batterie- oder Gasspeichern und auch in Form von festen Energieträgern wie Kohlebunkern, Öltanklagern sowie einfachen, meist privaten Brennholzmieten vorhanden. Neuerdings werden zudem vermehrt Batteriespeicher für die Besitzer von Eigenheimen mit PV-Anlagen angeboten, um den Betreibern mehr Entscheidungsfreiheit über den Verkauf oder die eigene Nutzung der gewonnenen Energie zu eröffnen.

Neben diesen Speichermöglichkeiten sind auch auf organisatorischer Ebene Mechanismen vorhanden, mit denen im Bedarfsfall Last- bzw. Versorgungsschwankungen gemindert werden können. Hierzu zählen die negative Regelfähigkeit, also die Möglichkeit zur Abschaltung von großen Verbrauchern (Verordnung zu abschaltbaren Lasten, AbLaV) oder die Vorhaltung von negativer Regelenergie, d.h. zusätzlichen Verbrauchern, die im Falle von einer Überfrequenz aktiviert werden können.

Drei zeitlich gestaffelte Regelenergiestufen stehen den Übertragungsnetzbetreibern zur Verfügung:

a) Primärregelenergie, die innerhalb von 30 s zur schnellen Netzstabilisierung bereitstehen muss,
b) Sekundärregelenergie die innerhalb von 5 min zur Verfügung steht und
c) die Minutenreserve, mit der an die Sekundärregelenergie angeschlossen werden kann. Sie muss im Notfall schon nach 7,5 min zur Verfügung stehen.

Die Option eines Demand-Side-Managements bei Großabnehmern und privaten Haushalten könnte diese Maßnahmen zukünftig ergänzen.

Speicher, Puffer und Dämpfer haben eine ausgleichende Funktion und tragen dazu bei die Widerstands- und Anpassungsfähigkeit des Systems zu erhöhen. Dies geschieht durch die Möglichkeit zur teilweisen Entkopplung von Verbrauch und Erzeugung. Insbesondere Natrium-Schwefel Akkumulatoren (NaS) als Speicher für Strom oder Röhrenspeicher für Gas eignen sich hervorragend für Regionen. Für die kurzfristige Dämpfung von Störungen der Frequenz eignen sich rotierende Massen, wie bspw. Schwungräder. Es gibt aber bereits die Möglichkeit hierzu auch Windturbinen zu nutzen.

2.4.5 Reserven, unverplante Ressourcen

Resiliente Systeme benötigen räumliche, zeitliche, stoffliche, energetische, monetäre, rohstoffliche, institutionelle, intellektuelle und kreative Ressourcen. Zusätzlich zur Verfügung stehende Kapazitäten sind im gegenwärtigen Energiesystem vor allem durch die Auslegung der Erzeugungsanlagen gegeben, deren maximale elektrische Leistung oberhalb der bekannten

Spitzenlasten liegt. Aber auch die Netzstruktur ist im Allgemeinen so ausgelegt, dass ein plötzlich eintretender erhöhter Bedarf durch Zulieferungen aus anderen Netzgebieten ausgeglichen werden kann. Die Betriebsmittel sind durch ihre Dimensionierung, die sich am Kurzschlussstrom bemisst, auf die dabei auftretenden Lasten ausgelegt.

Unverplante Ressourcen spielen eine entscheidende Rolle bei der Gestaltung Resilienter Systeme. Vor allem Innovationsfähigkeit und Improvisationsfähigkeit, die zum Umgang mit unbekannten Herausforderungen notwendig sind, benötigen Ressourcen. Es werden also zeitliche, finanzielle und organisatorische Puffer benötigt. Ein solcher sogenannte „slack“ im System hilft dabei unbekannte Störungen zu verarbeiten und Bewältigungsstrategien zu entwickeln. Die Resilienzmaßnahmen sind aus diesem Grund auch nicht ohne zusätzlichen Ressourcenverbrauch zu haben. Mit diesem Trade-Off muss besonders achtsam umgegangen werden, da er im Widerspruch zur Ressourcenschonung steht, welche oberstes Leitgebot im Nachhaltigkeitsdiskurs ist.

Last but not least ist die Senkung des Energieverbrauchs die einfachste Möglichkeit, Netze zu entlasten und Redundanzen und Puffer zu schaffen, wenn im gleichen Zuge die Infrastruktur weiter beibehalten wird und kein Rückbau erfolgt.

2.4.6 Effizienz

Effizienz zeigt sich im bestehenden Energiesystem vor allem in der aus ökonomischen Gründen angestrebten Verbesserung der Effizienz der Energieerzeugungsanlagen.

Aus ökonomischer Perspektive kann auch die leitungsminimale Netzauslegung, die bei historisch gewachsenen Netzen nur eingeschränkt vorhanden ist, hierzu gezählt werden. Für den Transport über lange Strecken werden auch Hoch-Gleichspannungs-Übertragung (HGÜ)-Leitungen verwendet.

2.4.7 Information und Kommunikation

Erst Informationen über den Zustand eines Systems ermöglichen seine Steuerung. Beim Strom- oder Gasnetz geben die Qualitäten des Energieträgers, d.h. Spannung, Frequenz, Blindleistung bzw. der Druck im Gasnetz Aufschluss über die Belastung des jeweiligen Netzes bzw. Netzabschnitts. Diese Informationen werden im bestehenden Energiesystem durch Messeinrichtungen an Leitungsabschnitten (im Stromnetz auf höheren und mittleren Netzebenen) erfasst. Im Stromnetz könnten zukünftig intelligente Stromzähler (Smart Meter), die über eine Datenverbindung mit dem Netzbetreiber verfügen, Netzzustandsdaten für die Niederspannungsebene liefern[18].

[18] Vgl. Zustandsschätzung in Niederspannungsnetzen mit Hilfe von Smart Meters, A. Abdel-Majeed, M. Braun, D. Schöllhorn, VDE Kongress 2012, Stuttgart. November 2012

Wenn die gemessenen oder zukünftig erwartbaren Lasten in bestimmten Netzregionen eine zu hohe Belastung von Leitungsabschnitten erwarten lassen, kann die Erzeugerleistung vor der Engstelle gedrosselt und die verfügbaren positiv regelbaren Erzeuger hinter diesem Leitungsabschnitt auf eine höhere Leistung eingestellt werden. Dieser auf einer Rückkopplung zum Netzzustand basierende Ausgleich wird als Redispatch bezeichnet.

Auch die Messung der Kurzschlussleistung in bestimmten Netzabschnitten und die bei Erreichen eines Grenzwertes mögliche Abtrennung der jeweiligen Netzabschnitte kann zu den bereits im Energiesystem vorhandenen Rückkopplungsmechanismen gezählt werden.

Die Möglichkeiten des Informationsaustauschs bei Störungen, Notfällen und Krisensituationen und die je nach Lage eingeleiteten Maßnahmen können ebenfalls als bereits etablierte Möglichkeiten zur Rückkopplung im bestehenden Energiesystem gezählt werden. Dabei werden sowohl organisatorisch (Informationsflüsse, Ansprechpartner, Ressourcenbeschaffung) als auch technisch (Netzwiederaufbau, Lastabwurf, Notausschaltung) die drei Ebenen des Störungs-, Notfall- und Krisenmanagements[19], unterschieden. Der Informationsaustausch wird dabei durch den nichtöffentlichen Funkdienst als Backbone der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) unterstützt. Nach dem Post- und Telekommunikationssicherstellungsgesetz (PTSG) ist der BOS über die eigenen Funkanlagen hinaus im Bedarfsfall auch in Mobilfunknetzen bevorrechtigt.

Auch die Vorbereitung auf Krisen in der Bevölkerung gehört hierher. Vorsorge-Aufklärungen der Bevölkerung können helfen, diese im Umgang mit Blackouts zu schulen. Die Bevölkerung sollte also über Sicherungssysteme informiert sein und für den Notfall Lebensmittel und Wasser vorhalten.

2.4.8 Balance von Rückkopplungsmechanismen

Die Balance zwischen verstärkenden und abschwächenden Feedbackmechanismen ist essentiell für dynamische Stabilität. Sie hilft einem System seine Innovationsfähigkeit und Anpassungsfähigkeit zu erhalten. Dies wird allgemein durch Ausgleich von verstärkenden und begrenzenden Mechanismen (z.B. bei Förderung neuer Technologien), aber auch durch Monitoring erreicht. Für Regionen spielt die Installation von Messsystemen eine wichtige Rolle. Erst mit dem Wissen um die Zustände in den Netzen und die genauen Verbrauchs- und Erzeugerprofile lassen sich Flexibilitäten umsetzen. Aber nicht nur technische Rückkopplungen

[19] Mit den Stufen Prävention, Krisenbewältigung, Krisenauswertung. Literatur (aus BBK 2015): ENTSO-E Operational Handbook, European Network of Transmission System Operators for Electricity 2010; Krisenhandbuch Stromausfall, Baden-Württemberg, Handbuch mit Planungshilfen 2010; Technischer Hinweis S 1002 „Sicherheit in der Stromversorgung – Hinweise für das Krisenmanagement des Netzbetreibers“, VDE-FNN 2011; Krisenkommunikation (Leitfaden für Behörden und Unternehmen), BMI 2008; Empfehlungen zur Sicherstellung des Zusammenwirkens zwischen staatlichen Ebenen des Krisenmanagements und den Betreibern, BMI 2010

sind gefragt, sondern auch gesellschaftliche, die z.B. über Haushaltsbefragungen oder Bürgerversammlungen erfolgen können. Die Einbindung externer Gutachter oder von Forschungseinrichtungen kann ein wichtiges Element sein, um eine Außensicht zu erlangen, mit der sich Verbesserungen auch nach innen effektiver argumentieren lassen.

2.4.9 Kopplungsarten

Bei den Kopplungsarten kann zwischen festen, flexiblen und optionalen bzw. „losen“ Kopplungen unterschieden werden. Im Sinne der folgenden Betrachtung wird unter einer festen Kopplung eine Verbindung von Systemteilen bzw. Abschnitten verstanden, deren Trennung an der Koppelstelle im laufenden Betrieb nicht vorgesehen ist und eine Schädigung des Systems zur Folge hat. Flexible Kopplungen zeichnen sich durch die Möglichkeit der Modulation des an der Koppelstelle übertragenen Mediums aus. Eine lose Kopplung ermöglicht die Trennung von Systemteilen bzw. Abschnitten, ohne dass eine Schädigung des Gesamtsystems hervorgerufen wird.

Eine im Sinne von Resilienz flexible Kopplung zwischen den Elementen oder ganzen Teilnetzen des Energiesystems wird derzeit durch die flexible Spannungsregelung im Schaltbereich von Transformatoren ermöglicht, mit denen die Hochspannungs- mit der Mittelspannungsebene verbunden wird. Zwischen dem Mittelspannungs- und Niederspannungsbereich sind in einigen Fällen bereits regelbare Ortsnetztrafos (RONT) installiert, deren Übersetzungsverhältnis für die Spannungsebenen im Betrieb geändert werden und damit auch die verbraucherseitige Einspeisung von Strom (z.B. aus PV-Anlagen) berücksichtigt werden kann (Meuser et al. 2011).

Lose Kopplungen finden sich an den Trennstellen des bestehenden Stromnetzes, die im Falle von Ringnetzen im Normalzustand offen betrieben werden und im Falle einer Störung im Ringnetz geschlossen werden können, um die Anschlüsse hinter der Störungsstelle zu ermöglichen.

Eine lose Kopplung ist auch durch den für Großstörungen der Energieversorgung vorgesehenen Abwurf von Lasten gegeben. Der relaisgesteuerte Lastabwurf wird bei einer zu niedrigen Frequenz (Unterfrequenz) nach einem 5-Stufenplan (Stufen 2-5 bei 49, 48,7, 48,4 Hz und 47,5 Hz) ausgelöst. Die finale fünfte Stufe führt letztendlich zu einer Abtrennung des versorgenden Kraftwerks vom Netz (Berndt et al. 2007, S. 65). In diesem Fall wird das Kraftwerk nicht abgeschaltet, sondern im sogenannten Inselbetrieb gefahren. Die Inselbetriebseinrichtung, die für Großkraftwerke ab einer elektrischen Leistung von 100 MW vorgesehen ist, stellt eine Rückfalloption dar und erinnert somit an die Zellen eines zellular organisierten Energiesystems (vgl. Kapitel 2.4.11), dessen Zellen im Notfall für eine gewisse Zeit auch zum autarken Betrieb fähig

sind. Auch die Inselnetze, die sich beim Zerfall eines Verbundnetzes bilden, und die nach einem Netzwiederaufbaukonzept wieder zum Verbundnetz zusammengeführt werden müssen, stellen eine zumindest temporäre Variante eines zellularen Systems dar.

Lose Kopplungen zur Erhöhung der Resilienz des Energiesystems sollten darüber hinausgehen, indem z.B. die optionale Kopplung verschiedener Systemteile vorangetrieben wird (bspw. zwischen Strom- und Wärmenetz oder zwischen verschiedenen Netzebenen). Dies kann durch den zusätzlichen Einbau von flexiblen Schaltern, durch Puffer und bivalente Speisung unterstützt werden und erhöht die Widerstandsfähigkeit des Systems, weil Abhängigkeiten dadurch reduziert werden. Ein netzdienliches Verhalten fördert die Möglichkeiten, Komponenten flexibel zu koppeln, da so der Energieausgleich minimiert wird und die Trennung leichter erfolgen kann. Auf ökonomischer Ebene helfen kurze Vertragslaufzeiten, bspw. bei Contracting und Lieferverträgen, wenn ausreichend Ressourcen zur Verfügung stehen. Bei Knappheit bieten eher lange Vertragslaufzeiten eine höhere Sicherheit, auch wenn dadurch Flexibilitäten eingeschränkt werden.

Ein Großteil der Prinzipien zur resilienten Gestaltung der Systemstrukturen von sozio-technischen Systemen lässt sich mit Blick auf Kopplungen zwischen verschiedenen Systemen, Systemebenen und zwischen räumlich getrennten Subsystemen diskutieren. So gibt es einige Prinzipien, die darauf abzielen, die Starrheit von Kopplungen sowohl räumlich getrennter als auch verschiedenartiger Infrastruktursysteme zu reduzieren und die Kopplungen soweit wie möglich optional zu gestalten. Der Aufbau eines gekoppelten IKT-Energiesystems mit unabhängigen Zellen zielt zum Beispiel hierauf ab. Hierarchisch betrachtet könnte zu den losen bzw. flexiblen Kopplungen in Energiesystemen beispielsweise das primäre Ausschöpfen lokal vorhandener Ressourcen und der subsidiäre Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch durch Speicher, Lastmanagement und eine intelligente Steuerung auf der niedrigst möglichen Ebene gezählt werden. Es ist jedoch nicht davon auszugehen, dass sich alle Kopplungen optional gestalten lassen. Aus der Festlegung des räumlichen Systemumfangs folgen Konsequenzen, z.B. hinsichtlich des Zeitraums, über den das entsprechend gestaltete System im Störungsfall auf den höheren Ebenen ohne Rückgriff auf diese auskommen, sich also selbst versorgen kann.

Um den dennoch immer wieder nötigen Rückgriff auf höhere Ebene zu gewährleisten, sind weitere Prinzipien nötig, die dafür sorgen, dass die optionalen Kopplungen bei Bedarf auch tatsächlich verfügbar sind. Dazu dienen beispielsweise die redundante und diversifizierte Auslegung von Kopplungen an andere Systeme und ihr zeitlich entsprechend getaktetes Monitoring. In diesem Zusammenhang existieren Trade-Offs zwischen der Verbesserung der Selbstversorgung, die eher dezentral orientiert ist, und der eher zentral umsetzbaren Stärkung der

Kopplungen. Diesbezüglich sollte eine Balance angestrebt werden, welche die jeweiligen Kosten und die erwartbaren Versorgungsengpässe ins Verhältnis setzt. Darüber hinaus bedarf es aber auch grundlegender Prinzipien und Komponenten, um im Fall des Versagens sowohl der Eigenversorgung als auch der Kopplungen zumindest eine Minimalversorgung zu ermöglichen und die reguläre Versorgung möglichst schnell wiederherzustellen, z.B. Notfallreserven und Backup-Systeme, aber auch Pläne für einen Schwarzstart. Dezentrale, auf ihre Selbstversorgung hin orientierte Bereiche des Energiesystems tragen dabei Verantwortung für die Unterstützung des Gesamtsystems und müssen entsprechend ihrer Leistungsfähigkeit im Bedarfsfall Leistung bzw. Dienstleistungen zur Verfügung stellen.

2.4.10 Der Vernetzungsgrad von Energiesystemen

Wie die Dezentralität durch Modularität gefördert wird, so ist auch der Grad der Vernetzung der Komponenten eng mit der Modularität verknüpft. Der Vernetzungsgrad beschreibt die Anzahl der Verbindungen zwischen den Systemsegmenten. Einerseits ermöglicht ein hoher Vernetzungsgrad, d.h. eine große Anzahl an Verbindungen in oder zwischen Modulen oder gar zu externen Systemsegmenten, die Möglichkeit, von außerhalb des Systems bzw. Systemsegments Impulse heranzuziehen, um auf Störereignisse angemessen reagieren zu können, wenn ein örtlich begrenztes Ereignis die Systemleistungen beeinträchtigt oder versagen lässt. Insbesondere die systemübergreifenden Verbindungen werden dafür als hilfreich angesehen und im Bereich der sozio-ökologischen Disziplinen auch als Zugänglichkeit (openness) bezeichnet (Carpenter et al. 2012). Zum Beispiel ist es bei Flüssen bekannt, dass auch nach einem Zusammenbruch des Ökosystems an einem Ort, die Wiederbelebung über Nebenarme durchaus möglich ist.

Andererseits kann, sofern die Verbindungen nicht optional gestaltet sind, ein zu hoher Vernetzungsgrad auch die Gefahr der Übertragung von Kaskadenereignissen fördern, da diese sich nahezu ungehindert durch das weit verzweigte System fortpflanzen können (Hughes et al. 2013). Mögliche Folgen in einem stark verzweigten und interdependent vernetzten System verschiedener Infrastrukturen konnten im Jahr 2003 in Italien beobachtet werden. Ein Stromausfall zog dabei nicht nur erste Kraftwerksausfälle nach sich, sondern hatte infolge der Stromausfälle auch Internetserverausfälle verursacht. Dies führte wiederum zu weiteren Kraftwerksausfällen (Buldyrev et al. 2010). Buldyrev et al. (2010) wiesen darauf hin, dass ein hoher Vernetzungsgrad in interpendenten Netzwerken das Auftreten zufälliger Fehler begünstigen kann. Zudem erschwert ein zu hoher Vernetzungsgrad das Verständnis und das Nachverfolgen potenzieller Störereignisse, weil dadurch ebenfalls die Komplexität des Netzwerks steigt (vgl. Lovins und Lovins 2001). Im Unterschied dazu verhält sich ein geringer Verbindungsgrad analog reziprok, der zwar zum einen die Gefahr von kaskadenartigen Ereignissen tendenziell ver-

ringert, aber zum anderen die Abhängigkeit (wieder im Falle von nicht optionalen Verbindungen) durch die Formierung von kritischen Pfaden fördert. Beide betrachteten Seiten lassen die Erkenntnis zu, dass es weniger um den Vernetzungsgrad, als um die Vernetzungsqualität (also um die Form der Kopplungen) geht. Starre und nicht optionale Verbindungen erhöhen die Gefährdung des System(segments) durch Störereignisse, wohingegen optionale, lose Kopplungen eine gewisse Flexibilität ermöglichen, die durch Erhöhung der Diversität oder Redundanz der Verbindungen noch verstärkt wird (vgl. Lovins und Lovins 2001).

Somit kann festgehalten werden, dass ein Trade-Off besteht zwischen einem hohen Vernetzungsgrad mit gleichzeitiger erhöhter Komplexität aber einer leichteren Wiederherstellung der Systemleistungen einerseits (Bernhardt und Leslie 2013) und einem niedrigen Vernetzungsgrad mit der Gefahr von Engpässen andererseits (Christopher und Peck 2004). Im Kern geht es jedoch nicht um den Grad, sondern um die Qualität der Kopplungen. Optionale Verbindungen halten die Flexibilität (oder auch Diversität) aufrecht und ermöglichen so ein resilientes Agieren gegen unerwartete Herausforderungen, während starre Kopplungen dies eher verhindern.

2.4.11 Zellularität

Zellularität trägt zur Widerstandsfähigkeit von Systemen bei. Dies geschieht zum einen indem kleinere Einheiten die Einbindung von Beteiligten vereinfachen. Zum anderen ergibt sich durch die Möglichkeit einer zusätzlichen Selbstversorgung eine höhere Versorgungssicherheit. In Regionen kann die Bildung erster Zellen bspw. zur weiter gehenden Versorgung der kritischen Infrastruktur mit erneuerbaren Energien in Verbindung mit Stromspeichern erfolgen. Die Schaffung der Möglichkeit, Elemente die bspw. standarisiert sind, leicht austauschen zu können, ist hierfür förderlich. Ebenso die Bildung von Gruppen und die Vernetzung untereinander, was den Organisationsgrad der Akteure erhöht. Wodurch die Grundlage für ein gemeinsames und abgestimmtes Handeln gelegt wird.

2.4.12 Subsidiarität

Subsidiarität bedeutet, dass alles, was auf den untersten Ebenen geregelt werden kann, primär auch dort geregelt werden soll. Das Subsidiaritätsprinzip vereinfacht die Nutzung von lebensweltlichem Wissen und Vor-Ort-Kenntnissen, fördert die Selbstorganisation und ermöglicht eine höhere Selbstbestimmung und Eigenverantwortung der Systemelemente. Subsidiarität hilft einem System improvisationsfähig zu sein, da die einzelnen Akteure mehr Verantwortung übernehmen und dadurch mehr Wissen über das System haben. Die Umsetzung in der Region kann über die Gründung von Genossenschaften oder allgemein einer breiten Beteiligung von Bürgern in allen Stufen des Prozesses erfolgen. Über die genannten Stufen trägt Subsidiarität dazu bei die Akzeptanz von Maßnahmen zu erhöhen.

2.4.13 Das Verhältnis von Zentralität und Dezentralität

Das Verhältnis von Zentralität und Dezentralität in Energiesystemen mit Bezug auf die Erzeugung von Energie, ihre Verteilung sowie die Steuerung und die Besitzstruktur des Energiesystems ist ein intensiv diskutiertes Thema.

Im Allgemeinen besitzen die zentrale und dezentrale Gewinnung verschiedene Vor- und Nachteile. Die zentrale Energiegewinnung verfügte bisher über eine hohe Effizienz- und damit auch Kostenvorteile, die aufgrund der Größe der Anlagen zum Tragen kommen können (vgl. Momoh et al. 2012:4). In der Regel werden solche Anlagen über sehr lange Zeiträume geplant und errichtet und müssen durch die vergleichsweise lange Amortisationszeit sehr lang betrieben werden, um rentabel zu sein. Ein Vorteil besteht auch in der Überschaubarkeit der zentralen Energiegewinnung, die im Top-Down Betrieb eine vergleichsweise einfachere Steuerung der Energieversorgung ermöglicht. Andererseits wird die lokal erzeugte Energiemenge vor Ort oft nicht benötigt und muss mittels längerer Transmissionsnetze an den Verbrauchsort geliefert werden, wobei Übertragungsverluste entstehen.

Diese Transmissionsnetze weisen ggf. allein aufgrund ihrer hohen räumlichen Exposition eine erhöhte Vulnerabilität gegenüber Störereignissen auf (Momoh et al. 2012, S. 13). Sie erzeugen je nach Struktur und Auslegung auch große Pfadabhängigkeiten. Wenn das Netz beeinträchtigt ist, steigt die Ausfallwahrscheinlichkeit des Gesamtsystems. Im Vergleich dazu basiert eine dezentrale Organisation des Energiesystems auf einer größeren Anzahl (teil-)autonomer und selbsterhaltender Subsysteme. Im Optimalfall findet die notwendige Stromerzeugung lokal am Verbrauchsort statt und wird gleichzeitig auch dort genutzt. Überschüsse könnten vor Ort gespeichert oder in das Übertragungsnetz eingespeist werden (Bouffard und Kirschen 2008) und bei zu geringer Eigenproduktion wird Strom aus dem übergeordneten Netz bezogen.

Gegenüber der dezentralen Energiegewinnung gibt es jedoch unterschiedliche Vorbehalte. Große Probleme bereiten die Kosten, wenn sehr viel mehr auf dezentraler Ebene gemessen und gesteuert werden soll. Dies bezieht sich sowohl auf Investitionen als auch auf den Dauerbetrieb. Ein weiteres Problem besteht darin, dass in einem kleinräumigen Erzeugungsgebiet die Wettbewerbsintensität nachlässt und die Gefahr der Monopol- oder Oligopolbildung steigt. Auch dies dürfte zu höheren Kosten führen. Die Einhaltung der Qualitätskriterien weist zudem bei vermehrtem Einsatz von dezentralen Erzeugern einige Herausforderungen auf, wie beispielsweise die Erhaltung des Spannungsniveaus bei der Stromversorgung, die sich durch die verteilte Erzeugung wesentlich heterogener gestaltet (Driesen und Belmans 2006). Mit Blick auf das Systemdesign und dessen Verhalten bei Störereignissen weisen dezentrale Erzeugungseinheiten hingegen Vorteile auf. Bei der Exposition einer dezentralen Versorgung gegenüber Störereignissen lassen sich Ausfälle und deren Auswirkungen einfacher lokal begrenzen. Der Fehler ist durch das Ereignis auf lokale Systemelemente begrenzt und führt daher

zunächst nur zu lokal begrenzten Beeinträchtigungen. Sofern geografisch ausgedehnte Störereignisse auf ein System wirken, werden auch mehrere Systemsegmente in Mitleidenschaft gezogen. Entsprechend ist der Studie von Zerriffi et al. 2002 zufolge ein verteiltes System von Gaskraftwerken unter Stress vorteilhafter, als ein zentralisiertes Elektrizitätssystem verschiedener Kraftwerkstypen. Falls auch die Wärme der Gaskraftwerke genutzt wird, sei das dezentrale System auch nicht mehr teurer, als die zentrale Lösung (Zerriffi et al. 2007).

2.4.14 Neue Geschäftsmodelle und Märkte

Eine weitere Gestaltungsmöglichkeit eröffnet die Flexibilisierung der Anforderung an die Systemleistung. Wenn die Möglichkeit existiert, für einen Teil der Nutzer - honoriert durch einen höheren Tarif - die Versorgungssicherheit zu erhöhen, indem sie für einen anderen Teil erniedrigt wird (was ebenfalls honoriert werden muss) eröffnen sich Spielräume. Durch diese lässt sich die Improvisationsfähigkeit des Systems steigern. Dies beruht hauptsächlich auf der dem Prinzip, dass knappe Ressourcen gezielt eingesetzt werden (nicht nach dem Gießkannenprinzip). Dieses Element ist also komplementär zur Redundanz und Speichern und Puffern. Letztendlich könnte es auch Tarife geben, die eine angekündigte Abschaltung vorsehen und so direkt bei Vertragsunterzeichnung abfragen ob die Ansprüche der Verbraucher flexibel sind. Technisch könnten Geräte so ausgelegt werden, dass sie nicht so empfindlich auf eine geringere Qualität im Bereich der Spannung und Frequenz reagieren. Dies gilt auch für Wechselrichter und IKT.

2.5 Fähigkeiten und Gestaltungsprinzipien Resilienter Energiesysteme

Es dürfte deutlich geworden sein, dass die Erarbeitung eines Leitkonzepts ‚Resilientes Energiesystem' ein komplexes Unterfangen darstellte, das an vielfältige Grenzen gestoßen ist und das mit etlichen Trade-offs zu kämpfen hatte, die oftmals in Formulierungen wie ‚ein ausgewogenes Verhältnis von …' gemündet sind. Hervorzuheben sind diesbezüglich die Trade-Offs bzw. Spannungsverhältnisse zwischen Diversität, Redundanz, Puffer,Speicher und unverplanten Ressourcen einerseits und (Ressourcen-) und ökonomischer Effizienz andererseits, zwischen Dezentralität (Zellularität) und Zentralität (Hierarchie), zwischen Komplexität und Vereinfachung (Modularität), hinsichtlich verschiedener Kopplungsarten und –intensitäten und nicht zuletzt zwischen Selbstorganisation (Autopoiesis) einerseits und technischer, ökonomischer und politischer Kontrolle andererseits.

Eine Übersicht der Fähigkeiten und Eigenschaften wie auch Gestaltungsprinzipien und –elemente, die im vorangegangenen Kapitel ausführlich vorgestellt wurden ist in Abbildung 2.3 zusammengetragen. Zusammen bilden sie das Leitkonzept ‚Resilientes Energiesystem'. Drauf aufbauend wird im nächstem Kapitel eine Annäherung an ein Gestaltungsleitbild Resilientes Regionales Energiesystem unternommen.

Abbildung 2.3: Fähigkeiten sowie Gestaltungsprinzipien und –elemente, die das Leitkonzept Resilientes Energiesystem bilden (eigene Darstellung)

2.6 Literatur Kapitel 2

Allen, Craig R.; Holling, C. S. (2010): Novelty, Adaptive Capacity, and Resilience. In: *Ecology and Society* 15 (3). Online verfügbar unter http://www.ecologyandsociety.org/vol15/iss3/art24/.

Barroso, A. P.; Machado, V. H.; Barros, A. R.; Cruz Machado, V. (2010): Toward a resilient Supply Chain with supply disturbances. In: IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2010. 7 - 10 Dec. 2010, Macao, China. EM). Macao, China, 7/12/2010 - 10/12/2010. Institute of Electrical and Electronics Engineers; Technology Management Council; IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management; IEEM. Piscataway, NJ: IEEE, S. 245–249.

Bate, Iain; Kelly, Tim (2003): Architectural considerations in the certification of modular systems. In: *Reliability Engineering & System Safety* 81 (3), S. 303–324. DOI: 10.1016/S0951-8320(03)00094-2.

BBK (Hg.) (2015): Notstromversorgung in Unternehmen und Behörden. Leitfaden für die Planung, die Einrichtung und den Betrieb einer Notstromversorgung in Unternehmen und Behörden (Praxis im Bevölkerungsschutz, 13).

Berndt, Holger; Hermann, Mike; Kreye, Horst D.; Reinisch, Rüdiger; Scherer, Ulrich; Vanzetta, Joachim (2007): Transmission Code 2007. Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber. Version 1.1. Hg. v. VDN.

Bernhardt, Joanna R.; Leslie, Heather M. (2013): Resilience to climate change in coastal marine ecosystems. In: *Annual review of marine science* 5, S. 371–392. DOI: 10.1146/annurev-marine-121211-172411.

Biggs, Reinette; Schlüter, Maja; Biggs, Duan; Bohensky, Erin L.; BurnSilver, Shauna; Cundill, Georgina et al. (2012): Toward Principles for Enhancing the Resilience of Ecosystem Services. In: *Annu. Rev. Environ. Resour.* 37 (1), S. 421–448. DOI: 10.1146/annurev-environ-051211-123836.

Bouffard, François; Kirschen, Daniel S. (2008): Centralised and distributed electricity systems. In: *Energy Policy* 36 (12), S. 4504–4508. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.09.060.

Brand, Fridolin (2009): Critical natural capital revisited. Ecological resilience and sustainable development. In: *Ecological economics* 68 (3), S. 605–612. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2008.09.013.

Buldyrev, Sergey V.; Parshani, Roni; Paul, Gerald; Stanley, H. Eugene; Havlin, Shlomo (2010): Catastrophic cascade of failures in interdependent networks. In: *Nature* 464 (7291), S. 1025–1028. DOI: 10.1038/nature08932.

Carpenter, Stephen; Arrow, Kenneth; Barrett, Scott; Biggs, Reinette; Brock, William; Crépin, Anne-Sophie et al. (2012): General Resilience to Cope with Extreme Events. In: *Sustainability* 4 (12), S. 3248–3259. DOI: 10.3390/su4123248.

Carvalho, Helena; Azevedo, Susana Garrido; Cruz-Machado, V. (2012): Agile and resilient approaches to supply chain management. Influence on performance and competitiveness. In: *Logist. Res.* 4 (1-2), S. 49–62. DOI: 10.1007/s12159-012-0064-2.

Cetinkaya, Egemen K.; Sterbenz, James P. G. (2013): A taxonomy of network challenges. Conference Paper. Design of Reliable Communication Networks (DRCN). Hg. v. IEEE.

Christopher, Martin; Peck, Helen (2004): Building the Resilient Supply Chain. In: *Int Jrnl Logistics Management* 15 (2), S. 1–14. DOI: 10.1108/09574090410700275.

Crona, Beatrice I.; Parker, John N. (2012): Learning in Support of Governance. Theories, Methods, and a Framework to Assess How Bridging Organizations Contribute to Adaptive Resource Governance. In: *E&S* 17 (1). DOI: 10.5751/ES-04534-170132.

Driesen, J.; Belmans, R. (2006): Distributed Generation: Challenges and Possible Solutions. IEEE Power Engineering Society general meeting, 2006. 18 - 22 June 2006, [Montreal, QC, Canada]. Power Engineering Society; IEEE Power Engineering Society general meeting; PES. Piscataway, NJ.

Eberhardt, Otto (2013): Risikobeurteilung mit FMEA. Die Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse gemäß VDA-Richtlinie 4.2 ; die Risikobeurteilung von Maschinen gemäß EU-Richtlinie 2006/42/EG. 3., überarb. Aufl. Renningen: expert-Verl. (Edition expertsoft, 63).

Farrell, Alexander E.; Zerriffi, Hisham; Dowlatabadi, Hadi (2004): Energy Infrastructure and Security. In: *Annu. Rev. Environ. Resourc.* 29 (1), S. 421–469. DOI: 10.1146/annurev.energy.29.062403.102238.

Fiksel, Joseph (2003): Designing Resilient, Sustainable Systems. In: *Environ. Sci. Technol.* 37 (23), S. 5330–5339. DOI: 10.1021/es0344819.

Fiksel, Joseph (2006): Sustainability and resilience: toward a system approach. In: *Sustainability: Science, Practice, & Policy* 2 (2).

Folke, Carl (2006): Resilience: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses. In: *Global Environmental Change* 16 (3), S. 253–267. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2006.04.002.

Forrester, Jay Wright (1961): Industrial Dynamics. New York: Wiley & Sons.

Gershenson, J. K.; Prasad, G. J.; Zhang, Y. (2003): Product modularity. Definitions and benefits. In: *Journal of Engineering Design* 14 (3), S. 295–313. DOI: 10.1080/0954482031000091068.

Gleich, Arnim von; Gößling-Reisemann, Stefan; Stührmann, Sönke; Woizeschke, Peer (2010): Resilienz als Leitkonzept – Vulnerabilität als analytische Kategorie. In: Klaus Fichter, Arnim von Gleich, Reinhard Pfriem und Bernd Siebenhüner (Hg.): Theoretische Grundlagen für Klimaanpassungsstrategien. Bremen/Oldenburg (nordwest2050-Berichte, 2191-3218), S. 13–49.

Gößling-Reisemann, S.; Stührmann, S.; Wachsmuth, J.; Gleich, A. v.; Blöthe, T. (2015): Klimaanpassung und Resilienz in der Energiewirtschaft. In: A. v. Gleich und B.

Siebenhüner (Hg.): Regionale Klimaanpassung im Küstenraum. Marburg: Metropolis-Verlag, S. 182–206.

Gößling-Reisemann, Stefan; Stührmann, Sönke; Wachsmuth, Jakob; Gleich, Arnim von (2013): Vulnerabilität und Resilienz von Energiesystemen. In: Jörg Radtke und Bettina Henning (Hg.): Die deutsche "Energiewende" nach Fukushima. Der wissenschaftliche Diskurs zwischen Atomausstieg und Wachstumsdebatte. Weimar (Lahn): Metropolis (Beiträge zur sozialwissenschaftlichen Nachhaltigkeitsforschung, 8), S. 367–396.

Gunderson, Lance H.; Holling, Crawford Stanley (Hg.) (2002): Panarchy. Understanding transformations in human and natural systems. Washington, DC: Island Press.

Hillman, Mark; Keltz, Heather (2007): Managing Risk in the Supply Chain - A Quantitative Study. Hg. v. AMR Research.

Holling, C. S. (1986): The Resilience of Terrestrial Ecosystems: Local Surprise and Global Change. In: William C. Clark und R. E. Munn (Hg.): Sustainable Development of the Biosphere. Cambridge: Cambridge University Press, S. 292–320.

Holling, Crawford Stanley (1973): Resilience and stability of ecological systems. In: *Annual Review in Ecology and Systematics* 4, S. 1–23.

Holling, Crawford Stanley (1996): Engineering resilience vs. ecological resilience. In: Peter C. Schulze (Hg.): Engineering within ecological constraints. Engineering resilience vs. ecological resilience. Washington, D.C: National Academy Press, S. 31–44.

Huang, Chun-Che; Kusiak, Andrew (1998): Modularity in Design of Products and Systems. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans* (1), S. 66–77.

Hughes, Terry P.; Carpenter, Stephen; Rockström, Johan; Scheffer, Marten; Walker, Brian (2013): Multiscale regime shifts and planetary boundaries. In: *Trends in ecology & evolution* 28 (7), S. 389–395. DOI: 10.1016/j.tree.2013.05.019.

Iakovou, E.; Vlachos, D.; Xanthopoulos, A. (2007): An analytical methodological framework for the optimal desing of resilient supply chains. In: *International Journal of Logistics, Economics and Globalisation* 1 (1), S. 1–20.

Jackson, Scott (2013): Resilience Principles for the ICT Sector. In: Paul Theron und Sandro Bologna (Hg.): Critical information infrastructure protection and resilience in the ICT sector. Hershey, Pa.: IGI Global (701 E. Chocolate Avenue, Hershey, Pennsylvania, 17033, USA), S. 36–49.

Jayant, Arvind; Ghagra, H. S. (2013): Supply Chain Flexibility Configurations: Perspectives, Empirical Studies and Research Directions. In: *International Journal of Supply Chain Management* 2 (1), S. 21–29.

Jüttner, Uta; Maklan, Stan (2011): Supply chain resilience in the global financial crisis. An empirical study. In: *Supp Chain Mnagmnt* 16 (4), S. 246–259. DOI: 10.1108/13598541111139062.

Kallaos, James; Mainguy, Gaell; Wyckmans, Annemie (2014): Considering Resilience: Steps Towards an Assessment Framework. Smart environment for sustainable resource management. 5-28 Paginazione / Tema. Journal of Land Use, Mobility and Environment, Vol 7, N° 1 (2014): Smart Cities Challenges: Smart Environment for Sustainable Resource Management. Hg. v. TeMA - Journal of Land Use, Mobility and Environment. University of Naples Federico II.

Klauck, Kai-Oliver; Stegmann, Claus (2006): Stresstests in Banken. Von Basel II bis ICAAP. 1. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.

Lovins, Amory B.; Lovins, L. Hunter (2001): Brittle Power -Energy Strategy for National Security. Andover, Massachusetts, USA: Brick House Pub. Co.

Mattheck, Claus (1998): Design in Nature. Learning from Trees. Berlin, New York: Springer-Verlag. Online verfügbar unter http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10644802.

Meuser, Mark; Vennegeerts, Hendrik; Haubrich, Hans-Jürgen (2011): Improved grid integration of distributed generation in existing network structures. Paper 0827. In: Cired (Hg.): 21st International Conference on Electricity Distribution. Frankfurt, 6.6.-9.6.2011. Frankfurt.

Molyneaux, Lynette; Brown, Colin; Wagner, Liam; Foster, John (2016): Measuring resilience in energy systems. Insights from a range of disciplines. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59, S. 1068–1079. DOI: 10.1016/j.rser.2016.01.063.

Momoh, James A.; Meliopoulos, Sakis; Saint, Robert (2012): Centralized and Distributed Generated Power Systems - A Comparison Approach. Prepared for the Project "The Future Grid to Enable Sustainable Energy Systems". Funded by the U.S. Department of Energy. Unter Mitarbeit von White Paper Team. Hg. v. PSERC Publication. Power Systems Engineering Research Center. Online verfügbar unter https://pserc.wisc.edu/documents/publications/papers/fgwhitepapers/Momoh_Future_Grid_White_Paper_Gen_Analysis_June_2012.pdf.

Oliver, Tom H.; Heard, Matthew S.; Isaac, Nick J. B.; Roy, David B.; Procter, Deborah; Eigenbrod, Felix et al. (2015): Biodiversity and Resilience of Ecosystem Functions. In: *Trends in ecology & evolution* 30 (11), S. 673–684. DOI: 10.1016/j.tree.2015.08.009.

Ostrom, Elinor (2010): Polycentric systems for coping with collective action and global environmental change. In: *Global Environmental Change* 20 (4), S. 550–557. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2010.07.004.

Park, J.; Seager, T. P.; Rao, P. S. C.; Convertino, M.; Linkov, I. (2013): Integrating Risk and Resilience Approaches to Catastrophe Management in Engineering Systems. In: *Risk Analysis* 33 (3), S. 356–367. DOI: 10.1111/j.1539-6924.2012.01885.x.

Park, Jeryang; Seager, Thomas P.; Rao, P. Suresh C. (2011): Lessons in risk- versus resilience-based design and management. In: *Integrated environmental assessment and management* 7 (3), S. 396–399. DOI: 10.1002/ieam.228.

Peterson, Garry; Allen, Craig R.; Holling, C. S. (1998): Original Articles. Ecological Resilience, Biodiversity, and Scale. In: *Ecosystems* 1 (1), S. 6–18. DOI: 10.1007/s100219900002.

Pettit, Timothy J. (2008): Supply Chain Resilience: Development of a Conceptual Frameork, an Assessment Tool and an Implementation Process. Dissertation. Ohio State University, Ohio.

Ponis, Stavros T.; Koronis, Epaminondas (2012): Supply Chain Resilience: Definition of Concept and its formative Elements. In: *The Journal of Applied Business Research* 28 (5), S. 921–930.

Rao, Shashank; Goldsby, Thomas J. (2009): Supply chain risks. A review and typology. In: *Int Jrnl Logistics Management* 20 (1), S. 97–123. DOI: 10.1108/09574090910954864.

Rechenberg, Ingo (1994): Evolutionsstrategie '94. Teilw. zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss. 1970 u.d.T.: Rechenberg, Ingo: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution. Stuttgart: Frommann-Holzboog (Werkstatt Bionik und Evolutionstechnik, 1).

Revilla, Elena; Sáenz, María Jesús (2014): Supply chain disruption management. Global convergence vs national specificity. In: *Journal of Business Research* 67 (6), S. 1123–1135. DOI: 10.1016/j.jbusres.2013.05.021.

Rohrer, Justin P.; Jabbar, Abdul; Sterbenz, James P. G. (2014): Path diversification for future internet end-to-end resilience and survivability. In: *Telecommun Syst* 56 (1), S. 49–67. DOI: 10.1007/s11235-013-9818-7.

Schilling, Simon J. (2009): Beitrag zur dynamischen Fehlerbaumanalyse ohne Modulbildung und zustandsbasierte Erweiterung. Dissertation. Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal. Sicherheitstechnik. Online verfügbar unter elpub.bib.uni-wuppertal.de/servlets/DerviateServlet/Derivate-1483/dd0904.

Schwab, Adolf J. (2009): Elektroenergiesysteme. Erzeugung, Transport, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie. 2., aktualisierte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Smith, Adrian; Stirling, Andy (2008): Social-Ecological resilience and socio-technical transitions: critical issues for sustainability governance. STEPS Working Paper 8. Brighton: STEPS Centre.

Sterbenz, James P.G.; Hutchison, David; Çetinkaya, Egemen K.; Jabbar, Abdul; Rohrer, Justin P.; Schöller, Marcus; Smith, Paul (2010): Resilience and survivability in communication networks. Strategies, principles, and survey of disciplines. In: *Computer Networks* 54 (8), S. 1245–1265. DOI: 10.1016/j.comnet.2010.03.005.

Stirling, Andy (2007): A general framework for analysing diversity in science, technology and society. In: *Journal of the Royal Society, Interface* 4 (15), S. 707–719. DOI: 10.1098/rsif.2007.0213.

Tang, Christopher (2006): Robust strategies for mitigating supply chain disruptions. In: *International Journal of Logistics* 9 (1), S. 33–45. DOI: 10.1080/13675560500405584.

Tang, Christopher; Tomlin, Brian (2008): The power of flexibility for mitigating supply chain risks. In: *International Journal of Production Economics* 116 (1), S. 12–27. DOI: 10.1016/j.ijpe.2008.07.008.

Wang, Shaopeng; Loreau, Michel (2014): Ecosystem stability in space: α, β and γ variability. In: *Ecology letters* 17 (8), S. 891–901. DOI: 10.1111/ele.12292.

Zerriffi, Hisham; Dowlatabadi, Hadi; Farrell, Alex (2007): Incorporating stress in electric power systems reliability models. In: *Energy Policy* 35 (1), S. 61–75. DOI: 10.1016/j.enpol.2005.10.007.

Zerriffi, Hisham; Dowlatabadi, Hadi; Strachan, N. D. (2002): Electricity and conflict: Advantages of y distributed system. In: *Electr. J.* (15), S. 55–65.

3 Das Gestaltungsleitbild Resiliente Energiesysteme

Leitkonzepte, wie das im vorigen Kapitel dargestellte Leitkonzept Resiliente Energiesysteme, sind auf einer mittleren Abstraktionsebene angesiedelt (vgl. Kapitel 2.4). Auf der darunterliegenden Ebene befinden sich die mit Werten aufgeladenen Weltbilder, auf der darüber liegenden Ebene die konkretisierten, sich schon auf bestimmte Gebiete beziehenden, operationalisierten Gestaltungsleitbilder. Im Rahmen von Resystra wurden Gestaltungsleitbilder für die beiden Energieregionen Osterholz und Wolfhagen sowie für die Option Power-to-Fuel erarbeitet. Die Erarbeitung erfolgte zweistufig. Zunächst wurde ein übergreifendes Gestaltungsleitbild ‚Resiliente Energiesysteme' erarbeitet. Es wird im Rahmen dieses Kapitels vorgestellt. Die Aufgabe bestand im Wesentlichen darin, die im Rahmen der Leitkonzepte ‚Resilientes System' und ‚Resilientes Energiesystem' erarbeiteten Fähigkeiten und Gestaltungselemente weiter zu konkretisieren und dabei auch aktuelle Vorstellungen (Planungen, Szenarien) über die Zukunft des nationalen Energiesystems aufzugreifen. Als Ergebnis werden spezifizierte Elemente, Strukturen und Regelungsprinzipien eines Resilienten Energiesystems vorgestellt. Erst in einem weiteren Schritt wurde dieses allgemeine Gestaltungsleitbild auf die beiden Regionen und die Option Power-to-Fuel zugeschnitten und vor allem weiter operationalisiert. Eine wichtige Voraussetzung hierfür bildeten die Systemanalysen und -beschreibungen in den Kapiteln zu den jeweiligen Fallbeispielen. Auf dieser Basis konnten sehr spezifische Umsetzungsmaßnahmen vorgeschlagen werden. Insbesondere bei diesem Operationalisierungsschritt spielte auch die Einbeziehung der Qualitätsansprüche der Stakeholder an die Energieversorgung (Studien, Interviews, Dokumentenauswertung) eine wichtige Rolle. Die spezifischen und operationalisierten Gestaltungsleitbilder finden sich in den Kapiteln zu den Fallstudien.

Das Energiesystem soll vorsorgeorientiert gestaltet werden, so dass es auf die zukünftigen Herausforderungen, angefangen von immensen sozialen, ökonomischen, technischen, klimatischen Unsicherheiten bis hin zu völligen Überraschungen (unknown unknowns), angemessen reagieren kann (Gößling-Reisemann, Stührmann et al. 2013). Die Gestaltungsleitbilder sollen zeigen, wie die Elemente, Strukturen und Relationen im Energiesystem konkret ausgestaltet werden können, damit es die von einem Resilienten System geforderten Fähigkeiten der Widerstands-, Anpassungs-, Improvisations- und Innovationsfähigkeit realisieren kann.

3.1 Allgemeine Vorgehensweise bei der Erstellung von Gestaltungsleitbildern

Die zu lösende Aufgabe bei der Erstellung eines Gestaltungsleitbildes ‚Resilientes Energiesystem' besteht im Abgleich zwischen dem allgemeinen Leitkonzept ‚Resilientes Energiesystem', welches sich auf abstrakterer Ebene auf Energiesysteme im Sinne einer ‚Planung auf der grünen Wiese' bezieht, und den realen vorfindbaren (und ggf. nicht ohne weiteres veränderbaren) Gegebenheiten bzw. schon existierenden Systemkonfigurationen sowie den aktuell

diskutierten Umbauperspektiven. Letztere werden einerseits mit ihren charakteristischen sozio-technischen Eigenschaften im Rahmen einer Systembeschreibung und Systemanalyse erfasst, in welche die Ergebnisse der Akteurs-, Leitbild-, Wertschöpfungs- und Vulnerabilitätsanalysen einfließen. Die Umbauperspektiven werden der aktuell vorliegenden Literatur entnommen. Neben der Systembeschreibung ist eine strukturelle Vulnerabilitätsanalyse in diesem Zusammenhang besonders wichtig, da mit ihrer Hilfe, unabhängig von bestimmten Störereignissen, Schwachstellen im System aufdeckt werden können, die durch eine resiliente Gestaltung beseitigt oder zumindest abgemildert werden können. Die Ergebnisse der Vulnerabilitätsanalysen stellen somit eine dritte wichtige (a posteriori) Quelle für Resilienz steigernde Maßnahmen dar, neben der Biomimetik (a priori) und dem Risikomanagement in Kritischen Infrastrukturen (ebenfalls a posteriori). Als alleinige Quelle für Resilienz steigernde Maßnahmen wären Vulnerabilitätsanalysen aber unseres Erachtens völlig unzureichend. Schließlich übersteigt insbesondere der biomimetische Ansatz die menschlichen Erfahrungs- und Erkenntnismöglichkeiten bei Weitem. Hollnagel verfolgt ansatzweise ein ähnliches Ziel, wenn er dafür plädiert die positiven Merkmale, Aktionen und Maßnahmen eines Systems zu stärken und nicht nur die erkennbaren Schwachstellen zu eliminieren. Letztere seien zwar sehr konkret, sie könnten das System aber nur gegen eine kleine Bandbreite der möglichen Herausforderungen wappnen (Hollnagel 2011).

Die Erarbeitung von Gestaltungsleitbildern folgt keinem starren Schema. Sie ist offen für Interpretationen und Einflussnahmen der Akteure und Stakeholder. Sie ist auch nicht wertfrei. Die quantitative und qualitative Bestimmung der Systemleistungen kann von den gesellschaftlichen Akteuren nur wertbezogen erfolgen. Zudem stehen die verschiedenen Fähigkeiten eines Resilienten Systems, seine Widerstands-, Anpassungs-, Innovations- und Improvisationsfähigkeit und auch verschiedene Gestaltungsprinzipien, z.B. wie insbesondere Effizienz und Redundanz, in einem Spannungsverhältnis zueinander, was das spezifische Austarieren ihrer Ausprägungen im Einzelfall erfordert.

Zumindest die folgenden Schritte sind somit erforderlich:

1) Systemanalyse der vorfindbaren Systeme und ihrer aktuellen Umbauperspektiven. Hierbei spielen die Festlegung der Systemgrenzen und der Systemleistungen eine wichtige Rolle, ebenso die Erfassung der jeweiligen Rahmenbedingungen und der relevanten Akteure, einschließlich der von ihnen verfolgten Leitorientierungen. Hierzu gehören auch die Analyse der systemleistungsbezogenen aktuellen und erwartbaren Wertschöpfung sowie die Vulnerablitätsanalysen. All dies erfolgt durch Recherche, Interviews, Datenerfassung, einfache Berechnungen aber auch durch aufwändigere Modellierungen.

2) Ausgehend von den Gestaltungselementen des Leitkonzepts ‚Resilientes Energiesystem' wird, aufbauend auf den Ergebnissen der Analysen aus Schritt eins untersucht, welche Elemente sich im vorfindbaren System in welcher Form realisieren lassen.

3) Im dritten Schritt werden in Kooperation mit den involvierten Akteuren und Stakeholdern die ermittelten Optionen zu einem konsistenten Gestaltungsleitbild zusammengeführt.

Während die Schritte eins und zwei noch weitgehend einem konventionellen wissenschaftlichen Vorgehen entsprechen, besteht gerade im dritten Schritt eine besondere Herausforderung darin, dass die involvierten Akteure und Stakeholder selbstverständlich ihre eigenen Motive (Leitkonzepte) und Vorstellungen (Gestaltungsleitbilder) mitbringen und verfolgen. Die Erfahrung zeigte zwar, dass sich in diesen Motiven und Vorstellungen zahlreiche Anknüpfungspunkte zum Leitkonzept und den Gestaltungsleitbildern ergaben, sie sind aber alles andere als deckungsgleich. Die WissenschaftlerInnen mussten im Sinne der von ihnen erarbeiteten Konzepte Überzeugungsarbeit leisten.

Die schwierige Verknüpfung der Leitkonzepte und Gestaltungsleitbilder mit den Motiven und Vorstellungen der Akteure und Stakeholder macht zudem deutlich, dass Gestaltungsleitbilder nur für einen vergleichsweise begrenzten Zeitraum handlungsanleitend sein können. Wenn sich Rahmenbedingungen, Wertvorstellungen und Akteure ändern, müssen sie angepasst werden, damit sie weiterhin ihre handlungsleitende Funktion erfüllen können. Wenn sich die Vorstellungen darüber ändern, was ein Energiesystem leisten sollte, wird sich dies auch im Systemdesign niederschlagen.

3.2 Systemabgrenzung und Systemleistungen

Energiesysteme sind komplexe sozio-technische Systeme. Wir unterscheiden zwischen dem Energiesystem und seinen Systemleistungen und verwenden den Begriff Systemleistungen anstelle des Begriffs Systemdienstleistungen, weil letzterer im Bereich der Energiesysteme schon sehr lange mit feststehender Bedeutung verwendet wird. Uns ist wohl bewusst, dass eine Trennung zwischen Systemgestalt und Systemleistung nicht möglich ist, sie bestimmen sich schließlich wechselseitig. Wenn als Teil der Systemleistung Klimaneutralität verlangt wird, hat das natürlich ganz massive Auswirkungen auf die Systemgestalt. Wir konzentrieren uns mit unseren Gestaltungsperspektiven allerdings ‚nur' auf die Resilienz bei der Erbringung der jeweiligen Systemleistungen und nicht auf die jeweils spezifischen Systemleistungen selbst. Insofern erscheint uns in diesem Fall eine Unterscheidung zwischen Systemgestalt und Systemleistung mit unterschiedlichen Zugängen als hilfreiche Komplexitätsreduktion. Mit Blick auf die Systemgestalt stehen dann Fragen der Konstruktion sozio-technischer Systeme, mit Blick auf die Systemleistungen Aushandlungsprozesse der Nutzer und Stakeholder im Zentrum. Selbst wenn keine Einigkeit über die Systemleistungen besteht, eröffnen sich Spielräume für

eine resiliente Systemgestaltung.

Wir arbeiten also mit der folgenden Definition von System(dienst)leistungen:

„Die verallgemeinerten Systemdienstleistungen von ökologischen, technischen, ökonomischen und sozialen Systemen bestehen aus Strukturen, Produkten und Leistungen, welche diese Systeme einem Empfängerkreis („Nutzer“) zur Verfügung stellen und welche für diesen Empfängerkreis einen technischen, ökonomischen bzw. Wohlstand erhaltenden oder vermehrenden Wert haben. Systemdienstleistungen werden dabei über mengen- oder objektartige („was“) und qualitätsartige („wie“) Kriterien beschrieben“ (Gleich, Gößling-Reisemann, Stührmann, Woizeschke 2010, S. 27).

Strukturen, Produkte und Leistungen können sowohl materieller Art sein (z.B. Energie-Infrastrukturen), als auch immaterieller Art, zum Beispiel in Form von Informationen. Wichtig ist zudem, dass sie für die Nutzer eine direkt nutzbare Ressource darstellen und nicht nur einen vorgelagerten Charakter haben. So stellt der Staat aus der Sicht der Logistikbranche Straßen und andere Transportwege zur Verfügung, welche von dieser Branche zur Erbringung ihrer Dienstleistungen genutzt werden. Für die Lebensmittelbranche stellt die Logistikbranche hingegen z.B. Transportdienstleistungen zur Verfügung, für die zwar Infrastrukturen vorgehalten werden müssen (z.B. Schienenwege der Bahn), welche aber aus dieser Perspektive vorgelagert sind und nicht direkt vom Nutzer in Anspruch genommen werden.

Diese Definition der Systemleistungen hat auch Konsequenzen für die Definition des diese Leistungen erbringenden Systems. Komponenten des sozio-technischen Energiesystems sind alle Objekte und Personen, die einen Beitrag leisten zur Erbringung der Systemleistungen (Bereitstellung von Energie und Leistung) und ihrer Qualitätskriterien (Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit und Akzeptanz).

Die Qualitätskriterien beziehen sich nicht allein auf die Qualität der direkten Systemleistungen für die Nutzer, sondern auch auf die Umstände ihrer Bereitstellung. Die Systemleistung ‚Versorgung mit Elektrizität’ kann beispielsweise auf viele Arten erbracht werden, wovon aber einige, aufgrund problematischer gesellschaftlicher oder ökologischer Auswirkungen, weniger akzeptiert sind als andere. In die Bestimmung der Systemleistungen fließen also auch Risiken und Nebenwirkungen sowie gesellschaftlich akzeptierbare Begleitumständen ein. Diese Qualitäten und Quantitäten der (normativ geprägten) Systemleistungen müssen gesellschaftlich ausgehandelt werden. Wissenschaft kann dazu nur begrenzt beitragen.

Ein Resilientes Energiesystem soll also in der Lage sein, auch unter turbulenten Rahmenbedingungen und trotz massiver Störungen und innerer Ausfälle, seine Systemleistungen im Sinne aller geforderten direkten und indirekten Qualitätsansprüche zu erbringen. Das derzeit

in Deutschland vorhandene Energiesystem erbringt recht zuverlässig diverse geforderte Leistungen (direkte Qualitätskriterien) für seine Nutzer, so z.B. die in einem engen Korridor konstante Spannung und Frequenz im Strombereich und die fast ununterbrochene und flächendeckende Versorgung mit Strom und Wärme. Die durchschnittlichen Ausfallzeiten im Stromsektor lagen 2014 bei unter 12 Minuten (VDE 2015). Etliche qualitative Qualitätskriterien werden aber (noch) nicht vom Energiesystem erfüllt (z.B. Klimaverträglichkeit). Darüber hinaus wird in Zukunft auch die derzeit gewährleistete zuverlässige und konstante Energieversorgung vor große Herausforderungen gestellt.

3.2.1 Systemleistungen des sozio-technischen Energiesystems

Die Systemleistungen beziehen sich auf eine quantifizierende Komponente („was und wieviel“) und eine qualifizierende Komponente („wie“). Sie werden und nach direkten und indirekten Kriterien unterschieden. Direkte Qualitätskriterien betreffen die Qualität des Endprodukts selbst (z.B. bei Elektrizität die erlaubten, zeitlich begrenzten Abweichungen von der Nennspannung). Die indirekten Qualitätsprinzipien sind vorgelagert und haben nicht unbedingt Auswirkungen auf den Zustand des Endprodukts. Sie beziehen sich auf die Herstellung und den Transport der benötigten Energie sowie auf weitere Faktoren, die Umwelt oder Gesellschaft betreffend.

In der Literatur werden die Systemleistungen oft mit dem sogenannten Zielviereck aus Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit und Akzeptanz umschrieben. Zu den direkten Qualitätsprinzipien gehört die Versorgungssicherheit inkl. konstante Spannung und Frequenz im Strombereich. Zu den indirekten Qualitätskriterien gehören die Wirtschaftlichkeit, die Umweltverträglichkeit und die Akzeptanz.

Alle drei Sektoren des Energiesystems Elektrizität, Wärme/Kälte und Verkehr sind Gegenstand der folgenden Betrachtung, allerding mit unterschiedlicher Intensität. Der Strombereich ist zentral, der Mobilitätsbereich wird mit längerfristiger Perspektive angegangen (Power-to-Fuel). Der Wärmebereich wird nur ansatzweise behandelt.

3.2.1.1 Systemleistung Elektrizitätsversorgung

Das mengenbezogene Qualitätskriterium bezieht sich im Bereich der elektrischen Energieversorgung auf die zur Verfügung gestellte gesicherte Anschlussleistung in kW sowie die gelieferte elektrische Energie in kWh. Die direkten Qualitätskriterien beziehen sich auf die erlaubten Spannungsabweichungen vom Nennwert (Bandbreite der Spannung), die erlaubten Frequenzabweichungen (Bandbreite der Frequenz) sowie die zeitliche und räumliche Verfügbarkeit der Leistung. Die indirekten Qualitätskriterien beziehen sich auf die Herstellung und die Verteilung der elektrischen Energie.

Der Fokus, der hier vorgestellten Definition liegt auf den innerhalb des Systems erbrachten

Leistungen, die außerhalb des Systems Anwendung finden. Eine auf den Nutzen fokussierte Definition der Systemleistung für den Bereich Elektrizität würde damit lauten:

Eine zu definierten Zeiten gesicherte Versorgung mit elektrischer Energie, bei Einhaltung einer definierten Frequenz und Spannung an einem definierten Ort unter Einhaltung weiterer direkter und indirekter Qualitätskriterien.

Im gängigen (technischen und angebotsorientierten) Verständnis von Systemdienstleistung sind die Zeiten, Frequenzen und Spannungen in den Grid-Codes, Technischen Anschlussbedingungen und Technische Anschlussregeln, definiert (durch ENTSO-E, BDEW und VDE). Die im Rahmen von REYSTRA berücksichtigten Systemleistungen sind im Vergleich dazu stärker durch die Nutzer und durch weiterreichende gesellschaftliche Ansprüche geprägt. So lässt beispielsweise die heutige Netzstruktur und Stromversorgung größere Abweichungen von Netzfrequenz und Spannung nicht zu. Bei einer Abkehr von Synchronmaschinen ließe sich das aber in Zukunft ändern, was mehr Flexibilität im Netzbetrieb erlauben würde. Systemleistung Wärmeversorgung

Für den Fall der Wärmeversorgung handelt es sich bei den mengenbezogenen Kriterien um die zur Verfügung gestellte Wärmemenge (in kWh) und die bereitgestellte Leistung oder Energiedichte (z.B. Anschlussleistung bei Fernwärme, Brennwert bzw. Wobbe-Index bei Erdgas), die über einen Energieträger (z.B. Dampf, Kondensat, Heizwasser, Gas, Öl) an die Übergabestelle (räumlicher Rahmen) gelangen. Die eingesetzte Technologie hängt stark von der zur Verfügung gestellten Leistung und der Art des Wärmeträgers ab. Es werden drei Segmente unterschieden: Kleinbedarf (bis 80 kW), mittlerer Bedarf (80-500 kW), Großbedarf (mehr als 500 kW).

Eine auf den Nutzen bzw. die Leistung beim Endverbraucher ausgerichtete Definition für die Systemleistung Wärmeversorgung lautet folgendermaßen:

Die Systemleistung liegt bei der Wärmeversorgung in der Bereitstellung von Wärme auf der Basis eines Energieträgers mit vereinbarter Energiedichte (Druck und Temperatur) und weiteren chemisch-physikalischen Parametern im vereinbarten Umfang zu definierten Zeiten am definierten Ort sowie unter Berücksichtigung weiterer Qualitätskriterien.

Hinsichtlich des mit dem Versorgungsunternehmen vereinbarten Energieträgers muss als direktes Qualitätskriterium die zeitliche Verfügbarkeit der Leistung an der Übergabestelle gesehen werden. Weiteres versorgungsrelevantes Qualitätskriterium ist die Einhaltung der chemisch-physikalischen Parameter insb. der zulässigen Druck- und Temperaturverhältnisse des Energieträgers. Dabei sind für die Fernwärmeversorgung z.B. die einzuhaltende minimale Temperatur des Warmwassers in Bezug auf die hygienischen Vorschriften zur Verhinderung

des Legionellenwachstums zu berücksichtigen, die maximalen und minimalen Vorlauftemperaturen sowie die maximale Druckfestigkeit der Haustechnik.

3.2.1.2 Systemleistungen Verkehr

Die quantitätsbezogenen Kriterien der Systemleistungen des Verkehrssektors beziehen sich auf die Verfügungsstellung von Waren und Dienstleistungen auf der Basis des Transports von Gütern, Personen und Kommunikation von einem Ort A nach einen Ort B. Zu den direkten Qualitätsprinzipien zählen die Dauer des Transports (h/km) und der Komfort während des Transports. Außerdem wird in Deutschland, ähnlich wie bei der Versorgung mit Strom- und Wärme, ein Zugang zu Transport zu jeder Zeit und von jedem Ort an jeden Ort erwartet.

Der Begriff des Komforts ist hier sehr breit gefasst und soll eine weitere Perspektive auf Transport ermöglichen. Darunter kann der Platz, der den beförderten Personen oder Gütern zu Verfügung steht, verstanden werden oder auch bestimmte Temperaturverhältnisse (Kühltransporte). Beim Personenverkehr schließt Komfort auch die Möglichkeit ein, sich z.B. während der Zeit des Transports mit anderen Aktivitäten zu befassen.

Eine die Nutzerperspektive einnehmende Definition für die Systemleistungen des Verkehrssektors könnte lauten:

Die Systemleistung liegt beim Verkehrssektor in der Bereitstellung von Transportmöglichkeiten von Gütern, Personen und Informationen von jedem Ort A an jeden Ort B in einer zuvor vereinbarten zeitlichen Dauer bei einem bestimmten Komfort. Bei Bereitstellung des Verkehrs müssen weiterer Qualitätskriterien berücksichtigt werden.

Die Systemleistungen und Qualitätskriterien sind in der Tabelle 3.1: Darstellung der Systemleistungen und zugehörigen Qualitätskriterien von Energiesystemen für die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr noch einmal zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Darstellung der Systemleistungen und zugehörigen Qualitätskriterien von Energiesystemen für die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr

Beschreibung der Systemleistung	Direkte Qualitätskriterien	Indirekte Qualitätskriterien

Elektrizität
• gesicherte Anschlussleistung in kW
• elektrische Energie in kWh
 	
Wärme/Kälte
• Zur Verfügung gestellte Wärmemenge (in kWh)
• die bereitgestellte Leistung oder Energiedichte über einen Energieträger
 	
Verkehr
• <u>Bereitstellung von Energie für Transport (in kWh)</u>
• <u>Transport von Personen, Gütern und Kommunikation von Ort A nach Ort B</u>
	<u>Versorgungssicherheit:</u>
	Elektrizität
	• Einhaltung der Bandbreite der Spannung (+/- 3%-10%)(V)
	• Einhaltung Bandbreite der Frequenz (+/- 0.2 Hz)(Hz)
	• Zeitliche Verfügbarkeit (h/a)
	• Räumliche Verfügbarkeit
	
	Wärme/Kälte
	• Zeitliche und räumliche Verfügbarkeit
	• Druck- und Temperaturverhältnisse
	• Einhaltung von gesetzlichen Vorgaben bei der Umsetzung des Energieträgers vor Ort
	
	Verkehr
	• <u>Dauer des Transportes (h/km)</u>
	• <u>Flächendeckende Erreichbarkeit von Orten</u>
	• <u>zeitliche Verfügbarkeit von Transportleistung</u>
		<u>Wirtschaftlichkeit:</u>
		Zum Beispiel:
		• Stromgestehungskosten (ct/kWh)
		• Prozesswärmekosten (ct/kWh)
		• Kraftstoffkosten (ct/l)
		• Nutzflächenverbrauch (ha/kWh)
		• Versicherungsrisiko
		
		<u>Umweltverträglichkeit:</u>
		Zum Beispiel:
		• spezifische Emissionen (t CO_2-Äquivalente/kWh)
		• Gefahren durch Erzeugung über Kernenergie
		• Kühlwasserentnahme durch thermische Kraftwerke und Heizkraftwerke (m^3/h)
		• Umweltbelastung durch Herstellung und Betrieb von Anlagen (z.B. Versauerung und Eutrophierung des Bodens und der Gewässer bei Biomasseproduktion)
		• Einhaltung der technischen Spezifikationen für Brenn- und Kraftstoffe
		  o Gase – DVGW
		  o Flüssigkeiten – DIN-EN 228, DIN EN 590, DIN 51603-1
		  o Feste Brennstoffe – EN 14961-2, DIN 21900
		• Ressourcenverbrauch beim Bau von Anlagen und Verteilnetz

Beschreibung der Systemleistung	Direkte Qualitätskriterien	Indirekte Qualitätskriterien
		• Brenn- und Kraftstoffverbrauch beim Betrieb von Anlagen (spezifischer Primärenergieverbrauch) <u>Akzeptanz in der Bevölkerung</u> *Zum Beispiel:* • Möglichkeiten der Bürgerbeteiligung • Endkunden-Strompreis (ct/kWh) • Heizkosten (ct/kWh) • Kilometerkosten (ct/km) • Häufigkeit von Gefährdungen der Bevölkerung (Erwartungswerte) • Gesamter Flächenverbrauch der Infrastruktur (ha/kWh) • Belastung durch stoffliche und Schallemissionen (mg/m^3 bzw. dB)

3.3 Systemanalyse und Beschreibung von Energiesystemen

3.3.1 Skizze des vorfindbaren Energiesystems in Deutschland

Das Energieversorgungssystem besteht aus den drei Hauptsektoren Strom, Wärme und Mobilität, die oft getrennt voneinander betrachtet werden. Diese Sektoren sind abhängig von unterschiedlichen Primärenergieträgern bzw. Energiequellen (z.B. Mineralöl, Erdgas, Steinkohle, Kernenergie, Sonne, Wind etc.). Die nachfolgende Darstellung fokussiert vor allem auf die Struktur der Stromsystems, das verstärkten Veränderungen unterworfen ist und eine Schlüsselrolle im Energiesystem der Zukunft spielen wird. Aufgrund der Abkehr von „brennbaren Energieträgern" hin zu den quasi unbegrenzt zur Verfügung stehenden erneuerbaren Quellen wie Wind und Sonne, wird zukünftig eine verstärkte Kopplung des Elektrizitätssektors mit den Sektoren Wärme und Mobilität erwartet (Quaschning 2016d). Der Zusammenhang wird in Abbildung 3.1 verdeutlicht. Es wird deutlich, dass Elektrizität universel einsetzbar und vielfältig umwandelbar ist.

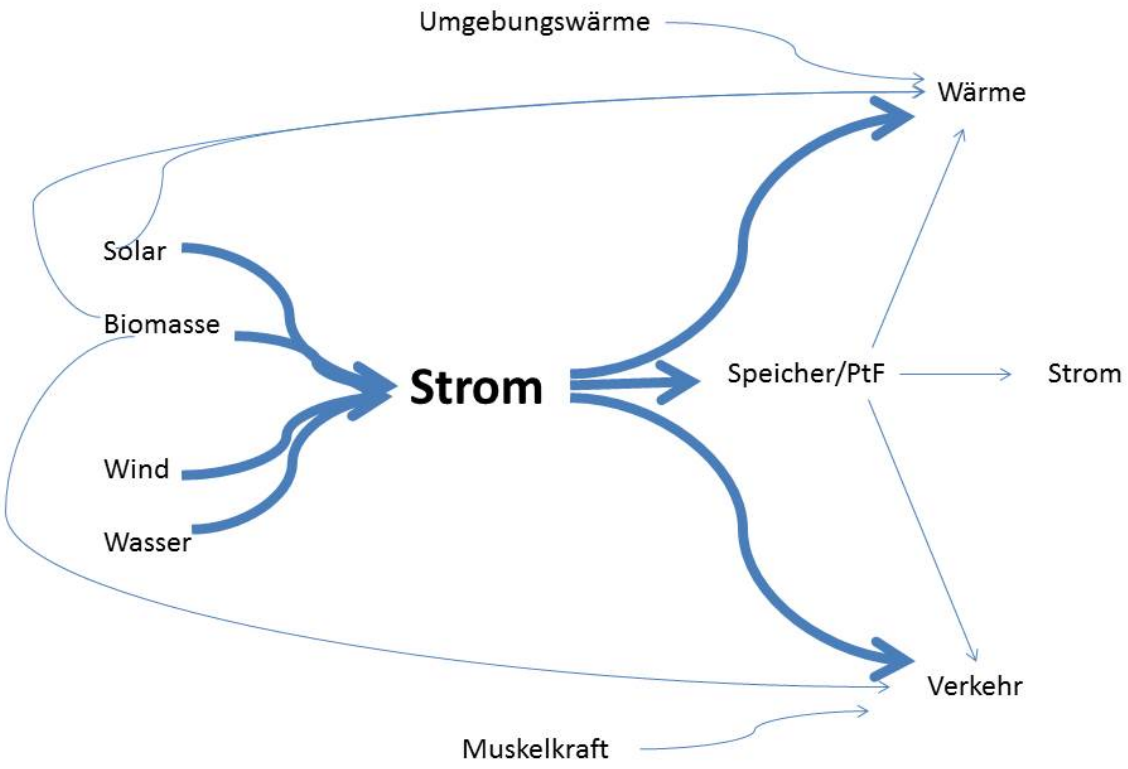


Abbildung 3.1: Vereinfachende Darstellung. die die bekannten erneuerbaren Energieträger den jeweiligen Sektoren zuordnet. Die Darstellnug suggiert für ein Energiesystem welches auf 100% EE basiert eine stärkere Abhängigkeit vom Stromsystem.

3.3.1.1 Elektrizität

2015 wurden 29,0% des Stroms aus erneuerbaren Energien gewonnen. Nach der Windenergie (12,3%) entfielen auf die Energie aus Photovoitaik (6,0%) und Biomasse (6,9%) die größten Anteile. Neben erneuerbaren Ressourcen wurden Baunkohle (24,0%), Steinkohle (18,3%), Erdgas (9,4%), Mineralölprodukte (0,9%) und weitere Quellen (4,2%) zur Stromproduktion genutzt. Die Kernenergie hatte noch einen Anteil von 14% (BMWi[20]).

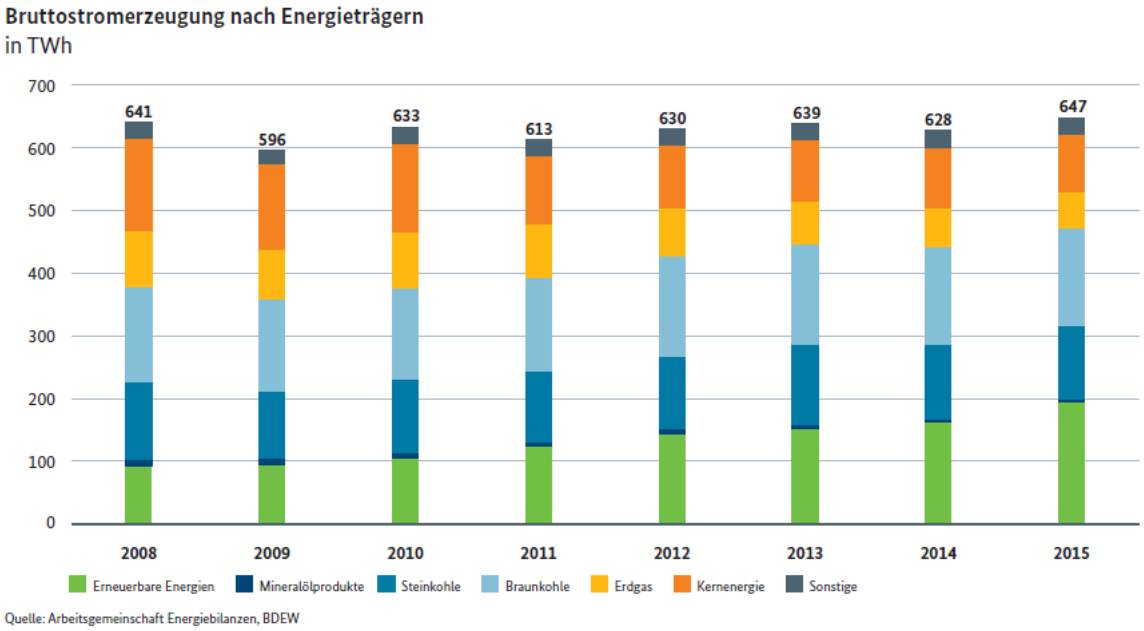


Abbildung 3.2: Bruttostromerzeugung nach Energieträgern (BMWi 2012)

Für die Kernenergie existiert ein Ausstiegsszenario demzufolge bis zum Jahr 2022 alle Atomkraftwerke abgeschaltet werden. Ein vergleichbares Szenario gibt es für die Kohleverstromung derzeit nicht. Die Stromversorgung erfolgt über Netze, die nach ihrer Betriebsspannung in Teilnetze untergliedert sind. Die Übertragungsnetze in Deutschland haben eine Gesamtlänge von 35.000 km und werden auf der sogenannten Höchstspannungsebene mit Spannungen von 220kV bzw. 380kV betrieben. Hohe Spannungen reduzieren bei Wechselstrom die Übertragungsverluste, sodass diese Netze für den überregionalen Ausgleich geeignet sind. Konventionelle Kraftwerke und Offshorewindparks speisen auf dieser Ebene Elektrizität ein. Deutschland ist in vier Zonen eingeteilt, für die je ein Übertragungsnetzbetreiber zuständig ist. Die Verteilnetze werden in Hochpannungsebene (60-110 kV), Mittelspannungsebene (6-30 kV) und Niederspannungsebene (230-440 V) untergliedert (s. Abbildung 3.3). Es gibt 806 Verteilnetzbetreiber, die ca. 1,8 Millionen Stromkreise verantworten.

[20] http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Strommarkt-der-Zukunft/zahlen-fakten.html

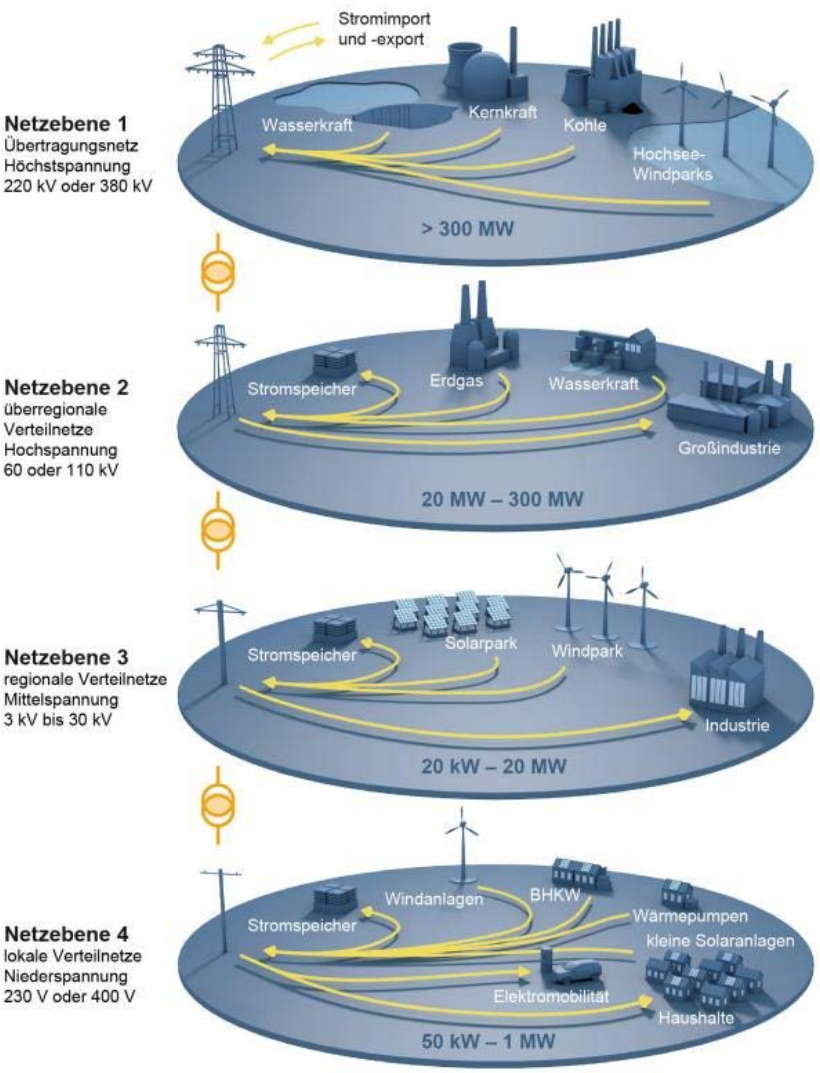


Abbildung 3.3: Netzebenen in Deutschland (Energieagentur NRW 2015)

Die Netze werden mit Wechselstrom mit einer Nennfrequenz von 50Hz und der die Ebene bestimmenden Nennspannung betrieben. Alle Ebenen des Stromnetzes sind dreiphasig ausgeführt und werden auch so betrieben. Einzig die 230V Ebene lässt einphasigen und dreiphasigen Betrieb zu. Im Netzentwicklungsplan sind außerdem drei Fernübertragungskorridore mit Gleichstromtechnik (HGÜ-Leitungen) geplant, die große Mengen Strom von Nord- nach Süddeutschland übertragen sollen.

Das Elektrizitätssystem ist stark hierarchisch aufgebaut. Auf der höchsten und hohen Spannungsebene speisen große Kraftwerke ein. Auf diesen Ebenen werden auch die traditionell so definierten Systemdienstleistungen erbracht. Wichtig für eine zuverlässige Stromversorgung ist, dass

Spannung, Frequenz und Phasenlage in zulässigen Grenzen gehalten werden. Dafür ist es unabdingbar, dass Stromerzeugung und -verbrauch zu jedem Zeitpunkt exakt gleich hoch sind. Für die Erbringung dieser Systemdienstleistungen sind hauptsächlich die Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) verantwortlich. Zu den Systemdienstleistungen gehören Regelleistung, die Frequenzhaltung (50 ± 0,2 Hz), die Vorhaltung von Blindleistung, die Bereitstellung von Verlustenergie, die Betriebsführung und der Versorgungswiederaufbau. Die Aufgabe der Spannungshaltung (230 V ± 10 %) wird von den Verteilnetzbetreibern übernommen.

Um unvorhergesehene Schwankungen von Erzeugung und Verbrauch ausgleichen, die zu Frequenzabweichungen führen, wird Regelleistungsenergie benötigt. Deren Erbringung wird von den ÜNB ausgeschrieben. Übertragungsnetzbetreiber regeln mittels verschiedener Regelleistungs-"Produkte". Sie unterscheiden sich in zwei Dimensionen, der Geschwindigkeit, mit der sie bereitgestellt und der Dauer, für die sie eingesetzt werden können. Durch die Primärregelung werden Frequenzschwankungen im Sekundenbereich ausgeglichen. Die Sekundärregelung schaltet sich an die Primärregelung an, wenn das Ungleichgewicht mehr als 30 Sekunden andauert. Sie soll die Frequenz wieder auf ihren Ausgangswert zurückbringen. Die Minutenreserve wird eingesetzt, falls die Imbalance länger als 300 Sekunden anhält. Ab einer Unausgewogenheit von über einer Stunde liegt die Verantwortung nicht mehr bei den Übertragungsnetzbetreibern, sondern bei den Bilanzierungskreisverantwortlichen. Um die Primär- und Sekundärregelleistungen bereitstellen zu können, sind also angedrosselte Kraftwerke unerlässlich. Diese Kraftwerke sind für die Netzstabilität von zentraler Bedeutung. Das derzeitige Systemdesign erfordert eine Präqualifizierung für alle Teilnehmer, die Systemdienstleistungen zur Verfügung stellen wollen. Im Allgemeinen handelt es sich um fossile Kraftwerke, aber in den letzten Jahren werden auch durch ein sogenanntes „Pooling" andere Energiequellen Batteriespeicher, Wind, Biogas und PV zur Erbringung von Regelenergie zugelassen, wenn sie die notwendigen Voraussetzungen erfüllen (Brauns et al. 2014).

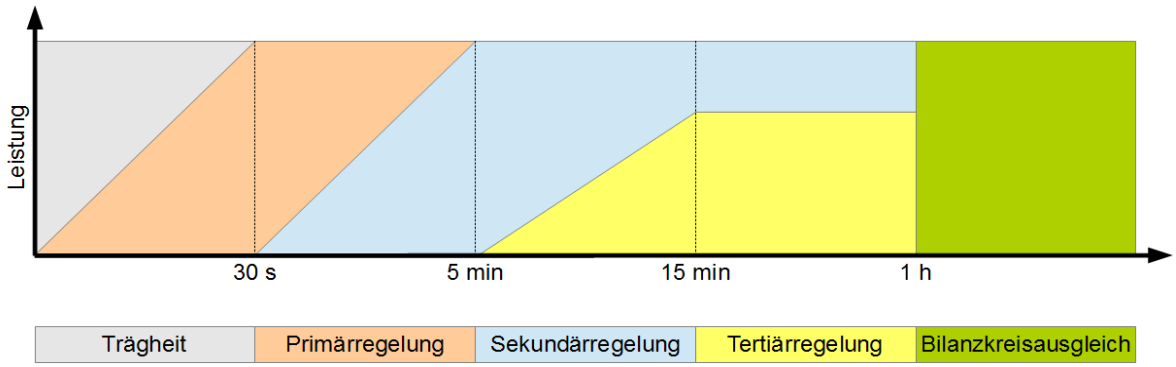


Abbildung 3.4: Schema des Einsatzes der unterschiedlichen Regelleistungsarten zur Stabilisierung der Stromversorgung (DF5GO 2013)

Neben dem Abruf von Regelleistung gibt es weitere, den ÜNB zur Verfügung stehende, Möglichkeiten, das Stromnetz zu stabilisieren. So können über Redispatch- und Countertradingmaßnahmen absehbare Schwankungen ausgeglichen werden, indem kurzfristig die Fahrpläne bestimmter Kraftwerke auf Anweisung der ÜNB oder über die Platzierung von Handelsgeschäften abgeändert werden. Des Weiteren können über das Einspeisemanagement einspeisende Anlagen abgeregelt werden, wenn es zu Netzüberlastungen kommt.

Im heutigen System leisten Synchrongeneratoren einen Beitrag zur Blindleistungsregelung durch ihre Fähigkeit Blindleistung zu kompensieren, sie können aber auch Blindleistung erzeugen. Mittlerweile sind auch Windenergieanlagen über entsprechend programmierte Wechselrichter und Photovoltaikanlagen hierzu auch in der Lage.

Eine weitere Anforderung an das Stromsystem ist seine Schwarzstartfähigkeit. Sie ist Voraussetzung für den Versorgungswiederaufbau nach einem Ausfall (Blackout). Netzbetreiber müssen garantieren, dass nach einem Blackout genügend Kraftwerke in der Lage sind, ohne externe Stromversorgung „ins Schwarze einzuspeisen“. Das heißt die Anlagen müssen geeignet sein, ohne Schaden zu nehmen, „blind“ in ein völlig undefiniertes Netz Energie einzuspeisen, um damit schrittweise den Betrieb des Gesamtnetzes wiederaufzunehmen.

Die Systemdienstleistungen werden in den Regelzonen Europas in gewisser Weise dezentral erbracht. Das Europäische Verbundnetz besteht aus 34 Übertragungsnetzbetreibern aus 22 Ländern. Als Steuerungsgröße dient die Netz-Frequenz, welche eine globale Größe darstellt, also bei allen verbundenen Netzen gleich ist, was charakteristisch für Wechselstrom ist. Verschiebungen in der Frequenz signalisieren, ob zu einem gewissen Zeitpunkt eine Über- oder Unterdeckung an elektrischer Energie gegeben ist. Bei einer Unterdeckung sinkt die Frequenz und bei Überdeckung steigt sie an. Das Verhalten der Kraftwerke bei Über oder Unterdeckung wird im Entso-E Gebiet durch die Grid-Codes geregelt.

3.3.1.2 Wärme

Der Wärmesektor umschließt die Versorgung von Gebäuden mit Raumwärme und Warmwasser sowie die Bereitstellung von Prozesswärme für die Industrie. Wärme macht rund 56 % des gesamten Endenergiebedarfs in Deutschland aus (Agentur für Erneuerbare Energien 2015). Als Energieträger werden im Wärmesektor vor allem Erdgas (45%) und Erdöl (19%) genutzt, aber auch Kohle (7%) sowie Strom (10%), Fernwärme (8%). Im Bereich der Erneuerbaren Energiequellen spielt bisher Biomasse (10%) eine gewisse Rolle, daneben Anlagen zur Nutzung der Sonneneinstrahlung (Solarthermie) und der Erdwärme (Wärmepumpen) (Stand 2013 in Breisig et al. 2015). Veränderungen in Richtung auf regenerative Energieträger und Klimaneutralität kamen in der Vergangenheit nur sehr langsam voran (Agentur für Erneuerbare Energien 2015).

3.3.1.3 Mobilität

Der Mobilitätssektor macht ca. 30% des Energiebedarfs in Deutschland aus, mit steigender Tendenz (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen 2016; Umweltbundesamt 2012). Der größte Anteil des Verbrauchs liegt bei der Nutzung von PKWs. Geringere Anteile gehen auf LKWs und Flugzeuge zurück (Brandt et al. 2015). Der bei weitem kleinste Anteil liegt beim Energiebedarf von Schienen- und Schiffsverkehr (für ausführliche Darstellung s. Wurster et al. 2014). Mit Ausnahme des elektrifizierten schienengebundenen Verkehrs (2%) basiert der Mobilitätsbereich fast ausschließlich auf den fossilen Energieträgern Diesel, Benzin (ca. 85%) und Kerosin (ca. 13%) des Endenergieverbrauchs im Verkehr in Höhe von 728 TWh in 2015 (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen 2016). Der Mobilitätssektor weist im Unterschied zu anderen Wirtschaftsbereichen einen Anstieg der Kohlendioxidemissionen aus fossilen Quellen aus (Gebauer und Wörlen 2017).

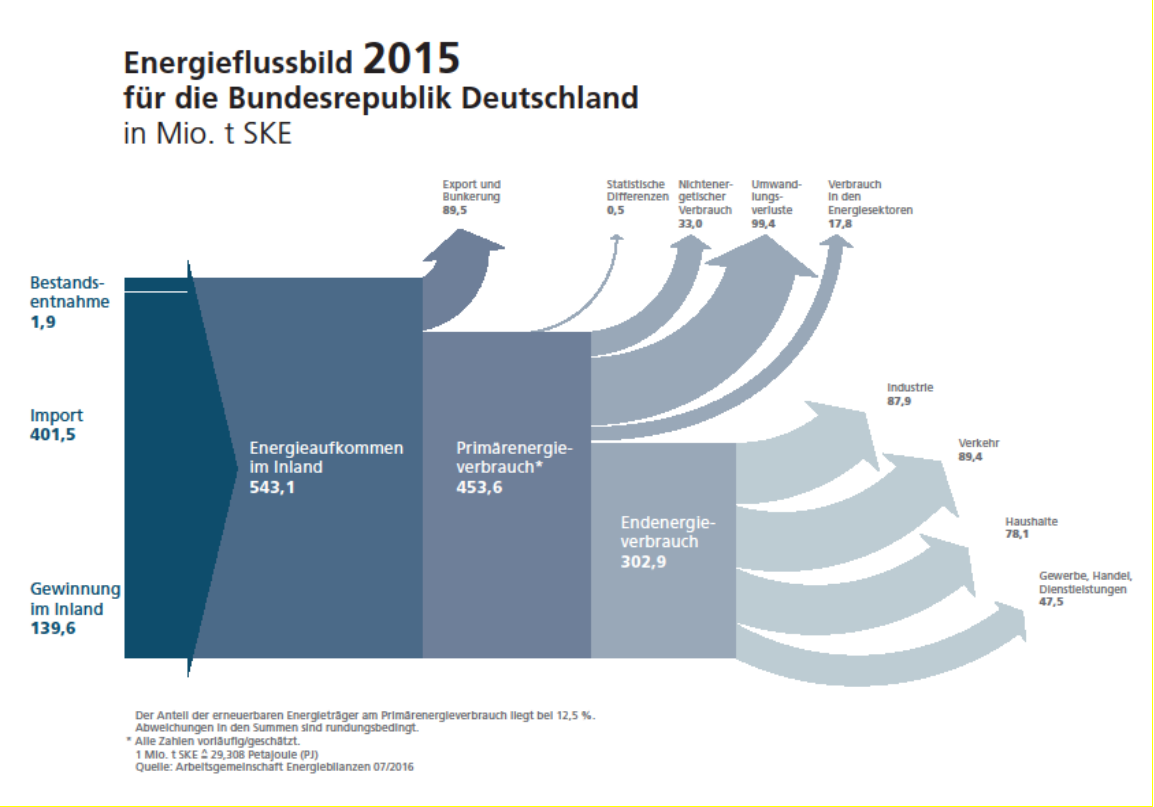


Abbildung 3.5: Energieflussbild der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2015 (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. 2015)

3.3.2 Derzeitiger Aufbau des Energiesystems zur Versorgung von Regionen

Regionale Energiesysteme von Gemeinden, kleinen Städten und Landkreisen besitzen im Strombereich meist nur eine Mittel- und Niederspannungsebene. Die Mittelspannungsebene ist über z.T. mehrere Umspannwerke an die Hochspannungsebene angeschlossen, die in der Abbildung 3.6, schematisch mit Großkraftwerken dargestellt ist. Aus Übersichtsgründen wurde ein Fernwärmenetz nicht integriert.

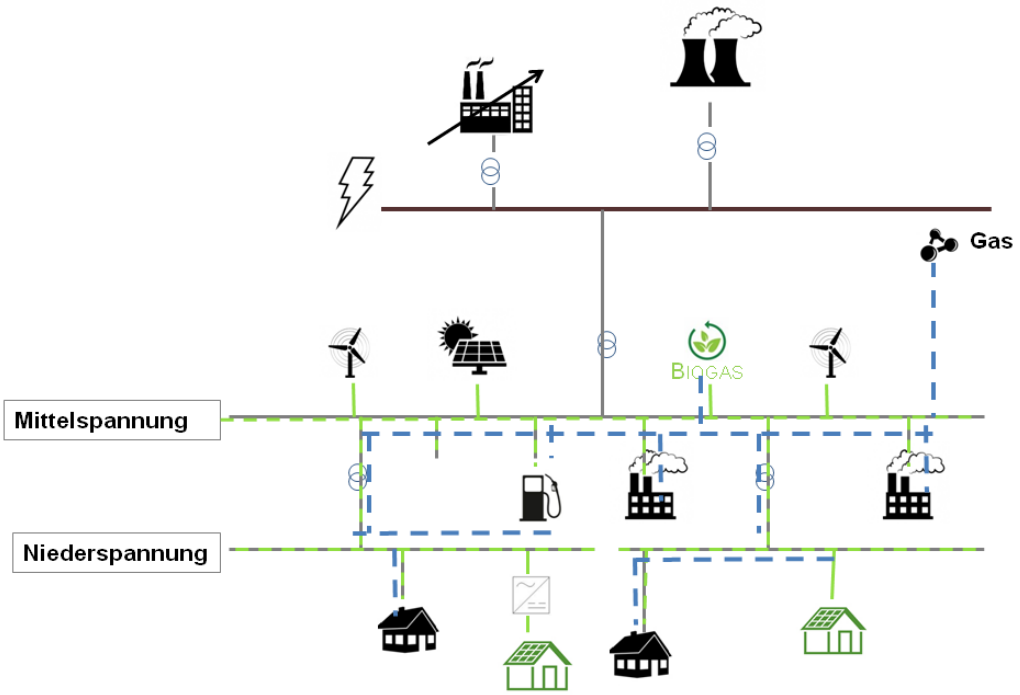


Abbildung 3.6: Vereinfachte Übersicht eines regionalen Energiesystems mit Strom, Gasnetz sowie die erneuerbaren Erzeuger Windkraft, Solarenergie und Biogas. (Quelle: Eigene Darstellung von Nina Böcker, Icons: all-free-download.com)

Die Erbringung der Systemdienstleistung ‚Regelung und Steuerung' findet auf den oberen Ebenen statt. Bis auf die in der Region erzeugte Energie aus erneuerbaren Quellen werden alle anderen Energiemengen und -arten importiert. Wobei aufgrund der derzeitigen Gestaltung des Marktes der meiste Strom aus regionalen erneuerbaren Quellen nicht in der Region vermarktet wird. Die Förderung der Anlagen über das EEG bedingt, dass der Großteil der Mengen zentral an der Börse vermarktet wird und nicht in lokale Märkte eingespeist werden kann, bzw. nur zu sehr hohen Kosten. Die fehlende Vorhaltung von Systemdienstleistungen auf den unteren Ebenen führen zu dem Paradoxon, dass im Falle eines Blackouts und Ausfalls der Übertragungsnetze, die regionalen Erzeugungseinheiten für die regionale Versorgung nicht verwendet werden können bzw. sich üblicherweise automatisch abschalten, da die Netz-Frequenz als Signal fehlt.

Die Sektoren Wärme und Verkehr sind aufgrund ihres stofflichen Charakters von Natur her stärker regional bzw. lokal strukturiert. Dennoch wird etwa 80-95% der Energie im Wärme- und Verkehrsbereich über Importe fossiler Rohstoffe wie Gas, Mineralöl und Kohle (KWK) abgedeckt.

3.3.3 Analyse von Transformationspfaden aus vier ausgewählten Studien mit Blick auf Resilienz steigernde Gestaltungselemente (Bauprinzipien) – Ermittlung von Gestaltungsoptionen

In diesem Abschnitt werden Szenarien und Ausbaupfade aus aktuellen Studien analysiert und vor dem Hintergrund der Gestaltungselemente auf ihren möglichen Beitrag zu einer resilienten

Ausgestaltung bewertet. Es wird überprüft, ob in den Ausbauszenarien Gestaltungelemente aus dem Leitkonzept Resilientes Energiesystem (wie z.B. Diversität der Erzeugungsanlagen) eine Rolle spielen und wie sie ggf. berücksichtigt wurden. Gleichzeitig dient die Analyse dazu Anknüpfungspunkte für Maßnahmenoptionen im vorfindbaren Energiesystem für Schritte in Richtung auf ein Resilientes Energiesystem zu ermitteln.

Die folgenden vier Studien, die Transformationsszenarien des Energiesystems enthalten, wurden analysiert:

1. **Peter (2013): Modellierung einer vollständig auf erneuerbaren Energien basierenden Stromerzeugung im Jahr 2050 in autarken, dezentralen Strukturen.** Im Auftrag des Umweltbundesamtes, 31. August 2013
2. **Breyer et al. (2013): Vergleich und Optimierung von zentral und dezentral orientierten Ausbaupfaden zu einer Stromversorgung aus erneuerbaren Energien in Deutschland.** Reiner Lemoine Institut (RLI) im Auftrag von Haleakala-Stiftung, 100 prozent erneuerbar stiftung und BVMW Bundesverband mittelständische Wirtschaft, 21. Januar 2014
3. **Übertragungsnetzbetreiber (2016): Szenariorahmen Netzentwicklungsplan** 2017-2030
4. **Quaschning (2016d): Sektorkopplung durch die Energiewende.** Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin

In der Studie von Breyer et al. werden die Kosten für eine (de)zentrale Erzeugung durch erneuerbaren Energien abgeschätzt, indem die erwartbaren zukünftigen Kosten des bestehenden Systems mit einer Konfiguration verglichen werden, in der Deutschland in 14 Energieregionen aufgeteilt ist. Bezüglich spezifischer Gestaltungselemente des Energiesystems werden in der Studie, neben der Orientierung auf Dezentralität, kaum Vorschläge unterbreitet. Immerhin haben Breyer et al. diverse Energiequellen (PV; Wind-und Wasserkraft, Biogas und Biomasse) in ihr Modell mit einbezogen. Auch auf die in den unterschiedlichen Szenarien benötigten Speicher (Pumpspeicher, Batterien-Kurzzeitspeicher, P2G) wird eingegangen. Weiter wird auch diskutiert, auf welcher Grundlage, Breyer et al. das Stromnetz modelliert haben. Es wird kurz angedeutet, dass sich auch Mobilität und Wärme in dezentralen Strukturen integrieren lassen. Bei den dargestellten Systemelementen existieren Anknüpfungspunkte an die Resilienz steigenden Gestaltungselemente **Diversität, Speicher und Puffer und Subsidiarität**. Die Studie konzentriert sich jedoch vorrangig auf ökonomische Abwägungen, bei denen aber auch mögliche Kosten, wie z.B. durch einen Blackout, nicht weiter mit einbezogen werden. Es ist anzunehmen, dass Breyer et al. von einer grundsätzlich gegebenen Versorgungssicherheit ausgehen.

Ähnlich wie in der Studie von Breyer et al. wird in der Studie von Peter die technische und ökonomische Umsetzbarkeit einer dezentralen Versorgung mit erneuerbaren Energien mithilfe der Modellierung verschiedener Szenarien diskutiert. Im Unterschied zu Breyer et al. wird auch die Möglichkeit eines „lokal-autarken"-Szenarios untersucht. Dafür wurden jeweils ein Dorf und ein Stadtteil in Nord- und Süddeutschland modelliert. Peter kommt zu dem Schluss, dass eine autarke regionale Stromversorgung nur in wenigen Regionen möglich wäre. Er rät daher, neben einer lokalen Stromerzeugung, zu einem gut ausgebauten Stromnetz, das den Austausch zwischen den Regionen ermöglicht. Diese Studie gibt hauptsächlich bzgl. des Resilienz Gestaltungsprinzips der **Subsidiarität** einen Hinweis auf die Gestaltung des Energiesystems und betont die Notwendigkeit von Transportnetzen zum Ausgleich regional erzeugter Energie. In Bezug auf die Steigerung der Versorgungssicherheit wird auf eine Kopplung von Strom mit den Sektoren Wärme und Mobilität und auf die Bedeutung von **Speichern** (elektrische und thermische) sowie im Sinne der Smartness auf die Ausstattung mit IKT, also Rückkopplungsmechanismen und Kommunikationseinheiten**,** verwiesen.

In der Studie von Quaschning wird ermittelt, welche Maßnahmen notwendig sind, um die im Dezember 2015 in Paris beschlossenen Klimaziele (unter 2 Grad Steigerung der mittleren Temperatur, möglichst 1,5 Grad Celsius) einzuhalten. In dieser Studie werden keine grundsätzlichen Aussagen zur Struktur und Regelung gemacht. Vielmehr werden hauptsächlich die erforderlichen Energiemengen, die mit den zur Verfügung stehenden Technologien bereitgestellt werden können, dargestellt und Empfehlungen ausgesprochen. Dabei wird immer die effizienteste Lösung anvisiert, da selbst diese einen enorm hohen Zubau erfordern würde. Grundsätzlich kann aus der Resilienzperspektive angemerkt werden, dass die Idee, in allen Sektoren Strom als Primärenergieträger zu nutzen, zu einer sehr hohen Abhängigkeit von der Stromerzeugung führen würde, mit den entsprechenden Nachteilen. Aufgrund fehlender Alternativen wird der Strom zukünftig zum größten Teil durch Wind- und Solarenergie gedeckt werden. Dies hat zur Folge, dass die Diversität der Erzeugung sinkt. falls keine Sicherungsmaßnahmen getroffen werden, welche die Diversität erhöhen. Hierfür käme die Erzeugung von P2G/L in Frage, als stoffliche Umwandlung der flüchtigen elektrischen Energie, wodurch wichtige Resilienz steigernde Redundanzen sowie Speicher in einem zukünftigen System bereitgestellt würden.

Im vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMU) vorgestellten Szenariorahmen für die Netzentwicklung im Zeitraum 2017-2030 steht das Ziel im Vordergrund, einen sicheren und zuverlässigen Netzbetrieb zu garantieren (Übertragungsnetzbetreiber 2016). Dafür müssen zwei Grundprinzipien erfüllt sein: Es muss zu jedem Zeitpunkt exakt so viel Strom erzeugt werden, wie gerade verbraucht oder vom System, z.B. auch durch Einspeicherung, verarbeitet werden kann. Zudem muss der Strom von den Erzeugungseinheiten zu den Verbrauchern gelangen, ohne dabei Überlastungen im Netz zu verursachen. Dies soll auch während des gesamten Verlaufs der Transformation des Energiesystems gewährleistet sein. Mit Blick

auf Resilienz verweist die Studie auf die mögliche Sektorkopplung von Strom mit Wärme und Verkehr (ohne konkrete Vorschläge dafür zu entwickeln), und es wird immer wieder auf das Spannungsverhältnis von Zentralität und Dezentralität der Energieerzeugung eingegangen. Auch werden Flexibilisierungsoptionen aufgezeigt, die es z.B. durch Demand Side Management ermöglichen, auf „ungeplante Nichtverfügbarkeiten“ angemessen reagieren zu können. Versorgungssicherheit wird somit explizit diskutiert, aber vor allem mit Blick auf die Erzeugungs- und Lastsituation und weniger auf strukturelle Elemente des Energiesystems. Immerhin geht die Studie auf nötige **Redundanzen, Diversität der Erzeugung, Demand-Side-Management und flexible Sektorkopplung** ein. Es wird also durchaus auf Resilienz steigernde Aspekte verwiesen.

Der Fokus der betrachteten Studien liegt somit auf Kosten, Nachfrage und Erzeugung und den nötigen Kapazitäten, nicht zuletzt um die Klimaziele zu erreichen. Trotzdem können Anknüpfungspunkte mit Blick auf ein Leitkonzept Resilientes Energiesystem in den Bereichen Redundanzen, Diversität, flexible Sektorkopplung und Demand-Side-Management identifiziert werden. Die Hoffnung noch konkretere Hinweise gemäß den Gestaltungselementen Resilienter Energiesysteme oder gar erweiterte Gestaltungsoptionen zu erhalten wurden nur ansatzweise erfüllt, da sich die Studien meistens auf die Ermittlung des Ausbaubedarfs konzentrieren.

3.3.4 Herausforderungen mit Blick auf Zentralität, Dezentralität und Subsidiarität im Energiesystem

Zentralistische Strukturen haben eine Reihe von Vorteilen. So kann bspw. der rasche Aufbau der erneuerbaren Energien in China darauf zurückgeführt werden, dass der koordinierte Prozess zentral organisiert und Partizipation nicht erwünscht ist. Des Weiteren ergeben sich bei zentralen Systemen häufig Kostenersparnisse durch die Verwendung von einheitlichen Standards und Komponenten. Bei Energiesystemen führt ein Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch (Angebot und Nachfrage) über ein großes Gebiet zu einer gleichmäßigeren und kontinuierlicheren Versorgung, da sich regionale Verbrauchsanomalitäten einfacher ausgleichen lassen. Wird als Systemgrenze die Bundesrepublik Deutschland genommen, so lassen sich Erzeugungsspitzen im Norden auf Basis von Wind, die häufig in Herbst- und Winterstürmen auftreten, sowie die in den Sommermonaten produzierten Solarstromspitzen im Süden durch die Übertragungsnetze verteilen. Allerdings wird das existierende System zunehmend vor Herausforderungen gestellt. Dazu gehört z.B. eine Abkehr von großen zentralen Erzeugungseinheiten hin zu kleinen verteilten Anlagen. Im Jahr 2015 waren über 1,5 Millionen Wandler, in diesem Fall Erneuerbare Energien Anlagen, zur Stromproduktion mit einer Gesamtleistung von etwa 80 GW installiert. Dieselbe Erzeugungsleistung wurde in den vorhergehenden Jahrzehnten von einigen hundert konventionellen Kraftwerken zur Verfügung gestellt. Der dynamische Zuwachs an Akteuren und Wandlern führt automatisch zu einer beträchtlichen Erhöhung der Komplexität des Systems. Es stellt sich die Frage, wie diesen Veränderungen mit neuen Formen für Netzführung und Steuerung begegnet werden kann.

Nicht nur die Erzeugungsstruktur verändert sich, sondern auch der „Verbraucher“ ändert sich. So gibt es immer mehr sogenannte „Prosumer“, also Privatkunden, die auch selbst Strom erzeugen. Diese kleinen Erzeugeranlagen speisen Strom auf der Niederspannungsebene ein. Dies führt dazu, dass der Strom nun auch in umgekehrter Richtung, von den niedrigeren auf die höheren Ebenen fließt.

Eine weitere große Herausforderung stellen große Offshore-Windparks dar. Sie sind eher als zentralistische Strukturen zu charakterisieren und lassen sich entsprechend gut von zentraler Stelle koordinieren. Ihre Standorte liegen allerdings fernab der Verbraucherzentren, sodass neue große Stromtrassen gebaut werden müssen, um den Strom abzutransportieren.

Generell stellt die Einspeisung von fluktuierenden erneuerbaren Energien auf allen Netzebenen eine Herausforderung für das Stromsystem dar, das nur sehr schlecht Schwankungen, z.B. der Frequenz, verarbeiten kann. Wenn der Anteil an erneuerbaren Energien weiterhin ausgebaut wird, muss eine entsprechende Koordination von Verbrauch und Erzeugung gewährleistet sein. Einen Beitrag hierzu könnte das Demand-Side-Management leisten. Für diesen Ansatz ist allerdings eine Flexibilität auf verschiedenen Ebenen notwendig, die nur schwer im Rahmen der derzeitigen Struktur des Stromsektors geleistet werden kann.

Nicht zuletzt führen zentrale Großstrukturen zu Pfadabhängigkeiten, die die Spielräume für Innovation und Improvisation einschränken. Und schließlich ist bei einem Ausfall von Steuerzentralen oder Hauptleitungen die Verletzlichkeit eines Systems hoch, solange die unterschiedlichen Einheiten starr miteinander gekoppelt sind.

3.4 Konkretisierung der Gestaltungselemente für das Gestaltungsleitbild Resiliente Energiesysteme mit erneuerbaren Energien

In diesem Kapitel wird das Gestaltungsleitbild für Resiliente Energiesysteme mit seinen Elementen und Prinzipien vorgestellt und werden Ansatzpunkte für Umsetzungsmaßnahmen diskutiert. Begonnen wird mit der Diskussion Resilienz steigernder Regelungsprinzipien und ‚smarter Systeme‘ (smart grids, microgrids). Der Fokus liegt dann insgesamt auf dem ‚Zellularen Energiesystem‘ mit subsidiärer Steuerung, dass in der aktuellen Diskussion eine zunehmend wichtige Rolle spielt und schon wichtige Elemente eines ‚Resilienten Energiesystems‘ in sich vereint.

3.4.1 Grundlagen Resilienter Steuerung und Regelung von Energiesystemen

Im folgenden Abschnitt werden gängige Steuer- und Regelungsmechanismen diskutiert und ihre Struktur und Funktionsweise mit Resilienz steigernden Designprinzipien abgeglichen. Dieser Untersuchung liegt die Hypothese zugrunde, dass eine subsidiäre Steuerung und Regelung einen wichtigen Beitrag zu einem ‚Resilienten Energiesystem‘ leisten kann.

Allgemeine Steuerungs- und Regelungskonzepte

Unter Steuerung (open loop control) oder offenem Wirkungsablauf wird ein Vorgang verstanden, bei dem mit Hilfe einer Stellgröße ein System (z.B. eine Maschine oder Anlage) gesteuert wird. Für den Aufbau einer Steuerung wird ein Sensor benötigt, mit dem eine Kenngröße aufgenommen werden kann, sowie ein Steuergerät zur Verarbeitung des Signals und schließlich ein Aktor, der die Handlungsanweisung des Steuergeräts ausführt.

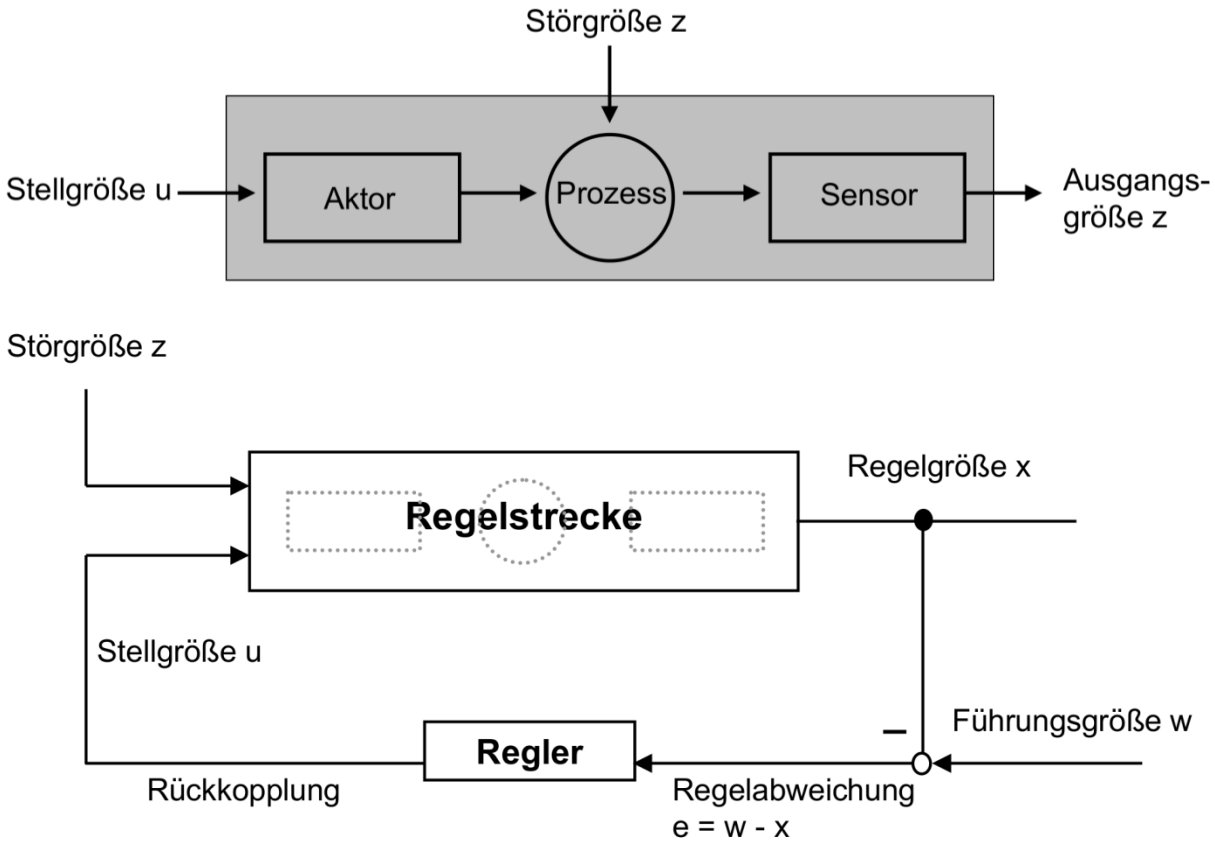


Abbildung 3.7: Darstellung eines einfachen Regelkreises. Obere Abbildung Regelstrecke, unten Regelkreis (closed loop control) (Abbildung: Prof. Dr.-Ing. Tim J. Nosper, ursprünglich: Nordmann)

Bei der Regelung (closed loop control) oder geschlossenem Wirkungsablauf (vgl. Abbildung 3.7) ist der Vorgang ähnlich dem der Steuerung mit dem Unterschied, dass nach erfolgter Steuerung zusätzlich eine ständige Rückführung des Ausgangssignals, der sogenannten Regelgröße, erfolgt und somit der Prozess permanent überwacht wird. Im Allgemeinen wird vom Sensor der IST-Wert einer Größe gemessen und mit dem SOLL-Wert verglichen. Ein Regelgerät verarbeitet das Signal und schickt die Handlungsanweisung an den Aktor. Dieser verändert die Stellgröße so, dass die Differenz reduziert und letztlich der SOLL-Wert erreicht wird. Die Rückführung ermöglicht somit eine automatisierte Reaktion des Systems auf Störungen und Sollwertänderungen. Als praktisches Beispiel kann das Einstellen der Duschtemperatur betrachtet werden. Regelgröße ist hier die Temperatur. Der Aktor ist das Wasserventil und der Mensch misst und regelt. D.h. er vergleicht die IST-Wassertemperatur mit der Wunsch- (SOLL-)

Wassertemperatur und stellt den Aktor entsprechend ein. In einer closed-loop-Regelung findet der Regelprozess automatisiert statt.

Bei einer **zentralen Regelung** laufen alle Informationen an einem zentralen Punkt zusammen. Dort werden die ankommenden Signale verarbeitet und ausgehende Signale erstellt. Die Zentrale kann als ‚kritische Struktur' bezeichnet werden, da bei einem Ausfall der Zentrale eine Ansteuerung der einzelnen Einheiten nicht mehr möglich ist, und es somit zum Systemzusammenbruch kommt.

Bei einer **verteilten Regelung** sind an mehreren Orten Regeleinheiten installiert. Die Einheiten besitzen Kommunikationsschnittstellen, um untereinander Informationen auszutauschen. Diese sind dabei so gestaltet, dass eine ständige Kommunikation nicht zwingend erforderlich ist, jedoch im Normalbetrieb von einer Kommunikation zwischen den Regeleinheiten ausgegangen wird. Der größte Vorteil ist, dass durch die Verteilung der Regelmechanismen ein einzelner Ausfall nicht zum Ausfall des Gesamtsystems führt. Sogenannte selbstorganisierende Systeme passen ihre Kommunikationsstruktur sogar bei einem lokalen Ausfall eigenständig an (Schuh und Lunze 2015).

Im Unterschied zur verteilten Regelung verzichtet die **dezentrale Regelung** gänzlich auf die Kommunikation zwischen den Regeleinheiten, sie erfolgt also quasi autonom. Das Konzept hat seinen Ursprung aus der Heizungs-Regeltechnik. Ohne Kommunikation kann es nicht zu Missverständnissen bzw. Kommunikationsstörungen kommen. Eine dezentrale Regelung ist somit deutlich störungsresistenter und kommt den Anforderungen eines Resilienten Systems entgegen. Die Einsatzmöglichkeiten von dezentralen Regelungen sind jedoch begrenzt. Dies liegt unter anderem daran, dass bei voller Autonomie der Regelung nur Informationen an der Regeleinheit verfügbar sind, die durch Auswertung von lokalen vorliegenden Gegebenheiten am Ort der Regelung gewonnen werden können. Für die Übernahme einer Gesamtverantwortung für das System und die Sicherstellung der Belieferung bedarf es einer übergeordneten Instanz, durch die verschiedene Ebenen involviert werden[21].

Berücksichtigung von Gestaltungselementen Resilienter Systeme für Steuer- und Regelungskonzepte

Angriffe auf IT-Systeme zeigen die Schwächen digitaler Datenverarbeitung auf. Das Schadprogramm Stuxnet, welches speziell zum Angriff auf Systeme zur Überwachung und Steuerung entwickelt und eingesetzt wurde, oder das Einschleusen von Viren auf Rechnersysteme kritischer Infrastrukturen, (Falliere et al. 2011) z.B. der Befall des IT-Systems des Bundestages im Mai 2015 oder das Finden von Büroviren auf Rechnern des Kernkraftwerkes

[21] Es gibt noch weitere Steuer- und Regelungsprinzipien, wie Master/Slave, Singlemaster und Multimaster, die hier aber nur der Vollständigkeit halber erwähnt werden sollen.

Grundremmingen am 25. April 2016, zeigen, dass auch gut gesicherte Netzwerke und EDV-Systeme von Industrieanlagen verwundbar sind. Insbesondere die Verwundbarkeit der für den Betrieb von Kraftwerken verwendeten Supervisory Control and Data Acquisition Systeme (SCADA) wurde in den letzten Jahren stark thematisiert (Grünwald 2014). Die Zahl der problematischen Vorkommnisse dürfte sich auch in Zukunft kaum verringern.

Damit Programmcode oder betriebsbedingte Fehler sich nicht auf das gesamte System auswirken, empfiehlt es sich, die Anlagensoftware möglichst heterogen/divers zu gestalten, jedoch mit standardisierten Schnittstellen, sodass die Kommunikation nicht beeinträchtigt wird. Andererseits wirkt sich eine zu heterogene Verteilung der Bedienoberflächen für das Personal der Leitstellen hinderlich aus, da diese nur von Wenigen bedient werden können. Sollte es bei Erkrankung oder Mitarbeiterfluktuation zu einem Engpass an spezifisch qualifiziertem Personal kommen, erschwert eine Spezialisierung eine zügige Einarbeitung.

Grundsätzlich bietet es sich an, die Systeme modular aufzubauen und Schnittstellen zu schaffen, die mit einer Vielzahl an Systemtypen/Subsystemen kompatibel sind. Besonders wichtig ist dabei die Existenz von flexiblen bzw. losen Kopplungen im System, die sich auch auf Steuerung und Regelung beziehen. Eine dezentrale bzw. verteilte Steuerung und Regelung berücksichtigt dieses Gestaltungselement. Dadurch können verschiedene Teilgebiete unabhängig voneinander betrieben werden. Dies hat auch Auswirkungen auf den Informationsaustausch, der ebenso flexibel erfolgen sollte. Ein weiteres Gestaltungselement besagt, dass die Regeleinheiten nicht nur funktionell divers, sondern zudem geographisch divers verteilt sein sollen, also nicht gebündelt an einem Ort. So sind Teile des Systems auch bei Krisen mit einem Ausfall mehrerer Regeleinheiten immer noch funktionsfähig und können den Ausfallgebieten ggf. Unterstützung zukommen lassen. Damit das System störungsresistent und im weiteren Sinne lernfähig bleibt, sind zudem Rückkopplungsmechanismen notwendig. Darunter werden ausgleichende positive und negative Feedbackmechanismen verstanden, die auf das System entweder dämpfend oder verstärkend wirken können. Auch sie benötigen Informationen über die Systemzustände, die durch Messsysteme zu ermitteln sind.

Die bis jetzt genannten Punkte beziehen sich hauptsächlich auf den Umgang mit bekannten Herausforderungen und zielen auf die Verbesserung der Widerstandsfähigkeit und Anpassungsfähigkeit des Systems. Ein Resilientes System soll aber auch in der Lage sein auf Störungen und Überraschungen improvisierend und innovativ zu reagieren. Hierfür spielt in der Struktur Resilienter Systeme der Faktor Mensch eine wichtige Rolle. Vor allem Menschen sind – über alle Möglichkeiten der künstlichen Intelligenz hinaus – zu echter Improvisations- und Innovationsfähigkeit in der Lage, wenn es darum geht Störungen und Überraschungen zu bewältigen, nicht zuletzt in dem Sinne, dass sich plötzlich eröffnende Chancen ergriffen werden.

Die Architektur des Systems muss ihnen allerdings auch die Möglichkeit zu entsprechenden Reaktionen eröffnen.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass trotz Automatisierung die Regelung und Steuerung weiterhin stark vom Menschen abhängen wird. Deshalb werden nicht zuletzt auch unverplante Ressourcen, also Freiräume und Kapazitäten der Mitarbeiter, die nicht durch feste Aufgaben überlastet sind, sowie Weiterbildungsmöglichkeiten für die Mitarbeiter benötigt.

3.4.2 Forschungsstand zu Microgrids und zellularen Ansätzen

Getrieben durch die Kostendegression bei dezentralen Stromerzeugern (PV) und Speichern, haben sich die Untersuchungen zu Microgrids und zellularen Ansätzen weltweit verstärkt (Quitzow et al. 2016). Microgrids sind teilautonome elektrische Versorgungssysteme, die sowohl im Inselmodus als auch an das Übertragungsnetz gekoppelt betrieben werden können (Zhou und Ngai-Man Ho 2016).

Ansätze, die neben Strom weitere Sektoren wie Wärme und Mobilität berücksichtigen, werden auch multimodale Energiesysteme genannt. Wir sprechen von einer zellularen Struktur, wenn das Gesamtsystem aus einzelnen teilautonomen Zellen besteht. Der Begriff wird häufig synonym mit regionalen Zellen verwendet – ähnlich multimodalen Microgrids am Übertragungsnetz. Ein Microgrid ist also ein Spezialfall einer Zelle, die sich nur auf Strom bezieht.

Etliche Projekte haben Ansätze zu regionalen Zellen untersucht, (u.a. Kießling 2013 und derzeit auch im Smart Grids-Plattform Baden-Württemberg e.V.). Das Projekt Iren2 Energiedorf Wildpoldsried untersuchte die Etablierung einer regionalen Zelle mit lokalem Ausgleich, da dort in den letzten Jahren sowohl die Rückspeiseereignisse als auch die Erzeugungsleistung rasant angestiegen sind. Wildpoldsried verspricht sich von einem regionalen Ausgleich geringere Kosten bei steigender Versorgungssicherheit (Rindt 2015). Explizites Ziel des Forschungsprojektes IREN2 ist es, eine Inselnetzfähigkeit der Region zu erreichen und zu erproben. Des Weiteren werden durch die Einbindung von BHKWs und Elektromobilen auch die Sektoren Wärme und Mobilität miteinbezogen. Neben eher praktisch orientierten Projektberichten finden sich Publikationen, die ein zellulares System bzw. deren Umsetzung in Form von Zellen auch konzeptionell untersuchen.

Ecofys hat im Jahr 2013 für das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) im Gutachten ‚Zukunftsfähige Stromnetze' die Fragestellung untersucht, wie der Betrieb der Stromnetze in regional begrenzten Zellen organisiert werden kann, und welche Vorteile auf diese Weise bzgl. der Robustheit gegenüber Großstörungen, der Integration von EE und der Verringerung des Übertragungsnetzbedarfs (Höchst und Hochspannung) zu erreichen sind (Grünwald 2014).

Der VDE hat 2015 in einem Arbeitspapier einen „Grüne Wiese“-Ansatz vorgestellt, der für verschiedene Zellgrößen eine Sektorkopplung modelliert. Dabei wurden Einfamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser und Gewerbe und Industrien betrachtet (VDE ETG 2015).

Die Bundesnetzagentur vertritt in ihrem Eckpunktepapier ‚Smart Grid und Smart Market‘ folgende These: „Der zellulare Ansatz wird eine der Antworten auf die sich ändernde Energieversorgung sein“. Weiter wird ausgeführt: „Die bisher übliche Netzführung und -steuerung könnte bei zunehmender Dezentralität […] so komplex werden, dass sie an ihre Grenzen gerät. […] [Es] wird im zellularen Ansatz ein Beitrag zur Versorgungssicherheit gesehen, weil der Ausfall einer Zelle nicht den Ausfall des Gesamtsystems zur Folge haben muss“ (Bundesnetzagentur, S. 34). Eine genaue Untersuchung wie sich ein zellulares System, also die Strukturierung eines Sektor gekoppelten Energiesystems in Form von Zellen, auf die Verwundbarkeit bzw. Versorgungssicherheit in den Zellen und des Gesamtsystems auswirkt, ist uns bisher nicht bekannt.

Intensiv diskutiert wird die Frage nach einer optimalen Größe einer Zelle. Wir gehen davon aus, dass die räumliche Dimensionierung der Zellen von den betrachteten Aspekten abhängt. Administrative Abgrenzungen sind aus Gründen der Datenverfügbarkeit nützlich. Letztendlich sollte die Abgrenzung aber weniger nach geographischen, sondern eher nach funktionalen Kriterien erfolgen. Die folgende Darstellung des Konzeptes eines zellularen Systems mit subsidiärer Regelung greift die Frage der Dimensionierung nur ansatzweise auf. Für unsere regionalen Fallstudien lag der Fokus von Anfang an auf der regionalen Ebene. Zudem haben wir uns aus pragmatischen Gründen der Datenverfügbarkeit für eine administrative Abgrenzung entschieden.

3.4.3 Konzept des zellularen Systems mit subsidiärer Regelung

In diesem Abschnitt wird das zellulare System definiert, eine Bewertung vor dem Hintergrund des Leitkonzepts und der Gestaltungselemente Resilienter Energiesysteme vorgenommen, sowie Vorschläge für ihre Umsetzung im Rahmen von Gestaltungsleitbildern auf nationaler und regionaler Ebene unterbreitet. Für regionale Zellen werden die Komponenten und Bauteile beschrieben.

Ein zellulares System wird durch die Anordnung von lose miteinander gekoppelten Sektor übergreifenden Energiesystemeinheiten (Zellen) charakterisiert, die sich für einen gewissen Zeitraum autonom versorgen und regeln können. Die Zelle umfasst die lokalen Energieinfrastrukturen für Elektrizität, Wärme und Verkehr. Die zellulare Struktur ist aber nicht auf die lokale Ebene beschränkt, sie kann auf jeder der Skalenebenen thematisiert werden. Zellen/Einheiten auf den niedrigeren Ebenen werden auf der nächsthöheren Ebene zu einer Zelle zusammengefasst. Eine Rangfolge, die sich an der Skalenebene orientiert, könnte lauten: Gebäude-Zelle; mehrere Gebäude werden zur Quartierszelle; Quartiere sind Bestandteil der Stadtzelle/Gemeindezelle; die Gemeinden sind Teil der regionalen Zelle; die Landeszelle besteht aus regionalen Zellen und die größten Zellen könnte man dann als Kontinente bezeichnen.

Der zellularen Struktur liegen u.a. Designprinzipien der Automatisierungstechnik zugrunde. Zum einen geht man davon aus, dass eine optimale Struktur erreicht ist, wenn die Struktur der Leittechnik der des zu kontrollierenden Prozesses ähnelt (VDE ETG 2015). Des Weiteren gilt in der Automatisierungstechnik, dass bei einer hierarchischen Datenverarbeitung, die Daten möglichst auf der niedrigsten Ebene verarbeitet werden sollten, da das Verschieben der Daten auf eine höhere Ebene zu Kapazitätsengpässen oder Zeitverzögerungen führen kann (VDE ETG 2015). Dieses Anliegen entspricht unserem Verständnis von Subsidiarität, demzufolge alles was auf der untersten Ebene geregelt werden kann, primär auch dort geregelt werden soll. Auch das Subsidiaritätsprinzip führt nicht dazu, sich auf fixe (geographisch abgrenzbare) Zellen zu beziehen, sondern eine funktionale, Ebenen zueinander in Beziehung setzende, Sicht einzunehmen. Ein Manko der dezentralen Regelung, die fehlende übergeordnete Instanz und Verantwortung, kann auf diese Weise durch eine subsidiäre Steuerung/Regelung mit verteilten Regelinstanzen überwunden werden. Das wäre dann eine Steuerung/Regelung, bei der übergeordnete Regelungsstrukturen den Informationsaustausch und die Bedarfe bestimmter Ebenen oder Einheiten koordiniert untereinander ausgleichen können.

Nah verwandt mit der subsidiären Regelung ist die verteilte Regelung, bei der an mehreren Orten Regeleinheiten installiert sind. Diese Einheiten besitzen Kommunikationsschnittstellen, um untereinander Informationen auszutauschen, die dazu dienen Fahrpläne und Strategien abzustimmen. Dabei sind die Schnittstellen so gestaltet, dass eine Kommunikation untereinander nicht zwingend erforderlich ist, also ein Notbetrieb ohne diese stattfinden kann. Der größte Vorteil der verteilten Regelung dürfte bei geeigneter Regeldefinition darin liegen, dass durch die Verteilung der Regelmechanismen ein einzelner Ausfall nicht zum Ausfall des Gesamtsystems führt.

Eine subsidiäre Regelung mit verteilten Steuerinstanzen ist vorteilhaft, weil gemäß dem Subsidiaritätsprinzip den Ebenen eine bestimmte Funktion zugewiesen wird. In der zellularen Struktur erfolgt auf den einzelnen Ebenen die Regelung verteilt. An den Schnittstellen mit anderen Zellen oder Ebenen findet die Kommunikation zwischen den Regeleinheiten nur mit aggregierten Daten statt.

Die außerhalb der Zelle übertragenen aggregierten Daten lassen für einen äußeren Betrachter keinen Schluss auf die interne Regelungsstruktur bzw. Daten von Nutzern zu. Dies ist insbesondere für die Wahrung des Datenschutzes und der Privatsphäre wichtig. Ein zellulares System führt im Unterschied zu derzeit diskutierten Smart Grid Ansätzen, die von einer zentralen Regelung und Steuerung ausgehen, zu einer Verringerung des Datenaustausches, indem an jeder Schnittstelle/Zellgrenze aggregierte Daten weitergegeben werden (Patzack et al. 2016).

Zudem führt das Subsidiaritätsprinzip dazu, dass in der Regel der dezentrale Ausgleich bevorzugt wird. Sollte eine lokale Versorgung nicht möglich sein, oder benachbarte Zellen zusätzliche Ener-

gie benötigen, werden übergelagerte Strukturen in Anspruch genommen. Der sogenannte Inselmodus kommt nur im Notfall zu tragen und erfordert eine spezielle Handhabung und ein besonderes Design der Systeme. Insbesondere ist eine schnelle und präzise Erkennung der Notwendigkeit der Netztrennung, also der Abkopplung der Zelle von dem Verbundnetz, notwendig. Im Falle der Netztrennung muss das System in der Lage sein, abweichende Übergangsströme und Spannungen auszuhalten. Diese entstehen, da zwangsläufig Lastverschiebungen stattfinden. Wie bereits erwähnt, muss für den Übergang aus der netzgebundenen Versorgung zu einem Inselbetrieb Rotationsreserve zur Verfügung gestellt wird, die üblicherweise durch die Trägheit rotierender Massen in den Turbinen bereit gestellt wird, ebenso Netzselbsterhaltung und Kurzschlussleistung (Grünwald 2014). Ggf. sind Sicherheitskonzepte anzupassen, wenn z.B. die Kurzschlussleistung nicht bereitgestellt werden kann. Zudem muss Regelenergie sichergestellt werden, die von der Regelbarkeit, Ausgewogenheit und Größenverteilung der Erzeugungsanlagen abhängt. Im gleichen Zuge ist bei der Wiederankopplung an das übergeordnete Netz eine Synchronisierung der Frequenzen der Teilnetze notwendig, sodass die Abweichungen möglichst gering bleiben. Es gilt also sowohl für das Abtrennen als auch das Wiederankoppeln, dass es am vorteilhaftesten, bzw. quasi eine notwendige Voraussetzung ist, dass die Netzabschnitte sich in einem Gleichgewichtszustand befinden und an den Übergabestationen/Umspannwerken, etc. keine Ströme fließen.

Die Kopplungs- bzw. Entkopplungsmöglichkeiten der unterschiedlichen Netze/Leitungen sind grundsätzlich dadurch eingeschränkt, dass immer Strom für die Steuer und Regeltechnik benötigt wird:

- IKT (Kommunikation für Verbraucher, Steuersignale zur Lastverschiebung, Regeltechnik, Internet, Telefon, Mobilfunk, Funk),
- Wärme (Regelung/Steuerung für Dampf, kalte Nahwärme, Fernwärme),
- Strom-Versorgung (DC, AC),
- Gas sowie und in anderen Fällen
- flüssige Kraftstoffe.

Insofern ist eine vollständige Entkopplung vom allgemeinen Stromnetz nur über Speicher und/oder lokale Erzeugung mittels erneuerbaren Energien oder anderer Aggregate (z.B. Notstrom/USV-Systeme) möglich. Betrachtet man die Energieträger in einer Zelle wird deutlich, dass eine Kopplung der verschiedenen Sektoren auch zu Effizienzgewinnen führen kann. Sie rühren z.B. daher, dass man Kraft- und Wärmeerzeugung koppelt oder auf Low Exergie Systeme in Form bisher ungenutzter Abwärmepotentiale zurückgreift, einschließlich der Anhebung von Temperaturniveaus durch Wärmepumpen (Kopplung mit dem Stromsystem). Eine solche Kopplung ist

aber auch aus Resilienzsicht vorteilhaft, da dadurch der Diversifizierungsgrad steigt. Auf der anderen Seite kann die steigende Komplexität durch die Kopplung der Energiesektoren und -systeme jedoch auch dazu führen, dass die Verwundbarkeit des Gesamtsystems steigt. Dies wird stark von der Qualität (der Ausgestaltung) der Kopplung abhängen (Stichwort lose Kopplung).

Wärme und Mobilität sind in weiten Bereichen aufgrund ihrer stofflichen Charakteristik anders zu behandeln als Strom. Wärme kann über verschiedene Primärenergiequellen durch Verbrennungsprozesse erzeugt werden und wird für Anwendungen meist stoffgebunden verwendet. Für Mobilität werden derzeit vor allem Kraftstoffe auf Erdölbasis verwendet. Lässt man Muskelkraft außer Acht, so kommen für nicht leitungsgebundene mobile Anwendungen aus Energieeffizienzgründen hauptsächlich Energieträger in Frage, die pro Energieeinheit ein geringes Volumen und Gewicht haben. Während sich flüssige Kraftstoffe mit vergleichsweise geringem Energiebedarf transportieren lassen, treten beim Wärmetransport hohe Wärmeverluste an Leitungen auf. Dies schränkt die Transportdistanz stark ein. Für ein Wärmenetz gelten je nach Alter des Netzes Verlustwerte zwischen 150-500 kWh/a je Meter Trassenlänge. Bei einem zukünftigen Heiz- und Warmwasserverbrauch von Haushalten in Deutschland von ca. 6000 kWh/a wird ersichtlich, dass sich eine Belieferung einzeln stehender Ein- und Zweifamilienhäuser aufgrund der Verluste nicht lohnt (Wolff und Jagnow 2011).

3.4.4 Bewertung des zellularen Systems aus Resilienzsicht

In diesem Abschnitt wird ergänzend zur Darstellung im Leitkonzept Resiliente Energiesysteme auf die Möglichkeiten zur Resilienzsteigerung durch eine zellulare Strukturierung des Energiesystems eingegangen. Hierzu wird dargestellt welche Gestaltungselemente durch das zellulare System, bzw. die darin enthaltenen Elemente, die Zellen, erfüllt werden und welche Vor- und Nachteile sich dadurch ergeben.

Bei der Auswertung der von uns durchgeführten leitfadengestützter Interviews mit vierzehn Experten des Energiesystems wurde deutlich, dass die Mehrheit der befragten Akteure davon ausgeht , dass ein zellulares System mit subsidiärer Regelung Gestaltungselemente eines Resilienten Energiesystems enthält und zugleich eine ausgleichende Perspektive in der Debatte über zentrale oder dezentrale Strukturen eröffnet. Deutliche Auswirkungen einer zellularen Strukturierung des Energiesystems auf die Resilienz der Zellen des Systems wurden auch in dem schon erwähnten Ecofys-Gutachten ermittelt (Grünwald 2014). Als wichtigster Punkt wurden die Vorteile der Inselnetzfähigkeit regionaler Zellen beim Umgang mit Großstörungen hervorgehoben. Damit liegt im Vorhandensein einer **flexiblen/losen Kopplung,** bzw. in der Aufhebung, der im bisherigen System dominierenden starren Kopplung der einzelnen Spannungsebenen und Netzgebiete, der wesentliche Vorteil gegenüber anderen Strukturvorschlägen. Die Orientierung an der Frequenz eröffnet auch im zellularen System eine elegante Methode, um wichtige Zustände im Netz zu erfassen. Die Frequenz dürfte weiterhin eine wichtige Rolle im zukünftigen Stromnetz spielen.

Allerdings ist bei einer Abkopplung, also einem unterbrechungsfreien Übergang vom Netzparallelbetrieb in den Inselmodus, zu beachten, dass sich starke und abrupte Veränderungen der Frequenz und Spannung aufgrund von Transienten ergeben können (Grünwald 2014). Ein Grund hierfür ist häufig, dass die sich trennenden Netze nicht im Gleichgewicht waren, sodass sich in der sich bildenden Zelle entweder zu viel oder zu wenig Erzeugung befindet. Im Weiteren erfordert die Inselnetzfähigkeit von Systemen, dass alle Systemdienstleistungen in den Zellen selbst und nicht wie im bisherigen Verbundsystem auf den übergeordneten Netzebenen erbracht werden. Die dadurch erforderliche Einrichtung von Regel und Steuerungsinfrastruktur bedeutet zum einen, dass **Balance- und Feedbackmechanismen** eingerichtet werden und zum anderen, dass Steuer und Regelung so beschaffen sein müssen, dass bei Fehlern Backup-Systeme, also z. B. **Redundanzen** vorhanden sind. Findet die Regelung wie von uns anvisiert **subsidiär** und verteilt statt, eröffnet dies einen weiteren Gewinn für die Versorgungssicherheit. Dies liegt daran, dass über die Einrichtung der Inselnetzfähigkeit Doppelstrukturen, also zusätzliche Redundanzen, in Bezug auf Steuerung und Regelung geschaffen werden. Je nach Ausgestaltung der verteilten Regelung müssen sehr große Datenmengen verarbeitet werden. An jeder Zellgrenze/Schnittstelle sollen diese nur aggregiert an die nächsthöhere Steuereinheit / Zelle weitergeben werden. Auf diese Weise wird eine Verringerung der Datenübertragungsbandbreiten erreicht, sowie Datenschutzbedenken entgegengewirkt. Des Weiteren werden **Speicher und Puffer** benötigt, um die Strommengen aus der fluktuierenden Erzeugung zu speichern. Die Berücksichtigung dieser Elemente führt bereits zu einer erhöhten Widerstandsfähigkeit der Zellen. Hierzu kommt noch die größere **Diversität** der Energie-Ressourcen, die sich über eine Kopplung der Sektoren ergibt und dazu führt, dass die Umwandlung von Strom in flüssige oder gasförmige Energieträger Berücksichtigung findet. Eine Möglichkeit die Diversität beizubehalten besteht darin, neben der Strominfrastruktur auch eine Biogas und Power-to-Gas gespeiste Gasinfrastruktur beizubehalten und als weiterhin wichtiges Standbein der Energieversorgung zu sehen. Abbildung 3.8 fasst die Gestaltungsprinzipien und –elemente Zellularer (Energie) Systeme zusammen. In Abgrenzung zum Leitkonzept „Resilientes Energiesystem“ fehlen die Akteure und Ressourcen, die durch das Konzept nicht gegeben sind.

Abbildung 3.8: Fähigkeiten und Prinzipien Zellularer Energiesysteme (Eigene Abbildung)

Bisher wurden vor allem technische Aspekte dargestellt, deren Beitrag als förderlich für die Resilienz eingestuft wurde. Die Stärke des zellularen Ansatzes und seine Beiträge zur Resilienz dürften aber vor allem darin liegen, dass diese Art der Struktur es einfacher macht soziale und gesellschaftliche Aspekte zu integrieren. In einer Reihe von Projekten konnte bspw. gezeigt werden, dass die Beteiligung der relevanten Akteure bei verschiedenen Maßnahmen zu einer höheren Akzeptanz von geplanten Veränderungen führt. Des Weiteren begünstigen die Einbindung der lokalen Bevölkerung, die Gruppenbildung und die Durchführung von Beteiligungsverfahren. Über die Einbeziehung des lebensweltlichen Wissens der lokalen Akteure erfolgt zudem eine angemessene Berücksichtigung von lokalen Gegebenheiten. Der direkte Umgang mit der Technik und die Auseinandersetzung mit dieser können dazu beitragen, dass die Akteure ein geschärftes Bewusstsein für die Gestaltung der Energiesysteme erlangen. Dies ist letztendlich die Grundlage um Verhaltensänderungen anzustoßen, was nicht zuletzt auch eine Voraussetzung für Energieeinsparungen ist. Durch die regionale bzw. lokale Vernetzung und regelmäßige Treffen werden zudem das Vertrauen und der Zusammenhalt gestärkt, was Entscheidungsfindungen vereinfacht.

Die bisherige Diskussion der Gestaltungselemente deutet darauf hin, dass ein zellulares System zu den gewünschten Fähigkeiten eines Resilienten Energiesystems, zu Widerstandsfähigkeit, Anpassungsfähigkeit, Innovationsfähigkeit und Improvisationsfähigkeit beizutragen vermag.

Ein großer Vorteil des zellularen Systems ist, dass es mit ihrer eher kleinteiligen Strukturierung eine kontinuierliche Transformation des Systems ermöglicht. Der individuelle Aufbau von Erzeugungsanlagen und Steuerungsinstrumenten könnte, falls eine zukünftige Regulierung dies zulässt, dazu führen, dass Strukturen wie in einer Graswurzelbewegung verändert werden und die Erzeugungsleistung, die von diesen Strukturen ausgeht, problemlos in die Netze integriert werden kann. In der VDE-Studie heißt es sinngemäß durch den offenen Ansatz gegenüber allen Energieträgern und den starken Fokus auf Umwandlungstechnologien ist die technische Umsetzung

unabhängig von den genutzten Energieträgern Diese hohe Flexibilität gegenüber vielen Veränderungen auf mehreren Ebenen, sowohl technischer als auch ökonomischer oder regulatorischer Art, macht diesen Ansatz besonders attraktiv (VDE ETG 2015, S. 61).

Den beschriebenen Vorteilen, vor allem auch auf gesellschaftlicher Ebene, steht eine mögliche Erhöhung der Komplexität auf der Steuerungsebene, sowie eine Erhöhung der Angreifbarkeit und der Vulnerabilitäten aufgrund eines höheren Vernetzungsgrads im Zuge einer umfassenden Installation von IKT gegenüber. Das zellulare System gibt zunächst keine Hinweise darauf wie der Ausgleich von Angebot und Nachfrage genau zu erfolgen hat. Damit dieser Ausgleich reibungslos erfolgt, werden zusätzliche Kommunikationsinfrastrukturen und die Entwicklung von speziellen Ausgleichsmechanismen benötigt. Ideal wäre es einen Weg zu finden, der komplett auf intensive Kommunikation und hohen Vernetzungsgrad verzichtet, also bei dem eine Größe, wie derzeit die Frequenz, über den Zustand des Netzes informiert. Eine wachsende Anzahl an Einspeisern führt zu einer Komplexitätserhöhung. Diese könnte in gewissem Maße durch eine Verkleinerung der Zellen, gemäß der Regel: „Teile und Herrsche“, bewältigt werden. Auf der anderen Seite steigen die Schwierigkeiten die Frequenz gleichmäßig und stabil zu halten mit der Verkleinerung des Gebietes und der Anzahl der Anschlussteilnehmer.

Zu den Schwächen einer regionalen zellularen Strukturierung des Energiesystems gehört zudem, dass energiearme Regionen, die sich nicht selbst versorgen können, benachteiligt werden. Wege auf denen Solidarität im System gewährleistet werden kann, müssen gefunden werden. Aufbauend auf einer regionalen Zelle muss es auch eine Instanz geben, die im Sinne des Subsidiaritätsprinzips Verantwortung für das Gesamtsystem übernimmt. Diese Instanz muss auch in die Entwicklung und Umsetzung der Rahmenbedingungen eingebunden werden. Zu guter Letzt dürften regionale Zellen, trotz des dezentralen und verteilten Charakters aufgrund der geringen Anzahl der in der Zelle agierenden Akteure dazu führen, dass der Wettbewerb geschwächt wird und sogar Monopolstellungen aufgebaut werden.

Und zu guter Letzt dürfte sich in kleinräumigen Zellen der Konflikt zwischen Resilienz und Effizienz, der bereits bei den Ausführungen zum Leitkonzept ‚Resilientes Energiesystem‘ angesprochen wurde, enorm verschärfen. Je kleiner die Zelle, desto größer der innerhalb der Zelle zu leistende Aufwand für Redundanz und Diversität.

Es dürfte als deutlich geworden sein, dass wir uns in RESYSTRA zwar auf regionale Zellen in den beiden Fallbeispielen konzentrieren, dass uns die damit verbundenen Probleme und Tradeoffs aber sehr wohl bekannt sind. Es bleibt weiteren Forschungen vorbehalten, Ansätze zu einer angemessenen funktionalen Dimensionierung von Zellen zu erarbeiten.

3.5 Annäherung an das Gestaltungsleitbild Resilientes Energiesystem über das Konzept des zellularen Systems mit subsidiärer Regelung

In diesem Kapitel wird ausgehend von der nationalen Ebene ein Gestaltungsleitbild für ein resilientes Energiesystem beschrieben, welches sich vom Leitkonzept dess ‚zellularen Systems' ableitet. Wie bei der Beschreibung der allgemeinen Vorgehensweise schon erwähnt besteht die zu lösende Aufgabe bei der Erstellung eines entsprechenden Gestaltungsleitbildes in einem Abgleich zwischen dem allgemeinen Leitkonzept, welches sich auf abstrakterer Ebene auf Energiesysteme im Sinne einer ‚Planung auf der grünen Wiese' bezieht, und den realen vorfindbaren (und ggf. nicht ohne Weiteres veränderbaren) örtlichen Gegebenheiten bzw. schon existierenden Systemkonfigurationen. Als Grundlagen dienen uns deshalb einerseits sozusagen ‚top down' die Gestaltungselemente Resilienter Energiesysteme und andererseits eine Analyse des vorfindbaren nationalen Energiesystems der Bundesrepublik Deutschland einschließlich einiger aktuell diskutierter Ausbaupläne. Abschließend wird noch ein Blick auf die regionale Ebene geworfen.

3.5.1 Ein möglicher Ansatz für die zellulare Strukturierung der Energieversorgung in Deutschland

Der folgende Abschnitt beschreibt qualitativ wie ein zellulares Energiesystem in Deutschland aussehen könnte und welche Aspekte besonderer Berücksichtigung bedürfen. Hierzu wird auf der allgemeinen Beschreibung der zellularen Struktur im vorigen Kapitel aufgebaut. Dort wurde davon ausgegangen, dass sich die gewünschte Struktur aus mannigfaltig vielen Zellen unterschiedlicher Größe zusammensetzt. Die Größe der regionalen Zellen hat sich wie erwähnt bei den beiden im Projekt untersuchten Fallstudien an den Verwaltungsgrenzen orientiert. Ein Ergebnis der Fallstudien, sei hier schon vorweggenommen, nämlich, dass die Orientierung an administrativen Grenzen die Zuordnung von Verantwortlichkeiten und dadurch die Umsetzung von Maßnahmen erleichtert. Unsere regionalen Gestaltungsleitbilder in Osterholz und Wolfhagen lokalisieren die kleinsten Zellen auf der untersten Ebene der Gemeinden und Städte. Die Grenzen der Zellen auf der nächsthöhere Ebene, die sich aus den unteren Zellen zusammensetzen, orientieren sich an Landkreisen. Landkreise zusammengefasst bilden Landeszellen. Großstädte und die energieintensiven Industriebetriebe, die in den Landeszellen enthalten sind, können sich aufgrund ihres hohen Energieverbrauchs nicht vollständig durch Energie aus den breit zerstreuten und große Flächen einnehmenden Erneuerbaren Quellen versorgen. Dementsprechend bedarf es eines Ausgleiches zwischen den verschiedenen Zell-Typen. Gemeint ist damit, dass Zellen, mit geringeren Erzeugungspotentialen von den Zellen mitversorgt werden müssen, denen eine hohe Erzeugung gelingt. Ein kooperierendes Verhalten muss gegenüber einer Abschottung, bei der nur an eine Eigenversorgung und einen Ausgleich in eigenen Gebiet gedacht wird, den Vorzug erhalten. Für den horizontalen und vertikalen Ausgleich zwischen den Zellen bedarf es einer über-

geordneten Instanz. Der hierfür nötigen Ausgestaltung der IKT-Infrastruktur muss große Aufmerksamkeit gewidmet werden, da es verschiedene Möglichkeiten gibt, Informationen zwischen Zellen und den Ebenen des zellularen Systems zu übermitteln. So ist es denkbar einen übergeordneten zentralen Markt zu etablieren, der sich aber leicht durch Attacken stören ließe. Eine wesentlich sicherere Art der Kommunikation, könnte in einem peer-to-peer basierter Ansatz bestehen, wie er aus der Netzwerktechnik bekannt ist (Schollmeier 2002). Für einen energetischen Ausgleich müsste ggf. jeder mit jedem kommunizieren können. Eine Kommunikation auf Zellebene ist in dieser Form vorstellbar. Für eine übergeordnete Kommunikation jedoch erscheint aufgrund des Aufwandes und der durch die vielen Teilnehmer erzwungenen langen Laufzeiten, dieser Ansatz nicht zielführend, auch wenn eine zentrale Steuerung bei den derzeit umgesetzten Microgrids dominiert. Wir präferieren eine subsidiäre Regelung mit verteilten Steuer und Regelinstanzen in den Zellen. Diese ermöglicht zum einen die Priorisierung des Ausgleichs auf den unteren Ebenen und ermöglicht zum anderen den Verzicht auf eine zentrale Regelung in den einzelnen Zellen. Die Regelung muss so konzipiert werden, dass sie die Bereithaltung aller möglichen Arten von Systemdienstleistungen unterstützt. In jeder Zelle wird es neben Regel- und Steuerungsinstanzen, Erzeugungsanlagen, Wandlern zwischen verschiedenen Energieträgern auch Verbraucher, Infrastruktur zum Verteilen der Energie und Speicher geben. Die Speicher sollen so dimensioniert werden, dass sie die Überbrückung auch langer „Dunkelflaute-Zeit“ ermöglichen. In dieser Zeit wäre der komplette Energiebedarf aus Biomasse, solarer und Erd-Wärme und Wasserkraft sowie aus gespeicherter Energie, insb. in Form von Wasserstoff, synthetischem Gas und synthetischem Treibstoff zu decken. Soll dies ohne fossile Energien und Energieimporte möglich sein, werden je nach Szenario entsprechend große Speicher benötigt. Zudem wird ein als konventionelles Erzeugungsportfolio angesehener Kraftwerkspark mit Gasturbinen, BHKWs und Öl-Kraftwerken, welche mit flüssigen und gasförmigen Kraftstoffen befeuert werden können, benötigt, damit Lastspitzen und Verbrauchsmengen in der Dunkelflaute-Zeit erzeugt werden können. Der Betrieb dieser Erzeuger soll mit den gespeicherten erneuerbaren Kraftstoffen (Power-to-Gas und Power-to-Fuel) erfolgen. Es wird also neben einem massiven Ausbau von Speichern auch eine beträchtliche Menge zusätzlicher konventioneller Wandlungseinheiten (Gasturbinen, BHKWs) aber auch Brennstoffzellen benötigt, die nah an den Verbrauchern in den jeweiligen Zellen zu installieren sind. Dies wird zwangsläufig dazu führen, dass Doppelstrukturen geschaffen werden, was zwar zur Resilienz beiträgt aber die Effizienz mindert. Des Weiteren wird Regeltechnik benötigt, die sowohl mit einer eher dezentralen fluktuierenden Erzeugung als auch mit einer über rotierende Massen eher konstanten Erzeugung zurechtkommt. Asynchrone Erzeugungseinheiten (Erneuerbare Energien) werden meist über Leistungselektronik (Wechselrichter) ans Netz angeschlossen und bieten nach bisheriger Bauart wenig oder gar keine implizite Frequenzstabilisierung. Dies wird zu ändern sein, denn auch auf Erneuerbaren Energien basierende Anlagen sind in der Lage

mit hierfür programmierten Wechselrichtern Systemdienstleistungen zu erbringen. Synchronmaschinen (Generatoren/rotierende Massen) haben aufgrund ihrer Trägheit eine natürlich „dämpfende“/ stabilisierende Wirkung auf das System. Sie nehmen bauartbedingt eine geringere Leistung auf, wenn die Netzfrequenz absinkt, oder eine höhere Leistung, wenn sie ansteigt. Die dargestellten Doppelstrukturen stellen allerdings nur bei ausreichender Erzeugung aus erneuerbaren Energien Redundanzen dar, in den übrigen Zeiten sind die aus Speichern gespeisten Erzeuger für die Versorgung notwendig. Diese Redundanzen führen also nur begrenzt zu einer Resilienzerhöhung des Systems, ggf. müssen zusätzliche Kapazitäten geschaffen werden.

Der Blick war bisher auf das elektrische System gerichtet. Eng mit diesem verknüpft ist die Wärmeversorgung, die zukünftig zu einem großen Teil über strombasierte bzw. stromgestützte Umwandler erzeugt werden könnte. Dies würde aber zu einer starren Kopplung und einer enormen Abhängigkeit von den Stromnetzen führen. Nicht allein deshalb stellt die Wärmeversorgung eine große Herausforderung dar. Zwar gibt es technische Lösungen wie bivalente Wärmepumpen, die die lokale Wärmeversorgung sowohl mit Strom als auch mit Gas ermöglichen, was zu einer Diversifizierung der Primärenergieträger führt und Redundanzen schafft. Dieser eher dezentrale Ansatz ist jedoch bisher mit den bestehenden Nah- und Fernwärmenetzen und der Heizungsinfrastruktur, die auf hohe Vorlauftemperaturen angewiesen ist, nicht kompatibel. Des Weiteren stellt sich die Frage wie die Betriebsführung von BHKWs zukünftig gestaltet werden soll – strom- oder wärmegeführt. Unter Einbeziehung von Wärmespeichern sollte in der Heizperiode und den Übergangsjahreszeiten eine Flexibilisierung möglich sein, die einen stromgeführten Betrieb zulässt. Die Verbraucher und die Förderpolitik verhalten sich immer noch so, als ob die Kraftstoffe für die Verbrennung in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen zur gleichzeitigen Strom und Wärmeerzeugung zukünftig weiterhin günstig zur Verfügung stünden. Da die biogenen Ressourcen deutlich begrenzt sind, werden in Zukunft diese Kraftstoffe allerdings im großen Stil strombasiert hergestellt werden müssen. Dies ist verglichen mit dem Einsatz des Stromes in Wärmepumpen oder sogar nur in Heizstäben, sehr viel ineffizienter ist und damit teurer (Quaschning 2016d). Zudem werden die verfügbaren Mengen an Treibstoffen im Verkehrssektor gebraucht. Der Anteil von Blockheizkraftwerken an der Wärmeversorgung wird also vermutlich nicht steigen. Bei der zukünftigen Planung und dem Bau von Wärmeversorgungssystemen sollte zukünftig verstärkt auf die dargestellten Zusammenhänge geachtet werden. Nicht mehr ohne weiteres verändern lässt sich die Abhängigkeit vieler bestehender Heizungssysteme und der zugehörigen Heizkörper von hohen Vorlauftemperaturen. Auch ein weiterer Ausbau der Fernwärmenetze würde vor allem Pfadabhängigkeiten verfestigen. Diese zu minimieren gehört zu den großen Herausforderungen der Wärmewende. Ein Weg, die bestehende Infrastruktur weiterhin zu nutzen, besteht darin Netze mit hoher Vorlauftemperatur in sogenannte kalte Nahwärmenetze, bzw. Niedertemperaturnahwärmenetze umzurüsten, die aus allen möglichen Quellen insb. Low-Exergie Quellen gespeist wer-

den können. Hierzu gehören neben Erdwärme und Solarthermie auch Prozessabwärme und Abwärme elektrischer Anlagen. Vor allem die Solarthermie wird derzeit aus Effizienzgesichtspunkten eher stiefmütterlich behandelt. Diese Wärmequelle stellt aber nicht nur aus Material- und Umweltaspekten die CO_2freundlichste Wärmeerzeugungsquelle dar, sondern liefert auch einen Beitrag zur Diversifizierung. Da jedoch die Erzeugungssaison und die Nachfragesaison auseinander fallen, werden Speicher benötigt. Als saisonale Speicher für Wärme eignen sich Aquiferspeicher. Kurzfristig kann auch in Gebäuden Energie in signifikantem Ausmaß gespeichert werden, indem die Temperatur flächendeckend geringfügig angehoben oder abgesenkt wird. Insofern empfiehlt sich eine Kombination mit Solarthermie, Photovoltaik und Erdwärme (Wärmepumpe). Am resilientesten wäre es jedoch über Dämm- und Wärmerückgewinnungsmaßnahmen (Luft und Wasser) den eigenen Wärmeenergiebedarf drastisch zu reduzieren, wie es in Plusenergiehäusern derzeit schon der Fall ist, so dass die Wärmestrahlung elektronischer Geräte und die körpereigene Wärmeabstrahlung ausreichen für ein für den Menschen akzeptables Temperaturniveau bei gleichzeitigen niedrigen Betriebskosten.

Vermutlich die größte Herausforderung geht vom Mobilitätsbereich aus. Das liegt unter anderem darin, dass selbst im Bereich des Individualverkehrs (Autos) die erkennbaren Alternativen für den Verbraucher stark eingeschränkt sind. Eine schnelle Fortbewegung benötigt besonders viel Energie und die Macht der Gewohnheit steht vor allem bei der individuellen Fortbewegung mit Kraftfahrzeugen Veränderungen im Weg. Aber auch Investitionsentscheidungen können eine Veränderung behindern. Im Flugverkehr sind die Pfadabhängigkeiten zwar fast noch größer als im Wärmesektor, da es bisher an Alternativen zu bisherigen Antriebssystemen und Treibstoffen fehlt. Der Umgang mit ihnen gestaltet sich aber möglicherweise anders. Dies liegt daran, dass es sich um wenige Akteure handelt, mit denen es denkbar wäre, ähnlich wie beim Atomausstieg, eine Vereinbarung für die zügige Umstellung der Flotten zu vereinbaren, sobald technologische Alternativen in Sicht sind. Da auch bei einer schnellen Zertifizierung von neuen Fluggeräten, mindestens für die bestehenden Flotten und die Fluggeräte in den kommenden Jahrzehnten eine Lösung basierend auf CO_2 neutralen Kraftstoffen benötigt wird. Dies gilt auch für den Schiffs- und Schwerlastverkehr. Auch diese Flotten werden – um die Klimaschutzziele einzuhalten - bis 2050 CO_2neutral betrieben werden müssen. Lösungsansätze liegen nicht nur in neuen Antriebskonzepten, sondern auch in einer Veränderung des Mobilitätsverhaltens hin zur Intermodalität oder zu einer stark eingeschränkten Mobilität. Einen Lösungsbeitrag für vorerst nicht elektrifizierbare Bereiche werden synthetische Kraftstoffe erbringen. Die Elektromobilität im motorisierten Individualverkehr, die als flexibler Verbraucher (Ladeverhalten) und in Form von beweglichen Speichern (Batterien) Vorteile aufweist, wird im Vergleich zum derzeit Kraftstoff-dominierten Mobilitätssektor, zu einer Diversifizierung der Energiequellen für den Verkehr führen. Was auch als ein

Beitrag zur Resilienzsteigerung interpretiert werden kann. Grundsätzlich wird sich aber Intermodalität als Leitbild etablieren müssen, um absolute Energieeinsparungen in diesem Bereich zu erzielen. Dies wird dazu führen, dass zur Bewältigung einer Strecke nicht mehr nur auf das Verkehrsmittel bezogen gedacht wird, sondern Komfort, Energie und der Zeitfaktor angemessen berücksichtigt werden. Also statt auf einen Fahrzeugtyp, z.B. Auto, bezogen zu denken, sollte selbstverständlich die Kombination aller zur Verfügung stehender Fortbewegungsmittel gegeneinander abgewogen werden. Dies könnte z.B. über geeignete Apps dem Nutzer in Bezug auf seine Bewertungskriterien als optimale Kombination an Fortbewegungsmittel angezeigt und empfohlen werden.

3.5.2 Der Aufbau regionaler Zellen als Gestaltungsleitbild des zellularen Systems

Die Gestaltung eines zellularen Energiesystems mit subsidiärer Regelung kommt einen ‚Resilienten Energiesystem' schon recht nahe. In den einzelnen Zellen werden die Sektoren und ihre Netze lose gekoppelt, sodass die Flexibilität der einzelnen Erzeuger steigt. Es wird auf diverse Erzeugungsquellen zurückgegriffen und sowohl bestehende Wärmekonzepte wie auch innovative Low-Exergie Lösungen integriert. Von uns für die Fallstudien durchgeführte Modellsimulationen konnten zeigen, dass in diesen Regionen umsetzbare Speicherkonzepte ausreichen würden, um Dunkelflautezeiten von bis zu 5 Tagen zu überbrücken. Wenn im Ernstfall der Bedarf auf das Allernötigste reduziert werden kann, ließen sich auch 14 Tage überstehen. Auf jeden Fall werden Investitionen in Vorsorgemaßnahmen und unverplante Ressourcen sowie Task-Forces benötigt. Neben der absoluten Reduzierung der Nachfrage ist auch eine Strategie denkbar, bei der die Versorgung nach unterschiedlichen Qualitätsniveaus erfolgt und z.B. für bestimmte Verbraucher definierte Systemleistungen (mit besonderer Vergütung) bevorzugt gewährleistet oder eben im Ernstfall auch reduziert werden. So könnte die Einführung von Stromsicherheitstarifen bestimmten industriellen Abnehmern eine höhere Versorgungssicherheit garantieren oder die Versorgung dort gewährleistet werden, wo sie am Nötigsten ist (z.B. für kritische Infrastrukturen). Förderlich hierfür wären auch Marktstrukturen, die sich an den Zellen orientieren. So könnte, z.B. eine Differenzierung der Netzentgelte nach dem Kriterium ‚innerhalb der Zelle' oder ‚über die Grenzen der Zelle hinaus' einen regionalen Ausgleich zwischen Erzeugung und Verbrauch stärken.

Wie bereits bei der Darstellung des Leitkonzeptes Resilientes Energiesystem und des Gestaltungsleitbildes skizziert, erfolgt die Bestimmung, inwieweit ein System resilient ist, mit Blick auf seine Fähigkeiten und die Systemarchitektur, also die Resilienz steigernden Gestaltungselemente. Grundlage für die Ermittlung dieser Elemente waren top down die Evolutions- und Ökosystemtheorie sowie bottom up Erfahrungen aus dem Risikomanagement in kritischen Infrastrukturen. Hinzu kommen die Ergebnisse der Vulnerabilitätsanalysen in den Fallbeispielen.

Klassifiziert man Zellen nach ihrer geographischen Ebene, so beschreiben regionale Zellen das Energiesystem einer Region, bspw. eines Landkreises oder einer Stadt. Der Aufbau einer solchen regionalen Zelle ist in Abbildung 3.9 dargestellt. Wesentliche Unterscheidungsmerkmale zum bestehenden Energiesystem sind auf den unterschiedlichen Stufen aktive Netztrennschalter sowie das Vorhandensein bzw. die Einrichtung von Steuer- und Regelmechanismen, welche die Systemdienstleistungen, wie z.B. Regelenergie zur Leistungs-Frequenzregelung und Blindleistungs-Spannungsregelung, zur Verfügung stellen. Bei der Leistungsfrequenzregelung gibt es unterschiedliche Stufen. Anstelle der Trägheit der rotierenden Massen, die im bisherigen System in den ersten Sekunden die Frequenz stabil halten, könnte in den Zellen eine Lösung über Zwischenkreiskondensatoren oder den Bau von virtuellen Massen über Wechselrichter erfolgen (Waffenschmidt 2015). Andererseits gibt es bereits Lösungen, die zeigen, dass das Nutzen von Wechselrichtern und die Regelung über Batteriespeicher schneller und genauer ist, als das Nutzen von rotierenden Massen thermischer Kraftwerke (Struck und Broichmann 2015). Zur Erfassung des Netzzustandes werden auch auf der niedrigsten Ebene Messeinrichtungen installiert. Dabei zeigt die Praxis von Energieversorgungsunternehmen, dass deutlich weniger Messpunkte benötigt werden als ursprünglich vermutet (Rindt 2015). Puffer und Speicher wie Batterien oder synthetische Gasspeicher werden als Reserve für Regelenergie vorgehalten. Für die Flexibilisierung der Verbraucher und Schaltung von Lasten ist ein Kommunikationsnetz nötig. Dies gilt auch für eine verteilte Regelung und Steuerung. Damit die Resilienz erhöhenden Aspekte zum Tragen kommen, sollte das Kommunikationsnetz so ausgelegt sein, dass der Betrieb unabhängig vom Stromnetz erfolgen kann. Zudem sollte das Stromnetz über die verteilte Regelung und Steuerung zeitweise unabhängig vom Kommunikationsnetz betrieben werden können. Des Weiteren ist die Kommunikationsinfrastruktur möglichst unabhängig von systemübergreifenden Strukturen und öffentlichen Netzwerken, wie bspw. dem Internet, zu gestalten. Bei den verschiedenen Abnehmern, bspw. Haushalte, die teilweise Gleichstrom-Systeme installiert haben, Gewerbebetrieben, öffentliche Gebäuden und landwirtschaftliche Betrieben wären Automatisierungsschnittstellen einzurichten. Große Teile von dem gerade Geschildertem werden beim Smart Meter Gateway Rollout umgesetzt, wobei auch dann nicht alle nötigen Funktionalitäten, um einen Betrieb in der Zelle zu ermöglichen, verfügbar sein werden (Patzack et al. 2016).

Für die Umsetzung der Zelle müssen auch zwischen den unterschiedlichen Spannungsebenen, z.B. Mittelspannungs-/Hochspannungsebene sowie Mittelspannungs-/Niederspannungsebene Leistungsschalter installiert werden, um die Schwankungen bei einer Netzabtrennung auffangen, bzw. Gebiete vor starken Schwankungen schützen zu können. Für die Kopplung der Sektoren Wärme- und Kraftstoffversorgung mit dem Stromnetz werden verschiedene Stromwandler benötigt. In der Abbildung sind stellvertretend für die verschiedenen Technologien eine Wärmepumpe sowie ein Elektrolyseur eingezeichnet. Die Kopplung mit dem Gasnetz ist schematisch darge-

stellt. Der Betrieb des Gasnetzes wird möglicherweise durch hohe Anteile Erneuerbarer Stromerzeuger und die Erzeugung der Wärmeleistung durch Wärmepumpen aus ökonomischer Sicht in Frage gestellt. Auf der anderen Seite bietet ein zweites Netz eine gewisse Redundanz, was die Versorgung mit Primärenergie betrifft.

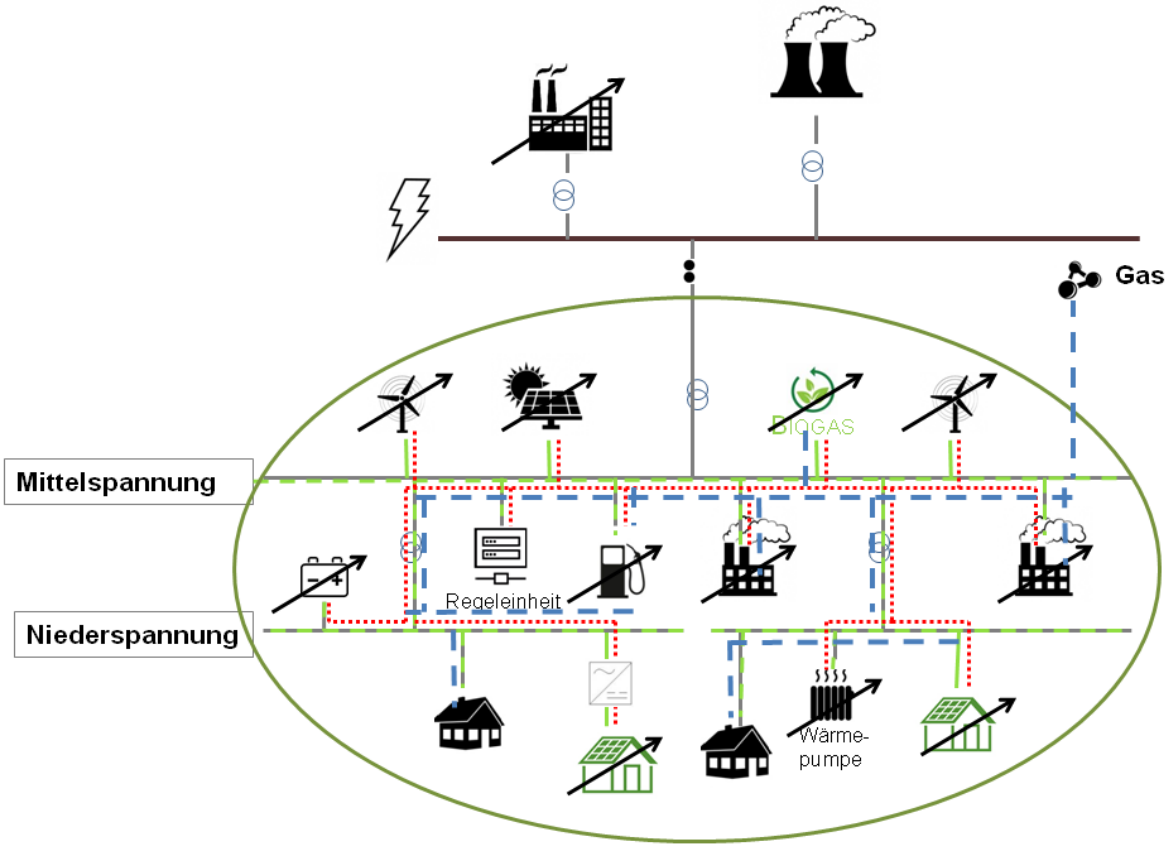


Abbildung 3.9: Aufbau und Komponenten einer regionalen Zelle mit Schwerpunkt Stromversorgung und Wandler zur Kopplung mit den Sektoren Wärme und Kraftstoffe. (Eigene Darstellung , Icons: all-free-download.com)

Für den Aufbau regionaler Zellen existiert also eine Vielzahl technischer Lösungen, so dass eine Umsetzung schon aus heutiger Sicht möglich ist. Allein an einer Kompatibilität und Standarisierung der verschiedenen Protokolle, Schnittstellen und Bauteile mangelt es derzeit noch. Hier sollten rechtzeitig Schritte unternommen werden, damit der Transformationsprozess nicht behindert wird, da die Betriebs- und Laufzeiten bei Infrastrukturen sehr lang sind und sich Änderungen deshalb nur sehr langsam implementieren lassen.

Die genaue Auslegung einer Zelle wurde für eine Fallstudie modelliert und ist in Kapitel 6.2.6 dargestellt.

3.6 Literatur Kapitel 3

Agentur für Erneuerbare Energien (Hrsg.). (Juli 2015). *Metaanalyse: Energiewende im Wärmesektorin Deutschland. Forschungsradar Energiewende*. www.forschungsradar.de.

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, B. (2016a). Bruttostromerzeugung nach Energieträgern. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/stromerzeugung-nach-energietraegern.pdf?_blob=publicationFile&v=3. Zugegriffen 16.05.2017.

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, B. (BDEW, Hrsg.). (07/2016b). Endenergieverbrauch 2015 nach Sektoren und Energieträgern. Auswertungstabellen zur Energiebilanz 1990 bis 2015. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/4_abb_eev-sektoren-et_2017-02-17.pdf.

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AG Energiebilanzen e.V. (AGEB), Hrsg.). (2015). Energieflussbild 2015 für die Bundesrepublik Deutschland in Mio. t SKE. http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ageb_energieflussbild-kurz_de-2015-ske_20160811.pdf.

Brandt, T., Breisig, V., Claudy, P., Kohlmorgen, P., Lehmann, S., Teichmann, G., Zein, M. & Zwick, J. (2015). *Energiewende-Outlook: Kurzstudie Verkehr. Eine Untersuchung verschiedener Strategien zur Sicherstellung einer erfolgreichen Energiewende im Verkehrbereich* (PwC, Hrsg.). www.pwc.de/energiewende.

Brauns, S., Jansen, M., Jost, D., Siefert, M., Speckmann, M. & Widdel, M. (März 2014). *Regelenergie durch Windkraftanlagen. Abschlussbericht* (Fraunhofer IWES, Hrsg.), Kassel.

Breisig, V., Claudy, P., Kohlmorgen, P., Tillner, S., Uhr, P. & Zein, M. (2015). *Energiewende-Outlook: Kurzstudie Wärme. Eine Untersuchung verschiedener Strategien auf Sicherstellung einer erfolgreichen Energiewende im Wärmebereich* (PwC, Hrsg.). www.pwc.de/energiewende.

Breyer, C., Müller, B., Möller, C., Gaudchau, E., Schneider, L., Gajkowski, K. & Resch, Matthias, Pleßmann, Guido. (2013, 21. Oktober). *Vergleich und Optimierung von zentral und dezentral orientierten Ausbaupfaden zu einer Stromversorgung aus erneuerbaren Energien in Deutschland* (Haleakala-Stiftung, 100 prozent erneuerbare stifung & BVMW, Hrsg.). Berlin: Reiner Lemoine Institut.

Bundesnetzagentur. (2011). "Smart Grid" und "Smart Market". Eckpunktpapier der Bundesnetzagentur zu den Aspekten des sich verändernden Energieversorgungssystems, 34. https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/NetzzugangUndMesswesen/SmartGridEckpunktepapier/SmartGridPapierpdf.pdf?__blob=publicationFile. Zugegriffen 17.05.2017.

DF5GO. (2013, 08. August). Schema des Einsatzes der Unterschiedlichen Regelleistungsarten zur Stabilisierung der Stromversorgung. https://de.wikipedia.org/wiki/Regelleistung_(Stromnetz).

Energieagentur NRW. (2015, 11. November). Netzebenen in Deutschland. http://www.energieagentur.nrw/content/Netze_und_Speicher/thumbs/947_a1_G_146_Netzebenen-1447232778.jpg. Zugegriffen 16.05.2017.

Falliere, N., O Murchu, L. & Chien, E. (Symantec Corporation, Hrsg.). (2011). W32.Stuxnet Dossier. Version 1.4. http://nsarchive.gwu.edu/NSAEBB/NSAEBB424/docs/Cyber-044.pdf. Zugegriffen 15.05.2017.

Gebauer, K. & Wörlen, C. (2017, 10. März). *Kurzanalyse der nationalen Treibhausgasemissionen für das Jahr 2016. Kurzstudie für die Bundestagsfraktion Bündnis 90/Die Grünen* (Arepo Consult, Hrsg.), Berlin.

Gleich, A. von, Gößling-Reisemann, S., Stührmann, S. & Woizeschke, P. (2010) Resilienz als Leitkonzept – Vulnerabilität als analytische Kategorie. In K. Fichter, A. von Gleich, R. Pfriem

& B. Siebenhüner (Hrsg.), *Theoretische Grundlagen für Klimaanpassungsstrategien* (S. 13–49). Bremen/Oldenburg.

Gößling-Reisemann, S., Stührmann, S., Wachsmuth, J. & Gleich, A. von. (2013). Vulnerabilität und Resilienz von Energiesystemen. In J. Radtke & B. Henning (Hrsg.), *Die deutsche "Energiewende" nach Fukushima. Der wissenschaftliche Diskurs zwischen Atomausstieg und Wachstumsdebatte* (Beiträge zur sozialwissenschaftlichen Nachhaltigkeitsforschung, Bd. 8, S. 367–396). Weimar (Lahn): Metropolis.

Grünwald, R. (2014). *Moderne Stromnetze als Schlüsselelement einer nachhaltigen Energieversorgung. Endbericht zum TA-Projekt*. TAB-Arbeitsbericht (Nr. 162). https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab162.pdf. Zugegriffen 11.05.2017.

Kießling, A. (2013, 01. Juli). *E-Energy. IKT-basiertes Energiesystem der Zukunft*. Beiträge von moma zur Transformation des Energiesystems für Nachhaltigkeit, Beteiligung, Regionalität und Verbundenheit.

Patzack, S., Hoven, M. & Vennegeerts, H. (Februar 2016). *Metastudie smart grid. Forschungsüberblick Intelligente Stromnetze* (BDEW & FGH, Hrsg.), Aachen.

Peter, S. (September 2013). *Modellierung einer vollständig auf erneuerbaren Energien basierenden Stromerzeugung im Jahr 2050 in autarken, dezentralen Strukturen* (Umweltbundesamt, Hrsg.) (Climate Change Nr. 14), Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/climate_change_14_2013_modellierung_einer_vollstaendig_auf_erneuerbaren_energien.pdf.

Quaschning, V. (2016, 20. Juni). *Sektorkopplung durch die Energiewende. Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zum Erreichen der Pariser Klimaschutzziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung* (Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin, Hrsg.). : Ingenieurwissenschaften Energie und Information. http://pvspeicher.htw-berlin.de/.

Quitzow, R., Röhrkasten, S., Jacobs, D., Bayer, B., Jamea, E. M., Waweru, Y. & Matschoss, P. (2016). *Die Zukunft der Energieversorgung in Afrika. Potenzialabschätzung und Entwicklungsmöglichkeiten der erneuerbaren Energien* (IASS Potsdam, Hrsg.).

Rindt, B. (2015, November). *Energiewende im Griff. "Erfahrungen aus Forschungsprojekten verändern die Verteilnetze"*.

Schollmeier, R. (2002). A definition of peer-to-peer networking for the classification of peer-to-peer architectures and applications. In N. Shahmehri & R. L. Graham (Hrsg.), *Proceedings, First International Conference on Peer-to-Peer Computing. 27-29 August 2001, Linköping, Sweden* (S. 101–102). Los Alamitos, Calif: IEEE Computer Society.

Schuh, R. & Lunze, J. (2015). Design of the communication structure of a self-organizing networked controller for heterogeneous agents. In *2015 European Control Conference (ECC). 15-17 July 2015, Linz* (S. 2194–2201). Piscataway, NJ: IEEE.

Smart Grids-Plattform Baden-Württemberg e.V., Hrsg.. Projekt C/sells. http://www.csells.net/.

Struck, T. & Broichmann (2015), J. *Batteriespeicherprojekte der WEMAG AG*. www.reevolt.de.

Übertragungsnetzbetreiber. (2016, 30. Juni). *Genehmigung des Szenariorahmens für die Netzentwicklungspläne Strom 2017-2030*. https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/szenariorahmen_2030_genehmigung.pdf.

Umweltbundesamt (Hrsg.). (2012). *Daten zum Verkehr. Ausgabe 2012*. Ratgeber.

VDE. (2015). *Störungsstatistik 2014: Durchschnittliche Dauer von Stromausfällen pro Kunde und Jahr erstmals unter 12 Minuten*. www.vde.com/de/presse/pressemitteilungen/63-15.

VDE ETG (Hrsg.). (2015). *The cellular approach. The basis of successful, cross-regional energy transition*. VDE-Study.

Waffenschmidt, E. (2015, November). *Zellulare Netze mit dezentralen Erneuerbaren Energien*.

Wolff, D. & Jagnow, K. (2011, 15. Mai). *Überlegung zu Einsatzgrenzen und zur Gestaltung einer zukünftigen Fern- und Nahwärmeversorgung. Untersuchung von Nah- und Fernwärmenetzen*, Wolfenbüttel/Braunschweig. r www.delta-q.de.

Wurster, R., Weindorf, W., Zittel, W., Schmidt, P., Heidt, C., Lambrecht, U., Lischke, A. & Müller, S. (2014, 17. Oktober). *LNG als Alternativkraftstoff für den Antrieb von Schiffen und schweren Nutzfahrzeugen. Aktualisierung auf Verkehrsprognose 2030* (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Hrsg.), München.

Zhou, Y. & Ngai-Man Ho, C. (2016). A review on Microgrid architectures and control methods. In *2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia) took place 22-26 May 2016 in Hefei, P.R. China* (S. 3149–3156). Piscataway, NJ: IEEE.

4 Vorstellung des Schildkrötenmodells und des MLA und deren Integration

4.1 Theorien und Modelle der gerichteten Transformation bzw. der Systemischen Innovation

Die Bedeutung von Innovationen für gesellschaftliche Entwicklungen ist unbestritten. Insbesondere wird der Beitrag von Innovationen für die langfristige Entwicklung der Produktivität, Wettbewerbsfähigkeit und des ökonomischen Wachstums hervorgehoben. Dies bedeutet zugleich, dass Innovationen im Zentrum der Aufmerksamkeit von Politik und insbesondere der Wirtschaftspolitik stehen. Über lange Zeit herrschte ein lineares Verständnis von Innovationsprozessen vor. Eine Innovation ist im vorherrschenden Verständnis nicht schlicht etwas Neues, sondern eine gesellschaftlich erfolgreiche Neuerung. Eine neue Möglichkeit muss auch auf einen Bedarf, eine gesellschaftliche Nachfrage treffen. Im linearen Verständnis von Innovationsprozessen wird gerne mit der Abfolge Entdeckung, Erfindung, Innovation, Diffusion gearbeitet (Bluszcz 2010).

Der Fokus der Innovationsforschung hat sich im Zeitablauf verändert, ausgehend von der Vorstellung eines linearen Innovationsmodells hin zu einem systemischen Innovationsmodell. Diese Blickwende wird in der Folge kurz skizziert, gerade auch deshalb, weil sich daraus Fragen der Beeinflussbarkeit von Innovationen ergeben und sich die Rolle der beteiligten Akteure verändert. Anschließend wird ein Vergleich der Innovationssystemansätze MLP und des sogenannten „Schildkröten“-Modells vorgenommen. Diese beiden Modelle nehmen eine Entwicklung auf, bei der nicht mehr nur die Möglichkeiten zur Verbesserung der Fähigkeit zur Innovation, sondern auch die Möglichkeiten zur Beeinflussung der Innovationsrichtung im Fokus stehen.

4.1.1 Die Entwicklung der Innovationsmodelle

Die Relevanz von Innovationen für die wirtschaftliche Entwicklung wurde schon von Schumpeter systematisch erforscht (Schumpeter 2006). Schon sein Ausgangspunkt war ein lineares Modell der Innovation und die Beobachtung, dass, wenn Innovationen erfolgreich sind, der Diffusionsprozess in der Regel wie eine S-Kurve erfolgt (langsamer Beginn, steiler Anstieg, allmähliche Sättigung). Die zentralen Akteure für Innovationen sind dabei entweder der individuelle Unternehmer, der Ideen umsetzt, oder Großunternehmen, die in der Lage sind, die Kosten für Forschung und Entwicklung aufzubringen. Schumpeter selbst hat mit dem Innovationsprozess die Idee der ‚kreativen Zerstörung‘ als ‚für den Kapitalismus wesentliches Faktum‘ verbunden, die für die wirtschaftliche Entwicklung höchst relevant sei (Schumpeter 2005). Lange Zeit ging man von Forschung und Entwicklung als zentralem Treiber von Innovationen aus. Dieser „technology push“ ist heute nur noch ein Faktor unter mehreren im Schildkröten-Modell.

Dieses lineare Innovationsmodell wurde frühzeitig dahingehend kritisiert, dass damit wesentliche Faktoren für eine erfolgreiche Innovation nicht berücksichtigten werden, beispielsweise die Ver-

änderungen der ökonomischen Bedingungen, die Einfluss auf die Erträge aus Innovationen haben. Wesentlicher für die innovationstheoretischen Ansätze war allerdings die Erkenntnis, dass sich der Innovationsprozess bei weitem komplexer darstellt, als es das lineare Modell unterstellt. Es entstehen beispielsweise neue Ideen, diese werden aber durch vielfältige Feedbacks, Interaktionen und Netzwerke mit beeinflusst, sodass Innovationsprozesse mithin als iterative und rekursive Prozesse zu betrachten sind. In diesem Kontext wurde auch die Rolle der Nachfrage („demand-pull") betont, die ganz wesentlich zur Innovationsrichtung beitragen kann. Ab den 1970er Jahren hat sich das Verständnis des technologischen Wandels weiterentwickelt, in dem der Einfluss weiterer Faktoren in den Blick geraten ist. Ein Beispiel ist die Rolle induzierter Innovationen, wonach die Veränderung der relativen Preise die Innovationsrichtung beeinflusst. Ein weiterer neuer Faktor wurde durch evolutionäre Ansätze, die insbesondere auf die Existenz von Pfadabhängigkeiten verweisen, in den Blick genommen. Diese sagen aus, dass Entscheidungen in der Vergangenheit aktuelle Innovationen begrenzen können und so nicht nur die Innovationsfähigkeit, sondern auch die Innovationsrichtung beeinflussen (Arthur 1989; David 1995).

Mit den Ansätzen der evolutionären Ökonomie sind vor allem folgende Aspekte mit Blick auf die Innovationsprozesse einbezogen worden: „bounded rationality", Unsicherheit, „increasing returns on adoption" sowie Lernkurven (bspw. Dosi et al. 1990; Soete 1991). Mit der *bounded rationality* war eine Abkehr vom Konzept eines allwissenden rationalen Entscheiders verbunden, hin zu der Vorstellung, dass Entscheidungen nicht „optimal" getroffen werden, sondern letztlich allein „hinreichend" sein sollten („satisficing"). Der Ansatz weist des Weiteren darauf hin, dass Akteure, wie beispielsweise Unternehmen, in ihren Entscheidungsfindungen von ihren Erwartungen über die Zukunft geprägt sind. Diese Zukunftserwartungen und Leitbilder werden vielfach zwischen Unternehmen gleicher oder ähnlicher Branchen geteilt.[22]

Der Aspekt der *Unsicherheit* im Kontext der Innovationsmodelle bedeutet, dass der Inventions- und Innovationsprozess intrinsisch unsicher ist. Dies gilt insbesondere für frühe Phasen der Entwicklung. Es existiert eine Vielzahl von Handlungs- und Entwicklungsoptionen z.B. mit Blick auf eine neue Technologie, es ist aber unklar, inwieweit sie sich realisieren lassen. Dabei geht es nicht allein um die Technologie selbst, sondern gerade auch um das sozio-institutionelle Setting, auf das diese neue Technologie trifft (also Unsicherheit über die Anforderungen der Nutzer, die Marktnachfrage etc.). Zudem sind das bestehende regulatorische System und auch die vorhandenen Unterstützungsmechanismen meist auf die bestehenden Technologien bezogen. Dies führt letztlich zu einer systematischen Bevorzugung inkrementeller Innovation, womit wiederum ein deutlicher Bezug hergestellt werden kann zu der Idee der Pfadabhängigkeit bzw. des Lock-in.

[22] Dies verweist auf die im Folgenden dargestellte Rolle von Leitbildern und Zukunftserwartungen für Innovationen und den technologischen Fortschritt.

Das Konzept der increasing returns to adoption beinhaltet die Überlegung, dass je stärker eine Technologie von Nutzern angenommen wird, desto größer sind die Chancen, dass sie auch von anderen übernommen wird. Arthur (1994) hat dabei vier Arten von “increasing returns” benannt: “scale economy”, “learning effects”, “adaptative expectations” und “network economies”. Hier soll nur kurz auf die „adaptive expectations“ eingegangen werden, weil dabei deutlich wird, dass es für den Erfolg von Innovationen zentral auf die Erwartungen der Akteure ankommt. Die Herausbildung stabiler Erwartungen mindert die Unsicherheit und erhöht das Vertrauen sowohl der Nutzer als auch der Produzenten. Lernkurven (“learning by doing”, “learning by using”, “learning by interacting”) führen in der Regel dazu, dass eher inkrementelle Innovationen angestoßen werden. In den neueren Forschungen wird davon ausgegangen, dass radikale Innovationen sich überwiegend außerhalb des dominanten Regimes entwickeln, zudem wird eine weiter weitere Kategorie hinzugefügt: „learning by researching“.

Pfadabhängigkeiten

Arthur (1989) und David (1995) haben auf diesen Aspekt hingewiesen und gehen davon aus, dass aktuelle (Innovations-) Entscheidungen von Unternehmen oder Individuen durch bereits in der Vergangenheit getroffene Entscheidungen begrenzt werden. Dies kann auch dann der Fall sein, wenn die Gründe für die vergangenen Entscheidungen nicht mehr relevant sind. Es geht dabei nicht mehr allein um die Pfadabhängigkeit einer technologischen Entwicklung, vielmehr können die Pfadabhängigkeiten auch das institutionelle und mentale Umfeld betreffen.

Erwartungen spielen dabei sowohl bei den Unternehmen generell als auch den Unternehmen einer spezifischen Branche eine wichtige, vielfach sich selbst verstärkende, Rolle, die sich als selbst erfüllende Prophezeiungen erweisen können. Durch die Ko-Evolution von Technologien und Institutionen kann dieser Prozess kontinuierlich verstärkt werden und sich damit (neue) soziotechnische Regimes herausbilden.

Chain-Linked-Modell

Das Chain-Linked-Modell von Kline (1985) ist einer der ersten Versuche die systematischen Feedbacks innerhalb des Innovationsprozesses darzustellen. In diesem Modell werden die „feedback loops“ zwischen der Forschung, dem wissenschaftlichen und technologischen Wissen, den potentiellen Märkten, der Erfindung und den verschiedenen Schritten hin zum Produktionsprozess dargestellt. Anzumerken ist, dass das System eher eng definiert wird und ökonomische politische soziale oder kulturelle Aspekte nicht mit einbezogen werden.

4.1.2 Innovationssystemansätze

Der Fokus der Innovationsforschung verlagerte sich in der Folge zunehmend in Richtung Systembetrachtungen, indem der Analyserahmen des Innovationssystems entwickelt wurde. So dif-

ferenzierte beispielsweise das Oslo Manual (*OECD)* mit Blick auf das nationale Innovationssystem nach (i) den generellen Rahmenbedingungen, (ii) den zentralen Elementen der nationalen wissenschaftlichen und ingenieurswissenschaftlichen Grundlagen, (iii) den Transferfaktoren und (iv) den Innovationsdynamiken.

Es besteht die Vorstellung, dass zentrale institutionelle Treiber des Innovationsprozesses vor allem auf der nationalen Ebene zu finden sind. Definiert wird das *Nationale Innovationssystem* (NIS) als ein Netzwerk von Institutionen im öffentlichen und privaten Sektor, dessen Aktivitäten und Interaktionen neue Technologien initiieren, verändern und diffundieren. Dabei wird insbesondere auf die wichtige Rolle des Staates mit Blick auf die Ermöglichung von Kooperation zwischen Industrie und wissenschaftlichen Einrichtungen fokussiert.

Lundvall (2010) – und ähnlich Freeman (1995) – als Vertreter des NIS, fokussierte vor allem auf die Interaktion zwischen Nutzern und Produzenten und verwies darauf, dass es erforderlich sei, Information und Wissen zwischen den technologischen „capabilities“ und den „user needs“ herzustellen. Dabei hebt er insbesondere darauf ab, dass es um weit mehr als den Marktmechanismus geht, sondern bspw. auch gegenseitiges Vertrauen durch diese Interaktionen hergestellt wird.

4.1.2.1 Systemische Perspektive auf Innovationen.

Diese Innovationssystemansätze betonen vor allem die Rolle multipler Agency und verteilter Mechanismen des Lernens im technologischen Wandel. Es wird abgegangen von der Idee bidirektionaler Wissensflüsse, vielmehr geht es um organisationale Netzwerke und Feedbacks. Vor allem die Rolle der Institutionen auf allen Ebenen, die die Spielregeln aufstellen, deren Einhaltung und Weiterentwicklung unterstützen, ist ein zentrales Thema, da diese Institutionen Auswahlprozesse eröffnen oder auch begrenzen können. Ebenso werden die Rückkopplungsschleifen zwischen unterschiedlichen Elementen des Systems, sowohl positiv als auch negativ, betont. Die Orientierung dieser Innovationsstudien besteht demnach darin, inwieweit Aktivitäten und Kontexte identifiziert werden können, die Innovation befördern oder behindern. Gelingt dies, besteht die Möglichkeit die Innovationsprozesse intentional zu befördern (Hekkert et al. 2007). Beispiele für diese Ansätze sind der Ansatz des technologischen Innovationssystems (TIS), die Multilevel Perspektive (MLP) und der Transitionsansatz. Die Ansätze unterscheiden sich in ihrem Fokus, aber sie haben gemeinsam, dass sie den technologischen Wandel nicht allein als Element der physischen Technologien, sondern als ein Prozess der Interaktion mit den weiteren sozio-ökonomischen Strukturen (wie Markt oder Konsumentenpräferenzen) begreifen.

4.1.2.2 Technologisches Innovationssystem (TIS)

Der Ansatz des TIS (Hekkert et al. 2007) ist entwickelt worden, um das systemische Verständnis des Innovationsprozesses zu verbessern. Ausgangspunkt der Analyse ist in der Regel eine Technologie bzw. der technologische Wandel in einem spezifischen Bereich.

Die Vertreter dieses Ansatzes gehen davon aus, dass die Analysen, die das Nationale Innovationssystem in den Fokus nimmt, nicht spezifisch genug sind, um den Innovationsprozess gehaltvoll zu analysieren. Die nationale Ebene als Analyseeinheit wird, aufgrund der Vielzahl von Akteursbeziehungen und Institutionen, als zu komplex angesehen, um konkrete Innovationstreiber oder -hemmnisse identifizieren zu können. Dies vor allen Dingen auch deshalb, weil im Kontext von NIS überwiegend Strukturen analysiert werden, es hingegen kaum gelingt, die Beziehungen zwischen den Strukturen auszuleuchten.

Im Kontext des von TIS entwickelten Zugangs sind die zu analysierenden Akteursnetzwerke und die relevanten Institutionen deutlich weniger komplex und kleiner, als es bei den Analysen des Nationalen Innovationssystems der Fall war. Dies gilt insbesondere dann, wenn sich gerade entwickelnde TIS in den Fokus genommen werden. Dieser Ansatz verspricht, dass die „realen“ Innovationsdynamiken analysiert werden können. Damit ist es auch klar, dass der Fokus von TIS durchaus mit Analysen sektoraler, regionaler und nationaler Systeme überlappen kann.

Jacobsson und Bergek (2011) verweisen auf drei Kernelemente des technologischen Innovationssystems: (i) Akteure (Unternehmen, Nutzer, Zulieferer, Investoren und andere Organisationen), (ii) Netzwerke als Kanäle für den Transfer von implizitem und explizitem Wissen (iii) Institutionen, die die Umgebungen, in denen die Akteure operieren, bestimmen.

Die Analysen des TIS gehen von einem sehr breiten Verständnis von Institutionen aus. Institutionen werden nicht nur als formale Regeln des Marktes, sondern auch als Normen in Gesellschaft und Organisation verstanden.

TIS-Funktion

Im Rahmen von TIS wird des Weiteren nicht versucht, das jeweilige Innovationssystem in seiner Gesamtheit zu analysieren, sondern man fokussiert auf die Systemfunktionen. Damit sollen zwei Schwächen früherer Systemkonzepte überwunden werden: Einerseits soll die meist vernachlässigte Mikroebene einbezogen und andererseits der eher statische Blick auf die Strukturen des Innovationssystems überwunden werden. Hekkert et al. (2007) fokussieren auf sieben essenzielle Funktionen des TIS: (i) unternehmerische Aktivitäten, (ii) Wissensentwicklung, (iii) Wissensaustausch, (iv) Orientierung der Suche, (v) Marktformierung, (vi) Ressourcenmobilisierung sowie (vii) Schaffung von Legitimität und Umgang mit Widerstand gegen den Wandel.

Je besser diese Funktionen erfüllt werden, desto besser sollte auch die Performanz eines Innovationssystems sein. Damit wird auch davon ausgegangen, dass sich die Diffusion und Implementation verbessern.

4.1.2.3 TIS und Transition

Ein zentrales Thema der TIS-Literatur ist der Wettbewerb zwischen etablierten und neu aufkommenden Systemen. Es wird einerseits erwartet, dass der Eintritt neuer Unternehmen die Entwicklung von Schlüsselfunktion unterstützen kann, wie die Schaffung neuen Wissens, die Zufuhr von Ressourcen und die Formierung von Märkten. Auf der anderen Seite kann aber der Markteintritt auch zur Folge haben, dass bestehende Unternehmen versuchen, die Suchfunktionen neuer Unternehmen zu behindern. Mit diesem Fokus auf Funktionen ist es für die regulierenden Institutionen möglich, Entwicklungen und neue Markteintritte zu unterstützen.

Die Innovationsliteratur hat insbesondere die Bedeutung der Herausbildung von Nischen betont, in welchen neue Technologien eher in der Lage sein könnten, im Wettbewerb mit bereits existierenden Technologien zu bestehen (bspw. Kemp et al. 1998) - Dies gilt insbesondere dann, wenn die schnelle Penetration von Nischenmärkten, die das Potenzial der Verbreiterung haben (bspw. „lead markets“), gelingt (durch „learning by doing“) und damit Kostenreduktionen und Performanz-Verbesserungen möglich werden. Diese Nischen sind in der Regel etwas abgeschirmt von den normalen Marktselektionsfunktionen und können damit als Inkubatoren für radikale Neuheiten dienen. Zugleich können in diesen Nischen auch soziale Netzwerke entstehen, die Innovation unterstützen; wie zum Beispiel User-Producer-Beziehungen. Geels (2004) unterteilt die Nischen in zwei Formen: technologische Nischen und Marktnischen. Die sozialen Netzwerke und die Regelwerke in Nischen unterscheiden sich von denen der technologischen Regimes in zweierlei Weise: Zum einen sind die Regelwerke in Nischen eher elastisch und breit, in existierenden Regimes hingegen sind sie fixiert, stabil und spezifisch. Die Protagonisten der Nischen werden vielfach durch diffuse Szenarios über das Potenzial der künftigen Technologien geleitet. Diese allgemeinen Regeln und Visionen werden spezifischer und stabiler sobald Lerneffekte im Bereich der Technologie und ihrer Nutzung realisiert werden konnten. Zum anderen bestehen Regimes in der Regel aus großen sozialen Netzwerken. Nischen hingegen werden durch kleine und vielfach spezifische Netzwerke gestützt. Eine zentrale Aufgabe ist es, die Arbeit der Nischenprotagonisten so zu entwickeln, dass sie andere Akteure mit einbeziehen können.

Geels (2004) und andere gehen davon aus, dass soziotechnische Regimes eher auf Stabilität ausgerichtet sind, Nischen hingegen die Keimzellen für den Wandel und die „building blocks“ für die Transitionen darstellen. Er geht weiterhin davon aus, dass Transitionen zu neuen soziotechnischen Landschaften dadurch entstehen, dass es zu Nischenverbreitungen kommt („strategic niche management“).

Im Fokus der Forschung steht auch die Differenzierung zwischen inkrementellen, radikalen und disruptiven Innovationen. So wird davon ausgegangen, dass größere Industrieunternehmen zwar die Forschungs- und Entwicklungskapazitäten haben, um neue Ideen zu generieren, dass diese

Ideen aber im Wesentlichen auf inkrementellen Verbesserungen entlang der bestehenden technologischen Trajektorien beschränkt sind. *Disruptive Innovationen* sind in der Lage bestehende dominante Technologien, Prozesse und Produkte zu überwinden. Die neuen Technologien, bzw. die darauf aufbauenden Innovationen, mögen eine ähnliche Marktnachfrage befriedigen wie existierende Technologien, sie nutzen dazu aber eine neue Wissensbasis. Dies kann bedeuten, dass Unternehmen, die im alten Technologiesystem Marktführer waren, nicht in der Lage sind, diesen technologischen Wandel nachzuvollziehen.

Dabei ist darauf hinzuweisen, dass Unternehmen in reifen Sektoren wie dem Energiesystem, in der Regel in soziotechnischen Netzwerken agieren und in der Regel ihre bestehenden Kompetenzen schützen bzw. dort hinein investieren. Disruptive Technologien kommen für die etablierten Unternehmen in solchen Kontexten selten in den Fokus, sodass diese Technologien eher durch kleine Organisationen, die nicht dem Sektor zugehören, entwickelt werden.

Transitionsansatz

Der Fokus dieses Forschungsansatzes zielt vor allem darauf, solche Prozesse des technologischen Wandels zu untersuchen, die weit über inkrementelle Innovationen hinausgehen, sondern sich an komplexeren, radikalen, möglicherweise gar disruptiven, Veränderungen von Produkten und Prozessen orientieren.

Der technologische Wandel und die Transitionsprozesse können aus sehr unterschiedlichen Perspektiven untersucht werden. Das gemeinsame Ziel dieser Ansätze ist es Transitionspfade einerseits zu antizipieren und andererseits auszuloten bzw. zu „managen“. Nach Foxon et al. (2010) hat der Transitionsansatz drei wesentliche Linien: (i) Multilevel Perspektive, (ii) Strategisches Nischenmanagement und / oder Transition Management sowie (iii) soziotechnische Szenarien. Er identifiziert drei wesentliche Schritte, um Transitionspfade zu identifizieren: (i) das bestehende Regime muss in seinen wesentlichen Elementen charakterisiert werden, (ii) es müssen zentrale Prozesse identifiziert werden, die Dynamik und Stabilität beeinflussen – dies insbesondere mit Blick auf die Nische – und (iii) es müssen Interaktionen identifiziert und spezifiziert werden, die einen Transitionspfad ermöglichen.

4.1.2.4 Zwischenfazit

Die wesentliche Veränderung der innovationstheoretischen Ansätze ist in der Erweiterung der Betrachtungsebenen zu sehen. Ausgehend von einem linearen Modell der Innovation wird eine zunehmend komplexer werdende Sicht auf den Innovationsprozess möglich. So wird davon ausgegangen, dass Wissensflüsse beidseitig sind, dass also nicht mehr alleine die Treiber des „technology push“ relevant, sondern eben auch Treiber des „market pull“ zu beachten sind. Ebenso wurden Interaktionen zwischen den unterschiedlichen Stadien der Innovation und dem internen und externen Umfeld einbezogen. Schließlich haben gerade auch die „Systembedingungen“ oder

Rahmenbedingungen (rechtlicher Rahmen, Zugang zu Risikokapital, generelle Bedingungen das Innovationssystem) in den innovationstheoretischen Ansätzen an Relevanz gewonnen.

Der kursorische Überblick über die unterschiedlichen Ansätze hat deutlich gemacht, dass für die entsprechenden Wandlungsprozesse sehr unterschiedliche Wissenschaftszweige und Theorien in Anschlag gebracht werden. Auch gegenwärtig ist noch festzustellen, dass eine vereinheitlichte Theorie gesellschaftlichen Wandels nicht existiert, dass aber Bemühungen unternommen werden, eine Transitionstheorie zu entwickeln, die auf sehr unterschiedliche Wissensbereiche zurückgreift. Festzuhalten ist insbesondere, dass der systemische Charakter von komplexen Innovationsprozesses (Systeminnovationen) und Transformationen betont wird, und damit Systemtheorien zunehmend eine Rolle spielen. Zugleich ist aber auch festzustellen, dass abstrakte Systemtheorien vielfach handlungsorientiert nur begrenzt hilfreich sind. Der analytische Zugang beispielsweise zu Fragen der Transformation des Energiesystems sollte je nach Fragestellung und Ansatzpunkt unterschiedlich zugeschnitten werden.

Die im Rahmen des Projekts Resystra genutzten Ansätze der Multilevel Perspektive (MLP) und der Schildkröte ähneln sich einerseits, andererseits weisen sie einen anderen Blickwinkel auf die Fragestellung auf. Die Schildkröte fokussiert auf Einflussfaktoren für eine gerichtete Transformation des Energiesystems auf verschiedenen Ebenen, was in den beiden regionalen Fallbeispielen eine zentrale Rolle spielt. Die Multilevel Perspektive ist dagegen für diejenigen Prozesse besonders hilfreich, bei denen es darum geht einer bestimmten Technologie, bzw. einer bestimmten komplexen Innovation, wie z. B. dem Power-to-Fuel-System, aus der Nische zu verhelfen.

Im Rahmen der Studie wurde dementsprechend unterschiedlich vorgegangen. Zwar wurde die Transformation des Energiesystems als Ganzes thematisiert, allerdings wurden in den Fallstudien jeweils tiefergehende Analysen vorgenommen, die darauf abzielen, Teilsysteme zu erfassen und zu verstehen und aus diesem Verständnis heraus Handlungsempfehlungen abzuleiten. In der Analyse der Teilsysteme wird allerdings immer auch Rekurs auf weitere Systeme oder das Gesamtsystem genommen, um die Entwicklung und Entwicklungsperspektiven der Teilsysteme ausloten zu können. Dies wurde sowohl anhand von zwei regionalen Fallstudien als auch der eher technisch orientierten Fallstudie Power-to-Fuel realisiert.

4.1.3 Innovationen und Innovationsrichtung

Die Innovationsforschung fokussierte über lange Zeit überwiegend auf die Frage der Innovationsfähigkeit. Dies beruhte sicherlich auch auf den wirtschaftspolitischen (Wachstum und Wettbewerbsfähigkeit fördernden) Motivationen der Innovationsforschung und führte zur Analyse von Innovationssystemen. Im Falle von TIS wurden Fragen nach den Funktionen gestellt, die von Innovationssystem erbracht werden müssen, um die Innovationsfähigkeit zu befördern.

Die Frage der Innovationsrichtung stand über lange Zeit hingegen deutlich weniger im Fokus und bildete sich spätestens in den neunziger Jahren dahingehend heraus, dass nach den Risiken ausgehend von bestimmten Innovationen (Kernenergie, synthetische Chemie) gefragt wurde und nach Ansätzen zur Umweltentlastung. Die aufkommende Diskussion um Nachhaltige Entwicklung führte zur Frage, wie „nachhaltige Innovationen“ realisiert werden können[23].

Auch eine Reihe von eher sozialwissenschaftlichen Ansätzen verfolgte die Frage, wie sich Innovation herausbilden und wie sie beeinflussbar sind. Die Frage nach der Innovationsrichtung spielte dabei hingegen eine weniger relevante Rolle, abgesehen von dem Fokus auf sogenannte „emerging technologies“ oder Zukunftstechnologien (vielfach Querschnittstechnologien), von denen wichtige Impulse für die jeweiligen Innovationsstandorte erwartet wurden. Die Wissenschafts- und Innovationspolitik fokussierte vorwiegend auf die Förderung sogenannter Hochtechnologien. Der Fokus lag nach wie vor auf der internationalen Wettbewerbsfähigkeit, implizit wurden gesellschaftliche Probleme wie Beschäftigung adressiert, „Externalitäten“, wie der Klimawandel, standen weniger im Fokus.

Die Frage der Innovationsrichtung steht inzwischen, insbesondere mit den „Grand Challenges“ im EU-Förderprogramm Horizon 2020, auf der forschungspolitischen Agenda, Herausforderungen also, die sich aus der gesellschaftlichen Entwicklung ergeben. Zu den „Grand Challenges“ werden u.a. der Klimawandel aber auch die demographischen Herausforderungen gezählt. Es geht nicht mehr allein um die Innovationsfähigkeit, sondern vor allem auch um die Innovationsrichtung, am Beispiel des Klimawandels um die Frage, wie Forschung und Innovation Beiträge zur Minderung der Klimagasemissionen leisten können.

Damit ergeben sich aber auch neue Anforderungen an die Innovationsforschung, die den Fokus auf die Möglichkeiten und Grenzen zur Beeinflussung der Innovationsrichtung in ihre Agenden mit aufnehmen muss. Dies wird sicherlich zum Teil durch gezielte Förderungen, z.B. von Energietechnologien, erreicht werden können. Dies wird aber für systemische Innovationen und Transformationen nicht ausreichen. Hier müssen neue Ansätze erschlossen werden. Dazu gehört zweifelsohne auch die Frage der Neukonfigurierung des Verhältnisses zwischen sozialen und technischen Innovationen, und damit auch von gesellschaftlichen Veränderungsprozessen im Sinne der Nachhaltigkeit.

Allerdings dürfte auch derzeit immer noch der Fokus auf technologischen Innovationen liegen (z.B. im 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung). Rahmenprogramme wie die Forschung für Nachhaltigen Entwicklung (FONA) und darin Förderprogramme zur ‚Umwelt- und Gesellschaftsverträglichen Transformation des Energiesystems, in dessen Rahmen auch Resystra

[23] Beispielhaft sei auf die BMBF Förderprogramme FIU (Forschungsverbund Innovative Auswirkungen Umweltpolitischer Instrumente 1997) (vgl. Klemmer et al. (1999)) und riw (Rahmenbedingungen für Innovationen zum Nachhaltigen Wirtschaften) verwiesen (vgl. Hemmelskamp 2001).

gefördert wurde, bilden eher die Ausnahme, gewinnen aber rasch an Bedeutung. Zwar sind die Forschungsagenden um vielfältige Aspekte der Nachhaltigkeit bzw. der großen gesellschaftlichen Herausforderungen erweitert worden, so beispielsweise in der nächsten Phase der Hightech-Strategie der Bundesregierung, gleichwohl muss die Verzahnung zwischen Innovationsförderung, gesellschaftlichen Herausforderungen und Partizipation weiter verbessert werden.

Dementsprechend existiert ein großer Forschungsbedarf zu den Fragen, wie entsprechende Transformationsprozesse auf den Weg gebracht werden können, welche Beiträge die Innovationsforschung und -politik dazu leisten können. In den vorangegangenen Kapiteln wurde bereits aufgezeigt, dass in komplexen Systemen Steuerungsversuche hin zu einem Resilienten Energiesystem (einschließlich der Erreichung der Klimagasminderungsziele) an Grenzen stoßen. Bisher standen in gegenwärtigen Innovations- bzw. Transformationsforschungen überwiegend Fallstudien im Zentrum. In diesen Fallstudien, die zumeist dem Narrativ „von der Nische in dem Mainstream“ folgten, werden unter anderem die spezifischen Bedingungen identifiziert, unter denen bestimmte Technologien bzw. sozio- technischen Teilsysteme, einen relevanten Beitrag zur Energiewende leisten können (bspw. Canzler et al. 2016). Gleichwohl ist festzustellen, dass die unterschiedlichen Nischen und sozio-technischen Teilsysteme von vielfältigen Einflussfaktoren abhängig sind, die von der jeweiligen Nische aus nicht kontrolliert werden können.

Die Orientierung auf die „Grand Challenges“ lenkt den Blick vom Innovationssystem hin zu den gesellschaftlichen Herausforderungen und fokussiert auf Wandelprozesse, die weit über das klassische Innovationsmanagement hinausgehen. Letztlich wird ein gesellschaftlicher Wandlungsprozess als erforderlich angesehen, der als Transformation bezeichnet werden muss und in den Systeminnovationen eine wichtige Rolle spielen. Im Kern geht es dabei um gesellschaftspolitische Ziele und den Beitrag den bestimmte sozio-technische Systeme dazu leisten müssen. Die Beeinflussung der Innovationsrichtung eines eingebetteten sozio-technischen Regimes erweist sich als ein komplexes Unterfangen. „Einfaches Umsteuern“ wird kaum möglich sein, vielmehr wird es im Kern darum gehen, einen Verständigungsprozess über die grundsätzliche Entwicklungsrichtung einzuleiten (Leitkonzepte) und in der Folge weitere Prozesse auf den unterschiedlichen Ebenen anzustoßen. Mögliche Elemente dieses Verständigungsprozesses sind beispielsweise Diskurse über Leitkonzepte, die Generierung von Leitkonzepten, die Erarbeitung von Szenarien und Gestaltungsleitbildern. In allen Fällen geht es darum, dass Verständigungsprozesse angestoßen werden und mithin Lösungsräume und Lösungspfade identifiziert werden können, wobei jeweils auch Annahmen über technologische Wandlungsprozesse und Handlungsmöglichkeiten einfließen. Anzumerken ist dabei natürlich, dass es sich bei diesen Verständigungsprozessen nicht um einmalige Ereignisse handelt, sondern um Prozesse die kontinuierlich stattfinden, und die im günstigsten Fall zu einer Art selbstverstärkender Dynamik führen.

Solche Vorstellungen werden insbesondere im Kontext der Diskussion um „reflexive governance“ geführt, indem auf vier Vorbedingungen verwiesen wird, nämlich die Schaffung von (i) Selbstreflexionskapazitäten, (ii) Brücken- und Integrationskapazitäten, (iii) Antizipationskapazitäten und schließlich (iv) die Bereitstellung von Kapazitäten für Experimente (Lindner et al. 2016; Voß et al. 2006). Diese Ansätze der Innovationsforschung nähern sich den Ansätzen der Transformationsforschung an und vice versa.

Auch in diesen Ansätzen wurde darauf verwiesen, dass sich der Innovationssystemansatz (inkl. TIS Ansatz) überwiegend mit der Frage der Innovationsfähigkeit befasst hat und sehr viel weniger mit der Frage der Innovationsrichtung. Zudem seien bisherige Zugänge überwiegend mit technologischen Fragestellungen, also technologischen Innovationen, befasst gewesen. Die Umgestaltung des soziotechnischen Regimes sei letztlich allenfalls als eine Diffusionsfrage aufgefasst worden.

Andererseits muss betont werden, dass auch das Schildkrötenmodell zahlreiche Erkenntnisse der Innovationssystemansätze aufgreift. Das Schildkrötenmodell versucht allerdings darüber hinaus die zentralen Faktoren zur Beeinflussung der Innovationsrichtung zu identifizieren und dabei auch gesellschaftliche Prozesse und Dynamiken mit zu berücksichtigen.

Mit Blick auf gesellschaftliche Ziele wurden vielfältige Erweiterungen des Innovationssystemansatzes realisiert, indem die Ansätze von Innovationssystemen und die Multilevel Perspektive zusammengeführt wurden und mit weiteren Ansätzen, wie dem strategischen Nischenmanagement oder Transitionsmanagement verbunden wurden.

4.1.4 Skizzierung der Ansätze mit Blick auf die Innovationsrichtung

Wie bereits dargestellt, gewann in der Forschungs- und Technologiepolitik die Orientierung auf einen Beitrag zur Lösung gesellschaftlicher Probleme an Bedeutung. Zudem haben sich in jüngerer Zeit Ansätze der Innovationsforschung entwickelt, die einen Fokus auf die Innovationsrichtung legen. Im Folgenden werden einige dieser Ansätze skizziert, bevor diese Ansätze resümierend, mit Blick auf das Projekt Resystra, zusammengeführt werden.

Science and Technology Studies (STS)

Der Fokus der STS-Studies liegt darauf, dass Wissenschaft und Technologie durch Menschen in der Gesellschaft konstruiert werden, dabei spielen weniger ‚geniale Erfinder‘ eine zentrale Rolle, sondern eher der soziale Kontext. Daraus ist die Idee der „Social Construction of Technology“ entstanden (bspw. Bijker et al. 1987). In Übereinstimmung mit dem Innovationssystemansatz wird davon ausgegangen, dass Technologien auch durch Politik und Gesellschaft beeinflusst bzw. gestaltet werden. Damit besteht ebenfalls ein enger Bezug zum Ansatz der reflexiven Governance: Innovation wird nicht allein als technisches, sondern gerade auch als soziales Phänomen interpretiert. Innovationen werden damit nicht allein durch wissenschaftliches und empirisches

Wissen bestimmt, sondern Governanceprozessen kommt eine wichtige Rolle bei der Beeinflussung der Innovationsrichtung zu.

Governance of Science Technology and Innovation (STI)

Hier besteht ganz offensichtlich ein enger Bezug zu Governancefragen. Die mit diesem Ansatz verbundene Akteursperspektive überwindet den technikzentrierten Blick. Leitbilder können als ein zentrales Mittel angesehen werden, um Orientierung zu unterstützen und zur Koordination der komplexen Prozesse der Innovation beizutragen. Dabei geht es, wie Rip und Kulve (2008) darstellen, auch um die Integration unterschiedlicher Perspektiven und Stakeholder in die aktuellen Prozesse der STI. Dazu gehören insbesondere das „constructive technology assesment“ (CTA) von Rip et al. (2008) und das „realtime technology assesment“ von Guston und Sarewitz (2002). Auch jüngere konzeptionelle Beiträge zu „responsible research and innovation“, die insbesondere auf EU-Ebene Wirkung entfalten konnten, bauen auf diesen Überlegungen auf. Auch sie betonen die Reflexivität der Governance von „research and innovation“ (von Schomberg 2013).

Durch die Einbeziehung der gesellschaftlichen Relevanz werden die fundamentalen Unsicherheiten im Umgang mit STI weiter verschärft, u.a. durch die Komplexität und die Ambivalenzen, die mit den neuen, missions-orientierten Innovationsansätzen bzw. der Einbeziehung der gesellschaftlichen Herausforderungen verbunden sind. Es müssen Ansätze entwickelt werden, die in der Lage sind diese Komplexität, Unsicherheit und Uneindeutigkeiten aufzufangen (Voß et al. 2006).

Standen lange Zeit Fragen des Marktversagens und von Dysfunktionalitäten im Innovationssystem im Fokus der Innovationspolitik, so wurden nun neue Prinzipien („rationals“) für die Innovationspolitik entwickelt. Diese neuen Prinzipien (Missionsorientierung) erfordern erweiterte Ansätze, im Vergleich zu solchen, die allein auf das bestehende Innovationssystem oder dessen Funktion abzielen.

Vergleicht man die wenigen Ansätze bzw. Modelle, die sich aktuell mit der Richtungsgebung von Systeminnovationen beschäftigen, dann lassen sich Ähnlichkeiten bzgl. der von ihnen identifizierten richtungsgebenden Einflussfaktoren feststellen. So heben sowohl die Ansätze des „transition management“ (TM) (Geels 2004; Rotmans und Loorbach 2010) und „constructive technology assessment“ (CTA) (Boxsel 1991; Rip et al. 1995) als auch das Schildkröten-Modell (Ahrens et al. 2006; Brand 2013, 2016; Fichter 2005; Hemmelskamp 1999) die Bedeutung von „(Leit-)Akteuren“ und „Zukunftsvorstellungen“ hervor. Der CTA-Ansatz verweist bspw. auf wirtschaftliche Akteure und NGOs, die aufgrund ihrer Unternehmens- und Organisationspolitik technische Entwicklungen stark beeinflussen können, und benennt den Austausch über (Zukunfts-)Vorstellungen (z.B. Visionen) als relevante Gestaltungsmöglichkeit (Brand 2016; Rip et al. 1995; Schot und Rip 1997). Das TM geht von „frontrunner“ und „advocacy“-Koalitionen sowie (langfristigen) Visionen aus, die wichtige Richtungsgeber darstellen (Brand 2016; Rotmans und Loorbach 2010; Schneidewind

und Scheck 2012). Schließlich hebt das Schildkrötenmodell auf die richtungsgebende Bedeutung von zivilgesellschaftlichen Akteuren, Leitakteuren und deren Netzwerke sowie des „vision pull“ (u.a. Ziele, Visionen oder Leitbilder bzw. Leitkonzepte) ab (Ahrens et al. 2006; Brand 2016; Fichter 2005). Auch der zivilgesellschaftlichen Akzeptanz oder Skandalisierung kommt eine wichtige Rolle zu. Auf der Basis dieser Erkenntnisse wurde im Rahmen des Projektes RESYSTRA der Schwerpunkt auf folgende drei richtungsgebenden Einflussfaktoren gelegt: zivilgesellschaftlicher vision pull (Utopien, Leitkonzepte), zivilgesellschaftlicher (Skandalisierungs)push (Dystopien) sowie Leitakteure und deren Netzwerke. Dementsprechend wird der Analyserahmen zur Erfassung der Möglichkeiten und Grenzen der Richtungsgebung mittels Zukunftsvorstellungen bzw. Leitakteuren in den nachfolgenden Kapiteln zunächst theoretisch weiterentwickelt und dabei auch Forschungslücken aufgezeigt. Der weiterentwickelte Analyseansatz wird dann in den empirischen Fallstudien eingesetzt.

4.1.5 Vergleich der Innovationssystemansätze MLP und Schildkröten-Modell

Im Kontext der Nachhaltigkeitsdiskussion und insbesondere mit Blick auf die Ansätze der Transformationsforschung haben sich unterschiedliche analytische Ansätze herausgebildet, welche die im Rahmen von Resystra verfolgten Forschungsansätze mitbestimmen. Die Bandbreite der Forschungszugänge ist hoch. Etliche Veränderungen der Ansätze in der Innovationsforschung wurden bereits skizziert. In der Folge sollen die hier besonders interessierenden Ansätze MLP und Schildkröte vergleichend analysiert werden.

Markard et al. (2012) haben in Abbildung 4.1 wesentliche aktuell verfolgte Ansätze und deren Genese zusammengeführt. Gleichwohl ist darauf zu verweisen, dass weitere Forschungsansätze von Relevanz sind, die allerdings in diesem Kontext nicht weiter verfolgt werden sollen.[24]

Die Abbildung 4.1 verdeutlicht grafisch die unterschiedlichen Zugänge zum Forschungsfeld der „sustainability transition studies“. Diese basieren auf Systemansätzen und wurden um Elemente der (ökonomischen) Innovationsforschung sowie der evolutionären Ökonomie bereichert.

Die mit den Ansätzen verbundenen Systemperspektiven weisen eine Reihe von Gemeinsamkeiten bzgl. Transitionen auf (Markard et al. 2012):

- Die Systeme, die analysiert werden, sind offen und eingebettet in eine äußere Umwelt mit der das System ko-evolviert.
- Es existiert eine äußere Umwelt, die das System beeinflusst.
- Die Systeme sind komplex und zeigen vielfach nicht lineare (und sogar emergente) Reaktionen, wenn sie auf interne oder auf Veränderungen der Umwelt reagieren.

[24] Vgl. zu einem Überblick weiterer Ansätze wie „Varieties of Capitalism“, Institutionalistische Theorieansätze bspw. (Lockwood et al. 2013).

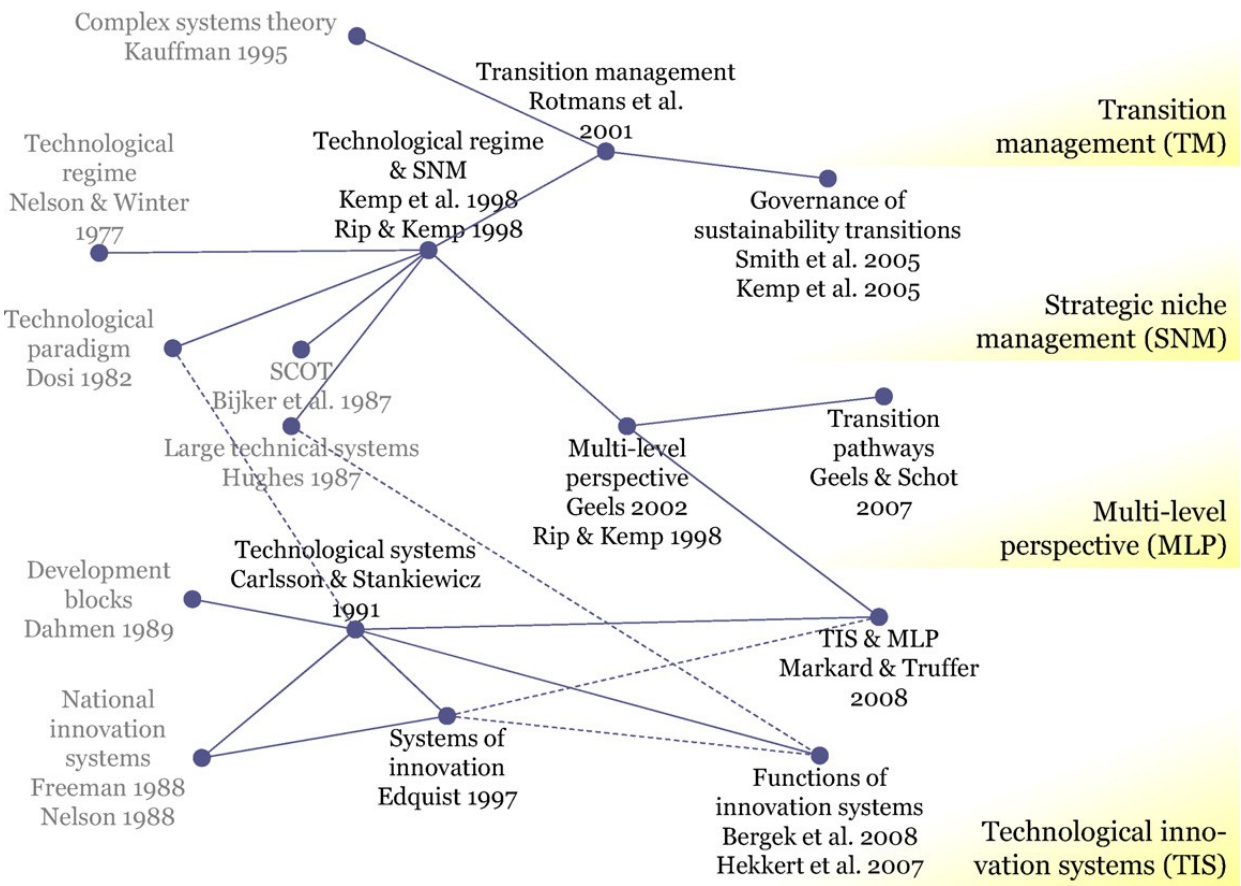


Abbildung 4.1: Forschungs- und Analyseansätze im Forschungsfeld der „sustainability transition studies“. (Quelle: Markard et al. 2012, S. 957.)

Die Anpassungsprozesse finden oft in Form von Veränderungen der Systemstruktur statt. Es sind Umstände möglich, unter denen graduelle Anpassungsprozesse nicht mehr greifen und Strukturen in Frage gestellt werden. Es handelt sich dann um Krisen, die eine dominante Struktur beeinträchtigen können. Dies kann einen Wendepunkt des Systems darstellen, worauf sich eine neue Struktur herausbildet. Anpassungsprozesse von komplexen Systemen, wie des sozio-technischen Energiesystems, sind nicht steuerbar, sondern ihre Rahmenbedingungen lediglich gestaltbar. Damit kann ihre Richtung nicht mit Sicherheit vorherbestimmt werden. Insofern kommt es im Rahmen der Energiewende zentral darauf an, dass die für die Transformation unterstützenden Rahmenbedingungen entsprechend gestaltet werden. Gleichwohl lässt sich im Kontext der Energiewende festhalten, dass Politik und Gesellschaft eine zentrale Rolle bei der Transformation des Energiesystems zukommt (von den Liberalisierungsbemühungen der EU über konkrete Maßnahmen der Energiepolitik wie dem EEG bis hin zu Energiegenossenschaften). Das Energiesystem ist, wie vor allem auch an der ökonomischen Situation der etablierten Energieversorgungsunternehmen deutlich wird, umfassend destabilisiert. Die weiteren Entwicklungspfade hängen dementsprechend von den weiteren Regulierungen, den Marktbedingungen, den technologischen Entwicklungen (u.a. auch Speichertechnologien) und dem Engagement bzw. der Akzeptanz der zivilgesellschaftlichen Akteure ab.

Im Rahmen von RESYSTRA wurde sowohl mit dem MLP-Modell als auch mit dem Schildkrötenmodell gearbeitet:

- Der MLP-Ansatz ist einer der prominenten Systemansätze, der insb. im Kontext der holländischen Transitionsperspektive entwickelt wurde. Er erfasst mit einer heuristischen Analyse auf drei Ebenen vor allem auch die zeitliche Perspektive der Entwicklungsdynamiken des (sozio-technischen) Systems.
- Das Schildkrötenmodell ist in der ökonomischen Innovationsforschung (Innovationssysteme) verwurzelt. Allerdings wird besonderes Augenmerk auf diejenigen Einflussfaktoren gelegt, die die Richtung von Innovationssystemen bestimmen, unterteilt nach „Push-" und "Pull"-Faktoren.

Die Kombination dieser beiden Ansätze soll der besonderen Herausforderung gerecht werden, unter extremer Unsicherheit eine Verbindung zwischen der langfristigen Perspektive der Transformation (Energiewende), den konkreten Richtungsentscheidungen mit Blick auf Beteiligung, Regulierung und Technologieentwicklung und den jeweils von den unterschiedlichen Akteur/innen verfolgten Strategien zu knüpfen. Der MLP-Ansatz, der letztlich aus der evolutionären Ökonomie mit dem Fokus auf technologischen Entwicklungen entstand, versucht die Dynamiken einzufangen, die zur Herausbildung und Veränderung des sozio-technischen Systems beitragen sowie analytisch relevante Einflussfaktoren, gerade auch im Zeitablauf, zu erfassen. Berücksichtigt man die Vielzahl von Beziehungen im sozio-technischen Regime und die Beziehungen zu „Landschaft" und „Nische" (siehe MLP), so wird deutlich, dass diese Komplexität bei der Analyse der Veränderungen im Energiesystem nur begrenzt zu bewältigen ist.

Das Schildkrötenmodell dient der Reduktion dieser Komplexität und konzentriert sich auf wenige Einflussfaktoren, eingeteilt in push- und pull-Faktoren, welche auf das sozio-technische System wirken.

Zwischen den Ebenen des MLP-Ansatzes und den push- und pull-Faktoren des Schildkrötenmodells lassen sich Verbindungen herstellen. Lediglich die zeitliche Entwicklung des sozio-technischen Systems ist mit dem MLP-Ansatz adäquater darzustellen.

4.1.5.1 Die Multi-Level-Perspektive (MLP)

Im Kontext der Transitionsforschung hat sich vor allem auch die (insb. in den Niederlanden entwickelte) Multi-Level-Perspektive als relevant herauskristallisiert. Gründe für den Erfolg dürften im relativ hohen heuristischen Wert dieses Ansatzes liegen, der eine grafische Darstellung der unterschiedlichen Ebenen und Dynamiken ermöglicht. Ebenso lassen sich zumindest ex-post die Dynamiken gut beschreiben[25].

[25] Zu kritischen Einwände gegenüber diesem Ansatz vgl. z.B. Lockwood et al. (2013) und die dort erwähnte Literatur.

Die Multi-Level-Perspektive unterscheidet im Grundsatz drei Ebenen:

1. Die *Landschaft,* also externe Faktoren, die das Regime (siehe 2.) und das System indirekt beeinflussen. Dazu gehören u.a. Weltbilder bzw. deren Veränderung sowie Rahmenbedingungen wie der demographische Wandel, die wirtschaftliche Liberalisierung etc.
2. Das *sozio-technische Regime*, das die Elemente Markt, Industrie, Gesellschaft, Politik und Forschung umfasst. Das sozio-technische Regime wird wiederum durch drei Ebenen strukturiert:
    - die kognitiven Regeln (Ziele, dominante Logiken, Visionen und Leitorientierungen), die diesem konkreten sozio-technischen Regime zu Grunde liegen,
    - die regulativen Regeln wie Standards, Regulierungen etc. sowie
    - die normativen Regeln wie Beziehungen, Werte und Lebensstile.
3. Die *Nischen* (Markt und Technologie), in denen sich soziale und technische Innovationen herausbilden können.

Die Herausforderungen an das sozio-technische Regime ergeben sich folglich durch “externe” Faktoren “von oben” und “von unten”.

Herausforderungen von "oben" – aus der sozio-technischen Landschaft – sind bspw. die Rolle des Klimawandels und dessen Ursachen, welche als Herausforderung an das sozio-technische Regime fungieren können, wenn Politik und Gesellschaft diese Vorstellungen aufgreifen.

“Von unten” wird das sozio-technische Regime bspw. von (technischen oder auch sozialen) Innovationen aus Nischen herausgefordert, wenn diese Innovationen nicht einfach in das Regime übernommen werden können (bspw. wenn sie andere institutionelle Arrangements notwendig machen).

Abbildung 4.2 verdeutlicht diese Dynamiken und Abhängigkeiten am Beispiel von unterschiedlichen Entwicklungsrichtungen des sozio-technischen Regimes mit Blick auf die Energiewende im Elektrizitätsbereich (im Spannungsverhältnis zentraler und dezentraler Lösungen).

Die Abbildung 4.2 veranschaulicht, dass sich die “Landschaft” (“von oben”) verändert (bspw. Klimawandel wird als relevant erachtet) und neue Anforderungen an das sozio-technische Regime gestellt werden (z.B. low carbon energy) (s. grüne Pfeile). Die bestehenden Strukturen des fossilen (Energie-)Systems werden in Frage gestellt und das sozio-technische Regime wird destabilisiert (durch Delegitimation, Regulierungen und neue Leitorientierungen). Nischeninnovationen erhalten eine Chance, sich zu etablieren (s. rote Pfeile). Dies geschieht einerseits durch staatliche Regulierungen (bspw. Einspeisevergütung), andererseits werden sie zeitgleich durch Lerneffekte wettbewerbsfähiger und stellen die Strukturen des sozio-technischen Systems weiter in Frage.

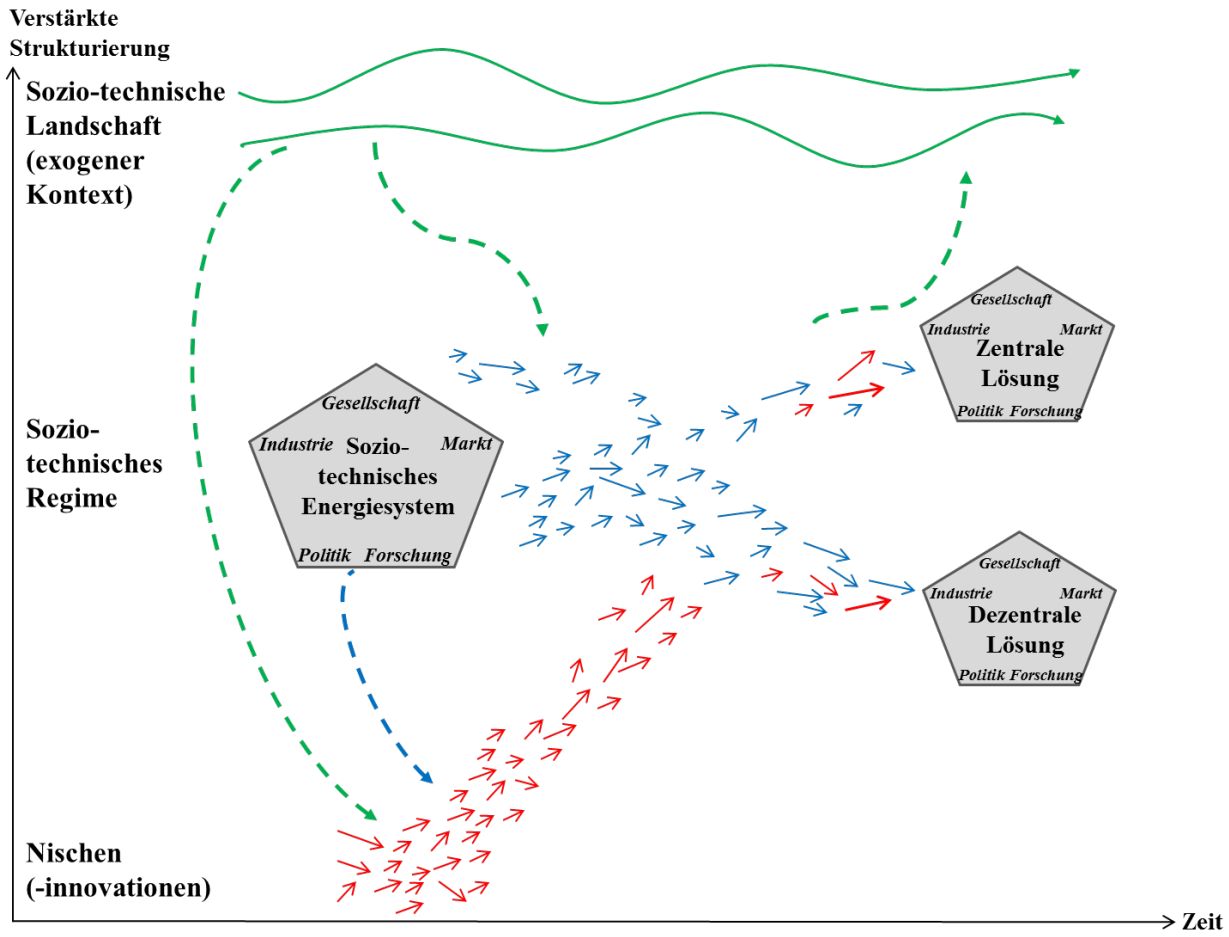


Abbildung 4.2: Multi-Level-Perspektive und mögliche Entwicklungspfade im Energiesystem. (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Geels und Schot 2007)

Es sind unterschiedliche Entwicklungspfade denkbar, so kann sich das sozio-technische System in eine dezentralere oder eine zentralere Richtung entwickeln (s. blaue Pfeile). Dies hängt von vielfältigen Einflussfaktoren ab. Im Bereich Elektrizität ist dies in starkem Maße durch die Bedingungen des Zugangs zu den Infrastrukturen beeinflusst.

Bekanntermaßen hat das EEG und speziell die Einspeiseregelung (in die Netzinfrastruktur) wesentlich zur Durchsetzung von EE-Technologien und einem Innovationsschub in diesem Bereich beigetragen. Diese Interaktion hat dann dazu geführt, dass das bestehende sozio-technische System destabilisiert und die Entstehung neuer Entwicklungspfade ermöglicht wurde.

4.1.5.2 Schildkröten-Modell und richtungsgebende Impulse

Die Transformation des leitungsgebundenen Energiesystems im Rahmen der Energiewende wird hier als systemischer Innovationsprozess eines sozio-technischen Infrastruktursystems aufgefasst. Neben der Frage durch welche äußeren Impulse die Innovationsfähigkeit verbessert werden kann, ist dabei ebenso von Interesse, in welcher Weise äußere Impulse die Innovationsrichtung beeinflussen können. Unter *Innovationsrichtung* sollen dabei gerichtete, an Weltbildern, Gestaltungskonzepten und Gestaltungsleitbildern orientierte Veränderungen des sozio-technischen

Systems (von Komponenten, Betriebs- und Nutzungsweise der Infrastruktur) und seiner gesellschaftlichen Einbettung verstanden werden. Dabei wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass systemische Innovationen bzw. Transformationen nicht durch einzelne dominante Faktoren, sondern erst aufgrund eines dynamischen Wechselspiels vielfältiger Faktoren erfolgen können (Multi-Impuls-Hypothese). Einzelne Einflussfaktoren, und seien sie noch so mächtig, z.B. marktbezogene Faktoren oder staatliche Rahmenbedingungen, sind demnach selten allein ausschlaggebend für die Innovationsrichtung. Diesen „mächtigen“ Einflussfaktoren galt bisher zu Recht meist eine besonders hohe Aufmerksamkeit. Im Rahmen des Projektes RESYSTRA sollte darüber hinaus jedoch auch der Einfluss von Leitorientierungen und ihr Wechselspiel mit anderen Faktoren im Fokus stehen.

Zu diesem Zweck wurde das *Schildkröten-Modell* von Ahrens / v. Gleich (2002) als eine erste Entwurfsgrundlage für die Modellierung der richtungsgebenden Einflussfaktoren bei der Transformation des leitungsgebundenen Energiesystems herangezogen. Das Modell basiert auf den Untersuchungen von Hemmelskamp (1999) zu Einflussfaktoren von Umweltinnovationen und wurde in der Zwischenzeit von Fichter (2005) und Stührmann et al. (2012) weiterentwickelt und modifiziert. In der aktuellen Fassung wird unterschieden zwischen internen Einflussfaktoren wie Akteursnetzwerken und -strategien und externen Einflussfaktoren, die das Innovationssystem beeinflussen und dadurch mittelbar eine Wirkung auf die Richtung des Innovationsprozesses ausüben. Als Schildkrötenmodell wird das Modell bezeichnet, weil die Langsamkeit der Schildkröte die Mühen von Innovationsprozessen widerspiegelt und weil sich die als besonders relevant erkannten stoßenden (push) und ziehenden (pull) Einflussfaktoren in Form von Kopf und Schwanz sowie den vier Füßen um den Körper (das System) anordnen lassen.

Das Modell fokussiert somit auf sechs externe Einflussfaktoren, wovon je dreien eine schiebende bzw. ziehende Wirkung zukommt (siehe Abbildung 4.3). Unter push-Faktoren fallen auch Einflussfaktoren, die das bestehende Regime vor allem destabilisieren, indem sie neue Optionen für Innovationen bereitstellen oder vorhandene Elemente beschränken oder delegitimieren. Pull-Faktoren sind Einflussfaktoren, die bestimmte Innovationsoptionen durch Nachfrage oder Anreize als besonders wünschenswert auszeichnen. Sie wirken selektierend, insb. in den sich durch die Destabilisierung eröffnenden ‚sensiblen Phasen‘. Die sechs Einflussfaktoren werden unter Heranziehung von Beispielen für das leitungsgebundene Energiesystem folgendermaßen definiert:

1.) Technology Push: Als ein zentraler Treiber für Innovationen gilt die Angebotsseite des Marktes. Damit sind neue technische Optionen gemeint, die wiederum neue soziale Einsatzmöglichkeiten eröffnen wie z.B. dezentrale Stromspeicher.

2.) Market Pull: Hierunter sind Nachfrageveränderungen (z.B. neue Kundenwünsche) zu verstehen, die zu Innovationsbemühungen führen, um diese Nachfragen befriedigen zu können. Dazu zählt bspw. die Nachfrage nach einer Eigenversorgung mit EE.

3.) Regulativer Push: Als weitere Treiber können sämtliche (supra-)staatliche Regulierungen verstanden werden, die einen Veränderungsdruck auf die in der Wertschöpfungskette beteiligten Akteur/innen ausüben. Der Druck kann durch Gesetze, Verordnungen und Normen, aber auch durch bloße Ankündigung von Regelungen oder den politischen Diskurs über künftige Gesetzesentwicklungen erzeugt werden.

4.) Regulativer Pull: Dieser Begriff umfasst staatliche Anreize für Marktakteur/innen, die zur Entwicklung oder Anwendung neuer Technologien führen. Dies sind zum einen nachfragesteigernde Impulse wie das EEG und zum anderen Förder- und Forschungsprogramme, mit denen eine finanzielle Unterstützung, die Vermittlung von Wissen oder die Bereitstellung von Know-how verbunden ist.

5.) Zivilgesellschaftlicher Push: Wachsende Bedeutung hat der Einfluss zivilgesellschaftlicher Akteur/innen wie Verbraucher- und Umweltschutzorganisationen. Gemeinsam mit den Medien können sie durch öffentliche Skandalisierungen bestimmte Technologien oder fossile Energieträger angreifen. Sie weisen dadurch ein erhebliches Potenzial auf, um sowohl bisherige Pfade als auch zukünftig mögliche Entwicklungen zu delegitimieren.

6.) Vision Pull: Hierunter sind gemeinsame Werte, Visionen, Leitorientierungen und Szenarien zu verstehen, welche die Akteur/innen im Energiesystem zu Innovationen anregen bzw. zur Gestaltung und Ausrichtung des Innovationsgeschehens maßgeblich beitragen, ein bekanntes Gestaltungsleitbild lautet z.B. „100% Erneuerbare Energien“.

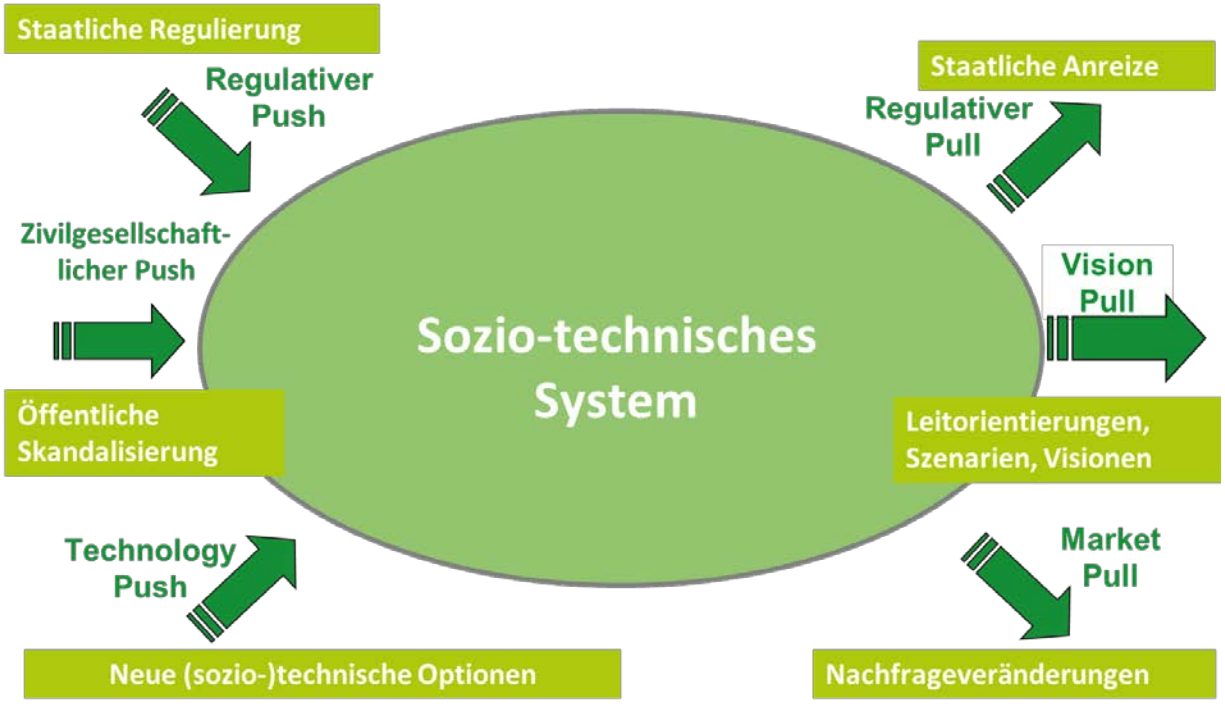


Abbildung 4.3: Schildkrötenmodell der Einflussfaktoren für sozio-technische Systeme. (Quelle: Darstellung in Anlehnung an Ahrens et al. 2002; Hemmelskamp 1999; Fichter 2005; Brand 2013.)

Neben dem generellen Einfluss des „Vision Pull“ auf die bevorzugten Mittel und Instrumente der verschiedenen Akteur/innen, soll in dieser Studie vor allem auf das Zusammenwirken der richtungsgebenden Faktoren eingegangen werden. Eine Ausgangsthese ist dabei, dass eine *Synchronisation der Einflussfaktoren* (verstanden als Kompatibilität und Kombination der Richtungsimpulse) zu einem hohen Einfluss auf die Richtung führt und eine fehlende Synchronisation zu nicht vorhersehbaren Richtungen. Darüber hinaus ist allerdings auch darauf zu achten, dass eine zu starke Synchronisation zu neuen Pfadabhängigkeiten führen kann. Es muss also geprüft werden, inwiefern Leitorientierungen synchronisierend wirken und nicht-kompatible Leitorientierungen Asynchronitäten bei den weiteren Einflussfaktoren zur Folge haben.

Fichter (2005) hat sich aufbauend auf dem Schildkrötenmodell noch intensiver mit den internen Einflussfaktoren beschäftigt, beschränkt sich jedoch bei seinen Untersuchungen auf Innovationsprozesse von Technologien auf der Ebene von Unternehmen und Branchen. Für die Analyse der systeminternen Einflussfaktoren im Energiesystem wird daher in dieser Studie auf die Theorie strategischer Handlungsfelder und eine entsprechende Strategieanalyse zurückgegriffen

4.1.5.3 Kombination der Ansätze

Die unterschiedlichen analytischen Zugänge fokussieren jeweils auf das Energiesystem und seine Rahmenbedingungen, wobei die verschiedenen Abgrenzungen nicht deckungsgleich sind, sondern jeweils einen spezifischen Fokus haben. Die Heuristik der Multi-Level-Perspektive ist dabei die umfassendste, da die unterschiedlichsten Dynamiken und Ebenen im Grundsatz erfasst werden können und zugleich die zeitliche Entwicklungsperspektive integriert wird. Wie bei der Beschreibung der Multi-Level-Perspektive bereits erwähnt wurde, tendiert diese Zugangsweise letztlich zur Überforderung. Analytisch ist sie kaum zu bewältigen, wenn es um weitreichende Transformationen geht, in denen sich viele Elemente gleichzeitig verändern. Daher ist es nicht verwunderlich, dass sich entsprechende Studien bisher auf die Chancen und Grenzen der Integration von „Nischentechnologien“ in das sozio-technische Regime beschränken. Um einen umfassenden Gesamteindruck, inklusive der zeitlichen Perspektive, zu bekommen und sich darüber zu verständigen, ist die Multi-Level-Perspektive allerdings höchst relevant, sie repräsentiert sozusagen das „big picture“. Das aus der Innovationsforschung stammende Schildkröten-Modell stellt hingegen das konkrete zu transformierende sozio-technische System ins Zentrum und versucht die Kraft und die Richtung der beeinflussenden richtungsgebenden Faktoren zu verstehen.

Als Fazit kann festgehalten werden, dass mit der Multi-Level-Perspektive eine Systemperspektive zum Einsatz kommt, die insb. die zeitliche Dimension berücksichtigt. Diese Perspektive wird ergänzt (insb. zeitpunktbezogen) durch die Betrachtung der Einflüsse auf die „Bewegungsrichtung“ des Innovationssystems (Schildkrötenmodell) und der als relevant erachteten push- und pull-Faktoren. Abbildung 4.4 zeigt eine Kombination der Multi-Level-Perspektive und des Schildkrötenmodells.

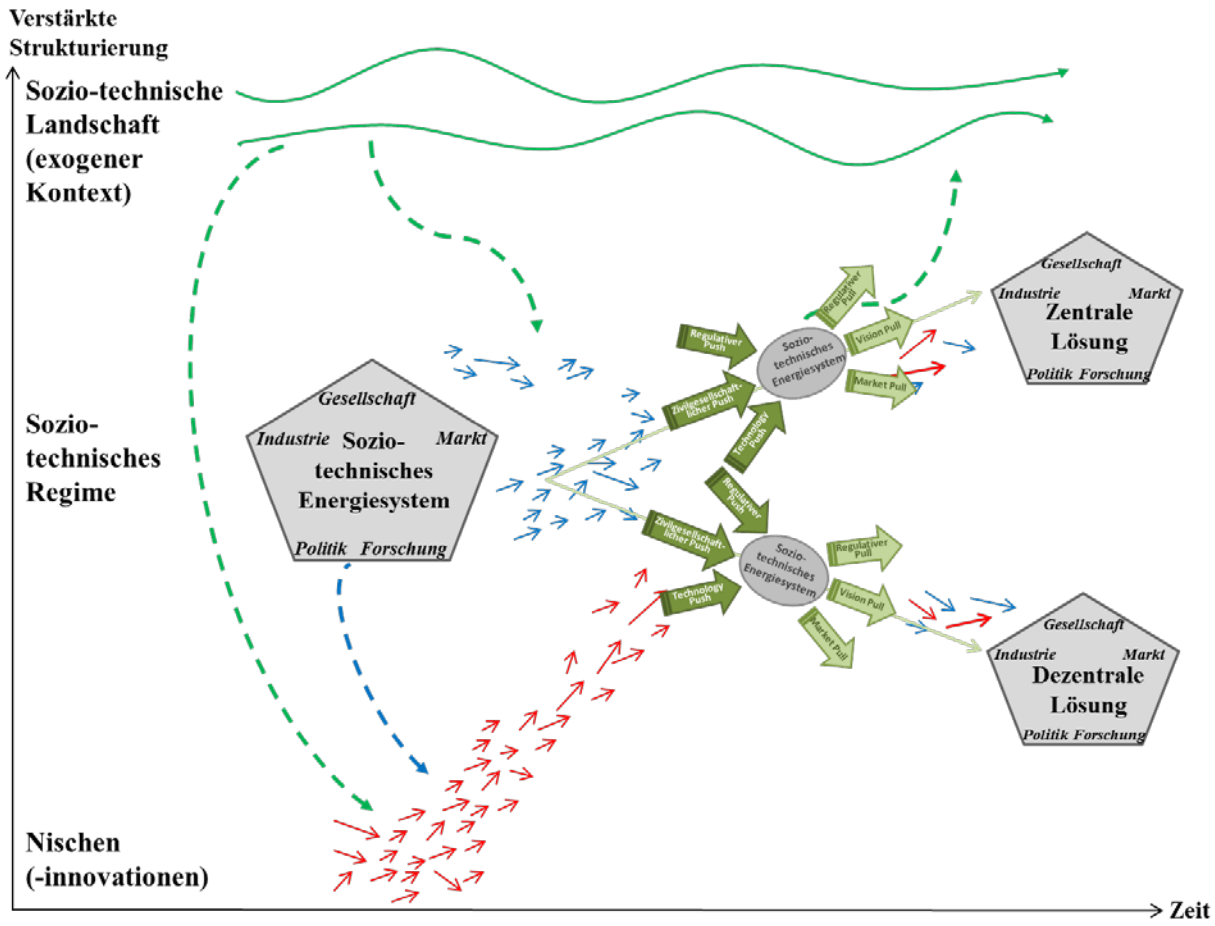


Abbildung 4.4: Kombination der Multi-Level-Perspektive und des Schildkrötenmodells. (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Geels und Schot 2007; Ahrens et al. 2002; Hemmelskamp 1999; Fichter 2005; Brand 2013)

Die hier vorgenommene Kombination bedeutet noch keine Integration der Ansätze, vielmehr stellt eine solche Integration als Herausforderung für die weitere Forschung noch aus. Die Herausforderungen bestehen u.a. darin, dass ähnliche aber nicht gleiche Analyseschritte und -kategorien mit den unterschiedlichen Ansätzen verbunden werden. Das Schildkröten-Modell fokussiert eher zeitpunktbezogen auf die Identifikation von wesentlichen push- und pull-Faktoren mit Blick auf das spezifische Innovationssystem. Dahinter steht letztlich der Versuch die wesentlichen Einflussfaktoren zu identifizieren und zu gewichten. Die Differenzierung möglicher konfliktärer Leitorientierungen, die z.B. mit vergleichbaren Emissionsminderungsstrategien verbunden werden, ist hingegen nur begrenzt darstellbar. Die Abbildung zeigt eine Differenzierung nach zentralen und dezentralen Systemen, ebenso ist eine Differenzierung nach dem Leitkonzept Resilienz und deren jeweiligen Gestaltungsleitbildern denkbar. Mit dem „big picture“ der Multi-Level-Perspektive werden solche Dynamiken besser erfassbar (und vor allem auch graphisch darstellbar) und explizieren die möglichen Entwicklungsrichtungen. Mit ihnen kann aufgezeigt werden, dass unterschiedliche Zukünfte möglich sind und diese gerade auch von den heutigen Entscheidungskonstellationen abhängen.

Damit wird deutlich, dass die Kombination der unterschiedlichen Ansätze fruchtbar ist, weil sie jeweils eine unterschiedliche Tiefenschärfe bei der Analyse ermöglicht und damit jeweils unterschiedliche Leerstellen füllen bzw. offen lassen kann. Geraten bei der Systemperspektive (Multi Level Perspektive) z.B. leicht die handelnden Akteur/innen aus dem Blick, so werden mit der Schildkröte in der Fassung 2.0 zeitpunktbezogen sehr konkret die Dynamiken und die unterschiedlichen Zug- und Druckfaktoren zusammengeführt. Sie können auch gewichtet und mit der Theorie der Strategischen Handlungsfelder die konkreten handelnden Akteur/innen (unter Berücksichtigung der Gewichtung) in den Fokus genommen werden.

Im Rahmen von Resystra sind in diesem Sinne beide Ansätze genutzt worden. Um ein Ergebnis vorwegzunehmen, welches im Schlusskapitel dieses Abschnitts dargestellt wird, widersprechen sich die Ansätze nicht (wie auch schon der Vergleich deutlich gemacht hat), wenn beide Ansätze als Heuristiken des Wandels interpretiert werden, die Orientierung geben können für gesellschaftliches und unternehmerisches Handelns. Mit der MLP können die Dynamiken bspw. der Nischenentwicklungen analysiert und dabei vor allem auch die dynamischen Verhältnisse von Regime und Nische systematisch ausgelotet werden. Mit diesem Modell kann herausgearbeitet werden, welche Kontextbedingungen Technologien in der Nische – hier Power-to-Fuel – benötigen, um aus der Nische heraus zu kommen und zur Herausbildung eines Resilienten Energiesystems beizutragen. Mit Blick auf die regionalen Fallstudien kann systematisch die Frage verfolgt werden, unter welchen Kontextbedingungen sich Resiliente Energiesysteme in den Regionen herausbilden können. Für die Richtungssicherheit ist es dabei entscheidend, dass Leitkonzepte und Gestaltungsleitbilder von Resilienten Energiesystemen generiert werden und Entwicklungspfade aufgezeigt werden. Die MLP erweist sich als Heuristik, mit deren Hilfe die konkreten Dynamiken erfasst werden können. Sie erfordert allerdings den Einsatz weiterer Methoden, wie bspw. beim Fallbeispiel Power-to-Fuel die Modellierung der ‚Wege aus der Nische' mit Hilfe eines Multiagentensystemen. Bei den regionalen Fallstudien spielte die modellgestützte Erarbeitung von Szenarien eine vergleichbare Rolle.

Die Schildkröte erfasst, wie beschrieben, sehr konkret zu einem Zeitpunkt die unterschiedlichen pull- und push-Faktoren, die auf das jeweilige sozio-technische System wirken. Insbesondere der Fokus auf dem vision pull, auf Werten, Leitkonzepten, Gestaltungleitbildern und Szenarien verweist auf die hohe Relevanz eines Verständigungsprozesses über die Entwicklungsrichtungen des jeweiligen Energiesystems und betont durch die konkrete Analyse (im Idealfall auch eines geteilten Verständnisses unterschiedlichster Stakeholder) den entsprechenden Handlungsbedarf (bspw. Instrumenteneinsatz) zur „Steuerung" der Entwicklungsrichtung. Insofern erweist sich die Schildkröte sowohl als Verständigungsinstrument sowohl mit Blick auf die Entwicklungsrichtung des Gesamtsystems als auch der jeweiligen Subsysteme einschließlich der Beziehungen zwischen den Ebenen.

Im Ergebnis kann festgestellt werden, dass weitgehende Ähnlichkeiten der beiden Analyseansätze existieren. Beide Ansätze können im Wesentlichen als Heuristiken bezeichnet werden, die gegenüber den herkömmlichen Ansätzen der Analyse von Innovationen nicht allein auf die Innovationsfähigkeit abheben, sondern auch zur Innovationsrichtung Erkenntnisse beisteuern können.

Beide Ansätze basieren auf einem System- bzw. Regimeansatz, bei dem nicht allein eine spezifische technologische Innovation in den Fokus gerückt wird, sondern die vielfältigen Kontexte mitberücksichtigt werden. Zu den Kontexten gehören unter anderem auch die rechtlichen und sozialen Bedingungen, einschließlich weiterer komplementärer Technologien.

Es bleibt allerdings anzumerken, dass es sich sowohl beim Schildkrötenmodell als auch beim Multi-Level-Ansatz im Wesentlichen um Heuristiken handelt, die in den jeweiligen Anwendungskontexten mit konkreter Empirie gefüllt werden müssen.[26]

In gewisser Form konkurrierend sind allerdings die Begrifflichkeiten: im Kontext der MLA werden auch (sich wandelnde) Leitbilder auf der oberen Ebene differenziert. Diese Leitbilder müssen aber nicht zwangsläufig mit denen des jeweiligen soziotechnischen Systems übereinstimmen, sie können aber dazu beitragen, dass sich die Leitbilder der jeweiligen sozio-technischen Systeme wandeln.

In diesem Sinne ergänzen sich die beiden Heuristiken und schließen einander keineswegs aus. Sie sollten je nach konkreter Fragestellung zum Einsatz kommen. Die Einbeziehung der zeitlichen Perspektive und anstehende Phasenübergänge erfordern eine Multi-Level-Perspektive in welcher die Entwicklungsrichtung des soziotechnischen Systems darstellbar wird.

Die richtungsgebenden Einflussfaktoren für die Innovationsrichtung können letztlich mit beiden Ansätzen identifiziert werden, mithin können im Folgenden dargestellten Ansätze der Leitorientierungsanalyse auf beiden Heuristiken aufbauen, wenngleich sie für die Zukünfte quasi synthetische Zugänge erforderlich machen, weil bspw. Wirksamkeitsfaktoren nicht wirklich identifizierbar sind, sondern Annahmen darüber getroffen werden müssen.

4.1.6 Fazit

Der Forschungsfokus auf das Thema Innovationsfähigkeit von Systemen ist weiterhin ungebrochen, allerdings ist in jüngerer Zeit festzustellen, dass die Thematik der Beeinflussung der Innovationsrichtung an Bedeutung gewinnt, dass also die Diskussionen um die Innovationsmodelle „Schildkröte“ oder auch des MLP-Ansatzes zunehmen. Im Fokus der Diskussion über Innovationen zur Nachhaltigkeit stand vor allen Dingen die Frage wie es gelingen kann, entweder einzelne

[26] Anzumerken ist, dass die innovationstheoretischen Fundierungen vielfach noch ausstehenn, also z.B. Fragen nach Spezifika der jeweiligen Technologien und sozio-technischen Systeme, Überwindung von Lock–ins und die Generierung von Netzwerkeffekten.

Innovationen oder das gesamte Innovationssystem so auszurichten, dass nachhaltige Innovationen dazu beitragen, eine grüne Pfadentwicklung zu eröffnen. Neben einer Reihe von weiteren Faktoren, wurde, auf der Basis früherer Forschungen, die insbesondere die Rolle der Leitbilder zur Richtungsgebung betonten, die Idee entwickelt, dass Technikentwicklung ganz wesentlich auch von den zugrundeliegenden Leitbildern beeinflusst wird. Dazu wurden einige Kriterien entwickelt, die erfüllt sein müssen damit Leitbilder diese Funktion überhaupt übernehmen können (vgl. den Zugang im folgenden Abschnitt 4.2 zu Leitkonzepten).

Die Innovationsforschung hat sich bisher intensiv mit Problemen der Innovationsfähigkeit befasst. Hier spielen Rahmenbedingungen, der richtige Mix an Playern im Innovationssystem und Pfadabhängigkeiten eine zentrale Rolle (Bergmann und Daub 2008; vgl. z.B. Hauschildt et al. 1999; Kaschny et al. 2015). Arbeiten zu Rahmenbedingungen, Einflussmöglichkeiten und Akteurskonstellationen für erfolgreiche – politisch bzw. gesellschaftlich gewollte – gerichtete Innovationen wurden im deutschsprachigen Raum im Rahmen des BMBF-Förderprogramms „Rahmenbedingungen für Innovationen zum Nachhaltigen Wirtschaften“ gefördert (Laufzeit: 2001 bis 2004).

4.2 Richtungsgebender Einflussfaktor: Zukunftsvorstellungen mit Fokus auf Leitkonzepte

Anstrebenswerte Zukunfts- und Zielvorstellungen werden derzeit mit einer Vielzahl an Begriffskonzepten zu fassen versucht, z.B. *regulative Idee*, *Metapher*, *Ideal*, *Utopie*, *Vision, Erwartung (expectation)* oder neuerdings besonders beliebt *Narrativ*. Diese Konzepte lassen sich teilweise voneinander abgrenzen, weisen aber auch definitorische Unschärfen auf (vgl. Bloch 1985; Constanza 2000; Aristoteles übersetzt von Fuhrmann 1982; Kant 1900-; Nünning und Nünning 2002; van Lente und Rip 1998). Zu diesen Konzepten zählen auch *Leitbilder*, die als sozial geteilte, gleichzeitig erwünschte und für machbar gehaltene Zukunftsvorstellungen definiert werden und das Denken und Handeln von Akteuren prägen (Dierkes et al. 1992; Dierkes und Canzler 1998). Genau auf solche Leitbilder und deren richtungsgebende Wirkung auf Systeminnovationen waren im Fokus des innovationstheoretischen Ansatzes des Projekts RESYSTRA. Schließlich spielen Leitbilder wie Nachhaltige Energieversorgung, Dezentralisierung, Erneuerbare-Energie-Region, Energieeffizienz oder Smart Grid aktuell in der Energiewende eine bedeutende Rolle.

Leitbilder können Akteure und ihr Zusammenwirken unterstützen, indem sie auf ein gemeinsames Ziel hin *koordinierend* und *synchronisierend* wirken und eine *Gruppenidentität* schaffen bzw. erhöhen. Sie geben *Orientierung*, *verringern die wahrgenommene Komplexität* und können damit Wissenslücken und Unsicherheiten überbrücken. Indem Leitbilder Akteure emotional ansprechen, können sie *motivierend* wirken. Sie geben dem Handeln einen Sinn und *strukturieren damit das Wahrnehmen, Denken und Handeln* der Akteure (Ahrens und Gleich 2002; Brand 2016; Brand und Gleich 2012; Canzler und Dierkes 2000; Dierkes et al. 1992; u.a. Dierkes et al. 1995;

Giesel 2007). Nach der intensiven Debatte in den 1990er Jahren im Rahmen der Technikgeneseforschung wurde in den vergangenen Jahren wieder zunehmend über die Möglichkeit diskutiert, Leitbilder gezielt für die Richtungsgebung von Innovationen und Transformationsprozessen einzusetzen (Antes et al. 2012; Grießhammer und Brohmann 2015; Jischa 2005; Leggewie und David 2015; WBGU 2011). Blickt man jedoch auf den wissenschaftlichen Diskurs in der Technikgeneseforschung in den 1990er Jahren, dann wurden dort die Möglichkeiten und Grenzen einer gezielten Richtungsgebung bzw. Gestaltung von Technikentwicklungen mittels Leitbildern sehr kontrovers diskutiert. Konsens bestand darin, dass Leitbilder in vielen Technikgeneseprozessen eine wichtige Rolle gespielt haben. Im Rahmen von retrospektiven Studien zeigte sich jedoch, dass sich viele Leitbilder erst während Technikentwicklungsprozessen ausprägen, unterschiedliche Leitbilder nebeneinander existieren können und eine von Vorneherein gezielte Gestaltung durch einzelne dominante Leitbilder nicht festzustellen war (Eulenhöfer 1996; Hellige 1993; Maaß 1994; Mambrey et al. 1995; Tepper 1994). Bei diesen retrospektiven Studien und weiteren wissenschaftlichen Arbeiten zum Leitbildansatz konnten jedoch etliche Forschungslücken aufgedeckt werden, die eine nähere Auseinandersetzung mit dem Leitbildkonzept im Rahmen des Projektes RESYSTRA nahelegten (Brand 2016):

1. Eine Ausdifferenzierung von Leitbildern in Form von unterschiedlichen Typen fand nicht statt, sondern es wurde per se angenommen, dass Leitbilder Technikentwicklungen nicht von Prozessbeginn an richtungsgebend beeinflussen können.
2. Es wurden sehr spezifische, teils sehr technische Leitbilder (z.B. Personal Computer, Time-Sharing-System) untersucht. Generellere Leitbilder, die Systeminnovationen betreffen (systemische Leitbilder), wurden jedoch nicht in den Studien berücksichtigt.
3. Es wurden wenige Aussagen darübergemacht, welche Qualtäten erfolgreiche Leitbilder haben, wie ein Leitbild bezogen auf seinen Inhalt und seinen Prozess der Entwicklung, Verbreitung und Umsetzung ausgestaltet sein sollte (inhalts- und prozessbezogene Wirksamkeitskriterien bzw. -faktoren). Ebenso stellt sich die Frage, wie das Leitbild bzgl. des Systems, auf das es sich bezieht, beschaffen sein sollte (system-/inhaltsbezogene Wirksamkeitsfaktoren).
4. Die Möglichkeiten und Grenzen der Richtungsgebung mittels Leitbildern im Vergleich zu anderen richtungsgebenden Einflussfaktoren wurden wenig diskutiert und noch weniger retrospektiv oder empirisch untersucht.
5. Es wurden größtenteils retrospektive Dokumentenanalysen durchgeführt. Zur Untersuchung der Wirksamkeit von Leitbildern als sozial geteilte Zukunftsvorstellungen ist es jedoch nötig, dass im Rahmen von empirischen Studien zum einen reaktive Erhebungsmethoden angewendet werden, d.h. Methoden, die im Kontakt mit den jeweiligen Leitbild-

Adressaten durchgeführt werden, und zum anderen diese Methoden bereits prozessbegleitend und nicht erst retrospektiv eingesetzt werden.

6. Es wurde nicht hinreichend spezifiziert, in welchen Fällen Leitbilder überhaupt als richtungsgebend bezeichnet werden können.

Im Rahmen des Projektes RESYSTRA konnte im Zuge eines Dissertationsvorhabens (Brand 2016) und basierend auf Vorstudien, die am Fachgebiet Technikgestaltung & Technologieentwicklung durchgeführt wurden, an diese Forschungslücken sowohl theoretisch als auch empirisch angeknüpft werden. Im folgenden Abschnitt werden zunächst diese Vorarbeiten beschrieben, aus denen sich der Analyserahmen und ein Maßnahmenkonzept für eine Transformation des Energiesystems mit Hilfe von Leitorientierungen ableiten lassen.

4.2.1 Dreiebenenmodell von Leitorientierungen

In den Studien der Technikgeneseforschung zur Wirkung von Leitbildern wurde nicht zwischen verschiedenen Typen von Leitbildern differenziert. Außerdem existierten keine Ansätze, Leitbilder mit Hilfe von Kriterien hinsichtlich ihres Typus zu unterscheiden. Das sogenannte Dreiebenenmodell von Leitorientierungen bietet hier eine Lösung an (Beucker/Brand et al. 2011; Brand, Petschow et al. 2015; Brand 2016; Brand und Gleich 2012; u. a. Gleich/Brand et al. 2010b). Es werden drei Typen von *Leitorientierungen*[27] unterschieden, *Weltbilder*, *Leitkonzepte* und *Gestaltungsleitbilder* (Brand 2016). Die auf der mittleren Ebene angesiedelten *Leitkonzepte* werden in Anlehnung an die definitorischen Arbeiten von Dierkes et al. (1992) und Giesel (2007) als gleichzeitig erwünschte und für machbar gehaltene, sozial geteilte Zukunftsvorstellungen aufgefasst (Brand 2016; Gleich/Brand et al. 2010b). Die auf der unter- bzw. übergeordneten Ebene verorteten *Weltbilder* bzw. *Gestaltungsleitbilder* haben dementsprechend eher eine Tendenz zu erwünschten (Weltbilder) oder für machbar gehaltenen, sozial geteilten Zukunftsvorstellungen (Gestaltungsleitbilder). Innerhalb der drei Hauptebenen sind weitere Binnendifferenzierungen möglich. Mit Hilfe der sechs Unterscheidungskriterien Generalisierungsniveau, gesellschaftliche, räumliche und zeitliche Reichweite sowie zeitlicher Bezug (Gegenwart/Zukunft) und Realitätsbezug werden die Leitorientierungen den Ebenen zugeordnet (Brand 2016; Gleich/Brand et al. 2010b) (vgl. Abbildung 4.5):

1.) Weltbilder: Auf der untersten Ebene verortet, zeichnen sich durch ein hohes Generalisierungsniveau aus. Sie sind also allgemein gehalten, eher erwünscht und stellen oft Vorstellungen dar, die weit in der Zukunft liegen. In der Regel weisen sie eine große gesellschaftliche, räumliche und zeitliche Reichweite auf wie *Sicherheit*, *Gerechtigkeit*, *Vorsorge* oder *Leben in Einklang mit der Natur.*

[27] Wir grenzten uns vom gebräuchlichen Begriff des Leitbildes ab, um die Differenzierung von mehreren Leitbildebenen hervorzuheben; Brand (2016)

2.) Leitkonzepte: Als gleichzeitig erwünschte und für machbar gehaltene Vorstellungen sind sie auf der mittleren Ebene angesiedelt und können einen Gegenwarts- oder Zukunftsbezug haben. Sie weisen eine mittlere gesellschaftliche, räumliche und zeitliche Reichweite auf und beziehen sich mit ihrem mittleren Generalisierungsniveau oft (problemlösungsorientierte) Richtungsentscheidungen/-pfade wie *Resilientes System* oder auf spezifischere Formen wie *Resilientes Energiesystem*.

3.) Gestaltungsleitbilder: Diese auf der oberen Ebene verorteten, sehr spezifischen Vorstellungen mit einem hohen Gegenwartsbezug sind geprägt von einer hohen Machbarkeit (Realitätsbezug). In der Regel haben sie einen Bezug zu bestimmten Handlungs- oder Bedürfnisfeldern wie Landwirtschaft/Ernährung oder Energie (oder noch spezifischer wie in unserem Fallbeispiel Power-To-Fuel) und oft auch einen spezifischen Raumbezug (wie in unseren regionalen Fallstudien). Als spezifische Handlungsanleitungen oder Konstruktionsprinzipien sind sie gesellschaftlich und räumlich weniger verbreitet und sind eher von einer kurzfristigen zeitlichen Reichweite geprägt, z.B. *Zelluläres System in Wolfhagen).*

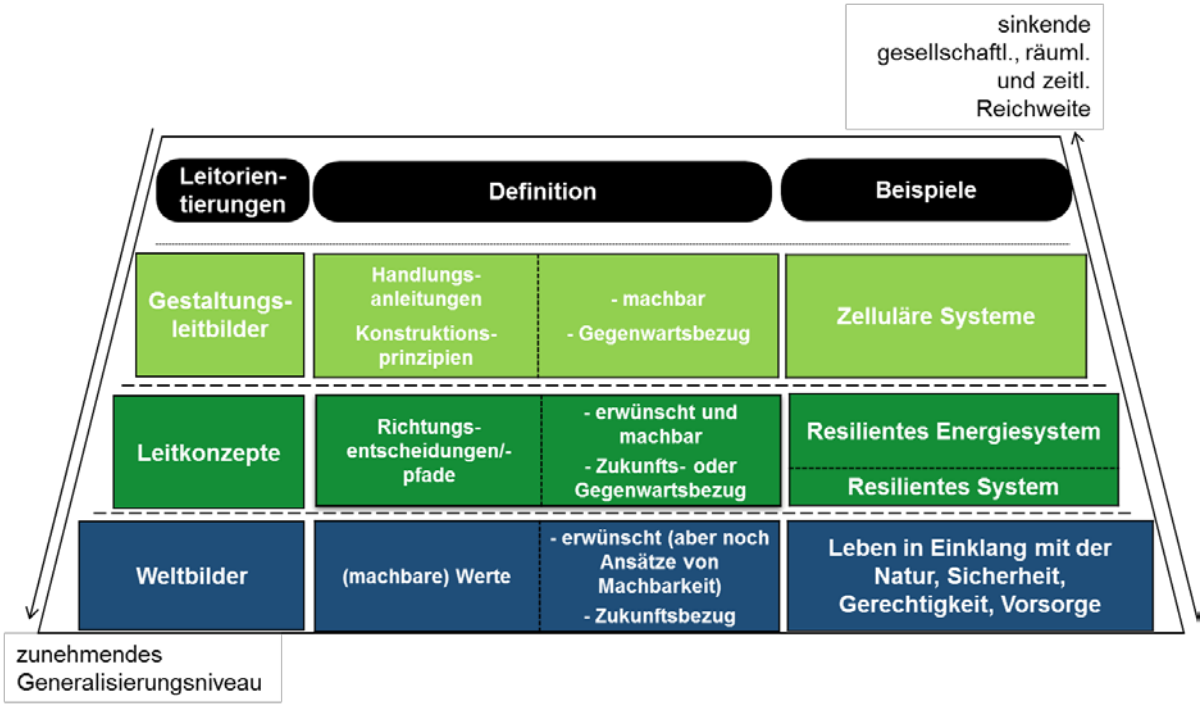


Abbildung 4.5: Dreiebenenmodell von Leitorientierungen. (Quelle: Darstellung in Anlehnung an Beucker/Brand et al. 2011; Brand, Petschow et al. 2015; Brand 2016; Brand und Gleich 2012; u. a. Gleich/Brand et al. 2010b)

Eine eindeutige Zuordnung aller Zukunftsvorstellungen zu den drei Ebenen ist nicht immer möglich, daher ist ggf. eine Zuordnung unter Berücksichtigung der Kriterien im Zweifelsfall individuell zu entscheiden. Schließlich ist es auch maßgeblich von der jeweiligen sozialen Gruppe abhängig, ob sie eine Zukunftsvorstellung als Leitorientierung oder im Rahmen eines anderen Begriffskon-

zepts wahrnimmt. Denn je nachdem wie machbar oder erwünscht bspw. ein *Resilientes Energiesystem* erscheint, kann diese Zukunftsvorstellung als Ziel, Leitkonzept oder Utopie wahrgenommen werden.

Im Rahmen des Dreiebenenmodells wird außerdem angenommen, dass zwischen den drei Ebenen Wechselwirkungen bestehen, und sie sich gegenseitig in ihrer Wirksamkeit beeinflussen können (Beucker et al. 2011; Brand 2016; Brand und Gleich 2012; Gleich/Brand et al. 2010b). Zum einen wird davon ausgegangen, dass viele Leitkonzepte und Gestaltungsleitbilder erst dann besonders wirksam werden, d.h. richtungsgebend wirken, wenn sie Bezüge zu (stärker erwünschten), bereits existierenden und verinnerlichten Weltbildern aufweisen und von daher ihre emotionale Aufladung, ihren gesellschaftlichen Resonanzboden und ihre Gestalt erhalten (Gleich, Brand, Stührmann, Gößling-Reisemann, Lutz-Kunisch 2010b). Zum anderen besteht die Annahme, dass Leitkonzepte dann besonders ihre Wirkung entfalten können, wenn sie Bezüge zu Gestaltungsleitbildern aufweisen und in diese übersetzbar sind, so dass ihre Machbarkeit stärker zum Ausdruck kommt und sie damit „einleuchtender“ und „greifbarer“ für potenzielle Adressaten werden (Brand 2016).

Den auf der mittleren Ebene verorteten Leitkonzepten, welche sowohl allgemein gehalten sind und möglichst Bezüge zu Weltbildern aufweisen, als auch spezifischere Vorstellungen zulassen, indem sie Bezüge zu Gestaltungsleitbildern aufweisen, dürfte also eine zentrale Rolle bei der Richtungsgebung von Systeminnovationen zukommen. Dementsprechend befasste sich das Projekt RESYSTRA insbesondere mit dieser Ebene von Leitorientierungen und konzentrierte sich in der theoretischen Arbeit auf die Ausgestaltung und Präzisierung der Leitkonzepte *Resilienz* bzw. *Resiliente Systeme* und *Resiliente Energiesysteme* sowie in den Fallstudien auf die entsprechenden Gestaltungsleitbilder auf der regionalen (Osterholz, Wolfhagen) und nationalen Handlungsebene (Power-to-Fuel).

4.2.2 Wirksamkeitsfaktoren

Wie ein solch bewusster Einsatz von Leitkonzepten im Rahmen sogenannter Leitorientierungsprozesse ablaufen kann, und welche Erfolgskriterien (hier bezeichnet als Wirksamkeitskriterien bzw. -faktoren) dabei berücksichtigt werden müssen, wird in den nächsten Abschnitten erläutert. Grundsätzlich wird bei solchen Leitorientierungsprozessen auf Leitkonzepte fokussiert, die durch starke Werte und Weltbilder aufgeladen bzw. befeuert werden. Ausgehend von diesen Leitkonzepten werden dann gemeinsam mit ausgewählten Adressaten diese Zukunftsvorstellungen in Form von Gestaltungsleitbildern spezifiziert und operationalisiert. Diese Gestaltungsleitbilder werden dann verbreitet und schließlich gemeinsam umgesetzt. Mit Blick auf mögliche Faktoren, die zur Wirksamkeit dieser Leitorientierungsprozesse und der darin kommunizierten Leitkonzepte und Gestaltungsleitbilder beitragen, sind nach Brand vier verschiedene Typen zu unterscheiden,

nämlich inhaltsbezogene, systembezogene, prozessbezogene und akteursbezogene Wirksamkeitsfaktoren (Brand 2016). Inhaltsbezogene Wirksamkeitsfaktoren betreffen die Qualität, die Gestalt bzw. den Inhalt der Leitkonzepte, d.h. wie Leitkonzepte bzw. Gestaltungsleitbilder formuliert sein sollten, um besonders hohe Resonanz auszulösen und dadurch wirksam zu werden. Systembezogene Wirksamkeitsfaktoren beziehen sich dagegen nicht nur auf die Resonanz auslösende (emotionale) Kraft eines Leitkonzeptes bzw. Gestaltungsleitbildes, sondern auch auf seine Bezüge zum zu gestaltenden System. Schließlich ist davon auszugehen, dass die Wirksamkeit von Leitkonzepten bzw. Gestaltungsleitbildern auch davon abhängt, welche Situationslagen und Systemzustände vorliegen, welche Gelegenheitsfenster sich dort eröffnen oder schließen (Brand 2016). Prozessbezogene Wirksamkeitsfaktoren beziehen sich auf den Prozess der Entwicklung, Verbreitung und Umsetzung von Leitkonzepten und Gestaltungsleitbildern, d.h. auf die Art der Durchführung dieser Prozesse. Akteursbezogene Wirksamkeitsfaktoren beziehen sich schließlich auf die Art der Akteure, welche in den Prozess involviert werden sollte. Auch die nun folgende Darstellung des Forschungsstandes zu Wirksamkeitsfaktoren von Leitorientierungen basiert neben den Untersuchungen im Rahmen von RESYSTRA auf Vorarbeiten an der Universität Bremen. Es wurde Literatur in den Bereichen Technikgeneseforschung, Politikwissenschaften, Organisationslehre und Regionalplanung nach Wirksamkeitskriterien bzw. -faktoren gesichtet (Beucker et al. 2011; Brand 2016). Insbesondere wurden aber auch eigene retrospektive und empirische Studien durchgeführt, um die identifizierten Kriterien bzw. Faktoren zu validieren (Brand 2016; Brand und Gleich 2012, 2015).

4.2.2.1 Inhaltsbezogene und systembezogene Wirksamkeitsfaktoren von Leitkonzepten und Gestaltungsleitbildern

Da im Rahmen des Projekts RESYSTRA die Spezifizierung des Leitkonzepts Resiliente Energiesysteme in nationale und regionale Gestaltungsleitbilder im Rahmen der Fallstudien vorgesehen war (s. Kapitel 6), interessierten nicht nur die inhaltsbezogenen und systembezogenen Wirksamkeitsfaktoren von „Leitkonzepten“, sondern auch die entsprechenden Wirksamkeitsfaktoren von „Gestaltungsleitbildern“. Beide werden in Anlehnung an Brand im Folgenden erläutert (Brand 2016).

Inhaltsbezogene Wirksamkeitsfaktoren von Leitkonzepten

- Sie sollen Bezug zu bereits von den Adressaten verinnerlichten Weltbildern, Leitkonzepten oder Gestaltungsleitbildern haben, die ihren Resonanzboden bilden.
- Sie sollen übersetzbar sein in für machbar gehaltene Gestaltungsleitbilder und Praxisbeispiele, um als realistisch, plausibel und einleuchtend zu gelten.
- Sie sollen ein mittleres Generalisierungsniveau aufweisen. Zum einen sollen sie allgemein genug gehalten sein, damit sie genügend Interpretations-, Ermessens-, Entscheidungs- und Gestaltungsspielraum aufweisen, was eine ganzheitliche Sichtweise begünstigt. Zum

anderen sollen sie Ansatzpunkte für eine Spezifizierung und Operationalisierung in Form von Gestaltungsleitbildern, Zielen und Maßnahmen aufweisen.

- Sie sollen innovativ, kreativ, überraschend und/oder phantasieanregend sein, um im Gedächtnis der Adressaten zu bleiben und motivierend zu wirken.
- Sie sollen ausreichend Interpretationsspielraum bieten, um einen Verständigungs- und Aushandlungsprozess anstoßen zu können, was eine wichtige Voraussetzung für das soziale Teilen eines Leitkonzeptes darstellt.

Inhaltsbezogene Wirksamkeitsfaktoren von Gestaltungsleitbildern

- Im Vergleich zu Leitkonzepten sollen sie einen höheren Realitätsbezug haben, wodurch sie plausibler werden. Gleichzeitig sollen sie aber noch Ansatzpunkte für Inspiration und Wünsche eröffnen.
- Sie sollen innovativ sein und nicht nur vorzufindendes Bewusstsein bestätigen.
- Um die eigentlich mit den Leitkonzepten intendierte Wirkung zu erzielen, sollen sie einen deutlichen Bezug zu den Leitkonzepten haben, aus denen sie spezifiziert wurden.
- Um einen Verständigungsprozess in Gang halten zu können, sollen sie nicht zu spezifisch sein und Raum für Interpretationen lassen.
- Sie sollen Bezug zu bereits von den Adressaten verinnerlichten Weltbildern, Leitkonzepten oder Gestaltungsleitbildern aufweisen, die ihnen den Resonanzboden bieten.

Systembezogene Wirksamkeitsfaktoren von Leitkonzepten und Gestaltungsleitbildern

- Sie sollen Anschluss zu gegenwärtigen oder zukünftigen Situationslagen haben. Zu berücksichtigen ist, dass die wahrgenommene Zeitgemäßheit eines Leitkonzeptes bzw. Gestaltungsleitbildes abhängig vom Adressaten variieren kann.
- Hinsichtlich gegenwärtiger oder zukünftiger Problemstellungen sollen sie Lösungsmöglichkeiten aufzeigen.
- Sie sollen kompatibel und komplementär zu weiteren richtungsgebenden Einflussfaktoren sein (vgl.Brand 2016).

Die Ergebnisse der Anwendung dieses Analyserahmens und die Beantwortung der Frage, inwiefern unser Leitkonzept ‚Resiliente Energiesysteme' und unsere drei Gestaltungleitbilder aus den Fallbeispielen diesen Kriterien genügen oder eben nicht genügen, und ob ggf. noch etwas am Analyseansatz geändert werden muss, werden in Kapitel 7.1 und Kapitel 8 vorgestellt.

4.2.2.2 Prozess- und akteursbezogene Wirksamkeitsfaktoren sowie Phasenmodell eines idealtypischen Leitorientierungsprozesses

Auf Grundlage des von der Forschergruppe um Meinolf Dierkes (Wissenschaftszentrum Berlin) (Dierkes et al. 1992) erarbeiteten Vier-Stufen-Prozesses, in dem Handlungsempfehlungen für eine bewusste Entwicklung von Leitbildern zur Gestaltung von Technikentwicklungsprozessen gegeben werden, und basierend auf dem von uns erarbeiteten Dreiebenenmodell von Leitorientierungen einschließlich theoretischer und empirischer Untersuchungen zu prozess- und akteursbezogenen Wirksamkeitsfaktoren (Beucker et al. 2011; Brand 2016; Brand und Gleich 2012, 2015) wurde von Brand (Brand 2016) das „Phasenmodell eines idealtypischen Leitorientierungsprozesses“ entwickelt. Dieses Modell wurde als theoretische Grundlage für die Entwicklung der Leitkonzepte bzw. Gestaltungsleitbilder für die beiden in RESYSTRA im Fokus stehenden Fallstudien Wolfhagen und Osterholz mit Blick auf das Leitkonzept Resilientes Energiesystem herangezogen. Deses Modell wird kurz erläutert und die sich daraus ergebenden weiteren Forschungsbedarfe werden am Ende des Kapitels aufgezeigt.

Das Phasenmodell zeigt den idealtypischen Verlauf der Entwicklung von Leitkonzepten hin zu Gestaltungsleitbildern und deren Umsetzung in vier Phasen. Hierbei bilden drei für die Wirksamkeit des Prozesses als besonders wichtig erachtete Aspekte das Grundgerüst des Leitorientierungsprozesses: 1.) der Bezug von Leitkonzepten zu vorhandenen Weltbildern, 2.) die Spezifizierung von Leitkonzepten in Gestaltungsleitbildern und Praxisbeispielen und 3.) die Partizipation von ausgewählten Adressaten.

Phase 1: Anstoß des Prozesses und Aufgreifen von Weltbildern (erwünschte Richtung) mit Leitkonzept:

Ein in Vergessenheit geratenes, zuvor nicht ausgesprochenes oder aus anderen Systemen stammendes Leitkonzepts wird von Individuen, kleine Gruppen oder Netzwerken (bezeichnet als Träger des Leitorientierungsprozesses) aufgegriffen und auf betroffene Systeme bezogen. Es zeigt eine erwünschte Richtung auf, die oft auf Weltbildern gründet und durch gegenwärtige oder zukünftige Problemstellungen oder sich verändernder Wunschvorstellungen bedingt ist. Der Bezug des formulierten Leitkonzeptes auf existierende Weltbilder und grundlegende Werte eröffnet einen breiteren Resonanzboden für diese Leitkonzepte.

Zu berücksichtigen sind in dieser Phase folgende akteurs- und prozessbezogenen Wirksamkeitsfaktoren:

- Um die erwünschte Richtung nicht nur zu erfassen, sondern auch mit einem adäquat formulierten Leitkonzept aufgreifen zu können, sollen *Akteure mit Fachexpertise* (Fachpromotoren) unter den Prozessträgern vorhanden sein. Für die erfolgreiche Überführung des Leitkonzeptes in die nachfolgenden Prozessphasen sollten sie maßgeblich von ihm überzeugt sein.

- Mithilfe der genannten *inhalts- und system-/inhaltsbezogenen Wirksamkeitsfaktoren* von Leitkonzepten soll das formulierte Leitkonzept vor Beginn der zweiten Phase überprüft werden.
- Es soll innerhalb der Gruppe der Prozessträger eine *gemeinsame Überzeugung* und ein *einvernehmliches Verständnis* des Leitkonzepts geschaffen werden.
- Bei einem solchen Verständigungsprozess können *externe Fachexperten* mit Vorträgen, Workshops etc. unterstützen.

Phase 2: Spezifizierung des Leitkonzeptes in Gestaltungsleitbilder und Praxisbeispiele:

Von den Prozessträgern wird das Leitkonzept in ein oder mehrere Gestaltungsleitbilder und Praxisbeispiele[28] (Beispiele der vom Leitkonzept forcierten Systeminnovationen) spezifiziert, was seine wahrgenommene Realisierbarkeit und Plausibilität bei Adressaten fördert. Hieran sollten ausgewählte Adressaten und Entscheidungsträger beteiligt sein, da sie auf diese Weise eigene Aspekte ihrer verinnerlichten Leitorientierungen (Wunsch- und Machbarkeitsvorstellungen) in die spezifizierenden Gestaltungsleitbilder einbringen können, und diese damit anschlussfähiger werden. Außerdem ist davon auszugehen, dass sich Adressaten eher mit Gestaltungsleitbildern identifizieren, wenn sie an dem Spezifizierungsprozess mitgewirkt haben. Ggf. kann es vorteilhaft sein, die Gestaltungsleitbilder in qualitative/quantitative Ziele und Maßnahmen zu übersetzen, damit sie noch greifbarer für die Adressaten werden. Die entwickelten Gestaltungsleitbilder sollten bei den beteiligten Akteuren auch weiterhin Bezug zum ursprünglichen Resonanzboden haben.

Zu berücksichtigen sind in dieser Phase folgende Wirksamkeitsfaktoren:

Akteursbezogene Wirksamkeitsfaktoren:

- Unter den Prozessträgern sollen *überzeugte Akteure mit Fachexpertise* (Fachpromotoren) vorhanden sein, welche imstande sind, das Leitkonzept zu spezifizieren und zu operationalisieren. Darüber hinaus sind *Akteure mit Zugang zu Adressatennetzwerken* (Beziehungspromotoren) von Vorteil, um ausgewählte (betroffene) Adressaten in die Phase einzubeziehen. Für die Entwicklung von Gestaltungleitbildern, Zielen und Maßnahmen zusammen mit Adressaten sind *Moderations- und Präsentationskompetenzen* dieser Akteure hilfreich.
- Die einzubeziehenden *Adressaten sollen möglichst betroffen* sein von den mit den Gestaltungsleitbildern intendierten Systeminnovationen, um eine höhere Motivation für ihre

[28] Bei Praxisbeispielen kann es sich um bereits existierende Beispiele handeln, die möglichst lokal verortet sind, damit Adressaten Bezug zu ihnen haben, oder um selbst umgesetzte Beispiele (z.B. Leuchtturmprojekte); Brand (2016)

Teilnahme am Prozess zu haben. Gleichzeitig kann ihr anwendungsbezogenes Wissen für die Spezifizierung des Leitkonzeptes herangezogen werden.

- Durch die *frühzeitige Partizipation der Entscheidungsträger* am Prozess kann Akzeptanz und Legitimation für die entwickelten Gestaltungsleitbilder, Ziele und Maßnahmen geschaffen werden. Im späteren Verlauf kann die Partizipation zur Verstetigung des Prozesses im Rahmen von Richtlinien, Institutionen o.ä. beitragen. Darüber hinaus können Entscheidungsträger mit ihrem (lebensweltlichem) Wissen die Entwicklung von anschlussfähigen Gestaltungsleitbildern fördern.
- Die *Beteiligung von Fachexperten und/oder Moderatoren* ist von Vorteil, wenn die Prozessträger nur ungenügende Fachkompetenzen oder Kommunikationsfähigkeiten für die Entwicklung von Gestaltungsleitbildern, Praxisbeispielen, Zielen und Maßnahmen aufweisen. Um die Objektivität und Akzeptanz des Prozesses und der Spezifizierungen zu gewährleisten, sollen diese Akteure möglichst *unabhängig* sein.

Prozessbezogene Wirksamkeitsfaktoren:

- Für die Entwicklung von Gestaltungsleitbildern, Zielen und Maßnahmen gemeinsam mit Adressaten sind *adäquate und adressatengerechte Methoden und Techniken* zu wählen (z.B. Kreativitäts-/Visualisierungstechniken).
- Mithilfe der *inhaltsbezogenen und system-/inhaltsbezogenen Wirksamkeitsfaktoren* von Gestaltungsleitbildern sollen die entwickelten Gestaltungsleitbilder *regelmäßig überprüft* werden. Ggf. sind hierbei *weitere Analysemethoden* heranzuziehen (z.B. Innovationspotenzialanalysen, Konsistenzanalysen, Plausibilitätsprüfungen).
- *Leitakteure/Diffusionsintermediäre*[29], welche die Verbreitung und/oder Umsetzung der Gestaltungsleitbilder im besonderen Maße befördern können, sollten frühzeitig identifiziert und verstärkt in den Leitorientierungsprozess eingebunden werden.
- Um die Verbindlichkeit zu erhöhen, sollten die entwickelten Gestaltungsleitbilder, Ziele und Maßnahmen *schriftlich fixiert* werden, was die Möglichkeiten zu ihrer Verbreitung verbessert.
- Ein *offizieller Beschluss* der entwickelten Gestaltungsleitbilder, Ziele und Maßnahmen, z.B. in politischen Gremien ist vorteilhaft für ihre Verbindlichkeit.

[29] Akteure, welche nicht selbst Adressat sind, sondern nur Vermittler der Gestaltungsleitbilder bzw. damit verbundener Umsetzungen, können als „Diffusionsintermediäre“ bezeichnet werden vgl. Fichter et al. (2010a).

- Aufgrund sich verändernder Rahmenbedingungen sollen die entwickelten Ziele und Maßnahmen, und je nach Spezifizierungsgrad auch die Gestaltungsleitbilder, *regelmäßig überprüft und angepasst* werden.

Phase 3: Verbreitung der Gestaltungsleitbilder und Praxisbeispiele:

Die entwickelten Gestaltungsleitbilder und Praxisbeispiele sowie ggf. entwickelte Ziele und Maßnahmen (Spezifizierungen) werden über unterschiedliche Kommunikationsmittel verbreitet. Auf diese Weise können sie die Adressaten erreichen und werden im besten Falle wirksam, d.h. sie treffen auf Resonanz bei den Adressaten.

Zu berücksichtigen sind in dieser Phase folgende Wirksamkeitsfaktoren:

Akteursbezogene Wirksamkeitsfaktoren:

- Unter den Prozessträgern sollten *Akteure* vorhanden sein, welche *Zugang zu Adressatennetzwerken* haben sowie *Moderations- und Präsentationskompetenz* aufweisen, um die Spezifizierungen zielgruppenspezifisch und adressatengerecht zu verbreiten. Sie sollten außerdem *Fachkompetenzen* haben, um die Spezifizierungen auf Fachdiskursebene kommunizieren zu können und damit für Akzeptanz zu sorgen.
- *Lokal verortete Leitakteure/Diffusionsintermediäre mit sozialen Kompetenzen und großen sozialen Netzwerken* sollten verstärkt beteiligt werden, denn sie können mit ihrer Überzeugungskraft die Verbreitung der Gestaltungsleitbilder maßgeblich unterstützen. Hierfür sollen ihnen die Gestaltungsleitbilder von den Prozessträgern plausibel erklärt werden, und die Leitakteure bzw. Diffusionsintermediäre sollen hinreichend überzeugt von ihnen sein.
- In die Verbreitung sollen *Entscheidungsträger* einbezogen werden, denn sie haben Möglichkeiten die Spezifizierungen in Gesetzgebungen, Institutionen etc. zu überführen und somit zu verstetigen.
- Etablierte *Funktionsträger* können im Prozessverlauf die Verantwortung für die Verbreitung und Umsetzung der Handlungsleitkonzeptideen, Ziele und Maßnahmen übernehmen und damit zur Verstetigung beitragen, daher sind sie im besonderen Maße zu berücksichtigen.

Prozess:

- Um möglichst eine breite Adressatengruppe zu erreichen, sollen *unterschiedliche, zielgruppenspezifische Kommunikationsmittel* eingesetzt werden und möglichst *alle potenziellen Adressaten* Berücksichtigung finden. Als Kommunikationsmittel können schriftliche Formen (z.B. Print- und Onlinemedien), verbalisierte Formen (z.B. öffentliche Vorträge

und Fachvorträge) und/oder die Organisation von Fachcommunities oder die Gründung von Instituten herangezogen werden.

- Durch eine *Institutionalisierung* der Gestaltungsleitbilder, Ziele und Maßnahmen (z.B. in Form von Institutsgründungen oder die Überführung in Richtlinien, Gesetze o.ä.) oder die *Bestimmung von Verantwortlichkeiten* (z.B. Übertragung auf langfristig festgelegte Funktionsträger) sollte der Leitorientierungsprozess frühzeitig verstetigt werden.

Phase 4: Umsetzung der Gestaltungsleitbilder:

Die entwickelten Gestaltungsleitbilder, Ziele und Maßnahmen werden umgesetzt, d.h. sie werden handlungsleitend. Die Adressaten sind entweder bereit, die von den Gestaltungsleitbildern betroffenen Systeminnovationen umzusetzen, indem sie diese bspw. planen, oder sie setzen diese praktisch um. Die Umsetzung kann innerhalb des initiierten Leitorientierungsprozesses (z.B. in Form von Beteiligungsprojekten) stattfinden. Im besten Fall konnten schon die vorherigen Prozessphasen zu einer Umsetzung auch außerhalb des Prozesses im Sinne einer Verstetigung führen.

Zu berücksichtigen sind in dieser Phase folgende Wirksamkeitsfaktoren:

Akteursbezogene Wirksamkeitsfaktoren:

- Unter den Prozessträgern sollen *Akteure* sein, die *Zugang zu Adressatennetzwerken* haben, um Adressaten für die Umsetzung der Gestaltungsleitbilder zu identifizieren. Sie sollen zudem *Projektmanagementkompetenzen* für die Durchführung und Koordination von Beteiligungsprojekten haben sowie für den Dialog mit Adressaten *Moderations- und Präsentationskompetenzen* aufweisen. Mit ihrem *Fachwissen* können sie außerdem dazu beitragen, Akzeptanz für den Umsetzungsprozess und seine Spezifizierungen zu schaffen.

- Für die Überprüfung der Machbarkeit der Systeminnovationen z.B. in Form von Feasibility Studien kann es hilfreich sein, *externe Akteure mit Fachexpertise* einzubeziehen. Darüber hinaus können *professionelle Moderatoren* zur Unterstützung des Adressatendialogs herangezogen werden. Sowohl die externen Fachexperten als auch die Moderatoren sollen *unabhängig* sein, um die Objektivität und Akzeptanz des Umsetzungsprozesses zu erhöhen.

- *Leitakteure* stellen aufgrund ihrer Überzeugungen wichtige Praxispartner für die Umsetzung der Gestaltungsleitbilder dar und sollten daher maßgeblich am Prozess beteiligt werden.

Prozessbezogene Wirksamkeitsfaktoren:

- Es ist sinnvoll, *strukturierte, lokal verortete Beteiligungsprojekte* für die Adressaten anzubieten. Werden diese Projekte *durch die Prozessträger koordiniert*, indem jene bspw. für das Projektmanagement verantwortlich sind, für die Vernetzung zwischen den Adressaten als Praxispartner sorgen und innovative Umsetzungsvorschläge unterbreiten, kann dies einen wichtigen Anreiz für eine Beteiligung darstellen. Gleichwohl ist zu berücksichtigen, dass die Projekte *genügend Ergebnisoffenheit* aufweisen und *Raum* bieten, um mit Adressaten gemeinsam Umsetzungsmöglichkeiten (Systeminnovationen) entwickeln zu können.
- Die Machbarkeit und Plausibilität von Gestaltungsleitbildern und den damit forcierten Systeminnovationen soll mittels *Praxisbeispielen* aufgezeigt werden.
- Die *Realisierbarkeit* von entwickelten Systeminnovationen soll mittels *Analysen abhängig vom Anwendungsfall* (z. B. Machbarkeitsstudien) geprüft und die Innovationen ggf. angepasst werden.

Der Prozess mit den eben dargestellten Wirksamkeitsfaktoren ist in Tabelle 4.1 dargestellt.

Tabelle 4.1: Phasenmodell eines idealtypischen Leitorientierungsprozesses (Quelle: Darstellung in Anlehnung an Brand 2016)

Phasen	Prozessbezogene Wirksamkeitsfaktoren	Prozessträger	Beteiligte Akteure
Phase 1: Anstoß: Aufgreifen von Weltbildern mit Leitkonzept	• Überprüfung des Leitkonzeptes anhand inhalts- und system-/ inhaltsbezogener Wirksamkeitsfaktoren von Leitkonzepten • Verständigungsprozess über Leitkonzept	insb. Fachpromotoren (ggf. Beziehungs-/ Machtpromotoren zur Überführung in nachfolgende Phasen)	Externe Fachexperten
Phase 2: Spezifizierung des Leitkonzeptes in Gestaltungsleitbildern und Praxisbeispielen (ggf. auch in Zielen und Maßnahmen) ***Beginnende Transformation zu von Resonanz getragenen Gestaltungsleitbildern***	• Anwendung von adressatengerechten Methoden (z.B. Kreativitätstechniken, Visualisierungstechniken) • Überprüfung der Gestaltungsleitbilder anhand inhalts- und system-/inhaltsbezogener Wirksamkeitsfaktoren von Gestaltungsleitbildern (ggf. weitere Analysemethoden heranziehen) • Identifizierung und Einbindung von möglichen Leitakteuren/Diffusionsintermediären • Schriftliche Fixierung der entwickelten Gestaltungsleitbilder, Ziele und Maßnahmen • Offizieller Beschluss von Gestaltungsleitbildern, Zielen und Maßnahmen • Regelmäßige Überprüfung und Anpassung der Ziele, Maßnahmen und ggf. Gestaltungsleitbilder	Fachpromotoren; Beziehungspromotoren mit Moderations-/ Präsentationskompetenz	Adressaten; Entscheidungsträger; Externe (unabhängige) Fachexperten/ Moderatoren
Phase 3: Verbreitung der Gestaltungsleitbilder und Praxisbeispiele ***Transformation zu von Resonanz getragenen Gestaltungsleitbildern***	• Nutzung von unterschiedlichen, zielgruppenspezifischen Kommunikationsmitteln unter Berücksichtigung möglichst aller potenzieller Adressaten: Veröffentlichung von Presse-/Fachartikeln als Online- und Printausgabe; Fachvorträge etc. • Verstetigung einleiten z.B. in Form einer Institutionalisierung (Institutsgründung, Überführung in Richtlinien/Gesetzen etc.) oder der Bestimmung von Verantwortlichkeiten	Fachpromotoren; Beziehungspromotoren mit Moderations-/ Präsentationskompetenz	Adressaten; Entscheidungsträger; Funktionsträger; Leitakteure/ Diffusionsintermediäre
Phase 4: Umsetzung der Gestaltungsleitbilder ***Transformation zu handlungsleitenden Gestaltungsleitbildern***	• Angebot an lokalen Beteiligungsprojekten mit klarer Struktur • Aufzeigen von Praxisbeispielen • Überprüfung der Umsetzungsmaßnahmen (Systeminnovationen) nach ihrer Realisierbarkeit (z.B. Machbarkeitsstudien)	Fachpromotoren; Beziehungspromotoren mit Moderations-/ Präsentations-/ Projektmanagementkompetenz	Adressaten; Leitakteure; ggf. externe (unabhängige) Fachexperten

4.2.3 Einsatz und Überprüfung des Analyserahmens und Maßnahmenkonzepts im Rahmen von RESYSTRA

Im Rahmen des Projekts RESYSTRA konnte der erarbeitete Analyserahmen und das vorgestellte Maßnahmenkonzept für eine Transformation des Energiesystems mit Hilfe von Leitorientierungen auf verschiedenen Handlungsebenen (regional und national) eingesetzt und überprüft werden. Dabei galt es folgenden Fragen besonders zu berücksichtigen:

1.) Zunächst war die Wirksamkeit von Leitbildern bzw. Leitorientierungen und des damit verbundenen Leitorientierungsprozesses zu überprüfen. Wie bereits oben aufgezeigt wurde, handelte es sich bei den Vorläuferstudien aus den 1990erJahren, die sich auf die Möglichkeiten und Grenzen einer Richtungsgebung durch Leitbilder konzentrierten, um retrospektive Dokumentenanalysen. Dementsprechend sollten im Rahmen von RESYSTRA insbesondere empirische, prozessbegleitende Studien mit reaktiven Methoden durchgeführt werden, um die Wirksamkeit des bewussten Einsatzes von Leitorientierungen analysieren zu können. Die zwei Regionen, die Stadt Wolfhagen und der Landkreis Osterholz, die ohnehin schon mit großem Engagement dabei waren die Energiewende voran zu bringen, boten als Fallbeispiele im Rahmen von RESYSTRA hervorragende Voraussetzungen für eine prozessbegleitende Untersuchung der weiteren Transformation ihrer Energiesysteme mit Hilfe des Leitkonzepts *Resilientes Energiesystem*.

2.) Bei der Durchführung der Leitorientierungsprozesse wurden die oben beschriebenen Wirksamkeitsfaktoren berücksichtigt. Als besonders wichtiger inhaltsbezogener Wirksamkeitsfaktor bestätigte sich, dass Leitkonzepte und Gestaltungsleitbilder besonders dann wirksam werden, wenn sie Bezüge zu bereits vorhandenen (verinnerlichten) Leitorientierungen aufweisen. Um die Gestaltungsleitbilder eines resilienten regionalen Energiesystems für die beiden ausgewählten Regionen gemäß diesem Wirksamkeitsfaktor zu entwickeln, war es nötig, die schon im regionalen Energiewendeprozess wirksamen Leitorientierungen im Dialog mit regionalen Akteuren aufzugreifen, um sie dann im nächsten Schritt in die zu entwickelnden Gestaltungsleitbilder integrieren zu können. Dieser Schritt erwies sich dann allerdings als schwieriger als erwartet.

3.) Darüber hinaus stellen die vorgesehenen empirischen Studien im Rahmen von RESYSTRA Möglichkeiten dar, die eben beschriebenen Wirksamkeitsfaktoren zu überprüfen und weiter zu spezifizieren. Hierbei sollten sowohl die inhaltsbezogenen und systembezogenen Wirksamkeitsfaktoren von Leitkonzepten und Gestaltungsleitbildern als auch die prozess- und akteursbezogenen Wirksamkeitsfaktoren in den Blick genommen werden.

4.) Zu den schon erwarteten Schwierigkeiten gehörte die Tatsache, dass – wie im Rahmen des Schildkrötenmodelles ja ausführlich beschrieben – Leitorientierungen nur einen Faktor darstellen unter vielen Einflussfaktoren. Hier ist ein Blick auf das Zusammen- oder eben auch Gegeneinanderwirken dieser Einflussfaktoren nötig.

4.3 Zusammenfassung der Innovationssystemansätze MLP und Schildkröten-Modell: Akteure und deren Handlungsmöglichkeiten auf unterschiedlichen Ebenen

Im Rahmen von Resystra kamen das MLP- und das Schildkröten-Modell zum Einsatz. Damit wurden, in unterschiedlicher Tiefenschärfe, sowohl die nationale Ebene als auch die regionale Ebene (zwei Fallstudienregionen) und ein eher technologischer Ansatz (mit vielfältigen Verknüpfungen zu anderen Technologien und Anwendungskontexten) analysiert.

4.3.1 Das Schildkröten-Modell

Die Schildkröte, die vor allem im deutschsprachigen Raum entwickelt wurde, zielt darauf ab, das Innovationsverständnis dahingehend zu erweitern, dass Akteure und unterschiedliche Dynamiken in die Analyse miteinbezogen werden. Es wird dabei der Versuch unternommen push- und pull-Faktoren hinsichtlich ihrer Relevanz einzuschätzen und damit die „Bewegungsrichtung“ bzw. Richtungsgebung von Innovationen zu identifizieren. Damit wird zugleich die Möglichkeit eröffnet, Handlungsempfehlungen abzuleiten, um den „richtigen“ Pfad einzuschlagen. Eine spezifische Bedeutung hat die Schildkröte unter anderem durch die Berücksichtigung der Einflussmöglichkeiten zivilgesellschaftlicher Akteure und durch die explizite Vorstellung, dass Innovationen auch durch *Leitbilder* befördert werden. Es wurde die Hypothese überprüft, dass Leitbilder eine höchst relevante Funktion gerade für das „greening“ des Innovationssystems und entsprechende Transformationspfade haben. Als zentrale Fragestellung war dabei immer zu analysieren, welchen Einfluss Leitbilder für die Bewegungsrichtung des Regimes haben können.

Das Schildkrötenmodell kann unterschiedlich komplex ausgestaltet werden, es kann einerseits sehr umfassend das sozio-technische Regime darstellen, also auf ein nationales Innovationssystem bezogen sein, und andererseits kann sich die Darstellung auch auf Teilsysteme beziehen, wie regionale oder sektorale Systemen. Insofern ist die Analyseebene flexibel skalierbar.

Der Ansatz der Schildkröte war immer auch damit verbunden, dass die relevanten Akteure im Idealfall gemeinsam über die Entwicklungspfade des jeweiligen soziotechnischen Regimes diskutieren und so zu Einschätzungen kommen, welche push- und pull-Kräfte auf die Schildkröte wirken und wie diese die Entwicklungsrichtungen mitbestimmen. Damit wird ein gemeinsames Verständnis über die relevanten Faktoren erarbeitet. Zugleich lassen sich daraus auch Hinweise ableiten, an welchen „Stellschrauben“ gedreht werden muss, um die gewünschten

Zielzustände zu erreichen. Damit dient die Schildkröte ganz essenziell einem Verständigungsprozess unterschiedlichster, für das jeweilige sozio-technische System relevanter, Akteure, die daraus ihre Schlussfolgerungen ziehen können.

Wie dargestellt kann die Schildkröte auch Teilsysteme repräsentieren. Die Beziehungen und Abhängigkeiten zum „Gesamtsystem“ können durch die push- und pull-Faktoren des Teilsystems repräsentiert werden.

Des Weiteren ist darauf zu verweisen, dass es sich bei der Darstellung des sozio-technischen Systems, wie es durch die Schildkröte repräsentiert wird, i.d.R. um eine Zeitpunktbetrachtung handelt, mithin wird versucht die Frage zu beantworten, welche push- und pull-Faktoren die Bewegungsrichtung beeinflussen. Dynamische Entwicklungen können damit nicht abgebildet werden, gleichwohl sind Spannungsverhältnisse aufdeckbar, wenn bspw. Zukunftsbilder durch die Leitbildanalyse (oder auch durch Szenarien) erfasst werden können.

Die Schildkröte hat von daher die gleichen Probleme wie es sämtliche Zugänge zu Analysen des Innovationssystems haben. Diese fokussieren, wie bereits im Falle des NIS dargestellt, überwiegend auf die Erfassung von Strukturen und haben Probleme, die Beziehungen zwischen den Teilelementen zu erfassen.

4.3.2 Multi-Level-Perspektive (MLP)

Bei der Multi-Level-Perspektive (MLP), die einen Denkrahmen darstellt, in dem die unterschiedlichen Einflussfaktoren auf das soziotechnische Regime dargestellt werden (letztlich als grobe Heuristik), also vor allem die Ebenen Nische und die eines exogenen Rahmens, in welchem dann auch unterschiedliche Leitbilder Einfluss nehmen können. Diese Einflussfaktoren führen dazu, dass sich das sozio-technische Regime wandelt und im Idealfall in Richtung Nachhaltigkeit bewegt. Dieser Ansatz, der sich aus unterschiedlichen wissenschaftlichen Disziplinen speist, nicht zuletzt aus Ansätzen der Evolutionsökonomie, verweist auf die Bedingtheiten des Wandels sozio-technischer Systeme.

Ein spezifischer Fokus liegt dabei auf der Frage, wie und unter welchen Bedingungen sich Nischentechnologien (zunehmend werden neben technischen auch soziale Innovationen in den Blick genommen) entwickeln lassen, und wie diese das soziotechnische Regime verändern, in dem sie entweder hineinwachsen oder zu einem grundsätzlichen Wandel beitragen. Dazu sind weitere Ansätze entwickelt worden, wie das strategische Nischenmanagement oder das „transition management“ (vgl. bspw. (Foxon et al. 2010)). Die Multi-Level-Perspektive stellt insofern, ähnlich wie die Schildkröte, eine Heuristik des Wandels von sozio-technischen Systemen dar, die zwangsläufig abstrakt bleiben muss, da die Vielzahl von Einflüssen und deren Gewichtung kaum systematisch erfassbar sind. Handlungsorientierung erhält die MLP aller-

dings überwiegend erst dann, wenn es um das „Management“ geht, also die Frage der Beeinflussung insbesondere der Innovationsrichtung („transition management“). Anzumerken ist, dass i.d.R. nicht davon ausgegangen wird, dass ein Management im Sinne einer direkten Steuerung möglich ist, sondern dass es allenfalls um die Beeinflussung der Systementwicklung geht.

Es wurde deutlich, dass die grundsätzlichen Heuristiken höchst relevant sind, diese aber methodisch weiter unterlegt werden müssen. Dies gilt sowohl für die Analyse der Gegenwart, wobei insbesondere Akteure und damit Akteursanalysen im Vordergrund stehen sollten, als auch für Analysen potenziell zukünftiger Entwicklungen, bei denen auch sehr unterschiedliche Ansätze zum Einsatz kommen können. Im Fokus steht dabei vor allem die Frage der Ausleuchtung von Zukünften und der Identifikation förderlicher oder auch hinderlicher Konstellationen, die zugleich Hinweise auf Handlungsnotwendigkeiten oder Potenziale im Sinne der Richtungssicherheit geben können.

Sozio-technische Regime können sehr unterschiedlich abgegrenzt werden (bspw. regionale oder nationale sozio-technische Systeme). Damit ist verbunden, dass die Handlungsoptionen der jeweiligen Akteure i.d.R. auch von dem gewählten Zuschnitt der sozio-technischen Systeme abhängen:

- mit Blick auf die regionale Ebene: Was ist machbar und welche Technologien sind nutzbar?
- mit Blick auf neue Technologien (Power-to-Fuel): Welche Konstellationen sind in dem Kontext wichtig und relevant?

Die unterschiedlichen Ebenen können dabei nicht strikt voneinander getrennt werden. Sie beeinflussen sich gegenseitig. Vereinfachend dargestellt kann angeführt werden, dass die Energiewende schon früh einen ihrer Ausgangspunkte einerseits in technologischen Nischen nahm (in der die Windkraft und Photovoltaik entwickelt wurden) und andererseits insbesondere über die Gründung von Energiegenossenschaften durch regionale Akteure vorgeprägt wurde. Im Sinn der MLP war eine umfassende Leitbildveränderung (oberste Ebene) erforderlich, die Nischenakteure veranlasst hat, mit neuen Technologien alternative Entwicklungspfade voranzutreiben welche später, nicht zuletzt unter dem Leitbild einer Nachhaltigen Entwicklung, wirkmächtig wurden. Zugleich wurde auf der regionalen Ebene zum Beispiel mit dem Beispiel Schönau (Stadtwerke) deutlich, dass regionale Handlungsmöglichkeiten existieren, womit Handlungsoptionen dezentraler Akteure deutlich wurden. Das Vorbild Schönau hatte im Übrigen auch in einer der beiden Fallstudienregionen einen wesentlichen Einfluss auf die Energiewendeaktivitäten. Das Leitbild der Nachhaltigen Entwicklung wurde vor dem Hintergrund der Klimaproblematik mit Blick auf das Energiesystem in Deutschland stark mit den EE verbunden

und z.T. auch mit regionaler Selbstversorgung. Letztere hat, nicht allein über das Leitbild, sondern auch über die zum Einsatz kommenden Instrumente, starke Impulse) sowohl auf der nationalen Ebene als auch in den Regionen ausgelöst. In Verbindung mit den staatlichen Förderinstrumenten wurden in der Folge auch technologische Dynamiken ausgelöst.

Die deutsche Energiewende war aber auch von den generellen Liberalisierungsbemühungen der EU-Kommission beeinflusst, die die „incumbents“ des bestehenden Energiesystems maßgeblich schwächten (u.a. Trennung von Produktion und Vertrieb) und dazu führten, dass die regionalen Monopole in Frage gestellt wurden. Schließlich wurde mit dem EEG ein machtvolles Instrument geschaffen, das zudem so ausgestaltet war, dass es dezentralen Akteuren Zugangsmöglichkeiten zum Markt ermöglichte (Stichwort Energiegenossenschaften). Fast zeitgleich wurden durch die Finanzkrise 2008 rentable Anlagemöglichkeiten knapp, dies mit der Folge, dass Investitionen in EE, aufgrund der Ausgestaltung des EEG, hochgradig attraktiv wurden.

Im Ergebnis wird daraus deutlich, dass die Beeinflussung des Energiesystems bzw. des Innovationssystem auf vielfältigen Ebenen stattfand und stattfinden muss, wobei die Modelle des MLP aber auch des Schildkröten-Modells als Heuristik als durchaus geeignet erwiesen haben. Es hat sich aber auch heraus gestellt, dass diese Heuristiken auch sehr vereinfachend sind, da das sozio-technische Regime keineswegs einheitlich strukturiert ist, sondern sich aus unterschiedlichen Teilsystemen mit vielfältigen (Teil-)Arenen und Konflikten zusammensetzt. Wie die konkreten Konstellationen und die Veränderungen der Teilsysteme dann wiederum auf das Gesamtsystem und dessen Innovationsrichtung auswirken, ist nicht eindeutig zu klären. Dies gilt dabei weniger mit Blick auf die Treibhausgas-Emissionen, als vielmehr insbes. für die (resilienten) Strukturen.

Insofern geht es ganz entscheidend um die Frage der Gestaltung von Prozessen für die Transformation des Energiesystems und insbesondere auch um die Frage der Entwicklung eines Resilienten Energiesystems. Dabei sind unterschiedliche Ebenen zu betrachten, es sind sehr unterschiedliche Arenen zu bespielen, und es müssen entsprechend differenzierte (Akteurs-)Analysen vorgenommen werden.

Zugleich ist aber auch festzuhalten, dass eine abstrakte Analyse und Ausgestaltung, wie sie mit der Erarbeitung der Leitkonzepte Resilientes System und Resilientes Energiesystem verbunden war, nur begrenzt handlungsorientierend wirksam wird. Dies bedeutet auch, dass der analytische Zugang, beispielsweise zu Fragen der Transformation des Energiesystems, je nach Fragestellung und Ansatzpunkt unterschiedlich zugeschnitten sein muss.

Im Rahmen der Studie wurde dementsprechend unterschiedlich vorgegangen. Zwar wurde die Transformation des Energiesystems als Ganzes thematisiert, allerdings wurden in den Fallstudien jeweils Vertiefungen, Konkretisierungen und Operationalisierungen vorgenommen, die

darauf abzielten „Teilsysteme“ zu erfassen und zu verstehen und aus diesem Verständnis heraus Handlungsempfehlungen abzuleiten. In der Analyse der Teilsysteme wird allerdings immer auch Bezug auf weitere Systeme oder das Gesamtsystem genommen, um die Rahmenbedingungen und Entwicklungsperspektiven der Teilsysteme ausloten zu können.

4.3.3 Fallstudien

Es ist darauf hinzuweisen, dass sowohl das Schildkrötenmodell als auch MLP jeweils Erweiterungen benötigen und zwar dahingehend, dass Pfade künftiger Entwicklungen, die Bedingungen für Nischentechnologien und deren „upscaling“ ausgelotet werden.

Im Rahmen des Projektes RESYSTRA wurde in der Fallstudie „Power-to-Fuel“ (P2F) eine Integration von Schildkröte und MLP realisiert, in dem die zeitpunktbezogene Analyse des sozio-technischen Systems durchgeführt wurde (bzw. des sozio-technischen Regimes der P2F-Technologien) und in der Folge die „internen“ Erfordernisse des sektoralen sozio-technischen Regimes in der Verbindung mit den (erforderlichen) Entwicklungsdynamiken des sozio-technischen Energieregimes auf der Zeitachse in Verbindung gebracht wurden. Damit konnte die MLP spezifische beantwortet werden, unter welchen Bedingungen sich die P2F-Technologien aus der Nische heraus bewegen und in den Markt integrieren können. Im Rahmen von Resystra konnte diese Frage nach relevanten Voraussetzungen und Konstellationen über den Aufbau eines Multi-Agentensystem ausgelotet werden, mit welchem sowohl die Akteure als auch die Technologien und deren Entwicklungsdynamiken (u.a. Lernkurven) in dynamischer (auch zeitlicher) Perspektive in den Vordergrund rückten. Mit Blick auf die Fallstudie „P2F“ konnte ebenfalls aufgezeigt werden, dass die jeweiligen Kontexte der Entwicklung und Förderung dieser Technologien von sehr unterschiedlichen Akteuren und Akteurskonstellationen abhängen. An dieser Technologie und der Technologieentwicklung sind gegenwärtig eine Vielzahl von Akteuren beteiligt, die einerseits die Technologieentwicklung selbst vorantreiben und andererseits kontinuierlich nach Gelegenheitsfenstern der Förderung in unterschiedlichen Feldern Ausschau halten (müssen): Angefangen von der Möglichkeit als „grüne“ Technologie anerkannt zu sein und damit zugleich in die jeweiligen Förderschemata zu passen, bis hin zu der Auslotung der Möglichkeiten der Infrastrukturentwicklung. Auch in diesem Bereich ist festzustellen, dass Impulse oder Handlungsmöglichkeiten in den unterschiedlichen Akteurssettings auf den unterschiedlichen Ebenen erforderlich sind.

Aus den im Rahmen von Resystra ebenfalls durchgeführten regionalen Fallstudien konnte zudem herausgearbeitet werden, dass bestimmte Konstellationen, sowohl der Akteure als auch der Technologien, für die Gestaltung eines Resilienten Energiesystems fördernd oder auch hinderlich sein können. Ohne an dieser Stelle die fördernden bzw. hemmenden Faktoren vollständig benennen zu wollen, ist doch aus den regionalen Fallstudien deutlich geworden, dass beispielsweise die Akteure auf der regionalen Ebene insbesondere dann gestaltenden Einfluss

auf die regionale Energiewende nehmen können, wenn die regionale Aktionsfähigkeit gegeben ist, dadurch dass regionale Vorstellungen über die Entwicklungsrichtungen synchronisiert werden können, und eine gemeinsam geteilte Leitorientierung mehr oder weniger explizit existiert. In den beiden regionalen Fallstudien wurde deutlich, dass in den Regionen handlungsfähige Akteure existierten, die den Energiewendeprozess regional vorantreiben wollen, und die zugleich in der Lage waren, die Vorstellung eines Resilienten Energiesystems in ihre konkreten Handlungskontexte zu übertragen und somit im Grundsatz handlungsorientierend zu machen. Einschränkend muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass die lokalen oder regionalen Möglichkeiten zur Entwicklung eines Resilienten Energiesystems begrenzt sind, es kommt mithin entscheidend auf die Gestaltung der Rahmenbedingungen an, inwieweit sich entsprechende Konzepte in Wert setzen lassen. Gleichwohl konnte aufgezeigt werden, dass auch innerhalb der bestehenden Rahmenbedingungen Handlungsspielräume bestehen, in denen die Idee der Resilienz bzw. des Resilienten Energiesystems anschlussfähig für die regionalen Akteure werden kann und damit zu mindestens Impulse für die Entwicklung eines Resilienten Energiesystems setzt.

In der Summe ist letztlich entscheidend, inwieweit regionale Akteure unternehmerisch handlungsfähig sind, um die regionalen Möglichkeiten der Energiewende (Stichwort: Wertschöpfung in der Region halten) tatsächlich zu erschließen zu können. In Wolfhagen ist dies weitgehend gelungen, in Osterholz hingegen nicht. Dies, obgleich sich die Leitbilder für eine Energiewende in beiden Regionen durchaus ähnlich waren. Im Vergleich zu Wolfhagen fehlten in Osterholz die frühzeitig handlungsfähigen, regionalen und unternehmerischen Akteure. Die Erschließung der Potenziale der Energiewende gelang auch in Osterholz, allerdings überwiegend durch regionsexterne Akteuren. Mit Blick auf die regionale Ebene, aber auch den technologischen Ebenen bspw. „alternativer“ Energien ist festzustellen, dass diese Leitorientierungen „alternativ“ zu den bislang verfolgten Pfaden des fossil-atomaren Komplexes entwickelt wurden und dessen Leitorientierungen delegitimiert haben. Die Ereignisse von Fukushima stellten vor dem Hintergrund ein Gelegenheitsfenster dar, ein relativ stabiles sozio-technisches System zu destabilisieren und damit neue Entwicklungspfade zu ermöglichen. Anzumerken bleibt allerdings, dass die Möglichkeit dieses „shifts“ einen langen zeitlichen und diskursiven Vorlauf hatte.

In den Regionalstudien wurde das Leitkonzept Resilientes Energiesystem zur besseren Anschlussfähigkeit herunter gebrochen auf das Leitkonzept eines „Zellulären Energiesystem. Dabei wurde deutlich, dass das Leitkonzept „Zelluläres Energiesystem“ in den regionalen Kontexten durchaus anschlussfähig ist, dass aber die grundlegenden Voraussetzungen für seine Umsetzung mit Blick auf die Kompetenzen in den Regionen letztlich nicht oder nur partiell gegeben sind. So ist zwar die Idee des Zellulären Energiesystems an das in den untersuchten

Regionen bisher vorherrschende Leitkonzept der regionalen Selbstversorgung durchaus anschlussfähig, allerdings wäre es zu seiner Umsetzung erforderlich die Strukturen des Stromsystems weitgehend umzubauen, wobei Zellularität (insbesondere die Ausdehnung der Zellen) keineswegs mit den untersuchten Regionen oder Verwaltungseinheiten in Übereinstimmung stehen müssen.

Geht man von der Multi-Level-Perspektive aus, dann wird deutlich, dass die Gestaltung der Rahmenbedingungen essentiell für den Erfolg der Energiewende in der Breite war und ist. Es entwickeln sich Nischen unter spezifischen Konstellationen zu „Vorreitern“. Diese eröffnen zwar Möglichkeitsräume, die Umsetzung in der Breite erweist sich allerdings in starkem Maß abhängig von der Ausgestaltung der Rahmenbedingungen, die nicht oder nur begrenzt von der regionalen Ebene beeinflusst werden können. Insofern kommt es auf die dynamische Interaktion von Vorreitern bzw. Nischenakteuren (auf der regionalen oder auch der technologischen Ebene) mit den gesellschaftlichen Resonanzräumen und den regulativen Rahmensetzern an, die entsprechende Entwicklungen ermöglichen können. Erst in dieser Kombination können offenbar hinreichende Impulse zum Wandel des oder der sozio-technischen Regime erzeugt werden, dies gilt vor allem für hochregulierte Bereiche wie das Energiesystem.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass (generell formuliert) in Mehrebenensystemen wie in Deutschland, das selbst wiederum in die EU-Regularien eingebettet ist, höchst komplexe Interaktionen zwischen den unterschiedlichen Ebenen bestehen. Sie werden durch technologische und politische Entwicklungen jeweils neu konfiguriert, wobei die gegenseitigen Abhängigkeiten offenbar werden. Ein Resilientes Energiesystem, wenn es wie hier in der Struktur eines Zellulären Energiesystems getestet wird, kann letztlich nur über eine Ebenen übergreifende Kooperation realisiert werden. Gleichwohl erweist sich die Rolle von Vorreitern als essentiell, die sie die Machbarkeit bestimmter Entwicklungsvorstellungen aufzeigen und damit die Legitimation dieser alternativen Pfade stärken. Im Europäischen Mehrebenensystem erscheint es allerdings zunehmend schwieriger zu werden, alternative Pfade zu entwickeln (vgl. die Auseinandersetzungen um die jeweiligen Reformen des EEG), gleichwohl hat sich auch die EU den Klimazielen, wie sie im Pariser Abkommen festgelegt wurden, verpflichtet. Die dadurch erforderlichen Wandelsnotwendigkeiten erscheinen zwar als generell anerkannt, die jeweiligen konkreten Pfade sind allerdings noch weitgehend offen. Ob die Ansätze der EU, wie die Schaffung eines Binnenmarkts für Energie, mit zellulären Systemen in Übereinstimmung zu bringen sind, dürfte zumindest gegenwärtig in Frage stehen.

4.4 Literatur Kapitel 4

Ahrens, A. & Gleich, A. von. (2002). *Leitbilder in der Chemikalienentwicklung und Stoffpolitik* (Bericht vom SubChem-Workshop), Hamburg. http://www.tecdesign.uni-bremen.de/subchem/pdf/Reader_Herbst_WS_aktuell_4_03.pdf. Zugegriffen Januar 2012.

Ahrens, A., Braun, A., Gleich, A. von, Heitmann, K., Lißner, L., Effinger, A., Weiß, M. & Wölk, C. (2006). *Hazardous chemicals in products and processes. Substitution as an innovative process* (Sustainability and innovation). Heidelberg, New York: Physica-Verlag.

Antes, R., Eisenack, K. & Fichter, K. (2012). Wirtschaftswissenschaftliche Ansätze zur Gestaltung von Wandlungsprozessen. *Ökologisches Wirtschaften* (3), 35–39.

Arthur, W. B. (1989). Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-In by Historical Events. *The Economic Journal 99* (394), 116. doi:10.2307/2234208

Arthur, W. B. (1994). *Increasing returns and path dependence in the economy* (Economics, cognition and society). Ann Arbor Mich.: Univ. of Michigan Press.

Bergmann, G. & Daub, J. (2008). *Systemisches Innovations- und Kompetenzmanagement. Grundlagen - Prozesse - Perspektiven* (Lehrbuch, 2., aktualisierte Aufl.). Wiesbaden: Gabler.

Beucker, S., Brand, F., Fichter, K. & Gleich, A. von. (Mai 2011). *Leitorientiertes integriertes Roadmapping. Bremen* (nodwest2050-Werkstattberichte), Bremen/Oldenburg.

Bijker, W. E., Hughes, T. P. & Pinch, T. J. (Hrsg.). (1987). *The social construction of technological systems. New directions in the sociology and history of technology* (12. pr). Cambridge, Mass.: MIT Press.

Bloch, E. (1985). *Das Prinzip Hoffnung in fünf Teilen* (Suhrkamp Taschenbuch Wissenschaft, Bd. 554, 1. Aufl.). Frankfurt: Suhrkamp.

Bluszcz, O. (07.2010). *Grundlagen der Innovation. Grundlegendes zu Innovationsprozessen in Unternehmen*. Arbeitspapier aus dem Verbundprojekt MICC Working-Paper Nr11 (Universität Duisburg - Essen, Hrsg.). : Fakultät für Bildungswissenschaften. http://micc-project.org/wp-content/uploads/MICC_WP_11_Grundlagenpapier-Innovation1.pdf.

Boxsel, J. A. M. (1991). Konstruktive Technikfolgenabschätzung in den Niederlanden. In K. Kornwachs (Hrsg.), *Reichweite und Potential der Technikfolgenabschätzung* (S. 137–154). Stuttgart: C.E. Poeschel-Verlag.

Brand, U. (2013). *Abschlussbericht zum Umsetzungsbaustein 1: "Schaffung von gemeinsamer Identität und Verantwortung der Bewohner durch energie- und kosteneffiziente Sanierungs- und Entwicklungsplanung" – Teilprojekt: Analyse und prozessbegleitende Untersuchung der richtungsgebenden Einflussfaktoren. Projekt ZukunftsWerkStadt Leutkirch*. http://www.tecdesign.uni-bremen.de/typo3/fileadmin/user_upload/Ver%C3%B6ffentlichungen/ZukunftsWerkStadt_Leutkich_UniHB_VS2.pdf. Zugegriffen 01.04.2016.

Brand, U. (2016). *Leitkonzepte Nachhaltigkeit und Resilienz als Richtungsgeber in Transformationsprozessen von Energiesystemen*. Dissertation, Universität Bremen. Bremen.

Brand, U. & Gleich, A. von. (2012) Leitorientierte Technologie- und Systemgestaltung als Beitrag zur Umsetzung des Vorsorgeprinzips. In S. Bröchler, G. Aichholzer & P. Schaper-Rinkel (Hrsg.), *Theorie und Praxis von Technology Governance* (S. 49–64). Wien.

Brand, U. & Gleich, A. von. (2015). Transformation toward a Secure and Precaution-Oriented Energy System with the Guiding Concept of Resilience—Implementation of Low-Exergy Solutions in Northwestern Germany. *Energies 8* (7), 6995–7019. doi:10.3390/en8076995

Brand, U., Petschow, U., Fettke, U., Fuchs, G., Pissarskoi, E. & Kljajic, M. (2015). Empirische Analysen von Zielen, Mitteln, Strategien und Leitorientierungen. In J. Wachsmuth, U. Petschow, U. Brand, U. Fettke, E. Pissarskoi, G. Fuchs et al. (Hrsg.), *Richtungsgebende Einflussfaktoren im Spannungsfeld von zentralen vs. dezentralen Orientierungen bei der*

Energiewende und Ansatzpunkte für ein Leitkonzept Resilienz. RESYSTRA-Diskussionspapier 1. (S. 48–63). Bremen/Berlin.

Canzler, W. & Dierkes, M. (2000). Informationelle Techniksteuerung: öffentliche Diskurse und Leitbildentwicklungen. *Politische Vierteljahresschrift, Sonderheft Politik und Technik 41* (31), 457–475.

Canzler, W., Grundmann, P., Leibenath, M., Moss, T., Quitzow, L. & Rave, T. (2016). Special section on German Energiewende. *Utilities Policy* (41), 1–264.

Constanza, R. (2000). Visions of alternative (unpredictable) futures and their use in policy analysis. *Conservation Ecology 4* (1), 5–22.

David, P. A. (1995). Clio and the Economics of QWERTY. *The American Economic Review 75* (2), 332–337. http://www.jstor.org/stable/1805621.

Dierkes, M., Hoffmann, U. & Marz, L. (1992). *Leitbild und Technik. Zur Entstehung und Steuerung technischer Innovationen*. Berlin: Edition Sigma.

Dierkes, M., Canzler, W., Marz, L. & Knie, A. (1995). Politik und Technikgenese. *Verbund Sozialwissenschaftliche Technikforschung. Mitteilungen* (15/1995), 7–28.

Dierkes, M. & Canzler, W. (1998). Technikgenese und politische Steuerung. In C. Wächter (Hrsg.), *Technik gestalten. Interdisziplinäre Beiträge zu Technikforschung und Technologiepolitik* (Technik- und Wissenschaftsforschung, Bd. 31, S. 23–25). München: Profil.

Dosi, G., Pavitt, K. & Soete, L. (1990). *The economics of technical change and international trade*. New York, NY: Harvester Wheatsheaf.

Eulenhöfer, P. (1996). Leitbilder in der Genese der Theorie der Programmiersprache? In H. D. Hellige (Hrsg.), *Technikleitbilder auf dem Prüfstand. Leitbild-Assessment aus Sicht der Informatik- und Computergeschichte* (S. 99–113). Berlin: Edition Sigma.

Fichter, K. (2005). *Interpreneurship. Nachhaltigkeitsinnovationen in interaktiven Perspektiven eines vernetzenden Unternehmertums* (Theorie der Unternehmung, Bd. 33). Marburg: Metropolis-Verl.

Fichter, K., Hintemann, R. & Stecher, T. (2010) Leitakteure: Richtungsgebende Schlüsselakteure. In K. Fichter, A. von Gleich, R. Pfriem & B. Siebenhüner (Hrsg.), *Theoretische Grundlagen für Klimaanpassungsstrategien* (S. 157–165). Bremen/Oldenburg.

Foxon, T. J., Hammond, G. P. & Pearson, P. J. (2010). Developing transition pathways for a low carbon electricity system in the UK. *Technological Forecasting and Social Change 77* (8), 1203–1213. doi:10.1016/j.techfore.2010.04.002

Freeman, C. (1995). The 'National System of Innovation' in historical perspective. *Cambridge Journal of Economics 19* (1). doi:10.1093/oxfordjournals.cje.a035309

Fuhrmann, M. (1982). *Poetik (Griechisch / Deutsch)* (Universal-Bibliothek, 7828 [2]. Stuttgart: Philipp Reclam.

Geels, F. W. (2004). Understanding system innovations: a critical literature review and a conceptual synthesis. In B. Elzen, F. W. Geels & K. Green (Hrsg.), *System innovation and the transition to sustainability: theory, evidence and policy* (S. 19–47). Cheltenham: Edward Elgar.

Geels, F. W. & Schot, J. (2007). Typology of sociotechnical transition pathways. *Research Policy 36* (3), 399–417. doi:10.1016/j.respol.2007.01.003

Giesel, K. D. (2007). *Leitbilder in den Sozialwissenschaften. Begriffe, Theorien und Forschungskonzepte* (1. Aufl.). Wiesbaden: VS, Verl. für Sozialwiss.

Gleich, A. von, Brand, U., Stührmann, S., Gößling-Reisemann, S. & Lutz-Kunisch, B. (2010) Leitorientierte Technologie- und Systemgestaltung. In K. Fichter, A. von Gleich, R. Pfriem

& B. Siebenhüner (Hrsg.), *Theoretische Grundlagen für Klimaanpassungsstrategien* (S. 130–139). Bremen/Oldenburg.

Grießhammer, R. & Brohmann, B. (09/2015). *Wie Transformationen und gesellschaftliche Innovationen gelingen können*: UBA. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/wie_transformationen_und_gesellschaftliche_innovationen_gelingen_koennen.pdf. Zugegriffen 30.04.2016.

Guston, D. H. & Sarewitz, D. (2002). Real-time technology assessment. *Technology in Society 24* (1-2), 93–109. doi:10.1016/S0160-791X(01)00047-1

Hauschildt, J., Gemünden, H. G. & Witte, E. (1999). *Promotoren. Champions der Innovation* (2. Aufl.). Wiesbaden: Gabler.

Hekkert, M. P., Suurs, R., Negro, S. O., Kuhlmann, S. & Smits, R. (2007). Functions of innovation systems. A new approach for analysing technological change. *Technological Forecasting and Social Change 74* (4), 413–432. doi:10.1016/j.techfore.2006.03.002

Hellige, H. D. (1993). Von der programmatischen zur empirischen Technikgeneseforschung. Ein technikhistorisches Analyseinstrumentarium für die prospektive Technikbewertung. *Technikgeschichte 60* (3), 186–223.

Hemmelskamp, J. (1999). *Umweltpolitik und technischer Fortschritt. Eine theoretische und empirische Untersuchung der Determinanten von Umweltinnovationen : mit 44 Tabellen*. Heidelberg: Physica-Verlag.

Jacobsson, S. & Bergek, A. (2011). Innovation system analyses and sustainability transitions. Contributions and suggestions for research. *Environmental Innovation and Societal Transitions 1* (1), 41–57. doi:10.1016/j.eist.2011.04.006

Jischa, M. F. (2005). *Herausforderung Zukunft. Technischer Fortschritt und Globalisierung* (2., Aufl.). München: Elsevier, Spektrum, Akad. Verl.

Kant, I. (1900-). *Gesammelte Schriften*. Berlin: De Gruyter.

Kaschny, M., Nolden, M. & Schreuder, S. (2015). *Innovationsmanagement im Mittelstand. Strategien, Implementierung, Praxisbeispiele* (SpringerLink : Bücher). Wiesbaden: Springer Gabler.

Kemp, R., Schot, J. W. & Hoogma, R. (1998). Regime shifts to sustainablilty through processes of niche formation: the approach of strategic niche management. *Technology analysis and strategic management 10* (2), 175–196.

Klemmer, P., Lehr, U. & Löbbe, K. (1999). *Umweltinnovationen. Anreize und Hemmnisse* (Innovative Wirkungen umweltpolitischer Instrumente, Bd. 2, 1. Aufl.). Berlin: Analytica.

Kline. (1985). Research, Invention, Innovation and Production: Models and Reality. *Report INN-1*.

Leggewie, C. & David, M. (2015). *Kultureller Wandel in Richtung gesellschaftliche Nachhaltigkeit*. Essen: Arbeitspapier KWI.

Lindner, R., Daimer, S., Beckert, B., Heyen, N., Koehler, J., Teufel, B., Warnke, P. & Wydra, S. (7.2016). *Addressing directionality: Orientation failure and the systems of innovation heuristic. Towards reflexive governance* (Fraunhofer ISI, Hrsg.), Karlsruhe. http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/p/de/diskpap_innosysteme_policyanalyse/discussionpaper_52_2016.pdf.

Lockwood, M., Kuzemko, C., Mitchell, C. & Hoggett, R. (7.2013). *Theorising governance and innovation in sustainable energy transitions. EPG Working Paper: 1304* (IGov, Hrsg.): University of Exeter. http://projects.exeter.ac.uk/igov/wp-content/uploads/2013/07/WP4-IGov-theroy-of-change.pdf.

Lundvall, B.-Å. (2010). *National systems of innovation. Toward a theory of innovation and interactive learning* (The Anthem Other Canon series). London: Anthem.

Maaß, S. (1994). Maschine, Partner, Medium, Welt. Eine Leitbildgeschichte der Software-Ergonomie. In H. D. Hellige (Hrsg.), *Leitbilder der Informatik- und Computer-Entwicklung* (artec-Paper, Bd. 33, S. 329–342). Bremen.

Mambrey, P., Paetau, M. & Tepper, A. (1995). *Technikentwicklung durch Leitbilder. Neue Steuerungs- und Bewertungsinstrumente*. Frankfurt/Main [u.a.]: Campus-Verl.

Markard, J., Raven, R. & Truffer, B. (2012). Sustainability transitions. An emerging field of research and its prospects. *Research Policy 41* (6), 955–967. doi:10.1016/j.respol.2012.02.013

Nünning, V. & Nünning, A. (2002). *Erzähltheorie transgenerisch, intermedial, interdisziplinär* (WVT-Handbücher zum literaturwissenschaftlichen Studium, Bd. 5). Trier: WVT.

OECD. Oslo Manual. http://www.oecd.org/science/inno/2367580.pdf.

Rip, A. & Kulve, H. t. (2008). Constructive Technology Assessment and Socio-Technical Scenarios. In E. Fisher, C. Selin & J. M. Wetmore (Hrsg.), *The Yearbook of Nanotechnology in Society, Volume I: Presenting Futures* (The Yearbook of Nanotechnology in Society, Volume I, Bd. 1). Dordrecht: Springer Science+Business Media B.V.

Rip, A., Misa, T. J. & Schot, J. (1995). *Managing technology in society. The approach of constructive technology assessment*. London: Pinter Publishers; Distributed in the United States by St. Martin's Press.

Rotmans, J. & Loorbach, D. (2010). Towards a better understanding of transitions and their governance. A systemic and reflexive approach. In J. Grin, J. Rotmans & J. W. Schot (Hrsg.), *Transitions to sustainable development. New directions in the study of long term transformative change* (Routledge studies in sustainability transitions, S. 105–220). New York: Routledge.

Schneidewind, U. & Scheck, H. (2012). Zur Transformation des Energiesektors – ein Blick aus der Perspektive der Transition- Forschung. In H.-G. Servatius, U. Schneidewind & D. Rohlfing (Hrsg.), *Smart Energy. Wandel zu einem nachhaltigen Energiesystem* (SpringerLink : Bücher, S. 45–61). Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Schomberg, R. von. (2013). A vision of responsible innovation. In R. Owen, M. Heintz & J. Bessant (Hrsg.), *Responsible Innovation.* London: Wiley.

Schot, J. W. & Rip, A. (1997). The Past and Future of Constructive Technology Assessment. *Technological Forecasting & Social Change* (54), 251–268.

Schumpeter, J. A. (2005). *Kapitalismus, Sozialismus und Demokratie* (UTB, Bd. 172, 8., unveränd. Aufl.). Tübingen u.a.: Francke.

Schumpeter, J. A. (2006). *Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung* (Nachdr. der 1. Aufl. von 1912 / hrsg. und erg. um eine Einf. von Jochen Röpke und Olaf Stiller). Berlin: Duncker & Humblot.

Soete, L. (1991). *National support policies for strategic industries: The international implications, Strategic Industries in a Global Economy. Policy Issues for the 1990s* (OECD International Futures Programme, Hrsg.). Paris: OECD.

Stührmann, S., Gleich, A. von, Brand, U. & Gößling-Reisemann, S. (2012). Mit dem Leitkonzept Resilienz auf dem Weg zu resilienteren Energieinfrastrukturen. In M. Decker, A. Grunwald & M. Knapp (Hrsg.), *Der Systemblick auf Innovation - Technikfolgenabschätzung in der Technikgestaltung* (Gesellschaft – Technik – Umwelt, Bd. 16, S. 181–192). Berlin: Edition Sigma.

Tepper, A. (1994). Computer für jeden und alles. Zur Rolle von Leitbildern in der Entwicklungsgeschichte des Personalcomputers. In H. D. Hellige (Hrsg.), *Leitbilder der Informatik- und Computer-Entwicklung* (artec-Paper, Bd. 33, S. 345–375). Bremen.

van Lente, H. & Rip, A. (1998). Expectations in technological developments: an example of prospective structures to be filled in by agency. In C. Disco & B. van der Meulen (Hrsg.), *Getting new technologies together. Studies in making sociotechnical order* (De Gruyter studies in organization : innovation, technology, and organization, Bd. 82, S. 203–229). New York: Walter de Gruyter.

Voß, J.-P., Bauknecht, D. & Kemp, R. (Hrsg.). (2006). *Reflexive governance for sustainable development*. Cheltenham: Elgar.

WBGU. (2011). *Welt im Wandel: Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation. [Hauptgutachten]* (Welt im Wandel). Berlin: Wiss. Beirat d. Bundesregierung Globale Umweltveränderungen.

5 Methoden

5.1 Einleitung

Zwei Hauptstränge kennzeichnen die Arbeiten im Projekt Resystra. Dies ist zum einen die Arbeit an der Zielperspektive. Die Leitkonzepte Resiliente Systeme und Resiliente Energiesysteme wurden gespeist durch einen biomimetischen Ansatz, basierend auf Evolutions- und Ökosystemtheorien sowie durch eine Analyse von Risikomanagementkonzepten und –Maßnahmen mit Fokus auf Kritischen Infrastrukturen. Die Gestaltungsleitbilder in den beiden regionalen Fallstudien Osterholz und Wolfhagen bekamen zusätzliche Impulse durch die Systemanalysen, bei denen der Analyse von Wertschöpfungseffekten (modellbasierte Wertschöpfungsanalyse) eine wichtige Funktion zukam. Ein wesentlicher Grund dafür lag darin, dass sich die Akteure in den beiden Energieregionen insbesondere eine Verbesserung der regionalen Wertschöpfung versprachen. Weitere wichtige Impulse für die Gestaltungsleitbilder kamen aus den Vulnerabilitätsanalysen der jeweiligen Energiesysteme, durch das Aufgreifen der soziotechnologie-politischen Option ‚zellulares System' und nicht zuletzt durch die Partizipationsprozesse mit den Stakeholdern. Das Gestaltungsleitbild Power-to-Fuel bekam ebenfalls zusätzliche Impulse durch Szenarien basierte System- und Vulnerabilitätsanalysen auf nationaler Ebene (klimaverträgliche Mobilität in der Zukunft), durch eine Analyse der Technologieoptionen im Bereich Power-to-Fuel sowie durch Partizipationsprozesse mit den Stakeholdern in diesem Bereich. Vor allem der Methodik der Vulnerabilitätsanalyse wird besondere Aufmerksamkeit gewidmet.

Auch der zweite Hauptstrang, das Arbeiten an den Transformationsmöglichkeiten der Energiesysteme, besteht aus einem Schritt der Theorieentwicklung und einem darauf aufbauenden umsetzungsorientierten Schritt. Im Bereich der Innovations- und Transformationsforschung stand die Weiterentwicklung und ‚Füllung' des Schildkrötenmodells mit den richtungsgebenden Einflussfaktoren im Rahmen einer Leitorientierungsanalyse im Zentrum, ebenso das Multi-Level-Modell mit der Frage, wie Power-to-Fuel aus der Nische kommen kann und schließlich Ansätze zur Integration der beiden Modelle. In allen drei Fallbeispielen spielten die Akteursanalysen mit Leitfadeninterviews partizipative Prozesse in Form von Workshops sowie Modelle eine zentrale Rolle, die letztgenannten in Form von modell- und Szenario basierten Wertschöpfungsanalysen, von Szenarien basierten Entwicklungsmodellen resilienterer Energiesysteme in den Regionen und in Form eines agentenbasierten Modells des Transformationsprozesses im Bereich Power-to-Fuel. Auf die Methoden der Leitorientierungsanalyse, der Akteursanalyse (qualitative Inhaltsanalyse der Leitfadeninterviews), der Wertschöpfungsanalyse sowie auf die agentenbasierte Modellierung wird in diesem Methodenkapitel näher eingegangen.

5.2 Erhebungsmethoden für die Analyse des Transformationsprozesses in den Fallstudien

Im Projekt wurden zwei Typen von Fallstudien betrachtet. Zum einen Regionen, Osterholz und Wolfhagen, und zum anderen die Technologie strombasierte synthetische Kraftstoffe (P2F). Zur Analyse des Energiewende-bezogenen Transformationsprozesses, der Bedeutung von Resilienz in diesem Prozess und der Umsetzung von Resilienz fördernden Maßnahmen in den Fallstudien wurden

- Dokumentenanalysen,
- Workshops, sowie
- leitfadengestützte Interviews

durchgeführt. Diese Methoden werden im Folgenden beschrieben.

5.2.1 Dokumentenanalysen

Während der gesamten Untersuchung wurden Analysen von Dokumenten durchgeführt. Sie dienten der

1.) retrospektiven Untersuchung des Energiewendeprozesses und ihrem Bezug zur Leitkonzeptidee Resilienz,
2.) Analyse des Energiesystems der Fallstudienregionen Osterholz und Wolfhagen sowie der Ermittlung von technischen Parametern und Systemeigenschaften von P2F als Grundlage einer Modellierung,
3.) Identifizierung möglicher Interviewpartner für die vorgesehenen Leitfadeninterviews sowie einer tiefergehenden Recherche ihrer Aktivitäten,
4.) Identifizierung von Richtungsimpulsen mit Bezug zu Resilienz erhöhenden Maßnahmen.

In die Dokumentenanalyse konnten frei zugängliche Dokumente (z.B. Internetdokumente, Presseartikel) sowie begrenzt zugängliche Dokumente (z.B. Gemeinderatsprotokolle, wissenschaftliche Arbeiten wie Studien) herangezogen werden.

5.2.2 Partizipationsprozesse - Workshops und Treffen mit Akteuren in den Fallstudien

Zur Anbahnung und Durchführung der Fallstudien fanden mehrere Treffen mit einflussreichen Akteuren statt, insbesondere mit Vertretern der regionalen Energieversorger, der Stadt und des Landkreises, Handwerksbetrieben, Installateursbetrieben, Ingenieurbüros und Unternehmen, ansässigen Genossenschaften und aktiven Privatpersonen (siehe im Detail die Kapitel zu den Akteursanalysen in den jeweiligen Fallstudien).

In den beiden Fallstudienregionen wurden jeweils zwei Workshops durchgeführt. Die ersten Treffen dienten der Vorstellung der Projektziele und der Bedeutung von Resilienz für die zukünftige Gestaltung der Energieversorgung. Ziele der Workshops waren Rückmeldungen zu

den vorgestellten Arbeiten, eine frühe Einbindung der regionalen Akteure und Erfassung der Stimmungen, Tendenzen und Leitorientierungen der Akteure in den Regionen. Die ersten Workshops in den Fallstudienregionen Ende des Jahres 2015 waren darauf ausgerichtet, die Bedeutung der Begriffe Resilienz und Vulnerabilität unter maßgeblichen regionalen Akteuren (25 bzw. 12 Teilnehmern aus unterschiedlichen Feldern) bekannt zu machen. Zudem sollten die technischen und sozialen Faktoren mit Bedeutung für die Vulnerabilität bzw. Resilienz der regionalen Energieversorgung aus der Perspektive der Akteure in Erfahrung gebracht werden. Intendiert war damit eine Sensibilisierung für potentielle zukünftige Schwachstellen aber auch für mögliche Lösungsansätze. Um dies zu erreichen, war der Workshop interaktiv gestaltet. Neben Input der Wissenschaftler gab es ausreichend Raum für Feedback und Diskussionen. Hierfür wurde ein Fragen-Set erarbeitet (siehe Anhang 10.2.2), welches im Workshop von den Teilnehmern beantwortet wurde. Die Ergebnisse flossen in die weiteren Arbeiten ein und bildeten eine wichtige Grundlage für die Erarbeitung des Gestaltungsleitbildes.

Im Vordergrund der zweiten Workshops Mitte des Jahres 2016 (4 bzw. 6 Teilnehmer aus den Regionen) stand die Vorstellung der Ergebnisse der Wertschöpfungsanalyse, der Modellierung, der Vulnerabilitätsanalyse für die Fallstudienregionen sowie eine Diskussion der Gestaltungsleitbilder inklusive Handlungsvorschläge und Maßnahmen für eine ‚Resiliente Energieversorgung' in den Regionen. Des Weiteren wurden anhand der im Schildkrötenmodell dargestellten relevanten richtungsgebenden Impulse, Transformationsoptionen diskutiert.

In der Fallstudie P2F wurden insgesamt 3 Workshops im Jahr 2015 durchgeführt. Sie dienten dazu, den aktuellen Forschungsstand zu ermitteln und ein Akteurs- und Expertennetzwerk aufzubauen. Daneben sollten während der Workshops inputbasiert (bottom-up approach) die Fragestellung und die Modellkonfiguration ermittelt sowie ein Expertenfeedback zu einem ersten Entwurf des Modells mit den getroffenen Annahmen eingeholt werden. Die Workshops waren mit 25, 12 und 30 Teilnehmern aus allen P2F-relevanten Bereichen gut besucht. Die Dokumentation (Protokoll) des letzten Workshops findet sich im Anhang (10.2).

Alle Workshops wurden protokolliert und teilweise auch als Tonbandaufzeichungen festgehalten.

5.2.3 Leitfadeninterviews

In den Fallstudienregionen Osterholz und Wolfhagen wurden mit einer Reihe von zuvor im Zuge der Dokumentenanalyse sowie der Kontaktanbahnung bei ersten Treffen identifizierten einflussreichen Akteure noch vor den ersten Workshops leitfadengestützte Interviews durchgeführt. Zu den Befragten zählten Mitarbeiter der örtlichen Energieversorgungsunternehmen, der Verwaltung, der Koordination bzw. Beratung für Energiewendeprojekte, einer Forschungseinrichtung mit Kontakt zur Fallstudienregion, Vertreter von Energiegenossenschaften bzw.

Initiativen, die sich für die Verbreitung erneuerbarer Energien einsetzen sowie Inhaber mittelständischer Unternehmen mit Bezug zu erneuerbaren Energien.

Für die Fallstudie Osterholz wurden in sieben Interviews (Dauer: jeweils ca. 1h) insgesamt acht Personen befragt (sechs Einzelinterviews, ein Doppelinterview). Für die Fallstudie Wolfhagen wurden in sieben Interviews (Dauer: jeweils ca. 1h) insgesamt neun Personen befragt (fünf Einzelinterviews, zwei Doppelinterviews).

Tabelle 5.1: Übersicht der Befragten in den Fallstudienregionen (eigene Darstellung)

Region	Interviewpartner (anonymisiert)	Funktion/Hintergrund	Datum
Osterholz	I-ohz1	Verwaltung	Juni 2014
Osterholz	I-ohz2	Unternehmen	Juli 2014
Osterholz	I-ohz3	Unternehmen	Juni 2014
Osterholz	I-ohz4	Projektkoordination/Beratung	Juli 2014
Osterholz	I-ohz5	Unternehmen	Juli 2014
Osterholz	I-ohz6	Verwaltung	Juli 2014
Osterholz	I-ohz7	Energieversorgungsunternehmen	Juli 2014
Wolfhagen	I-whg1	Unternehmen	April 2015
Wolfhagen	I-whg2	Genossenschaft	April 2015
Wolfhagen	I-whg3	Energieversorgungsunternehmen	April 2015
Wolfhagen	I-whg4	Forschungseinrichtung	April 2015
Wolfhagen	I-whg5	Verwaltung	April 2015
Wolfhagen	I-whg6	Projektkoordination/Beratung	April 2015
Wolfhagen	I-whg7	Energieversorgungsunternehmen	April 2015

Die durchgeführten halbstandardisierten Interviews enthielten maximal 31 offene Fragen. Je nach Gesprächssituation wurde die Reihenfolge der Fragen frei gestaltet. Bereits beantwortete Fragen wurden übersprungen. Für die Untersuchung der Fallstudienregion Osterholz wurde auf Interviewmaterial zurückgegriffen, das im Rahmen einer Qualifikationsarbeit (C. Osterndorf) erstellt wurde. Für die erst später im Projektverlauf hinzugekommene Fallstudienregion Wolfhagen wurde der Fragebogen differenziert und um einen Fragenkomplex zur Vulnerabilität und zu den regulativen Rahmenbedingungen ergänzt.

Die Interviewleitfäden enthielten Fragenkomplexe zu folgenden Bereichen (weitere Details im Anhang dieses Projektberichts):

- Hintergrund des/der Befragten
- Historie der lokalen Energiewende
- Lokale Akteure

- Leitbilder
- Einflussfaktoren und Richtungsgebung bei der Energiewende
- Vulnerabilitäten (Wolfhagen)
- Regulative Rahmenbedingungen (Wolfhagen)
- Zukünftige Entwicklung

Die in der Fallstudie P2F durchgeführten Interviews wurden ohne Leitfaden durchgeführt. Sie dienten hauptsächlich dazu, Feedback zum Modell und den Ergebnissen zu erhalten. Hierzu wurden auch Telefonate und Treffen organisiert.

5.3 Auswertungsmethoden für die Leitorientierungsanalyse, Akteursanalyse und Ermittlung der Richtungsgebenden Einflussfaktoren

Die Leitfadeninterviews und Beobachtungsprotokolle (hier benannt als Datenmaterial) wurden in Anlehnung an die qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring (u.a. Mayring 2002, 2010) und an die Leitbildanalyse der Forschungsgruppe Umweltbildung FU Berlin (Haan 2001; Haan und Kuckartz 1998; Schaar 1998) ausgewertet. Die Leitbildanalyse basiert in ihren grundsätzlichen Vorgehensschritten auf der qualitativen Inhaltsanalyse, sieht jedoch ein festgelegtes Kodierungssystem vor, um Leitbilder von befragten Personengruppen ermitteln zu können. Nachfolgend werden die wichtigsten Schritte der Auswertung erläutert:

Auswahl der Auswertungsmethode: Für die Auswahl der Methode der qualitativen Inhaltsanalyse haben drei Gründe eine bedeutende Rolle gespielt. Erstens beinhaltet die Inhaltsanalyse die systematische Bildung von theoriegeleiteten Kategorien, nach denen das Datenmaterial gesichtet und ausgewertet wird. Blickt man auf die Forschungsfragen bzw. zu beforschenden Themenfelder (z.B. Leitorientierungen, relevante Akteursgruppen, Verletzlichkeit der Energiesysteme, richtungsgebende Einflussfaktoren), die hinter den empirischen Untersuchungen stehen, dann machen diese eine zielgerichtete Auswertung des Datenmaterials nach festgelegten Kategorien notwendig. Zweitens sollten Wissensbestände rekonstruiert und Informationen zu spezifischen Themen erhoben werden. Es interessierte demnach, „was“ und weniger „wie“ die befragten und beobachteten Akteursguppen (etwas) sagten. Die Inhaltsanalyse fokussiert – wie ihr Name schon sagt – auf die Analyse des „Inhaltes“ („was“) des Gesagten bzw. Geschriebenen und stellte daher eine adäquate Auswertungsmethode dar. Drittens war vorgesehen, eine erhebliche Menge an Datenmaterial auszuwerten. Dementsprechend war es naheliegend, Datenanalysesoftware zu nutzen. Diese basiert gegenwärtig zum Großteil auf der qualitativen Inhaltsanalyse, was einen weiteren Grund darstellte, diese Methode anzuwenden.

Festlegung des Materials: Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes wurden bezogen auf die Fallstudien 19 Leitfadeninterviews (7 im Landkreis Osterholz, 7 in Stadt Wolfhagen,

5 im Bereich synthetische Kraftstoffe), 11 teilnehmende Beobachtungen (4 im Landkreis Osterholz, 4 in der Stadt Wolfhagen, 3 im Bereich synthetische Kraftstoffe) und frei zugängliche Dokumente (z.B. Internetdokumente, Presseartikel) bzw. begrenzt zugängliche Dokumente (z.B. Gemeinderatsprotokolle, wissenschaftliche Arbeiten) ausgewertet. Von den durchgeführten 19 Leitfadeninterviews wurden 14 wortwörtliche Transkripte mit der Transkriptionssoftware f4 sowie von den Beobachtungen 11 (teils stichpunktartige) Beobachtungsprotokolle erstellt. Die Interviewtranskripte wurden pseudonymisiert.

Richtung der Analyse: Mittels der qualitativen Inhaltsanalyse wurde das Datenmaterial nach den zu beforschenden Themenfeldern (vgl. Kapitel 1) analysiert. Ein besonderer Fokus wurde hierbei auf die Identifizierung von vorhandenen Leitorientierungen und die Wirksamkeit des propagierten Leitkonzeptes Resilienz sowie damit verbundener Wirksamkeitsfaktoren (Leitorientierungsanalyse) sowie die Ermittlung von relevanten Akteuren (Akteursanalyse) gerichtet.

Beschreibung der Analysetechnik und des -ablaufes: Zur Auswertung des Datenmaterials fanden die drei gängigen Analysetechniken der qualitativen Inhaltsanalyse Anwendung, die Strukturierung, die Zusammenfassung und die Explikation (Mayring 2010). Zunächst wurde anhand der Forschungs- und Leitfadenfragen sowie theoretischen Modelle (u.a. Schildkrötenmodell der richtungsgebenden Einflussfaktoren) deduktiv ein Kategoriensystem erstellt.

Zur Auswertung vorhandener Leitorientierungen in den Fallstudien fanden außerdem die von der Leitbildanalyse vorgeschlagenen Kategorien, die sog. Leitbilddimensionen, Berücksichtigung. Hierbei handelt es sich um sechs Kategorien, die in ihrer Kombination Leitbilder bzw. Leitorientierungen sichtbar machen können, und bereits in den Leitfadeninterviews beachtet wurden (Brand 2016; Giesel 2007):

1. Erwünschte und für realisierbar gehaltene Entwicklungen (z.B. eines Systems) (*Wunsch- und Machbarkeitsprojektionen)*;
2. Persönliche Motivation/emotionale Hintergründe, sich mit bestimmten Themen zu beschäftigen (*Coenästhetische Resonanzen)*;
3. Identifikation mit Meinungen/Vorstellungen anderer Akteure (z.B. im System) bzw. der eigenen Institution (*Sozietätsstiftende Imaginationen*);
4. Für wichtig/vernünftig erachtete Strategien bzw. Herausforderungen im Zusammenhang mit bestimmten Themen (*Perspektivische Synchronisation)*;
5. Positionen und Einstellungen, von denen sich der Befragte abgrenzt (*Perspektivische Desynchronisation)*;
6. Hinweis auf Verinnerlichung eines Themas z.B. durch Wechsel zwischen Bildsprache (Metaphern) und (abstrakten) Begriffen/Theorien (*Semantische Sukzession)*.

So wie bereits von Brand (Brand 2016) vorgeschlagen, wurden die sechs noch sehr abstrakten Kategorien in der Form an die vorliegende empirische Untersuchung angepasst, dass sie begrifflich vereinfacht und in mehrere Unterkategorien (Leitorientierungs-Kategorien) eingeteilt wurden (u.a. wünschenswerte Entwicklung des Energiesystems, Einschätzung über realistische Entwicklung des Energiesystems, Anforderungen an das Energiesystem). Diese Unterteilung macht zudem eine Ausdifferenzierung von Leitorientierungen gemäß der drei vorgeschlagenen Ebenen (vgl. Dreiebenenmodell, Kapitel 4.1.1) möglich.

Mittels des entwickelten Kategoriensystems wurde das Datenmaterial gesichtet und die Analysetechnik der (inhaltlichen) „Strukturierung“ herangezogen, d.h. die von den Kategorien angesprochenen Textstellen (Codings) wurden extrahiert und gemäß ihren Hauptkategorien zusammengefasst, was mithilfe der qualitativen Datenanalysesoftware MAXQDA 10 vorgenommen wurde. Im folgenden Schritt der „Zusammenfassung“ wurden die Codings paraphrasiert, d.h. in eigenen Worten wiedergegeben, und generalisiert, d.h. die Codings aller Interviews verglichen, um Gemeinsamkeiten bzw. Differenzen und möglichst Grundtendenzen feststellen zu können.

Zusammenstellung und Interpretation der Ergebnisse mit Bezug zu den formulierten Fragestellungen: Im letzten Analyseschritt wurden die zuvor entwickelten Ergebnisse zusammengefasst und interpretiert. Teilweise war es notwendig, zusätzliches Material z.B. in Form der gesichteten Dokumente heranzuziehen, um die Erkenntnisse aus den Beobachtungen und Interviews näher zu erläutern, zu erklären und auszudeuten, was Mayring (2010) als „Explikation“ bezeichnet.

Vorgehen zur Identifizierung von vorhandenen Leitorientierungen und Analyse der Wirksamkeit des propagierten Leitkonzeptes Resilienz (Leitorientierungsanalyse): Zur Analyse der vorhandenen Leitorientierungen wurden gemäß Brand (Brand 2016) die paraphrasierten Codings, die mittels der o.g. Leitorientierungs-Kategorien identifiziert werden konnten, pro Interviewpartner bzw. zu beobachtendem Akteur zusammengefasst, was zur Ermittlung von bestimmten Mustern diente. Hierbei wurden zusätzlich quantifizierende Verfahren angewendet, indem bestimmte Begriffe in den Codings nach ihrer Häufigkeit analysiert wurden (z.B. Häufigkeit des Begriffes Regionale Wertschöpfung oder (Versorgungs-)Sicherheit) (Giesel 2007). Umso häufiger ein Begriff genannt wurde, umso stärker wurde ihm eine Bedeutung für den jeweiligen Akteur zugesprochen. Mittels der Analysen konnten mehrere Leitorientierungen pro Akteur ermittelt werden, die in einem nachfolgenden Schritt Interview übergreifend verglichen wurden, um gemeinsam getragene Leitorientierungen identifizieren zu können (Brand 2016).

Um die Wirksamkeit des propagierten Leitkonzeptes Resilienz (und seiner Gestaltungselemente) untersuchen zu können, wurden die Interviews und Beobachtungsprotokolle nach ge-

wissen Schlüsselbegriffen gesichtet (Brand 2016). Bspw. wurde das Leitkonzept dann als wirksam, d.h. von Resonanz getragen identifiziert, wenn es bspw. als „relevant“, „sinnvoll“ oder „notwendig“ von den jeweils befragten bzw. beobachteten Akteuren erachtet wurde oder sie sich detaillierter mit dem Leitkonzept auseinandergesetzt haben.

5.4 Wertschöpfungsanalyse

5.4.1 Methodische Grundlagen - Kurzdarstellung des WeBEE-Modells

Im Rahmen der Studie „Kommunale Wertschöpfung durch Erneuerbare Energien“ hat das IÖW im Auftrag der Agentur für Erneuerbare Energien (AEE) ein Modell zur Ermittlung von Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekten auf kommunaler Ebene entwickelt (im Folgenden auch als WeBEE-Modell bezeichnet) (siehe Hirschl et al. 2010). Das Modell, welches seit 2010 kontinuierlich weiterentwickelt wurde, umfasst mittlerweile über 50 EE-Wertschöpfungsketten (siehe Tabelle 5.2) und repräsentiert damit ein breites Portfolio strom- und wärmeerzeugender EE-Anlagen einschließlich der Bereitstellung von biogenen Brenn- und Kraftstoffen und der Distribution von EE-Wärme bzw. Biogas über Nahwärmenetze bzw. Biogasleitungen. Für diese Wertschöpfungsketten können mit dem Modell die Unternehmensgewinne, die Netto-Einkommen der Beschäftigten und die Steuereinnahmen für die Kommunen sowie auf Länder- und Bundesebene berechnet werden. Darüber hinaus ermöglicht das Modell die Ermittlung von Beschäftigungseffekten in Form von Vollzeitarbeitsplätzen.

Zentrale Grundlage für die Ermittlung der Wertschöpfung mit dem WeBEE-Modell bildet die Analyse der Investitions- und Betriebskosten der einzelnen EE-Technologien. Diese entsprechen den spezifischen Umsätzen entlang der Wertschöpfungskette einer EE-Technologie und werden auf die installierte Anlagenleistung bezogen.

Die Wertschöpfungsketten werden in vier aggregierte Wertschöpfungsstufen und die darin enthaltenen Kostenpositionen unterteilt:

1) Anlagenherstellung (Investitionskosten für die EE-Anlagen und einzelne Anlagenkomponenten)
2) Planung und Installation (Investitionsnebenkosten für Planungsbüros, Montage, tlw. Grundstückskauf etc.)
3) Anlagenbetrieb und –wartung (Betriebskosten für Wartungsarbeiten, Brennstoff- und Energiekosten, Versicherung, Fremdkapitalzinsen, tlw. Betriebspersonal oder Pachtzahlungen etc.)
4) Betreibergewinne (Gewinne der Anlagenbetreiber/innen und darauf gezahlte Gewinnsteuern).

Tabelle 5.2: Im WeBEE-Modell des IÖW abgebildete Wertschöpfungsketten der erneuerbaren Energien nach Technologien und Größen- bzw. Brennstoffdifferenzierung (Quelle: Eigene Darstellung)

Nr.	EE-Technologie	Differenzierung
Strom		
1	Windkraft	Onshore
2		Repowering
3		Offshore
4	Photovoltaik	Dachanlagen klein
5		Dachanlagen groß
6		Freiflächenanlagen
7	Wasserkraft	Kleinanlagen
8		Großanlagen
Strom und Wärme		
9	Biogas	Kleinanlagen
10		mittlerer Leistungsbereich
11		Großanlagen
12	Biogas-Satelliten-BHKW	Kleinanlagen
13		mittlerer Leistungsbereich
14		Großanlagen
15	Holzvergaser	Kleinanlagen
16		mittlerer Leistungsbereich
17	Holzheizkraftwerk	
18	Biomasse flüssig stationär	
19	Tiefe Geothermie	
Wärme		
20	Solarthermie	Kleinanlagen
21		Großanlagen
22	Zentralheizungsanlagen holzbefeuert	Pellet-Heizanlage klein
23		Pellet-Heizanlage groß
24		Scheitholz-Heizanlage klein
25		Scheitholz-Heizanlage groß
26		Hackschnitzel-Heizanlage groß
27	Holzheizwerk	mittlerer Leistungsbereich
28		Großanlagen
29	Wärmepumpen	Kleinanlagen
30		Großanlagen
31	Tiefe Geothermie	
Gas-/Wärmedistribution		
32	EE-Wärmenetz	EE-Nahwärmenetze
33	Mikrogasleitung	
Brenn- und Kraftstoffe		
34	Holzbrennstoff-Bereitstellung	Pellets
35		Scheitholz teilmechanisiert
36		Scheitholz vollmechanisiert
37		Hackschnitzel teilmechanisiert
38		Hackschnitzel vollmechanisiert
39	Kraftstoff-Bereitstellung	Pflanzenöl
40		Bioethanol
41		Biodiesel
42	Rohgasbereitstellung	Kleinanlagen
43		mittlerer Leistungsbereich
44		Großanlagen
45	Biogas-Aufbereitung (Druckwasserwäsche)	Kleinanlagen
46		mittlerer Leistungsbereich
47		Großanlagen
48	Biogas-Aufbereitung (Druckwechselabsorption)	Kleinanlagen
49		mittlerer Leistungsbereich

Nr.	EE-Technologie	Differenzierung
50		Großanlagen
51	Biogas-Aufbereitung (Aminwäsche)	Kleinanlagen
52		mittlerer Leistungsbereich
53		Großanlagen
54	Biogas-Aufbereitung (Membranpermeation)	Kleinanlagen
55		mittlerer Leistungsbereich
56		Großanlagen

In der beschriebenen Methodik ist der Handel von Anlagenkomponenten oder Installations- und Wartungsmaterial in den oben genannten vier Wertschöpfungsstufen subsumiert. Jede der oben genannten Wertschöpfungsstufen lässt sich wiederum je nach Wertschöpfungskette in verschiedene Wertschöpfungsschritte untergliedern, die sich zwischen den EE-Technologien unterscheiden können. In der Wertschöpfungsstufe der Anlagenherstellung bilden bspw. die Wertschöpfungsschritte die einzelnen Anlagenkomponenten ab. In der Stufe des Anlagenbetriebs finden sich Wertschöpfungsschritte, wie z.B. die Anlagenwartung, Versicherungsbeiträge oder ggf. Personalkosten. Den einzelnen Wertschöpfungsschritten werden einzelne oder mehrere typische Wirtschaftszweige zugeordnet, für die statistische Datenquellen für ökonomische Kennzahlen verfügbar sind. Die Umsätze in den einzelnen Stufen werden durch eine Zuordnung der einzelnen Kostenpositionen der Investitions- und Betriebskosten zu den entsprechenden Wertschöpfungsschritten ermittelt. In der Literatur sind Kostenstrukturen vorwiegend relativ bezogen auf die Investitionskosten, bzw. teilweise bezogen auf die Investitionsnebenkosten angegeben. Dieser prozentuale Aufbau ermöglicht die Anwendung der Kostenstrukturen auf die spezifischen Investitionskosten, die der aktuellen Literatur (Marktanalysen, Evaluierungsberichte etc.) entnommen wurden. Die Kosten bzw. Umsätze in den Wertschöpfungsstufen „Anlagenproduktion“ und „Planung & Installation“ fallen einmalig durch die Investitionen in eine EE-Anlage an. Die Kosten bzw. Umsätze für den Betrieb werden dagegen jährlich über die gesamte Betriebsdauer der EE-Anlagen generiert.

Die Wertschöpfung setzt sich grundsätzlich aus den folgenden drei Bestandteilen zusammen:

1. die um die Gewinnsteuern bereinigten Gewinne der beteiligten Unternehmen,
2. die Nettoeinkommen der beteiligten Beschäftigten und
3. die auf die Unternehmensgewinne und die Bruttoeinkommen gezahlten Steuern.

Bei den gezahlten Steuern wird in Steuereinnahmen der Kommunen, der Länder und des Bundes differenziert.

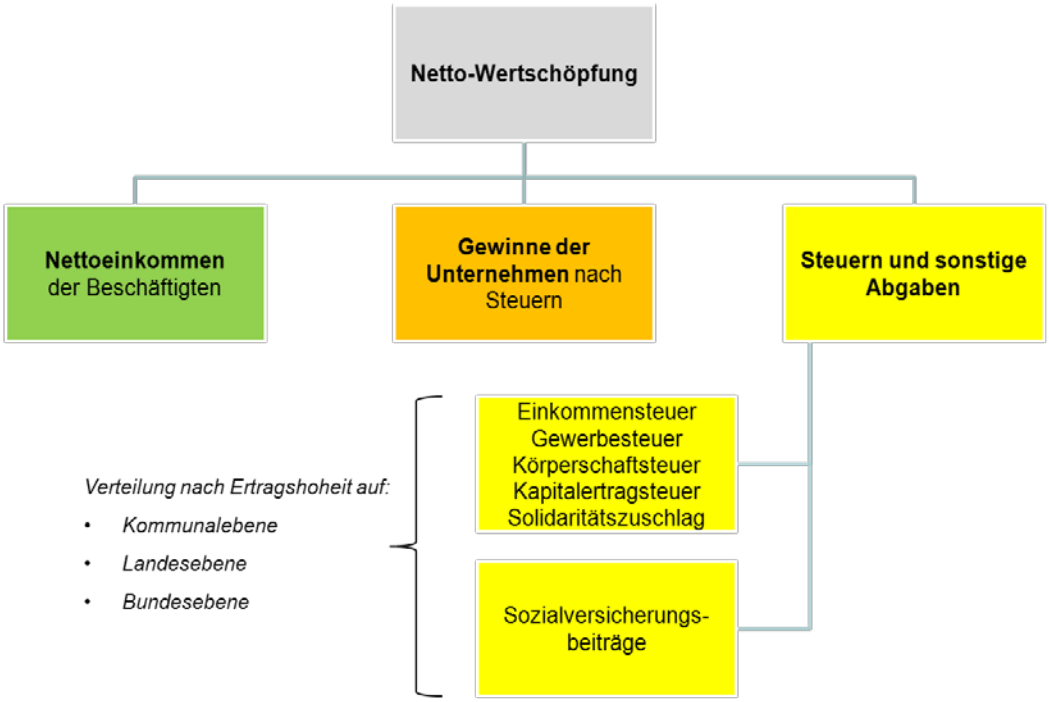


Abbildung 5.1: Wertschöpfungsdefinition des WeBEE-Modells (Quelle: Eigene Darstellung)

Nachfolgend wird die grundlegende Vorgehensweise für die Ermittlung der Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte kurz beschrieben. Für die Ermittlung der Vor-Steuer-Gewinne der Unternehmen in den jeweiligen Wertschöpfungsschritten wird jeder Position eine Umsatzrentabilität zugeordnet, welche den Jahresüberschuss vor Steuern eines Unternehmens ins Verhältnis setzt zu dem in dieser Periode erzielten Umsatz. Die Umsatzrentabilität ist einer Statistik der Deutschen Bundesbank entnommen, in welcher hochgerechnete Angaben aus Jahresabschlüssen deutscher Unternehmen für die Jahre 2006 bis 2010 aufgeführt sind (Bundesbank 2012). Die durchschnittlichen Umsatzrenditen der verschiedenen Branchen werden als Mittelwert der Jahre 2006 bis 2010 errechnet. Eine Abweichung zu dem beschriebenen Vorgehen bildet die Bestimmung der Gewinne der Anlagenbetreiber/innen. Hier erfolgt die Berechnung der Vor-Steuer-Gewinne mithilfe von durchschnittlichen Eigenkapitalrenditen der jeweiligen EE-Technologien, welche aus dem EEG-Erfahrungsbericht (BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2011) entnommen und ggf. aktualisiert werden.

Die Einkommenseffekte werden in Abhängigkeit vom Umsatz für die einzelnen Positionen der Wertschöpfungsstufen ermittelt. Neben den Einkommen ist auch die Beschäftigungswirkung Ergebnis dieser Methodik. Zunächst wird die Beschäftigungswirkung als Anzahl der beschäftigten Personen ermittelt. Hierzu werden aus Veröffentlichungen der Bundesagentur für Arbeit (Bundesagentur für Arbeit 2012) der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten nach Wirtschaftszweigen extrahiert. Zusätzlich werden wirtschaftszweigspezifische Umsätze erhoben

(Statistisches Bundesamt 2012a). Daraus lässt sich eine Indikation für die Anzahl der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten pro Euro Umsatz ermitteln, die, multipliziert mit dem Umsatz pro kW installierter Leistung, die spezifische Angabe der Beschäftigten (Köpfe) pro kW Leistung ermöglicht. Diese Angabe wird dann mithilfe von Sonderdatenauswertungen des Statistischen Bundesamtes in Vollzeitäquivalente (VZÄ) umgerechnet. Die Sonderauswertungen stammen zum einen aus der vierteljährlichen Verdiensterhebung im produzierenden Gewerbe und im Dienstleistungsbereich und zum anderen aus Daten des Mikrozensus „RS 3.8 Erwerbstätige nach Wirtschaftsunterabschnitten“. Auf Basis der durchschnittlichen Bruttojahreseinkommen in dem Wirtschaftszweig des jeweiligen Wertschöpfungsschrittes, können aus den Quellen des Statistischen Bundesamtes (Statistisches Bundesamt 2012c) dann die gezahlten Löhne und Gehälter in Euro pro kW ermittelt werden.

Steuereinnahmen und Einnahmen aus sonstigen Abgaben entstehen aus der Besteuerung der Unternehmensgewinne und der Einkommen der Beschäftigten. Im Rahmen der Steuern und sonstigen Abgaben auf Unternehmensgewinne wird neben der Besteuerung auf der Unternehmensebene auch die Besteuerung ausgeschütteter Gewinne betrachtet. Das Modell beinhaltet die Gewerbesteuer, die Einkommensteuer, die Körperschaftsteuer und die Abgeltungsteuer, sowie den Solidaritätszuschlag, die Kirchensteuer und ggf. Krankenkassenbeiträge. Grundsätzlich ist für die Berechnung der Steuerlast eines Unternehmens die Gesellschaftsform maßgeblich. Daher wird für die im Wertschöpfungsprozess beteiligten Unternehmen auf Basis der WZ 2008 eine Unterteilung in Kapital- und Personengesellschaften vorgenommen, um Unterschiede in der Unternehmensbesteuerung berücksichtigen zu können (Statistisches Bundesamt 2012b). Um die Nach-Steuer-Gewinne modellieren zu können, ist zuerst eine Abschätzung des zu versteuernden Einkommens notwendig, welches die Bemessungsgrundlage für die Steuerfestsetzung bei der Einkommensteuer und der Körperschaftsteuer darstellt. Das zu versteuernde Einkommen wird mithilfe von Angaben zu gezahlten Steuern am Vor-Steuer-Gewinn nach Bundesbank (2012), dem Vor-Steuer-Gewinn und der idealtypischen Unternehmensbesteuerung von Kapital- und Personengesellschaften berechnet. Die Gewerbesteuer wird vereinfachend auf Basis des Vor-Steuer-Gewinns errechnet. Bei den Kapitalgesellschaften (KapG) werden auf der Unternehmensebene Gewerbesteuer, Körperschaftsteuer zzgl. Solidaritätszuschlag auf die Körperschaftsteuer fällig. Im Rahmen der Personenunternehmen (PersU) findet, mit Ausnahme der Gewerbesteuer, eine Besteuerung auf Ebene der Gesellschafter statt.

Für die ausgeschütteten Gewinne wird bei den KapG die Annahme getroffen, dass 50% der Teilhaber Privatpersonen und jeweils 25% KapG und PersU sind. Weiterhin wird eine Ausschüttungsquote von 50% der Nach-Steuer-Gewinne festgelegt. Privatpersonen als Anleger zahlen Abgeltungsteuer auf die ausgeschütteten Gewinne, KapG zahlen Körperschaftsteuer

und Solidaritätszuschlag und PersU zahlen Einkommensteuer, Kirchensteuer und Solidaritätszuschlag. Die Besteuerung der Personenunternehmen erfolgt unter der Aufteilung der Gesellschafter in Privatpersonen, KapG und PersU nach einer Sonderauswertung des Statistischen Bundesamtes aus der Statistik über die Personengesellschaften/Gemeinschaften 2008. Für KapG sind hier Körperschaftsteuer und Solidaritätszuschlag zu entrichten, für PersU und Privatpersonen fallen Einkommensteuer, Kirchensteuer und Solidaritätszuschlag an, für Privatpersonen zusätzlich noch Krankenkassenbeiträge.

Für die Steuern und sonstigen Abgaben auf die Einkommen der Beschäftigten sind die vorher berechneten Bruttojahresgehälter maßgeblich. Hier werden entsprechende Zahlungen an Einkommensteuer, Kirchensteuer, Solidaritätszuschlag und Sozialabgaben (Arbeitgeber und Arbeitnehmer) berücksichtigt.

Unter Berücksichtigung dieser Systematik kann dann der Umfang der Steuer- und Abgabenzahlungen ermittelt und der Nach-Steuer-Gewinn bzw. die Nettoeinkommen errechnet werden.

Die Kommunen profitieren im Wertschöpfungsprozess, neben den indirekten Effekten durch Gewinne und Einkommen, direkt auf zwei Wegen. Zum einen erhalten sie die Gewerbesteuer in fast vollem Umfang. Hiervon ist lediglich eine Umlage an den Bund und die Länder zu entrichten. Daneben partizipieren die Kommunen anteilig an der veranlagten Einkommen- (15%) sowie der Abgeltungsteuer (12%).

Weiterhin können mit dem WeBEE-Modell neben den kommunal relevanten Bruttowertschöpfungskomponenten auch die Bruttowertschöpfungseffekte auf Länder- und auf Bundesebene berechnet werden. Auf der Landesebene werden hierbei Einnahmen aus der Körperschaft-, Einkommen-, Abgeltung- und Gewerbesteuer berücksichtigt, auf Bundesebene werden sowohl die jeweiligen Anteile an der Körperschaft-, Einkommen-, Abgeltung- und Gewerbesteuer, als auch Einnahmen durch den Solidaritätszuschlag und die Sozialabgaben der Arbeitnehmer/innen und Arbeitgeber/innen miteinbezogen. Dies ermöglicht eine deutschlandweite Quantifizierung der Wertschöpfungseffekte für jede dieser drei Ebenen, d.h. eine Bestimmung, welche Wertschöpfung in den deutschen Kommunen, Ländern oder in Deutschland insgesamt durch die im Modell abgebildeten EE-Technologien generiert wird.

Bei der Analyse mit dem oben beschriebenen Modell werden die Wertschöpfungsketten auf die direkt EE-relevanten Umsätze begrenzt. So wird beispielsweise die Produktion von Anlagenkomponenten in die Analyse der direkten Effekte einbezogen. Weiter vorgelagerte Umsätze und damit verbundene Wertschöpfungseffekte werden als indirekte Effekte methodisch bedingt nicht berücksichtigt. Diese Effekte können jedoch durch eine Kopplung des WeBEE-Modells mit einem erweiterten, statisch offenen IO-Modell ebenfalls ermittelt werden (siehe hierzu Aretz et al. 2013).

5.4.2 Regionalspezifische Anpassung des WeBEE-Modells

Dem WeBEE-Modell des IÖW zur Quantifizierung von Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekten durch erneuerbare Energien liegt eine Vielzahl an ökonomischen Kennzahlen zu Grunde. Diese können bei der Betrachtung unterschiedlicher, regional abgrenzbarer Räume angepasst werden. Hierzu zählen unter anderem die Bruttojahreseinkommen der betrachteten Wirtschaftszweige, der Gewerbesteuerhebesatz der betrachteten Kommune bzw. der Kommunen in der Region und der regionale Anteil an Kirchenmitgliedern für die Berechnung der Kirchensteuer. Je nach Datenverfügbarkeit erfolgte die Anpassung der Kennzahlen auf der Ebene des Bundeslandes (Bruttojahreseinkommen, Kirchensteuersatz) oder der Gebietskörperschaft (Gewerbesteuerhebesatz Stadt Wolfhagen bzw. Landkreis Osterholz).

5.4.3 Ermittlung von Eingangsdaten und Modellparametern für den Status quo (2013)

Mit dem WeBEE-Modell des IÖW werden für jede der betrachteten Wertschöpfungsketten die spezifischen Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte, bezogen auf eine Einheit installierte EE-Leistung bzw. Trassenlänge, berechnet. Für die Wertschöpfungsstufen der Planung und Installation, den Anlagenbetrieb und die Wartung sowie die Betreibergewinne ermöglicht dies eine Hochrechnung der Effekte für die betrachteten Gebietskörperschaften. Die wirtschaftlichen Aktivitäten der Hersteller von EE-Anlagen- und Komponenten in den Regionen sind – sofern vorhanden – jedoch weitestgehend unabhängig von der in der Region zugebauten und installierten Leistung. Auch stehen bei der Transformationsoption „regionale Selbstversorgung“, die im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens untersucht wird, die vor Ort installierten Erzeugungskapazitäten im Vordergrund und nicht die Aktivitäten der Hersteller von EE-Anlagen. Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieses Vorhabens ausschließlich die Effekte durch die Installation und den Betrieb der vor Ort installierten EE-Anlagen betrachtet; die Effekte durch in der Region ansässige Hersteller von EE-Anlagen und Komponenten wurden für die Stadt Wolfhagen und den Landkreis Osterholz nicht ermittelt, da der Aufwand in keinem Verhältnis zum Nutzen gestanden hätte, da keine größeren Hersteller in den Regionen ansässig sind. Auf der Wertschöpfungsstufe der Planung und Installation erfolgt die Hochrechnung der Effekte auf Basis der im Betrachtungsjahr in der Region zugebauten Anlagenleistung bzw. Trassenlänge. Die Ermittlung der Beschäftigungs- und Wertschöpfungseffekte durch den Betrieb der EE-Anlagen erfolgt auf der Grundlage des regionalen EE-Anlagenbestands. Da der Zubau im Betrachtungsjahr über das Jahr verteilt stattfindet, würden die Effekte überschätzt, wenn für die Ermittlung der betriebsbezogenen Effekte der gesamte Zubau miteinbezogen wird. Deswegen setzt sich der Anlagenbestand, der den Berechnungen zugrunde liegt, jeweils aus dem Bestand des vorangegangenen Jahres und der Hälfte des Zubaus des betrachteten Jahres zusammen. Für die Berechnung der Effekte im Jahr 2013 entspricht dies der installierten Leistung der EE-Anlagen Ende 2012 und der Hälfte des Zubaus im Jahr 2013.

Die regionalökonomischen Effekte durch erneuerbare Energien werden zu einem überwiegenden Anteil durch die in den Regionen ansässigen Unternehmen, ihre Beschäftigten und die Investor/innen der EE-Anlagen generiert. Dies bedeutet, dass allein die Kenntnis der vor Ort installierten Leistung der EE-Anlagen nicht ausreicht, um die Wertschöpfung und Beschäftigung in diesen Gebietskörperschaften zu ermitteln. Es muss zusätzlich ermittelt werden, zu welchem Umfang die über den regionalen Anlagenbestand und -zubau ermittelten Umsätze in den verschiedenen Wert-schöpfungsschritten durch in den Regionen ansässige Unternehmen und Eigenkapitalgeber/innen abgedeckt werden.

Die Daten zu dem Bestand und Zubau an installierter EE-Leistung in den beiden Regionen basieren u.a. auf regionalen Erhebungen zum Anlagenbestand, einer Auswertung der EE-Anlagenstammdaten der Netzbetreiber sowie Befragungen von Anlagenbetreiber/innen bzw. Verwaltungen. Für die Angaben zur regionalen Ansässigkeit von Unternehmen und weiteren Akteuren entlang der Wertschöpfungsketten wurden u.a. Akteure aus der Verwaltung, Betreiber/innen der regionalen EE-Anlagen (inkl. Stadtwerke und Genossenschaften), Energieagenturen und regionale Handwerksunternehmen befragt sowie zusätzlich zur Verfügung stehende Literatur- und Internetquellen ausgewertet. Die Erhebung wurde vom Fachgebiet Technikgestaltung der Universität Bremen durchgeführt. Für einige Wertschöpfungsschritte konnten keine Werte ermittelt werden; in diesem Fall wurden, basierend auf den Erfahrungen früherer Regionalstudien und unter Berücksichtigung der regionalen Besonderheiten, Annahmen getroffen.

Um die Bedeutung der regionalen Ansässigkeit von Unternehmen und Investor/innen entlang der Wertschöpfungskette für die Höhe der erzielten Wertschöpfung und Beschäftigung in den Regionen kenntlich zu machen, wurden zusätzlich zwei Szenarien betrachtet. Für das Szenario 1 wurde, abweichend von den ermittelten Werten zur regionalen Ansässigkeit der Betreibergesellschaften und der Eigenkapitalgeber/innen, angenommen, dass diese bei allen Technologien zu 100% innerhalb der Region angesiedelt sind. Auch wenn eine 100%-ige Ansässigkeit der Eigenkapital-geber/innen gerade bei den größeren Technologien (Wind, PV-Freiflächenanlagen) in Gebieten von der Größe eines Landkreises oder einer Stadt nicht realistisch sind, soll der Vergleich mit diesem Szenario aufzeigen, welchen Einfluss die lokale Ansässigkeit dieser Akteure auf die Höhe der Effekte hätte. Im Szenario 2 wurde für alle betrachteten Wertschöpfungsschritte eine 100%-ige regionale Ansässigkeit der beteiligten Unternehmen und Akteure angenommen und damit die maximal mögliche Wertschöpfung bei dem gegebenen Anlagenbestand und Zubau berechnet. Auch dieses Szenario ist bei den betrachteten Regionen nicht realistisch, veranschaulicht aber den Einfluss dieser Eingangsgrößen auf die Wertschöpfung und Beschäftigung in den Fallstudien-Regionen.

5.4.4 Ermittlung von Eingangsdaten und Modellparametern für die Zukunftsszenarien 2030

Das Ziel einer regionalen Selbstversorgung mit erneuerbaren Energien verfolgen sowohl die Stadt Wolfhagen als auch der Landkreis Osterholz. Die Berechnungen für das Jahr 2013 machen deutlich, welche Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte vor Ort mit dem derzeitigen Ausbaustand der erneuerbaren Energien verbunden sind. Um aufzuzeigen, mit welchen Effekten der weitere Ausbau der erneuerbaren Energien in den beiden Regionen einhergehen könnte, wurde für jede der betrachteten Regionen neben dem Status quo im Jahr 2013 auch ein Szenario zur zukünftigen Entwicklung des Ausbaustands der erneuerbaren Energien betrachtet. Bezugsjahr für die Abschätzung der Wertschöpfung und Beschäftigung in diesem Zukunftsszenario ist das Jahr 2030.

Die zentralen Eingangsdaten für die Berechnung der Wertschöpfung und Beschäftigung sind auch im Zukunftsszenario die Angaben zu Bestand und Zubau an installierter EE-Leistung sowie zur regionalen Ansässigkeit von Unternehmen, Anlagenbetreiber/innen und Investor/innen entlang der EE-Wertschöpfungskette im Betrachtungsjahr 2030. Auf der Basis regionaler Zielsetzungen und Planungen zum Ausbau der erneuerbaren Energien vor Ort wurden Annahmen zum zukünftigen Anlagenbestand sowie der regionalen Ansässigkeit der Akteure getroffen. Die Entwicklung der Zukunftsszenarien lag beim Fachgebiet Technikgestaltung der Universität Bremen und wurde in enger Abstimmung mit den Akteuren im Landkreis Osterholz und in der Stadt Wolfhagen durchgeführt. Für den zukünftigen Ausbau der Solarthermie und der holzbefeuerten Zentralheizungsanlagen lagen keine regionalspezifischen Zielsetzungen vor. In diesem Fall orientiert sich die angenommene Entwicklung bis zum Jahr 2030 an den nationalen Zielsetzungen. Ausgehend von dem Bestand der einzelnen EE-Technologien in den Regionen (Landkreis Osterholz und Stadt Wolfhagen) im Jahr 2013, ist der Zubau an installierter Leistung bis 2030 an die bundesweite Zubaurate, entsprechend den im Leitszenario 2011 A in den Langfristszenarien des Bundesumweltministeriums (Nitsch, Pregger, Naegler, Heide, Tena, Trieb, Scholz, Nienhaus, Gerhardt, Sterner et al. 2012) festgelegten, technologiespezifischen Ausbauzielen bis zum Jahr 2030, angelehnt.

Für die Annahmen zur regionalen Ansässigkeit der Unternehmen, Anlagenbetreiber/innen und Investor/innen entlang der EE-Wertschöpfungsketten im Jahr 2030 wurden darüber hinaus Informationen zu geplanten Projekten und den beteiligten Akteuren ausgewertet sowie auf Daten der Erhebung für den Status quo zurückgegriffen (siehe Kapitel 5.4.3).

Für die Szenario basierte Hochrechnung ist weiterhin zu berücksichtigen, dass sich bis 2030 die Investitionskosten in den meisten Fällen aufgrund von Lernkurveneffekten verringern werden und somit die spezifischen Investitionskosten der EE-Technologien einer Degression un-

terworfen werden müssen. Die Kostendegression bis zum Jahr 2020 wurde auf Basis der angenommenen Kostenentwicklung in den Langfristszenarien des Bundesumweltministeriums (BMU) (Nitsch, Pregger, Naegler, Heide, Tena, Trieb, Scholz, Nienhaus, Gerhardt, Sterner et al. 2012; Nitsch, Pregger, Naegler, Heide, Tena, Trieb, Scholz, Nienhaus, Gerhardt, Sterner 2012) berechnet. Vereinfachend wurde angenommen, dass sich die übrige Kostenstruktur nicht verändert. Auch bei den technologiespezifischen Eigenkapitelrenditen, welche für die Berechnungen für 2013 dem EEG-Erfahrungsbericht (BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2011) entnommen wurden, fand für das Jahr 2030 eine Anpassung statt. Die Eigenkapitalrenditen für ab 2013 zugebaute PV-Dachanlagen und Windenergieanlagen wurden auf Basis der aktuellen EEG-Erfahrungsberichte (Falkenberg et al. 2014; Kelm et al. 2014) angenommen. Sofern verfügbar, sind zudem Informationen zu projektspezifischen Eigenkapitalrenditen (bspw. bei Windparks in den Regionen) in die Berechnungen eingeflossen. Die Ermittlung der Steuern im Jahr 2030 erfolgt auf der Grundlage der im Jahr 2013 geltenden steuerlichen Gesetzgebung.

5.4.5 Ermittlung der Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte für den Status quo und das Zukunftsszenario

Grundsätzlich erzielt das WeBEE-Modell die Ergebnisse zu Wertschöpfung und Beschäftigung jeweils auf ein konkretes Jahr bezogen, da relevante Inputgrößen bzw. Modellparameter jahresbezogen vorliegen, beispielsweise die in einem Jahr gegebenen Investitionskosten, Steuersätze und Bruttojahresverdienste. Neben der regionalspezifischen Anpassung des Modells (siehe Kapitel 5.4.4) musste somit auch eine Anpassung der ökonomischen Kennzahlen für die unterschiedlichen Betrachtungsjahre vorgenommen werden. Für die Betrachtung des Status quo wurden reale Größen des Jahres 2013 recherchiert und das Modell für die zwei Regionen entsprechend angepasst. Die Abschätzung der Effekte im Jahr 2030 wurde auf Basis des für 2013 angepassten Modells unter Berücksichtigung von Lernkurveneffekten bei den EE-Technologien (Degression der Investitionskosten) durchgeführt. Zusätzliche Anpassungen einzelner Modellparameter für das Zukunftsszenario wurden in den Kapiteln bei den regionalen Fallstudien erläutert.

Die Berechnung der Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien für die Bezugsjahre 2013 und 2030 erfolgte demnach für die zwei Regionen Landkreis Osterholz und Stadt Wolfhagen jeweils mit dem regionalspezifisch und auf das entsprechende Bezugsjahr angepassten Modell und auf Basis der erhobenen Eingangsdaten und Modellparameter. Grundsätzlich muss bei der Interpretation der Ergebnisse beachtet werden, dass den Berechnungen – sofern keine validen Daten zur Verfügung standen – teilweise Annahmen, Abschätzungen und Hochrechnungen zugrunde liegen.

5.5 Energiesystemanalysen und Modellierung mit OEMOF

Im Folgenden werden die methodischen Grundlagen für die Modellierung der Energiesysteme in den Fallbeispielen Osterholz und Wolfhagen vorgestellt. Mit dieser Modellierung werden mehrere Ziele verfolgt, sie dient erstens der Systembeschreibung, zweitens einer prospektiven regionalen Vulnerabilitätsanalyse in Form einer Energiesystemanalyse. Zum dritten werden mit einer zukunftsorientierten Szenario basierten Modellierung und Simulation die Möglichkeiten und Grenzen einer resilienteren Gestaltung der regionalen Energiesysteme abgeschätzt.

Für die Analyse von regionalen Energiesysteme im Rahmen der Vulnerabilitätsanalyse wurden einfache Berechnungen und Auswertungen mit Hilfe von Excel durchgeführt. Diese verfolgten das Ziel, Residuallastschwankungen und Volatilitäten zu berechnen, sowie auch die Diversität der Energieerzeugung im System zu erfassen. Die Diversität wurde Mithilfe des Indexes von Molyneaux ermittelt, wie es weiter unten näher beschrieben wird (Molyneaux et al. 2016). Der zeitgleiche Eigenversorgungsgrad berechnet sich aus dem Mittelwert der Quotienten der Erzeugung und des Verbrauchs je Zeiteinheit, wobei die Einzelwerte bei 100 Prozent gedeckelt sind. Je nach Fallstudie wurden Viertelstunden oder Stundenwerte berücksichtigt. Um die Charakteristik von Leistungsflüssen und Lastgradienten zu ermitteln, wurde die Residuallast analysiert. Die Volatilität wird über die Standardabweichung der mittleren Entnahmeleistung ermittelt. Der Residuallastgradient je definierter Zeiteinheit t ermittelt sich aus der Differenz t_0-t_1, wobei der Index 1 den späteren Zeitpunkt angibt. Nimmt man den großmöglichen Wert, stellt dieser den maximalen Residuallastgradienten dar.

Die funktionelle Diversität der Energieerzeugung D wird von uns mit dem von Molyneaux vorgeschlagenen Maß für die Diversität beschrieben, das auf dem Anteil unterschiedlicher Energiequellen E an der Gesamtenergieerzeugung beruht. Mit diesem Diversitätsindex wird die Wahrscheinlichkeit angegeben, mit der die nächste Einheit elektrischer Energie aus einer anderen Quelle stammt:

$$\boldsymbol{D = 1 - \sum_{i=1}^{N} E^2} \qquad \textbf{(Formel 5.1)}$$

Die möglichen Werte beginnen bei null falls keine Diversität vorliegt und die gesamte Erzeugung auf nur einen Anlagentyp zurückgeht[30]. Sehr hohe Diversitäten nähern sich dem Index 1 an.

Für die Modellierung von möglichst realistischen Zukunftsszenarien wurden pro Fallstudienregion je ein Maximal (b) und ein Minimalszenario (a) für den Ausbau von Erzeugungsanlagen erneuerbarer Energien im Jahr 2030 erstellt. Zusätzlich wurden für Wolfhagen Variationen zur Steigerung des Eigenversorgungsgrades und für Osterholz eine Modellierung des Landkreises

[30] Nach Molyneaux kann die funktionelle Diversität der Stromerzeugung als Quadratsumme der Leistungsanteile der unterschiedlichen Erzeugerarten an der gesamten Erzeugungsleistung dargestellt werden.

als regionale Zelle mit den Unterzellen, 5 Regionen und 11 Gemeinden durchgeführt, die Szenario 2040 bezeichnet wurde. Das Szenario 2040 beschreibt dabei eine wünschenswerte Zukunft und unterscheidet sich vom Ansatz her von den Minimal und Maximalszenarien.

Der Unterschied liegt in unterschiedlichen Szenarienverständnissen, Während die Minimal und Maximalszenarien eine möglichst realistisch mögliche Zukunft beschreiben wollen, beschreibt Szenario 2040 ein Leitkonzept umsetzende bzw. eine wünschenswerte Zukunft, welche wir mit dem Gestaltungsleitbild der regionalen Zelle umschreiben. Erstere Szenarien bilden die Grundlage für die Wertschöpfungsanalysen, die auf besonders großes Interesse der regionalen Akteure traf, da die Erhöhung der Wertschöpfung die Hauptmotivation für die regionale Selbstversorgung ist. Um also die Anschlussfähigkeit der möglichst realistischen Szenarien sicherzustellen wurde bei der Erstellung auf vorhandene Raumordnungspläne und Einschätzung der örtlichen Verwaltung zurückgegriffen.

Die Modellierung verfolgte das Ziel, die zukünftigen Anforderungen an das Energiesystem zu beschreiben und Optionen zur Vermeidung von Schwachstellen zu testen. Für die Modellierungen der Fallstudienregionen wurde auf ein Simulationsprogramm-Framework zurückgegriffen, das eigens für Energiesystemdarstellungen entwickelt wird.
Das Modellierungstool *open energy modelling framework (Oemof)* wird von verschiedenen Instituten federführend durch das Reiner-Lemoine-Institut in Berlin entwickelt (Free Software Foundation 2016). Dieses *Framework* wird im Weiteren kurz skizziert und die wichtigsten Komponenten vorgestellt (Hilpert et al. 2017). Im Rahmen von Resystra wurde mit den *Oemof* Versionen bis 0.0.7 unter Python 3.4.4 auf dem Betriebssystemen Windows 7 und 10 gearbeitet. Als *Solver* wurde Gurobi in der Version 6.5.2 verwendet. *Oemof* ist ein open source Framework, welches auf der Programmiersprache *python* basiert. Es kann Energiesysteme auf der Basis stündlicher Daten darstellen und die unterschiedlichen Komponenten in ihrer benötigten Leistung und Kapazität optimieren. Die Komponenten, die *Oemof* zur Verfügung stellt, sind in 5 Klassen strukturiert. Quellen, Wandler, Senken, Transport und Netze. Innerhalb dieser Klassen existieren unterschiedliche Entitäten, die genauer die entsprechenden Komponenten beschreiben. Es existieren unterschiedliche Arten von Quellen. Quellen speisen immer in lediglich ein oder mehrere Netze Energie ein. Sie haben also einen oder mehrere *Outputs*, allerdings keine *Inputs*.

Fixed Source Eine *Fixed Source* ist eine Energiequelle mit einer vorgegebenen Nennleistung. Die zur Nennleistung relative Einspeisung pro Periode muss vom Benutzer für jede einzelne Periode vorgegeben werden. Im Modell werden diese Quellen für alle Erzeuger erneuerbarer Energie verwendet.

Dispatch Source Eine *Dispatch Source* ist wie die *Fixed Source* eine Energiequelle mit einer vorgegebenen Nennleistung und einer fest definierten, zur Nennleistung relativen, Einspeisung pro Periode. Diese relative Einspeisung ist allerdings, im Unterschied zur *Fixed Source*, lediglich ein Maximalwert. Wenn in der Periode eine geringere Einspeisung in das Energiesystem sinnvoll ist, so kann die *Dispatch Source* entsprechend geregelt werden und weniger Energie einspeisen. Aufgrund der fehlenden Implementierung der Optimierung dieser Quellen werden diese Komponenten im Modell nicht verwendet.

Commodity Die *Commodity* verhält sich wie eine Ressource. Diese kann in ihrer gesamten Abgabe reguliert werden und in ihrer maximalen Abgabe pro Periode. Eine *Commodity* ist eine Energiequelle mit einem bestimmten Energiegehalt, der in einer definierbaren Geschwindigkeit eingespeist werden kann. Die Commodity wird in den regionalen Modellen der Fallbeispiele teilweise als externes Netz verwendet, da sich bei dieser Quelle die gesamte verfügbare Energie über den Szenariozeitraum festlegen lässt. Diese Quelle wird im Szenario 2040 für den Landkreis Osterholz – regionale Zelle - für den Stromimport aus dem externen Netz verwendet.

Shortage Die *shortage* Quelle ist eine hier verwendete Behelfsquelle. Sie ist von der Einspeiseleistung nicht begrenzt. Für diese Quelle können allerdings Kosten pro Einheit festgelegt werden was die Möglichkeit eröffnet die Einspeisung in das Energiesystem ökonomisch zu optimieren. Für diese Quelle ist im Gegensatz zu der *Dispatch Source* und der *Commodity* eine *investment* Optimierung in *Oemof* implementiert. Neben den Quellen, die nur einen *Output* haben, existieren auch Energiewandler. Diese haben einen oder mehrere *Inputs* und *Outputs*. Die entsprechende Klasse nennt sich *Transformer*.

Simple *Simple Transformer* haben eine einfache *Input/Output* Beziehung. Es lassen sich Wirkungsgrade und unterschiedliche Kostenparameter festlegen. Im Modell wurden mit diesen Komponenten die Transformatoren zwischen den unterschiedlichen Spannungsebenen im Stromnetz dargestellt.

CHP Diese Energiewandler sind speziell für die Verbindung von Strom, Gas und Wärmenetzen gedacht. Sie haben einen *Input* und zwei *Outputs*. Für jeden *Output* lassen sich eigene Wirkungsgrade definieren. Insofern lassen sich diese Komponenten sehr gut für die Darstellung der Blockheizkraftwerke und *Power to Fuel* Anlagen verwenden.

Storage Auch die Energiespeicher befinden sich in der *Transformer* Klasse, da diese genau wie die Energiewandler einen *Input* und einen *Output* haben. Es existieren noch weitere Komponenten in der Klasse *Transformer*, die in den erstellten Modellen allerdings keine Verwendung fanden. Aus diesem Grund wurden sie hier nicht aufgeführt[31].

Es existiert lediglich ein einziger Senkentyp. Dieser hat einen *Input* und keinen *Output*. Für die Senke muss für jede Periode ein bestimmter absoluter Bedarf definiert werden. Sämtliche Komponenten müssen immer an ein Netz angebunden sein. Aus diesem Netz wird der *Input* bezogen, oder es wird der *Output* in das Netz eingespeist. Um zwei unterschiedliche Netze miteinander zu verbinden, können Transport-Objekte verwendet werden. Diese funktionieren ähnlich wie Wandler. Sie haben einen *Input* und einen *Output*, die über einen konstanten Wirkungsgrad miteinander verbunden sind. Sämtliche Komponenten in *Oemof* können mit unterschiedlichen ökonomischen Parametern genauer definiert werden. Ebenso können Grenzwerte für die Optimierung, wie ein maximaler Ausbau einer bestimmten Komponente, vorgegeben werden. So können beispielsweise Flächenbegrenzungen berücksichtigt werden. Dies ist insbesondere bei Biogasanlagen, aufgrund des hohen Flächenbedarfes, sinnvoll. Mittels der implementierten *Investment* Optimierungs-Option ist es möglich, aus den Vorgaben die kostengünstigste Lösung zu berechnen. Die Optimierung erfolgt mittels des Simplex-Algorithmus. Aus dem programmierten Problem wird also eine Minimierungsfunktion mit entsprechenden Randbedingungen übersetzt und anschließend durch einen *Solver* gelöst. Die Konfiguration der Energiesysteme erfolgt über einen Texteditor direkt am Programmcode. Die Berechnung wird über die Kommandozeile initiiert. Die Berechnung erfolgt durch einen externen *Solver*. Für die Arbeit wurde der *Solver Gurobi* verwendet. Um die Ergebnisse der Berechnung zu erhalten, ist es notwendig, diese entweder in einer Zeitreihe in eine externe Datei ausgeben zu lassen oder diese von Python plotten zu lassen. Zeitreihen ist hier definiert als eine Reihe von Werten mit einem relativen oder absoluten Wert für jede Periode. Der Wert gibt die dem Netz entnommene oder die ins Netz eingespeiste Leistung oder die gespeicherte Energie einer Komponente an. Eine Zeitreihe einer Komponente in einem Modell mit 8760 Stunden muss dementsprechend 8760 Werte enthalten.

Neben dem Kernpaket *Oemof* existieren unterschiedliche weitere Projekte des Entwicklerteams. Im Rahmen von Resystra wurden zusätzlich die *feedinlib* und die *demandlib* verwendet. Diese erlauben, Zeitreihen der Verbraucher und Erzeuger zu erstellen. So kann die *feedinlib* aufgrund von stündlichen Wetterdaten Einspeiseverläufe für Windkraft und Photovoltaikanlagen erzeugen. Die *demandlib* kann auf Basis der Standardlastprofile des Bundesverbandes

[31] Auflistung aller *Transformer:* https://www.pythonhosted.org/oemof_base/api/oemof.core.network.entities.components.html#module-oemof.core.network.entities.components.transformers

der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) und von Temperaturdaten Strom- und Wärmebedarfe ermitteln. Aus diesen lassen sich dann entsprechende Elektrizitäts-, Gas- und Wärmebedarfe ermitteln.

Die Modellierung mit OEMOF ermöglichte uns, zukünftige Konfigurationen von regionalen Energiesystemen, basierend auf Szenarien, die im Austausch mit den lokalen Akteuren entwickelt worden waren, zu erstellen. Mit Modellierungen konnten Zeitreihen für Erzeugung und Verbrauch erzeugt werden, was eine Analyse des Lastverhaltens in stündlicher Auflösung erlaubte. Die Ergebnisse werden in den Fallstudienkapiteln für die Regionen Landkreis Osterholz und Stadt Wolfhagen dargestellt. In der Analyse der dynamischen Systemveränderungen zeigten sich die Grenzen der auf der Basis von OEMOF durchgeführten linearen Optimierung. Auch ein Versuch Modelle mit Ausfallszenarien zu berechnen scheiterte, da der Solver in angemessener Zeit zu keiner Lösung kam. Ebenso wenig wird die Berechnung über Monte-Carlo Simulationen, mit der eine Vielzahl von Ausfällen hätte durchgespielt werden können, durch OEMOF unterstützt. Auch die Evolution der Systeme über die Zeit, also eine dynamische Modellierung, lässt sich mit OEMOF nicht darstellen. Solch eine Modellierung hätte es ermöglicht, verschiedene Transformationspfade näher zu untersuchen und anschließend die Vulnerabilitäten zu bestimmen. Hierfür würde sich die Methode der Agenten-basierten Modellierung eignen, die später dargestellt wird, da sie für die Fallstudie, Power-to-Fuel verwendet wurde.

5.6 Vulnerabilitätsanalyse

Der Begriff der Vulnerabilität wurde bisher, neben einem starken Diskussionsstrang in der Psychologie (Deveson 2003; Walsh 2003), vor allem mit Blick auf die Voraussetzungen und Folgen von Naturkatastrophen (vgl. O'Keefe et al. 1976) verwendet. Eine für unsere Zwecke geeignete **Definition von Vulnerabilität** lautet folgendermaßen:

„The degree to which a system is likely to experience harm due to exposure to a hazard, either an exogenous perturbation or an endogenous stress or stressor.“ (Turner et al. 2003, S. 8074)

Im Rahmen von Resystra geht es um die Verwundbarkeit sozio-technischer Energiesysteme gegenüber inneren und äußeren Störereignissen einschließlich ihrer Anpassungskapazitäten, also ihrer Fähigkeiten, mit Störereignissen in einer Art und Weise umzugehen, dass die von ihnen erwarteten Systemleistungen weiterhin aufrechterhalten werden können. Die Vulnerabilität eines Systems bezieht sich also in unserem Verständnis auf die Einschränkung seiner Systemleistungen, so dass diese zur Operationalisierung der Vulnerabilitätsanalyse des Energiesektors definiert sein müssen (vgl. Kapitel 3.2).

Mit Blick auf das in Frage stehende System ist somit zu untersuchen, welche Systemleistungen von wem als wichtig und unverzichtbar angesehen werden. Zu berücksichtigen ist dabei auch die Qualität einer Dienstleistung, nämlich in dem Sinne, dass die Anpassungsfähigkeit

eines Systems auch darin begründet sein kann, dass es ggf. mit qualitativ geringwertigeren Komponenten (Produkte, Flüsse, Dienstleistungen, etc.) auszukommen lernt.

5.6.1 Die Methode der ereignisbezogenen und der strukturellen Vulnerabilitätsanalyse

Die Verletzlichkeit eines Systems interessiert nicht nur bezogen auf äußere Störereignisse (ereignisbezogene Vulnerabilitätsanalyse) sondern auch bezogen auf innere Störereignisse und Ausfälle (strukturelle Vulnerabilitätsanalyse).

Wenn man versucht, den Vulnerabilitätsbegriffs für die Methodik einer **ereignisbezogenen Vulnerabilitätsanalyse** zu operationalisieren, wird schnell deutlich, dass die Vulnerabilität nur zum Teil bestimmt wird durch die Stärke und Qualität des Störsignals bzw. die Exposition ihm gegenüber. Die zweite wesentliche Komponente ist die Empfindlichkeit des Systems - Sensitivität und die dritte wesentliche Komponente ist die Fähigkeit der betroffenen Systeme das Störsignal zu kompensieren oder sogar für sich die darin liegenden Chancen zu nutzen - Anpassungskapazität. (Bohle 2008; Hanson 2005; Turner et al. 2003).

Während die **Sensitivität** (sensitivity) beschreibt, in welchem Maße das Energiesystem als Ganzes oder Teil auf eine definierte potenzielle Störung reagiert. Beschreibt die **Anpassungskapazität** (adaptive capacity) die Fähigkeit eines Systems, sich an Störungen anzupassen und potenziellen Schaden zu mindern. Die Anpassungskapazität bezieht sich auch auf die Zukunft im Sinne der Möglichkeit, zusätzliche Maßnahmen zu ergreifen. Es geht um mögliche Vermeidungs-, Minderungs- oder Schutzmaßnahmen, die über das bereits Bestehende hinausgehen. In der Vergangenheit bereits getroffene Anpassungsmaßnahmen fließen in die Analyse der Sensitivität mit ein.

Die Analyse konzentriert sich also erstens auf die Bestimmung der Exposition, d.h. die Klärung der Frage, ob das System von bestimmten äußeren Störimpulsen bzw. Veränderungen seiner Rahmenbedingungen betroffen ist, kurz: ob es überhaupt ‚exponiert' ist. Im zweiten Schritt wird die Frage nach der Sensitivität geklärt, d.h., ob das System gegenüber diesen Störimpulsen ‚Schnittstellen' bzw. Rezeptoren aufweist, ob diese mit für das Erbringen der Systemleistungen relevanten (sensiblen) Strukturen und Funktionen verbunden sind, und wie ‚empfindlich' das System an diesen Rezeptoren ist, sowohl in positiver als auch in negativer Hinsicht. Das Ergebnis der Bestimmung von Exposition und Sensitivität wird als **potenzielle Auswirkungen** bezeichnet. Im dritten Schritt wird nun untersucht, wie das System auf entsprechende Störungen / Belastungen reagiert und welche Fähigkeiten es besitzt, um diese Störungen / Belastungen zu verarbeiten. In diesem Schritt wird also die Adaptivität bzw. Anpassungskapazität des betroffenen Systems untersucht. Als Ergebnis der Analyse von Exposition, Sensitivität und Anpassungskapazität ergibt sich dann erst die ereignisbezogene Vulnerabilität des Systems. Vulnerabilität wird somit von uns in Übereinstimmung mit einem Großteil der einschlägigen

Literatur (vgl. Bundesregierung 2008; Isoard et al. 2008; Kommission der europäischen Gemeinschaften 2009; Kropp et al. 2009; Stock 2005) für eine ereignisbezogene Vulnerabilitätsanalyse (EVA) als Funktion von Exposition, Sensitivität und Anpassungskapazität operationalisiert V= f (E, S, Ak)[32].

Mit Blick auf die Frage nach möglichen Wirkungen der Störereignisse im System ist es unmöglich, alle denkbaren (und erst recht undenkbaren) Systemdynamiken zu untersuchen. Wir können aber sehr wohl die Struktur des betroffenen Systems daraufhin untersuchen, ob es „Schwachstellen" gibt, die unter solchen turbulenten Umgebungsbedingungen bzw. unter dem damit verbundenen Stress nachgeben könnten. Diese im Maschinen- und Anlagenbau sowie im Bereich der Absicherung von Computernetzen gegenüber Angriffen weit verbreitete Herangehensweise[33] fragt systematisch nach der Verlässlichkeit des betreffenden Systems (system reliability), also danach, wo anfällige Schnittstellen zwischen Systemkomponenten oder Subsystemen liegen, was ‚kritische Systemelemente' sind, deren Ausfall das System in kritische Zustände versetzen könnte, bzw. an welcher Stelle das System voraussichtlich am ehesten ‚nachgibt', wenn es unter Druck bzw. Stress gerät. Ein wichtiger zusätzlicher Aspekt wird auf diese Weise auch mit Blick auf mögliche Störimpulse berücksichtigt. Der Blick richtet sich bei der **strukturellen Vulnerabilitätsanalyse** nicht mehr auf Störimpulse, sondern auf Auswirkungen von externem und internem Stress auf die jeweiligen Systeme.

Auf der Unterscheidung zwischen externen Störungen und internen Stressoren basiert die Differenzierung zwischen zwei Typen und Vorgehensweisen von Vulnerabilitätsanalysen (Gleich, Gößling-Reisemann, Stührmann, Lutz-Kunisch et al. 2010). Die **ereignisbezogene Vulnerabilitätsanalyse (EVA)** schaut zunächst auf die Störereignisse von außen, die Exposition des Systems und auf seine Sensitivität diesen Störereignissen gegenüber und dann auf die Anpassungskapazität, vgl. Abbildung 5.2. Eine **strukturelle Vulnerabilitätsanalyse (SVA)** konzentriert sich dagegen zunächst auf die Schwachstellen im System, die ausfallen bzw. nachgeben können, wenn das System unter Stress gerät und dann auf die Verarbeitungskapazität für derartige Ausfälle. Sie fragt also danach, welche Systemkomponenten ausfallen könnten, wenn das System unter Stress gerät, und wie sich dieser Ausfall dann im System fortpflanzen

[32] „In all formulations, the key parameters of vulnerability are the stress to which a system is exposed, its sensitivity, and its adaptive capacity." (Adger (2006, S. 269)). Für eine genaue Definition und Operationalisierung von klimawandelbezogenen Vulnerabilitätsanalysen siehe Schuchardt und Wittig (2009)).

[33] Vgl. z.B. die FMEA-Methode (failure mode and effects analysis) bzw. FMECA (failure modes, effects and criticality analysis) (vgl. z.B. Eberhard 2012), sowie FTA (Fault Tree Analysis) (vgl. z.B. Schilling (2009)) sowie Ursache-Wirkungs-Diagramme, welche teilweise noch ereignisbezogene (auf äußere Störimpulse fokussierte), aber teilweise auch schon stark strukturbezogene (auf innere Störimpulse bzw. Ausfälle und deren Ausbreitung fokussierte) Analysetechniken darstellen.

würde[34]. Für eine SVA entfällt die Abhängigkeit von der Exposition (vgl. Abbildung 5.3). Hinsichtlich der Anpassungskapazität unterscheiden wir noch zwischen der Anpassungsbereitschaft und der sozioökonomischen und institutionellen Anpassungskapazität. Damit untersucht die strukturelle Vulnerabilitätsanalyse systematisch die Folgen zufälliger Entwicklungen in Bezug auf die wesentlichen Unsicherheiten und identifiziert auch die Schwachstellen, die am ehesten zu Einschränkungen der Systemleistungen führen könnten. Letztere wären ggf. auch primäre Ziele von intendierten Störereignissen, also von Angriffen und Anschlägen.

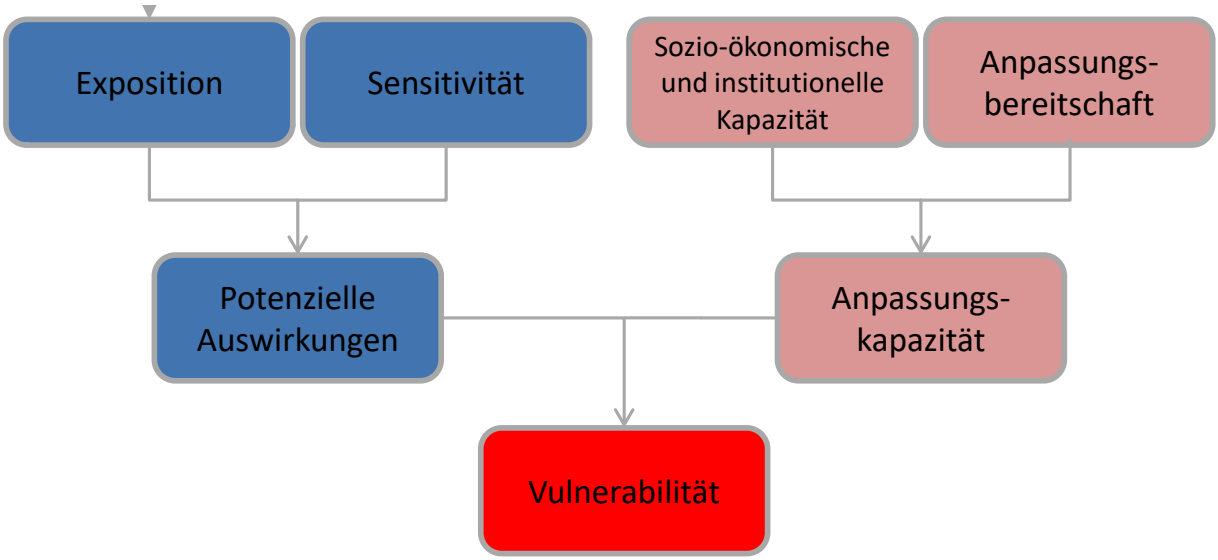


Abbildung 5.2: Darstellung des theoretischen Rahmens der Ereignisbezogenen Vulnerabilitätsanalyse (EVA) (Darstellung in Anlehnung an Schuchardt und Wittig 2009 und (Gleich, Gößling-Reisemann, Stührmann, Lutz-Kunisch et al. 2010)).

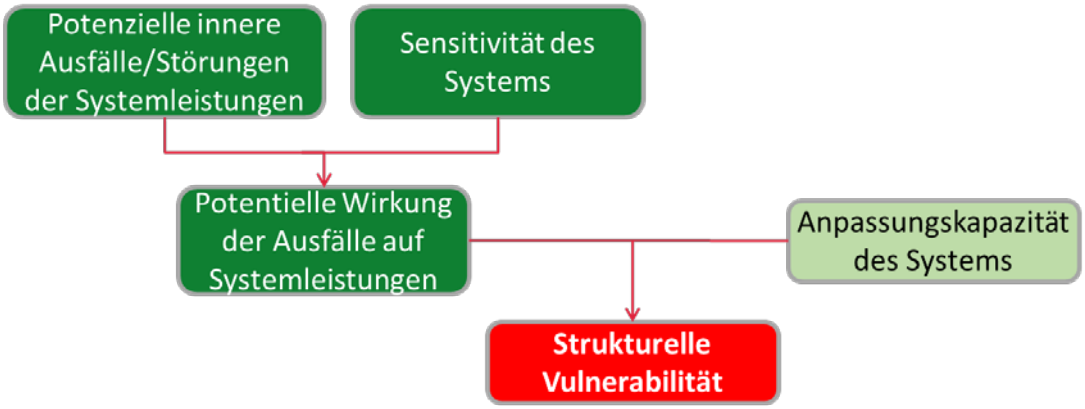


Abbildung 5.3: Schematische Darstellung der bei Resystra benutzten Vorgehensweise bei der Strukturellen Vulnerabilitätsanalyse (SVA) (Darstellung in Anlehnung an Schuchardt und Wittig 2009 und Gleich et al. 2010).

[34] Letzteres ist aus der Risikoanalyse technischer Anlagen als Fehlerbaumanalyse (Fault Tree Analysis) bekannt (vgl. z.B. Schilling (2009)).

5.6.2 Potentielle innere Ausfälle, Indikatoren und Wirkmechanismen für Energiesysteme zur Operationalisierung der strukturellen Vulnerabilitätsanalyse

Im Folgenden sollen im Sinne einer strukturellen Vulnerabilitätsanalyse potentielle innere Ausfälle für Energiesysteme zusammengefasst und für die zu betrachtenden Fallstudien „Regionale Selbstversorgung“ und „strombasierte synthetische Kraftstoffe“ operationalisiert werden. Hierfür werden soweit möglich Indikatoren bzw. Fragestellungen zur Sensitivität und Anpassungskapazität aufgeführt. Die inneren Ausfälle bzw. Störungen beziehen sich dabei immer auf eine Beeinträchtigung der direkten bzw. indirekten Systemleistungen, die in Kapitel 3.2 definiert wurden.

5.6.2.1 Potentielle Ausfälle, sowie abgeleitete Indikatoren für Fallstudien

Im Rahmen der Ermittlung und Bewertung von Verwundbarkeiten eines Systems gibt es unterschiedliche mögliche Vorgehensweisen. Indikatoren haben den Vorteil, dass diese häufig eine quantitative und objektive Bewertung ermöglichen. Unter einem Indikator verstehen wir nach Gallopín „eine Variable (nicht einen Wert), die eine operationalisierte Beschreibung einer Eigenschaft oder Charakteristik eines Systems darstellt“ (Gallopin 1997; Merz 2010). Bei der Aufstellung von Indikatoren muss demzufolge beachtet werden, was die Indikatoren indizieren und wie Ergebnisse / Werte zugewiesen werden, also die Bewertung erfolgt. Es werden Indikatoren ermittelt, welche in quantitativer Weise (z.B. modellbasiert durch Auswertungen von modellierten Ausfällen und deren Wirkungen auf das System) oder in qualitativer bzw. semi-quantitativer Weise Bewertungen ermöglichen. Diese Bewertungen, wie z.B. „hat hohe/mittel/geringe Auswirkungen auf das System“, werden zusätzlich über geeignete Beteiligungsformenexterner Experten abgesichert (z.B. im Rahmen einer Delphibefragung oder über die sachkundige Einordnung durch wissenschaftliche Experten).

Im Folgenden sollen Indikatoren für die nachfolgend aufgeschlüsselten Ausfälle zusammengestellt werden:

Ausfall von technischen Komponenten

Ausfall von Marktplayern

Ausfall Prognosesicherheit

Mangel an Ressourcen (Bsp. Energie/Primärquellen / Materialien / Fachpersonal)

Skandalisierung des Ausbaus EE

5.6.2.1.1 Indikatoren für die Vulnerabilitätsanalyse eines regionalen Energiesystems

In diesem Abschnitt werden für die bereits eingeführten Ausfälle Indikatoren für Sensitivitäten und Anpassungskapazität des regionalen Energiesystems dargestellt.

5.6.2.1.1.1 Ausfall einer Komponente

Tabelle 5.3: Indikatoren für Sensitivität und Anpassungskapazität bei Ausfall von Anlagen (Erzeugung, Wandlung, Verarbeitung)

Sensitivität	Anpassungskapazität regionales Energiesystem
Anteil der Anlage an Gesamterzeugungsleistung	Anzahl Großverbraucher (Großverbraucher: > 10% der Gesamtausspeisung)
Shannon-Index Funktionelle Diversität (Molyneaux)	Anzahl unterschiedlicher Verbraucherarten (Privathaushalt/Gewerbe/öfftl. Einrichtungen)
Eigenversorgungsgrad in Region	Volatilität als Standardabweichung der Erzeugungsleistung P [W]
Spezifische Emissionen (t CO_2 -Äquivalente/kWh)	Endenergieverbrauch je Einwohner-/in
Generation adequacy (regionale Bilanz)	gewonnene Energieeinheit je Primärenergieeinheit
	Sicherung von Preisen für Energieimport
	Anzahl unterschiedlicher Erzeugungsarten gewichtet nach ihrem jeweiligen realen Gesamtenergieanteil pro Jahr (W/t) [Mwh/a]
	Anzahl der verschiedenen nutzbaren lokalen Energiequellen

Tabelle 5.4: Indikatoren für Sensitivität und Anpassungskapazität bei Ausfall von Steuerung und Regelung: (Netzsteuerung, IT Infrastruktur, Kommunikation)

Sensitivität	Anpassungskapazität regionales Energiesystem
Redundante Struktur vorhanden?	Existenz von Betriebsmodi ohne IT keine zentrale Datenablage
Häufigkeit der Spannungsbandverletzungen	Mögliches Lastmanagement vorhanden
	Dezentrale Steuerungsmöglichkeiten vorhanden?
	Unterschiedliche Kommunikationskanäle vorhanden? Anzahl und Ebenen der Leitwarten/Steuereinheiten [Zahl]
Vernetzungsgrad	Anteil Komponenten, die sich manuell schalten lassen [Zahl]
	Anteil loser Kopplungsmöglichkeiten

Tabelle 5.5: Indikatoren für Sensitivität und Anpassungskapazität bei Ausfall von Infrastruktur (Umspannwerk / Transformator / Leitung)

Sensitivität	Anpassungskapazität regionales Energiesystem
Berücksichtigung des N-1 Kriteriums	Anzahl unterschiedlicher Übertragungsarten zu einem Punkt (z.B. Erdkabel vs. Freileitung) gewichtet nach ihrem jeweiligen realen Gesamtenergieanteil pro Jahr (W/t) [MWh/a]
Art der Netzstruktur (Stichleitung, Maschennetz)	Anteil regelbarer/trennbarer Verknüpfungen zur Übertragung, Speicherung, Energieumwandlung (z.B. regelbarer Ortsnetztrafo)
System adequacy (Importkapazitäten)	Anschluss an vorgelagerte Netzebenen, Anschluss an Gasversorgung für BHKWs etc.

5.6.2.1.1.2 Ausfall von Marktakteuren

Tabelle 5.6: Indikatoren für Sensitivität und Anpassungskapazität bei Ausfall von Marktakteuren

Sensitivität	Anpassungskapazität regionales Energiesystem
Marktanteile von Marktakteuren	Diversifizierung der Akteure
Erzeugungsleistung von Marktakteuren	Beschränkung der Erzeugungsleistung von Marktakteuren

5.6.2.1.1.3 Zunehmende Prognoseunsicherheit

Tabelle 5.7: Indikatoren für Sensitivität und Anpassungskapazität bei zunehmender Prognoseunsicherheit

Sensitivität	Anpassungskapazität regionales Energiesystem
Klimatische Veränderungen	Anzahl Übungen im Jahr
Lastgradienten	Anteil regelbarer Erzeugungs- und Verbrauchseinheiten (gewichtet nach Leistungsanteil)
	Anteil an Speicher- und Dämpferleistung zur Erzeugungsleistung [%]

5.6.2.1.1.4 Mangel an Ressourcen

Tabelle 5.8: Indikatoren für Sensitivität und Anpassungskapazität bei Mangel an Ressourcen

Sensitivität	Anpassungskapazität regionales Energiesystem
Anzahl Facharbeiter	mittleres Einkommen
Anteil redundanter Stellen	
Gesamtenergieverbrauch	
Nachfrage von externen Energiequellen (Eigenversorgungsanteil)	Möglichkeit der Energiespeicherung
Nutzflächenverbrauch (ha/kWh)	

5.6.2.1.1.5 Skandalisierung Ausbau EE

Tabelle 5.9: Indikatoren für Sensitivität und Anpassungskapazität bei Skandalisierung des Ausbaus von EE

Sensitivität	Anpassungskapazität regionales Energiesystem
Anzahl der Initiativen/Gegner	Partizipative Integration von Bürgergruppen
Stromkosten	Regionale Vermarktungsmöglichkeiten
Regionale Wertschöpfung durch EE	Anzahl an Vereinen und Genossenschaften sowie deren Mitgliederzahl
Gesamter Flächenverbrauch der Infrastruktur (ha/kWh)	
Abrupte Änderung der politischen Ziele	

5.6.2.1.2 Indikatoren für die Vulnerabilitätsanalyse der Technologie „strombasierte synthetische Kraftstoffe P2F“.

Die Herangehensweise bei der strukturellen Vulnerabilitätsanalyse für die Systeminnovation P2F unterscheidet sich von den regionalen Fallstudien. Im Fokus der zu analysierenden Schwachstellen steht hier eine Technologie anstelle eines Energiesystems. Typische Systemelemente und Strukturen (bspw. das n-1 Kriterium) können daher in Bezug auf die P2F-Technologie nicht auf Schwachstellen untersucht werden. Stattdessen liegt der Fokus auf der Untersuchung potentieller Störungen innerhalb des zugrundeliegenden technologischen Prozesses sowie auf Störungen, die sich in der „Umgebung“ von P2F-Prozessen ergeben könnten.

Folgende potentielle Störfälle wurden für die technologiebezogene strukturelle Vulnerabilitätsanalyse berücksichtigt:

- Materialengpässe (insbesondere von Katalysatoren)
- Betriebsabhängige Degradationseffekte
- Prozessabhängigkeit von schwankender Ressourcenverfügbarkeit (Strom, Wasserstoff, CO_2)
- Grenzen der Skalierung von P2F-Anlagen
- Einschränkung von Konzepten durch mangelnde Wirtschaftlichkeit
- Einschränkung des Zubaus von P2F-Anlagen durch mangelnde Akzeptanz

Bezüglich der Anpassungskapazität des Energiesystems ist zu bedenken, dass es sich beim P2F-Konzept um eine Innovation handelt, die im bisherigen Energiesystem noch keine Rolle spielt und praktisch nicht vorhanden ist. Sie wird vielmehr als entscheidende Zukunftstechnologie für ein Gelingen des Energiewendeprozesses im Bereich klimaneutrale Mobilität (v.a. Schwerlast- Luft- und Schiffsverkehr) gesehen. Anpassungskapazitäten eines zukünftigen Energiesystems sind deshalb kaum plausibel zu identifizieren, vor allem, da P2F-Anlagen mitunter völlig unterschiedliche Aufgaben im Energiesystem erfüllen sollen (bzw. unterschiedliche

Systemleistungen erbringen) und dementsprechend auch unterschiedlich konfiguriert sind. Die zu ermittelnde Anpassungskapazität ergibt sich also vielmehr aus den vorhandenen Kenntnissen zum Prozess selbst bzw. zu dessen Umwelt. So könnte bezüglich einer Störung in der Materialverfügbarkeit ermittelt werden, ob auch alternative, abundantere Materialen eingesetzt werden können, wodurch eine hohe Anpassungskapazität gegeben wäre.

5.6.3 Konkretisierung der Anwendung der Vulnerabilitätsanalyse für die Fallstudien

5.6.3.1 Vorgehen einer strukturellen Vulnerabilitätsanalyse von Energiesystemen zu bestimmten Zeitpunkten

In diesem Abschnitt wird das Vorgehen beschrieben welches im Projekt Resystra für die Fallstudien angewandt wurde. Die Auswirkungen von potenziellen Ausfällen von Elementen des Energiesystems unter Stress stehen im Mittelpunkt der hier dargestellten Vulnerabilitätsanalyse. Dabei werden die Struktur sowie die Auslastung des Systems untersucht, um kritische Elemente bzw. Zustände zu identifizieren. Hierbei wird auf eine ganze Reihe von Analysen zurückgegriffen, vornehmlich eine Systembeschreibung und Energiesystemanalyse, die z.B. über eine Modellierung erfolgen kann, des Weiteren eine Wertschöpfungsanalyse und eine Akteursanalyse, damit sozioökonomische Aspekte Berücksichtigung finden. Das Wichtigste ist jedoch eine enge Zusammenarbeit mit den lokalen Verantwortlichen und einen vertrauensvollen Austausch. Sie sind die Experten und kennen das System besser als jeder Externe, der für einen begrenzten Zeitraum das System untersucht.

Im Folgenden wird das Vorgehen skizziert, bevor die einzelnen Schritte näher beschrieben werden:

A) Durchführung einer Systemanalyse über eine Systembeschreibung und Modellierung
B) Führung von Interviews mit Netzverantwortlichen u. regionalen Akteuren zu potenziellen Ausfällen und Schwachstellen im Stromnetz (vgl. Anhang 10.2.1)
C) Brainstorming Sessions und Überlegungen zu möglichen Ausfällen
   Diskussion erster Ergebnisse und Ergänzungen in einem Workshop mit einem breiten Spektrum lokaler Akteure

Schritt A) ist am zeitintensivsten und erfordert hohe Recherchekapazitäten. Hierbei geht es darum, das System als Ganzes zu erfassen und in den wesentlichen Aspekten aufzunehmen. Häufig bietet es sich an über eine Simulation bzw. Modellierung das eigene Systemverständnis zu testen und die Grundlage für die Überprüfung möglicher Zukunftsszenarien, durch Berechnung von konkreten Systemzuständen und Zeitreihen, zu legen, wie es auch bei Resystra erfolgt ist.

Betrachtet werden technische Parameter wie die Erzeugung, der Verbrauch, die Netzinfrastruktur und Steuerung und Regelung. Aber auch sozioökonomische Aspekte spielen eine Rolle, wie das spätere Anwenden von möglichen Ausfallszenarien zeigen wird.

Schritte B) Um ein besseres Gefühl für das System und mögliche Ausfälle zu bekommen, wurden Interviews mit den Personen, die verantwortungsvolle Positionen im Energiesystem haben, geführt. Diese Informationen dienen später auch dazu verschiedene Szenarien zu kreieren und auf dabei die Motive und Leitvorstellungen der Stakeholder einzubeziehen.

Schritt C) Dieser letzte Schritt erfolgt zunächst einmal auf rein abstrakter Ebene und wird danach mit den lokalen Netzverantwortlichen besprochen. Auf der Grundlage der im vorherigen Abschnitt (vgl. 5.6.2) beschriebenen Störungen und Ausfälle mit den zugehörigen Indikatoren und Beschreibungen wird zu ermitteln versucht, wie sich das System unter Stress verhält. Die Bewertung erfolgt zunächst durch Wissenschaftler und wird dann über Expertenworkshops und Befragungen validiert. Zusätzlich werden Recherche- und Design Thinking Methoden angewandt, damit auch ungewöhnliche Fälle Berücksichtigung finden können.

5.6.3.2 Vorgehen einer Vulnerabilitätsanalyse von Transformationspfaden von Energiesystemen

Wie zu Beginn dieses Berichts schon dargelegt, gehen wir davon aus, dass die entscheidenden und wirklich bedrohlichen Vulnerabilitäten nicht in den derzeit schon existierenden Energiesystemen zu identifizieren sind, sondern dass sie sich erst im Zuge der großen anstehenden Transformationen zeigen werden. Der Vulnerabilitätsanalyse von Transformationspfaden kommt somit eine wesentlich größere Bedeutung zu. Derartige Analysen waren allerdings im Rahmen von Resystra nur ansatzweise zu leisten. Trotzdem wird im folgenden Kapitel eine idealtypische Vorgehensweise für die Ermittlung von Vulnerabilitäten in Transformationspfaden vorgestellt.

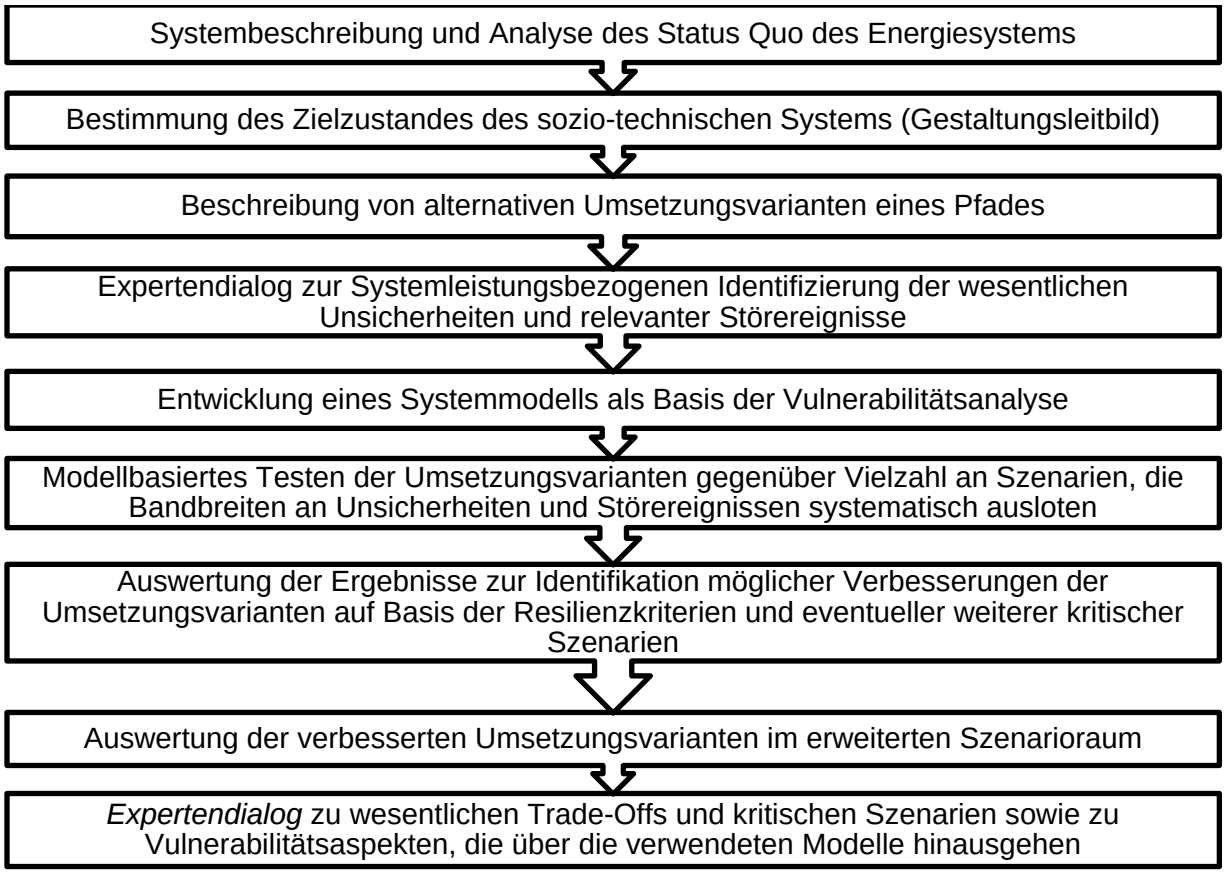


Abbildung 5.4: Darstellung der Schritte zur Ermittlung der Vulnerabilität von Transformationspfaden von Energiesystemen.

(1) Systembeschreibung und Analyse des Status Quo des Energiesystems

Der erste Schritt dient dazu, dass zu untersuchende System abzugrenzen (Systemgrenze) und ein allgemeines Systemverständnis zu erlangen. Dies wird ergänzt durch eine erste Analyse des bisherigen Zustandes (Status Quo) und seiner charakterisierenden Eigenschaften

(2) Bestimmung des Zielzustandes des sozio-technischen Systems

Bei der Betrachtung von Schwachstellen von Transformationspfaden ist es entscheidend normativ festzulegen welche Zielzustände des Systems in Frage kommen, um damit den Szenarioraum einzugrenzen.

Das erwünschte Zukunftssystem wird dabei sozio-technisch beschrieben.

(3) Beschreibung von alternativen Umsetzungsvarianten eines Pfades

Um einen Transformationspfad in Bezug auf seine Vulnerabilität zu bewerten, sollten zunächst auf Basis der verfügbaren Fachliteratur die verschiedenen denkbaren Umsetzungsvarianten identifiziert und konkretisiert werden. Beispiele sind: Kommt eine neue Technologie zentral oder dezentral zum Einsatz und welche Durchdringungsrate erreichen relevante soziale Innovationen? Auf diese Weise sollten sich später nicht nur Aussagen dazu treffen lassen, wie vulnerabel ein bestimmter Transformationspfad ist, sondern auch wie er sich ggf. mit möglichst geringer Vulnerabilität umsetzen lässt.

Zur Beschreibung der Umsetzungsvarianten gilt es klar zu trennen, welche Parameter als externe Rahmenbedingungen aufgefasst werden und welche als interne Variablen, mittels derer in der Folge die jeweilige Ausgestaltung des Transformationspfads beschrieben wird. Im Fokus sollte dabei zunächst die Festlegung der internen Parameter stehen, weil die relevanten Rahmenbedingungen im nächsten Schritt ausführlicher adressiert werden.

Ein wichtiges Kriterium für die Auswahl der internen Parameter ist ihre Beeinflussbarkeit durch die am Transformationsprozess Beteiligten. Denn für die nicht signifikant beeinflussbaren Parameter sollen in der Folge möglichst viele denkbare Entwicklungen analysiert werden. In vielen Fällen wird sich dabei die Systemgrenze nur so ziehen lassen, dass sich eine mögliche Beeinflussung auf eine sehr große Anzahl an beteiligten Akteuren bezieht, z.B. die Nutzer einer bestimmten Technologie.

Problematisch ist hierbei, dass auch eine missbräuchliche Nutzung oder anders geartete Umsetzung nie ausgeschlossen werden kann. In diesem Zusammenhang sollte vorläufig abgewogen werden, ob das jeweilige Verhalten ausreichend beeinflussbar ist oder doch den externen Rahmenbedingungen zugerechnet werden sollte. Das Ergebnis der Abwägung ist dann später in die Diskussion der Ergebnisse einzubeziehen.

Bei der Auswahl der zu beschreibenden Umsetzungsvarianten geht es darum, die Breite der denkbaren Umsetzung in einer geringen Zahl von plausiblen Alternativen abzubilden. Die Beschreibung der Alternativen sollte an dieser Stelle die zentralen Merkmale qualitativ beschreiben. Eine Quantifizierung und eine eventuelle dynamische Anpassung an Rahmenbedingung können dann im nächsten Schritt erfolgen.

Für jede Umsetzungsvariante sollte einerseits die Bandbreite an relevanten Zielsystemen als auch die Bandbreite der Transformationspfade dorthin charakterisiert werden, unter Bezugnahme auf das beschriebene Systemverständnis.

Zu dieser Charakterisierung gehören u.a.:

- einzubeziehende Systemleistungen/Versorgungsgüter
- Höhe des Durchschnitts- und des Spitzenbedarfs an den verschiedenen Versorgungsgütern und zeitlich verschiebbarer Anteil des Spitzenbedarfs
- Wandlungskapazitäten zwischen den relevanten Versorgungsgütern
- Anteile der Erzeugung im regionalen Verteilnetz und im überregionalen Austauschnetz, sowie Importanteil für jedes der relevanten Versorgungsgüter
- Mix der Erzeugungsarten auf den verschiedenen Versorgungsebenen
- Umfang an Speichern für die relevanten Versorgungsgüter

- Kapazitäten der Übertragung der Versorgungsgüter von der Austauschebene in die Verteilebene und umgekehrt sowie Anzahl der Übertragungsstellen
- Verantwortlichkeiten für die Koordinierung der Erbringung der System Services auf den verschiedenen Versorgungsebenen

(4) *Expertendialog* zur Systemleistung-bezogenen Identifizierung der wesentlichen Unsicherheitsbereiche und relevanter Störereignisse

Im diesem Schritt geht es vor allem darum die relevanten externen Rahmenbedingungen zu identifizieren und die Spannbreiten ihrer Entwicklung zu beschreiben. In der Regel ist eine Vielzahl von Rahmenbedingungen relevant, über deren Entwicklung hohe Unsicherheiten bestehen. Deswegen ist es wichtig, schon früh auf die vorhandene Expertise eines breit aufgestellten Experten- und Stakeholderpanels zurückzugreifen. Dies kann in Form einer schriftlichen Abfrage und/oder eines Workshops geschehen.

Vorab sollten dabei die Umsetzungsvarianten vom Expertenpanel auf ihre Plausibilität geprüft werden. Außerdem sollte festgelegt werden, welche Qualitätskriterien der relevanten Systemleistungen in die Vulnerabilitätsanalyse einbezogen werden und bei welchen Entwicklungen diese als beeinträchtigt oder gestört gelten sollen. Beispielsweise könnte entschieden werden, dass neben der generellen Versorgungssicherheit die Qualitätskriterien Wirtschaftlichkeit, Klimaschutz und Flächennutzung einbezogen werden sollen, nicht aber weitere Umweltwirkungen wie Ressourcenverbrauch und Schadstoffemissionen. Dann wären als verträglich angesehene Obergrenzen für Kosten und Flächenverbrauch und ein Mindestniveau an CO_2-Emissionsreduktionen anzugeben. Dieser Schritt ist vergleichbar mit der Festlegung von Schutzzielen für kritische Infrastrukturen.

Bei der Identifizierung wesentlicher Unsicherheitsbereiche und relevanter Störereignisse für die Transformationsoption können die identifizierten Rahmenparameter als Ausgangspunkt dienen. Als Methode zur systematischen Identifizierung der wesentlichen Unsicherheiten und Störereignisse kann ein Vorgehen in Anlehnung an die Fehlerbaumanalyse in Bezug auf die Erbringung der Systemleistungen dienen. Es sollten also detaillierte Überlegungen angestellt werden, welche Ursachen für eine Beeinträchtigung jedes der vorher festgelegten Qualitätskriterien im Kontext des jeweiligen Transformationspfads denkbar sind.

Zu beachten ist, dass ein solches Vorgehen primär die bekannten Unbekannten zu Tage fördert und höchstens exemplarisch bisher unbekannte Unbekannte. Prinzipiell ist es selbstverständlich unmöglich, jegliches Störereignis vorherzusehen. Eine gewisse Kompensation dafür kann in der Folge durch das systematische Überschreiten der bekannten Unsicherheitsbereiche und die Betrachtung ausgewählter Extremereignisse erreicht werden.

(5) Entwicklung eines Systemmodells für die Vulnerabilitätsanalyse

Für die systematische Analyse der Vulnerabilität muss ein entsprechendes Systemmodell entwickelt werden. In diesem Modell sollten die Komponenten und Wechselwirkungen so gewählt werden, dass die identifizierten alternativen Umsetzungsvarianten und die identifizierten wesentlichen Unsicherheiten und Störereignisse so weit möglich abgebildet werden können. Dabei müssen die qualitativen Beschreibungen der Umsetzungsoptionen in quantitative Pfade bzw. dynamische Entwicklungsregeln übersetzt werden. Denn es ist nicht davon auszugehen, dass ein statischer Entwicklungspfad den vielen möglichen Entwicklungen der Rahmenbedingungen annähernd gerecht wird. Da eine Anpassung und Feinabstimmung später möglich ist, können die Entwicklungsregeln an dieser Stelle ohne eine detaillierte Vorauswertung des Modells gewählt werden.

Zur Analyse der Konsequenzen der integrierten Unsicherheiten und Störereignisse sollten einerseits Indikatoren für die Variation der ausgewählten Qualitätskriterien der Systemleistungen bei sich ändernden Rahmenbedingungen oder Störereignissen enthalten sein. Andererseits sollten geeignete Vulnerabilitätsindikatoren für die Sensitivität und die Anpassungskapazität sowie u.U. für die Exposition des Transformationspfads ausgewählt und in das Modell integriert werden. Diese können an die Designprinzipien Resilienter Systeme angelehnt werden.

Das folgende modellbasierte Testen der Umsetzungsvarianten sollte sich sowohl auf den Transformationspfad als auch auf den Zielzustand beziehen. Daher bedarf das Modell zweier Zeitskalen: einer längerfristigen Zeitskala, auf welcher die Vulnerabilität des Transformationspfads betrachtet, und einer kurzfristigen, auf der die Vulnerabilität des Zielzustands überprüft wird.

(6) Modellbasiertes Testen der Umsetzungsvarianten gegenüber Vielzahl an Szenarien, die Bandbreiten an Unsicherheiten und Störereignissen systematisch ausloten

Für das modellbasierte Testen der Umsetzungsvarianten sollten eine Vielzahl an Szenarien generiert werden, die Bandbreiten an Unsicherheiten und Störereignissen systematisch ausloten. Je nach Kapazitäten und Rechenaufwand sollte dafür ein geeignetes Vorgehen gewählt werden. Denkbar ist für die relevanten Parameter nur eine Mittel- und Extremwertbetrachtung durchzuführen. Dabei kann eine zufällige Generierung der Szenarien im Sinne einer Monte-Carlo-Simulation in Betracht gezogen werden.

Verlässt einer der Indikatoren für die Qualitätskriterien den Bereich der akzeptablen Spannbreite, sollte die Vulnerabilität gegenüber dem jeweiligen Szenario als hoch eingestuft werden. Dabei ist je nach Indikator festzulegen, ob die Aggregation über einen Szenariendurchlauf auf Basis einer Worst-Case-, einer kumulativen oder einer Mittelwertbetrachtung erfolgt.

(7) Auswertung der Ergebnisse zur Identifikation möglicher Verbesserungen der Umsetzungsvarianten auf Basis der Resilienzkriterien und eventueller weiterer kritischer Szenarien

Für die Vielzahl an Szenarien hingegen sollte im Sinne des Robust Decision Making zunächst die gesamte Verteilung der Indikatorwerte zur Verfügung stehen. Zur weiteren Auswertung können entsprechende Kenngrößen dieser Verteilung, wie z.B. bestimmte Perzentile, herangezogen werden.

Dabei ist zu beachten, dass die Verteilung der Indikatorwerte nicht grundsätzlich als eine statistische Verteilung angesehen werden kann. Sie wird erst zu einer echten Verteilung bei der Annahme von Wahrscheinlichkeiten für die verschiedenen Entwicklungen der Rahmenparameter, wozu sich in der Regel keine Aussagen treffen lassen. Werden diesbezüglich keine Annahmen gemacht, aber dennoch Perzentile oder ähnliche Größen ausgewertet, so beinhaltet dies implizit die Annahme, dass alle Szenarien gleich wahrscheinlich sind. Darüber hinaus sind die Kenngrößen auch teilweise von den Verhältnissen zwischen den Abstufungen der einzelnen Parameter abhängig, so dass die Wahl der Abstufungen die Ergebnisse beeinflussen kann.

Wenn die Systemleistungen bei bestimmten Anwendungsoptionen vulnerabel gegenüber gewissen Typen von Szenarien sind, sollte geprüft werden, ob sich aus den Vulnerabilitätsindikatoren der Ursprung der Vulnerabilität ableiten lässt und eine Verbesserung der jeweiligen Umsetzungsvariante möglich ist, insbesondere durch die Berücksichtigung weiterer Resilienzprinzipien. Zur Verbesserung des Zielzustands sind dabei vor allem die für die Widerstands- und Improvisationsfähigkeit nützlichen Prinzipien in Betracht zu ziehen, und entsprechend für die Verbesserung des Transformationspfads die die Anpassungs- und Innovationsfähigkeit nützlichen Prinzipien.

Andererseits sollte geprüft werden, ob für die angepassten Umsetzungsvarianten vorher ausgelassene Unsicherheiten und Störereignisse einzubeziehen sind.

(8) Auswertung der verbesserten Umsetzungsvarianten im erweiterten Szenarioraum

In diesen Schritt sollten die erarbeiteten verbesserten Umsetzungsvarianten und eventuell ergänzende Unsicherheiten und Störereignisse einbezogen werden. Bei der Auswertung sollten wiederum die wesentlichen Trade-Offs zwischen den verschiedenen Umsetzungsvarianten und die jeweils kritischen Szenarien in Bezug auf die Entwicklung der Rahmenbedingungen herausgearbeitet werden.

(9) *Expertendialog* zu wesentlichen Trade-Offs und kritischen Szenarien sowie zu Vulnerabilitätsaspekten, die über die verwendeten Modelle hinausgehen

In einem zweiten Expertendialog sollten die als wesentlich identifizierten Trade-Offs und kritischen Szenarien präsentiert und diskutiert werden. Falls sich dabei Ungereimtheiten zeigen,

sollte im Anschluss in Abstimmung mit den Experten eine entsprechende Überprüfung der Ergebnisse erfolgen.

Bei der Diskussion der Ergebnisse sollte beachtet werden, dass die modellgestützte Analyse stets auf ausgewählte Aspekte der Vulnerabilität fokussiert und eine Vielzahl u.U. ebenfalls wichtiger Aspekte dabei außen vor bleiben, insbesondere solche, die sich schlecht in den Modellen abbilden lassen, wie z.B. der Kommunikationsbedarf zwischen den beteiligten Akteuren. Diese Aspekte sollte im finalen Expertendialog zumindest qualitativ diskutiert und für die verschiedenen Umsetzungsoptionen verglichen werden.

Schließlich sollten Schlussfolgerungen gezogen werden, ob und welche der Umsetzungsvarianten der betrachteten Transformationsoption in robuster Weise eine akzeptable Vulnerabilität erreichen können und wie ggfs. darauf hingewirkt werden kann, dass die entsprechenden Umsetzungsvarianten so ausgestaltet werden, dass tatsächlich eine geringe Vulnerabilität erreicht wird.

Im Prinzip ist eine Validierung durch Experten bei jedem der Schritte denkbar. Aus Gründen der Bewältigbarkeit kann die Anzahl der Expertenbefragungen auf zwei begrenzt und diese aus pragmatischen Gründen eher an den Anfang und ans Ende gestellt werden. Dies sollte kein Hinderungsgrund sein, auch Zwischenschritte mit geeigneten Experten abzustimmen.

5.6.3.3 Vorgehen zur Bewertung der strukturellen Vulnerabilität

Zur Ermittlung der potentiellen Auswirkungen auf die Systemleistungen werden, insoweit möglich, Indikatoren ausgewertet oder über Literaturanalyse bzw. Expertenbefragungen eine Einschätzung eingeholt.

Sodann wird die Sensitivität des Systems ermittelt. Zur Erfassung dieser Sensitivitäten sollten nach (Akamp und Mesterharm 2010) Sektor spezifisch geeignete Indikatoren definiert werden. In Kapitel 5.6.2 wurde der Versuch unternommen einige aussagekräftige Indikatoren zu ermitteln. Dies war nur in wenigen Fällen und nur für die technischen Aspekte sowie einige wenige wirtschaftlichen Aspekte möglich. Ansonsten wurden z.B. Einsatzmengen bzw. Nachfrage, Kosten bzw. Preise, Herkunft bzw. Einsatzort, Abhängigkeiten (Grad der Verfügbarkeit und Substitutionsmöglichkeiten) oder Qualität (Produkt- und Prozessqualität) auf einer qualitativen Ebene betrachtet.

Zur Bestimmung der potentiellen Auswirkungen wurde geprüft, ob sich aus den potentiellen Auswirkungen und ihrer Sensitivität substantielle Beeinträchtigungen entweder bei der Erbringung von Elektrizitäts- Wärme- oder Mobilitätsversorgung selbst (Mengenkriterien) oder hinsichtlich ihrer im Kapitel 3.2.1 genannten Qualitätskriterien ergeben. Die Bewertung der potenziellen Auswirkungen der ermittelten Aspekte erfolgt qualitativ nach den Ausprägungen „gering“, „mittel“ und „hoch“:

- → Geringe potenzielle Auswirkungen liegen vor, wenn keines der Qualitätskriterien von Elektrizitäts- und Wärmeversorgung noch die tatsächliche Erbringung (Mengenkriterium) der Dienstleistungen selbst substantiell beeinträchtigt wird.
- → Mittlere potenzielle Auswirkungen liegen vor, wenn nicht die tatsächliche Erbringung (Mengenkriterium) von Elektrizitäts- und Wärmeversorgung, aber mindestens ein oder zwei ihrer Qualitätskriterien von Elektrizitäts- und Wärmeversorgung substantiell beeinträchtigt werden/wird.
- → Hohe potenzielle Auswirkungen liegen vor, wenn die tatsächliche Erfüllung von drei oder mehr der Qualitätskriterien und/oder ein (Mengenkriterium) in der Elektrizitäts- und Wärmeversorgung substantiell beeinträchtigt werden.

Hinsichtlich der Beurteilung, ob eine Beeinträchtigung substantiell ist oder nicht, wäre es am transparentesten, unter Einbindung der relevanten Akteursgruppen einzuhaltende Grenzwerte für alle Mengen- und Qualitätskriterien der Elektrizitäts- und Wärmeversorgung festzulegen. Dies ist im Rahmen dieser Studie nicht möglich gewesen, weswegen die Einstufung einer Beeinträchtigung als „substantiell“ auf Basis von Literaturrecherchen und Experteneinschätzungen erfolgt.

Zur Ermittlung der Anpassungskapazität wurden gemäß (Akamp und Mesterharm 2010) in Anlehnung an (Zebisch et al. 2005) potenzielle Anpassungsmaßnahmen identifiziert. Darüber hinaus wurden auch mögliche Barrieren für die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen in Form der Anpassungsbereitschaft der betroffenen Erbringer und/oder Nutzer betrachtet. Auch die Bewertung der Anpassungskapazität erfolgt qualitativ, indem für alle aufgeführten Aspekte auf Basis von Literaturrecherchen und Expertenbefragungen eine Bewertung in den Ausprägungen „gering“, „mittel“ und „hoch“ vorgenommen wird:

- → Eine **geringe Anpassungskapazität** liegt vor, wenn hinsichtlich der potenziellen Auswirkungen in einer Wertschöpfungsstufe weder eine Anpassungsmaßnahme zur Vermeidung der Auswirkungen noch die Anpassungsbereitschaft der betroffenen Erbringer und/oder Nutzer besteht.
- → Eine **mittlere Anpassungskapazität** liegt vor, wenn hinsichtlich der potenziellen Auswirkungen in einer Wertschöpfungsstufe zumindest entweder eine Anpassungsmaßnahme zur Vermeidung der Auswirkungen oder die Anpassungsbereitschaft der betroffenen Erbringer und/oder Nutzer besteht.
- → Eine **hohe Anpassungskapazität** liegt vor, wenn hinsichtlich der potenziellen Auswirkungen in einer Wertschöpfungsstufe sowohl eine Anpassungsmaßnahme zur Vermeidung der Auswirkungen als auch die Anpassungsbereitschaft der betroffenen Erbringer und/oder Nutzer besteht.

Bei der Einschätzung der Anpassungsbereitschaft geht es nicht allein um den nur sehr bedingt zu ermittelnden Willen der Betroffenen. Es spielt vor allen Dingen eine Rolle, ob die Umsetzung einer Anpassungsmaßnahme durch ökonomische und regulative Zwänge oder die Entscheidungen einzelner Schlüsselakteure be- oder sogar verhindert werden kann. Beispielsweise obliegt die Entscheidung über bestimmte Maßnahmen wegen ihrer Monopolstellung einzig den Netzbetreibern, wobei sie zusätzlich noch regulativen Zwängen unterliegen.

In einem letzten Arbeitsschritt wurde die strukturelle Vulnerabilität bewertet. Hierzu wurden die potenziellen Auswirkungen den ermittelten Anpassungskapazitäten gegenübergestellt. Die Zuordnung geschah dabei auf Basis der folgenden Logik: Der Grad einer potenziellen Auswirkung wird durch eine geringe Anpassungskapazität in einen höheren Grad der Vulnerabilität „umgewandelt"; eine hohe Anpassungskapazität führt dagegen zu einem niedrigeren Grad der Vulnerabilität, während eine mittlere Anpassungskapazität dafür sorgt, dass der Grad der Vulnerabilität genau dem Grad der potenziellen Auswirkungen entspricht (vgl. Tabelle 5.10 Schema für die Bestimmung der Vulnerabilität aus potenziellen Auswirkungen und Anpassungskapazität. Also wird die Vulnerabilität im Fall potenziellen Auswirkungen bei einer entsprechend hohen Anpassungskapazität „nur" als mittel eingestuft. Umgekehrt ergibt sich bei geringer Anpassungskapazität aus geringen potenziellen Auswirkungen ebenfalls schon eine mittlere Vulnerabilität. Damit wird berücksichtigt, dass auch hinsichtlich nicht substantiell erscheinenden Beeinträchtigungen bei mangelnder Anpassungskapazität geprüft werden sollte, ob als niedrig eingestufte potenzielle Auswirkungen in der Tat niedrig ausfallen. Und sogar wenn eine hohe Anpassungskapazität vorliegt, sollte im Blick behalten werden, ob hohe potentielle Auswirkungen dadurch tatsächlich kompensiert werden können. Und wenn keine geeigneten Anpassungsmaßnahmen verfügbar sind, sollte im Blick behalten werden, ob als niedrig eingestufte potenzielle Auswirkungen in der Tat niedrig ausfallen. Generell sind die verschiedenen Vulnerabilitätsniveaus wie folgt zu interpretieren:

- → Wenn eine geringe Vulnerabilität vorliegt, dann gibt es keine Anzeichen für die Notwendigkeit von Anpassungsmaßnahmen oder umfangreichem Monitoring.
- → Wenn eine mittlere Vulnerabilität vorliegt, dann sollte es ein weitergehendes Monitoring der potenziellen Auswirkungen geben und Maßnahmen zur Erhöhung der Anpassungskapazität sollten geprüft werden.
- → Wenn eine hohe Vulnerabilität vorliegt, dann sollten in jedem Fall Maßnahmen zur Verringerung der potentiellen Auswirkungen und zur Erhöhung der Anpassungskapazität angegangen werden.

Tabelle 5.10 Schema für die Bestimmung der Vulnerabilität aus potenziellen Auswirkungen und Anpassungskapazität

Potenzielle Auswirkungen	Anpassungskapazität	Vulnerabilität
Gering	Gering	Mittel
	Mittel	Gering
	Hoch	Gering
Mittel	Gering	Hoch
	Mittel	Mittel
	Hoch	Gering
Hoch	Gering	Hoch
	Mittel	Hoch
	Hoch	Mittel

5.7 Agentenbasierte Modellierung

5.7.1 Einleitung

In den vorherigen Kapiteln wurde die Schlüsselrolle der Akteure im Transformationsprozess bereits ausgiebig diskutiert. Leitorientierungen, ein grundlegendes Verständnis der komplexen Zusammenhänge im gegenwärtigen Energiesystem und die Vermittlung von Orientierungswissen im Transformationsprozess sind für eine erfolgreiche Energiewende erforderlich. Aus einer sozioökonomischen und sozio-technischen Perspektive reichen klassische ökonomische Modelle für die Generierung von Transformationswissen nicht aus, da sie nicht allein rationales Akteursverhalten und soziale Interaktionen zwischen Akteuren nicht abbilden können. Die agentenbasierte Modellierung ermöglicht es, dieses anderen Motiven folgende und sozial beeinflusste Verhalten von Akteuren in Simulationsmodellen zu integrieren. Im Projekt Resystra ist diese Methode deshalb für eine quantitative Analyse zur Identifizierung ökonomischer Erfolgsfaktoren für eine Integration der Systeminnovation Power-to-Fuel eingesetzt worden.

Die Etablierung von Systeminnovationen in bestehende sozio-technische Systeme (im Energiesystem) erfordert geeignete Rahmenbedingungen technischer, sozialer, ökonomischer und auch ökologischer Natur. Während die Technik von Innovationen für eine erfolgreiche Integration noch weitestgehend von Herstellern optimiert werden kann, resultiert die Entwicklung der übrigen Faktoren, die ebenfalls über Erfolg und Misserfolg entscheiden, aus einem komplexen Wechselspiel von Handlungen diverser Entscheidungsträger und aus nicht steuerbaren Ereignissen. In Simulationsmodellen können solche Beziehungen und Wechselwirkungen vereinfacht abgebildet werden und bei entsprechender Datenlage potentielle Entwicklungen einzelner Systembestandteile und auch des Gesamtsystems unter definierten Bedingungen berechnet werden. Für die hier adressierte Fragestellung nach der Integration einer Systeminnovation in ein etabliertes sozio-technisches System eignet sich die agentenbasierte Modellierung, da

einzelnen Akteuren im System, den Agenten, mit dieser Methodik individuelle Handlungsmöglichkeiten zugewiesen werden können. Durch eine kommunikative („soziale“) Vernetzung mit weiteren Agenten kann ihr eigenes Verhalten und das der übrigen Agenten im Modell beeinflusst und auf diese Weise in der Gesamtheit das globale Systemverhalten gelenkt werden.

Auf diese Weise wird das Systemverhalten im Unterschied zu übrigen Modellierungsansätzen nicht auf der Systemebene gesteuert, sondern ergibt sich unmittelbar aus der „Macht“ bzw. den Steuerungsimpulsen der einzelnen Agenten. Die Ergebnisse sollen schließlich zeigen, wie sich ein System neuen Rahmenbedingungen anpasst und wie es auf Änderungen reagiert, die durch einzelne Individuen und/oder Gruppierungen hervorgerufen werden. Für das Projekt stehen Experimente im Fokus, die ein besseres Verständnis der Dynamiken rund um ein P2F-System ermöglichen. Durch die Berechnung der potentiellen Auswirkungen von individuellen Entscheidungen (der Agenten), von politischen Eingriffen und gesellschaftlichen Handlungen können Wege ermittelt werden, auf denen P2F aus der Nische heraus in den Markt geführt wird.

5.7.2 Methodik

Bei der agentenbasierten Modellierung (ABM) werden Interaktionen zwischen verschiedenen Akteuren quantitativ untersucht. Sie ist dafür ausgelegt, komplexe soziale Phänomene aus einer Bottom-Up Perspektive zu ergründen. Es handelt sich dabei um eine Form der Simulation, bei der die Akteure von autonom handeln Agenten in einer Software repräsentiert werden. Durch die Interaktion der Agenten können Prozesse über Zeiträume modelliert und Effekte dieser Interaktionen beobachtet werden. Außerdem ist es möglich, Einflüsse aus der Systemumwelt in die Simulation mit einzubeziehen

> *“Models, of course, are never true, but fortunately it is only necessary that they be useful.“ (Box 1979)*

Wie George Box klarstellt, können Modelle nicht die Realität abbilden. Sie beruhen grundsätzlich auf Interpretationen der Realität durch die Modellierenden (vgl. Nikolic und Kasmire 2013). Nichtdestotrotz können Modelle aber nützlich sein, um Gegenstände der Forschung zu untersuchen. Während der Modellierung müssen zwei gegenläufige Tendenzen stetig gegeneinander abgewogen werden: Einerseits sollte das Modell komplex genug gestaltet sein, damit es den Forschungsgegenstand angemessen darstellen kann, andererseits ermöglicht das Modell gerade durch Simplifizierung und Abstraktion ein besseres Verständnis des Untersuchten. Je nach Fragestellung muss folglich entschieden werden, in welchen Aspekten das Modell die Realität vereinfachen sollte und in welchen Teilen die Komplexität beibehalten bleibt. Dieses Abwägen unterliegt immer der Perspektive der Modellierenden. Mithilfe der ABM ist es also

nicht möglich, die Realität abzubilden oder mit Sicherheit soziale Entwicklungen zu prognostizieren. Es können jedoch Szenarien erstellt werden, wie sich Prozesse unter bestimmten Bedingungen entwickeln könnten.

Bevor im Folgenden die einzelnen Komponenten agentenbasierter Modelle genauer beschrieben werden, sollen zuerst die der ABM zugrundeliegenden system- und handlungstheoretischen Konzepte erläutert werden.

5.7.3 Handlungs- und Systemtheorien

Das im Projekt Resystra entwickelte ABM wurde zum Zwecke der Ermittlung von Möglichkeiten programmiert, durch die sich P2F aus einer Nischenposition heraus bewegen und sich auf dem Markt etablieren kann. Für diese Fragestellung erscheint es sinnvoll, Handlungs- und Systemtheorien als Grundlage zu wählen, die die Akteure als autonome, miteinander in Interaktion stehende und nach Abwägen von Kosten und Nutzen entscheidende Einheiten betrachten.

Handlungstheorie

Da im Zentrum der Untersuchung eine ökonomische Fragestellung steht, bietet sich die in der Volkwirtschaft verbreitete Handlungstheorie des Rational Choice Ansatzes (RCA) an. Kroneberg und Kalter definieren *verfügbare Alternativen*, *Erwartungen* und *Kosten-Nutzenabwägung* als Hauptkonzepte dieses Ansatzes. In anderen Worten geht die Rational Choice Theorie davon aus, dass Akteure zwischen Kosten und Nutzen der verfügbaren Handlungsalternativen abwägen, Erwartungen über die Konsequenzen der Alternativen formen und letztendlich die Alternative auswählen, die am besten ihren Präferenzen entspricht. Akteure und deren Handlungen auf diese Weise zu betrachten, ist für die Simulation von Märkten durchaus nutzbringend: Betreiber wie auch Kunden versuchen durch die Wahl der besten Kosten-Nutzen-Lösung ihre Stellung auf dem Markt zu verbessern (Kroneberg und Kalter 2012).

Raymond Boudon formuliert sechs Postulate, die dem RCA vorausgehen: 1. Soziale Phänomene sind Effekte von Entscheidungen, Handlungen, Einstellungen etc. von Individuen (Individualismus). 2. Handlungen von Individuen sind nachvollziehbar. 3. Jede Handlung wird von einem Individuum aus einem Grund ausgeführt (Rationalität). 4. Der Grund für eine Handlung resultiert aus der Abwägung der Konsequenzen verschiedener Alternativen (Instrumentalismus). 5. Individuen sind vor allem an den sie selbst betreffenden Konsequenzen interessiert (Egoismus) und 6. Akteure sind in der Lage Kosten und Nutzen von Alternativen abzuwägen und sich für die beste Balance aus beiden zu entscheiden (vgl. Boudon 2003).

Wie James Coleman argumentiert, weisen rationale Entscheidungen eine große Attraktivität für die Erklärung sozialer Phänomen auf. Rationale Entscheidungen sind nachvollziehbar und

wenn komplexe soziale Prozesse in rationale Handlungen von Individuen zerlegt werden können, sind auch sie nachzuvollziehen (Coleman 1986). Boudon zeigt allerdings auf, dass sich der RCA für die Erklärung vieler sozialer Phänomene nicht eignet. So lassen sich Handlungen von Individuen oft nicht durch nachvollziehbare Gründe erklären oder Individuen handeln, ohne eine direkte, für sie spürbare, Konsequenz aus ihrer Handlung zu erwarten. WählerInnen, die sich am Sonntag zur Wahlurne begeben, gehen z.B. nicht davon aus, gerade ihre Stimme würde das Wahlergebnis verändern. Hier verlangt es nach einer anderen Erklärung. Vor allem aber die Annahme des RCA, dass Akteure hauptsächlich im Interesse ihrer eigenen Nutzenmaximierung handelten, lässt sich in vielen empirischen Untersuchungen nicht bestätigen. Beispielsweise kann nicht durch persönliches Kosten-Nutzen-Abwägen begründet werden, warum Kunden ein Produkt kaufen, das zwar teurer, allerdings auch umweltfreundlicher ist.

Aus diesem Grund schlägt Boudon vor, das Verständnis von Rationalität zu erweitern und nicht allein auf instrumentelle oder Konsequenz orientierte Rationalität zu beschränken. Rationalität ist nach Reschers Definition, die Boudon übernimmt, zwar immer teleologisch, es könne aber auch das Ziel von rationalem Handeln sein im Einklang mit einer Überzeugung zu handeln. So unterscheidet auch Max Weber Rationalität in Zweckrationalität und Wertrationalität (vgl. Weber 2007). Zweckrationales Handeln beschreibt das Abwägen zwischen Konsequenzen von Handlungen und den Mitteln, die zum Erreichen der Ziele aufgebracht werden müssen. Die Handlung wird ausschließlich zu einem bestimmten Zweck ausgeführt. Wertrationales Handeln hingegen ist nicht unbedingt auf die Folgen der Handlung gerichtet. Der Handelnde entscheidet sich aufgrund von selbst aufgestellter Regeln, die auf seiner Wertüberzeugung basieren, also aufgrund eines „bewussten Glauben an den — ethischen, ästhetischen, religiösen oder wie immer sonst zu deutenden — unbedingten Eigenwert eines bestimmten Sachverhaltens rein als solchen und unabhängig vom Erfolg“ (Weber 2007).

Über dieses erweiterte Verständnis von Rationalität ist es möglich auch Wertorientierungen, wie zum Beispiel eine umweltfreundliche Einstellung mithilfe des RCA zu erklären. Für die Modellierung des P2F-Marktes ist es durchaus sinnvoll von einem erweiterten Rationalitätsverständnis auszugehen. Gerade bei umweltfreundlichen Technologien spielen Wertüberzeugungen eine wichtige Rolle und sollten in das Modell aufgenommen werden. Für die ABM der hier vorliegenden Fragestellung eignet sich ein erweiterter RCA, da für die Modellierung von Handlungen am Energiemarkt ökonomisches Kosten-Nutzen-Abwägen der Agenten ausschlaggebend ist, wertrationale Überlegungen aber ebenso mit in die Entscheidungen einfließen.

System

Für die Beschreibung von Systemen sind zahlreiche Definitionen vorhanden. Sie reichen von tautologischen Containern, also Definitionen, die so vage sind, dass alles unter sie gefasst

werden könnte, zu ausdifferenzierten Begriffsbestimmungen, die zwar geschlossener, dadurch aber anwendbarer für konkrete Untersuchungen sind. Die Definition von Alex Ryan "[a] system is a representation of an entity as a complex whole open to feedback from its environment" erweist sich für das Vorhaben einer ABM als hilfreiches Arbeitswerkzeug (Ryan 2008). Ryan formuliert seine Definition in zehn Punkten aus:

1. Systeme sind Idealisierungen.
2. Systeme haben multiple Komponenten.
3. Die Komponenten sind interdependent.
4. Systeme sind organisiert.
5. Systeme haben emergente Eigenschaften.
6. Systeme haben Grenzen.
7. Systeme sind beständig.
8. Systeme beeinflussen und werden von ihrer Umgebung beeinflusst.
9. Kommunikation in Systemen ist an Feedback gekoppelt.
10. Systeme weisen nicht-triviales Verhalten auf.

Systeme sind Idealisierungen von Einheiten als komplexes Ganzes (vgl. Ryan 2008). Sie sind keine physikalisch existierenden Objekte, sondern werden erst durch den Betrachter erzeugt (1). Daher sind Systeme abstrakte Repräsentationen. Systeme bestehen aus vielfältigen Bestandteilen (2), die meist durch eine Struktur von Interaktionsmustern miteinander in Verbindung stehen (4) und sich gegenseitig beeinflussen (3). Durch das Zusammenspiel von unterschiedlichen Systemkomponenten kann das System neue Eigenschaften hervorbringen (5). Systeme sind durch ihre Grenzen definiert (6). Das Außen eines Systems macht dieses überhaupt erst erkennbar. Der Betrachter benötigt eine klare Definition von dem, was vom System ausgeschlossen ist, um die zum System gehörigen Komponenten als Einheit ausmachen zu können. Ein System kann des Weiteren nur dann als solches identifiziert werden, wenn es lange genug besteht, um betrachtet oder diskutiert werden zu können (7). Auch wenn Systeme klare, vom Betrachter festgelegte Grenzen benötigen, sind sie doch im Austausch mit ihrer Umgebung, formen diese und werden von ihr geformt (8). Die Kommunikation innerhalb des Systems, wie auch mit der Umgebung des Systems ist durch Feedback geprägt: Interdependenzen der einzelnen Systemelemente erzeugen Kommunikationsschleifen, die nicht-triviales Verhalten hervorbringen (9). Die Unterscheidung von trivialem und nicht-trivialem Verhalten übernimmt Ryan von Heinz von Foerster, der diese Unterscheidung für Maschinen festlegte (vgl. Foerster 1972). Im Wesentlichen definiert nicht-triviales Verhalten, dass es keine deter-

ministische Beziehung von Input und Output gibt (triviales Verhalten), sondern, dass der Output auch von vorherigen Outputs der Maschine abhängt. Nicht triviales Verhalten in Systemen lässt sich durch Punkte 8 und 9 der Systemdefinition begründen. Durch den Austausch mit der Umwelt und die Feedback-Schleifen in der Kommunikation können sich die Systemkomponenten verändern und anpassen. Ihre Reaktion auf Stimuli lässt sich dann nicht mehr so leicht vorhersagen: Ein einmal beobachteter Output, der auf einen Input folgt, wird in der zweiten Wiederholung des Inputs nicht in der gleichen Form auftreten.

Komplexe adaptive Systeme

Das Gehirn, ein Vogelschwarm, soziale Systeme, der Aktienmarkt, das Ökosystem sind Beispiele für komplexe adaptive Systeme (KAS). Verschiedene Disziplinen, z.B. Neurologie, Ökologie, Ökonomie und Informatik beschäftigen sich mit KAS. Die beschriebenen Kernkomponenten, durch die KAS definiert werden, variieren und es gibt unterschiedliche Auffassungen darüber, wie exakt KAS definiert werden sollten. In diesem Abschnitt soll nicht versucht werden einen ganzheitlichen Überblick der verschiedenen Definitionen zu geben. Vielmehr wird sich darum bemüht, den kleinstmöglichen Nenner der Begriffsbestimmungen zu benennen und eine für unsere Vorhaben geeignete Definition zu formulieren.

Die folgende Definition von John Holland definiert sehr kompakt, was unter komplex und adaptiv zu verstehen ist:

> *“Cas [complex adaptive systems] are systems that have a large number of components, often called agents, that interact and adapt or learn."* (Holland 2006)

Adaptieren wird von Holland mit Lernen gleichgesetzt und resultiert aus Interaktionen zwischen Agenten und aus Interaktionen von Agenten mit Umweltfaktoren. Adaption ist eine Form von Veränderung. Allerdings kann nur von Adaption gesprochen werden, wenn dieser Wandel aufgrund eines Stimulus erfolgt, und es sich um eine Verbesserung handelt. Die Stimuli können reine Umweltfaktoren sein, wie z.B. der Anstieg der Temperatur oder sie können aus Interaktionen mit anderen Einheiten resultieren, wie z.B. der Kampf um Ressourcen. Der Stimulus muss konstant oder wiederholt auftreten, damit es zu einer Anpassung kommen kann. Adaption ist also die Anpassung über eine Zeit an eine Umgebung (vgl. Nikolic und Kasmire 2013).

Die Definition von Komplexität scheint nicht so leicht zu fallen. Oft wird sogar argumentiert, dass der Begriff Komplexität nicht zu definieren sei, man jedoch Komplexität erkennen würde, wenn man mit ihr konfrontiert wäre (vgl. Nikolic und Kasmire 2013). Gell-Mann (1995) versucht es mit einer Definition über die etymologische Herleitung des Begriffs: Der lateinische Begriff plexus bedeutet verflochten oder verschlungen. Complexus bedeutet mit einander verflochten. Komplexe Systeme sind folglich dadurch charakterisiert, dass ihre Elemente, wie auch die

Systeme und ihre Umwelt, miteinander verbunden und ihre Handlungen ineinander verwoben sind.

Ein wichtiger Aspekt komplexer Systeme fehlt allerdings noch in dieser Herleitung: Die ineinander verflochtenen Handlungen erzeugen emergente Eigenschaften, die über die Akteursebene hinausgehen.

> *"An emergent property of a CAS is a property of the system as a whole which does not exist at the individual elements (agents) level."* (Ahmed et al. 2005)

Um komplexe Systeme zu verstehen, ist es daher notwendig, das System als Ganzes zu betrachten. Eine Zerlegung in seine Einzelteile und die isolierte Analyse der einzelnen Komponenten kann die Vorgänge in komplexen Systemen nicht erklären.

Aus diesen verschiedenen Begriffsbestimmungen lässt sich folgende Definition zusammenfassen:

KAS bestehen aus ineinander verflochtenen Elementen und sind mit ihrer Umwelt verwoben. Diese interdependenten Handlungen erzeugen neue Eigenschaften des Systems. Des Weiteren sind KAS dadurch in der Lage, sich an ihre Umwelt anzupassen und von ihr zu lernen.

5.7.4 Vorteile der ABM

Beim Energiesystem handelt es sich um ein soziotechnisches System, das durch das Zusammenspiel verschiedener Akteure auf unterschiedlichen Ebenen beeinflusst wird. Um die Fragestellung, wie P2F-Technologien aus einer Nischenposition heraus einen Markt erschließen könnten, müssen demnach die unterschiedlichen Akteure sowie ihre Interaktionen berücksichtigt werden. Außerdem ist das Energiesystem eng mit anderen Systemen verknüpft, von denen es nicht losgelöst betrachtet werden kann. Ohne deren Einflüsse in die Analyse mit einzubeziehen, ließen sich die Entwicklungen des Energiesystems nicht adäquat simulieren. Die Simulation mithilfe eines agentenbasierten Modells ermöglicht es all diese Faktoren zu berücksichtigen.

Ähnliche Fragestellungen zu Konsumverhalten generell, aber auch bezüglich der Etablierung nachhaltiger Energietechnologien im speziellen, wurden schon mit ABM untersucht. Varun Rai und Adam D. Henry geben eine gute Übersicht über Modellierungen, die zu diesen Fragestellungen erstellt wurden (Rai und Henry 2016). Der größte Anteil der ABM, die sich mit der Annahme neuer Technologien beschäftigen, konzentriert sich auf den Punkt der Nachhaltigkeit. Vor allem die Etablierung von Elektromobilität und Biokraftstoffen wurden viel untersucht (Eppstein et al. 2011; Mueller und Haan 2009; Stummer et al. 2015; Tran 2012; van Vliet et al. 2010; Wolf et al. 2015; Zhang et al. 2011). Des Weiteren wurden auch ABM zu Solarenergie (z.B. Rai und Robinson 2015; Zhao et al. 2011) und zu Stromtarifen und Demand Side Management (z.B. Kowalska-Pyzalska et al. 2014; Ma und Nakamori 2009) durchgeführt. Rai und

Henry stellen fest, dass sich diese Studien vorrangig mit politischen Entscheidungen und Marketingstrategien befassen, die zu einer höheren Verbreitung nachhaltiger Technologien führen können.

Warum bietet sich die ABM für diese Fragestellungen an? Die ABM ermöglicht komplexe soziale und ökologische Vorgänge in die kleinsten und einfachsten Einheiten zu zerlegen. Wie Nicholas Jennings argumentiert, ermöglicht diese Dekomposition eine der einfachsten Strategien um komplexe Probleme zu lösen. Das Problem wird in übersichtliche Teile zerlegt, die vorerst isoliert betrachtet werden können. Hier handelt es sich um die rationalen Entscheidungen der Agenten (vgl. Jennings 2000). Der erweiterte Rational Choice Ansatz von Boudon ergänzt die rein ökonomische Kosten-Nutzen-Abwägung der Agenten um den Aspekt der Wertorientierung, der so mit einbezogen werden kann. Gerade bei der Annahme grüner Technologien ist dieser Aspekt ausschlaggebend.

Allerdings bleibt die ABM nicht bei der Dekomposition stehen. In der Simulation werden die einzelnen Komponenten wieder zusammengesetzt, die Agenten agieren miteinander. Die ABM macht es dadurch möglich, nicht-triviales Verhalten und neu entstehende Systemeigenschaften zu simulieren. In diesem Punkt liegt der große Vorteil von ABM. Sie ermöglicht eine neue Herangehensweise soziale und ökonomische Prozesse zu untersuchen, basierend auf der Idee, dass komplexes Verhalten aus dem Zusammenspiel relativ einfacher Handlungen resultiert (Simon 1996).

5.7.5 Bestandteile agentenbasierter Modelle

Modelle komplexer adaptiver Systeme können und sollten diese vereinfachen. Um als Modell nützlich zu sein, müssen sie aber so komplex gestaltet sein, dass sie die Entwicklung des Systems angemessen simulieren können. Dafür müssen die Modelle selbst komplexe adaptive Systeme sein (vgl. Nikolic und Kasmire 2013). Nikolic und Kasmire erarbeiteten drei Eigenschaften, die Modelle von komplexen adaptiven Systemen beinhalten sollten: Erstens sollten Modelle von KAS Wissen aus verschiedenen Gebieten und Disziplinen beinhalten. Weil sich an die Modelle meist Fragen richten, die nur durch interdisziplinäres Wissen beantwortet werden können, ist es vonnöten, dass bei der Modellierung entsprechendes Wissen berücksichtigt wird. Zweitens sollten die Modelle von KAS generative und Bottom-up Ansätze aufweisen. Wie oben erklärt, zeichnen sich KAS dadurch aus, dass die Handlungen von Akteuren durch ihre Verstrickungen neue Elemente auf der Systemebene erzeugen können. Modellen von KAS sollte eine Bottom-up Struktur zugrunde liegen, um diesen Aspekt simulieren zu können. Drittens sollten die Modelle anpassungsfähig sein, da auch dies eine bestimmende Eigenschaft von KAS ist.

Das agentenbasierte Modell setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen, die sich in die Kategorien Agent und Umwelt unterteilen lassen.

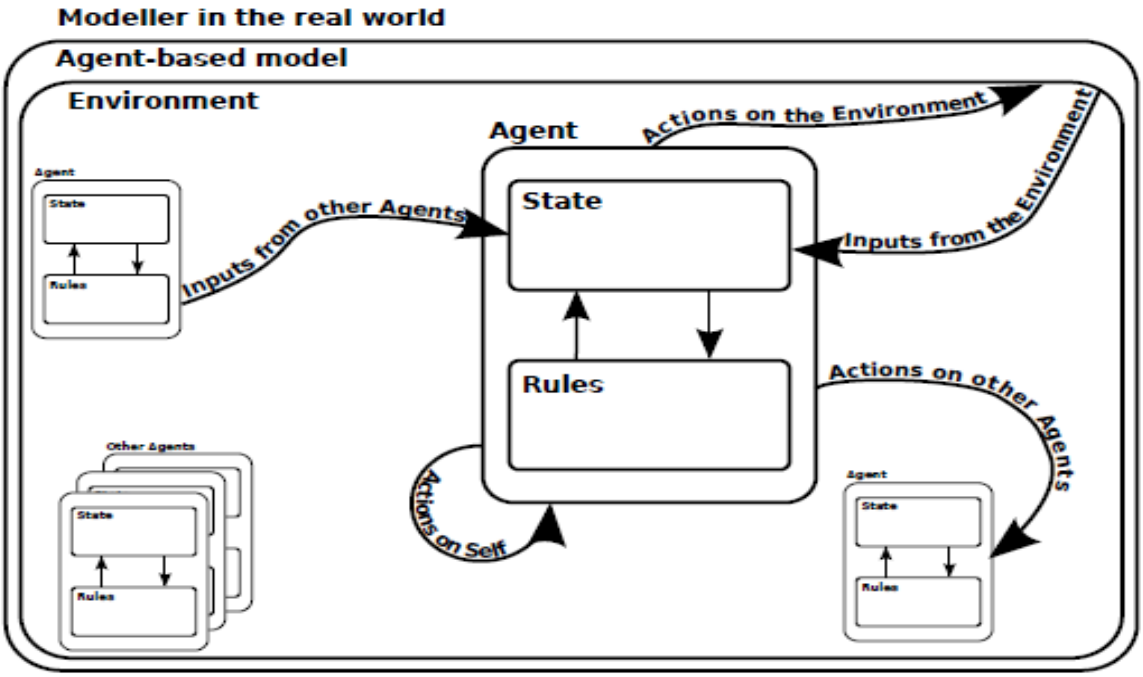


Abbildung 5.5: Schematische Darstellung der Interaktion von Agenten und weiteren Systemkomponenten in einem ABM (aus Nikolic und Kasmire 2013).

5.7.6 Agent

Agenten sind die kleinsten Einheiten der Modelle, die dort Akteure der realen Welt repräsentieren. Agenten können Individuen, Organisationen oder auch Gruppen von Individuen darstellen, solange diese zu entscheidungstreffenden Einheiten zusammengefasst werden können (vgl. Nikolic und Kasmire 2013). Jennings definiert fünf Eigenschaften, die Agenten ausmachen: (1) Agenten sind klar identifizierbare, problemlösende Einheiten mit definierten Grenzen und Schnittstellen. (2) Sie sind in einer bestimmten Umwelt situiert, mit der sie kommunizieren: Sie erhalten über Sensoren Informationen von ihrer Umwelt, und sie agieren in der Umwelt mithilfe von Effektoren. (3) Agenten sind zu dem Zweck designed ein Ziel zu erreichen. (4) Agenten sind in der Lage autonom zu handeln. Sie können ihren internen Status, wie auch ihr Verhalten kontrollieren. (5) Des Weiteren ist es ihnen möglich, flexibel zu handeln, um ihre Ziele zu erreichen: Einerseits können sie aktiv Handlungen einleiten, andererseits aber auch auf Veränderungen in ihrer Umgebung reagieren (Jennings 2000).

Zustand

Einem Agenten werden zwei Attribute zugeordnet, sein Zustand und seine Handlungsregeln. Der Zustand eines Agenten ist die Zusammenstellung aller Eigenschaften, die den Agenten ausmachen. Der generelle Zustand eines Agenten wird durch seine internen, lokalen und globalen Zustände ausgemacht. Die verschiedenen Zustände können sowohl dynamisch als auch statisch designed sein. Die gegenwärtige Ausprägung aller möglichen Eigenschaften und Werte, die vom Agenten besessen werden können, definiert seinen internen Zustand. So sind z.B. finanzielle Ressourcen, Eigentum oder eine bestimmte Werthaltung zum internen Zustand

eines Agenten zu zählen. Die Informationen über den internen Zustand können anderen Agenten zugänglich sein (öffentlicher Zustand) oder ihnen nicht (geheimer Zustand) oder nur teilweise zur Verfügung stehen.

Wie Agenten handeln ist jedoch nicht nur von ihrem eigenen Zustand abhängig. Auch Handlungen anderer Agenten werden meist mit berücksichtigt. Dieser Aspekt findet sich im lokalen Zustand wieder: Dieser umfasst den internen Zustand eines Agenten (öffentliche wie auch private Aspekte) und die für den Agenten beobachtbaren Zustände anderer Agenten, mit denen der Agent interagiert.

Der interne, der lokale und alle restlichen Aspekte, die Handlungen eines Agenten beeinflussen, sind im globalen Zustand zusammengefasst. Diese restlichen Aspekte umfassen alle vom Akteur beobachtbaren und relevanten Informationen aus seiner Umwelt, die nicht Informationen über andere Agenten sind, z.B. die Zeit.

Handlungsregeln

Neben dem Zustand werden Agenten außerdem durch Handlungsregeln bestimmt. Diese Regeln bauen auf der Annahme auf, dass Agenten rational handeln. Nach unserem Verständnis von Rationalität (s. oben) fällt darunter sowohl rein ökonomisches Kosten-Nutzen-Abwägen, als auch das Übereinstimmen von Handeln und Wertevorstellungen des Agenten. Regeln können alle dem Agenten zugänglichen Informationen mit einbeziehen und sind von dessen Ziel oder Zweck geprägt. Sie können statisch oder dynamisch sein und können sich auf den internen, lokalen oder globalen Zustand eines Agenten beziehen. Außerdem können Regeln auch Freiräume zulassen und je nach Definition zufällige Elemente miteinschließen. Nikolic und Kasmire unterscheiden fünf verschiedene Typen von Handlungsregeln:

Regel-basierte Entscheidungsregeln sind die am meisten angewandten Regeln. Sie setzen sich aus einer if-then-else-Struktur zusammen und sind relativ leicht zu implementieren, da sie von den Agenten verlangen, beobachtete Informationen direkt in Handlungen umzusetzen.

Im zweiten Regeltyp ist die Input-Output-Beziehung weniger deterministisch: Hier werden verschiedene Kriterien vor der Entscheidung abgewogen und der Agent versucht die Konsequenzen der unterschiedliche Optionen mit seinen Präferenzen abzugleichen. Diese Form der Handlungsregel ist weitaus komplexer und das daraus resultierende Verhalten weniger vorhersagbar.

Der dritte Regeltyp, die Folgerungsmaschine, erstellt aus Informationen und heuristischen Annahmen Entscheidungsbäume und versucht über diese Methode, die bestmögliche Handlungsoption zu wählen.

Die Regel des evolutionären Berechnens ermöglicht es Agenten durch genetische Algorithmen Entscheidungen zu fällen. Diese Berechnungen sind sehr komplex und werden meist nur angewendet, wenn Agenten in großen oder komplexen Lösungsräumen die beste Option finden müssen. Beim evolutionären Berechnen werden Lösungsmöglichkeiten in einer großen Anzahl vom Agenten erstellt und mithilfe einer Funktion bezüglich ihrer Fitness bewertet. Daraufhin wird eine Gruppe der besten Optionen zusammengestellt, die dann durch genetische Kombinationen zu neuen und besseren Optionen zusammengesetzt werden.

Wenn Agenten sich anhand von Mustern entscheiden sollen, können auch neurale Netzwerke als Entscheidungsregeln genutzt werden. Die neuralen Netzwerke fungieren als Klassifizierungssystem, in welchem der Agent die beobachteten Informationen einordnen kann. Durch das Klassifizieren wird dann entschieden, welche Handlung auszuführen ist. Auch diese Form der Handlungsregeln ist sehr aufwendig und kann eine Lernphase erfordern, in der die Agenten das richtige Klassifizieren lernen, bevor die eigentliche Simulation beginnen kann.

Handlungen und Verhalten

Handlungen sind die Aktivitäten, die der Agent aufgrund seines Zustands und seiner Handlungsregeln ausführt (vgl. Nikolic und Kasmire 2013). Wenn z.B. der Zustand eines Agenten einen Kapitalüberschuss und eine Wertorientierung am Umweltschutz aufweist, könnte die Handlungsregel besagen, dass dann klimafreundliche, teurere Produkte gekauft werden. Die Handlung ist dann, diese von einem entsprechenden Anbieter zu kaufen. Das Verhalten eines Agenten setzt sich aus allen Handlungen und Zustandsänderungen dieses Agenten über den Zeitraum der Simulation zusammen.

5.7.7 Umgebung

Die Umgebung eines Agenten beinhaltet alle externen Elemente und Informationen, also auch andere Agenten (vgl. Nikolic und Kasmire 2013). Daher ist die Umgebung jedes Agenten des Modells unterschiedlich. Nichtsdestotrotz gibt es Elemente der Umgebung, die allen Agenten oder einer bestimmten Gruppe von Agenten gemein sind. Die Komponenten der Umgebung können in die Kategorien Information und Struktur eingeteilt werden. In anderen Worten, die Umgebung eines Agenten definiert, was der Agent weiß und auf welche Weise er Informationen erhält.

Informationen eines Modells können statisch oder dynamisch sein. Eine über den Verlauf der Modellierung gleichbleibende Information könnte z.B. die Anzahl der Interaktionspartner eines Agenten sein. Dynamische Informationen können von den Modellierenden so designed werden, dass sie sich über den Zeitraum verändern. So könnte z.B. in einem Modell der Wert von

altem technischem Equipment stetig abnehmen, weil ein kontinuierlicher Fortschritt prognostiziert wird und daher davon ausgegangen wird, dass technische Geräte veralten. Die Dynamik von Informationen muss allerdings nicht immer von außen vorgegeben sein, sondern kann auch durch das System des Modells selbst entstehen.

Die Simulation kann mehrere Male wiederholt werden. Wenn bei den verschiedenen Durchläufen die Informationen von den Modellierenden abgeändert und zu Parametersätzen gebündelt werden, spricht man von verschiedenen Szenarien (vgl. Nikolic und Kasmire 2013). Die Szenarien können dann miteinander verglichen werden und eignen sich besonders gut, um einen Eindruck zu bekommen, wie die Veränderung einiger Parameter zu einem anderen Ergebnis der Modellierung führen kann. Wenn Szenarien gebildet werden, geht es meist nicht darum, die wahrscheinlichste Möglichkeit vorherzusagen (vgl. Epstein 2008). Vielmehr können sie eine plastische Orientierung für Entscheidungsträger darstellen, indem verschiedene Szenarien miteinander verglichen werden (vgl. Rai, Henry 2016).

Struktur

Neben der Information stellt die Umgebung eine Struktur dar, anhand derer die Agenten geordnet sind. Die Struktur kann, genau wie die Information, statisch oder dynamisch sein. Agenten müssen nicht wissen wie die gesamte Struktur des Modells aussieht. Für sie sind nur die Verbindungen von Bedeutung, die sie und ihre Interaktionspartner betreffen. Ein Haushalt muss nicht wissen, wie viele andere Haushalte im Modell enthalten sind. Für ihn sind nur seine Interaktionspartner, im Falle des in Resystra entwickelten Modells die Betreiber von P2F-Anlagen, als Anbieter wichtig.

Nikolic und Kasmire unterscheiden vier verschiedene Typen von Strukturen, die agentenbasierte Modelle aufweisen können: unstructured soup (1), space (2), small-world network (3) und scale-free network (4).

(1) Die Struktur der „soup“ umfasst zufällig organisierte Netzwerke, in denen alle Agenten mit der gleichen Wahrscheinlichkeit miteinander agieren können, wie auch Netzwerke, in denen alle Agenten miteinander in Interaktion stehen. Agenten sind in dieser Modellstruktur einfach zu vernetzen. Dies wird auch durch eine kurze durchschnittliche Pfadlänge ausgedrückt. Allerdings ist der Cluster-Koeffizient relativ gering, was bedeutet, dass es keine Subsysteme gibt, in denen die Agenten öfter miteinander agieren als mit anderen Agenten. (2) In der Struktur des „space“ sind Agenten mit einer Anzahl von anderen Agenten verknüpft, nicht aber mit allen anderen Agenten. Die Verknüpfungen folgen meist einem Muster, z.B. geometrischen Netzen. In diese Struktur können aber auch geografische Distanzen des modellierten Systems integriert werden. (3) Small-world networks beginnen mit der Struktur von „spaces“, tauschen

dann aber einige der lokalen Vernetzungen durch Verbindungen über größere Distanz aus. Small-world Netzwerke zeichnen sich dadurch aus, dass die durchschnittliche Pfadlänge kurz und die globale Konvergenz hoch ist, sie aber trotzdem einen hohen Cluster-Koeffizienten aufweisen. (4) Scale-free networks teilen diese Eigenschaften mit small-world networks, allerdings weisen diese Netzwerke Knotenpunkte auf, die über die Zeit der Simulation schnell anwachsen können. Diese Knotenpunkte entstehen durch die Gradverteilung des Systems, die einem Potenzgesetz folgt. Daher gibt es in scale-free networks Agenten, die sehr beliebt sind und viele Vernetzungen haben und Agenten, die sehr isoliert und schlecht vernetzt sind.

Zeit

Nikolic und Kasmire verweisen immer wieder darauf, dass die Zeit eine essentielle Rolle für die Modellierung spielt und dieser Aspekt daher besondere Aufmerksamkeit verlangt. Zeit verläuft in der realen Welt kontinuierlich und stetig. Agentenbasierte Modelle hingegen sind in der diskreten Zeit des Computers modelliert. Die kleinste Einheit der Zeit ist dort ein so genannter Tick, der die von den Modellierenden festlegelegte Zeiteinheit repräsentiert. Ein Tick kann eine Minute, eine Woche oder auch eine Dekade darstellen, im Modell von Resystra stellt ein Tick ein Jahr dar. Eine weitere Differenz zwischen realer und simulierter zeitlicher Dimension ist die Parallelität. In der wirklichen Welt laufen verschiedene Handlungen parallel ab. In Simulationsmodellen werden einzelne Handlungen hingegen als aufeinander folgende Arbeitsschritte der Reihe nach ausgeführt, von denen jedoch angenommen wird, sie würden gleichzeitig stattfinden. Die Parallelität der Handlungen muss folglich simuliert werden (vgl. Nikolic und Kasmire 2013). Wenn ein Agent eine Handlung ausführt, kann der nächste darauf reagieren. Bei Handlungen, die in der Realität parallel ablaufen, kann es so zu Verzerrungen der Simulation kommen (vgl. Gilbert und Troitzsch 2005).

In der agentenbasierten Modellierung reguliert ein Scheduler die Handlungen und deren zeitliche Abfolge. Dieser Zeitplan ist daher die Kontrolleinheit von Modellen, die Systeme ohne zentrale Steuerung simulieren. Es gibt verschiedene Möglichkeiten Parallelität der Handlungen zu simulieren. Um Gleichzeitigkeit der Handlungen vorzutäuschen, kann ein Tick in zwei Schritte zerlegt werden. Im ersten werden die Informationen von den Agenten ausgesandt, verweilen aber in der Umgebung und werden erst im nächsten Schritt zugestellt. Je nach modelliertem System kann aber auch diese Vorkehrung nicht ausreichend sein, um Parallelität zu simulieren (weitere Ausführungen in Gilbert und Troitzsch 2005).

5.8 Zwischenfazit

Im Rahmen des Projekts Resystra wurden Methoden nicht nur angewendet, sondern auch vergleichsweise viel Methoden(weiter)entwicklung betrieben. Dies geschah besonders erfolgreich im Bereich der Innovationsforschung, mit der Weiterentwicklung des Schildkrötenmodells und der Integration des Multi-Level-Modells, gestützt nicht zuletzt auf die Dissertation von Urte

Brand. In diesem Bereich stehen Methodenentwicklung, Methodenanwendung und deren kritische Reflektion in gutem Einklang. Auf dem zweiten wichtigen Gebiet der Vulnerabilitätsanalyse ist dies im Rahmen des Projekts nicht in gleichem Maße gelungen. Nicht zuletzt der Zeitknappheit geschuldet, waren die durchgeführten Vulnerabilitätsanalysen in den regionalen Fallbeispielen zwar einerseits durchaus innovativ, als szenarien- und modellbasierte, prospektive Vulnerabilitätsanalysen, auf der anderen Seite deckten sie – als im Kern Modellierung möglicher Belastungsspitzen im Stromnetz - nur einen kleinen Ausschnitt der Vulnerabilitäten ab, die im Rahmen einer strukturellen und ereignisorientierten Vulnerabilitätsanalyse untersucht werden sollten. Die Vulnerabilitätsanalysen konnten deshalb auch weniger als ursprünglich erhofft zu den Gestaltungsleitbildern beitragen.

5.9 Literatur Kapitel 5

Adger, W. N. (2006): Vulnerability. In: *Global Environmental Change* 16 (3), S. 268–281.

Ahmed, E.; Elgazzar, A. S.; Hegazi, A. S. (2005): An Overview of Complex Adaptive Systems.

Akamp, M.; Mesterharm, M. (2010): NordWest 2050. Leitfaden zur vulnerabilitätsbezogenen Wertschöpfungskettenanalyse. Hg. v. Carl Ossietzky Universität Oldenburg. Produktion und Umwelt.

Aretz, Astrid; Heinbach, Katharina; Hirschl, Bernd; Schröder, Andrè (2013): Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch den Ausbau Erneuerbarer Energien. Hg. v. Greenpeace. IÖW. Hamburg. Online verfügbar unter https://www.ioew.de/fileadmin/_migrated/tx_ukioewdb/Greenpeace-Studie-Wertschoepfung.pdf.

BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2011): Erfahrungsbericht 2011 zum Erneuerbare-Energien-Gesetz. EEG-Erfahrungsbericht. Online verfügbar unter https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Berichte/erfahrungsbericht-eeg-2011.pdf;jsessionid=1000122625341E51C5F68910A9682ADE?__blob=publicationFile&v=3.

Bohle, Hans-Georg (2008): Leben mit Risiko - Resilience als neues Paradigma für die Risikowelten von morgen. In: Carsten Felgentreff und Thomas Glade (Hg.): Vulnerabilitätskonzepte in Sozial- und Naturwissenschaften // Naturrisiken und Sozialkatastrophen. Berlin: Spektrum Akad. Verl.

Boudon, Raymond (2003): Beyond Rational Choice Theory. In: *Annu. Rev. Sociol.* 29 (1), S. 1–21. DOI: 10.1146/annurev.soc.29.010202.100213.

Box, George (1979): Some Problems of Statistics and Everyday Life. In: *Journal of the American Statistical Association* 74 (365), S. 1–4.

Brand, Urte (2016): Leitkonzepte Nachhaltigkeit und Resilienz als Richtungsgeber in Transformationsprozessen von Energiesystemen. Dissertation. Universität Bremen, Bremen.

Bundesagentur für Arbeit (2012): Arbeitsmarkt in Zahlen - Beschäftigungsstatistik: Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte nach Wirtschaftszweigen. WZ 2008.

Bundesbank (2012): Hochgerechnete Angaben aus Jahresabschlüssen deutscher Unternehmen von 2006 bis 2011.

Bundesregierung (Hg.) (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Online verfügbar unter http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf, zuletzt geprüft am 23.04.2016.

Coleman, James S. (1986): Individual Interest and Collective Action. Selected Essays. Cambridge: Cambridge University Press.

Deveson, A. (2003): Resilience: Allen & Unwin. Online verfügbar unter https://books.google.de/books?id=gMIqLom3-RMC.

Eppstein, Margaret J.; Grover, David K.; Marshall, Jeffrey S.; Rizzo, Donna M. (2011): An agent-based model to study market penetration of plug-in hybrid electric vehicles. In: *Energy Policy* 39 (6), S. 3789–3802. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.04.007.

Epstein, Joshua M. (2008): Why Model? In: *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 11 (4), S. 12. Online verfügbar unter http://jasss.soc.surrey.ac.uk/11/4/12.html.

Falkenberg, Doris; Weiß, Thomas; Nehls, Georg (2014): Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des Erfahrungsberichts 2014 gemäß § 65 EEG. Vorhaben IIe Stromerzeugung aus Windenergie. Wissenschaftlicher Bericht. Hamburg.

Foerster, Heinz von (1972): Perception of the future and the future of perception. In: *Instr Sci* 1 (1), S. 31–43. DOI: 10.1007/BF00053969.

Free Software Foundation (2016): oemof. Version 0.07: Open Energy Modelling Framework - A modular open source framework to model energy supply systems. Online verfügbar unter https://github.com/oemof.

Gallopin, G. C. (1997): Indicators and Their Use: Information for Decision-making. Part One - Introduction. In: B. Moldan und S. Bilharz (Hg.): Sustainability Indicators. A Report on the Project on Indicators of Sustainable Development. SCOPE 58. Chichester: Wiley.

Gell-Mann, Murray (1995): Let's call it Plectics. In: *Complexity* 1 (5).

Giesel, Katharina D. (2007): Leitbilder in den Sozialwissenschaften. Begriffe, Theorien und Forschungskonzepte. 1. Aufl. Wiesbaden: VS, Verl. für Sozialwiss.

Gilbert, G. Nigel; Troitzsch, Klaus G. (2005): Simulation for the social scientist. 2. ed., 1. publ. Berkshire u.a.: Open Univ. Pr.

Gleich, Arnim von; Gößling-Reisemann, Stefan; Stührmann, Sönke; Lutz-Kunisch, Birgitt; Woizeschke, Peer (2010): Theoretische Grundlagen für Klimaanpassungsstrategien (nordwest2050 Berichte 1). Resilienz als Leitkonzept – Vulnerabilität als analytische Kategorie. Hg. v. Klaus Fichter, Arnim von Gleich, Reinhard Pfriem und Bernd Siebenhüner. Bremen / Oldenburg: Projektkonsortium nordwest2050. Bremen/Oldenburg. Online verfügbar unter www.nordwest2050.de.

Haan, Gerhard de (2001): Die Leitbildanalyse. Ein Instrument zur Erfassung zukunftsbezogener Orientierungsmuster. In: Gerhard de Haan (Hg.): Typenbildung in der sozialwissenschaftlichen Umweltforschung. Opladen: Leske + Budrich (Lehrtexte Soziologie), S. 69–106.

Haan, Gerhard de; Kuckartz, Udo (Hg.) (1998): Umweltbildung und Umweltbewußtsein. Opladen.

Hanson, B. (2005): Resiliency in the Face of Disaster. In: *Science* 309 (5737), S. 1029. DOI: 10.1126/science.309.5737.1029.

Hilpert, Simon; Günther, Stephan; Kaldemeyer, Cord; Krien, Uwe; Plessmann, Guido; Wiese, Frauke; Wingenbach, Clemens (2017): Addressing Energy System Modelling Challenges. The Contribution of the Open Energy Modelling Framework (oemof). DOI: 10.20944/preprints201702.0055.v1.

Hirschl, Bernd; Aretz, Astrid; Prahl, Andreas; Böther, Timo; Heinbach, Katharina (2010): Kommunale Wertschöpfung durch Erneuerbare Energien. Berlin: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (Schriftenreihe des IÖW, 196). Online verfügbar unter

https://www.ioew.de/fileadmin/user_upload/BILDER_und_Downloaddateien/Publikationen/2010/IOEW_SR_196_Kommunale_Wertsch%C3%B6pfung_durch_Erneuerbare_Energien.pdf, zuletzt geprüft am 11.05.2017.

Holland, John H. (2006): Studying Complex Adaptive Systems. In: *Jrl Syst Sci & Complex* 19 (1), S. 1–8. DOI: 10.1007/s11424-006-0001-z.

Isoard, S.; Grothmann, T.; Zebisch, Marc (2008): Climate Change and Adaptation. Theory and Concepts. Paper presented at the workshop: Climate Chance Impacts and Adaptation in the European Alps: Focus Water.

Jennings, Nicholas R. (2000): On agent-based software engineering. In: *Artificial Intelligence* 117 (2), S. 277–296. DOI: 10.1016/S0004-3702(99)00107-1.

Kelm, Tobias; Schmidt, Maike; Taumann, Michael; Püttner, Andreas; Jachmann, Henning; Capota, Michael et al. (2014): Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des Erfahrungsberichts 2014 gemäß § 65 EEG. Vorhaben IIc Solare Strahlungsenergie. Stuttgart. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/XYZ/zwischenbericht-vorhaben-2c,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf.

Kommission der europäischen Gemeinschaften (2009): Anpassung an den Klimawandel. Ein europäischer Aktionsrahmen. Weissbuch. Hg. v. Kommission der europäischen Gemeinschaften. Brüssel.

Kowalska-Pyzalska, Anna; Maciejowska, Katarzyna; Suszczyński, Karol; Sznajd-Weron, Katarzyna; Weron, Rafał; Suszczy?ski, Karol; Weron, Rafa (2014): Turning green. Agent-based modeling of the adoption of dynamic electricity tariffs. In: *Energy Policy* 72, S. 164–174. DOI: 10.1016/j.enpol.2014.04.021.

Kroneberg, Clemens; Kalter, Frank (2012): Rational Choice Theory and Empirical Research. Methodological and Theoretical Contributions in Europe. In: *Annu. Rev. Sociol.* 38 (1), S. 73–92. DOI: 10.1146/annurev-soc-071811-145441.

Kropp, J.; Roithmeier, O.; Hattermann, F.; Rachimow, C.; Lüttger, A.; Wechsung, F. et al. (2009): Zusammenfassung der Studie "Klimawandel in Sachsen-Anhalt". Potsdam.

Ma, Tieju; Nakamori, Yoshiteru (2009): Modeling technological change in energy systems – From optimization to agent-based modeling // Modeling technological change in energy systems ? From optimization to agent-based modeling. In: *Energy* 34 (7), S. 873–879. DOI: 10.1016/j.energy.2009.03.005.

Mayring, Philipp (2002): Qualitative content analysis - Research instrument or mode of interpretation? In: Mechthild Kiegelmann (Hg.): The role of the researcher in qualitative psychology. 1. ed. Tübingen: Huber (Qualitative psychology nexus, Vol. 2), S. 139–148.

Mayring, Philipp (2010): Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken. 11. Aufl. Weinheim: Beltz.

Merz, Mirjam (2010): Entwicklung einer indikatorbasierten Methodik zur Vulnerabilitätsanalyse für die Bewertung von Risiken in der industriellen Produktion. Dissertation. Institut für Technologie, Karlsruhe. Fakultät für Wirtschaftswissenschaten. Online verfügbar unter http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/.

Molyneaux, Lynette; Brown, Colin; Wagner, Liam; Foster, John (2016): Measuring resilience in energy systems. Insights from a range of disciplines. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59, S. 1068–1079. DOI: 10.1016/j.rser.2016.01.063.

Mueller, Michel G.; Haan, Peter de (2009): How much do incentives affect car purchase? Agent-based microsimulation of consumer choice of new cars—Part I: Model structure, simulation of bounded rationality, and model validation. In: *Energy Policy* 37 (3), S. 1072–1082. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.11.002.

Nikolic, Igor; Kasmire, J. (2013): Theory. In: Koen H. van Dam, Igor Nikolic und Zofia Lukszo (Hg.): Agent-based modelling of socio-technical systems. Dordrecht: Springer (Agent-based social systems, 9).

Nitsch, Joachim; Pregger, Thomas; Naegler, Tobias; Heide, Dominik; Tena, Diego Luca de; Trieb, Franz et al. (2012a): Langfristsszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Schlussbericht. Hg. v. BMU.

Nitsch, Joachim; Pregger, Thomas; Naegler, Tobias; Heide, Dominik; Tena, Diego Luca de; Trieb, Franz et al. (2012b): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Datenanhang II zum Schlussbericht. Stuttgart, Kassel, Teltow.

O'Keefe, Phil; Westgate, Ken; Wisner, Ben (1976): Taking the naturalness out of natural disasters. In: *Nature* 260, S. 566–567.

Rai, Varun; Henry, Adam Douglas (2016): Agent-based modelling of consumer energy choices. In: *Nature Climate change* 6 (6), S. 556–562. DOI: 10.1038/nclimate2967.

Rai, Varun; Robinson, Scott A. (2015): Agent-based modeling of energy technology adoption. Empirical integration of social, behavioral, economic, and environmental factors. In: *Environmental Modelling & Software* 70, S. 163–177. DOI: 10.1016/j.envsoft.2015.04.014.

Ryan, Alex J. (2008): What is a Systems Approach?

Schaar, Katrin (1998): Leitbilder in Reformvorhaben zur Umweltbildung. In: Gerhard de Haan und Udo Kuckartz (Hg.): Umweltbildung und Umweltbewußtsein. Opladen.

Schilling, Simon J. (2009): Beitrag zur dynamischen Fehlerbaumanalyse ohne Modulbildung und zustandsbasierte Erweiterung. Dissertation. Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal. Sicherheitstechnik. Online verfügbar unter elpub.bib.uni-wuppertal.de/servlets/DerviateServlet/Derivate-1483/dd0904.

Schuchardt, Bastian; Wittig, Stefan (2009): Definition von Vulnerabilität und Konzept für die Vulnerabilitätsanalyse. Arbeitspapier der AG Vulnerabilitätsanalyse im Projekt nordwest2050. Bremen.

Simon, Herbert A. (1996): The sciences of the artificial. 3rd ed. Online verfügbar unter http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=e000xat&AN=49230.

Statistisches Bundesamt (2012a): Finanzen und Steuern - Umsatzsteuerstatistik (Voranmeldungen) 2010.

Statistisches Bundesamt (2012b): Statistisches Jahrbuch - Deutschland und Internationales.

Statistisches Bundesamt (2012c): Verdienste und Arbeitskosten - Arbeitnehmerverdienste 2011.

Stock, Manfred (2005): KLARA: Klimawandel-Auswirkung, Risiken, Anpassung. PIK Report. No. 99. Hg. v. Manfred Stock und F.-W. Gerstengarbe. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK). Potsdam.

Stummer, Christian; Kiesling, Elmar; Günther, Markus; Vetschera, Rudolf; G?nther, Markus (2015): Innovation diffusion of repeat purchase products in a competitive market. An agent-based simulation approach. In: *European Journal of Operational Research* 245 (1), S. 157–167. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.03.008.

Tran, Martino (2012): Agent-behaviour and network influence on energy innovation diffusion. In: *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* 17 (9), S. 3682–3695. DOI: 10.1016/j.cnsns.2012.01.016.

Turner, B. L.; Kasperson, Roger E.; Matson, Pamela A.; McCarthy, James J.; Corell, Robert W.; Christensen, Lindsey et al. (2003): A framework for vulnerability analysis in sustainability science. In: *PNAS* 100 (14), S. 8074–8079. DOI: 10.1073/pnas.1231335100.

van Vliet, Oscar; Vries, Bert de; Faaij, Andr; Turkenburg, Wim; Jager, Wander; Faaij, André (2010): Multi-agent simulation of adoption of alternative fuels. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 15 (6), S. 326–342. DOI: 10.1016/j.trd.2010.03.006.

Walsh, Froma (2003): Family Resilience. A Framework for Clinical Practice. In: *Family Process* 42 (1), S. 1–18. DOI: 10.1111/j.1545-5300.2003.00001.x.

Weber, Max (2007): Wirtschaft und Gesellschaft. Grundriss der verstehenden Soziologie. Tübingen, 1922. In: Steffen Kailitz (Hg.): Schlüsselwerke der Politikwissenschaft. 1. Aufl. Wiesbaden: VS Verl. für Sozialwiss.

Wolf, Ingo; Schröder, Tobias; Neumann, Jochen; Haan, Gerhard de; Schr?der, Tobias (2015): Changing minds about electric cars. An empirically grounded agent-based modeling approach. In: *Technological Forecasting and Social Change* 94, S. 269–285. DOI: 10.1016/j.techfore.2014.10.010.

Zebisch, Marc; Grothmann, Torsten; Schröter, Dagmar; Hasse, Clemens; Fritsch, Uta; Cramer, Wolfgang (2005): Klimawandel in Deutschland - Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Hg. v. Umweltbundesamt. Potsdam Institut für Klimafolgenforschung e.V.

Zhang, Ting; Gensler, Sonja; Garcia, Rosanna (2011): A Study of the Diffusion of Alternative Fuel Vehicles. An Agent-Based Modeling Approach*. In: *Journal of Product Innovation Management* 28 (2), S. 152–168. DOI: 10.1111/j.1540-5885.2011.00789.x.

Zhao, Jiayun; Mazhari, Esfandyar; Celik, Nurcin; Son, Young-Jun (2011): Hybrid agent-based simulation for policy evaluation of solar power generation systems. In: *Simulation Modelling Practice and Theory* 19 (10), S. 2189–2205. DOI: 10.1016/j.simpat.2011.07.005.

6 Fallstudien

6.1 Einleitung der Fallstudien Regionale Selbstversorgung und strombasierte synthetische Kraftstoffe

Die Energiewende und in deren Rahmen vor allem das EEG haben Transformationsprozesse im Energiesektor angestoßen. Angetrieben werden und wurden diese Veränderungen durch Kritik an Kernkraftwerken, durch den drohenden Klimawandel, durch veränderte öffentliche Leitvorstellungen einer zukunftsfähigen und ökologisch nachhaltigen Energieversorgung sowie durch technische Innovationen und staatliche Regulierungen. Die Katastrophe von Fukushima führte zum erneuten Ausstiegsbeschluss aus der Kernenergie und ein im September 2010 verabschiedetes Richtliniendokument sah eine Reduzierung der Treibhausgase um 80-95% bis zum Jahr 2050 vor, u.a. durch Reduzierung des Gesamt-Primärenergieverbrauchs bis 2050 um 50 Prozent gegenüber 2008 und Berücksichtigung einer Minderung des Endenergieverbrauchs um 80 Prozent beim Gebäudebestand und um 40 Prozent gegenüber 2005 bis 2050 im Verkehrssektor. Sowie durch einen erhöhten Anteil an Erneuerbaren Energien auf 80 Prozent an der Stromversorgung und Minderung des Bruttostromverbrauchs um 25 Prozent gegenüber 2008 bis 2050. Darüber hinaus war und ist ein erhöhter Anteil an erneuerbaren Energien in allen Sektoren (auch Wärme, Kühlung und Mobilität) vorgesehen (Klaus et al. 2010). Im November 2015 wurde zusätzlich in Paris beschlossen, dass die Erderwärmung auf mind. 2 Grad, wenn möglich auf 1,5 Grad begrenzt werden soll. Um dies zu erreichen werden ambitioniertere Ziele der Energie bzw. Klimapolitik der Bundesregierung benötigt (Höhne et al. 2016). In diesem Zuge wird auch die Umstellung auf erneuerbare Treibstoffe eine gewichtige Rolle spielen, die im bisher stark stromzentrierten Diskurs vernachlässigt werden. Diese werden weiterhin für Flug und Schwerlastverkehr benötigt, außerdem gibt es ausreichend Lagerstätte in Form der strategischen Reserve. In Deutschland spielen neben der nationalen Handlungsebene schon seit Beginn der Energiewende auf dezentraler Ebene Städte und Regionen als Vorreiter eine wichtige Rolle. Mehrere Kommunen und Landkreise arbeiten bereits seit geraumer Zeit an einer Energiewende (Dawid 2011). Der Übergang von einem zentralen Stromerzeugungssystem hin zu einem System, das im Wesentlichen auf dezentralen Erzeugungsanlagen aufbaut, ist in vollem Gang. Durch die unterschiedlichen Fördersysteme (u.a. langfristige Einspeisevergütung) wurden deutliche Anreize geschaffen, in EE zu investieren. Der Übergang zu regenerativen Energien im Bereich der Elektrizität wird derzeit kaum noch in Frage gestellt. Aktuell bestimmen zwei neue Herausforderungen die Debatte. Zum einen ist dies der Übergang zu regenerativen Energien auch in den Bereichen Wärme und Mobilität, einschließlich einer möglichen Kopplung dieser Sektoren, und zum zweiten die Ausgestaltung der Systemarchitektur des zukünftigen Energiesystems. An diesen beiden Herausforderungen setzt das Projekt RESYSTRA mit seinen Fallbeispielen in den Bereichen regionale resiliente

Energieversorgung sowie dem Fallbeispiel Power-to-Fuel als Element eines resilienten nationalen Energiesystems an. Diese Fallbeispiele adressieren unterschiedliche Innovationstypen (Regionales System / Technologie) und damit einhergehend gänzlich unterschiedliche Akteure (Zivilgesellschaft / Unternehmen) und Zeithorizonte (kurz bis mittelfristig / langfristig). In der ersten Fallstudie werden die bisherigen Erfolge sowie die weiteren Perspektiven einer regionalen Selbstversorgung mit Erneuerbaren Energien in den Regionen Landkreis Osterholz und Stadt Wolfhagen untersucht. Dabei stand im Vordergrund ein Gestaltungsleitbild für „Resiliente Regionale Energiesysteme“ zu entwickeln und die Rolle zivilgesellschaftlicher Akteure hierin zu untersuchen. Die Auswahl der Regionen erfolgte hauptsächlich aufgrund deren starken Engagement in Bezug auf die Erreichung der Ziele sich bilanziell mit 100% Erneuerbare Energien zu versorgen gepaart mit einem dadurch guten Feldzugang und Offenheit für unsere Forschungen. Dies war zwingend notwendig, da intendiert war, insbesondere die Rolle zivilgesellschaftlicher Akteure im Innovationssystem zu untersuchen, sowie neben der Selbstversorgung weitere Leitorientierungen zu identifizieren. Die Perspektive der Selbstversorgung wurde dabei in den Kontext des breiteren Leitkonzepts eines ‚Resilienten Energiesystems‘ eingebettet. Neben der technischen Ebene sind dabei die wirtschaftlichen Aspekte sowie die gesellschaftlichen Einflüsse und Folgen auf die sozio-technischen Systeme von besonderer Bedeutung. Im Rahmen der Untersuchung der vorfindbaren Bedingungen und möglicher zukünftiger Gestaltungsoptionen, wurden strukturelle Vulnerabilitätsanalysen durchgeführt. Eine Analyse der Wertschöpfungseffekte untersuchte ebenfalls sowohl den erreichten Status Quo in den beiden Regionen als auch die erwartbaren wirtschaftlichen Auswirkungen der Gestaltungsoptionen einer resilienteren regionalen Energieversorgung. Die Voraussetzungen, Möglichkeiten und Grenzen einer entsprechenden weiteren Transformation der regionalen Energiesysteme wurden vor dem Hintergrund der bisherigen gesellschaftlichen Dynamiken und Einflussfaktoren durch Dokumentenrecherchen und durch Interviews mit Akteuren der Energiewende in den beiden Regionen untersucht.

Bei der Fallstudie Power-to-Fuel, bei der eine Technologie im Fokus der Betrachtungen steht, wurde ein anderer Zugang gewählt. Die Fragestellung die zu beantworten war lautete: Marktbedingungen um Wege aus der Nische für diese Technologie zu finden. Hierzu wurde ausgehend vom Schildkrötenmodell eine Agentenbasierte Modellierung durchgeführt. Anhand dieser konnten notwendige politische und regulatorische Rahmenbedingungen identifiziert werden, die mit den Stakeholdern diskutiert wurden.

6.2 Fallstudie resiliente regionale Selbstversorgung im Landkreis Osterholz

Als erste Fallstudie wurde der Landkreis Osterholz in Niedersachsen ausgewählt. Wichtiger Grund für die Auswahl war die dort existierende Initiative „Energiewende Osterholz 2030“, die als Ziel eine bilanzielle Energieautarkie bis zum Jahr 2030 formuliert hatte (Landkreis Osterholz 2016d). Die Region war bzw. ist somit auf dem Weg in Richtung einer regionalen Selbstversorgung auf Basis von erneuerbaren Energien. Sie strebt einen grundlegenden Strukturwandel an, der sowohl organisatorische als auch technologische, institutionelle und das Akteurs-Netzwerk betreffende Veränderungsprozesse umfasst. Diese Veränderungen stehen in einem direkten Wechselspiel zueinander, wodurch diese regionale Energiewende als ein komplexes Unterfangen betrachtet werden muss. Es geht um eine weitreichende Transformation bzw. Systeminnovation. Wichtig für die Auswahl dieses Fallbeispiels war schließlich auch ein besonders guter Feldzugang, basierend auf bisherigen Kontakten und Erfahrungen.

6.2.1 Systembeschreibung Landkreis Osterholz

6.2.1.1 Geographische Gegebenheiten

Der Landkreis Osterholz (LK OHZ) befindet sich im Norden Niedersachsens, eingebettet zwischen den Landkreisen Cuxhaven, Rotenburg (Wümme), Verden und Wesermarsch. Er grenzt im Süden an die Stadt Bremen an und ist Mitglied der Metropolregion Bremen-Oldenburg im Nordwesten. Im Jahr 2015 zählte der Landkreis 113.579 Einwohner auf einer Fläche von 650,81 km^{2,} verteilt auf sieben kreisangehörige Kommunen, die Gemeinden Grasberg, Lilienthal, Ritterhude, Schwanewede, Worpswede, die Kreisstadt Osterholz-Scharmbeck sowie die Samtgemeinde Hambergen mit ihren Mitgliedsgemeinden Axstedt, Hambergen, Holste, Lübberstedt und Vollersode (Landesamt für Statistik Niedersachsen 2016) (siehe Abbildung 6.1).

6.2.1.2 Wirtschaftsstrukturelle Gegebenheiten

Bis 1939 gehörten noch sechs weitere Gemeinden zum Landkreis, von denen er sich aber im Zuge einer Gebietsreform trennen musste, was für den Landkreis den Verlust eines Großteils der Einwohner und der Unternehmen an die Stadt Bremen bedeutete. Seitdem gilt der Landkreis Osterholz als wirtschaftlich unterentwickelte Region und kann diesen Verlust, trotz der Nähe zu Bremen, aufgrund mangelnder Standortvoraussetzungen bis heute nicht kompensieren. So belegt der Landkreis nach dem 2009 durchgeführten Regionalranking der Initiative Neue Soziale Marktwirtschaft (INSM) Platz 391 von 409 untersuchten Kreisen, bezogen auf sein Bruttoinlandsprodukt mit 16.576 Euro pro Einwohner (Bundesdurchschnitt liegt bei 28.534 Euro) und Platz 44 von 46 Rängen innerhalb von Niedersachsen (Initiative Neue Soziale Marktwirtschaft 2009). Der Pendlersaldo lag 2009 bei -14,4 je 100 Einwohner. Ein positiver Pendlersaldo wäre ein wichtiges Indiz dafür, dass eine Region attraktive Arbeitgeber hat. Pro Jahr übernachten im Landkreis Osterholz durchschnittlich 1,1 Besucher je Einwohner. Das

Bundesmittel hingegen lag bei 4,8 Gästen pro Jahr, und somit belegt Osterholz lediglich Rang 372 im Gesamtranking und Platz 40 von 46 betrachteten Städten und Kreisen innerhalb Niedersachsens (Initiative Neue Soziale Marktwirtschaft 2009).

Abbildung 6.1: Landkreis Osterholz (Koordinierungsstelle GDI-NI beim Landesbetrieb Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen 2009)

Im Kontrast zu Wirtschaftsleistung steht der Landkreis bei der Arbeitsmarktsituation und der Gründungsdynamik recht gut dar. Bei der Kaufkraft je Einwohner belegte der Kreis Osterholz Platz 98 von 409 untersuchten Kreisen und kreisfreien Städten in 2009. Des Weiteren kommen auf 100 Einwohner im Kreis Osterholz 3,6 Arbeitslosengeld-II-Empfänger (5,6 im bundesweiten Durschnitt). Somit belegt Osterholz Rang 131 im bundesweiten Vergleich sowie Rang vier unter 46 untersuchten Kreisen in Niedersachsen. Die Arbeitslosenquote des Kreises Osterholz betrug im Jahr 2008 5,7%. Bundesweit waren - bezogen auf abhängig Beschäftigte - 8,4% arbeitslos gemeldet, was im Gesamtranking Platz 137 unter 409 kreisfreien Städten und Landkreisen ergibt, sowie Platz sechs unter 46 Kreisen und Städten in Niedersachsen (Initiative Neue Soziale Marktwirtschaft 2009).

Landschaftlich ist der Landkreis Osterholz durch Moor, Marsch und Geest geprägt. Besonders über die Region hinaus bekannt ist das seit dem 18. Jahrhundert kultivierte Teufelsmoor. Bedingt durch diese landschaftlichen Gegebenheiten und geschichtlich-politischen Entwicklungen liegt der Nutzungsschwerpunkt der Flächen im Landkreis Osterholz auf der Landwirtschaft gefolgt von Siedlungs- und Verkehrsflächen sowie Waldflächen (siehe Abbildung 6.2) (Landkreis Osterholz 2014c).

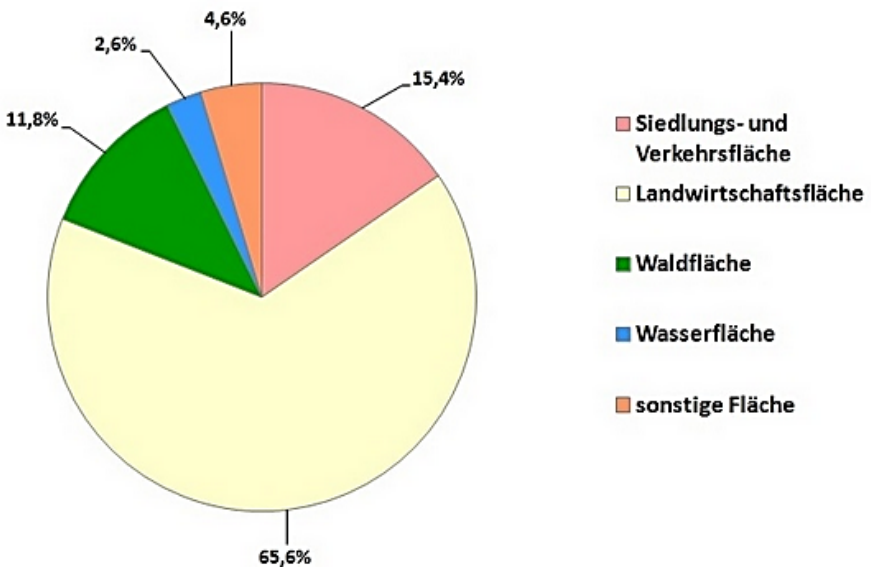


Abbildung 6.2: Flächennutzungsstruktur im Landkreis Osterholz nach Katasterfläche zum 31.12.2014 (Landkreis Osterholz 2014b)

Um die räumliche und strukturelle Entwicklung voranzutreiben, erarbeitete der Landkreis Osterholz im Jahre 2011 unter Beteiligung von Öffentlichkeit und Politik ein Regionales Raumordnungsprogramm, welches zum 27.10.2011 in Kraft trat (Landkreis Osterholz 2011). Vereinbart wurde in diesem ‚Interkommunalen Raumstrukturkonzept Region Bremen' das Leitbild einer nachhaltigen Raumentwicklung, verbunden mit dem Ziel, die Region auch langfristig für künftige Generationen zu einem attraktiven Wirtschaftsraum mit hoher Lebens- und Umweltqualität zu entwickeln (Landkreis Osterholz 2011).

6.2.1.3 Politische Gegebenheiten

In Abbildung 6.3 wird die aktuelle Sitzverteilung im Kreistag Osterholz gezeigt, welcher sich aus insgesamt 46 Kreisabgeordneten zusammensetzt. Mit 33% und 15 Sitzen repräsentiert die SPD in der 17. Wahlperiode (2016 bis 2021) die stärkste Kraft im Kreistag (Landkreis Osterholz 2016c).

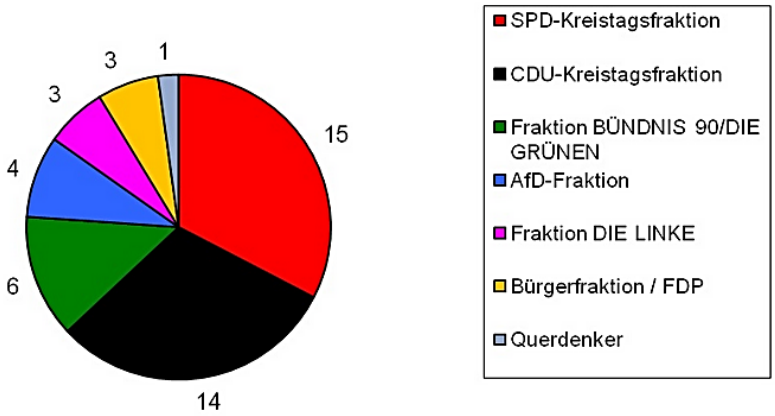


Abbildung 6.3: Zusammensetzung Kreistag (17. Wahlperiode) (Landkreis Osterholz 2016c)

Der Kreistag hat einen maßgeblichen Anteil an der Lenkung der lokalen Energiewende und unterstützt diese finanziell. Weiterhin wurde im Rahmen des neuen Raumordnungsprogramms im Kreistag die Erhöhung des potentiellen Anteils der Windkraftanlagen vereinbart (vgl. I-OHZ1: 12).

6.2.1.4 Technische Gegebenheiten

6.2.1.4.1 Stromversorgung

Die Versorgung mit Strom sowie der Betrieb der Stromnetze erfolgt im Landkreis durch die Osterholzer Stadtwerke und die EWE AG (Hauptsitz in Oldenburg, Nds.). Entstanden sind die Osterholzer Stadtwerke aus einer Fusion der Unternehmen Gemeindewerke Lilienthal, Gemeindewerke Ritterhude und den Stadtwerken Osterholz-Scharmbeck im Jahr 2010. Die EWE AG und die Stadtwerke Osterholz sind eng miteinander verknüpft, weil die EWE AG über die swb Vertrieb Bremen GmbH 25,71% der Anteile an den Stadtwerken hält (EWE 2016a).

Das Versorgungsgebiet der Osterholzer Stadtwerke umfasst die Gemeinden Lilienthal (Ortsteile Lilienthal Zentrum, Worphausen, Sankt Jürgen, Seebergen, Heidberg, Falkenberg, Trupermoor Trupe, Feldhausen, Butendiek und Moorhausen), Ritterhude sowie die Kreisstadt Osterholz-Scharmbeck. Die verbleibenden Gemeinden des Landkreises werden durch die EWE AG versorgt (Grasberg, Schwanewede, Worpswede, Hambergen) (Stadtwerke Osterholz 2016).

Abbildung 6.4: Darstellung des Netzgebietes der Osterholzer Stadtwerke (orange hinterlegt) sowie der übrigen Gemeinden des Landkreises Osterholz (grau hinterlegt) deren Strom- und Gasnetz von der EWE betrieben werden. (Osterholzer Stadtwerke 2015)

Die im Rahmen eines Energiemonitorings vom Landkreis und den regionalen Energieversorgern erstellte Strombilanz des Landkreises Osterholz gibt Aufschluss über Strombedarf, -erzeugung sowie Erzeugungsart in den Jahren 2010 bis 2013 (Landkreis Osterholz 2013c). Wie

der Tabelle 6.1 zu entnehmen ist, betrug der Strombedarf im Jahr 2013 382 Mio. kWh, bei einer Stromerzeugung im Landkreis von 152 Mio. kWh, was einer bilanziellen Eigenversorgung des Landkreises von 40% entspricht. Der größte Strombedarf liegt bei den privaten Haushalten mit einem Anteil von 42%, gefolgt vom produzierenden Gewerbe mit 38% und Dienstleistungen mit 11%. Von 2010 bis 2013 hat die Stromeigenerzeugung um ca. 95% zugenommen. Davon werden 96% (146 Mio. kWh) aus regenerativen Energien (Windkraft, Photovoltaik und Biogas) und 4% (5 Mio. kWh) aus fossilen Energien (Gas-Blockheizkraftwerk) bzw. Eigenversorgung gewonnen. Der Strombedarf ist dagegen von 2010 bis 2013 um ca. 1% gesunken (Landkreis Osterholz 2013c).

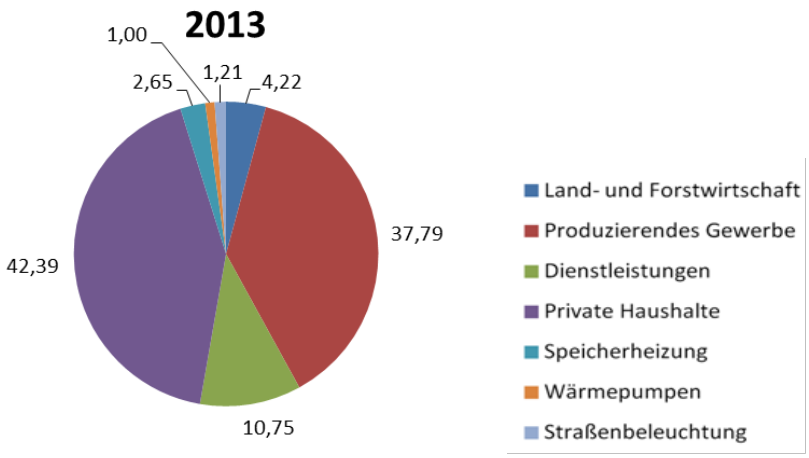


Abbildung 6.5: Aufschlüsselung des Stromverbrauchs nach Abnehmern für das Jahr 2013 (Landkreis Osterholz 2014d)

Da der Landkreis Osterholz im Landes-Raumordnungsprogramm Niedersachsen (LROP) als besonders windhöffige Region verpflichtet ist, Vorranggebiete zur Windenergienutzung in einem Umfang von mindestens 50 MW Leistung auszuweisen, entfällt die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien zu 42% primär auf die Windenergie. Danach folgt die Strombereitstellung zu 28% durch Biogasanlagen und zu 26% durch Photovoltaikanlagen (Landkreis Osterholz 2013c).

Im Landkreis Osterholz waren zum Ende des Jahres 2013 61 Windkraftanlagen mit einer Gesamtleistung von 51.340 kWp installiert. Der Zeitraum der Inbetriebnahme der Anlagen liegt zwischen den Jahren 1989 und 2011 (Landkreis Osterholz 2013b). Die durchschnittliche erreichte Volllaststundenzahl für das Jahr 2013 lag bei 1100 Stunden für Anlagen im Netz-Gebiet der Osterholzer Stadtwerke (Landkreis Osterholz 2013c). Die Gesamtzahl der Photovoltaikanlagen lag im Jahr 2013 bei 1.777 Anlagen mit einer Gesamtleistung von 49.584 kWp. Diese Anlagen teilen sich auf in 1773 Dachanlagen mit 30.326 kWp und 4 Freiflächenanlagen mit 19.258 kWp Leistung (Landkreis Osterholz; Landkreis Osterholz 2013c; TenneT TSO GmbH 2014). Die durchschnittliche Zahl der Volllaststunden für Photovoltaikeinspeisung der Anlagen

mit Lastgangzähler im Netzgebiet der Osterholzer Stadtwerke betrug im Jahr 2013 750 h (Osterholzer Stadtwerke 2013). Die 14 Biogasanlagen haben eine elektrische Leistung von 5.722 kW (Landkreis Osterholz 2013a). Die Anlagen auf dem Gebiet der Osterholzer Stadtwerke hatten im Jahr 2013 eine mittlere Volllaststundenzahl von 4500, und es wurde das gesamte erzeugte Biogas verstromt.

Im Jahr 2014 waren im Landkreis Osterholz 61 Windkraftanlagen mit einer Gesamtleistung von 51,3 MW in Betrieb (siehe Tabelle 6.1) (Landkreis Osterholz 2014a). Weitere 49 Windkraftanlagen mit einer Gesamtleistung von ca. 132 MW waren geplant (Stand Dezember 2014). Des Weiteren existierten 2014 im Landkreis 14 Biogasanlagen mit einer installierten elektrischen Leistung von 5,7 MW (Stand Dezember 2014), von denen 11 Anlagen mit nachwachsenden Rohstoffen und drei mit Gülle betrieben werden (Landkreis Osterholz 2014a). Vier weitere Biogasanlagen von 925 kW (2 mit Gülle, 2 mit nachwachsenden Rohstoffen) waren bereits genehmigt. Im Bereich der Freiflächen-Photovoltaikanlagen (insgesamt vier) wurden zwei Photovoltaikanlagen sowie die Solarparks Hambergen und Worpswede-Neu Sankt Jürgen mit einer Gesamtleistung von 19.258 kWp betrieben (Stand Januar 2014, gilt auch für 2016) (Landkreis Osterholz 2014a). Insgesamt 1.854 Aufdach-Photovoltaikanlagen existierten 2014 mit einer Gesamtleistung von 31.974 kWp, davon 1.665 (16.177 kWp) bis 30 kWp und 189 (15.797 kWp) größer als 30 kWp (Stand Dezember 2014) (TenneT TSO GmbH 2014). Die Kleinfeuerungsanlagen beliefen sich in 2014 auf ca. 18,1 MWth (Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks 2014).

Tabelle 6.1: EE-Anlagen im Landkreis Osterholz im Jahr 2013 und 2014 (Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks 2014; Landkreis Osterholz 2014a, 2014d; TenneT TSO GmbH 2014)

	2013		2014	
	Anzahl	Leistung [MW]	Anzahl	Leistung [MW]
Wind	61	51,3 MW	61	51,3 MW
PV	1777	49,6 MW	1858	51,2 MW
Biogas	14	5,7 MW	14	5,7 MW
Kleinfeuerungsanlagen	n/a	18,1 MWth	n/a	18,1 MWth
Stromerzeugung aus EE:		152MWh/a (Anteil: 39,7%)		156,9 MWh/a (Anteil: 42,7%)

6.2.1.4.2 Wärme- und Gasversorgung

So wie bei der Stromversorgung wird auch die Gasversorgung mit ihrem Netzbetrieb von der EWE AG (Gemeinde Grasberg, Schwanewede, Worpswede, Hambergen) und den Stadtwerken Osterholz (Gemeinden Lilienthal und Ritterhude, Kreisstadt Osterholz-Scharmbeck) übernommen (Osterholzer Stadtwerke 2014).

Daten zur Wärme- und Gasversorgung liegen nur im geringen Umfang und lediglich für das Jahr 2009 vor. So betrug der Wärmebedarf im Jahr 2009 ca. 1.167 Mio. kWh. Er wurde zu 98,3% mit Energieimporten gedeckt (Dawid 2011) (siehe Abbildung 6.7).

Die Erdgasinfrastruktur ist in den ländlich geprägten Gebieten nur begrenzt ausgebaut.

Laut Angaben der Gasversorger basiert die Wärmeversorgung im Bereich der Osterholzer Stadtwerke zu ca. 70% und im Einzugsgebiet der EWE AG zu ca. 40% auf Erdgas. Es wird angenommen, dass die restliche Wärmeversorgung zum größten Teil durch Öl und in kleineren Anteilen durch Flüssiggas, Strom, Solarthermie und Festbrennstoffe sowie die Abwärme von BHKWs bereit gestellt wird (Osterndorf 2014).

Im Jahr 2013 gab es 611 holzbefeuerte Heizungsanlagen mit einer Gesamtleistung von 17.000 kWth und 1280 Solarthermieanlagen mit einer Fläche von 11.055 qm (Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks 2013). Für die Solarthermieanlagen wurde ein Ertrag von 300 kWh pro qm/Jahr angelegt. Zur Anzahl der Wärmepumpen konnten keine aussagekräftigen Daten für den gesamten Landkreis beschafft werden. Es gibt drei Wärmenetze mit einer Länge von 3.950 Trassenmetern. Die Ansässigkeit der Betreiber wurde bei einem Telefonat mit einem Vertreter des Landkreises ermittelt (M. Monsees, persönl. Mitteilung, 16.03.2015).

Mit Blick auf den Einsatz von erneuerbaren Energien zur Wärmeversorgung können drei zentrale Wärmeversorger genannt werden: Zentralheizungen, die mit Pellets, Scheitholz, bzw. Holzhackschnitzel befeuert werden, Solarthermie und Nahwärmenetze (siehe Tabelle 6.2) (Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks 2014).

Tabelle 6.2: Wärmeversorgung aus EEG (Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks 2014)

Anlagen	Anzahl	Leistung
Zentralheizungen (Pellets, Scheitholz, Holzhackschnitzel)	655	ca. 22 MW
Solarthermie	1295	11.220 qm
Nahwärmenetze	3	ca. 4 Km

6.2.1.4.3 Verkehr

Im Jahr 2010 war ein Fahrzeugbestand von 75.254 Kraftfahrzeugen zu verzeichnen (Landesamt für Statistik Niedersachsen 2016). Davon fielen 62.522 Fahrzeuge in die Kategorie Personenkraftfahrzeuge (PKW). Die PKWs wurden zu knapp 24% (15.109 PKWs) von Dieselmotoren und zu 76% (47.552 PKWs) von Otto-Motoren angetrieben. 3% der Ottomotoren wurden mit Gas betreiben (1058 gasbetrieben(LPG) und 176 erdgasbetrieben).

Dies entsprach im Jahr 2010 einem Verhältnis von 559 PKW je 1000 Einwohnern, wobei eine sinkende Tendenz im Vergleich zu den Vorjahren zu erkennen war. Der Peak lag im Jahr 2007 bei etwa 610 PKW je 1000 Einwohnern (Landesamt für Statistik Niedersachsen 2016).

Der gesamte Energiebedarf für Mobilität im Landkreis wird auf 600 Mio. kWh/a geschätzt (siehe Tabelle 6.3).

Tabelle 6.3: Aufschlüsselung des Energiebedarfs im Landkreis Osterholz für das Jahr 2013 (Dawid 2011; Landkreis Osterholz 2013c); eigene Schätzung / Hochrechnung auf Basis der Verkehrsmitte)

Nutzenergiebedarf	ca. 2.200 Mio kWh/a
Strombedarf	382 Mio kWh/a (Jahr 2013)
Wärmebedarf (Öl, Erdgas)	1.167 Mio kWh/a (Daten 2009)
Mobilitätsbedarf	ca. 600 Mio kWh/a (Schätzung Resystra)

6.2.1.4.4 Energieverbrauch

Für die Modellierung des regionalen Energiesystems werden Energieverbräuche der Energieträger Strom Gas, Nahwärme und Sonstige Energieträger pro Haushalt und Gewerbe benötigt. Hierfür dienen die in der Systembeschreibung ermittelten Zahlen, die umgerechnet auf die Haushalte sich folgendermaßen aufschlüsseln. Als Basis wurde die Anzahl von 49.388 Haushalten zugrunde gelegt.

Tabelle 6.4: Darstellung der Durchschnitts-Verbräuche je Haushalt im Landkreis Osterholz (Quelle: Eigene Berechnung und Schätzung auf Grundlage des Gesamtverbrauchs im Landkreis (Kubina 2016)

2013	Pro Haushalt			Gewerbe gesamt	
Energieträger	Elektrizität [kWh]	Warmwasser & Raumwärme [kWh]	Mobilität [kWh]	Energiebedarf [kWh]	Mobilität [kWh]
Energiebedarf	3000	12.300	12.440	822.246.489	
Anteil Elektrizität	100%	0%		27%	0%
Anteil Gas		40%	2%	22%	2%
Anteil Nahwärme		3%			
Anteil Sonstiges		57%	98%		49%

Die in Tabelle 6.4 dargestellten Verbräuche entsprechen einem Gesamtenergiebedarf von 466.109.127 kWh Gas, 358.996.433 kWh Elektrizität und 18.224.172 kWh Wärme pro Jahr im Landkreis. Der Sonstige Anteil beträgt für Raumwärme und Warmwasser 349.592.768 kWh und für die erdölbasierte Mobilität im Privatbereich 602.098.985 kWh und im Gewerbe 400.591.623 kWh. Es sei erwähnt, dass die letztgenannten Energieträger ohne Netz durch die Modellierungen nicht berücksichtigt werden.

Insgesamt erhält man dadurch einen Gesamtenergiebedarf im Landkreis von 2.195.603.109 kWh/Jahr.

6.2.1.5 Bisheriger Verlauf der Energiewende in Osterholz

Bereits in den 1990er Jahren wurden die Grundlagen geschaffen für eine Energiewende im Landkreis, indem vermehrt lokale Installateure und Handwerker, oft umweltbewusste und technologieaffine Pioniere, damit begannen den Bereich der „grünen Technologien“ zu unterstützen und so weitere Handwerker und Bürger inspirierten und motivierten. Gleichzeitig beförderten in den folgenden Jahren das Stromeinspeisegesetz sowie das spätere EEG und die damit verbundenen langfristigen Vergütungen und Einspeisevorrangregelungen die Nachfrage nach EE-Erzeugungsanlagen (insb. Photovoltaik), was wiederum lokale Handwerker noch stärker beflügelte sich dem Bereich der Erneuerbaren Energien zu widmen:

„…speziell mit den Dingen, die wir auch umgesetzt haben und so ist das eindeutig das EEG gewesen. Also die Anreizfunktion des EEG hat ganz viel vorangebracht, und das haben wir im Grunde mit unserem gemeinsamen Agieren und mit den Dingen, die ich eben schon geschildert habe, potenziert noch mal“ (I-OHZ1: 31).

Dadurch kamen weitere Bürger und Akteure des Landkreises Osterholz frühzeitig mit der Energiewende und dem Thema Erneuerbare Energien in Berührung. Sie wurden bereits ab diesem Zeitpunkt, also den 90er Jahren, für das Thema sensibilisiert, was zu einer höheren Akzeptanz von Erneuerbaren Energien im Landkreis beitrug. Neben den im EE-Bereich fachlich qualifizierten Handwerkern bot zudem die gewerbliche und ländliche Struktur des Landkreises eine gute Ressourcengrundlage für den Energiewendeprozess:

„…schon in den 90er Jahren viele Installateure auf die Regenerativen konzentriert haben, nicht nur Photovoltaik, sondern auch Solarthermie. Hier gab es einzelne Pioniere, […]*, und generell ist die Region hier sehr grün eingestellt.* […] *wir sind hier ja in Niedersachen, in Norddeutschland auf der einen Seite Pionier und auf der anderen Seite so der größte Photovoltaik Großhandel, den es überhaupt gibt, und gerade, wenn so ein Projekt in unmittelbarer Umgebung stattfindet, dann müssen wir da als Partner da auch äh zur Seite stehen“* (I-OHZ5: 6).

Durch Bemühungen einzelner Personen und lokaler Politiker wie dem Landrat und einiger Bürgermeister konnten Anfang der 2000er Jahre Kontakte zu anderen Vorreiterregionen im Bereich der regionalen Selbstversorgung mit EE aufgebaut werden, insbesondere zur Stadt Güssing in Österreich (vgl. I-OHZ1: 10). Im Rahmen des 6. EU-Forschungsrahmenprogramms (2006 bis 2008) arbeiteten Güssing und Osterholz gemeinsam in dem Projekt KISoLL („Knowledge Investment on Local Level“) zum Thema Wissensmanagement mit den Unterthemen Breitbandtechnologie, Erneuerbare Energien und Tourismus. Die Projektmittel ermöglichten eine Studienfahrt nach Güssing im Herbst 2008. Der Besuch überzeugte viele der Kommunalvertreter von der Idee, die Energieversorgung in Richtung Erneuerbare Energien (EE) umzugestalten und wird daher als einer der wichtigsten Impulse der Energiewende in Osterholz bezeichnet (vgl. I-OHZ1: 10).

„das war auch hier für unsere Kommunalpolitiker letztendlich überzeugend […], *dass die es in Güssing geschafft haben, in einem Ort mit 4000 Einwohnern, viereinhalb tausend Einwohnern, vor der ungarischen und slowenischen Grenze über 1000 Arbeitsplätze zu schaffen* […] *innerhalb von 10 Jahren mit ´ner konsequenten Orientierung auf erneuerbare Energien“* (I-OHZ4: 8).

Insbesondere die in Güssing mit der Umstellung auf Selbstversorgung verbundene wachsende regionale Wertschöpfung stieß bei den Vertretern des Landkreises auf Resonanz, denn Berechnungen zufolge verzeichnete der Landkreis Osterholz damals jährliche Kaufkraftverluste durch Energieimporte in Höhe von ca. 150 Mio. Euro (I-OHZ3: 47). Mit der Unabhängigkeit von Energieimporten erhofften sich die kommunalen Akteure eine erhebliche Reduzierung des Kaufkraftverlustes und einen Anstieg der regionalen Wertschöpfung.

Ein weiterer wichtiger Impuls für das Projekt Energiewende in Osterholz ging von dem Unternehmen REON AG aus (I-OHZ6: 6). Dieses Unternehmen ist im Landkreis ansässig und beschäftigt sich mit Projektentwicklungen im Bereich Regenerative Energien. Auslöser für die Initiative der REON AG war die Ernennung des Landkreises Osterholz zum Ziel 1 des EU-Konvergenzprogramms im Jahr 2007 (I-OHZ2: 3). Im Rahmen dieses Programms konnten wirtschaftlich benachteiligte Regionen in Europa Fördermittel erhalten. Als Reaktion auf diese Ernennung hat die REON AG im Jahr 2008/2009 eine Potenzialanalyse für Strom und Wärme für den Landkreis OHZ erstellt. Hierbei konnten die mit dem EEG verbundenen Melde- und Veröffentlichungspflichten insb. für EE-Strom dazu beitragen, dass dem LK OHZ bereits früh eine adäquate Datengrundlage hinsichtlich Erzeugung, Bedarf und Potenzial von EE zur Verfügung stand. Ergebnis dieser Studie war eine als realistisch prognostizierte bilanzielle Energieautarkie von 109% im Strombereich und 84% im Wärmebereich bis 2030 (Schirrmeister 2009). Der Verkehrsbereich wurde in der Potenzialanalyse zunächst nicht berücksichtigt. Folglich beschloss der Landkreis das Ziel einer höchstmöglichen bilanziellen Energieautarkie bis 2030 auf Basis von erneuerbaren Energien (I-OHZ4: 125).

Es entstand die Initiative „Energiewende Osterholz 2030“, die sich das Ziel eines nachhaltigen und ganzheitlichen Energiekonzepts mit dem Fokus auf Elektrizität und regionale Wertschöpfung gesetzt hat. Gemeinsam mit Gemeinden, Unternehmen und Hochschulen sollten neue Möglichkeiten erarbeitet werden für eine Neugestaltung des Energiesystems, mit einer auf regionalen Kräften und Ressourcen basierenden Erzeugungs- und Versorgungsstruktur. Um dieses Ziel erfolgreich umzusetzen, sollten drei Maßnahmen als Handlungsorientierung dienen:

1. Verstärkte regionale Erneuerbare Energien Erzeugung
2. Verstärkte Energieeinsparung
3. Steigerung der Energieeffizienz, z.B. durch energetische Gebäudesanierungen oder energieeffizienten Neubauten.

Ihre Aktivitäten finanzierte die Energieinitiative bisher maßgeblich durch nationale und supra-staatliche Förderungen:

Neben dem 6. EU-Forschungsrahmenprogramm leistete bspw. eine Förderung aus dem EU-Konvergenzprogramm in den Jahren 2007 bis 2014 einen wichtigen Beitrag in Richtung auf die regionale Energiewende. Sie wurde durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) sowie den Europäischen Sozialfonds (EFS) und Kohäsionsfonds finanziert. Damit wurden erweiterte Handlungsmöglichkeiten für den Landkreis eröffnet, u.a. konnte damit 2008/2009 die o.g. Potenzialanalyse für den Landkreis Osterholz finanziert werden (Osterndorf 2014). Darüber hinaus sind das von 2009 bis 2012 laufende europäische Nordseeprogramm Interreg IV B „North Sea Sustainable Energy Planning“ (NorthSea SEP) zu erwähnen und das durch das EU-Förderprogramm LEADER („Liaison Entre Actions de Développement de l’ Economie Rurale“) finanzierte Projekt „Green Tech OHZ“ (2011) und schließlich das durch EFRE geförderte regionale Wachstumsprojekt „Energiekompetenz Osterholz“ (2011 bis 2014).

Das Interreg-Projekt zielte auf die Förderung von Innovation, nachhaltigem Wachstum und Energieeffizienz in Städten und Regionen mit dem Ziel einer Steigerung des regionalen wirtschaftlichen Erfolgs und der Wettbewerbsfähigkeit (Osterndorf 2014). Entsprechend wurde ein Businessplan der Energiewende OHZ 2030 darauf ausgelegt. Das durch EFRE geförderte regionale Wachstumsprojekt „Energiekompetenz OHZ“ diente der Erarbeitung von Kompetenzen, Maßnahmen und Werkzeugen zur Erreichung dieser Ziele.

Von 2013 bis 2014 entwickelte der Landkreis Osterholz außerdem gemeinsam mit der Stadt Osterholz-Scharmbeck, der Samtgemeinde Hambergen sowie den Gemeinden Lilienthal und Worpswede ein Klimaschutz-Teilkonzept für 29 kommunale Liegenschaften (z.B. Schulgebäude, Verwaltungsgebäude, Sporthallen, Kindergärten, etc.), welches vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit gefördert wurde und zum Ziel hatte, den Energieverbrauch in den kommunalen Liegenschaften zu senken. Anfang 2015 konnte das Konzept finalisiert werden (Landkreis Osterholz 2016b). Zur seiner Umsetzung wurde ein Klimaschutzmanager eingestellt.

Nationale und supranationale Förderprogramme schufen somit eine wichtige finanzielle und strukturelle Grundlage für die Energiewende in Osterholz. Sie gaben aber auch die Richtung, d.h. ihre Ziele und Maßnahmen mit vor. Im Rahmen der genannten Forschungs- und Entwicklungsprojekte konnten die Akteure der Energiewende Osterholz die folgenden Maßnahmen umsetzen und Erfolge verzeichnen, mit einem Fokus auf den Themenfeldern Erneuerbare Energieerzeugung und Energieeinsparung sowie Energieeffizienz (Osterndorf 2014):

- Machbarkeitsprüfungen zum Einsatz von Bioenergie
- Potenzialanalyse im Photovoltaikbereich
- Erprobung eines Energieberatungskonzeptes

- Energiekindergarten in der Gemeinde Worpswede, d.h. energetische Gebäudeoptimierung, pädagogische Energielernziele
- Grüner Campus: Energieversorgung des Campus Barkhof (Allwetterbad, Medizinzentrum und Schulzentrum) mittels Biogas und BHKW
- Energetische Sanierung des örtlichen Kreiskrankenhauses (u.a. solarbetriebene Erdwärmepumpen) und des Hallenbades Worpswede (u.a. erdgasbetriebenes BHKW)
- Bürgerenergiegenossenschaften in den Gemeinden Grasberg, Ritterhude und Schwanewede, die gemeinschaftlich Solaranlagen betreiben
- Erstellung eines Solardachkatasters
- Gründung eines ehrenamtlichen Energieberater-Netzwerks in Ritterhude
- Erhöhung der Deckung des Eigenbedarfs im Bereich Strom um ca. 82%
- Aufbau und Verstetigung eines Akteurs-Netzwerks
- Politische und vertragliche Verankerung im Rahmen von Zielvereinbarungen zwischen Landrat und Kreistag (u.a. Kontrakt 2016)
- Ernennung des Landkreises OHZ zur offiziellen „100%-Erneuerbare-Energie-Region“ im Jahr 2013.

Aufgrund der Ergebnisse der Potenzialanalyse, dem förderlichen EEG sowie der umfangreichen Datengrundlage im Strombereich wurde der Schwerpunkt des geplanten Energiewendeprozesses anfangs stark auf den Ausbau von regenerativen Stromquellen gerichtet, insb. auf die Bereiche Wind, Photovoltaik und Biogas (Osterndorf 2014). Hier führten beschleunigte Bewilligungsverfahren durch den Landkreis und eine Sensibilisierung der Bauverwaltung (I-OHZ4: 117) dazu, dass im Strombereich die Eigenerzeugung von 2010 bis 2013 um 95% zunahm, was einer bilanziellen Eigenversorgung des Landkreises zu 40% entspricht.

Ebenso waren wichtige technologische Entwicklungen im Bereich der erneuerbaren Stromerzeugung für die Energiewende in OHZ förderlich, die zunehmend wirtschaftlich wurden (Kostendegression). Dazu zählen insb. Technologien zur Umwandlung von Solar- und Windenergie sowie zur energetischen Nutzung von Biomasse (I-OHZ6: 43). Daher wurde zunächst die Weiterentwicklung von Dach- und Freiflächensolaranlagen, Windturbinen und Biogasanlagen sowie BHKWs forciert.

Am 27.10.2011 trat im Landkreis Osterholz das neue regionale Raumordnungsprogramm (RROP 2011) in Kraft, welches eine regionalpolitische Grundlage für den weitreichenden Ausbau der Windenergie im LK schaffen konnte. Durch dieses Programm wurde das Ausmaß der Vorranggebiete fast verdoppelt und damit die möglichen Gebiete für den Bau von Windkraftanlagen deutlich vergrößert (vgl. I-OHZ1: 12). In den Folgejahren fand ein Ausbau um 49 neue

Anlagen statt, was einer zusätzlichen installierten Leistung von ca. 131,85 MW und einer Gesamtleistung von 183,19 MW entspricht. Der Schwerpunkt auf den Windenenergiesektor wurde durch die guten Standortbedingungen (gute Windhöffigkeit) in der Region unterstützt.

Neben den aufgezeigten förderlichen Bedingungen (u.a. Gesetzgebungen, Förderprogramme, geographische Gegebenheiten, technologische Entwicklungen) hatte auch die Reaktorkatastrophe von Fukushima 2011 in der Region ihre Wirkung entfaltet. Die Forderung nach einem Atomausstieg wurde seitens der Bevölkerung wieder intensiviert sowie die Transformation des Energiesystems in Richtung EE vorangetrieben (vgl. I-OHZ5: 49). Auch Krisensituationen in Staaten wie Irak (Öl) und Ukraine (Gasleitungen) wirkten nach und verstärkten den Wunsch nach einer höheren Importunabhängigkeit und Preisstabilität:

„Klima in Anführungsstrichen, Umwelt, ähm Unabhängigkeit, immer dann wenn´s in irgendwelchen Regionen ´ne Krise gibt, dann erst merkt man diese Schwankungen gerade, ob´s jetzt gerade Ukraine ist oder der Irak ist, dann spielt das Thema Unabhängigkeit, Öl, Gaspreise einfrieren eine sehr sehr große Rolle“ (I-OHZ5: 96).

Unter den Bürgern erhöhte sich zumindest kurzzeitig das Bewusstsein für die Notwendigkeit eine Energiewende unter Verzicht auf Kernkraft und fossile Energieträger und der Wunsch nach einer aktiven Beteiligung an dem Prozess. Bspw. wurden vermehrt Öko-Strom Verträge abgeschlossen (Osterndorf 2014).

Neben dem Ausbau der Stromerzeugung sollte, laut einer Zielvereinbarung des Kreistages mit dem Landrat, zukünftig auch ein stärkerer Fokus auf die Sektoren Wärme und Verkehr gerichtet werden (Landkreis Osterholz 2014c). Im Verkehrsbereich hat die Landkreisverwaltung ihren Fuhrpark durch Elektroautos erweitert. Im Landkreis existierten 2014 drei kostenlose Elektroladestationen, sieben weitere sollten folgen (Schön 2014). Anfang 2014 wurde eine Stromtankstelle im Kreishaus installiert und Elektrofahrzeuge angeschafft, welche im Dienstbetrieb verwendet werden (vgl. I-OHZ1: 12).

Im Wärmebereich existieren drei Nahwärmeversorgungssysteme auf der Basis von Biogas. Des Weiteren bietet der lokale Energieversorger Stadtwerke Osterholz Contractingangebote im Wärmebereich an und unterstützt u.a. bei der Umrüstung auf Gasthermen. Im Speicherbereich werden Privathaushalten Elektrospeicher zur Speicherung von Photovoltaikstrom angeboten (Landkreis Osterholz 2014c).

Im Zuge der EEG-Novellen 2012 und 2014 mit ihren geänderten Vorgaben, wie der Limitierung von Ausbaukorridoren, sinkenden Einspeisevergütungen und Verpflichtungen zur EEG-Umlage, kam es jedoch zu einer Stagnation des Ausbaus u.a. im Biogas- und Photovoltaikbereich. Des Weiteren verursachten die ständigen Anpassungen der gesetzlichen Rahmenbedingungen eine zunehmende Verunsicherung der Akteure:

„…neue gesetzliche Rahmenbedingung, die da geschaffen wurden, die haben halt keine Verlässlichkeit provoziert. Die haben halt immer wieder Probleme gehabt, weil sie sich an neue Rahmenbedingungen anpassen mussten und dadurch hat es da Verzögerungen gegeben“ (I-OHZ6: 15).

Da zu Beginn der Energiewendeaktivitäten in OHZ stark auf die gewinnorientierte Stromeinspeisung gesetzt wurde, hatten die EEG-Reformen für den LK OHZ erhebliche negative Folgen. Auf Grund der Entwicklung im Solarsektor – niedrigere Vergütung und Verpflichtung eines Anteils von 10% an Eigenverbrauch - wurde im Landkreis zunehmend auf Windenergie gesetzt. Der Bau und Betrieb von Windkraftanlagen ermöglichte auch nach der Novellierung 2014 ein attraktives Geschäftsmodell für die Produktion von großen Mengen an günstigem grünem Strom.

In den letzten Jahren waren jedoch vermehrt kritische Stimmen zur Verschlechterung der EE-Ausbaubedingungen zu vernehmen. So haben Negativschlagzeilen in den Medien insb. bzgl. der gesunkenen EEG-Vergütungssätze und der Verpflichtung zur EEG-Umlage nach dem Inkrafttreten des EEG 2012 die ursprüngliche Hochstimmung zur Energiewende deutlich gedämpft. Viele der Bürger des LK nahmen den Ausbau von EE als nicht mehr wirtschaftlich wahr. Der Vertrieb bspw. von PV-Anlagen an Privatkunden wurde damit zunehmend schwieriger.

„…die meisten Endkunden denken, Photovoltaik lohnt sich nicht mehr“ (I-OHZ5: 62).

Als Reaktion auf die Ausweisung der vergrößerten Windvorranggebiete in 2011 hatten sich darüber hinaus im Landkreis fünf Bürgerinitiativen formiert, die gegen die Ausbaupläne vorgehen (I-OHZ1: 14). Diese Proteste richteten sich den Akteuren zufolge nicht gegen die Nutzung von Windkraftanlagen per se, sondern speisten sich aus der Angst vor der Wertminderung des eigenen Grundstücks, vor Lärmbelästigungen und negativen Landschaftsveränderungen (I-OHZ6: 46-49). Dieser unerwartete Widerstand der Bevölkerung führte bei den Protagonisten des Ausbaus der regionalen Selbstversorgung zu erhöhtem Aufwand und zeitlichen Verzögerungen der Energiewende in OHZ (I-OHZ1: 14). Ein Protagonist bezeichnete diese Proteste als gängiges Phänomen und „not-in-my-backyard-Syndrom“ (I-OHZ1: 43). In direkten Gesprächen mit den Anwohnern konnten immerhin Kompromisse gefunden werden, indem die Abstände der Anlagen zu Wohngebieten vergrößert wurden. Zwei der vorhergesehen Gebiete sind dadurch weggefallen, während andere vergrößert werden konnten (I-OHZ1: 14).

Des Weiteren verhinderte bis 2015 ein altes Funkfeuer des Bremer Flughafens bei Paddewisch den Ausbau von einigen Windenergieanlagen bzw. blockierte deren Genehmigung (vgl. I-OHZ2: 13). Die Deutsche Flugsicherung blockierte die Bauvorhaben mit der Begründung, dass um die Funkanlage herum ein Abstand von 15 Kilometern einzuhalten sei, da die

Windräder sonst Funksignale beeinträchtigen könnten. Durch das Nachrüsten der Funkanlagen im Jahr 2015 konnte dieser Abstand jedoch auf 3 Kilometer reduziert werden, wodurch der Bau weiterer Windanlagen möglich wurde (Komesker 2015).

„…über einen langen Zeitraum, war da jetzt Stillstand angesagt, weil die Baugenehmigung aufgrund dieser Stellungnahme nicht möglich war“ (I-OHZ6: 21).

Eine geplante Roadmap, welche die Umsetzungsschritte in Richtung einer Energiewende 2030 detailliert aufzeigen sollte, konnte durch die geänderten EEG-Bedingungen nicht finalisiert werden. Damit bewirkten die EEG-Novellen insgesamt eine starke Entschleunigung des Prozesses und eine Demotivation bei den Akteuren (I-OHZ2: 45). Der Bundesregierung wurde protektionistisches Verhalten gegenüber den großen Stromkonzernen und ihrer Marktmacht vorgeworfen. (I-OHZ2: 47). Mit Auslaufen der Förderprogramme (u.a. Energiekompetenz Osterholz Anfang 2015) kam es in 2014/2015 im LK OHZ somit zu einer Entschleunigung und teilweisen Stagnation des Energiewendeprozesses.

Im Laufe des Jahres 2015 gelang es dem Landkreis Osterholz jedoch noch einmal eine Förderung im Rahmen des EU-Förderprogramms LEADER zu erhalten, die er bis 2020 in Höhe von bis zu 2,4 Mio. Euro vom Land Niedersachsen abrufen kann. Gefördert werden Projekte der öffentlichen Hand sowie von privaten Initiatoren, die sich auf eines der Handlungsfelder Klimaschutz und Energie, Regionale Wirtschaftsentwicklung, Landwirtschaft und Innovation, Demografie, Umweltschutz, Natur- und Moorschutz oder Tourismus, Kultur, Freizeit und Regionalmarketing beziehen. Geplant ist mit der Fördersumme u.a. die Energiewende Osterholz 2030 wieder voranzubringen. So wurde bereits eine Regionalmanagementstelle mit den finanziellen Mitteln eingerichtet, die dem kreisweiten Energiewendeprozess zusätzlich Schub geben soll.

Das Regionalmanagement soll auf drei Hauptthemen fokussieren, auf 1.) Förderung privater Energieeinspar- und -effizienzmaßnahmen, 2.) Verstetigung des Akteurs-Netzwerkes trotz neuer EE-Förderbedingungen und 3.) Energieberatung/-einsparung im Wärmebereich. Es soll für die Projektentwicklung und -beratung sowie für das Projektmanagement verantwortlich sein, den Gesamtprozess koordinieren und Vernetzungsarbeit leisten (Müller 2015). Unterstützung bekommt die Regionalmanagerin zum einen von dem bereits erwähnten Klimaschutzmanager. Zum anderen soll eine Energieleitstelle eingerichtet werden. Sie wird von allen im Landkreis ansässigen Gemeinden finanziert und soll diese unterstützen, indem dort u.a. gemeindeübergreifende Standards, z.B. für Energieeffizienzbestimmungen, festgelegt werden (Müller 2015). Damit ist vorgesehen, dass der Landkreis künftig die Federführung der ursprünglich von Gemeinden getragenen Energiewende OHZ 2030 übernimmt und sich die Projektkoordination- und -steuerung im Kreishaus ansiedelt, wodurch der Prozess eine Institutionalisierung erfährt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die EU-Förderprogramme, die nationalen Regulierungsentwicklungen sowie die Vorbildfunktion der Stadt Güssing mit ihrem regionalen Wertschöpfungsmodell den Energiewendeprozess im Landkreis Osterholz angestoßen und zunächst verstetigt haben. Aufgrund langfristiger Sicherheiten durch die EEG-Vergütung richtete sich der Schwerpunkt anfangs stark auf die Vermarktung von Strom und damit verbundene Geschäftsmodelle (Photovoltaik, Windkraft, Biogas). Mittlerweile ist der Ausbau von Photovoltaik rückläufig und der Energiewendeprozess im Landkreis Osterholz erfährt teilweise eine Stagnation, was nicht zuletzt auf die EEG-Novellen 2012 und 2014 und damit einhergehende EEG-Umlagebeteiligungen, strengere Eigenverbrauchsregelungen sowie zukünftige Direktvermarktungsverpflichtungen zurückzuführen ist (EEG 2012, 2014). Damit rücken Diskussionen um neue Geschäftsmodelle in den Vordergrund:

„… die Photovoltaik-Industrie liegt am Boden, da ist keiner mehr, der noch irgendwie ein paar Mark in die Hand nehmen kann.“ (I-OHZ3: 105).

6.2.2 Akteursanalyse - Beschreibung des Landkreises Osterholz

6.2.2.1 Die Akteure der Energiewende in Osterholz

Zentrale Akteure der Energiewende Osterholz 2030 sind die Gemeinden, der Landkreis, die regionalen Energieversorgungsunternehmen (Osterholzer Stadtwerke, EWE AG) und die REON AG (Vgl. I-OHZ6: 10). Eine Lenkungsgruppe welche verantwortlich ist für die Koordination und Verwaltung des Prozesses, wurde aus Vertretern dieser Institutionen gebildet (Vgl. I-OHZ6: 9). Die genannten Akteure werden im Folgenden näher beschrieben und ihr Engagement im Projekt erläutert. Des Weiteren werden die Positionen der Akteure, welche Stellung zu Möglichkeiten der Resilienzsteigerung genommen haben, erörtert und ihr individuelles Engagement und sowie ihre Zukunftsvisionen beschrieben.

6.2.2.1.1 Politik und Verwaltung

Zu Beginn des Prozesses wurde das Projekt „Energiewende Osterholz 2030“ stark kommunal getragen. Jede der elf Kommunen im Landkreis hat sich für das Projekt ausgesprochen, um sich soweit als möglich aktiv daran zu beteiligen (Vgl. I-OHZ6: 7). Die Kommunalpolitiker bzw. Bürgermeister wurden maßgeblich durch die Studienfahrt nach Güssing, dazu bewogen EE-Projekte zu unterstützen. Die politischen Akteure sahen darin eine Chance neue Quellen für die lokale Wertschöpfung zu erschließen, Klimaschutzziele zu fördern und eine Vorbildrolle in der Region einzunehmen. Der Landkreis nahm zunächst eine eher abwartende Position ein. Dies änderte sich jedoch im Laufe des Projekts, woraufhin der Landkreis einen Großteil der Koordinierungsarbeit übernahm (Vgl. I-OHZ6: 9). Antragstellungen, Genehmigungsverfahren und Projektkoordination für EE-Projekte wurden seitens der lokalpolitischen Akteure durch personelle, sowie finanzielle Leistungen unterstützt.

„…dann entsprechend immer beteiligt also nicht nur mit personeller Unterstützung, sondern tatsächlich mit 10/15.000 Euro pro Jahr oder so was haben wir da finanziell immer reingegeben zur Unterstützung des Prozesses und haben dann bestimmte Bereiche federführend […] mit übernommen“ (I-OHZ6: 12).

Weiterhin beschrieb OHZ1 die Resilienz oder Widerstandsfähigkeit als zentrale Herausforderung für den Energiewendeprozess (Vgl. I-OHZ1: 29). Nach Angaben von OHZ6 erfordere diese Herausforderung ein Umdenken in dem Prozess. Im Solarbereich müsse der Eigenverbrauch weiter forciert werden, um die Netze zu entlasten (Vgl. I-OHZ6: 68). Zusätzlich müssen durch Speichertechnologie verstärkt Puffer im System geschaffen werden (Vgl. I-OHZ1: 47). OHZ4 betonte zudem, es müsse die Verwendung von Innovationen wie Power-to-Fuel im Kontext der Resilienz weiter ausgebaut werden, vor allem im Bereich Mobilität sei zudem eine große Wertschöpfung möglich. (Vgl. I-OHZ4: 206). Um Resilienzkonzepte weiter auszubauen, sei die Unterstützung und Förderung der Verwaltung wichtig. Weiterhin müsse diese auch für Transparenz sorgen und die Thematik an den Bürger herantragen. In diesen Bereichen bestünde ein großes Potential seitens der Politik und Verwaltung.

6.2.2.1.2 Energieversorger

Die Stadtwerke Osterholz sind der größte Energiedienstleister im Landkreis. Ca. 63.000 Anwohner nutzen die Angebote der Energie- und Wasserversorgung des Unternehmens.[35] Die Stadtwerke befinden sich noch im Prozess der Rollenfindung bezogen auf die Energiewende Osterholz 2030. Der Energiewendeprozess steht jedoch maßgeblich mit der Geschäftstätigkeit der Stadtwerke vor Ort in Verbindung. Ihnen gehört das Verteilnetz. Momentan werden Contracting-Modelle vorangetrieben bezüglich der Umrüstung von Ölheizungen auf Gasthermen und PV sowie Nahwärmeprojekte (z.B. Allwetterschwimmbad in Osterholz-Scharmbeck).[36] Weiterhin bringen sich die Stadtwerke Osterholz bisher durch energiewirtschaftliches Knowhow, die Generierung der Datengrundlage und den Aufbau eines Monitorings ein (Vgl. I-OHZ7.:13-15). Über die Lenkungsgruppe wird die Expertise der Stadtwerke im Bereich der Energieerzeugung in die Planung, Verabschiedung sowie Umsetzung von Projekten einbezogen. Die Datenbeschaffung und das Monitoring der fluktuierenden Energieerzeugung sind, insbesondere im Bereich Wärme große Herausforderungen, welche in Zukunft von den Stadtwerken bewältigt werden müssen.

Nach Angaben von OHZ5 sollte den Stadtwerken ebenfalls bei der Gestaltung eines resilienten dezentralen Systems eine elementare Rolle zukommen, indem sie den Strom nicht nur

[35] Unternehmensportrait. (o.J.). Zugriff am September 06, 2016, von https://www.osterholzer-stadtwerke.de/unternehmen/portrait/

[36] Brand, U. (2015). *Protokoll Austausch OHZ vom 26.08.2015*. Universität Bremen

vertreiben, sondern auch das Management von Angebot und Nachfrage mittels Speichermedien übernehmen.

„… am besten noch gemanaged von den Stadtwerken Osterholz, dann haben die auch eine tatsächliche Berechtigung, das heißt dann nicht nur Rechnung schreiben und Strom verwalten, sondern hier an der Stelle auch wirklich managen: so du produzierst Strom, ich speicher dir den, und für das Speichern nehme ich das Geld. […] ich sehe nicht, dass in jedes Haus ein Kurzzeitspeicher gehört. Ich sehe, dass auf jedes Dach eine Photovoltaik-Anlage gehört“ (I-OHZ5: 184-188).

Die Stadtwerke wiederum verwiesen im Rahmen des Themas Resilienz auf die Komplexität eines Energiesystems, welches durch viele Einflussfaktoren geprägt sei und betonten, dass blinder Aktionismus des Problems dem Ausgleich von Angebot und Nachfrage nicht gerecht würde (Vgl. I-OHZ7 et al.: 7). Zudem betonten sie, dass momentan kein Bedarf an einer Steigerung der Resilienz bzw. Versorgungsicherung bestünde und derzeit kein Speicher gewinnbringend betrieben werden könne (OHZ-WS1). Ihrer Netzausbaupflicht auf Grund des EE-Ausbaus seien sie bereits nachgekommen. Das Unternehme arbeite sowohl am Netzausbau bzw. seiner Verstärkung als auch an der Umsetzung von Smart Grids. Dies ermögliche eine Optimierung und Überwachung der miteinander verbundenen Bestandteile des Energiesystems und damit die Sicherstellung eines zuverlässigen und effizienten Systembetriebes.

Insgesamt jedoch kann festgehalten werden, dass die Stadtwerke ihren Fokus weniger in einer möglichen Koordinatorenrolle oder als regionaler Gestalter im Kontext der Energiewende sehen. Sie legen Wert auf eher spotmarktorientierte Geschäfte und einen möglichst kostengünstigen Stromeinkauf.

Als fünftgrößtes Energieversorgungsunternehmen in Deutschland mit Unternehmenssitz in Oldenburg operiert die EWE AG in der Weser-Ems-Elbe-Region, in Bremen und Brandenburg sowie auf der Ostseeinsel Rügen, in Westpolen und in der Türkei (Brand 2016). Das Geschäftsspektrum des Konzerns umfasst die Bereiche Strom, Erdgas, Telekommunikation und Informationstechnologie. EWE ist neben den Osterholzer Stadtwerken der zweitgrößte Energielieferant im Landkreis.

Zu den Energieerzeugungsanlagen der EWE AG in Norddeutschland zählen zwei Offshore-Parks, Photovoltaik-Anlagen, mehrere Erdgasspeicher, ein Wasserkraftwerk in Oldenburg, mehrere Biogasanlagen sowie ein Ortsnetzspeicher in Altenoythe. Laut Angabe der EWE liegt der Anteil von Strom aus erneuerbaren Energien in ihrem Netz bereits bei über 75% (EWE 2016b).

Die zukünftige Strategie der EWE AG orientiert sich an den sogenannten zehn BULLENSEE-THESEN, die im Jahr 2006 in Kooperation mit Wissenschaftlern entwickelt wurden (Böhringer

et al. 2010). Diese Thesen beinhalten u.a. Ziele wie die effiziente Nutzung fossiler Energieträger, den Ausbau der erneuerbaren Energien, die Effizienzsteigerung bei der Energiebereitstellung, die Optimierung der Einsparung bei der Energieanwendung/-nutzung sowie einen Mix aus einem europäischen Supergrid und dezentraler Erzeugung (Brand 2016). Aufgrund der steigenden Einspeisung von fluktuierenden erneuerbaren Energien spielt auch das Thema Versorgungssicherheit eine zunehmende Rolle bei der EWE. Sie soll laut Thesen durch die Einführung eines Lastmanagements (u.a. durch Einsatz von IKT), die Weiterentwicklung der Netz- und Stromerzeugungsstrukturen sowie die Realisierung von Speichermöglichkeiten für den Regelenergiebedarf erreicht werden (Böhringer et al. 2010). In der sog. E^3-Formel werden die zehn BULLENSEE-Thesen schließlich zu drei Kernzielen zusammengefasst, welche den Ausbau von erneuerbaren Energien, die Energieeinsparung auf Konsumentenseite und die effiziente Energieerzeugung umfassen.

Von 2015 bis 2016 wurden 19 neue Windkraftanlagen auf dem im Jahre 2011 ausgewiesenen Vorranggebiet im Landkreis Osterholz im EWE Netzgebiet installiert. Unter anderem bietet das Unternehmen auch Contracting-Modelle[37] für Stromspeicher an und forciert Verkaufsmodelle, bei denen der Eigenverbrauch in Kombination mit Speichertechnologien im Vordergrund steht. Lediglich der überschüssige Strom wird ins Netz eingespeist (Vgl. I-OHZ6: 68). Vertreter der EWE merkten an, dass Gewerbegebiete und Windanlagen, welche nah beieinander gebaut werden, eine autarke Einheit mit eigenem Netz und eigener Steuerung bilden könnten. Somit könnten Abgaben gespart und die Resilienz erhöht werden (OHZ-WS1). Das Unternehmen sei aber mit seinem Anteil an Erneuerbaren Energien bereits heute schon über dem Ziel der Bundesregierung für 2050 und könne eine hohe Versorgungsicherheit garantieren. Das Thema Resilienz als Leitkonzept erscheint für den Netzbetreiber als derzeit noch nebensächlich. Bei 3 Minuten Stromausfall pro Jahr pro Kunde im Netz der EWE könne eine mangelnde Akzeptanz für eine weitreichende Auseinandersetzung mit dem Thema beobachtet werden (WS-OHZ1). Um z.B. eine Insellösung erfolgreich umzusetzen, fehlen auf regionaler Ebene zudem Messwerte und Daten zu den Energieflüssen im Landkreis (WS-OHZ1). Vertreter der EWE verwiesen aber darauf, dass mit Blick auf Stromausfallszenarien und mögliche Kaskadeneffekten bereits mit dem Landkreis Überlegungen angestellt wurden, wie diese verhindert werden können. So wird darüber nachgedacht, inwieweit selektive Abschaltungen dazu beitragen können einen Totalausfall zu vermeiden (WS-OHZ1).

6.2.2.1.3 Wirtschaft und Projektierer

Die REON AG, welche den Anstoß für das Projekt „Energiewende Osterholz 2030“ lieferte, fungiert als direkter und privater Partner. Als Teil der John Becker Gruppe ist das Unternehmen, zuständig für Projektentwicklungen im Bereich Regenerative Energien und entwickelt

[37] Brand, U. (2015). *Protokoll Austausch OHZ vom 26.08.2015*. Universität Bremen

Konzepte für Kunden im In- und Ausland. Der Schwerpunkt des Unternehmens liegt bei der erfolgreichen Umsetzung von Windparks. Bis zum Jahr 2013 war die REON AG offizieller Partner im Rahmen des EU-Projektes „Energiewende Osterholz 2030“ und hat bestimmte Studienleistungen, bzw. ingenieurtechnische Planungsleistungen mit übernommen (Vgl. I-OHZ2: 5). Des Weiteren wurde berichtet, dass das Unternehmen eigene Windkraftanlagen in den ausgeschriebenen Gebieten errichten wird (Vgl. I-OHZ6: 41).
Ausschlaggebend für das Engagement der REON AG war der Wunsch ein Projekt vor Ort anzustoßen, welches als wichtiger Treiber für den Prozess wirken sollte (Vgl. I-OHZ2: 5). Herr Becker verfolgte die Vision, den Landkreis nicht nur bilanziell von Energieimporten unabhängig zu machen, sondern komplett autark, sprich ein Energiesystem auf Landkreisebene zu schaffen, welches unabhängig von supra-regionalen Netz und Stromimporten wäre.
Im unternehmerischen Sinne wurde in den Interviews ausgeführt, dass die direkten ökonomischen Anreize für das Unternehmen weniger relevant waren, als vielmehr das Sammeln von Erfahrungen und Referenzen in dem Bereich (Vgl. I-OHZ2: 5).
Mit Bezug auf das Thema Resilienz hob OHZ2 die Komplexität der Versorgung hervor, weswegen er eine Insellösung auf dezentraler Ebene ablehne. Ein Inselsystem sei nicht in der Lage für ein stabiles Netz im weiteren Umfeld zu sorgen, wenn aus vorgelagertem Netz Strom dazugegeben werden soll. Um ein ressourcenschonendes System zu implementieren, sei der Anschluss an das überregionale Netz und seien Lösungsansätze auf der überregionalen Ebene unabdingbar.

„Also ich gehe davon aus, dass es unter Resilienz-Gesichtspunkten immer sinnvoll ist ein überregionales Netz zu haben.“ (I-OHZ2: 82)

„Vollständige Autarkie ist aus meiner Sicht sowohl volkswirtschaftlich als auch technisch Unsinn. Weil man einfach […] viel mehr Ressourcen aufbringen, wenn man ein kleineres Netzwerk hat, um sicher zu stellen, dass man die Energieversorgung auch sicherstellt.“ (I-OHZ2: 71).

Regionale Zellen seien aus politischer Sicht sinnvoll aber aus technischer Sicht unlogisch. Um eine geringe Vulnerabilität zu erreichen, solle jedoch der lokale Handlungsspielraum ausgenutzt werden.

Weiterhin stellt OHZ2 den Sinn von Resilienz als Gestaltungsleitbild in Frage. Jeder Akteur würde sich lediglich auf eine für ihn relevante Systemdienstleistung konzentrieren. Eine gemeinsame Absprache der Akteure wäre nötig, bei der diese sich von bestimmten Marktmodellen lösen (WS-OHZ1).

Ein Unternehmen ist spezialisiert auf den Erneuerbare Energien Sektor. Seine Kernkompetenzen sind die Installation, Wartung, sowie Überwachung von Photovoltaik-Anlagen, Stromspeichern und Infrarotheizungen. Die Firma hat derzeit ca. 1.600 Referenzanlagen vorzuweisen und betreibt davon 45 selbst. Es hat seinen Sitz ist Ritterhude bei Bremen (Niedersachsen).[38]

„Ich schlage Projekte vor, was man wie machen könnte und mache Pressearbeit auch entsprechend. Zeige den Leuten auf, Jungs also das müssten wir mal machen, das müssten wir mal.“ (I-OHZ3: 19).

Zudem treibt OHZ3, als Experte für die Installation von Solartechnologien aktiv entsprechende Projekte in Ritterhude voran, wie etwa die Installation von Photovoltaikanlagen auf öffentlichen Gebäuden und die Nutzung von Speichertechnologien. Somit bringt er sich auch in Entscheidungsfindungsprozesse mit ein und liefert das nötige Datenmaterial für Projektplanungen.

OHZ3 nimmt eine etwas konträre Position zu OHZ2 ein. Dieser ist der Überzeugung die lokale Energieerzeugung sei essenziell für das Voranschreiten der Energiewende, sowie einer Steigerung der Resilienz auf bundesweiter Ebene. Durch eine höhere Diversität und den Aufbau zellulärer Systeme könne auf Bundesebene auf Dauer eine größere Versorgungssicherheit garantiert werden. Dabei komme der Solarenergie als bevorzugtem Instrument der dezentralen Energieerzeugung eine besondere Rolle zu. Durch Aufklärung, den Vertrieb von Direktverbrauchsanlagen und entsprechender Speichertechnologien, soll ein höherer Grad an Autarkie erreicht werden.

„Der Kunde der jetzt kommt ist ein Neukunde, und […] Speicherkunde. Also das hat sich bei uns rumgesprochen, dass wir keine Anlagen mehr brauchen ohne Speicher, fass ich nicht mehr an. Macht ja auch keinen Sinn. Was soll ich mit einer Anlage, die nur noch ins Netz einspeist. Machen wir nicht. Und da sind wir ziemlich erfolgreich.“ (I-OHZ3: 131).

„…weil wir ja seit […] Jahren aktiv die Speichergeschichte vorantreiben, ich hab knapp 800 Beratungsgespräche geführt“ (I-OHZ3: 135).

Den erzeugten Strom zur Wärmeversorgung zu nutzen sei ebenfalls relevant. Einfamilienhausbesitzer sollen mit allen Konsequenzen zum Energieversorger gemacht werden und OHZ3 sieht einen zukünftigen Trend in Richtung Nullenergiehäuser. OHZ3 hat bereits kleine Zellen bezogen auf solche Mehrfamilienhäuser realisiert, in denen alle Energieflüsse gemessen und kontrolliert werden können (WS-OHZ1).

Des Weiteren betont OHZ3, dass Probleme hinsichtlich der Belastung der Netze auf lokaler Ebene gelöst werden müssen, durch die Errichtung lokaler Bilanzkreise, in denen netzdienliches Verhalten vergütet wird (WS-OHZ1). Eine Resilienzsteigerung sei seiner Meinung nach nur möglich, wenn die Zahl der Prosumer und dezentralen Erzeuger steige (WS-OHZ1). OHZ3

[38] Das Unternehmen. (o.J.). Zugriff am September 06, 2016, von http://www.laudeley.de/index.php/unternehmen/

sieht ein stärkeres Engagement der Stadtwerke in dem Prozess als essenziell an. Diese müssten ein stabiles Netz garantieren und ein verlässliches Konzept ausarbeiten, in das z.B. ein Quartierspeicher integriert werden könne (WS-OHZ1).

SEN ist ein Handwerksbetrieb und Installationsunternehmen welches in der Solarbranche tätig ist. SEN wurde 1986 unter dem Namen Osmer Elektrotechnik gegründet. 1990 wurde im Rahmen des 1.000-Dächer Programms die erste netzgekoppelte Solarstromanlage gebaut. Im Jahr 2000 der Bereich Elektrotechnik ausgegliedert und der Fokus der Firma auf den Vertrieb von Photovoltaikanlagen gelegt. Die SEN-Firmengründer sind Klaus-Dieter Osmer und Jeannette Osmer.[39] In der Energiewende Osterholz 2030 fungiert die Firma als privater Partner und der Geschäftsführer gilt als Pionier im Bereich der Photovoltaik und starker Promotor zu Beginn der regionalen Initiative. Das Unternehmen wird häufig als Kompetenzzentrum für Informationen in Bezug auf unterschiedliche Technologien genutzt und gestaltet gelegentlich Marketingkampagnen mit:

„wir werden häufig als Kompetenzzentrum genutzt, das heißt, wenn es dann um unterschiedliche Technologien geht, wenn es um Sinnhaftigkeit mancher Entscheidungen geht, wenn es dann darum geht, eventuell Marketingkampagnen mitzugestalten“ (I-OHZ5: 19).

In Bezug auf das Thema Resilienz betont OHZ5 ebenfalls den zukünftigen Stellenwert von Speichertechnologien. Vor allem die Implementation von Langzeitspeichern und die Vernetzung lokaler Gebiete mit Kurzeitspeichern seien essenziell. Einen Problemlösungsansatz, welcher auf vereinzelten Kurzeitspeichern in Einfamilienhäusern basiert, lehnt dieser Akteur ab (Vgl. I-OHZ5: 188).

„… wir müssen auf lokaler Ebene, also sprich Industriegebiet oder größere Wohngebiete zu einer Einheit zusammenfassen und dort einen Kurzzeitspeicher eventuell installieren, dass eben halt punktuell und äh viel wichtiger ist es ein Langzeitspeicher in irgendeiner Art und Weise noch in den Landkreis zu bekommen, sei es Power-to-Gas oder ähnliches“ (I-OHZ5: 182).

Bei dem Monitoring und Management solcher Anlagen müsse den Stadtwerken eine zentrale Rolle zugeschrieben werden.

6.2.2.1.4 Kooperationen mit Wissenschaftlichen Institutionen

Der Landkreis Osterholz kooperiert mit der Jade-Hochschule Wilhelmshaven, welche als Lead-Partner für das Interreg Projekt fungiert, in welchem die Nutzung von Wasserstoff im Transportsektor untersucht wird (Vgl. I-OHZ4: 59).

[39] SEN Solare Energiesysteme Nord. (o.J.). Zugriff am September 06, 2016, von http://www.sen.eu/de/Über_SEN

Im Weiteren wurden mehrere Forschungsprojekte mit der Universität Bremen durchgeführt, wie z.B. Nordwest2050 oder das Projekt Resystra.

Die Osterholzer Stadtwerke haben im Weiteren an einem Projekt zu Geschäftsmodellen von Smart Grids, welches von Wissenschaftlern der Leuphana Universität in Lüneburg durchgeführt wurde, beteiligt.

6.2.2.1.5 Handwerker

Zu Beginn der Initiative hatten sich bereits viele Unternehmen und Handwerksbetriebe im Landkreis aufgrund monetärer Anreize neben ihrem Kerngeschäft den regenerativen Energien gewidmet und aktiv an einer Energiewende beteiligt. Sie waren bei Messen und Veranstaltungen auch im Umland stark vertreten. Vom Einbruch des Photovoltaik-Marktes waren dann vor allem Handwerker und Installateure betroffen, was sich wiederum in einer Abnahme ihrer Motivation und ihres Engagements deutlich widerspiegelte. Im Landkreis hat sich eine Energieberatung etabliert, die aus neun ehrenamtlichen Mitgliedern besteht, welche als Verbindung zwischen kreisgetriebener Energiewende und den Bürgern fungieren sollte (Transmissionsriemen). Es wurden jedoch Bedenken über die grundsätzliche Motivation des Netzwerks geäußert, inwiefern dort übergeordnete Energiewende-Ziele tatsächlich verfolgt werden. Die künftige Beteiligung von Unternehmen und Handwerkern wird von der Generierung neuer Geschäftsmodelle abhängen, ist jedoch aufgrund seiner Nähe zum Bürger sehr wichtig (Osterndorf 2014).

6.2.2.1.6 Europäisches Institut für Innovation e.V. (EiFI)

Das Europäische Institut für Innovation (EiFi) ist ein Verein mit Sitz in Osterholz-Scharmbeck. Der Leiter des EiFis war bis 2015 als Projektkoordinator gemeinsam mit dem Landkreis die treibende Kraft beim Projekt Energiewende OHZ 2030. Dabei hat der Verein eine moderierende Rolle in Teilprojekten und den Aufbau von Kooperationen übernommen. Die berufliche Erfahrung des Projektkoordinators als EU-Berater hatte die Suche und Einbettung in EU-Förderprojekte erleichtert, und somit für einen schnellen Projektstart und stetige Teilfinanzierung gesorgt. Es wurden dabei zahlreiche, hauptsächlich durch die EU finanzierte Projekte, im Rahmen von INTERREG, Efre und ESF durchgeführt.

Zum Ende des Projektes Energiewende OHZ 2030 ist die Rolle des Vereins im Rahmen des regionalen Energiewendeprozesses offen. Als neues offizielles Hochschul-Institut besteht Potenzial, dass der Verein seinen Schwerpunkt künftig auf die Ausbildung, Ausgestaltung von Kooperationsprojekten und Netzwerkaufbau im Bereich Forschung und Entwicklung setzen wird sowie weiterhin eine Managementrolle im Energiewende-Prozess abgibt.

6.2.2.1.7 Energieberaternetzwerk ENERKOM-OHZ

Im Landkreis OHZ haben sich hauptberufliche Energieberater, Ingenieure, Architekten und Handwerksmeister zusammengeschlossen und 2011 das Energieberaternetzwerk ENERKOM-OHZ gegründet. Das Netzwerk bietet Bürgern des Landkreises Osterholz Dienstleistungen an im Bereich des energiebewussten Bauens und Sanierens (u.a. Energieberatung). Dabei stehen Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit der möglichen Umsetzungsalternativen im Vordergrund. Die Mitglieder des Netzwerkes arbeiten kooperativ zusammen und ergänzen sich durch unterschiedliche Ausbildungswege, Qualifikationen und Erfahrungswerte. Gemeinsam vereinbarte Qualitätsstandards und die gemeinsame Teilnahme an Weiterbildungsmaßnahmen sichern dabei die Qualität der angebotenen Dienstleistungen. Unterstützt wurde das Netzwerk im Rahmen des von 2012 bis 2015 durchgeführten Projektes „Energiekompetenz OHZ“, da in der Energieberatung von Endkunden als potenziellen Investoren ein wichtiger Beitrag zur Nachfragesteigerung im Marktsegment energetische Sanierung gesehen wurde. Im Rahmen des Projektes wurden bspw. gemeinsame Weiterbildungen für das Netzwerk veranstaltet, Öffentlichkeitsarbeit und PR-Arbeit geleistet sowie gemeinsame Sanierungsprojekte umgesetzt (Osterndorf 2014).

6.2.2.1.8 Bürgerbeteiligung

Neben der Installation von privaten Solaranlagen ist die aktive Bürgerbeteiligung an Projekten der Energiewende in Osterholz sehr gering. Die Windkraftanlagen befinden sich zum größten Teil in der Hand von privaten Investoren und die Biogasanlagen in der Hand von Landwirten (Vgl. I-OHZ1: 10). Teilweise wurden die Anwohner durch einzelne Initiativen in Projekte mit einbezogen, wie die Errichtung eines Bürgersolardachs, oder den Verkauf von Anteilen an Solaranlagen. Eine verstärkte Bürgerbeteiligung, sowie die Errichtung von Bürgerwind- und Solarparks wird zwar weiterhin nicht ausgeschlossen, konnte jedoch bisher nicht umgesetzt werden (Vgl. I-OHZ6: 127). Für die Gemeinde Lilienthal befindet sich ein Bürgersolar-KW in Planung (Osterndorf 2014). Des Weiteren wurde der Versuch unternommen, die Projekte transparent zu gestalten und Informationen an die Bürger weiterzuleiten, z.B. durch die Verbreitung eines regelmäßig erscheinenden Energiejournals (Vgl. I-OHZ4: 91). Gleichwohl wurde festgestellt, dass die Bürgereinbindung insgesamt nicht wirklich gelungen ist.

Im Laufe des Energiewendeprozesses stellte sich heraus, dass zwar Öffentlichkeitsarbeit für die Bevölkerung durch verschiedenste Imagekampagnen geleistet wurde, dass darüber hinaus die Bürger jedoch nicht merklich in den Prozess der Energiewende integriert werden konnten. Hinzu kamen zunehmend mediale Negativschlagzeilen in Verbindung mit den Auswirkungen der EEG-Novelle.

Zentrale Akteure im Energiewendeprozess bemängelten fehlendes Interesse seitens der Bürger. Der fehlende Nachwuchs stelle zudem ein zentrales Problem für die zukünftige Entwicklung der Energiewende dar. Auch das Thema Resilienz findet wenig Aufmerksamkeit in der lokalen Bevölkerung. Es bestünde keine Notwendigkeit sich mit dem Thema auseinander zu setzen, da die Rate an Stromausfällen sehr gering ist und der Kunde die Problematik noch gar nicht sehen könne.[40] OHZ3 kritisiert in diesem Zusammenhang eine fehlende Initiative der Stadtwerke, welche als Vertrauensträger mit einer guten Kundenbindung eine stärkere Aufklärungsarbeit leisten müssten.[41]

6.2.3 Leitorientierungsanalyse im Landkreis Osterholz

In Kapitel 4.2 wurde der Analyserahmen dargestellt, mit dessen Hilfe die Orientierungsprozesse im Rahmen der Fallbeispiele untersucht werden sollen sowie ein erstes Maßnahmenpaket für die Prozesse einer leitorientierten Systemgestaltung und Transformation. In der Vorbereitung auf die Darstellung der erzielten Erkenntnisse sollen diese noch einmal kurz zusammengefasst und für die Fallstudien Osterholz und Wolfhagen in Form von Untersuchungszielen konkretisiert werden:

- Um die Wirksamkeit von Leitorientierungsprozessen und der in ihnen formulierten Leitkonzepte überprüfen zu können, kommt es darauf an empirische prozessbegleitende Studien mit reaktiven Methoden durchzuführen.
- Zunächst wurden gemäß der Annahme, dass propagierte Leitkonzepte und Gestaltungsleitbilder besonders dann wirksam werden, wenn sie Bezüge zu bereits verinnerlichten Leitorientierungen aufweisen, in beiden Regionen existierende energiesystembezogene Leitorientierungen empirisch erhoben (Vorhandene Leitorientierungen, Kapitel Kapitel 6.2.3.1). Diese wurden dann in die zu entwickelnden Gestaltungsleitbilder integriert (vgl. Regionale Gestaltungsleitbilder Kapitel 6.2.7)
- Inwiefern die Leitorientierungsprozesse mit ihrem kommunizierten Leitkonzept Resilienz und den erarbeiteten Gestaltungsleitbildern schließlich auf Resonanz bei den regionalen Akteuren treffen und sogar handlungsleitend werden konnten, wurde im Rahmen der Leitorientierungsanalysen erhoben (Wirksamkeit der Leitorientierungsprozesse, Kapitel 6.2.3.2 und Kapitel 6.2.3.3).
- Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde untersucht, welche Faktoren bei den Leitorientierungsprozessen in Osterholz und Wolfhagen zum Erfolg (Wirksamkeit) oder eben Misserfolg geführt haben. Hierbei wurde unterschieden zwischen inhaltsbezogenen und prozessbezogenen Wirksamkeitsfaktoren (vgl. Kapitel 4.2).

[40] Brand, U. (2015). *Protokoll Austausch OHZ vom 26.08.2015*. Universität Bremen

[41] Protokoll des Resystra Workshops vom 04.12.2015: *Resiliente Energieversorgung im LK OHZ.*

- Die in den Regionen vorfindbaren Energiesysteme befinden sich in unterschiedlichen Entwicklungsstadien auf ihrem Weg zur Selbstversorgung auf der Basis erneuerbarer Energien (Fokus auf Elektrizität). Da diese regionalen Gegebenheiten einen erheblichen Einfluss auf die Möglichkeiten und Grenzen einer weiterführenden leitorientierungsgestützen Systemtransformation haben, mussten Systembeschreibungen, Vulnerabilitätsanalysen sowie, als für die Grundlage für die Zukunftsszenarien, Modelle der regionalen Energiesysteme erarbeitet werden.

Im Rahmen der folgenden Ausführungen werden die Ergebnisse der Untersuchungen für die Fallstudie Osterholz beschrieben. Die Ergebnisse basieren auf den qualitativen und quantitativen Erhebungs- und Auswertungsmethoden, die in Kapitel 5 erläutert wurden.

6.2.3.1 Vorhandene Leitorientierungen

In diesem Kapitel werden die im regionalen Energiesystem des Landkreises Osterholz vorhandenen Leitorientierungen[42] beschrieben, an die ggf. mit dem Leitkonzept resilientes regionales Energiesystem und mit den entsprechenden Gestaltungsleitbildern angeknüpft werden kann. Einige dieser vorhandenen Leitorientierungen sind in die Gestaltungsleitbilder eingeflossen. In diesem Zusammenhang interessierte ebenso, ob und inwiefern diese Berücksichtigung der vorfindbaren Leitorientierungen die Wirksamkeit der Gestaltungsleitbilder beeinflussen konnte, was in Kapitel 6.2.7 näher thematisiert wird.

Das zentrale bisherige Ziel für die Umgestaltung des regionalen Energiesystems (Energiewende) im Landkreises Osterholz war die auf Elektrizität bezogene bilanzielle Selbstversorgung des Landkreises mit 100% Erneuerbaren Energien bis zum Jahr 2030 (*Bilanzielle Energieautarkie*) (Landkreis Osterholz 2016e). Dieses Ziel sollte durch den Aufbau von Erneuerbaren Energien, die Senkung des Energieverbrauchs durch Energiesparmaßnahmen und die Steigerung des Eigenverbrauchs an lokal erzeugter Energie erreicht werden (Landkreis Osterholz 2016e).

Eine weitere bedeutende Leitorientierung, welche maßgeblich zur Formulierung des Ziels Bilanzielle Energieselbstversorgung beigetragen hat, ist die Leitorientierung Steigerung der *regionalen Wertschöpfung*. Aufgrund der Tatsache, dass in der Region enorme Kaufkraftverluste durch Energieimporte zu verzeichnen waren, wurde die Erzeugung aus regionalen Energieträgern und die Umsetzung von Energiesparmaßnahmen als Option zur Erhöhung der Regionalen Wertschöpfung propagiert. Durch Energieeffizienzmaßnahmen, z.B. an Gebäuden,

[42] Im Folgenden findet keine Einordnung der in den Fallstudien erhobenen Zukunftsvorstellungen in das Dreiebenenmodell statt, da vornehmlich interessierte, welche Zukunftsvorstellungen in den Regionen existieren und weniger, auf welcher Ebene diese verortet sind. Aus Einfachheitsgründen werden die erhobenen Zukunftsvorstellungen als Leitorientierungen bezeichnet, auch wenn der übergeordnete Begriff der Leitorientierungen eigentlich alle Ebenen des Dreiebenenmodells (Weltbilder, Leitkonzepte und Gestaltungsleitbilder) umfasst; vgl. auch Kap. 4.2.1

durch eine steigende Anzahl an Energieerzeugungsanlagen in der Hand von regionalen Akteuren (z.B. private Haushalte, regionale Investoren) einschließlich ihrer Installation und Wartung durch regionale Unternehmen und Handwerker, erhoffte sich der Landkreis eine höhere Regionale Wertschöpfung.

„[...] *ich würde schon sagen, dass regionale Wertschöpfung das Leitbild ist, wo sich vor allem alle Politiker unabhängig von der Partei drauf einigen können und wo sich auch lokale Unternehmen drauf einigen können* [...]“ (I-OHZ2: 21).

„[...] *Importenergie haben wir 150 Millionen Euro und das Leitbild war immer diese 150 Millionen Euro einzusparen und der Bevölkerung die Kaufkraft dadurch zurück zu geben. Weil auch die Maßnahmen, die dazu notwendig sind, können von der örtlichen Handwerkerschaft erledigt werden*“ (I-OHZ6: 47).

Mit der forcierten *Bilanziellen Energieautarkie* intendierten viele der befragten regionalen Akteure eine *Dezentralisierung* des Energiesystems, was zumindest zu Beginn der Energiewendeaktivitäten im Landkreis Osterholz als Möglichkeit zur Abkehr von der dominierenden Oligopolstruktur der Energieerzeugung (Big 4) und zur Mitgestaltung des regionalen Energiesystems aufgefasst wurde (*Demokratisierung des Energiesystems*).

„[...] *durchaus ein Prozess* [...] *unter dem EEG zu einer stärkeren Regionalisierung von Energieerzeugung und* [...] *weg von rein Großstrukturen mit Großkraftwerken auf eine Wende dahingehend, dass jeder selbst was dazu beiträgt. Sei es auch im Bereich der Energieeinsparung aber auch im Bereich der Energieerzeugung*“ (I-OHZ1: 4).

„[...] *nicht abhängig von drei vier fünf großen Energieversorgern, sondern letztendlich mitgestalten können* [...]“ (I-OHZ6: 4).

Eine weitere bedeutende Leitorientierung betrifft die *Regionale Unabhängigkeit*. So hat eine Mehrzahl der regionalen Akteure als Motivation für ein Energiesystem basierend auf regionalen, erneuerbaren Energien die Unabhängigkeit von fossilen, endlichen Ressourcen mit steigenden Kosten gesehen.

Einige der befragten Akteure sagten darüber hinaus aus, dass sie nicht nur eine Unabhängigkeit, sondern eine *Autarkie* des Osterholzer Energiesystems anstreben (u.a. I-OHZ3). Diese Auffassung wird jedoch nicht von allen befragten Akteuren geteilt.

Ebenso konnte die im Landkreis Osterholz vorherrschende Leitorientierung *Wirtschaftlichkeit* ermittelt werden, welche eng geknüpft ist mit dem Streben nach *Regionaler Unabhängigkeit.* Denn durch die Unabhängigkeit von teurer werdenden fossilen Energieträgern und die Nutzung von eigenen, regionalen Energieträgern erhofften sich die regionalen Akteure Kosten einzusparen und damit eine höhere Wirtschaftlichkeit zu erzielen.

„Es ist ganz klar, [...]*, fossile Ressourcen sind endlich, das ist nun mal so. Das heißt, solange wir nicht in den nächsten 20 Jahren entscheiden auch noch von der Marktwirtschaft wegzukommen, werden die extrem teuer werden* [...]*. So* [...] *der gesunde Menschenverstand sagt doch, dass es sinnvoll ist, sich frühzeitig um Alternativen zu kümmern“* (I-OHZ2: 71).

Wirtschaft, Projektierer und Handwerker verbanden mit der gemeinsam initiierten Energiewende im Landkreis Osterholz zu Beginn die Möglichkeit, Zugang zu neuen Geschäftsfeldern zu erhalten, in Kontakt mit den anderen regionalen Akteuren Wissen auszutauschen und Erfahrungen zu sammeln sowie letztendlich damit eine steigende Auftragslage zu generieren. Dabei spielten auch erwartete Imagegewinne durch die Fokussierung auf erneuerbare Energien eine Rolle. Letztendlich intendierten die Akteure mit der Energiewende in ihrem Landkreis eine höhere Wirtschaftlichkeit und *Wettbewerbsfähigkeit* gegenüber konkurrierenden Unternehmen und Regionen zu erzielen. Sie waren deshalb zu Beginn durchaus dazu bereit, höhere finanzielle Mittel in die Energiewendeaktivitäten zu investieren als sie an kurzfristigem Return on Investment erwarten durften.

„Also wir stecken da mit Sicherheit mehr Arbeit rein als wir hinterher an Aufträgen wieder rausbekommen. Sondern man kann eher sagen, wir sammeln Erfahrungen und Referenzen in diesem Bereich, die wir dann woanders einsetzen können und weniger, dass es sich für uns jetzt direkt wirtschaftlich auszahlt“ (I-OHZ2: 5).

Es ist zu vermuten, dass dieser Finanzierungswille auch mit dem Heimatbezug regionaler Akteure (Handwerker und Projektierer) in Verbindung steht und mit einer persönlichen Umweltschutz- und Nachhaltigkeitsorientierung zu erklären ist.

„[Energiewende] *bedeutet letztendlich nichts anderes, als dass wir in der Lage sind irgendwann dieses Land und auch vielleicht die ganze Welt auf solche Beine zu stellen, dass wir mit allem was wir an Ressourcen benötigen, letztendlich komplett recyclefähig sind, das heißt also, dass wir einen hundertprozentigen Recyclingprozess haben, dass wir also an der gesamten Umwelt keinen einzigen Schaden mehr anrichten“* (I-OHZ3: 11)

Neben den eben aufgezeigten eher ökonomisch geprägten Leitorientierungen spielte im Landkreis Osterholz somit auch der Beitrag zum *Klima- und Umweltschutz* sowie der *Nachhaltigkeitsgedanke* im Sinne der *Generationengerechtigkeit* eine Rolle.

„[...] *weil ich persönlich glaube, dass die Energiewende ein Generationenthema ist, und* [...] *das macht eigentlich auch noch mal die Komplexität klar, dass es nicht von heute auf morgen geht. Und dieser Ruf nach einem Masterplan zur Energiewende, den ich ja als sehr menschlich nachvollziehbar erachte, den gibt es aber nicht, weil das Thema viel zu komplex ist“* (I-OHZ7: 7)

Hervorzuheben bleibt jedoch, dass die Transformation des Osterholzer Energiesystems bislang stark von ökonomisch geprägten Leitorientierungen wie *Regionale Wertschöpfung* und *Wirtschaftlichkeit* bestimmt war. Der Fokus wurde seitens des Landkreises bewusst auf diese Leitorientierungen gerichtet, um Akzeptanz für die Energiewende zu schaffen.

„Energiewende [...] *letztendlich ist ja jeder davon betroffen. Ist ja einmal der ökologische Ansatz, Stichwort Klimawandel, Erderwärmung, wo halt drauf geachtet werden muss, in allen Bereichen möglichst den CO_2-Ausstoß zu vermeiden, das ist der eine Ansatz. Dann ist aber auch ganz wichtig, denn nur damit kriegt man die Leute auch mit, der ökonomische Ansatz. Einmal steht fest, dass die fossilen Energieträger teurer werden* [...] *haben wir in den letzten Jahren schon festgestellt, und das wird sich weiter so entwickeln. Und wenn wir in der Lage sind die Energie, die wir brauchen, hier vor Ort zu erzeugen, haben wir natürlich auch noch im Bereich Wertschöpfung einiges getan“* (I-OHZ6: 2-4).

6.2.3.2 Wirksamkeit des Leitorientierungsprozesses

Inwiefern die im Landkreis Osterholz im Rahmen des Projekts Resystra initiierten Leitorientierungsprozesse tatsächlich wirksam werden konnten, war ein zentrales Thema im Rahmen der Leitorientierungsanalyse. Zum besseren Verständnis soll noch einmal daran erinnert werden, dass die Wirksamkeit von Leitorientierungsprozessen bzw. darin kommunizierter Leitkonzepte und Gestaltungsleitbilder in zwei Stufen analysiert werden sollte (vgl. auch Kapitel 4.2). Von einer Wirksamkeit kann dann ausgegangen werden, wenn die Leitkonzepte und Gestaltungsleitbilder auf Resonanz treffen (erste Stufe). D.h. sie haben eine Relevanz für die Adressaten. Eine noch höhere Wirksamkeitsstufe liegt dann vor, wenn die Leitkonzepte bzw. Gestaltungsleitbilder auch handlungsleitend werden, d.h. es besteht eine Bereitschaft sie umzusetzen, oder sie werden tatsächlich umgesetzt (vgl. auch Brand 2016).

Zudem muss betont werden, dass die Wirksamkeiten im Rahmen des Projektes RESYSTRA nur über einen kurzen Zeitraum, nämlich die Anstoß- und Spezifizierungsphase des Leitorientierungsprozesses erhoben werden konnte. Um eine längerfristige Wirksamkeit untersuchen zu können, müssten weitere empirische Erhebungen über diese Phasen hinaus vorgenommen werden, was aufgrund der terminierten Projektlaufzeit nicht möglich war.

Im Landkreis Osterholz wurde die Relevanz des Leitkonzeptes *Resilientes System* bzw. *Resilientes Energiesystem* von den regionalen Akteuren unterschiedlich wahrgenommen, jedoch sind Grundtendenzen zu erkennen. Blickt man zunächst auf die wahrgenommene Bedeutung des Begriffes Resilienz, dann fiel bei den Untersuchungen auf, dass der Begriff nicht in seiner Gesamtheit, so wie er vom Projektteam definiert wurde, wahrgenommen wurde. Die befragten regionalen Akteure verbanden mit Resilienz bezogen auf den Energiebereich zunächst vor allem Versorgungssicherheit oder einzelne Gestaltungselemente wie Speicher, Inselnetze o-

der Sektorkopplung (z.B. Power-to-Gas), weniger jedoch Fähigkeiten wie Widerstands-, Anpassungs-, Innovations- und Improvisationsfähigkeit in ihrer Gesamtheit im Sinne einer erweiterten Versorgungssicherheit bzw. Vorsorge auch gegenüber unbekannten und unerwarteten Störereignissen (OHZ-WS1). Nur wenige Akteure fassten das Resilienzkonzept ganzheitlicher auf.

„Also genau ihr Projekt, wenn man so will, wenn man mal einen Begriff aus [...] *der Klimaforschung* [...] *da gibt´s ja diesen schönen Begriff Resilienz, also* [...] *widerstandsfähig zu sein, ja, oder auch anpassungsfähig zu sein, wenn ich so will und das wird aus meiner Sicht genau eine Herausforderung für die Energiewendeprozesse“* (I-OHZ1: 29).

Der Resilienzbegriff drehte sich in den Diskussionen mit den regionalen Akteuren vornehmlich um das Ziel der Versorgungssicherheit und deren Bedeutung für das regionale Energiesystem. Generell wurde die Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit von den Akteuren, z.B. den Energieversorgungsunternehmen, als wichtiges Ziel insbesondere mit Blick auf die steigende Einspeisung von fluktuierenden erneuerbaren Energien erachtet, welche aber bereits seit langem in der Energiewirtschaft etabliert ist. Genau bei dieser Problemstellung würde es sich anbieten Maßnahmen im Sinne der Resilienz umzusetzen, so ein Befragter.

„Aber letztendlich ist das so, […] *die Energie fällt fluktuativ an, das heißt es muss irgendeinen Zwischenspeicher geben“* (I-OHZ2: 71).

Aufgrund der auch im internationalen Vergleich ausgezeichneten Netzstabilität, trotz steigender Einspeisung, wurde von diesen Akteuren aber nicht die Notwendigkeit gesehen, Resilienzmaßnahmen zu ergreifen und umzusetzen. Auch mit Blick auf die nähere Zukunft wurden keine neuen Unsicherheiten wahrgenommen, und es erschien ihnen nicht als notwendig Maßnahmen zur Verbesserung der Versorgungssicherheit zu ergreifen. Es bestanden lediglich Überlegungen im Falle von Extremereignissen bestimmte Netzgebiete gemäß der sog. BDEW-Kaskade (BDEW 2012) abschalten zu können, was die Energieversorger und die Landkreisverwaltung gemeinsam in Workshops diskutiert haben (WS-OHZ1). Unsicherheiten im Zuge der Transformation des Energiesystems, mit Blick auf Klimawandel und anstehende Klimaschutzmaßnamen oder mit Blick auf Terrorismus waren nicht auf der Agenda. Zwei weitere Faktoren scheinen bei der Vermeidung einer Vertiefung des Themas Versorgungssicherheit eine Rolle gespielt zu haben. Von den langjährigen Aktiven in der Energiewende wurde das Thema Versorgungssicherheit seit Beginn der Energiewende vor allem als Kritik auf die ‚unsicheren‘ Erneuerbaren verstanden und somit abgewehrt. Auch von den EVUs wurde die Thematisierung von Versorgungssicherheit offenbar schnell als Angriff auf ihre bisher tatsächlich sehr erfolgreichen Leistungen interpretiert. Angesichts dieser großen Koalition hatte es eine vertiefte Thematisierung zukünftiger Gefährdungen der Versorgungssicherheit bei den genannten Akteuren offenbar sehr schwer. Dabei scheint auch die Tatsache nicht zum Tragen

zu kommen, dass in der Bevölkerung und in den Medien die Sicherheitsthematik schon seit Längerem eine immer größer werdende Rolle spielt (vgl. Kap. 1).

Das Leitkonzept Resilienz, vorrangig bei den Akteuren als Versorgungssicherheit verstanden, konnte also im Rahmen des Orientierungsprozesses zwar auf eine gewisse Resonanz treffen, jedoch nicht wirklich handlungsleitend werden. Als Gründe nannten die Energieversorger und weitere regionale Akteure neben einem fehlenden Handlungsbedarf bspw. den erhöhten Datenbedarf, die fehlende Wirtschaftlichkeit von Resilienzmaßnahmen (z.B. bei Speichern) und eine fehlende Förderung durch staatliche Regulation (siehe auch Kapitel 6.2.8).

Da ist dann noch wichtig, dass man irgendwie eine Speichertechnologie schafft, die auch für ´n Privaten finanzierbar ist, […] *ist aber noch ´n bisschen zu teuer, wie ich finde,* […]“ (I-OHZ6: 66).

Mit Blick auf die befragten Handwerker und weitere Wirtschaftsunternehmen fiel auf, dass sie die Umsetzung von autonomen energetischen Teilsystemen in Kombination mit Speichern auf Haushalts- oder Quartiersebene als wichtig erachteten und teils schon selbst geplant hatten (I-OHZ3: 169). Jedoch konnte festgestellt werden, dass hierfür andere Motive und Leitorientierungen wichtig waren. So reizte die Akteure bspw. der Gedanke, ob und wie diese Maßnahmen technisch „realisierbar“ wären.

„[…] *die Wirtschaftlichkeit war mir immer* […] *völlig unwichtig. Das hat mich gar nicht interessiert. Die Machbarkeit hat mich interessiert* […]“ (I-OHZ3: 4).

Teils verbanden die Handwerker und Wirtschaftsunternehmen mit den Umsetzungsmaßnahmen auch ökonomische Motive, d.h. die Möglichkeit mit diesen Lösungen Kunden zu gewinnen und somit Aufträge zu generieren.

Lösungen wie Inselnetze, d.h. die zumindest zeitweise autarke Versorgung von Teilsystemen, wurde kontrovers gesehen. So haben einige regionale Akteure Inselnetze als durchaus bedeutende Option wahrgenommen, andere Akteure waren der Ansicht, dass eine Vernetzung zum übergeordneten Netz unabdingbar sei, so wie es auch in RESYSTRA mit den Gestaltungselementen von Resilienz propagiert wurde.

„Also ich gehe davon aus, dass es unter Resilienz Gesichtspunkten immer sinnvoll ist ein überregionales Netz zu haben“ (I-OHZ2: 82).

„Vollständige Autarkie ist aus meiner Sicht sowohl volkswirtschaftlich als auch technisch Unsinn. Weil man einfach […] *viel mehr Ressourcen aufbringen, wenn man ein kleineres Netzwerk hat, um sicher zu stellen, dass man die Energieversorgung auch sicherstellt“* (I-OHZ2: 71).

6.2.3.3 Inhalts-, system-, prozess- und akteursbezogene Wirksamkeitsfaktoren

Nachfolgend werden die identifizierten Treiber und Hemmnisse des Leitorientierungsprozesses im Landkreis Osterholz sowie daraus abzuleitende Wirksamkeitsfaktoren erläutert. Unterschieden wird hierbei zwischen inhalts-, system-, prozess- und akteursbezogenen Faktoren. Die letztgenannten Faktoren werden – wenn möglich – nach den jeweiligen Prozessphasen unterteilt. Der Prozess konnte, wie erwähnt, nur bis zur Spezifizierungsphase begleitet werden, also bis zur gemeinsam mit ausgewählten Adressaten vorgenommenen Spezifizierung des Leitkonzeptes Resilientes Energiesystem in einem Gestaltungsleitbild regionales resilientes Energiesystem für Osterholz einschließlich dessen Verbreitung zumindest unter den involvierten Akteuren. Deshalb wird der Fokus auf die Wirksamkeitsfaktoren in den ersten beiden Prozessphasen gerichtet. Die Verbreitungs- und Umsetzungsphase wird dementsprechend nicht näher beleuchtet. Es kann somit die Wirksamkeit des Leitkonzeptes Resilientes Energiesystem und der damit kommunizierten Gestaltungselemente (vgl. Kapitel 2) näher dargestellt werden, nicht aber die des Gestaltungsleitbildes, welches erst gegen Projektende fertig ausgearbeitet werden konnte.

6.2.3.3.1 Inhaltsbezogene Wirksamkeitsfaktoren

Die meisten involvierten Akteure waren vor dem Leitorientierungsprozess nicht mit dem Begriff Resilienz in Berührung gekommen. Einige erarbeiteten sich (z.B.: durch private Internetrecherchen) schon vor Beginn der partizipativen Spezifizierungsphase ein eigenes Verständnis des Begriffes. Der Begriff wurde als „sperrig“ wahrgenommen (OHZ-WS1). Es wurde in Frage gestellt, dass der so vielschichtige und komplexe Resilienzbegriff ein adäquates Kommunikationsinstrument jenseits des Wissenschaftsbetriebs darstellen kann. Wie sehr die Kommunikation des Resilienzbegriffes in seiner Gesamtheit eine Herausforderung im Landkreis Osterholz darstellte, bestätigten bereits die oben dargestellten Ergebnisse der Untersuchung der Wirksamkeit des Leitkonzeptes.

Gleichzeitig war der dem Resilienzbegriff innewohnende Interpretationsspielraum aber auch von Vorteil. Er vermochte es zur Diskussion zwischen den regionalen Akteuren in Osterholz anzuregen und damit einen Verständigungs- und Aushandlungsprozess in Gang setzen. So bemerkte ein Workshopteilnehmer durchaus kritisch, dass jeder aus dem Begriff das herausziehen könne, was aus seiner Brille wichtig sei (OHZ-WS1). Ähnliche Kritiken waren auch zu Beginn der Karriere des Nachhaltigkeitsbegriffs weit verbreitet.

Trotzdem ist die Gefahr nicht von der Hand zu weisen, dass Resilienz unterschiedlich aufgefasst wird und kein einheitliches Verständnis existiert, was missverständliche Diskurse fördert. Aspekte des Begriffes, die für jeden individuell von Bedeutung erscheinen, könnten interpretiert werden, ohne die tieferliegende Bedeutung und dahinterstehende Motivation zu verstehen und anzuerkennen.

Zur Lösung der eben dargestellten begrifflichen Herausforderungen wurde von beteiligten Adressaten vorgeschlagen, den Begriff insb. im Dialog mit außerwissenschaftlichen Akteuren (z.B. Bürgern) zu übersetzen und sich auf einzelne Aspekte zu einigen. Ansatzweise wurde dies auch im Rahmen des Projektes RESYSTRA vollzogen, indem einerseits auf Gestaltungselemente von Resilienten Systemen (z.B. Dämpfer, Puffer, Speicher, Redundanzen) fokussiert wurde und andererseits in Kooperation mit den Akteuren vor Ort ein Gestaltungsleitbild konkret bezogen auf den Landkreis Osterholz erarbeitet wurde. Hierbei wurde positiv herausgestellt, dass es sich bei den Elementen um „machbare“, also technisch umsetzbare Maßnahmen handelt (z.B. Speicher, Mess- und Regelsysteme). Es war also durchaus möglich, realisierbare Schritte auf der Basis des Leitkonzepts Resilientes System zu spezifizieren. Dabei muss jedoch die Frage offen bleiben, wie angemessen es ist, wenn auf der Basis des Leitkonzepts einzelne Aspekte ausgewählt werden, ohne die Gesamtheit der Begriffsbedeutung zu erfassen.

Abschließend können folgende inhaltsbezogene Wirksamkeitsfaktoren für das Leitkonzept *Resilientes System* bzw. *Resilientes Energiesystem* als Ergebnisse der Leitorientierungsanalyse im Fallbeispiel Osterholz festgehalten werden:

- Das Leitkonzept ist sehr vielschichtig und komplex und schien sich zunächst nicht als Designprinzip, sondern nur in Form von bestimmten Spezifizierungen (Bauelementen) für die Kommunikation mit den regionalen Akteuren in Osterholz zu eignen. Die ersatzweise versuchte Thematisierung der Versorgungssicherheit (thematisiert als ‚erweiterte Versorgungssicherheit‘) verzichtete auf wesentliche Bedeutungsdimensionen der Resilienz und stellte sich trotzdem, letztendlich aufgrund der Vorbehalte gegenüber einer Thematisierung von Versorgungssicherheit sowohl bei den zivilgesellschaftlichen Verfechter der Energiewende als auch bei den regionalen Energieversorgern, als kaum tragfähiger heraus. Selbst der enorme Aufschwung, den das Thema Sicherheit und auch der Resilienzbegriff in der öffentlichen Debatte während des Projektverlaufs erfuhr, vermochte daran nur wenig zu ändern.
- Das Leitkonzept bot genügend Interpretationsspielraum, um Diskussionen im Landkreis Osterholz anzuregen und Verständigungs- und Aushandlungsprozesse in Gang zu setzen.
- Gleichzeitig konnte gezeigt werden, dass das Leitkonzept in machbare Gestaltungselemente und Gestaltungsleitbilder übersetzbar ist. Es konnte damit plausibler und einleuchtender für die regionalen Akteure werden.

6.2.3.3.2 Systembezogene Wirksamkeitsfaktoren

Mit dem Transformationspfad „Regionale Selbstversorgung mit erneuerbaren Energien“ wurde ein für den Landkreis bedeutendes Thema aufgegriffen. Die steigende Einspeisung von fluktuierenden erneuerbaren Energien im Zuge der Energiewende stellte in diesem Zusammenhang eine Herausforderung insbesondere für die regionalen Energieversorger dar (OHZ-WS1). Das Leitkonzept Resilientes Energiesystem konnte den regionalen Akteuren Lösungsmöglichkeiten zum Umgang mit solchen Problemen aufzeigen, es hatte also einen problemlösungsorientierten Charakter. Obwohl eingeräumt werden muss, dass deutlich zu kurz gegriffen wird, wenn man das Resilienzkonzept allein zur Lösung der Problematik der fluktuierenden Einspeisung (Netzstabilisierung) einsetzen möchte.

Wie bereits in Kapitel 6.2.1.5 aufgezeigt, nahmen die Energieversorger die steigende fluktuierende Einspeisung mit den vorhandenen Mitteln ohne weiteres als beherrschbar wahr. Für sie erschien das wichtige Ziel der Versorgungssicherheit als nicht gefährdet. Es bestand (noch) keine Notwendigkeit für die zeitnahe Umsetzung von (investitionsintensiven) Resilienzmaßnahmen. Erst in Zukunft, wenn es zu einem überwiegenden Anteil an erneuerbaren Energien kommt, sahen die befragten Energieversorger Handlungsbedarf. Hier zeigt sich also, dass das Leitkonzept Resilienz von den regionalen Akteuren als (noch) nicht zeitgemäß_aufgefasst wurde (WS-OHZ1).

Dieser fehlende Handlungsbedarf kann auch als Resultat von unzureichenden weiteren Richtungsimpulsen, z.B. Resilienz fördernden Regularien interpretiert werden. Entsprechende Ansätze werden in Kapitel 6.2.8 vorgestellt.

Immerhin bestätigte sich beim Leitkonzept Resilientes Energiesystem mit seinen Gestaltungselementen der Vorteil, dass es viele Anknüpfungspunkte eröffnet für ein Gestaltungsleitbild unter Berücksichtigung der in der Region existierenden Leitorientierungen, der Gegebenheiten vor Ort und den realisierbaren nächste Schritte. Bspw. steht die in der Region erwünschte *Regionale Wertschöpfung* in enger Beziehung mit dem Leitkonzept Resilienz, denn nur durch eine hohe *Regionale Wertschöpfung* kann auch dafür gesorgt werden, dass finanzielle Ressourcen zur Verfügung stehen, um Vorsorge im Sinne der Resilienz zu betreiben. Darüber hinaus weist Resilienz Bezüge zu den existierenden Leitorientierungen *Wirtschaftlichkeit* und langfristige *Wettbewerbsfähigkeit* auf, denn eine Vorsorge gegenüber bekannten und unbekannten Störereignissen kann diese steigern. So können lokale Energieversorger durch die Umsetzung von Resilienzmaßnahmen bspw. besser gewappnet sein gegenüber Störereignissen. Sie können in diesen Fällen ihre Wirtschaftlichkeit länger aufrechterhalten, was wiederum gegenüber Konkurrenten als Wettbewerbsvorteil zu verbuchen ist. Gleichsam könnten sich mit dem verstärkten Fokus auf ein Resilientes Energiesystem neue Geschäftsfelder eröffnen wie

die Vermarktung von regionalem Strom und die regionale Installation von Speichern, Regel- und Steuertechnik durch Energieversorger, Wirtschaft, Handwerker und Projektierer.

Das Resilienz steigernde Gestaltungselement ‚Nutzung von regional vorhandenen und erneuerbaren Ressourcen' sowie und die vorrangige Nutzung dieser regionalen Ressourcen für die Versorgung der kritischen Infrastrukturen in der Region, knüpft ebenfalls an ohnehin schon existierende Ziele und geplante Maßnahmen des Landkreises an, nämlich an das *Autonomie*ziel sowie an die *bilanzielle Energieautarkie* bis 2030 durch den Ausbau regionaler, erneuerbarer Energien. Damit verbundene Leitorientierungen wie *Klima- und Umweltschutz* und *Nachhaltigkeit* im Sinne der *Generationengerechtigkeit* werden ebenso mit dem Resilienzbegriff aufgegriffen, da mit ihm auf die Zukunftsfähigkeit der Region abgehoben wird und die Vorsorge, und damit Bewahrung ihrer Entwicklungsmöglichkeiten für zukünftige Generationen, im Mittelpunkt steht. Das Gestaltungselement der Zellularität, welchem im Landkreis Osterholz eine hohe Bedeutung zugesprochen wurde, weist zudem starke Bezüge zu den vorhandenen Leitorientierungen *Regionale Unabhängigkeit* und *Dezentralität* auf. Hinter den aufgeführten spezifischeren regionalen Leitorientierungen stehen Allgemeinere, oft tiefverwurzelte Werte und Weltbilder wie *Autonomie, Sicherheit*, *Gerechtigkeit*, *Vorsorge* und *Leben in Einklang mit der Natur*.

Es wird also deutlich, dass mit dem Leitkonzept Resilienz und seinen Gestaltungselementen Anknüpfungsmöglichkeiten an viele im Landkreis existierende sowohl spezielle als auch generellere Leitorientierungen bestehen. Zumindest auf dem regionalen Abschlussworkshop in Osterholz wurde deutlich, dass es, sowohl über das Aufzeigen solcher Bezüge als auch durch die zwischenzeitliche Karriere des Resilienzbegriffs in der wissenschaftlichen und öffentlichen Debatte, gelungen ist, das Resilienzkonzept den beteiligten regionalen Akteuren ein Stück weit näher zu bringen. Ob dies tatsächlich in Zukunft selbsttragend zu einer (handlungsleitenden) Wirksamkeit im Landkreis führt, kann nur langfristig ermittelt werden. Offen bleibt zudem, wie relevant die Herstellung derartiger Bezüge zu existierenden Leitorientierungen im Vergleich zu anderen Wirksamkeitsfaktoren ist. Schließlich sollte der Kern eines erfolgreichen Leitkonzepts mehr transportieren als die Summe (oder gar nur den kleinsten gemeinsamen Nenner) aller schon vorfindbaren Leitorientierungen.

Aus den eben aufgezeigten Ergebnissen können folgende *systembezogene Wirksamkeitsfaktoren für das Leitkonzept Resilienz* identifiziert werden:

- Im Landkreis Osterholz existierten Problemstellungen (unzureichender Umgang mit Destabilisierungstendenzen wie Einspeisung von fluktuierenden EE und erst Recht wenig Perspektive auf die Unsicherheiten, die im Rahmen der anstehenden Transformationsprozesse zunehmen werden), zu deren Lösung die Umsetzung des Leitkonzeptes Resilienz beitragen würde.

- Es ist von Bedeutung, dass ein Leitkonzept als zeitgemäß wahrgenommen wird bzw. dessen handlungsrelevante Zeitgemäßheit stärker herausgestellt wird, was mit Blick auf das Leitkonzept Resilienz im Landkreis Osterholz nicht der Fall war.
- Propagierte Leitkonzepte sollten möglichst komplementär und kompatibel zu weiteren Richtungsimpulsen sein. Auf regionaler bzw. nationaler Ebene existierten möglicherweise zu wenige dieser kompatiblen bzw. komplementären Richtungsimpulse.
- Das Leitkonzept wies Bezüge zu (eher erwünschten) Weltbildern wie Autonomie, Sicherheit und intergenerationelle Gerechtigkeit auf, die den nötigen Resonanzraum eröffneten.

6.2.3.3.3 Prozess- und akteursbezogene Wirksamkeitsfaktoren

Phase 1 – Aufgreifen von Weltbildern (erwünschte Richtung) mit Leitkonzept:

Die *Vorsorge* gegenüber bekannten, aber auch unbekannten Störereignissen und Überraschungen im Sinne des „(Fast-)Egal was kommt-Ansatzes“ erlangt zunehmende Bedeutung in der Gesellschaft (vgl. Bankoff 2003; Bonß 2015; Fekete et al. 2016; Imbusch 2015; Kaufmann 2015; Promberger et al. 2015). Es wird nicht mehr nur mit bestimmten bzw. bestimmbaren Gefährdungen und Bedrohungslagen gerechnet, sondern auch mit noch unbekannten echten Überraschungen (sog. Schwarzen Schwäne, vgl. Taleb 2008), was in der Einsicht einer generellen gesellschaftlichen Verletzlichkeit mündet und schon seit geraumer Zeit z.B. unter dem Begriff „Risikogesellschaft“ diskutiert wird (Beck 1993; Brand 2016; Kaufmann 2015). Daneben spielen noch weitere konsensträchtige Weltbilder wie *Autonomie, Sicherheit*, *Gerechtigkeit* und *Leben in Einklang mit der Natur* eine wichtige Rolle, die auch im Landkreis Osterholz als wichtig erachtet und als *erwünschte Richtung* bezeichnet werden. Zunächst haben vor allem die unmittelbar im Projekt Resystra engagierten WissenschaftlerInnen (Prozessträger) ein *adäquates Leitkonzept identifizieren und propagieren* können, welches Anknüpfungspunkte eröffnete für die bei den regionalen Akteuren vorfindbaren Werte, Weltbilder und spezifischeren Leitorientierungen (z.B. Wettbewerbsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit, regionale Wertschöpfung und Unabhängigkeit). Sie haben die *Überzeugungskraft und den Durchsetzungswillen* aufgebracht, dieses Leitkonzept im BMBF-Forschungsprojekt RESYSTRA zu etablieren und damit die anschließenden Prozessphasen im Landkreis Osterholz in Gang zu setzen. Berücksichtigt haben diese Prozessträger außerdem *weitere förderliche inhalts- und system-bezogene Faktoren*, z.B. einen ausreichenden Interpretationsspielraum und eine Problemlösungsfähigkeit (vgl. die vorhergehenden Kapitel, 6.2.3.3.1 und 6.2.3.3.2).

Das Leitkonzept *Resilientes Energiesysteme* konnte *mithilfe von Fachexperten* (insb. WissenschaftlerInnen) aus dem Kreis der Prozessträger auf regionale Energiesysteme und im spezi-

ellen auf das regionale Energiesystem des Landkreises Osterholz übertragen werden. Bei diesem Schritt konnte auf *Vorarbeiten aus vorherigen wissenschaftlichen Projekten* (insb. nordwest2050[43]) und dabei gewonnene Erkenntnisse und Erfahrungen aufgebaut werden.

Als Schwierigkeit erwies sich jedoch eine vergleichsweise hohe Fluktuation im Projektteam selbst, so dass ein *einvernehmliches Verständnis und eine gemeinsame Überzeugung* mit Blick auf das doch sehr komplexe Resilienzkonzept immer wieder neu erarbeitet werden musste. Dies hatte zur Folge, dass die Phase 1 des Leitorientierungsprozesses sich über einen längeren Zeitraum hinzog und damit teilweise parallel zur Spezifizierungsphase (Phase 2) verlief.

Somit können folgende *prozess- und akteursbezogene Wirksamkeitsfaktoren für die erste Phase des Leitorientierungsprozesses* identifiziert werden:

- Es waren Prozessträger vorhanden, welche *Resilienz* bzw. *Resilientes Energiesystem* als adäquates Leitkonzept hinsichtlich der erwünschten Richtung identifizierten sowie die Überzeugungskraft hatten, es im Forschungsprojekt RESYSTRA zu etablieren.
- Die Etablierung des Leitkonzeptes *Resilientes Energiesystem* im Projekt und in den damit verbundenen Fallbeispielen (regionale Resiliente Energiesysteme) wurde von Fachpromotoren unterstützt, die Wissen und Erfahrungen aus zuvor durchgeführten Projekten aufwiesen, in denen das Leitkonzept Resiliente Systeme schon eine Rolle spielte.
- Die Prozessträger haben ein Leitkonzept ausgewählt, das den in Kapitel 4.2.2 vorgeschlagenen inhalts- und systembezogenen Faktoren weitgehend entspricht, indem es z.B. einen ausreichenden Interpretationsspielraum und einen Problemlösungsbeitrag aufweist.
- Kontinuität in der Gruppe der Prozessträger über den gesamten Prozess ist wichtig, damit ein gemeinsames und zunehmend vertieftes Verständnis und eine entsprechende Überzeugung stabil über den gesamten Projektverlauf erhalten werden kann.

Phase 2 – Spezifizierung des Leitkonzeptes in Gestaltungsleitbilder und Praxisbeispiele

Eine Herausforderung in der Spezifizierungsphase bestand darin, das bislang wenig handlungsorientierte Leitkonzept Resiliente Systeme auf den Energiebereich zu übertragen und in Form von Gestaltungsleitbildelementen zu spezifizieren. Im zweiten Schritt ging es darum, dieses Leitkonzept auf das spezifische regionale Energiesystem des Landkreises Osterholz in Form eines Gestaltungsleitbildes zu übertragen, zu spezifizieren und zu operationalisieren.

[43] nordwest2050 – Perspektiven für klimaangepasste Innovationsprozesse in der Metropolregion Bremen-Oldenburg im Nordwesten; gefördert vom BMBF

Wichtige Unterstützer dieses Prozesses waren die *Fachexperten (bspw. Wissenschaftler mit Energiewissen) unter den Prozessträgern.*

Sie kooperierten dabei mit dem schon vorhandenen *Netzwerk regionaler Akteure* (z.B. Energieversorger, regionale Handwerker, Projektierer, Unternehmen, Regionalpolitik). Über Experteninterviews und Workshops, aber auch durch die Bereitstellung wichtiger Daten für die Modellierung leisteten diese regionalen Akteure einen unersetzlichen fachlichen Input für diese Spezifizierungsarbeit. Damit konnten nicht nur Verletzlichkeiten des Systems analysiert (vgl. Kapitel 6.2.6), sondern auch mögliche Ausbaupfade, einschließlich möglicher Resilienz steigernder Maßnahmen, kooperativ erarbeitet werden (vgl. Kapitel 6.2.7). Ein Ziel war dabei, den regionalen Akteuren das Leitkonzept Resilientes Energiesystem näher zu bringen, indem gemeinsam ein entsprechendes Gestaltungsleitbild erarbeitet wurde, das nicht nur die regionalen natürlichen, technischen und strukturellen Gegebenheiten angemessen berücksichtigt, sondern auch ihre *Ziele und Werte sowie ihre realistischen Einschätzunge*n (ihr lebensweltliches Wissen und ihre Ortskenntnis).

Im Rahmen des Partizipationsprozesses fiel jedoch auf, dass *relevante Akteursgruppen*, die schon in den vorfindbaren Netzwerken kaum vertreten waren, *nur unzureichend in die Spezifizierungsphase integriert* werden konnten. Hier ist besonders die Gruppe der zivilgesellschaftlichen Akteure hervor zu heben, die weder als Verbände des Natur-, Umwelt- oder Verbraucherschutzes noch als Bürgerinitiativen involviert waren. Dies galt sowohl für die Unterstützer als auch für die Gegner der regionalen Energiewende (insb. Gegner des Windenergieausbaus). Um eine Nachfrage nach Resilienzmaßnahmen auf Seiten der Bürger anzustoßen (z.B. nach Versorgungssicherheitstarifen) und ihre Wünsche und Bedürfnisse bei der Ausgestaltung des Gestaltungsleitbildes zu berücksichtigen, wäre ihre Partizipation sicherlich von Vorteil gewesen.

Besonders umworben durch die Prozessträger war die *Partizipation von Entscheidungsträgern* (z.B. Landrat, Abteilungsleiter/Geschäftsführer aus Wirtschaftsunternehmen) und *Funktionsträgern* (z.B. Regionalmanager, Mitarbeiter im Bereich Unternehmensentwicklung). Damit verbunden war der Wunsch nicht nur nach Akzeptanz, sondern auch nach (politischer und institutioneller) Legitimation und nach einer Verstetigung des Prozesses, indem Entscheidungsträger den Weg für die Umsetzung des Leitkonzeptes ebnen, z.B. in Form von Beschlüssen im Landkreis, und Funktionsträger die Verantwortung für den Prozess langfristig übernehmen. Als Herausforderung stellte sich hierbei heraus, dass auch einige der involvierten regionalen Akteure nicht an der gesamten Spezifizierungsphase teilnehmen konnten, bspw. aufgrund ihrer sich ändernden oder endenden Verantwortlichkeiten.

Neben Entscheidungs- und Funktionsträgern konnten Akteure im Leitorientierungsprozess identifiziert werden, die als Pioniere der Umsetzung von erneuerbaren Energien eine besondere Rolle im Landkreis einnahmen. Sie waren sehr überzeugt von der Energiewende und hatten eine hohe Präsenz in der Region. Diese Akteure waren für die Spezifizierungsphase besonders wichtig, verbunden mit der Hoffnung, dass sie ihre Überzeugungen und ihr Engagement auch auf das Leitkonzept und das regionale Gestaltungsleitbild ‚regionales resilientes Energiesystem im Landkreis Osterholz' ausdehnen und dessen Umsetzung als *Leitakteure oder Diffusionsintermediäre* unterstützen. Auch hier fehlte es jedoch an Kontinuität. Möglicherweise hatten auch die Projektbeteiligten ihren Anteil an dieser unbefriedigenden Situation. Vielleicht hätten sie den Kontakt zu diesen Akteuren noch stärker aufrechterhalten und pflegen müssen, um eine stetige Beteiligung zu erzielen. In diesem Zusammenhang gibt die deutlich geringere Teilnehmerzahl beim Abschlussworkshop im Vergleich zum Auftaktworkshop zu denken. Es stellt sich die Frage, ob die Relevanz des Themas den Akteuren beim ersten Workshop nicht *adäquat kommuniziert* wurde, oder ob die *Bedürfnisse der involvierten Akteure nicht ausreichend berücksichtigt* wurden, oder ob noch andere Gründe für die sinkende Teilnahme verantwortlich waren (vgl. auch Kap. 6.2.8). Blickt man bspw. auf Praxisbeispiele, die in anderen Leitorientierungsprozessen als besonders wichtig erachtet wurden, da sie das Leitkonzept machbarer und greifbarer erscheinen lassen können, dann kann auch hier ein wichtiger Aspekt vermutet werden. *Beispiele aus der Praxis wurden, über Präsentationen hinaus z.B. durch Exkursionen, nicht in den Prozess eingebracht.* Dies liegt allerdings auch daran, dass bisher *noch relativ wenige Umsetzungsbeispiele* bezogen auf Resiliente Energiesysteme im Sinne des Projektes existieren.

Als Abschluss der Spezifizierungsphase wurde das entwickelte Gestaltungsleitbild auf dem Abschlussworkshop vorgestellt sowie in Form des hier vorliegenden *Projektberichtes dokumentiert.* Eine schriftliche Fixierung stellte sich in anderen untersuchten Leitorientierungsprozessen als hilfreich heraus. Inwiefern die schriftliche Fixierung im Fallbeispiel Osterholz zu einer Verbindlichkeit und Verbreitung führen wird, kann gegenwärtig aber noch nicht eigeschätzt werden.

Somit können folgende *prozess- und akteursbezogene Wirksamkeitsfaktoren für die zweite Phase des Leitorientierungsprozesses* identifiziert werden:

- Es waren Fachpromotoren unter den Prozessträgern, die mit ihrem Wissen die Spezifizierung des Leitkonzeptes Resilienz bezogen auf das regionale Energiesystem Osterholz beschleunigen konnten.
- Die für die Energiewende engagierten Akteure in der Region waren fast ausschließlich auf den Elektrizitätssektor fokussiert. Wärme spielte nur zum Teil, Mobilität fast gar keine Rolle. Eine alle Bereiche umfassende Verankerung des Konzepts ‚Regionales

resilientes Energiesystem im Landkreis Osterholz‘ und die Erarbeitung eines entsprechend breiten Gestaltungsleitbilds konnte im Rahmen der Projektlaufzeit nicht gelingen.

- Die Prozessträger kooperierten in die Spezifizierungsphase mit einem schon existierenden Netzwerk regionaler Akteure, die sich der Energiewende unter besonderer Berücksichtigung der regionalen Selbstversorgung mit Erneuerbaren mit Fokus auf Elektrizität verschrieben haben. Im Rahmen der Kooperation erfolgte mit dem Ziel der gemeinsamen Erarbeitung eines Gestaltungsleitbildes ein vergleichsweise intensiver Austausch von Zielen und Wünschen, Erkenntnissen und Erfahrungen, welche die Verletzlichkeit des Osterholzer Energiesystems und den Bedarf an Resilienzmaßnahmen betrafen.
- Die Kooperation mit dem in der Region vorhandenen Netzwerk hatte die Konsequenz, dass Akteure, die in diesem Netzwerk nicht schon vorhanden waren, für den Prozess fehlten, bspw. die Gruppe der zivilgesellschaftlichen Akteure.
- Für den Kontaktaufbau zu den zu partizipierenden regionalen Akteuren waren Prozessträger mit Netzwerkkompetenzen hilfreich.
- Es wurden gezielt Entscheidungs- und Funktionsträger, Leitakteure und Diffusionsintermediäre angesprochen, um Akzeptanz für den Prozess schaffen und ihn langfristig in der Region verstetigen zu können. Möglicherweise wurden allerdings, nicht zuletzt aufgrund der Fluktuation im Projektteam, dann die gewonnenen Kontakte durch die Prozessträger zu wenig gepflegt.
- Das Aufzeigen von Praxisbeispielen ist gerade für ein so komplexes Leitkonzept wie Resilienz ein wichtiges Kommunikationsinstrument. Im untersuchten Leitorientierungsprozess wurde es aus verschiedenen Gründen nur wenig genutzt.
- Die schriftliche Dokumentation des entwickelten Gestaltungsleitbildes kann seine Verbindlichkeit und Verbreitung erhöhen. Sie kam allerdings erst gegen Ende des Projekts zum Abschluss.

6.2.4 Szenarien für die Energieversorgung in den Jahren 2030 und 2040

In diesem Abschnitt werden technische Ausbauszenarien für die Region dargestellt. Dabei wurden zwei unterschiedliche Szenarien Verständnisse angewandt, zum einen möglichst realistische und zum anderen Leitkonzept umsetzende, also wünschenswerte Szenarien. Die Zukunftsszenarien 2030 a und b sollen eine möglichst realistisch mögliche Zukunft beschreiben. Diese Szenarien bilden die Grundlage für die Modellierungen im Rahmen der Vulnerabilitäts- und Wertschöpfungsanalyse. Vor allem letztere traf auf besonders großes Interesse bei den regionalen Akteure. Dies liegt daran, dass die Erhöhung der Wertschöpfung die Hauptmotivation für das Engagement zum Ausbau von Erneuerbaren Energien mit dem Ziel der regionalen

Selbstversorgung ist. Um die Anschlussfähigkeit der Szenarien sicherzustellen wurde bei der Erstellung auf vorhandene Raumordnungspläne und Einschätzung der örtlichen Verwaltung zurückgegriffen. Sowie eine Befragung von AkteurInnen des Landkreises durchgeführt, die dazu diente ein Meinungsbild und Einschätzung des weiteren Zubaus von Erneuerbaren Energien im Landkreis einzuholen. Zusätzlich wurden Annahmen hinsichtlich verschiedener Entwicklungen sowie Schätzungen bei Parametern vorgenommen für die keine Angaben vorlagen.

Das im Späteren einzuführende Szenario 2040 ist ein Leitkonzept umsetzendes bzw. wünschenswertes Szenario. Grundlage hierfür bildete das Konzept der regionalen Zelle, welche unter Zuhilfenahme eines Modells welches mit OEMOF beschrieben wurde simuliert werden konnte. Die Werte für die Szenarien sind niedriger als der Status Quo im Jahre 2013, da angenommen wurde, dass durch Effizienzmaßnahmen der Energiebedarf für Warmwasser und Wärme sinken werden. Die Energieeinsparungsmengen sind u.a. neben einer konstanten Bewohnerzahl Teil des zugrunde gelegten Rahmenszenarios.

6.2.4.1 Zukunftsszenario 2030 a und b

6.2.4.1.1 Energieerzeugung

6.2.4.1.1.1 Windkraft

Die Entwicklung des Szenarios für den Windzubau erfolgte in enger Abstimmung mit dem Landkreis und ist in Tabelle 6.5 dargestellt. Im Landkreis Osterholz wurden Wind-Vorranggebiete für die Windenergienutzung mit einer Gesamtfläche von 500 ha festgelegt.

Tabelle 6.5: Darstellung einer möglichst realistischen Entwicklung des Windkraftanlagenbestandes im Landkreis Osterholz gemäß den Angaben des Bauordnungsamtes. Ein Repowering wurde 18 Jahren nach der Inbetriebnahme der Windkraftanlagen angesetzt. (Quelle zu Daten der Inbetriebnahme: (Landkreis Osterholz))

Jahr	installierte Leistung kumuliert	Zubau pro Jahr		davon Neuinstallationen	davon Repowering	Rückbau
	[kW]	Anlagenzahl	[kW]	[kW]	[kW]	
2013	0		0			
2014	0		0			
2015	24.700	8	24.700	24.700		
2016	102.050	**29**	**77.350**	**70.950**	**6.400**	**-2.400**
2017	141.700	13	39.650	39.650		
2018	141.700		**0**			
2019	151.300	3	9.600		9.600	-3.600
2020	151.300	**0**	**0**	**0**	**0**	
2021	164.100	**4**	**12.800**	**0**	**12.800**	**-13.800**
2022	164.100					
2023	164.100					
2024	186.500	**7**	**22.400**		**22.400**	**-11.200**
2025	192.900	**2**	**6.400**		**6.400**	**-3.200**
2026	192.900	0	**0**		**0**	
2027	202.500	**3**	**9.600**		**9.600**	**-4.250**
2028	205.700	**1**	**3.200**		**3.200**	**-800**
2029	205.700					
2030	205.700					
Summe 2030	**205.700**	**70**			70.400	-39.250

Für die Neuinstallation von Windkraftanlagen auf diesen Flächen wurden der Raum- und Flächennutzungsplan des Landkreises sowie die aktuellen Planungen der verschiedenen Projektentwickler zugrunde gelegt. Diese sehen vor, auf allen neuen Flächen zusammen bis 2018 insgesamt 48 Windkraftanlagen zuzubauen mit einer Gesamtnennleistung von 135,3 MW. Für 43 Windkraftanlagen läuft die Betriebsgenehmigung in den Jahren zwischen 2019 und 2028 aus. Beim ersten Repowering-Beispiel im Jahre 2016 im Landkreis Osterholz wurden 4 Windkraftanlagen mit einer Nennleistung von je 600 kW durch 2 Windkraftanlagen mit einer Nennleistung von je 3.200 kW ersetzt. Im Szenario wurde angenommen, dass im Durchschnitt die Repowering-Maßnahme nach 18 Jahren durchgeführt wird. Es wurde weiterhin angenommen, dass beim Repowering aller Windkraftanlagen zwei Altanlagen durch eine neue Anlage mit 3,2 MW ersetzt wird. Dadurch verringert sich die Anzahl der Windkraftanlagen von 43 auf 22, und es erhöht sich die Nennleistung von derzeit 34,95 MW auf 70,4 MW.

6.2.4.1.1.2 Photovoltaik

Im Zukunftsszenario gibt es eine kleine Abweichung bei der Anzahl und Leistung der Photovoltaikanlagen in den Szenarien für die Wertschöpfungsanalyse und der Energiesystemmodellierung, die bei der letztgenannten aufgrund einer gleichmäßigen Verteilung der Anlagen in den Regionen zustande kommt.

6.2.4.1.1.2.1 Szenario 2030 a

Für eine möglichst realistische Abschätzung des Ausbaus von Photovoltaikanlagen im Landkreis wurden Betreiber und Projektierer nach ihren Erwartungen befragt. Hierfür dienten auch die erwarteten Ausbauszenarien zu regionalen PV Contracting-Produkten. Der angenommene Photovoltaikzubau im Szenario 2030 a, der mit einem Zuwachs von 46% von 50 MW auf 72,5 MW, angenommen wurde, kann folgendermaßen eingeordnet werden. Legt man zugrunde, dass nach der Erreichung des PV-Deckels von 52.000 MW gemäß EEG 2014 kaum/kein Zubau mehr erfolgt, so ergibt sich gegenüber 2013 eine Zunahme von 43%. In dieser Größenordnung liegt auch der für den LK angenommene PV-Zubau bis 2030 im Szenario a.

Tabelle 6.6: Vergleich des Zubauszenarios für Photovoltaik für den Landkreis Osterholz und für Deutschland für die Jahre 2013 und 2030 in MW (BNetzA 2015; Landkreis Osterholz 2013c, 2014d).

	2013	2030	Prozentuale Veränderung
PV im LK Osterholz [MW]	50	72	46%
PV in Deutschland [MW]	36.337	52.000	43%

6.2.4.1.1.2.2 Szenario 2030 b

Im Szenario 2030 b wird mit einem starken Zubau gerechnet. Es wird davon ausgegangen, dass die erhöhte Wirtschaftlichkeit und Rendite von Photovoltaikanlagen, die aus der Kombination von steigenden Strompreisen und günstigeren Photovoltaikanlagen sowie dazu passende Speicheranlagen, die für den Eigenverbrauch verwendet werden können den Zubau ankurbeln werden. Der Ausbau wird für Ende des Jahres 2030 bei 120.000 kW Photovoltaikleistung angenommen.

Freiflächenanlagen leisten dabei aufgrund der Ausbaukorridore im neuen EEG 2016, aufgrund des eher schlechten Solarstandortes einen geringen Beitrag. Diese Einschätzung wird auch durch den Landkreis geteilt, wobei hier hauptsächlich die geringeren Vergütungen als Grund genannt wurden.

Der Treiber für den Ausbau sind Dachflächen, die zur Eigenversorgung genutzt werden. Die Anlagen werden vermehrt ohne Förderung betrieben, sodass der Ausbau sich nicht durch den Förderstopp bei 52 GW einschränken lässt.

6.2.4.1.1.3 Biogas

Der weitere Ausbau von Biogasanlagen wurde durch das EEG 2014 stark eingeschränkt, was nicht zuletzt auf die gesellschaftliche Diskussion um Maismonokulturen und die Teller-Tank-Debatte zurückzuführen ist. Dementsprechend wurde von einem mäßigen Ausbau ausgegangen der hauptsächlich auf kleineren Biogasanlagen basiert in einem Leistungsbereich unter 150 kW und mittleren Leistungsbereich bis 1 MW. Es wurde nicht davon ausgegangen, dass Großanlagen mit Leistungen größer 1 MW gebaut werden. Durch den Zubau wächst die elektrische Leistung auf 7,274 MW, was eine Gaserzeugung von 16,91 MW entspricht. Es wurde grundsätzlich davon ausgegangen, dass die bestehenden Biogasanlagen weiter betrieben werden.

Tabelle 6.7: Darstellung des Bestandes an Biogasanlagen in 2013 aufgeschlüsselt nach Gemeinden und nach Szenario 2030 a und b für den Zubau im Jahr 2030.

	MWel			MWgas		
Gemeinde	Bestand 2013	Zubau	Szenario 2030	Bestand 2013	Zubau	Szenario 2030
Axstedt		0,1	0,1		0,233	0,233
Grasberg	0,5		0,5	1,163		1,163
Hambergen		0,2	0,2		0,465	0,465
Holste						
Lilienthal		0,438	0,438		1,019	1,019
Lübberstedt		0,2	0,2		0,465	0,465
Osterholz-Scharmbeck	0,85		0,85	1,977		1,977
Ritterhude	0,075	0,5	0,575	0,174	1,163	1,337
Schwanewede	2,237		2,237	5,202		5,202
Vollersode		0,2	0,2		0,465	0,465
Worpswede	1,974		1,974	4,591		4,591
Summe [MW]	5,636	1,638	**7,274**	13,107	3,809	**16,916**

6.2.4.1.1.4 Kleinfeuerungsanlagen und Solarthermie

Der Zubau an holzbefeuerten Zentralheizungsanlagen und solarthermischen Anlagen bis 2030 orientiert sich an der Entwicklung der Wärmebereitstellung dieser EE-Technologien im Leitszenario 2011 A des BMU (Nitsch, Pregger, Naegler, Heide, Tena, Trieb, Scholz, Nienhaus, Gerhardt, Sterner et al. 2012). Aufgrund von fehlenden Daten wurden Wärmepumpen nicht berücksichtigt.

6.2.4.1.1.5 Angenommene Volllaststunden für die Szenarien 2030

Tabelle 6.8: Volllaststunden der Erzeugungsanlagen im Landkreis Osterholz gemäß dem Szenario 2030 sowie Gesamtenergiebedarf aufgeschlüsselt nach Haushalten und Gewerbe (REON AG 2016)

Parameter	2030
Volllaststunden WKA	2177
Volllaststunden PV	913
Volllaststunden BGA	6000

6.2.4.1.2 Energieverbräuche

Für die Modellierung werden Energieverbräuche der Energieträger Strom Gas, Nahwärme und Sonstige Energieträger pro Haushalt und Gewerbe benötigt. Hierfür dienen die in der Systembeschreibung ermittelten Zahlen, die umgerechnet auf die Haushalte sich folgendermaßen ausschlüsseln.

Tabelle 6.9: Darstellung der Durchschnitts-Verbräuche je Haushalte im Landkreis Osterholz (Quelle: eigene Berechnung auf Grundlage des Gesamtverbrauchs im Landkreis)

2030	Pro Haushalt			Gewerbe gesamt	
Energieträger	Elektrizität [kWh]	Warmwasser & Raumwärme [kWh]	Mobilität [kWh]	Energiebedarf [kWh]	Mobilität [kWh]
Energiebedarf	2000	8.500	5.000	1.046.236.379	
Anteil Elektrizität	100%	10%	40%	33%%	2%
Anteil Gas		30%	10%	27%%	2%
Anteil Nahwärme		30%			
Anteil Sonstiges		30%	50%		36%

Die in Tabelle 6.9 dargestellten Verbräuche entsprechen einem Gesamtenergiebedarf pro Jahr im Landkreis von 450.665.500 kWh Gas, 606.237.700 kWh Elektrizität und 125.939.400 kWh Wärme. Der Sonstige Anteil beträgt für Raumwärme und Warmwasser 139.149.834 kWh und für die erdölbasierte Mobilität im Privatbereich von 12.470.000 kWh und im Gewerbe von 379.498.379 kWh. Diese Energieträger ohne Netz werden durch die Modellierungen nicht berücksichtigt. Als Basis wurde die Anzahl von 49.388 Haushalten zugrunde gelegt.

Insgesamt erhält man dadurch einen Gesamtenergiebedarf im Landkreis von 1824.960.813 kWh/Jahr. Dies bedeutet eine Reduktion des Energieverbrauchs des Landkreises gegenüber 2013 um 17%. Demgegenüber stehen die Ziele der Bundesregierung die bezogen auf 2005 eine Primärenergiereduktion im Jahr 2020 von 20% anstrebt (Nitsch et al. 2010).

Gegenüber 2013 wurden folgende Einsparungen angenommen. 31% im Wärmebereich der Privathaushalte, 33% Prozent bei der Elektrizität und aufgrund der Elektrifizierung 60% bei der Mobilität. Beim Gewerbe erhöht sich der vor Ort erzeugte Anteil, aufgrund angenommener fortschreitender Elektrifizierung. Diese Einsparungen liegen unten denen die von einer Potentialstudie im Rahmen des Projektes „Energiewende Osterholz 2030“ als machbar ermittelt wurden (Landkreis Osterholz 2016e). Einsparungen von 30% beim Gesamtstromverbrauch und 40% bei der Wärme sollten machbar sein.

6.2.4.1.3 Ansässigkeit

Die Einschätzung der lokalen Ansässigkeit von Unternehmen, Betreiber und Investoren entlang der EE-Wertschöpfungsketten im Jahr 2030 basiert im Wesentlichen auf einer Befragung zentraler Anlagenbetreiber (Erhebung des Fachgebiets Technikgestaltung, Universität Bremen) sowie den Annahmen im Status quo für das Jahr 2013.

Die Annahmen für das Zukunftsszenario 2030 wurden im Dezember 2015 im Rahmen eines Workshops im Landkreis Osterholz präsentiert und zur Diskussion gestellt und – sofern dies notwendig war – im Nachgang nochmals angepasst. Dies betraf hauptsächlich den Bereich Wind. Die Daten sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 6.10: Darstellung der Aufteilung der Ansässigkeit für Windkraftanlagen im Jahr 2013 und 2030.

Wertschöpfungsschritt	2013	2030
Pacht (Eigentümer Kommune)	1%	0,3%
Pacht (Eigentümer privat / Landwirtschaft)	83,8%	82,7%
Betreibergesellschaft	0,0%	42,3%
Eigenkapitalgeber	1%	1%

6.2.4.2 Szenarien für die Wertschöpfung der Jahre 2013 u. 2030

Die Szenarien für die Berechnung der Wertschöpfung ergeben sich aus dem Bestandsszenario 2013 und dem Zukunftsszenario 2030 a, Kapitel 6.2.4.1. Für das Szenario 2030 b wurden keine Berechnungen erstellt.

Abweichende Zahlen zu denen der Energiesystemmodellierung ergeben sich dadurch, dass für die Energiesystem-Modellierungen eine genaue Standortkenntnis notwendig war. Vermutlich aufgrund unterschiedlicher Festlegung der Zugehörigkeit der Anlagen (Einspeisepunkt oder Standort der Anlage) kommt es bei Anlagen nahe der Kreisgrenze zu unterschiedlichen Zahlen. Für die Modellierung war entscheidend die Anlagen der Region zuordnen zu können.

Tabelle 6.11: Aufstellung der Daten des Bestandsszenarios 2013 und des Zukunftsszenario 2030 a für die Berechnung der Wertschöpfungsstufen im Landkreis Osterholz (Eigene Erhebung)

	Bestand 2013		Zukunftsszenario 2030 a	
	Anzahl	**[kW_{el}]**	**Anzahl**	**[kW_{el}]**
Wind Onshore	**61**	**51.340**	**70**	**205.700**
Photovoltaik	**1.777**	**49.584**	**5.150**	**72.498**
davon PV Dach	1.773	30.326	4.906	53.240
davon PV Freiflächen	4	19.258	4	19.258
Biogas	**14**	**5.722**	**21**	**7.274**
	Anzahl	**[kW_{th}]**	**Anzahl**	**[kW_{th}]**
Zentralheizungsanlagen holzbefeuert	**611**	**17.000**	**-**	**18.534**
	Anzahl	**[m^2]**	**Anzahl**	**[m^2]**
Solarthermie	**1.280**	**11.055**	**-**	**43.973**
	Anzahl	**[Trm]**	**Anzahl**	**[Trm]**
EE-Wärmenetz	**3**	**3.950**	**3**	**3.950**

6.2.4.3 Szenario regionale Zelle (2040)

Das Szenario für die regionale Zelle im Jahr 2040 dient dazu die Eingangsparameter für die Modellierung der kostenoptimierten Zusammensetzung der Erzeugungsleistungen im Landkreis Osterholz zusammenzustellen. Die Ergebnisse der Modellierung bilden die Grundlage für das Gestaltungsleitbild regionale Zelle. Als Eingangsparameter werden zum einen der Energieverbrauch (Haushalte und Gewerbe) in Form von Zeitreihen, die Anlagentypen und deren Investitionskosten sowie Betriebskosten zugrunde gelegt. Die Darstellung ist so aufgebaut, dass nach Darstellung technischer und ökonomischen Parameter der technischen Anlagen, der Energiebedarf und die Zusammensetzung der Verbraucher aufgezeigt wird.

6.2.4.3.1 Zubau von Erzeugungsanlagen

Es wird angenommen, dass es keinen Zubau gegenüber dem Jahr 2030 an Solarthermie und holzbefeuerten Kleinfeuerungsanlagen gibt.

Für die Erzeugungsanlagen wurden durchschnittliche Volllaststunden der Anlagen zugrunde gelegt welche in Tabelle 6.12 aufgeschlüsselt sind. Tabelle 6.12 gibt ebenfalls den Energiegesamtverbrauch aufgeschlüsselt nach Haushalten und Gewerbe wieder.

Tabelle 6.12: Volllaststunden der Erzeugungsanlagen im Landkreis Osterholz gemäß dem Szenario 2040 sowie Gesamtenergiebedarf aufgeschlüsselt nach Haushalten und Gewerbe (REON AG 2016)

Parameter	2040
Volllaststunden WKA	2177
Volllaststunden PV	913
Volllaststunden BGA	6000
Energiebedarf Haushalte [kWh]	474.124.800
Energiebedarf Gewerbe [kWh]	469.186.000

Als Zeitreihe für die Erzeugung werden für Wind und PV reale Lastgänge aus dem Landkreis aus dem Jahr 2015 herangezogen (REON AG). Die Daten für eine WKA liegen bei 2350 kW; 108 m Nabenhöhe, 150 m Gesamthöhe für eine PVA normiert auf ein kW bei 15 Neigung und Ausrichtung SSW. Die Daten der PV-Anlage sind frei skalierbar.

Bei der Ermittlung der Investitionskosten für das Zukunftsszenario 2040 wurde eine Preisdegression berücksichtigt. Diese orientiert sich an dem Wert von 2030 (Schlesinger et al. 2014), da angenommen wurde, dass etwa die Hälfte der Anlagen in dem Zeitraum bis 2030 und die andere Hälfte zwischen 2030 und 2040 zugebaut werden. Es wurde dabei ein linearer Zusammenhang angenommen. Die sich ergebende Preissenkung führt zu einer Verringerung der Investitionskosten gegenüber den aktuellen Werten um 30% bei Photovoltaik und 3% bei Wind und 50% bei chemischen Stromspeichern. Die zugrunde gelegten Daten basieren auf Literaturangaben, sowie getroffenen Annahmen, wie z.B. einer Degradation von 20% bei Photovoltaik (Kubina 2016; Schlesinger et al. 2014).

Die Lebenszeiten von P2G Anlagen wurden auf 15 Jahre und von BHKWs auf 9 Jahre festgesetzt (Agora Energiewende 2014, S. 117). Bei P2G liegen keine verlässlichen Daten vor, sodass der Mittelwert aus der Studie genommen wurde. Bei BHKWs geht man grundsätzlich von 40-60.000 Betriebsstunden aus, bei im Durchschnitt 5000 Volllaststunden. Da jedoch ein häufiges Ab- und Ausschalten, welches eine stromgeführte Fahrweise nach sich zieht, das BHKW schneller verschleißen lässt, wurde ein Wert an der unteren Spanne der Betriebsstunden gewählt und somit die Lebenszeit auf 9 Jahren festgesetzt.

Als elektrische Speicher wurden Natrium-Schwefel Speicher (NAS) genommen. Bei diesen wurde die Preisdegression mit 40% angesetzt, ein Wert welcher auch in der AGORA Studie (Seite 129) bei Batteriespeichern genannt wird.

Tabelle 6.13: Investitionskosten der Komponenten einer regionalen Zelle die im Modell berücksichtigt wurden. (Für eine detaillierte Ausführung siehe Kubina 2016.)

Komponente	Investitionskosten Szenario 2040
Windkraft-Anlage	1.747 € pro kW_{peak}
Photovoltaik-Anlage	923 € pro kW_{peak}
Biogas-Anlage	1.825 € pro kW_{Gas}
BHKW	800 € pro kW_{el}
Power-to-Gas	1.000 € pro kW_{el}
Wärmepumpe	405 € pro kW_{el}
NAS-Speicher	150 € pro kWh_{el}
Gasspeicher	3 € pro kWh_{Gas}
Wärmespeicher	1,34 € pro $kWh_{Wärme}$

6.2.4.3.2 *Energieverbrauch*

Für die Modellierung werden Energieverbräuche der Energieträger Strom Gas, Nahwärme und Sonstige Energieträger pro Haushalt und Gewerbe benötigt. Hierfür dienen die in der Systembeschreibung ermittelten Zahlen, die umgerechnet auf die Haushalte sich folgendermaßen aufschlüsseln. Dabei wurde angenommen, dass die Anzahl der Haushalte im Landkreis gleichbleibt.

Die in Tabelle 6.3 dargestellten Verbräuche entsprechen einem Gesamtenergiebedarf pro Jahr im Landkreis von 161.745.700 kWh Gas, 527.216.900 kWh Elektrizität und 254.348.200 kWh Wärme. Der Sonstige Anteil beträgt für Raumwärme und Warmwasser 42.843.234 kWh sowie für die erdölbasierte Mobilität im Privatbereich von 14.816.400 kWh und im Gewerbe von 379.498.379 kWh. Diese Energieträger ohne Netz werden durch die Modellierungen nicht berücksichtigt. Als Basis wurde die Anzahl von 49.388 Haushalten zugrunde gelegt.

Tabelle 6.14: Darstellung der Durchschnittes-Verbräuche je Haushalt im Landkreis Osterholz im Szenario des Jahres 2040 (Quelle: Eigene Berechnung auf Grundlage des Gesamtverbrauchs im Landkreis)

2040	Pro Haushalt			Gewerbe gesamt	
Energieträger	Elektrizität [kWh]	Warmwasser & Raumwärme [kWh]	Mobilität [kWh]	Energiebedarf [kWh]	Mobilität [kWh]
Energiebedarf	1500	6.000	3.000	848.684.379	
Anteil Elektrizität	100%	10%	80%	36%	2%
Anteil Gas		10%	10%	15%	2%
Anteil Nahwärme		70%			
Anteil Sonstiges		10%	10%		45%

Insgesamt erhält man dadurch einen Gesamtenergiebedarf im Landkreis von 1.380.468.813 kWh/Jahr. Dies bedeutet eine Reduktion des Energieverbrauchs des Landkreises gegenüber 2013 von 37%. Zum Vergleich: Die Bundesregierung strebt eine Primärenergieeinsparung von 50% im Jahr 2050 (Nitsch et al. 2010).

Gegenüber 2013 wurden folgende ambitionierten Einsparungen bei den Privathaushalten angenommen: 51% im Wärmebereich, 50% Prozent bei der Elektrizität und aufgrund der Veränderung von Antriebstechnologien und Verhalten 76% bei der Mobilität. Diese Einsparungen decken sich in etwa mit den Zielen der Bundesregierung für 2050. Es wird also angenommen, dass dies 10 Jahre erreicht wird. Grund dafür ist, dass aufgrund des Parisers Klimaschutzabkommens höhere Einsparmengen notwendig sind.

6.2.5 Wertschöpfungsanalyse des Landkreises Osterholz für das Jahr 2013 und 2030

Wie bereits bei der Analyse der Leitorientierungen dargestellt ist ein Haupttreiber für den Energiewendeprozess im Landkreis Osterholz, der Wunsch die regionale Wertschöpfung zu erhöhen und die Kaufkraftverluste, die derzeit durch den Kauf externer Energie entstehen, zu reduzieren. In diesem Kapitel wird die Berechnung der Wertschöpfung durch Erneuerbare im Landkreis Osterholz für das Jahr 2013 und dem Zukunftsszenario 2030 a mit dem WeBEE Modell ermittelt. Zugleich werden die ermittelten Daten mit zwei Szenarien „1“ und „2“ verglichen. Diese zusätzlichen Szenarien dienen dazu abzuschätzen welches Potential in der regionalen Wertschöpfung steckt.

6.2.5.1 Status quo 2013

6.2.5.1.1 Eingangsdaten und Modellparameter

Wie in Kapitel 5.4 beschrieben, sind für die Quantifizierung der direkten Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte mit dem WeBEE-Modell auf regionaler Ebene eine Reihe von Eingangsdaten erforderlich. Diese umfassen die in den Regionen installierte und zugebaute EE-Leistung im jeweiligen Betrachtungsjahr (Angaben zu Bestand und Zubau an EE-Anlagen). Weiterhin muss ermittelt werden, zu welchem Umfang die über den regionalen Anlagenbestand und -zubau ermittelten Umsätze in den verschiedenen Wertschöpfungsschritten durch in den Regionen ansässige Unternehmen und EigenkapitalgeberInnen abgedeckt werden (Annahmen zur regionalen Ansässigkeit der Akteure).

Der erhobene Bestand und Zubau an installierten EE-Anlagen im Landkreis Osterholz ist in Tabelle 6.15 aufgeführt. Hier ist zu beachten, dass sich der in der Tabelle aufgeführte Bestand im Jahr 2013 aus dem Bestand zum Jahresende 2012 zzgl. der Hälfte des Zubaus im Jahr 2013 ergibt. Es wird deutlich, dass im Landkreis mit Blick auf die installierte Leistung Windenergie- und Photovoltaikanlagen dominieren. Zu Wärmepumpen und Holzheizwerken konnten keine Daten zu Bestand und Zubau ermittelt und damit für diese Technologien auch keine Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte berechnet werden. Für die holzbefeuerten Zentralheizungsanlagen waren lediglich Angaben zur Anlagenzahl verfügbar. Hier wurde die installierte Leistung mit Hilfe der durchschnittlichen Anlagengröße BAFA-geförderter Heizungsanlagen in Niedersachsen im Zeitraum 2001-2013 (eclareon GmbH 2015) in den entsprechenden Leistungsbereichen hochgerechnet.

Wie in Kapitel 5.4.3 beschrieben, wurden die Annahmen bezüglich der lokalen Ansässigkeit von Unternehmen, Betreiber/innen und InvestorInnen entlang der EE-Wertschöpfungsketten im Landkreis Osterholz mittels einer Befragung der EE-AnlagenbetreiberInnen sowie regionalen ExpertInnen (u.a. Verwaltung) ermittelt. In dem Fall, dass keine Angaben zur Ansässigkeit ermittelt werden konnte, wurden auf Basis früherer Regionalstudien und unter Berücksichtigung der regionalen Gegebenheiten Annahmen getroffen.

Tabelle 6.15: Bestand und Zubau an EE-Anlagen im Landkreis Osterholz (Quellen: Erhebung des Fachgebiets Technikgestaltung, Universität Bremen 2015, vgl. Kapitel 6.2.4.2)

	Bestand 2013		Zubau 2013	
	Anzahl	[kW_{el}]	Anzahl	[kW_{el}]
Wind Onshore	61	51.340	0	0
Photovoltaik	1.705	42.172	145	14.825
davon PV Dachanlagen	1.702	29.504	143	1.644
davon PV Freiflächenanlagen	3	12.668	2	13.181
Biogas	14	5.672	1	100
	Anzahl	[kW_{th}]	Anzahl	[kW_{th}]
Wärmepumpen	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Zentralheizungsanlagen holzbefeuert	591	16.427	40	1.146
Holzheizwerke	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	Anzahl	[m^2]	Anzahl	[m^2]
Solarthermie	1.270	10.927	20	256
	Anzahl	[Trm]	Anzahl	[Trm]
EE-Wärmenetz	3	3.950	0	0

6.2.5.1.2 Ergebnisse

Für den Landkreis Osterholz wurden für das Jahr 2013 Wertschöpfungseffekte durch erneuerbare Energien auf regionaler Ebene von insgesamt 3,0 Mio. Euro ermittelt. Damit verbunden sind rund 20 Vollzeitarbeitsplätze (siehe Tabelle 6.16 und Abbildung 6.6). Von der regionalen Wertschöpfung entfallen rund 1,9 Mio. Euro auf Gewinne nach Steuern, 0,6 Mio. Euro auf Nettoeinkommen der Beschäftigten und 0,6 Mio. Euro auf kommunale Steuereinnahmen. Ein Blick auf die Technologiebereiche zeigt, dass bzgl. der Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte die Photovoltaik mit Abstand die wichtigste EE-Technologie im Landkreis ist: Rund 61% der gesamten regionalen Wertschöpfung und 74% der Beschäftigten sind in diesem Bereich angesiedelt. An zweiter Stelle stehen die Windenergie und die Bioenergie. Mit der Strom- und

Wärmeerzeugung auf Basis biogener Rohstoffe sind 17% der Wertschöpfungseffekte und 9% der Vollzeitarbeitsplätze verbunden. Obwohl die Windenergie den größten Anteil zur EE-Stromerzeugung im Landkreis beiträgt und die installierte Leistung ähnlich hoch ist wie die der Photovoltaikanlagen, trägt diese nur rund 17% zur gesamten regionalen Wertschöpfung und 6% zur Beschäftigung vor Ort bei. Hauptursache hierfür ist, dass sowohl die BetreiberInnen als auch die EigenkapitalgeberInnen der Windenergieanlagen mehrheitlich außerhalb des Landkreises ansässig sind und somit ein Großteil der Gewinne aus dem Anlagenbetrieb und die damit verbundenen Steuerzahlungen aus dem Landkreis abfließen. Dies macht ein Vergleich der berechneten Effekte mit den Ergebnissen des Szenario 1 deutlich (siehe Tabelle 6.4 und Tabelle 6.5).

Tabelle 6.16: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen (Quelle: Eigene Berechnungen).

2013	Gewinne nach Steuern	Nettoeinkommen durch Beschäftigung	Steuern an die Kommunen	**WS kommunale Ebene**	Vollzeitbeschäftigte
	[Tsd. Euro]				[VZÄ]
Photovoltaik	1.165,9	447,3	241,8	1.855,0	15,0
Windenergie	226,2	45,1	258,1	529,4	1,2
Bioenergie (Strom)	398,9	41,2	75,6	515,7	1,9
Summe Strom	**1.791,0**	**533,6**	**575,5**	**2.900,1**	**18,0**
Bioenergie (Wärme)	19,1	41,7	5,6	66,3	1,6
Solarthermie	9,1	15,6	2,1	26,9	0,6
Nahwärmenetze	38,1	0,0	6,9	45,1	0,0
Summe Wärme	**66,3**	**57,3**	**14,6**	**138,2**	**2,2**
Summe	**1.857,3**	**590,9**	**590,1**	**3.038,3**	**20,2**

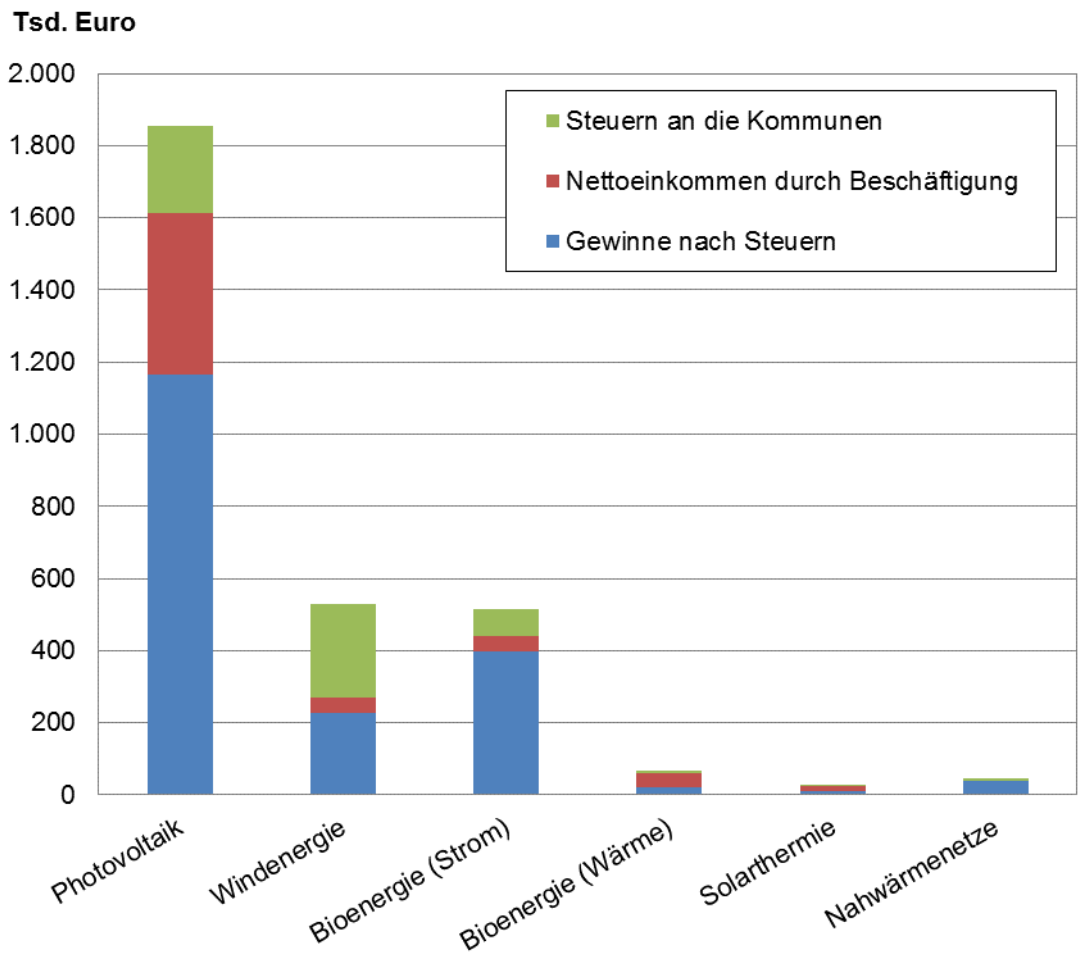


Abbildung 6.6: Regionale Wertschöpfungseffekte durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen (Quelle: Eigene Darstellung.)

In Tabelle 6.17 und Abbildung 6.6 sind die Ergebnisse differenziert nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen dargestellt. Die mit dem Anlagenzubau im Jahr 2013 verbundenen einmaligen Effekte in der Wertschöpfungsstufe „Planung & Installation“ sind, verglichen mit den Effekten im Zusammenhang mit dem Betrieb der Anlagen, gering. Wie aus Tabelle 6.15 ersichtlich wird, fand 2013 der größte Leistungszubau bei der Photovoltaik statt. Hier wurden im Betrachtungsjahr u.a. zwei Freiflächenanlagen in Betrieb genommen. Da die Installation der Freiflächenanlagen jedoch nicht durch lokal ansässige Unternehmen erfolgte und auch die Planung nur teilweise durch vor Ort ansässige Akteure, sind die damit verbundenen Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte nur zum Teil dem Landkreis Osterholz zuzuordnen. Die Ergebnisse des Szenarios 2 zeigen, dass die regionalen Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte hier bei einer 100%-igen regionalen Ansässigkeit der Unternehmen nahezu um den Faktor 2,5 höher liegen würden. Mit in Summe 2,7 Mio. Euro machen die betriebsbezogenen Wertschöpfungseffekte einen Anteil von rund 89% der Wertschöpfung auf regionaler Ebene aus. Der Großteil (rund 1,9 Mio. Euro) sind Gewinne der AnlagenbetreiberInnen und darauf gezahlte Steuern auf kommunaler Ebene. Diese fallen nur bei gewerblich betriebenen

Anlagen, d.h. bei einem Verkauf von Strom und/oder Wärme, an. Bei einer reinen Eigennutzung der Wärme (bspw. bei holzbefeuerten Zentralheizungsanlagen in Ein- und Mehrfamilienhäusern) werden deswegen grundsätzlich keine Betreibergewinne generiert. Rund zwei Drittel der Betreibergewinne sind im Landkreis auf den Betrieb der Photovoltaikanlagen zurückzuführen. Dagegen fallen die Betreibergewinne im Zusammenhang mit dem Betrieb der Windenergieanlagen in der Region gering aus; die Gründe dafür wurden oben bereits angeführt. Mit der Planung und Installation von EE-Anlagen waren im Jahr 2013 rund 8 Vollzeitarbeitsplätze verbunden, der Anlagenbetrieb und die Wartung der Anlagen schlagen mit knapp 12 Vollzeitbeschäftigten zu Buche.

Tabelle 6.17: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen (Quelle: Eigene Berechnungen)

2013	Planung & Installation	Anlagenbetrieb & Wartung	Betreibergewinne	**WS kommunale Ebene**
	[Tsd. Euro]			
Photovoltaik	305,8	384,6	1.164,6	1.855,0
Windenergie	0,0	267,9	261,5	529,4
Bioenergie (Strom)	0,0	64,7	451,0	515,7
Summe Strom	**305,8**	**717,2**	**1.877,1**	**2.900,1**
Bioenergie (Wärme)	13,9	52,4	0,0	66,3
Solarthermie	7,0	19,9	0,0	26,9
Nahwärmenetze	0,0	0,0	45,0	45,1
Summe Wärme	**20,9**	**72,3**	**45,0**	**138,2**
Summe WS	**326,7**	**789,5**	**1.922,1**	**3.038,3**
	[VZÄ]			
Vollzeitbeschäftigte	**8,4**	**11,7**	**-**	**20,2**

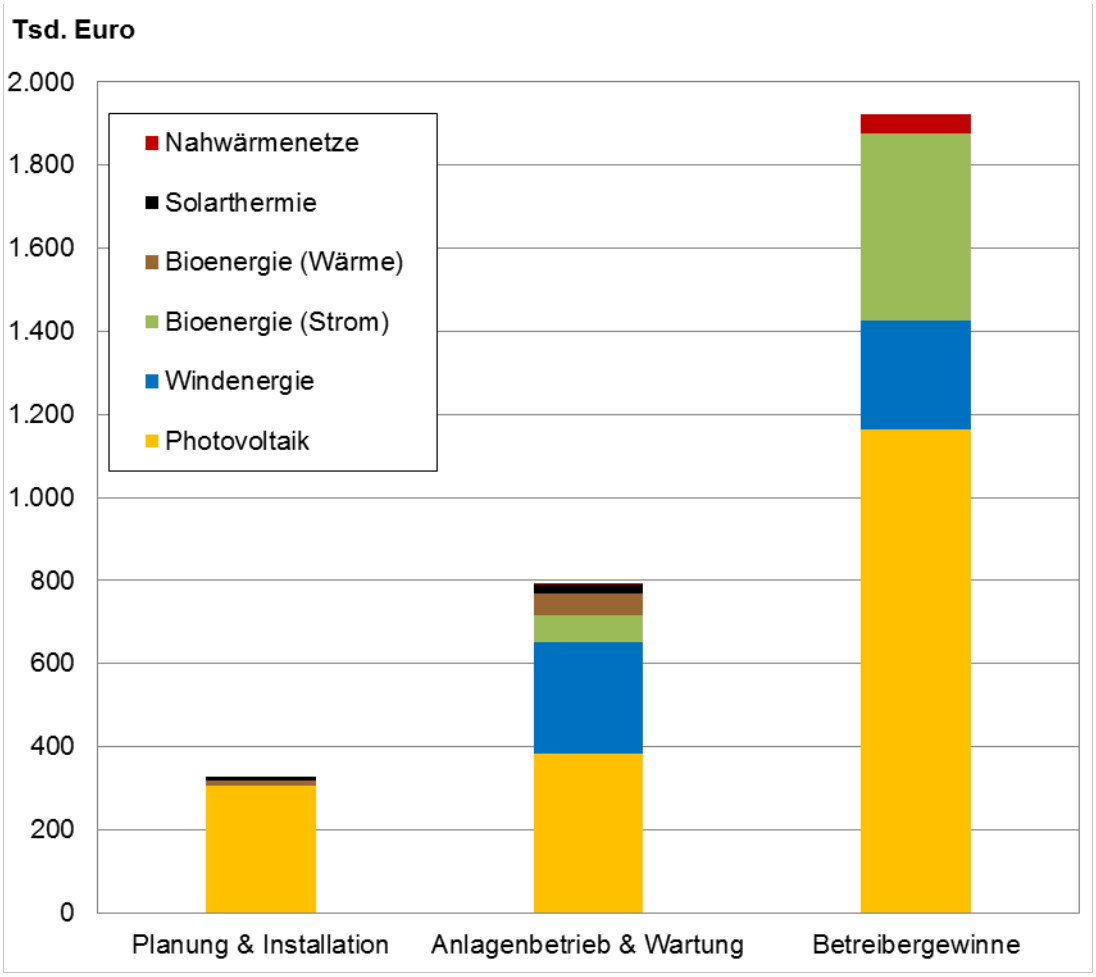


Abbildung 6.7: Regionale Wertschöpfungseffekte durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen (Quelle: Eigene Darstellung)

Die nachfolgenden Tabellen und Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Berechnungen für Szenario 1 und Szenario 2 im Betrachtungsjahr 2013. Wie in Kapitel 6.2.4 erläutert, wurde im Szenario 1 angenommen, dass die Betreibergesellschaften sowie die EigenkapitalgeberInnen zu 100% im Landkreis ansässig sind; die Prozentsätze für die anderen Wertschöpfungsschritte wurden nicht verändert. Im Szenario 2 wurde für alle betrachteten Wertschöpfungsschritte eine 100%-ige Ortsansässigkeit der Akteure unterstellt (maximal mögliche Wertschöpfung). Im Szenario 1 ergibt sich in Summe eine regionale Wertschöpfung von rund 6,1 Mio. Euro, was etwa einer Verdopplung der Effekte entspricht (siehe Tabelle 6.18). Insbesondere bei der Windenergie zeigt sich eine deutliche Steigerung der Wertschöpfungseffekte. Die Zahl der Vollzeitarbeitsplätze liegt im Szenario 1 rund 30% höher: In Summe ergeben sich hier knapp 26 Vollzeitäquivalente. Die geänderten Annahmen zum Sitz der Betreibergesellschaften und der EigenkapitalgeberInnen wirken sich entsprechend v. a. auf die Höhe der Betreibergewinne und die darauf gezahlten Steuern aus, wie aus Tabelle 6.19 ersichtlich wird.

Tabelle 6.18: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen – Szenario 1 Quelle: Eigene Berechnungen.

2013 Szenario 1	Gewinne nach Steuern	Nettoeinkommen durch Beschäftigung	Steuern an die Kommunen	**WS kommunale Ebene**	Vollzeitbeschäftigte
	[Tsd. Euro]				[VZÄ]
Photovoltaik	1.829,5	482,1	285,3	2.596,9	15,8
Windenergie	1.886,3	236,6	537,7	2.660,6	6,1
Bioenergie (Strom)	599,4	41,2	77,1	717,7	1,9
Summe Strom	**4.315,2**	**759,9**	**900,1**	**5.975,2**	**23,8**
Bioenergie (Wärme)	19,1	41,7	5,6	66,3	1,6
Solarthermie	9,1	15,6	2,1	26,9	0,6
Nahwärmenetze	38,1	0,0	6,9	45,1	0,0
Summe Wärme	**66,3**	**57,3**	**14,6**	**138,2**	**2,2**
Summe	**4.381,5**	**817,3**	**914,7**	**6.113,4**	**25,9**

Tabelle 6.19: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen – Szenario 1 (Quelle: Eigene Berechnungen).

2013Szenario 1	Planung & Installation	Anlagenbetrieb & Wartung	Betreiber-gewinne	**WS kommunale Ebene**
	[Tsd. Euro]			
Photovoltaik	305,8	421,5	1.869,6	2.596,9
Windenergie	0,0	470,3	2.190,3	2.660,6
Bioenergie (Strom)	0,0	64,7	653,0	717,7
Summe Strom	**305,8**	**956,5**	**4.712,9**	**5.975,2**
Bioenergie (Wärme)	13,9	52,4	0,0	66,3
Solarthermie	7,0	19,9	0,0	26,9
Nahwärmenetze	0,0	0,0	45,0	45,1
Summe Wärme	**20,9**	**72,3**	**45,0**	**138,2**
Summe WS	**326,7**	**1.028,8**	**4.757,9**	**6.113,4**
	[VZÄ]			
Vollzeitbeschäftigte	**8,4**	**17,5**	**-**	**25,9**

Wären entlang der Wertschöpfungskette alle Unternehmen und weiteren Akteure ausschließlich in der Region verortet, würden sich durch die Planung und Installation sowie den Betrieb der EE-Anlagen im Landkreis auf regionaler Ebene Wertschöpfungseffekte in Höhe von 7,1 Mio. Euro ergeben. Damit verbunden wären knapp 45 Vollzeitarbeitsplätze (siehe Tabelle 6.20). Im Unterschied zu Szenario 1 wirken sich die Annahmen in Szenario 2 auf die Effekte in allen Wertschöpfungsstufen aus. Die größte Steigerung zeigt sich jedoch auf der Stufe Planung & Installation (siehe Tabelle 6.21). Da diese Stufe eine höhere Beschäftigungsintensität aufweist als die Stufe Anlagenbetrieb & Wartung, geht dies in Szenario 2 mit einer deutlich höheren Zahl an Vollzeitäquivalenten einher.

In Abbildung 6.7 und Abbildung 6.8 sind die Ergebnisse zur Wertschöpfung und Beschäftigung im Landkreis Osterholz und für den Status quo im Jahr 2013 sowie die Szenarien 1 und 2 vergleichend gegenübergestellt.

Tabelle 6.20: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen – Szenario 2 (maximale Wertschöpfung) (Quelle: Eigene Berechnungen)

2013 Szenario 2	Gewinne nach Steuern	Nettoeinkommen durch Beschäftigung	Steuern an die Kommunen	**WS kommunale Ebene**	Vollzeitbeschäftigte
	[Tsd. Euro]				[VZÄ]
Photovoltaik	2.025,4	813,9	328,8	3.168,1	28,3
Windenergie	1.999,8	314,6	556,2	2.870,6	8,9
Bioenergie (Strom)	661,0	121,6	90,8	873,3	4,9
Summe Strom	**4.686,2**	**1.250,0**	**975,8**	**6.912,1**	**42,1**
Bioenergie (Wärme)	21,2	45,6	6,2	73,0	1,7
Solarthermie	10,3	17,1	2,5	29,9	0,6
Nahwärmenetze	40,1	1,9	7,3	49,4	0,1
Summe Wärme	**71,6**	**64,6**	**16,0**	**152,2**	**2,4**
Summe	**4.757,9**	**1.314,7**	**991,8**	**7.064,3**	**44,5**

Tabelle 6.21: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen – Szenario 2 (maximale Wertschöpfung) (Quelle: Eigene Berechnungen).

2013Szenario 2	Planung & Installation	Anlagenbetrieb & Wartung	Betreibergewinne	**WS kommunale Ebene**
	[Tsd. Euro]			
Photovoltaik	763,7	534,8	1.869,6	3.168,1
Windenergie	0,0	680,3	2.190,3	2.870,6
Bioenergie (Strom)	19,9	200,5	653,0	873,3
Summe Strom	**783,6**	**1.415,6**	**4.712,9**	**6.912,1**
Bioenergie (Wärme)	13,9	59,0	0,0	73,0
Solarthermie	7,0	22,9	0,0	29,9
Nahwärmenetze	0,0	4,3	45,0	49,4
Summe Wärme	**20,9**	**86,3**	**45,0**	**152,2**
Summe WS	**804,5**	**1.501,9**	**4.757,9**	**7.064,3**
	[VZÄ]			
Vollzeitbeschäftigte	**20,2**	**24,3**	**-**	**44,5**

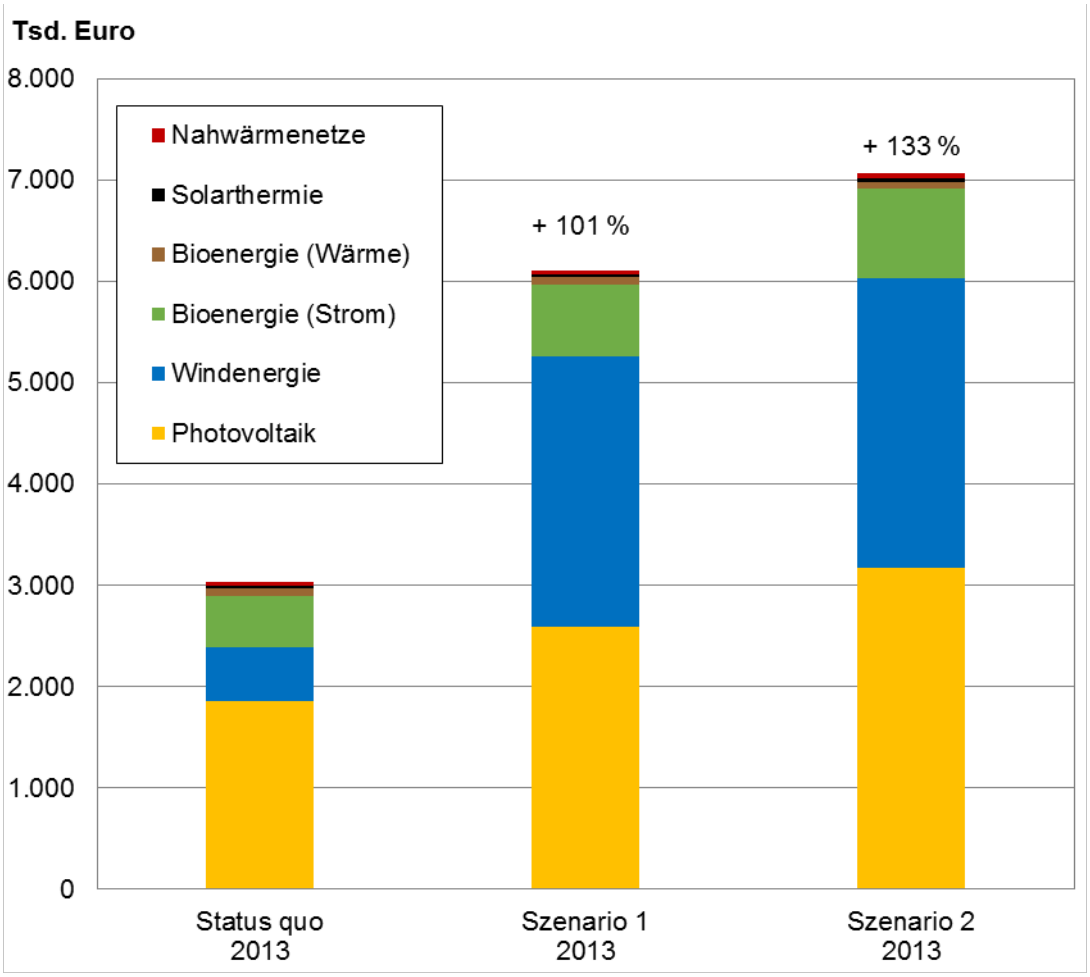


Abbildung 6.8: Regionale Wertschöpfungseffekte durch erneuerbare Energien nach Technologiebereichen im Landkreis Osterholz im Jahr 2013 für den Status quo und die Szenarien 1 und 2 (Quelle: Eigene Darstellung)

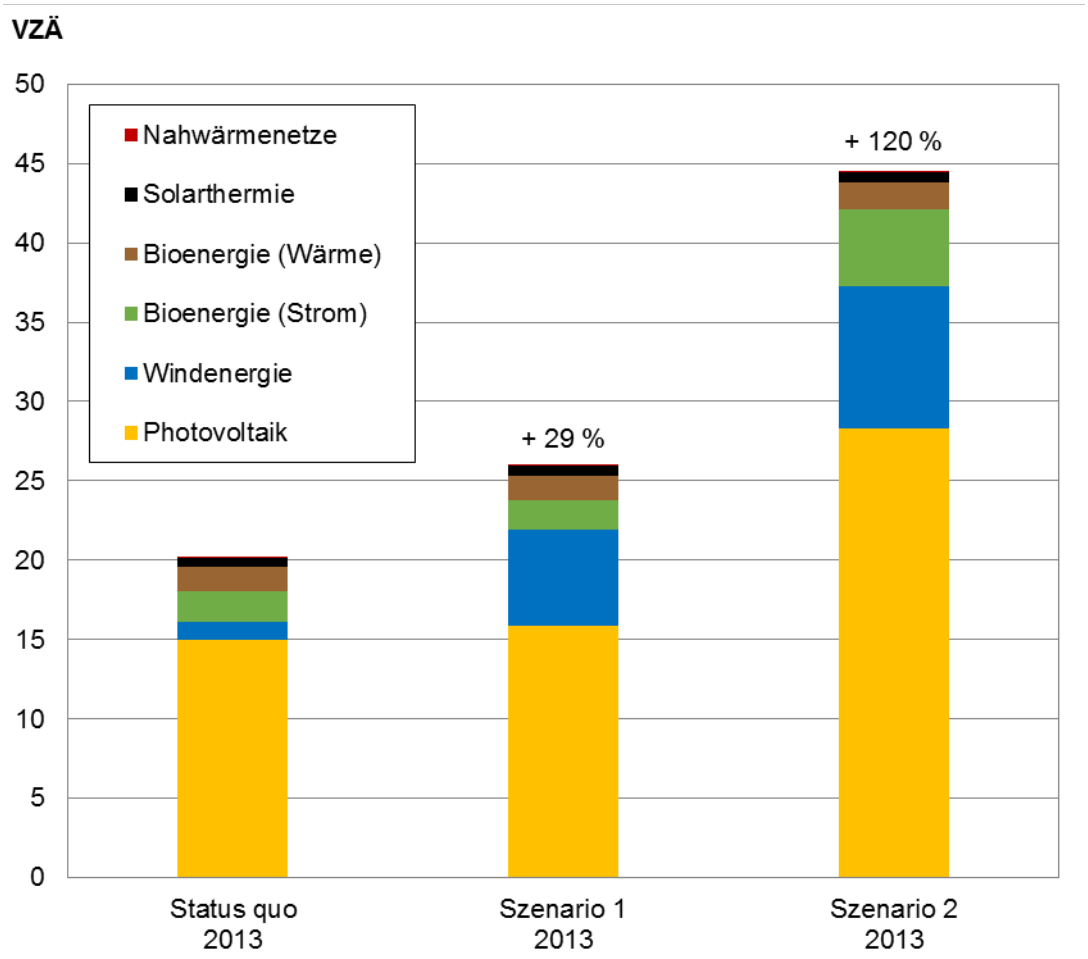


Abbildung 6.9: Beschäftigungseffekte (Vollzeitäquivalente) durch erneuerbare Energien nach Technologiebereichen im Landkreis Osterholz im Jahr 2013 für den Status quo und die Szenarien 1 und 2 (Quelle: Eigene Darstellung)

6.2.5.2 Zukunftsszenario 2030 a

6.2.5.2.1 Eingangsdaten und Modellparameter

Die nachfolgende

Tabelle 6.22 zeigt die Annahmen zum Bestand und Zubau an EE-Anlagen im Landkreis Osterholz im Zukunftsszenario a für das Jahr 2030. Dabei ist wieder zu beachten, dass sich der in der Tabelle aufgeführte Bestand im Jahr 2030 aus dem Bestand zum Jahresende 2029 zzgl. der Hälfte des Zubaus im Jahr 2030 ergibt. Der Leistungszubau im Bereich Wind ist sowohl auf Neuinstallationen als auch auf das Repowering bestehender Anlagen zurückzuführen.

Im Bereich Photovoltaik wird ein weiterer Ausbau bei den Dachanlagen angenommen, ein Zubau bei PV-Freiflächenanlagen findet nicht statt. Der Zubau an holzbefeuerten Zentralheizungsanlagen und solarthermischen Anlagen bis 2030 orientiert sich an der Entwicklung der Wärmebereitstellung dieser EE-Technologien im Leitszenario 2011 A des BMU (Nitsch, et al. 2012) (siehe Kapitel 5.4.4).

Tabelle 6.22: Bestand und Zubau an EE-Anlagen im Landkreis Osterholz im Jahr 2013 und im Zukunftsszenario für das Jahr 2030 (Quellen: Erhebung des Fachgebiets Technikgestaltung, Universität Bremen 2015)

	Status quo (2013)		**Zukunftsszenario 2030 a**	
	Bestand 2013	Zubau 2013	Bestand 2030	Zubau 2030
	[kW_{el}]	[kW_{el}]	[kW_{el}]	[kW_{el}]
Wind Onshore	51.340	0	205.700	0
Photovoltaik	42.172	14.825	71.825	1.348
davon PV Dachanlagen	29.504	1.644	52.567	1.348
davon PV Freiflächenanlagen	12.668	13.181	19.258	0
Biogas	5.672	100	7.274	0
	[kW_{th}]	[kW_{th}]	[kW_{th}]	[kW_{th}]
Wärmepumpen	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Zentralheizungsanlagen holzbefeuert	16.427	1.146	18.507	54
Holzheizwerke	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	[m^2]	[m^2]	[m^2]	[m^2]
Solarthermie	10.927	256	42.827	2.293
	[Trm]	[Trm]	[Trm]	[Trm]
EE-Wärmenetz	3.950	0	3.950	0

Die Einschätzung der lokalen Ansässigkeit von Unternehmen, BetreiberInnen und InvestorInnen entlang der EE-Wertschöpfungsketten im Jahr 2030 basiert im Wesentlichen auf einer Befragung zentraler AnlagenbetreiberInnen (Erhebung des Fachgebiets Technikgestaltung, Universität Bremen) sowie den Annahmen im Status quo für das Jahr 2013.

Die Annahmen für das Zukunftsszenario 2030 a wurden im Dezember 2015 im Rahmen eines Workshops im Landkreis Osterholz präsentiert und zur Diskussion gestellt und – sofern dies notwendig war – im Nachgang nochmals angepasst.

6.2.5.2.2 Ergebnisse

Im Zukunftsszenario a für das Jahr 2030 ergibt sich im Landkreis Osterholz eine regionale Wertschöpfung durch erneuerbare Energien von knapp 4,7 Mio. Euro und ein Beschäftigungseffekt von 27 Vollzeitäquivalenten (siehe Tabelle 6.23). Durch den weiteren Zubau an EE-Anlagen im Landkreis könnte bei der regionalen Wertschöpfung somit gegenüber dem Status quo eine Steigerung um 55% erreicht werden. Bei den Beschäftigten zeigt sich im Vergleich zu den Ergebnissen für das Jahr 2013 eine Zunahme um 35% (siehe Abbildung 6.10 und Abbildung 6.11). Wie aus Tabelle 6.23 ersichtlich wird, ist die Zunahme gegenüber dem Status quo sowohl bei der Wertschöpfung als auch bei der Beschäftigung im Wesentlichen auf den Bereich Windenergie zurückzuführen. Gemäß den Annahmen im Zukunftsszenario (siehe Kapitel 6.2.4) werden bis 2030 im Landkreis Windparks neu errichtet und bei bestehenden Anlagen repowert. Neben dem erheblichen Zubau an installierter Leistung sind im Szenario für 2030 a auch Änderungen bei der regionalen Ansässigkeit der Akteure zu erwarten: Bei den Betreibergesellschaften im Bereich Windenergie ist davon auszugehen, dass zukünftig ein deutlich höherer Anteil der Gesellschaften ihren steuerrechtlichen Unternehmenssitz innerhalb des Landkreises hat. Damit verbleibt ein größerer Anteil der generierten Unternehmensgewinne und an die Kommunen zu entrichtenden Steuern in der Region, was zusätzlich dazu beiträgt, dass die Effekte im Bereich Wind gegenüber 2013 höher sind.

Tabelle 6.23: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien in Osterholz im Jahr 2013 und im Zukunftsszenario a für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen (Quelle: Eigene Berechnungen)

2030	**regionale Wertschöpfung**		**Beschäftigung**	
	Status quo (2013)	**Zukunfts szenario 2030 a**	**Status quo (2013)**	**Zukunfts szenario 2030 a**
	[Tsd. Euro]		[VZÄ]	
Photovoltaik	1.855,0	1.871,3	15,0	11,6
Windenergie	529,4	2.040,0	1,2	10,2
Bioenergie (Strom)	515,7	604,3	1,9	2,4
Summe Strom	**2.900,1**	**4.515,6**	**18,0**	**24,3**
Bioenergie (Wärme)	66,3	59,5	1,6	1,4
Solarthermie	26,9	75,4	0,6	1,7
Nahwärmenetze	45,1	45,1	0,0	0,0
Summe Wärme	**138,2**	**180,0**	**2,2**	**3,1**
Summe	**3.038,3**	**4.695,6**	**20,2**	**27,3**

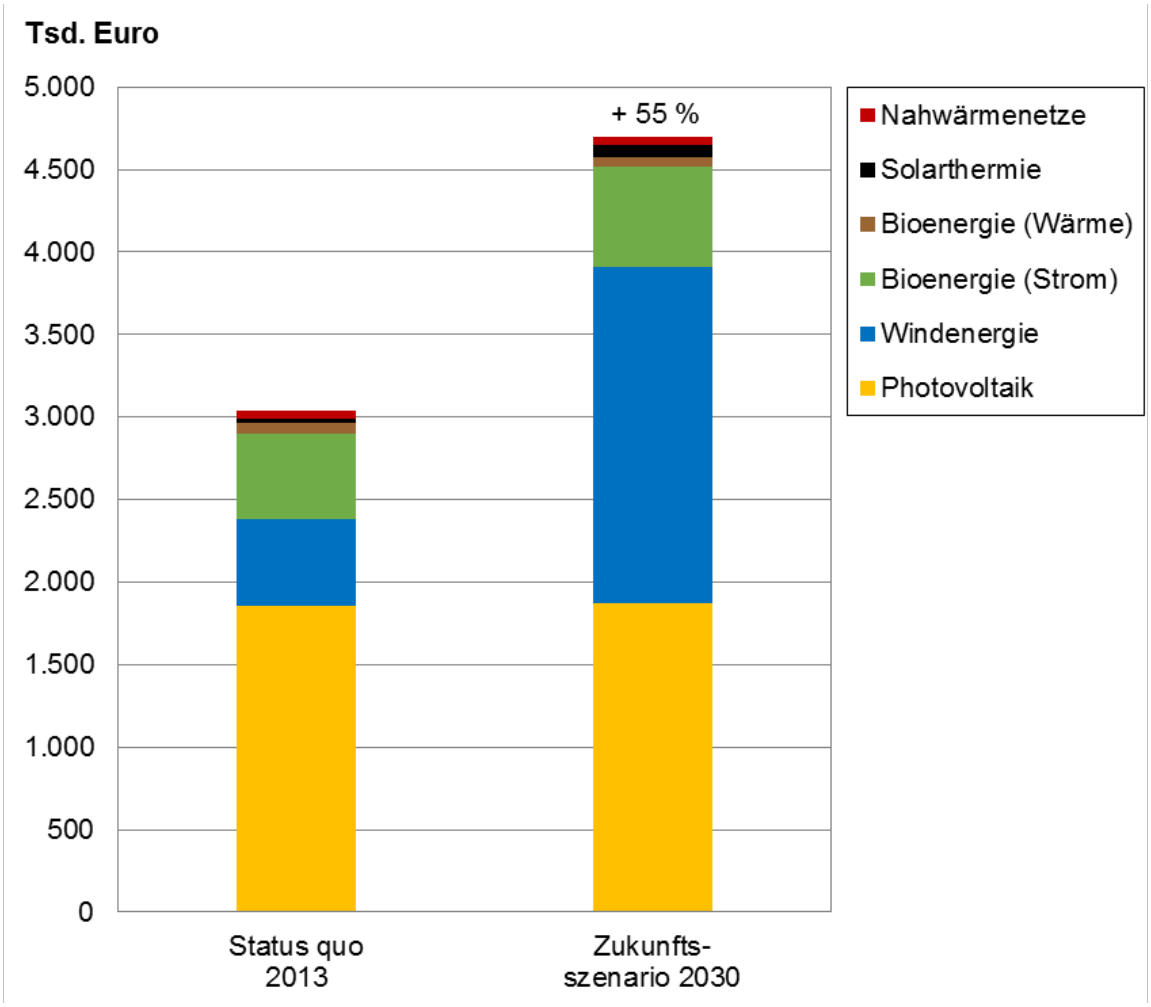


Abbildung 6.10: Regionale Wertschöpfungseffekte durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Jahr 2013 und im Zukunftsszenario a für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen (Quelle: Eigene Darstellung).

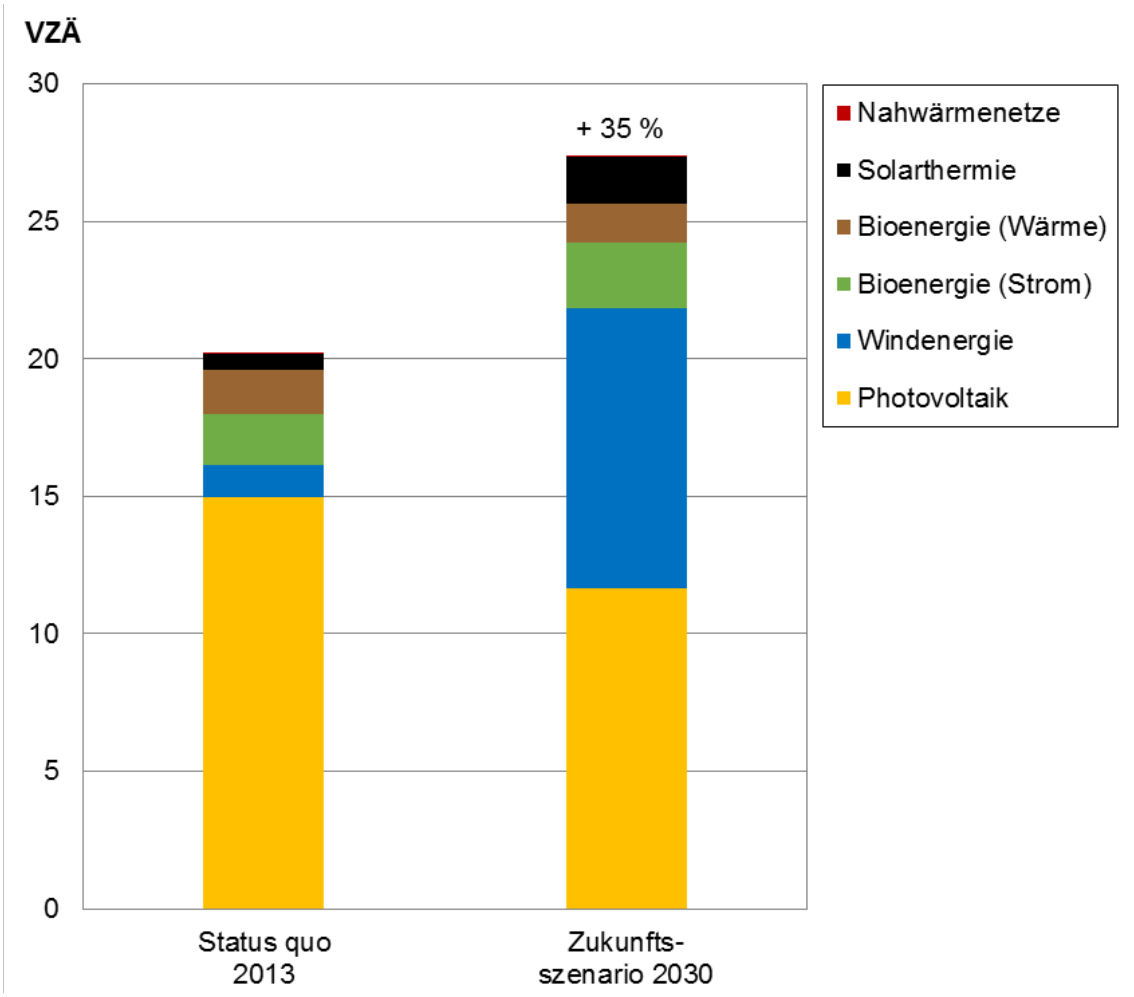


Abbildung 6.11: Beschäftigungseffekte (Vollzeitäquivalente) durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Jahr 2013 und im Zukunftsszenario a für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen (Quelle: Eigene Darstellung).

Abbildung 6.10 zeigt die Ergebnisse für das Jahr 2030 differenziert nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen. Von der regionalen Wertschöpfung entfallen rund 2,5 Mio. Euro auf Gewinne nach Steuern, 0,9 Mio. Euro auf Nettoeinkommen der Beschäftigten und 1,3 Mio. Euro auf kommunale Steuereinnahmen. War 2013 die Photovoltaik im Landkreis bzgl. der Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte mit Abstand die wichtigste EE-Technologie im Landkreis, so liegen im Zukunftsszenario die Effekte bei Wind und Photovoltaik in einer ähnlichen Größenordnung: Circa 40% der Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte sind jeweils auf diese Technologiebereiche zurückzuführen. Mit Blick auf die Photovoltaik zeigt sich gegenüber dem Status quo ein Rückgang der Effekte. Im Jahr 2013 wurden PV-Freiflächenanlagen unter Beteiligung lokal ansässiger Unternehmen bei der Planung und Projektierung zugebaut. Die Arbeiten im Zusammenhang mit der Planung und Installation von PV-Anlagen sind deutlich beschäftigungsintensiver als der Anlagenbetrieb, so dass der Beschäftigungseffekt und damit auch die Nettoeinkommen der Beschäftigten im Jahr 2030 geringer sind. Auch bei den holzbefeuerten Zentralheizungsanlagen ist der geringe Zubau Ursache für den Rückgang der Wertschöpfung und Beschäftigung im Vergleich zu 2013. Die Montage der

Heizungssysteme ist vergleichsweise beschäftigungsintensiv und wird in der Regel von lokalen Handwerksunternehmen durchgeführt. Auch wenn die Effekte durch den Betrieb der Heizungsanlagen 2030 höher sind als 2013, kann dieser Anstieg nicht den Rückgang auf der Stufe Planung und Installation ausgleichen (siehe Abbildung 6.10 und Abbildung 6.11).

Tabelle 6.24: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Zukunftsszenario a für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen (Quelle: Eigene Berechnungen).

2030 a	Gewinne nach Steuern	Nettoeinkommen durch Beschäftigung	Steuern an die Kommunen	**WS kommunale Ebene**	Vollzeitbeschäftigte
	[Tsd. Euro]				[VZÄ]
Photovoltaik	1.209,2	379,2	282,9	1.871,3	11,6
Windenergie	770,5	400,3	869,3	2.040,0	10,2
Bioenergie (Strom)	470,5	52,8	80,9	604,3	2,4
Summe Strom	**2.450,1**	**832,4**	**1.233,1**	**4.515,6**	**24,3**
Bioenergie (Wärme)	16,8	37,7	5,0	59,5	1,4
Solarthermie	25,5	43,9	5,9	75,4	1,7
Nahwärmenetze	38,1	0,0	6,9	45,1	0,0
Summe Wärme	**80,5**	**81,6**	**17,9**	**180,0**	**3,1**
Summe	**2.530,6**	**914,0**	**1.251,0**	**4.695,6**	**27,3**

Tabelle 6.25: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Zukunftsszenario a für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen, (Quelle: Eigene Berechnungen).

2030 a	Planung & Installation	Anlagenbetrieb & Wartung	Betreibergewinne	**WS kommunale Ebene**
	[Tsd. Euro]			
Photovoltaik	31,5	583,5	1.256,4	1.871,3
Windenergie	0,0	1.194,9	845,1	2.040,0
Bioenergie (Strom)	0,0	84,5	519,8	604,3
Summe Strom	**31,5**	**1.862,9**	**2.621,3**	**4.515,6**
Bioenergie (Wärme)	0,7	58,8	0,0	59,5
Solarthermie	33,4	42,0	0,0	75,4
Nahwärmenetze	0,0	0,0	45,0	45,1
Summe Wärme	**34,1**	**100,9**	**45,0**	**180,0**
Summe WS	**65,5**	**1.963,8**	**2.666,3**	**4.695,6**
	[VZÄ]			
Vollzeitbeschäftigte	**1,5**	**25,8**	**-**	**27,3**

Die Ergebnisse für das *Szenario 1* im Jahr 2030 zeigen, welche Effekte in dem Fall zu erwarten wären, dass die Betreibergesellschaften der EE-Anlagen und die EigenkapitalgeberInnen zu 100% im Landkreis ansässig sind. Es ergeben *sich regionale Wertschöpfungseffekte von 10,5 Mio. Euro* (+ 123%) sowie *Beschäftigungseffekte in Höhe von 42 Vollzeitäquivalenten* (+ 55%). Auch wenn zu erwarten ist, dass – wie oben beschrieben – der Anteil regional ansässiger Betreibergesellschaften bis 2030 steigen wird, so werden auch im Zukunftsszenario immer noch knapp 60%[44] ihren Unternehmenssitz außerhalb des Landkreises haben. Auch ist nicht davon auszugehen, dass sich bei dem Anteil der lokal ansässigen EigenkapitalgeberInnen signifikante Änderungen bis 2030 ergeben. So fließt immer noch ein beträchtlicher Anteil der Gewinne aus dem Anlagenbetrieb und den damit verbunden Steuerzahlungen aus dem Landkreis ab, wie der Vergleich der Ergebnisse mit den berechneten Effekten für das Szenario 1 zeigt (siehe Abbildung 6.12 und Abbildung 6.13 und Kapitel 6.2.5.3). Da 2030 ein Großteil der

[44] Bezogen auf die installierte Windenergieleistung im Jahr 2030.

installierten EE-Leistung sowie EE-Stromerzeugung im Landkreis Osterholz auf Windenergieanlagen entfällt, sind die Unterschiede bei dem Zukunftsszenario größer als bei den Berechnungen für den Status quo.

Im Unterschied zu Szenario 1 wirken sich die Annahmen in *Szenario 2* auf die Effekte in allen Wertschöpfungsstufen aus: Wären entlang der Wertschöpfungskette alle Akteure ausschließlich in der Region verortet, würden sich im Zukunftsszenario durch die Planung und Installation sowie den Betrieb der EE-Anlagen im Landkreis auf regionaler Ebene *Wertschöpfungseffekte in Höhe von 11,6 Mio. Euro* (+ 147%) ergeben. Damit verbunden wären knapp *58 Vollzeitarbeitsplätze* (+ 113%) (siehe Abbildung 6.12 und Abbildung 6.13 und Kapitel 6.2.5.3).

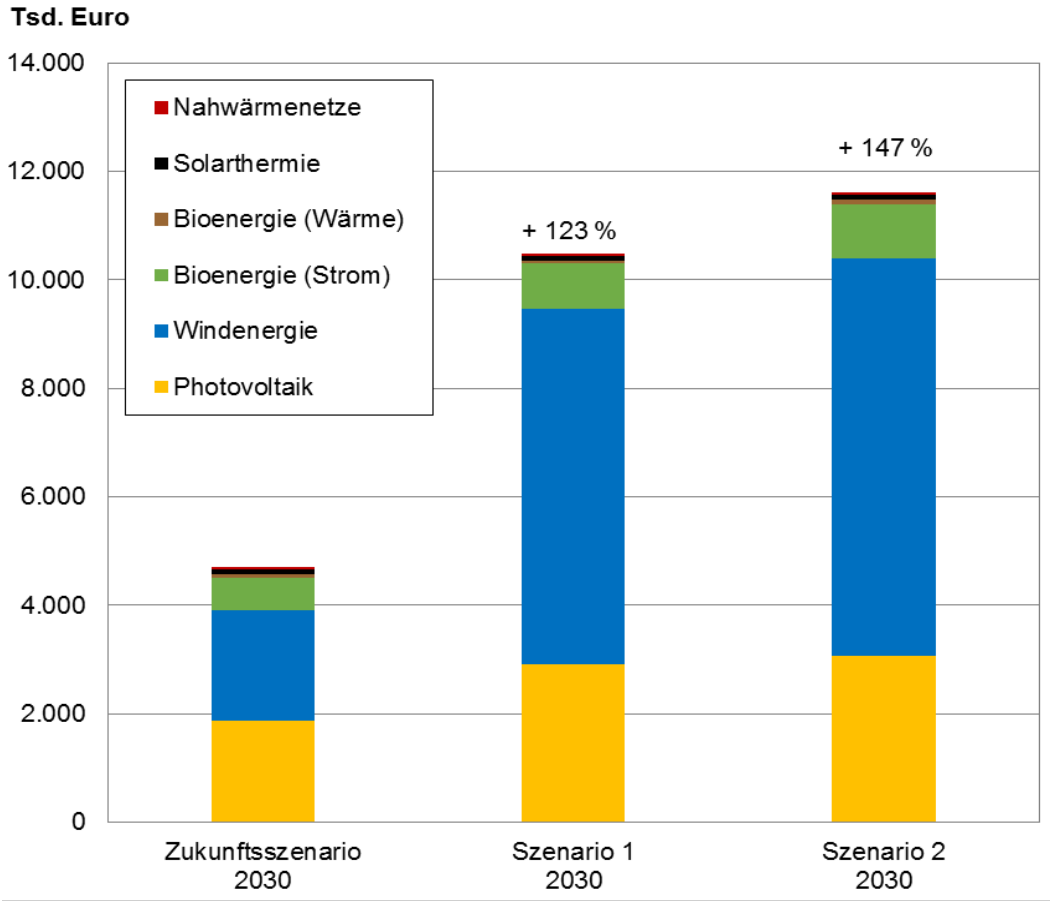


Abbildung 6.12: Regionale Wertschöpfungseffekte durch erneuerbare Energien nach Technologiebereichen im Landkreis Osterholz im Zukunftsszenario a für das Jahr 2030 und die Szenarien 1 und 2 (Quelle: Eigene Darstellung).

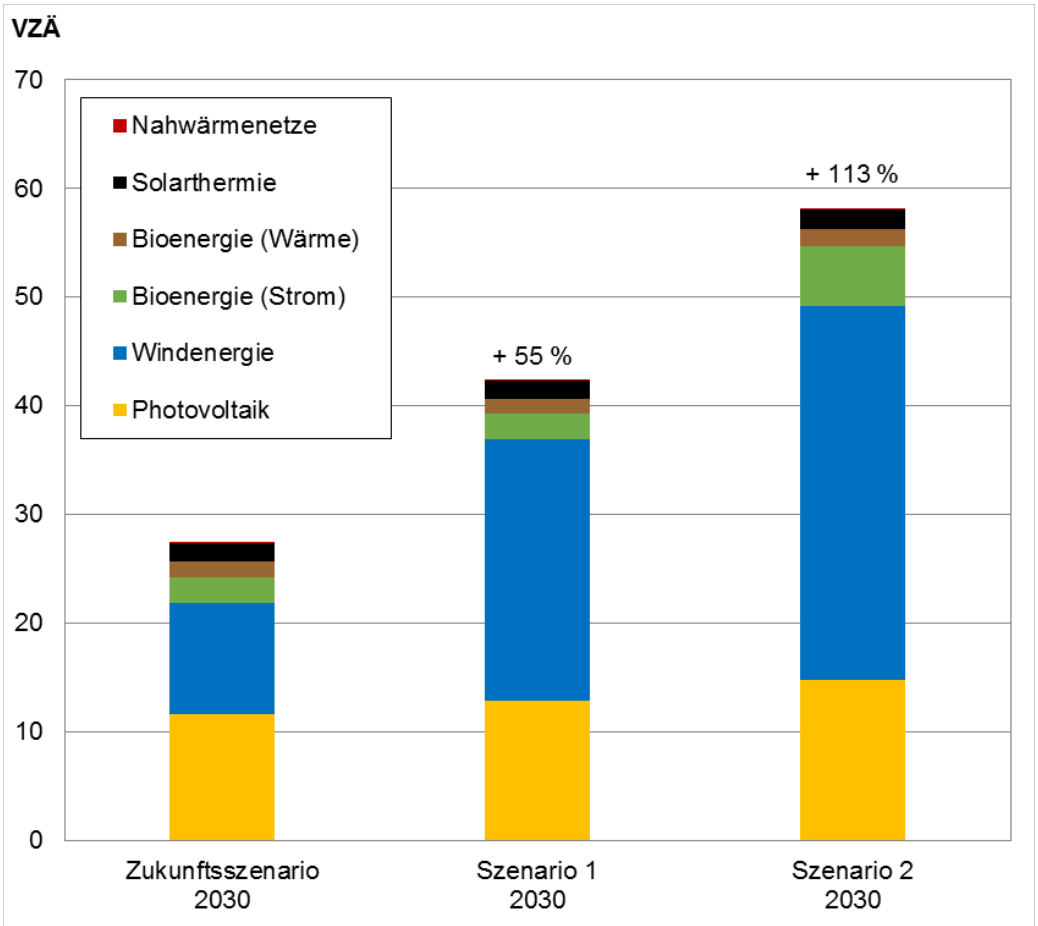


Abbildung 6.13: Beschäftigungseffekte (Vollzeitäquivalente) durch erneuerbare Energien nach Technologiebereichen im Landkreis Osterholz im Zukunftsszenario für das Jahr und die Szenarien 1 und 2 (Quelle: Eigene Darstellung).

6.2.5.3 Ergänzende Ergebnisdarstellung für das Zukunftsszenario 2030 a

Ergänzend zur Ergebnisdarstellung im vorgelagerten Bericht, sind nachfolgend die Ergebnisse der Wertschöpfungsberechnungen für die Szenarien „1“ und „2“, nach Technologiebereichen aufgeschlüsselt, dargestellt.

Tabelle 6.26: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Zukunftsszenario a für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen – Szenario 1 (Quelle: Eigene Berechnungen).

2030a Szenario 1	Gewinne nach Steuern	Nettoeinkommen durch Beschäftigung	Steuern an die Kommunen	**WS kommunale Ebene**	Vollzeitbeschäftigte
	[Tsd. Euro]				[VZÄ]
Photovoltaik	2.136,9	428,9	339,7	2.905,4	12,9
Windenergie	4.211,6	940,3	1.407,0	6.559,0	24,0
Bioenergie (Strom)	698,6	52,8	82,6	834,1	2,4
Summe Strom	**7.047,1**	**1.422,0**	**1.829,4**	**10.298,5**	**39,3**
Bioenergie (Wärme)	16,8	37,7	5,0	59,5	1,4
Solarthermie	25,5	43,9	5,9	75,4	1,7
Nahwärmenetze	38,1	0,0	6,9	45,1	0,0
Summe Wärme	**80,5**	**81,6**	**17,9**	**180,0**	**3,1**
Summe	**7.127,6**	**1.503,7**	**1.847,2**	**10.478,5**	**42,4**

Tabelle 6.27: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Zukunftsszenario a für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen – Szenario 1 (Quelle: Eigene Berechnungen).

2030a Szenario 1	Planung & Installation	Anlagenbetrieb & Wartung	Betreibergewinne	**WS kommunale Ebene**
	[Tsd. Euro]			
Photovoltaik	31,5	636,1	2.237,9	2.905,4
Windenergie	0,0	1.765,7	4.793,3	6.559,0
Bioenergie (Strom)	0,0	84,5	749,6	834,1
Summe Strom	**31,5**	**2.486,2**	**7.780,8**	**10.298,5**
Bioenergie (Wärme)	0,7	58,8	0,0	59,5
Solarthermie	33,4	42,0	0,0	75,4
Nahwärmenetze	0,0	0,0	45,0	45,1
Summe Wärme	**34,1**	**100,9**	**45,0**	**180,0**
Summe WS	**65,5**	**2.587,1**	**7.825,9**	**10.478,5**
	[VZÄ]			
Vollzeitbeschäftigte	**1,5**	**40,8**	**-**	**42,4**

Tabelle 6.28: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Zukunftsszenario a für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen – Szenario 2 (maximale Wertschöpfung) (Quelle: Eigene Berechnungen).

2030a Szenario 2	Gewinne nach Steuern	Nettoeinkommen durch Beschäftigung	Steuern an die Kommunen	**WS kommunale Ebene**	Vollzeitbeschäftigte
	[Tsd. Euro]				[VZÄ]
Photovoltaik	2.233,4	483,9	355,4	3.072,6	14,8
Windenergie	4.626,7	1.224,2	1.474,0	7.324,8	34,4
Bioenergie (Strom)	768,1	137,6	97,9	1.003,7	5,5
Summe Strom	**7.628,1**	**1.845,7**	**1.927,3**	**11.401,1**	**54,7**
Bioenergie (Wärme)	19,4	42,9	5,7	68,0	1,5
Solarthermie	30,2	49,7	7,3	87,1	1,8
Nahwärmenetze	40,1	1,9	7,3	49,4	0,1
Summe Wärme	**89,6**	**94,5**	**20,3**	**204,5**	**3,4**
Summe	**7.717,7**	**1.940,2**	**1.947,6**	**11.605,6**	**58,1**

Tabelle 6.29: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien im Landkreis Osterholz im Zukunftsszenario a für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen – Szenario 2 (maximale Wertschöpfung) (Quelle: Eigene Berechnungen).

2030a Szenario 2	Planung & Installation	Anlagenbetrieb & Wartung	Betreibergewinne	**WS kommunale Ebene**
	[Tsd. Euro]			
Photovoltaik	31,5	803,2	2.237,9	3.072,6
Windenergie	0,0	2.531,5	4.793,3	7.324,8
Bioenergie (Strom)	0,0	254,0	749,6	1.003,7
Summe Strom	**31,5**	**3.588,8**	**7.780,8**	**11.401,1**
Bioenergie (Wärme)	0,7	67,3	0,0	68,0
Solarthermie	33,4	53,8	0,0	87,1
Nahwärmenetze	0,0	4,3	45,0	49,4
Summe Wärme	**34,1**	**125,4**	**45,0**	**204,5**
Summe WS	**65,5**	**3.714,2**	**7.825,9**	**11.605,6**
	[VZÄ]			
Vollzeitbeschäftigte	**1,5**	**56,6**	**-**	**58,1**

6.2.6 Strukturelle Vulnerabilitätsanalyse für den Landkreis Osterholz für die Jahre 2013 und 2030

Die strukturelle Vulnerabilitätsanalyse der Energieversorgung für den Landkreis Osterholz untersucht mögliche Auswirkungen von externem und internem Stress z.B. durch Ausfälle von Komponenten, die zur Minderung oder gar zum Ausfall der Systemleistungen des Energieversorgungssystems führen können.

Es gibt verschiedene Vorgehensweisen für die Durchführung von Vulnerabilitätsanalysen, die sich an der Fragestellung und dem Untersuchungsgegenstand orientieren und im Rahmen des Projekts RESYSTRA weiterentwickelt wurden, siehe Kapitel 5. Für die regionalen Fallstudien, im nachfolgenden den Landkreis Osterholz, wird eine teilweise *prospektive Verwundbarkeitsanalyse* zur Analyse von Verwundbarkeiten zu diskreten Zeitpunkten gewählt, in diesem Fall für die Jahre 2013 und 2030 (siehe Kapitel 5.6). Zentrale Punkte im Vorgehen sind nachfolgend skizziert:

D) Durchführung einer Systemanalyse über eine Systembeschreibung und mit Hilfe einer System-Modellierung des Elektrizitätsnetzes
E) Durchführung von Interviews mit Netzverantwortlichen und regionalen Akteuren zu potenziellen Ausfällen und Schwachstellen im Stromnetz, (vergleiche Interview-Leitfäden und Codetabellen für Interviewauswertung im Anhang)
F) Brainstorming Sessions und Überlegungen zu möglichen Ausfällen
Diskussion erster Ergebnisse und Ergänzungen in einem Workshop mit einem breiten Spektrum lokaler Akteure

Als Grundlage für die Bewertung der verschiedenen Arten von Ausfällen dienen die im Vorfeld ermittelten Indikatoren (vgl. Kapitel 5.6.2). Mit diesen Indikatoren ist möglich zu fünf verschiedenen Ausfallarten eine Einstufung bezüglich Sensibilität und Anpassungsbereitschaft des jeweiligen Systems vorzunehmen.

Die Auswirkungen von potenziellen Ausfällen von Elementen des Energiesystems unter Stress standen im Mittelpunkt der durchgeführten Vulnerabilitätsanalyse. Dabei wurden in einem ersten Schritt die Struktur und die Auslastung des Systems untersucht.

6.2.6.1.1 Aufbau des regionalen Energieversorgungssystems im Landkreis Osterholz

In der Systembeschreibung, Kapitel 6.2.1, wurden bereits einige wichtige sozioökonomische Parameter des Energiesystems im Landkreis Osterholz vorgestellt. Diese Darstellung wird im Folgenden durch technische Daten und Fakten ergänzt, die über leitfadengestützte Interviews mit Netzverantwortlichen sowie weiteren Recherchen ermittelt wurden. Das Netzgebiet des Landkreises Osterholz wird von zwei unterschiedlichen Netzbetreibern versorgt, siehe Kapitel 6.2.1.4. Die Netzverantwortung der Gemeinden Osterholz-Scharmbeck, Ritterhude und Lilienthal liegen bei den Osterholzern Stadtwerken. Die übrigen Gemeinden liegen im EWE Netzgebiet.

Die Netzgebiete der beiden Betreiber weisen eine unterschiedliche Struktur auf. Während es sich bei der topologischen Struktur im Netzgebiet der Osterholzer Stadtwerke im Mittelspannungsbereich um Ringnetze und im Niederspannungsbereich um strahlenförmige Netze handelt, ist die Topographie auf dem Gebiet der EWE maschennetzartig, wobei sich im Niederspannungsbereich auch Strukturen finden lassen, die sich aufgrund der Datenlage nicht weiter spezifizieren lassen. Die Leitungen sind zum allergrößten Teil als Erdleitungen verlegt. Der Freileitungsanteil macht etwa 1% im Mittelspannungsbereich und 0,1% im Niederspannungsbereich aus. Die Mittelspannungsebenen der Gemeinden sind über 4 Umspannwerke (HS/MS) an das Hochspannungsnetz der Avacon im Höchstspannungsnetz der TenneT angeschlossen. Die Umspannwerke werden von der EWE als vorgelagertem Netzbetreiber betrieben. Zwischen den Regionen existieren überregionale Verbindungen, sodass die n-1 Regel einge-

halten wird. Diese können aber maximal eine Leistung von 8-12 MW übertragen. Diese Querleitungen sind im Normalbetrieb nicht aktiv, um möglicherweise entstehende Kuppelströme, die eine Herausforderung darstellen können, zu verhindern.

Die wichtigsten Elemente der regionalen Versorgung, deren Ausfälle später im Rahmen der Vulnerabilitätsanalyse untersucht werden, sind in Abbildung 6.14 schematisch für eine Beispiel-Gemeinde mit Umspannwerk dargestellt.

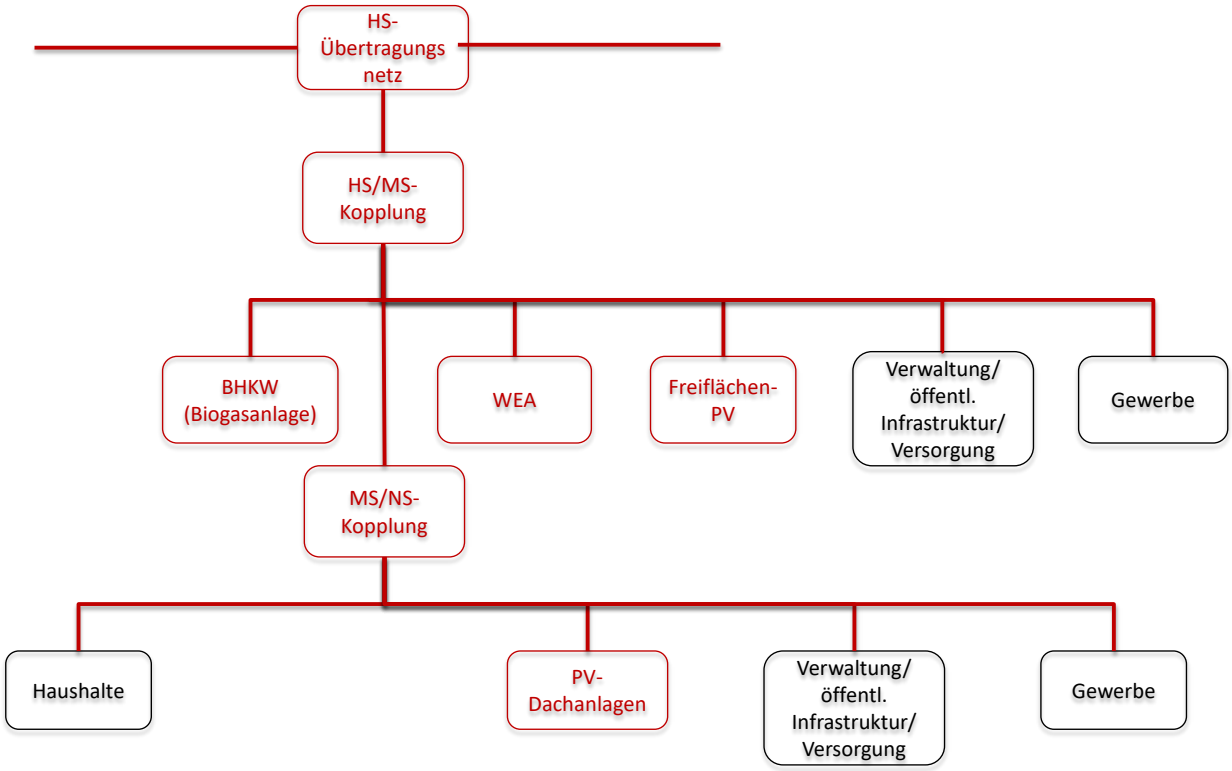


Abbildung 6.14: Vereinfachtes Netzschema für die Elektrizitätsversorgung einer Gemeinde im Landkreis Osterholz. Abkürzungen: HS = Hochspannung, MS = Mittelspannung, Kopplung = Transformatorenstation zur Spannungswandlung zwischen Netzebenen, BHKW = Blockheizkraftwerk, WKA = Windenergieanlage, PV = Photovoltaikanlage (Quelle: Eigene Darstellung)

Die Elemente gliedern sich in das Elektrizitätsnetz bestehend aus a) der Hochspannungsebene und den Kopplungen zwischen b) der Hoch- und Mittelspannungsebene sowie c) der Mittel- und Niederspannungsebene. Eine weitere Elementegruppe bilden die Erzeuger, zu denen a) die PV-Freiflächenanlagen, b) die PV-Dachanlagen, c) die Windenergieanlagen, d) die BHKW der Biogasanlage sowie kleinere BHKW einzelner Haushalte gehören. Die dritte Elementegruppe der Verbraucher besteht aus Gewerbebetrieben, Verwaltungseinrichtungen bzw. Einrichtungen der öffentlichen Versorgung, wie z.B. das Krankenhaus in Osterholz-Schwarmbeck oder diverse Schulen, sowie letztendlich den Haushalten, die zahlenmäßig umfangreichste Verbrauchergruppe.

Die Aufschlüsselung der Wärmeversorgung im Landkreis wurde in der Systembeschreibung dargestellt. An dieser Stelle sei angemerkt, dass kaum Nahwärmenetze vorhanden sind, sodass die vorhandenen Netze bei der Betrachtung der Vulnerabilitäten vernachlässigt werden können.

Der Verkehr im Landkreis findet hauptsächlich über Individualmotorisierung mit fossilen Energieträgern statt. Bahn-Anschlüsse an den Fernverkehr über Bremen sind vorhanden. Immerhin führt eine Straßenbahn nach Lilienthal. Für die Elektromobilität gibt es eine Handvoll öffentlicher Ladesäulen. Es sind sieben weitere Ladesäulen geplant. Bisher ist jedoch keine Schnellladesäule im Landkreis vorhanden.

6.2.6.1.2 Netzstruktur: Erzeugung, Verbrauch, Steuerung und Regelung

Unter der Annahme, dass eine Entlastung des gesamten (regionalen/nationalen) Elektrizitätssystems durch eine zuverlässige regionale Versorgung erreicht werden kann, ist zur langfristigen Beurteilung der Vulnerabilität der regionalen Stromversorgung, eine Gesamtschau der lokalen Erzeugerstruktur und der zugehörigen Netzlasten notwendig.

Im Rahmen einer Vulnerabilitätsanalyse der lokalen Erzeugungsanlagen interessiert deren Diversität. Diversität wird dabei auf verschiedene Arten betrachtet: funktionelle Diversität. Im Einzelnen beinhaltet dies die Vielfalt der Arten der Stromerzeugung, die Diversität der Verbraucher und die Diversität der Steuerung und Erzeugung zu beurteilen.

Die *funktionelle Diversität der Energieerzeugung* (D) kann mit einem von Molyneaux vorgeschlagenen Maß für die Diversität beschrieben werden, das auf dem Anteil unterschiedlicher Energiequellen (E) an der Gesamtenergieerzeugung beruht. Mit diesem Diversitätsindex wird die Wahrscheinlichkeit angegeben, mit der die nächste Einheit elektrischer Energie aus einer anderen Quelle stammt:

$$\boldsymbol{D = 1 - \sum_{i=1}^{N} E^2} \qquad \textbf{(Formel 6.1)}$$

Die möglichen Werte beginnen bei null, falls keine Diversität vorliegt und die gesamte Erzeugung auf nur einen Anlagentyp zurückgeht[45]. Sehr hohe Diversitäten nähern sich dem Index 1 an. Die für den Landkreis Osterholz beim Status quo bzw. den Zukunftsszenarien für 2030 erreichten Werte sind in der Tabelle 6.30 dargestellt. Die funktionelle Diversität der Erzeugungsstruktur des Landkreises Osterholzes liegt im mittleren Bereich und verändert sich für das Szenario 2030 a und 2030 b beträchtlich, da der Ausbau der Eigenerzeugung bis zu einem bestimmten Grad die Diversität im Landkreis erhöht. Beim Szenario 2030 b zeigt sich, dass

[45] Nach Molyneaux kann die funktionelle Diversität der Stromerzeugung als Quadratsumme der Leistungsanteile der unterschiedlichen Erzeugerarten an der gesamten Erzeugungsleistung dargestellt werden (Molyneaux et al. (2012)).

ein höherer Ausbau der Photovoltaik im Vergleich zum Windausbau in dieser Hinsicht vorteilhaft wäre.

Tabelle 6.30: Diversität der Anteile der Energieerzeugung am Gesamtelektrizitätsbedarf im Landkreis Osterholz für das Jahr 2013 und in den Szenarien 2030a/b und 2040 (regionale Zelle).

Szenario/Jahr	2013	2030 a	2030 b	2040 (regionale Zelle)
Diversität der Erzeugung	0,586	0,638	0,678	0,381

Bei zu starkem Ausbau von lediglich zwei Erzeugungsquellen, nämlich Windkraft und Photovoltaik, wie dies im Szenario 2040 (regionale Zelle) angenommen wird, sinkt für die regionale Zelle die Diversität. Dies könnte mit Speichern ausgeglichen werden, die bei dieser Betrachtung nicht als Erzeuger berücksichtigt wurden.

Ergänzend zur Diversität lässt sich die die Dispersion (räumliche Verteilung) der Erzeugungsanlagen ermitteln, indem ihre regionale Verteilung qualitativ beurteilt wird. Die **Dispersion** in Landkreis Osterholz kann als relativ hoch eingestuft werden. Dies liegt daran, dass sich alle Erzeugungsanlagen größtenteils an unterschiedlichen Standorten im Landkreis befinden. Dennoch ist die betrachtete regionale Ausdehnung eines einzelnen Landkreises zu klein, um einen nachhaltig positiven Effekt bei äußeren Störungen, wie Sturm, Überschwemmung oder längerer Dunkelflaute bewirken zu können.

Neben der Diversität der Energieerzeugung soll zur Beurteilung der Vulnerabilität eines Energiesystems auch die *Diversität der Verbraucher* ermittelt werden. Dabei soll im Rahmen dieser Analyse nur die Größe der Verbraucher, d.h. ihr geschätzter Anteil an der gesamten Netzlast bewertet werden. Die Vulnerabilität des Netzes steigt mit dem Anteil von Großverbraucher an der gesamten Netzlast, weil gebündelte Ausfälle oder eine Störung signifikante und unkontrollierbare Lastwechsel bewirken können. Für den Landkreis Osterholz erhielten wir die Information von den Netzverantwortlichen, dass einzelne Großverbraucher, die mehr als 10% der Gesamtnetzlast verursachen, in vernachlässigbarer Zahl vorhanden seien. Aus Abbildung 6.5 wird ersichtlich, dass private Haushalte als Verbraucher dominieren. Da der Verbrauch von Haushalten relativ gering ist, wirkt sich eine gewisse Gleichverteilung über den Landkreis bei möglichen Ausfällen stabilisierend auf das Netz aus.

Weiterhin wurde die *Diversität der Steuerung und Regelung* von Anlagen und Netz im Landkreis Osterholz analysiert. Eine von höheren Netzebenen unabhängige Steuerung und Regelung ist in dem vergleichsweise kleinen Netzgebiet der Osterholzer Stadtwerke und der EWE auf dem Gebiet des Landkreises Osterholz nicht vorhanden. Die Führungsgrößen Spannung und Frequenz werden infolge der starren Kopplung von Hoch- Mittel- und Niederspannungsebene durch das Hochspannungsnetz, bzw. um genauer zu sein vom Höchstspannungsnetz – 380 kV-Ebene, bestimmt. Aufgrund der bisher, verglichen mit dem Verbrauch, geringen Ein-

speisung fluktuierender Erneuerbarer Energien mit einem Anteil von 39% am Gesamtstrombedarf im Jahr 2013 gab es zum Jahr 2015 keine Rückeinspeiseereignisse. Dies wird sich in den nächsten Jahren mit den neuen Windparks, die in den Jahren 2015 bis 2017 gebaut werden; ändern, siehe hierzu auch Kapitel 6.2.4 Als verantwortlicher Netzbetreiber haben die Osterholzer Stadtwerke hierfür bereits vorgesorgt und die betroffenen Umspannwerke aufgerüstet.

6.2.6.1.3 Analyse von Netzlasten und Bedarfsdeckung

Ergänzend zur Analyse des generellen Aufbaus der Netzinfrastruktur wurde für das Gebiet der Osterholzer Stadtwerke eine Analyse der Lasten und der Bedarfsdeckung (im Sinne von zeitgleicher Selbstversorgung) durch eigene Anlagen durchgeführt. Die Grundlage für die Modellierung der dazu ermittelten Residuallastkurven bilden Jahreslastgänge des Stromverbrauchs sowie der Stromerzeugung durch WKA, PV-Anlagen und Biomasseverwertung im Netz der Osterholzer Stadtwerke für das Jahr 2013. Aufgrund einer Inkonsistenz bei der Zuordnung der Biogasanlagen zum Landkreisgebiet wurde für die Modellierung der Biogasanlagen ein um 86 kW reduzierter Wert verwendet, also mit einer installierten Biogasleistung von 5636 kW gearbeitet.

Mithilfe der im Kapitel 6.2.4 vorgestellten Szenarien über mögliche zukünftige Strukturen der Stromerzeugung im Landkreis Osterholz wurden zudem die Lasten und die zeitgleiche Selbstversorgung für das Bezugsjahr 2030 modelliert.

Für die Modellierung wurde die vom Reiner Lemoine Institut für Energiesysteme entwickelte quelloffene Modellierungssoftware OEMOF (Open Energy-System Modelling Framework) in der Version 0.0.7 verwendet. Die Netzlasten wurden in stündlicher Auflösung in die Modellierung einbezogen (Hilpert et al. 2017), siehe auch Kapitel 5.5.

6.2.6.1.3.1 Modell des lokalen Energiesystems

Die Modellierung des Elektrizitätsbereichs im Energiesystem des Landkreises Osterholz berücksichtigt einerseits fünf Regionen, welche die Mittelspannungsebene darstellen, mit je 1-3 Gemeinden, welche ausschließlich Netze auf der Niederspannungsebene haben. Diese Aufteilung für die Modellierung wurde aus Netztopologischen- und Modellierungsgründen vorgenommen und ist in Abbildung 6.15, einer Karte des Mittelspannungsnetzes im Landkreis Osterholz dargestellt. Die Regionenbildung dient der Evolution des Systems zu einer zellförmigen Strukturierung (Kubina 2016). Dabei sind die Gemeinden symmetrisch aufgebaut und für den Verbrauch wurde die Anzahl der Haushalte und Gewerbe berücksichtigt.

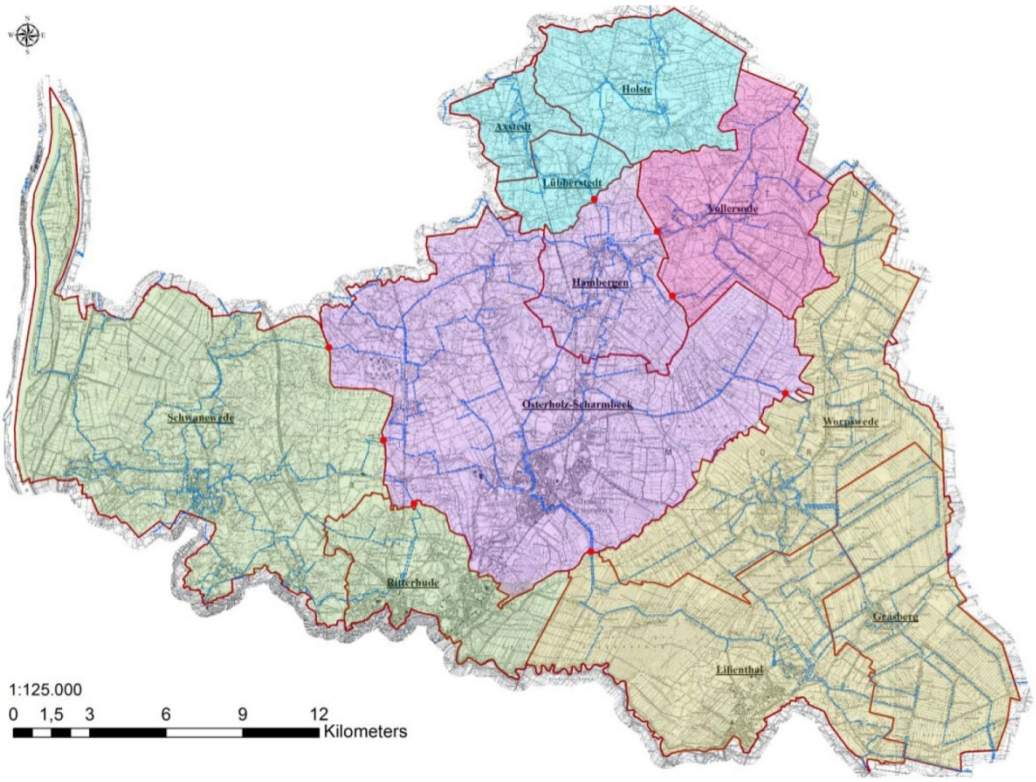


Abbildung 6.15: Darstellung des Mittelspannungsnetzes des Landkreises Osterholz und Unterteilung in 5 Regionen. Legende: Blau: Mittelspannungsleitungen, Rot (Punkte): Überregionale Leitungen; Eingefärbte Flächen: Gelb: Region 1, Grün: Region 2, Violett: Region 3, Rot: Region 4, Blau: Region 5, (Kubina 2016)

Die Elemente des Stromnetzes des Landkreises Osterholz wurden vereinfachend in die Klassen

1) Übertragungsnetz mit den Netzebenen Hochspannung, Mittelspannung und Niederspannung,

2) Transformatoren für die Verbindung der Netzebenen,

3) Energieerzeuger als Quellen (Source) mit einer maximalen Leistung in MW und einer im Jahresgang variablen Einspeiseleistung entsprechend

a) einer zugeordneten Jahresdauerlinie oder

b) den Erfordernissen einer Optimierung der Bilanz der Energieversorgung im lokalen Netz

4) Speicher mit einer maximalen Speicherfähigkeit, festen Werten für den Wirkungsgrad sowie Lade- und Entladeraten und - entsprechend den Erfordernissen der Kostenoptimierung - im Jahresgang variablen Werten der Speicherladung

5) Verbraucher (Sink), deren Last bei allen Modellierungsansätzen im Jahresgang entsprechend einer vorliegenden Jahresdauerlinie variiert wird, sowie

6) einem Speicher des Übertragungsnetzes mit unendlicher Speicherfähigkeit, um die Rückspeisung ins vorgelagerte Hochspannungsnetz im Jahresgang modellieren zu können.

Eine tiefergehende Darstellung des Modells findet sich in der Masterarbeit von Konstantin Kubina (Kubina 2016).

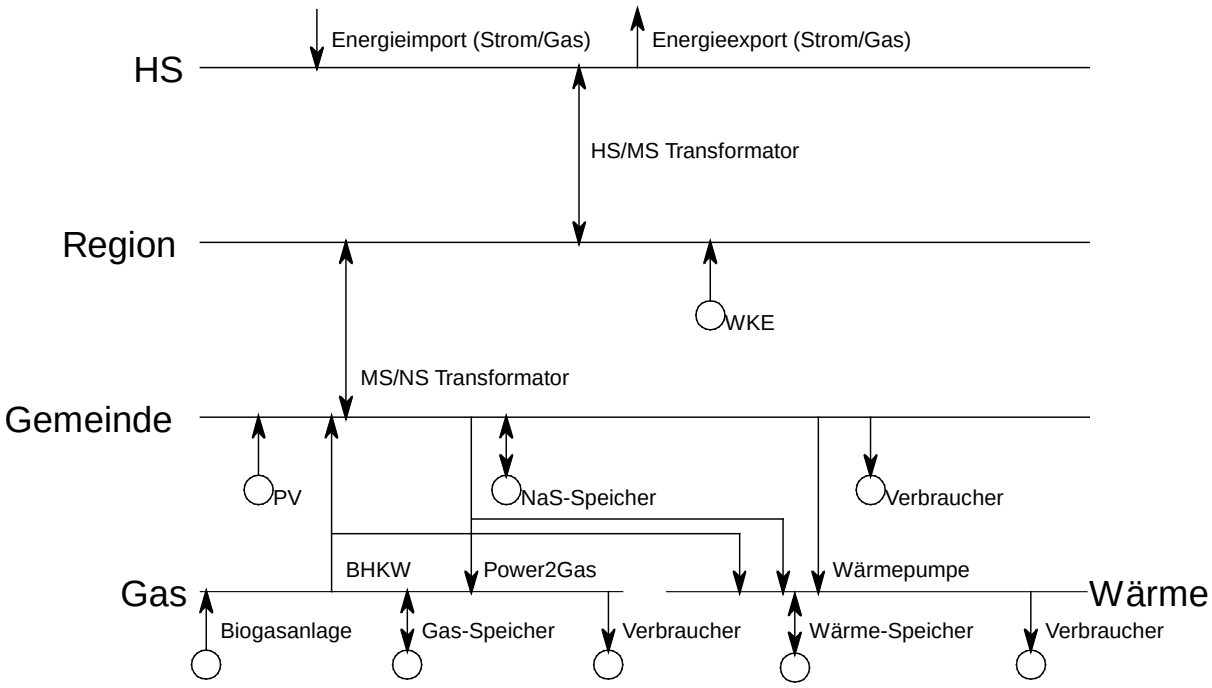


Abbildung 6.16: Vereinfachte Modelldarstellung für eine Region mit Einspeiseebenen, Erzeugern und Verbraucher (Wandler). (Quelle: Eigene Darstellung)

Abbildung 6.16: Vereinfachte Modelldarstellung für eine Region mit Einspeiseebenen, Erzeugern und Verbraucher (Wandler). Es ist lediglich eine Gemeinde, die über einen MS/NS Transformator mit der Region verbunden ist und in die Windkraftanlagen (WKE=WKA) einspeisen, dargestellt. Auf Gemeindeebene sind neben dem Niederspannungsnetz, an das die Erzeuger Photovoltaikanlage, BHKW, NaS-Speicher und die Verbraucher, Power2Gas und NaS-Speicher angeschlossen sind, ebenso ein Gasnetz mit Biogaserzeuger, Power2Gas-Erzeuger, Gasspeicher und Verbraucher, und schließlich auch ein Wärmenetz mit den Erzeugern BHKW, Power2Gas, Wärmepumpe, Wärme-Speicher und Verbraucher dargestellt.

6.2.6.1.3.2 Netzlasten für den Status quo2013, sowie Szenarien 2030 u. 2040

6.2.6.1.3.2.1 Szenarien für die Modellierung.

Die Datengrundlage für die Szenarien für die Modellierung unterscheidet sich minimal von der, die für die Ermittlung der Wertschöpfung zugrunde gelegt wurde. Der Grund hierfür lag darin, dass das Regionenmodell eine exakte Zuordnung der Anlagen zu Gemeinden erfordert. Die ermittelten Zahlen, die uns teilweise vom Landkreis, z.B. mittels der Monitoringberichte (Landkreis Osterholz 2014d), zur Verfügung gestellt wurden, wichen jedoch von den Daten der Energy-Map ab. Die unteren Daten basieren bis auf die Windkraftleistung, die sich an auf die Daten des Monitoringberichtes beziehen, auf den Energy-Map Daten (Kubina 2016).

Tabelle 6.31: Darstellung des Bestandsszenarios für das Jahr 2013 und der beiden Zukunftsszenarien für 2030 a (normaler PV Ausbau) und 2030 b (sehr starker PV Ausbau) für die Modellierungen.

Erzeuger/Speicher/Verbrauch	2013	2030a/2030b
Photovoltaik Leistung	49.231 kW	72.560 kW / 120.000 kW
Windkraft Leistung	51.290 kW	205.700 kW
BHKW Leistung	7.228 kWel	7.274 kWel / Biogas 16,91 kWgas
Solarthermie Fläche	11.055 m²	43.973 m²
Power-to-Gas Leistung	0 kW	0 kW
KFA-Leistung	17.000 kWth	18,534 kWth
Wärmepumpen Leistung	0 kW	0 kW
Energiespeicher	0 kWh	0 kWh
Energiebedarf Haushalte [kWh]	**421.664.866**	**516.104.600**
Energiebedarf Gewerbe [kWh] (ohne fossile Mobilität)	421.664.866	666.738.000

Für die Darstellung der Einspeisung der Biogasanlagen in den Modellierungen für die Jahre 2013 und 2030 wurde als Veränderung aufgenommen, dass im Jahr 2013 die Biogasanlagen durch Verbrennung des Gases Strom ins elektrische Netz einspeisen, während im Jahr 2030 eine Einspeisung ins Gasnetz angenommen wurde. Die Leistung der Transformatoren wurde grundsätzlich mit 400 kVA angesetzt.

6.2.6.1.3.2.2 Szenarien für den Zubau aufgeschlüsselt nach Regionen und Gemeinden

In den nachstehenden Tabellen ist ein Vergleich des Zubaus für die unterschiedlichen Regionen und Gemeinden für die Szenarien 2030 a/b und 2040 dargestellt.

Tabelle 6.32: Darstellung der von der Modellierung vorgeschlagenen Erweiterungen der Energieerzeuger-Komponenten des Energiesystems für das Szenario 2030 a/b. Die Werte sind jeweils in MWel bzw. bei der Biogaserzeugung in MWgas angegeben. (Quelle: Eigene Darstellung, angelehnt an Kubina 2016)

Zelle	Photovoltaik [MWel] Szenario: 2030 a/b	Biogaserzeugung [MWel]	Windkraftanlage [MWel]
Region 1			60,3
Region 2			65,1
Region 3			75,4
Region 4			2,7
Region 5			5,2
Axstedt	0,8 / 1,32	0,07	
Grasberg	4,5 / 7,44	0,5	
Hambergen	3,6 / 5,95	0,3	
Holste	0,7 / 1,16	0,06	
Lilienthal	12,0 / 19,83	1,2	
Lübberstedt	0,5 / 0,83	0,06	
Osterholz Scharmbeck	19,7 / 32,55	2,2	
Ritterhude	10,1 / 16,69	1,4	
Schwanewede	12,7 / 20,99	0,9	
Vollersode	1,8 / 2,97	0,1	
Worpswede	6,2 / 10,25	0,4	
Summe	72,5 / 119,97	7,3	205,7

Tabelle 6.33: Darstellung der von der Simulation vorgeschlagenen Erweiterungen der Energieerzeuger-Komponenten des Energiesystems für das Szenario 2040. Die Werte sind jeweils in MWel bzw. bei der Biogaserzeugung in MWgas angegeben. (Quelle: Eigene Darstellung)

Zelle	Photovoltaik [MWel]	Biogaserzeugung [MWgas]	Windkraftanlage [MWel]
Region 1			87,67
Region 2			92,52
Region 3			102,61
Region 4			4,40
Region 5			7,18
Axstedt	2,21	0,16	
Grasberg	15,34	1,09	
Hambergen	11,5	0,74	
Holste	2,06	0,14	
Lilienthal	44,31	2,85	
Lübberstedt	1,73	0,14	
Osterholz Scharmbeck	81,37	5,22	
Ritterhude	49,78	3,18	
Schwanewede	31,46	2,16	
Vollersode	3,45	0,23	
Worpswede	14,52	1,02	
Summe	257,73	16,92	294,37

6.2.6.1.3.2.3 Ergebnisse: Residuallastkurven für 2013 und 2030

Die Modellierung des Status quo des Elektrizitätssystems im Jahre 2013 ergab, dass die zeitgleiche Eigenversorgungsquote bei 28% liegt. Die geordnete Residuallastkurve ist in Abbildung 6.17 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass an wenigen Stunden im Jahr eine Rückspeisung stattfindet. Bei Betrachtung von Erzeugung und Verbrauch in Abbildung 6.17 wird ersichtlich, dass vor allem in den Sommermonaten der Verbrauch sinkt.

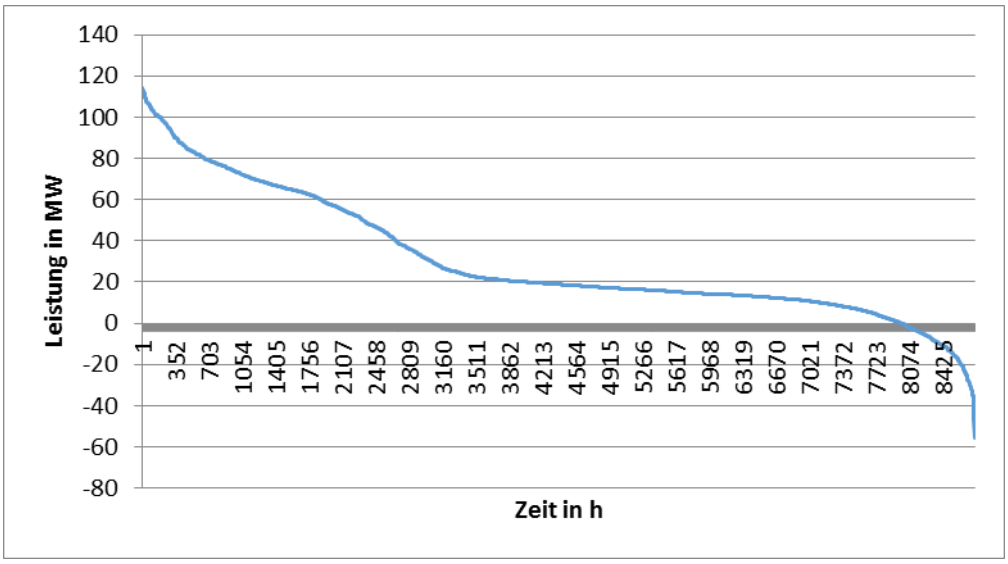


Abbildung 6.17: Residuallastkurve der Elektrizitätsversorgung auf dem Gebiet des Landkreises Osterholz für das Jahr 2013 (Eigene Darstellung)

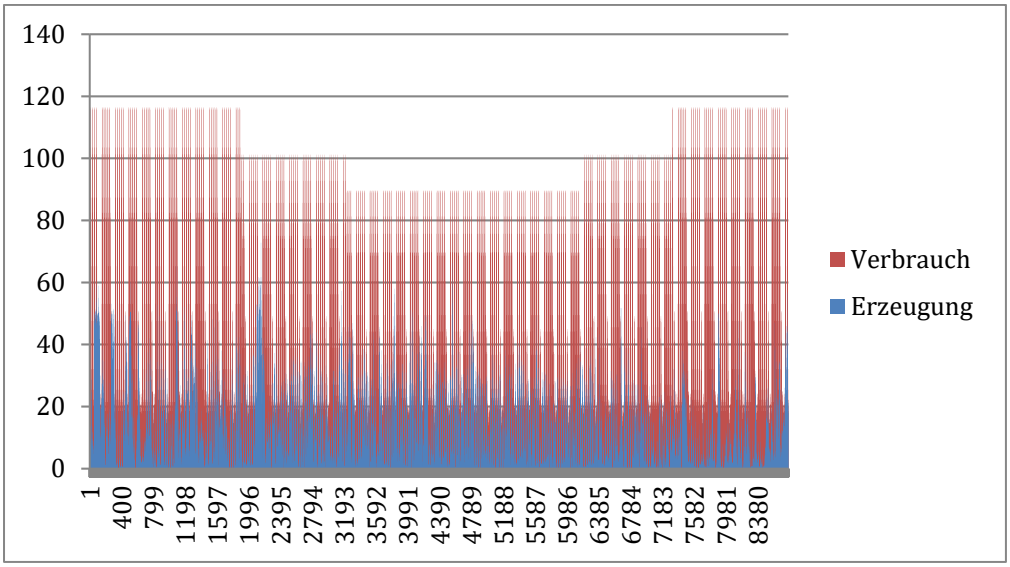


Abbildung 6.18: Darstellung der stündlichen Erzeugung und des Verbrauchs im Landkreis Osterholz im Jahr 2013; Aus Verbrauchsdaten ermittelte Datengrundlage und mit Reallastgängen aus dem Netzgebiet der Osterholzer Stadtwerke kalibriert (Eigene Darstellung)

Für die Modellierung der Szenarien a und b für das Jahr 2030 wurde neben der Elektrizitäts- auch die Wärmeversorgung und Mobilität berücksichtigt. Die sich draus ergebende Residuallastkurven zeigen, dass aufgrund des höheren Strombedarfs auch der Leistungsbezug aus dem Netz steigt. Die steigende Rückeinspeisung ist eine Konsequenz des verstärkten Ausbaus Erneuerbaren Energien. Im Übrigen ist aufgrund des massiven Zubaus von Windkraftanlagen in den Jahren 2016/2017 das Risiko, dass die Zubaupläne geändert oder gar storniert werden sehr gering, woraus sich schließen lässt, dass es sich um realistische Szenarien handelt.

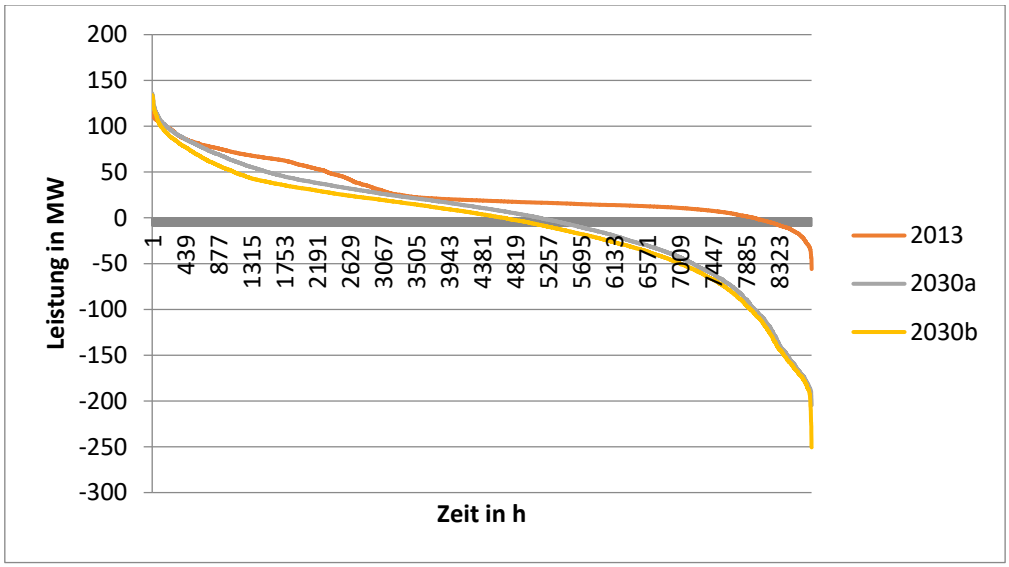


Abbildung 6.19: Residuallastkurve für die elektrische Energieversorgung des Landkreises Osterholz in den Jahren 2013 einschließlich der Szenarien 2030 a und 2030 b (verstärkter PV Ausbau) mit Berücksichtigung der Wärmeversorgung und Mobilität, die mit dem Elektrizitätsnetz gekoppelt wurden (Eigene Darstellung).

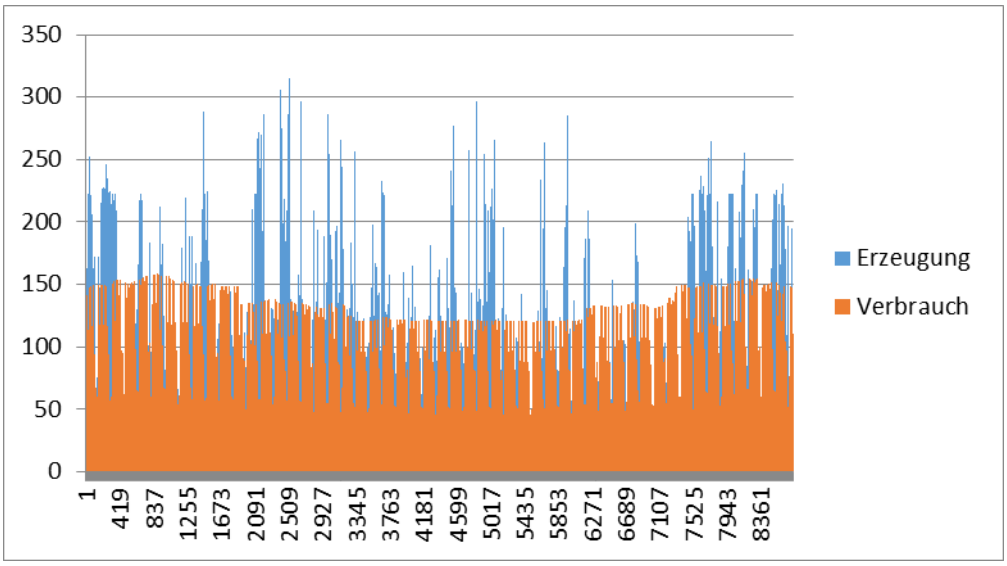


Abbildung 6.20: Stündliche Auflösung der Erzeugung und des Verbrauchs im Landkreis Osterholz für das Szenario 2030b; Datengrundlage simuliert, Erzeugungslastgänge für PV und Wind auf Grundlage der Realerzeugung im Jahr 2015 (Quelle Eigene Darstellung basierend auf Daten von REON AG 2016)

6.2.6.1.3.2.4 Der Landkreis als Zelle – Modellierungsergebnisse: Szenario 2040

Der nachfolgende Abschnitt stellt Modellierungsergebnisse für eine mögliche Implementierung in Form einer regionalen Zelle vor, für das Jahr 2040 bei einem Stromimport von 5% und Gasimport von 10%. Die Inputparameter wurden bei den Szenarien im Kapitel 6.2.4 dargelegt. Das Modell beschränkt sich auf die Ermittlung der notwendigen Auslegungsparameter der Erzeugungsanlagen ohne Regelinfrastruktur oder Regelkonzepte zu berücksichtigen. Als Output liefert das Modell stündlich aufgelöste Zeitreihen für die einzelnen Komponenten, Erneuerbarer Energien Erzeugungsanlagen, Gaserzeugungsanlagen, elektrische Speicher, P2G Umwandler, Wärmepumpen, Wärme- und Gasspeicher, wie in Abbildung 6.20 dargestellt. Aus

diesen Zeitreihen lassen sich Parameter, wie z.B. die maximale Leistung, einfach ermitteln. Die jeweiligen Investitions- und Betriebskosten sind im Kapitel 6.2.4 sowie in (Kubina 2016) dargestellt.

Tabelle 6.34: Darstellung der Komponenten, die vom Modell berücksichtigt werden.

Erzeugungsanlagen	Umwandler	Speicher / Netze
Windkraftanlagen	Power-to-Gas Anlagen	Transportleitungen
Photovoltaikanlagen	BHKW	Externer Gasspeicher
Biogasanlagen	Wärmepumpen	Transformatoren
		Elektrochemische Speicher (Batterien)
		Gemeinde-Gasspeicher
		Wärmespeicher

Die Modellierung zeigt auf, dass etwa 294 MW Windkraftanlagen und 258 MW Photovoltaikanlagen zu installieren wären. Die Biogaserzeugung, deren Ausbau wir auf etwa 17 MW beschränkt haben, wird vollständig ausgeschöpft. An deren Leistung orientiert sich die Strom- und Wärmeerzeugung über Blockheizkraftwerke. Um die Beschränkung des Gasimportes aufzufangen, müssen in dieser Konfiguration etwa 22 MW Leistung an Power-to-Gas Anlagen installiert werden. 16 MW Wärmepumpenleistung und 1562 MWh Gasspeicher werden benötigt.

Es ist beachtlich, dass trotz steigendem Stromverbrauch um etwa 50%, die Maximallast, d.h. die Leistung die aus dem übergeordneten Netz bezogen wird, nicht ansteigt und 125 MW beträgt. Dabei wird etwa zur Hälfte der Zeit eine relativ kleine Last an Importstrom aus dem vorgelagerten Netz bezogen. Anders verhält es sich mit der Rückspeisung. Hier ergibt sich aufgrund der hohen Ausbauzahlen eine Spitzenleistung von etwa 428 MW. Der Zeitraum, an dem diese hohe Leistung erzeugt wird, ist jedoch kurz. An 41 h im Jahr beträgt die erzeugte Leistung mehr als 300 MW. An 97 Stunden im Jahr ist die erzeugte Leistung im Landkreis höher als 250 MW. An 391 Stunden pro Jahr beträgt die Leistung mehr als 200 MW.

Tabelle 6.35: Installierte Leistung der Erzeugungsanlagen und Speicherkapazitäten von Speichern gemäß den Modellierungsergebnissen für Szenario 2040, in dem das Energiesystem des Landkreises als Zelle konfiguriert ist.

	Installierte Leistung [MW]
Photovoltaik	257,73
Wind	294,37
Biogaserzeugung	16,93
BHKW Leistung (Gas)	16,92
BHKW Leistung elektrisch	7,27
Power-to-Gas Leistung	22,45
Wärmepumpen Leistung	16,25
	Speicherkapazität in [MWh]
Elektrizitätsspeicher	395,46
Gasspeicher gesamt	13518,32
Gasspeicher intern	534,48
Gasspeicher extern	12983,85
Wärmespeicher	1562,28

Um die Ausbaukosten der Netze wirtschaftlich zu halten, wird eine Reduzierung der Leistung der Erzeugungsanlagen bei einer negativen Residuallast über 250 MW empfohlen. Die Mengen unterhalb dieser Schwelle sind durch Power-to-X Anlagen in geeignete Energieträger wie Wärme oder Gas umzuwandeln.

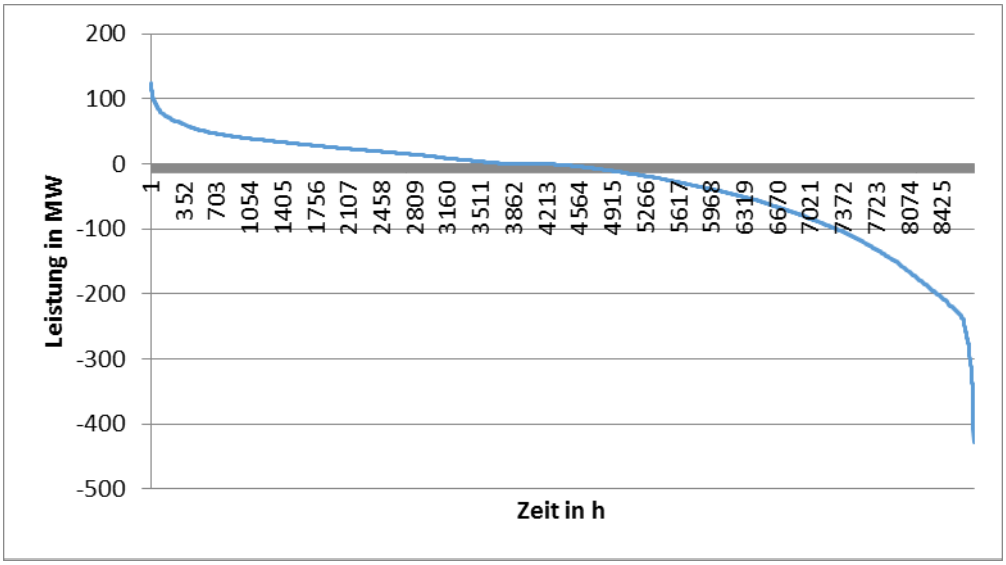


Abbildung 6.21: Residuallastkurve der Simulation des Osterholzer Landkreises als regionale Zelle, die einen externen Strombezug von 5% und Gasbezug von 10% zulässt. (Quelle: Eigene Darstellung).

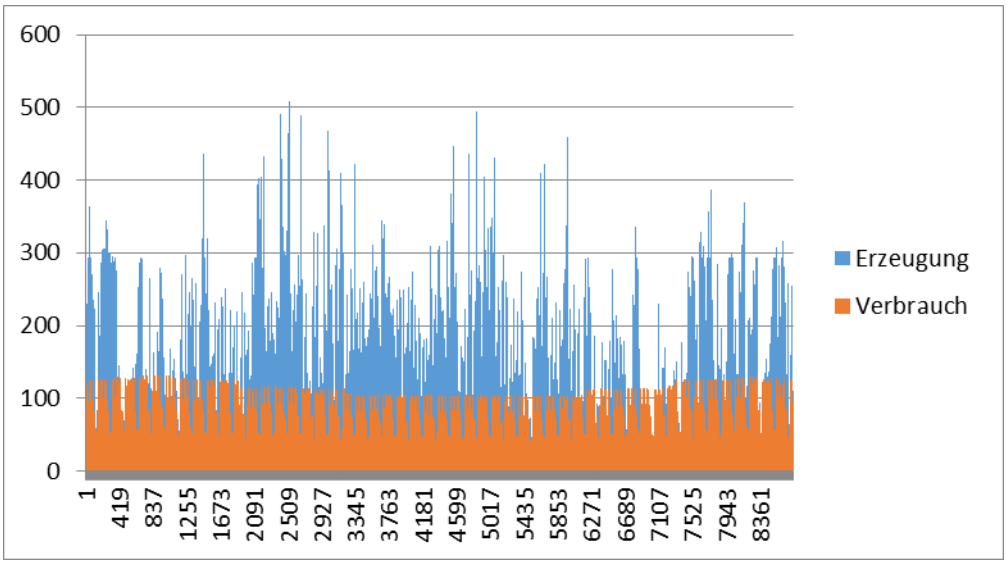


Abbildung 6.22: Darstellung der Erzeugung und des Verbrauchs im Landkreis Osterholz im Modell der regionalen Zelle für das Jahr 2040 (Quelle: Eigene Darstellung).

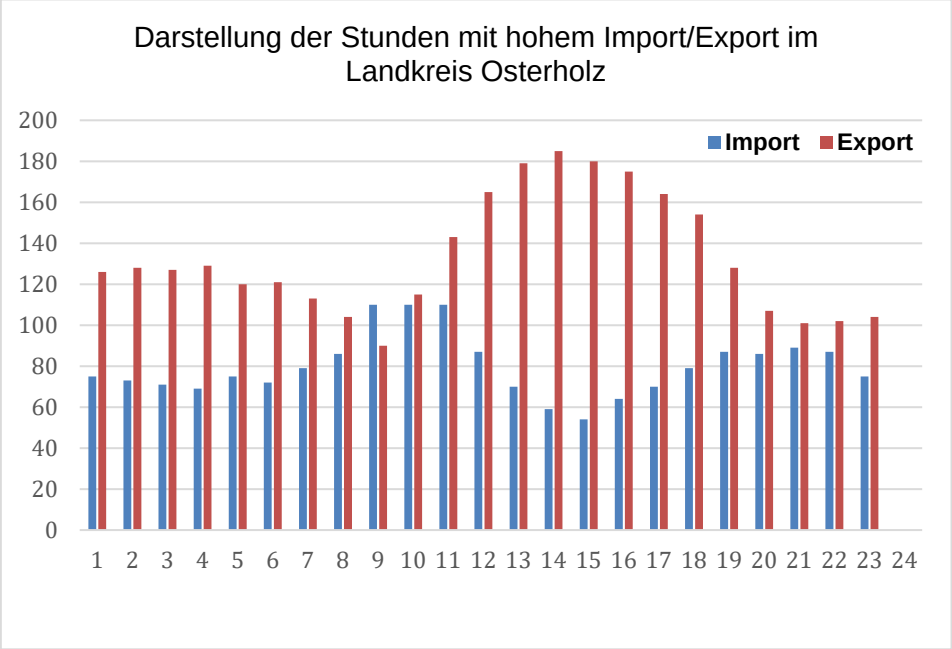


Abbildung 6.23: Darstellung der Häufigkeit von Strom-Import und Exportereignissen über die Stunden des Tages für den Landkreis Osterholz im Szenario 2040 (regionale Zelle).

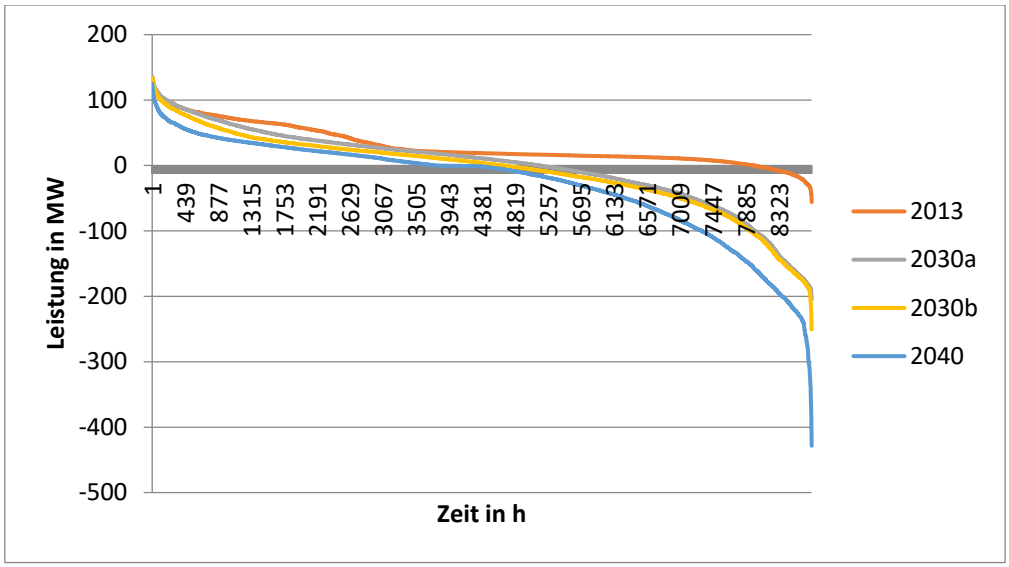


Abbildung 6.24: Vergleich der Residuallastkurven für die Szenarien der Jahre 2030 a, 2030 b und 2040 (regionale Zelle) mit dem status quo im Jahr 2013 (Quelle: Eigene Darstellung).

Für einen erzielten zellularen Aufbau des Energiesystems setzen wir das Jahr 2040 an. Zu diesem Zeitpunkt soll die Zelle möglichst zu 100% aus EE versorgt werden können, wobei 5% an Netzbezug zugelassen werden.

Bei zukünftigen Modellierungen ist das Zusammenspiel der unterschiedlichen Erzeuger aus Sicht der Steuerung und Regelung zu betrachten. Das Ziel solch einer Modellierung bestünde darin resiliente Netz und Steuerungsdesigns in der Zelle selbst zu identifizieren. Außerdem muss die Ausgestaltung der Schnittstellen noch definiert werden. Auch die Art der Interaktion der einzelnen Zell-Einheiten ist zu bestimmen. Dies gilt auch für die Frage, in welcher Größenordnung sich die Datenmengen bewegen werden, sodass die Aggregationsebenen festgelegt werden können.

6.2.6.1.3.3 Lastindikatoren im Netzgebiet des Landkreises Osterholz

Tabelle 6.36: Übersicht verschiedener Lastindikatoren für die Szenarien 2013, 2030 a, 2030 b und 2040 ermittelt aus den modellierten Zeitreihen für Verbrauch und Erzeugung im Landkreis Osterholz (Quelle: Eigene Berechnungen).

Szenario/Jahr	2013 status quo	2030 a	2030 b	2040 (regionale Zelle)
Modellierter zeitgleicher Eigenversorgungs-grad [%]	28%	72%	77%	83%
Volatilität der Residuallast [MW] % mittlerer Entnahmeleistung	29,5	61,1	60,5	77,5
mittlerer Residuallastgradient [MW/h]	6,9	15,3	16,3	22,1
Maximaler Residuallastgradient [MW]	65,5	141,4	141,4	200,5

Die Volatilität[46] der Residuallast im Gebiet der Osterholzer Stadtwerke variiert für die unterschiedlichen Szenarien von 29,5 MW bis 77,5 MW bereits fast so stark wie die mittlere Entnahmeleistung. Der stündliche Residuallastgradient liegt im Mittel zwischen 6,9 und 22,1 MW im Zellen Szenario, wobei 2040 auch Gradienten von bis zu 200 Megawatt erreicht werden (vgl. Tabelle 6.36). Der Großteil dieser Schwankungen in der Netzlast beruht auf der fluktuierenden Einspeiseleistung der Anlagen erneuerbarer Energien (EE-Anlagen) im Netzgebiet der Osterholzer Stadtwerke, die in Zukunft mit großer Wahrscheinlichkeit noch zunehmen wird.

Aus den Werten in Tabelle 6.36, lässt sich erkennen, dass der massive Ausbau der Erneuerbaren Energien in Szenario 2040 den zeitgleichen Eigenversorgungsgrad im Landkreis nur geringfügig erhöht, dabei aber die Residuallastgradienten stark ansteigen lässt. Aus Sicht des Leitkonzepts Resilientes Energiesystem wären Gegenmaßnahmen zu treffen, um die Verwundbarkeit des Energiesystems gering zu halten.

6.2.6.2 Ausfälle im sozio-technischen System

Im Rahmen der Vulnerabilitätsanalysen wurde, ergänzend zu den in den vorhergehenden Abschnitten dargestellten Analysen (Aufbau, Struktur und Netzlasten), das Verhalten des Systems bei Ausfällen betrachtet. Hierzu wurden im Kapitel 5.6.2 entsprechend der Methodik der strukturellen Vulnerabilitätsanalyse Indikatoren zur Sensitivität und Anpassungsfähigkeit des Systems für einige exemplarische Ausfälle im sozio-technischen System beleuchtet und daraufhin die Vulnerabilität ermittelt.

6.2.6.2.1 Ausfall von Komponenten des Energiesystems

6.2.6.2.1.1 Ausfall von Infrastruktur

6.2.6.2.1.1.1 Das Hochspannungsnetz

Aufgrund der mit Blick auf die Netzsteuerung beschriebenen Abhängigkeiten müssen die potenziellen negativen Auswirkungen eines Ausfalls der vom Hochspannungs-Übertragungsnetz geleisteten Erhaltung von Spannung und Frequenz als hoch und die Anpassungskapazität wegen der fehlenden Mittel zur eigenständigen Netzsteuerung – geschweige denn zur Abkopplung des Gebietes des Landkreises Osterholz – als gering bewertet werden. Daraus ergibt sich eine hohe Vulnerabilität gegenüber dem Ausfall des Hochspannungs- Übertragungsnetzes, trotz n-1 Sicherheit, und damit verbunden der Ausfall der vier Umspannwerke im Landkreisgebiet. Dies hätte einen Stromausfall im gesamten Gebiet des Landkreises Osterholz zur Folge.

[46] Als Standardabweichung der viertelstündlichen Residuallaständerungen.

6.2.6.2.1.1.2 HS/MS-Kupplungsstellen

Mit der im Abschnitt zur Netzsteuerung dargestellten Belastung des Elektrizitätsnetzes durch die fluktuierende Einspeisung der EE-Anlagen steigt auch die Wahrscheinlichkeit einer Überschreitung des Spannungsbandes, die zur Beschädigung oder zum Ausfall von Verbrauchern führt. Der Ausfall einer HS/MS-Kopplung durch zu hohe Strombelastung würde einen Stromausfall in Teilgebieten des Landkreises Osterholz zur Folge haben. Es besteht zwar die Möglichkeit diese Gebiete über querliegende Mittelspannungsleitungen mit geringer Übertragungsleistung (ca. 8-12 MW) zu versorgen, es ist jedoch fraglich ob die Schaltung im Bedarfsfall ordnungsgemäß funktioniert und die Ersatzleitungen nicht überlastet werden. Die potenziellen Auswirkungen einer Überlastung bzw. eines Ausfalls (durch Blitzschlag oder technischen Defekt der Betriebsmittel) der HS/MS-Kupplungsstelle müssen entsprechend als hoch bewertet werden. Da keine Möglichkeiten zum Gegensteuern vorhanden sind, ist die Anpassungskapazität mittel und die Vulnerabilität folglich als hoch einzustufen.

6.2.6.2.1.1.3 MS/NS-Kupplungsstellen

Für die Kupplungsstellen zwischen Mittel- und Niederspannung gilt ebenfalls die bereits zu den HS/MS-Kupplungsstellen formulierte Einschätzung zur Belastung und den möglichen Folgen. Allerdings sind von Ausfällen der MS/NS-Kupplungsstellen nur einzelne Bereiche des Netzes betroffen. Dem entsprechend sind, infolge einer Überlastung bzw. eines Ausfalls, nur mittlere Auswirkungen zu befürchten. In bestimmten Gebieten, z.B. in Schwanewede gibt es regelbare Ortsnetztransformatoren, womit die Anpassungskapazität verbessert wird, da auf unterschiedliche Netzlasten reagiert werden kann. Zudem kann davon ausgegangen werden, dass Ersatzbetriebsmittel für Netzkupplungen auf dieser Spannungsebene in kurzer Zeit zur Verfügung gestellt werden können. Insgesamt wird für die MS/NS-Kupplungsstellen deshalb eine mittlere Anpassungskapazität angenommen, woraus sich eine mittlere Vulnerabilität ergibt.

6.2.6.2.1.2 Ausfall von Erzeugungs- und Wandlungsanlagen

6.2.6.2.1.2.1 WKA und PV-Anlagen

Die WKA- und PV-Anlagen im Landkreis Osterholz dienen der Stromerzeugung zur Einspeisung in das nationale Netz. Die eigene regionale Versorgung kann mit ihnen nicht kontinuierlich gesichert werden, weil Speicher oder andere Verfahren zur Anpassung der fluktuierenden Stromerzeugung an den Verbrauch nicht vorhanden sind. Ein Ausfall der regionalen Anlagen wird deshalb auch keine Auswirkungen auf die Stromversorgung im Landkreis Osterholz haben. Ein Ausgleich wird – wie auch bei Flauten oder starkem Bedeckungsgrad – durch einen erhöhten Stromimport aus den vorgelagerten Netzebenen ermöglicht. Allerdings könnten plötzliche Änderungen der Einspeiseleistung (z.B. durch Abschaltung von PV-Anlagen, bei de-

nen noch keine Umrüstung im Sinne der 50,2 Hz Problematik stattgefunden hat) zu einer zusätzlichen Belastung des Netzes führen (BSW-Solar 2012). Zusammenfassend kann von einer geringen Höhe der möglichen problematischen Auswirkungen eines Ausfalls der WKA sowie der auf Freiflächen und Dächern befindlichen PV-Anlagen ausgegangen werden. Verbunden mit der hohen Anpassungsfähigkeit durch zusätzlichen Strombezug aus dem Hochspannungsnetz ergibt sich eine lediglich geringe Vulnerabilität für die Stromversorgung des Landkreises Osterholz in Bezug auf den Betrieb der regionalen WKA und PV-Anlagen.

6.2.6.2.1.2.2 Biomasse-BHKWs

Für die mit dem Gas der Biogasanlagen versorgten BHKWs kann die für WKA- und PV-Anlagen getroffene Einschätzung übernommen werden, da auch die auf Biomassebasierende Stromerzeugung nicht als Element der eigenen Bedarfsdeckung betrieben wird. Im Bereich der Wärme wird lediglich beim Kombi-Schwimmbad die Abwärme genutzt, die sich auch anders erzeugen ließe. Der Großteil der erzeugten Wärme wird bei den Biogasanlagen nicht genutzt. Auch hier ergibt sich eine nur geringe Vulnerabilität.

6.2.6.2.1.3 Ausfall der Steuerung und Regelung

Die Osterholzer Stadtwerke verfügen über eine eigene Leitwarte, die in der Stadt Osterholz-Scharmbeck gelegen ist, womit das Strom-, Gas- und Wassersystem überwacht werden. Die Warte dient hauptsächlich dazu Informationen zu bündeln und im Störungsfall, in Absprache mit den vorgelagerten Netzbetreibern, notwendige Maßnahmen zu ergreifen. Die Leitzentrale ist derzeit nicht durchgehend besetzt und ist technisch nicht so ausgerüstet, dass Systemdienstleistungen, also bspw. Wiederaufbau bei Schwarzfall, Blindleistungskompensation, Steuerung und Regelung, für die Region erbracht werden könnten. Eine manuelle Schaltung ist derzeit an fast allen Komponenten vorgesehen. Zumindest an einigen Umspannwerken gibt es Stützpunkte mit Personal wie Netzmeister, die die lokale Spannung überwachen, z.B. in Schwanewede. Die EWE, Netzbetreiber des übrigen Verteilnetzes im Landkreis Osterholz, betreibt lokal vor Ort keine weiteren Leiteinrichtungen, sondern bündelt diese Aktivitäten für den gesamten Norddeutschen Raum in einer Leitzentrale in Oldenburg, sowie in einer zusätzlichen Ersatz- bzw. Notzentrale an einem nicht weiter kommunizierten Ort.

Ein Ausfall der Regelung und Steuerung der vorgelagerten Verteilnetze und Höchstspannungsnetze mit dem Effekt, dass Systemdienstleistungen für das Gebiet nicht erbracht werden könnten, hätte massive Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit, bzw. würde zu einem Strom-Ausfall in der Region führen. Es ist nicht bekannt, ob zur Kommunikation mit den anderen Netzakteuren unterschiedliche Kommunikationskanäle, z.B. über Satellitentelefon, vorhanden sind.

6.2.6.2.1.4 Vulnerabilität von Haushalten, Gewerbe und öffentlichen Einrichtungen

Für eine Abschätzung des Schadens und dadurch die Verwundbarkeiten von Verbrauchern sollte nach Dauer der Ausfälle (kurz (<1 h), mittel (< 24 h) und lang (> 24 h) unterschieden werden.

Für die an das Elektrizitätsnetz angeschlossenen Haushalte werden im Falle eines Stromausfalls von kurzer oder mittlerer Dauer mittlere Auswirkungen angenommen, da voraussichtlich bis auf Kühl- und Gefriergeräte oder Wärmepumpen, die im Winter auf eine Stromversorgung angewiesen sind, keine weiteren Geräte oder Prozesse vorhanden sind, deren Versorgungsunterbrechung einen hohen Schaden verursachen könnte. Dabei sei erwähnt, dass EDV-Anlagen dabei rein als Unterhaltungsmittel eingestuft wurden. Anders sieht dies bei langen Ausfällen aus, da dann die Kommunikation, Wasser- und Treibstoffversorgung direkt betroffen sind und somit hohe Auswirkungen haben. Die Anpassungskapazität ist im Bereich der privaten Haushalte vermutlich recht gering. Nur ein geringer Teil von ihnen wird über Vorrichtungen zur Notstromversorgung oder Speicher verfügen, die im Falle eines Stromausfalls genutzt werden können. Andererseits könnte hier bei der Anpassungskapazität auch der soziale Zusammenhalt berücksichtigt werden, was bei einer positiven Beurteilung zu einer mittleren bis hohen Anpassungskapazität führen könnte. Dies konnte in dieser Fallstudie aufgrund mangelnder Kapazitäten nicht ermittelt werden.

Die Vulnerabilität der Haushalte sollte entsprechend als hoch bewertet werden. Dies gilt aufgrund der Bewertungsmatrix und geringen Anpassungskapazität sowohl für Ausfälle aller Ausfalldauern.

Für Gewerbebetriebe gilt die gleiche Annahme. Bei ihnen sind zudem die Auswirkungen eines Stromausfalls als hoch einzustufen, weil potenziell von einem Schaden an den Produktionsanlagen oder Werkzeugen ausgegangen werden muss.

Die Anpassungskapazität öffentlicher Einrichtungen, der Infrastruktur sowie von Versorgungseinrichtungen gegenüber Stromausfällen hängt von deren Ausstattung mit Anlagen zur Notstromversorgung ab. Für die meisten Einrichtungen kann hier nur von einem sehr begrenzten Umfang an Notstromversorgungskapazitäten ausgegangen werden. Wo vorhanden, sind diese mit Treibstoff für den 24 stündigen Einsatz konzipiert. Bei Stromausfällen von langer Dauer ist ohne Nachschub die Versorgung als kritisch anzusehen. Es gelten deshalb die gleichen Annahmen wie für Gewerbebetriebe.

6.2.6.2.1.5 Gesamtbetrachtung der Vulnerabilität der Elemente des Elektrizitätssystems im Landkreis Osterholz

Betrachtet man die Vulnerabilität des Elektrizitätssystems im Landkreis Osterholz unter der Annahme, dass die Versorgung im Landkreis Osterholz und nicht die Versorgungssicherheit des gesamten Elektroenergiesystems bewertet wird, so zeigt sich der Landkreis mit seinen

sehr abhängigen und damit auch verletzbaren Verbrauchern als vollständig auf die Versorgung durch das vorgelagerte Hochspannungsnetz angewiesen. Das Gebiet des Landkreises Osterholz ist deshalb an den Kopplungsstellen von der HS- zur MS-Ebene besonders vulnerabel. Kopplungen von der MS- zur NS-Ebene sind für das lokale Netz weniger bedeutend, da jeweils nur Teile des lokalen Netzes von einem Ausfall betroffen sind und zudem Ersatz für die defekten Betriebsmittel wahrscheinlich schneller zur Verfügung gestellt werden kann. Von den Anlagen auf dem eigenen Gebiet ist der Landkreis bei der Stromversorgung nicht abhängig, deshalb besteht auch nur eine geringe Vulnerabilität. Der (plötzliche) Ausfall von Erzeugungsanlagen hat lediglich temporär eine höhere Netzbelastung infolge des Lastwechsels zur Folge. Daneben sind wirtschaftliche Einbußen mit einem langfristigen Ausfall dieser Anlagen zu befürchten.

Über diese einfache qualitative Analyse der Elemente des lokalen Elektrizitätsnetzes hinaus kann eine Analyse des Verhältnisses von Bedarf und Erzeugung im lokalen Netz Aufschluss über die Belastung der vorgelagerten Netzebenen bzw. die Fähigkeit zu einer möglichen lokalen zeitgleichen Eigenversorgung geben. Dieses Verhältnis ist somit ein wichtiger Indikator für die Vulnerabilität der Energieversorgung und gibt zudem Aufschluss über die Realisierbarkeit einer lokalen Eigenversorgung.

6.2.6.2.2 Ausfall von Marktakteuren

Die regionalen Energieversorger, die vordem eine Monopolstellung innehatten, Osterholzer Stadtwerke und EWE, haben weiterhin einen sehr hohen Marktanteil von über 50% bei Strom und Gas. Im Bereich der Kraftstoffe dominieren die Treibstoffversorger, die diverse Tankstellen im Landkreis betreiben. Aufgrund des zunehmenden Wettbewerbs im Strommarkt und des hohen Wettbewerbs in den Sektoren Wärme und Treibstoffe ist mit einem weitreichenden Ausfall von Marktakteuren nicht zu rechnen. Ohne regulierenden Mechanismen ist anzunehmen, dass bei Bevorzugung der lokalen Erzeugung, z.B. bei einer Inselversorgung ohne Anschluss an das Verbundnetz, es aufgrund eines verringerten Wettbewerbs zu höheren Preisen kommt Schätzt man die heutigen Möglichkeiten im Landkreis ein, so stellt man fest, dass die Erzeugungsleistung, die in Hand von regionalen Marktakteuren ist, vernachlässigt werden kann ist. Zwar existiert jetzt und in Zukunft eine große Anzahl an Windkraftanlagen, jedoch sind diese in kreisfremder Hand, sodass nicht anzunehmen ist, dass ein besonderes Interesse besteht die erzeugten Mengen bevorzugt in unmittelbarer Nähe zu vermarkten. Ein Monopol in der Region würde jedoch zu höheren Preisen und eine Abhängigkeit von diesen Akteuren führen. Bisher ist außer bei den Windkraftanlagen keine Monopolbildung im Landkreis zu beobachten, die Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit hätte. Eine Beschränkung der Erzeugungsleistung je Marktakteur, wie sie im Falle von Monopolstrukturen durchgeführt wird, wird für den Landkreis nicht benötigt.

Abbildung 6.25: Zusammenfassende Bewertung der Vulnerabilität des Elektrizitätssystems im Landkreis Osterholz bei einem Ausfall der unterschiedlichen Komponenten (Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage eigener Analysen).

	Ausfall HS-Netz	Ausfall HS/MS-Kopplung	Ausfall Erzeugung mit Biogasanlagen	Ausfall Erzeugung mit WKA	Ausfall Erzeugung mit Freiflächen-PV	Ausfall MS/NS-Kopplung	Ausfall Erzeugung mit PV klein	Ausfall der Steuerung und Regelung in der Region	Ausfall der Stromversorgung von Haushalten und Betrieben	Ausfall der Stromversorgung von Verwaltung/öfftl. Infrastruktur/ Versorgung
Potenzielle Auswirkungen	hoch	Hoch	Gering	Gering	gering	mittel	gering	Mittel	mittel	hoch
Anpassungskapazität	gering	Mittel	Hoch	Hoch	Hoch	mittel	hoch	gering	gering	gering
Vulnerabilität	**hoch**	**hoch**	**Gering**	**Gering**	**gering**	**mittel**	**gering**	**hoch**	**hoch**	**hoch**

Allein die monopolartige Struktur der Netzbetreiber könnte, bei einem Ausfall Beeinträchtigungen für die Region nach sich ziehen. Aufgrund von gesetzlichen Vorschriften wird ein Ausfall dieser als sehr unwahrscheinlich gesehen. Zusammenfassend kann gefolgert werden, dass aufgrund geringer Sensitivität und mittlerer bis hoher Anpassungskapazität, bei einem Ausfall von Marktakteuren, die Vulnerabilität bei als gering einzustufen ist.

6.2.6.2.3 Zunehmende Prognoseunsicherheit

Die Erzeugung im Landkreis erfolgt fast klimaneutral. Aufgrund des hohen Imports hätte jedoch, bei einem Ausfall von lokalen Erzeugungseinheiten und des Ausgleichs durch Nutzung fossiler Energieerzeugungsanlagen, dies eine Auswirkung auf die Emission von CO_2 und anderen Klimagasen im Landkreis. Mit wachsendem Zubau an Windkraftanlagen erhöhen sich zudem auch die Lastgradienten. Im Weiteren haben Rundsteuerempfänger bei PV-Anlagen aufgrund der gesetzlichen Vorschriften einen hohen Durchdringungsgrad, wodurch eine zwar keine Regelung aber eine Abschaltung bzw. Verminderung der Erzeugungsleistung möglich ist. Windkraftanlagen lassen sind grundsätzlich steuern. Ein Versuch von der Bundesregierung Marktstrukturen hierfür zu schaffen ist durch die Einführung einer Marktprämie erfolgt. Bei dieser erhalten Anlagenbetreiber einen Bonus, wenn sie die Anlagen in derart aufrüsten, dass diese sich mittels Marktsignalen steuern lassen. Aufgrund der vernachlässigbaren geringen Mengen an Speicher und Dämpfer im Landkreis Osterholz können starke Lastschwankungen nicht lokal ausgeglichen bzw. abgepuffert werden. In Bezug auf klimatische Auswirkungen auf die Prognosesicherheit lässt sich sagen, dass für diese Region die erwartbaren Auswirkungen des Bedeckungsgrades und der Windgeschwindigkeiten nach derzeitigem Wissen vernachlässigbar sind. Was auf der anderen Seite nicht bedeutet, dass die Gegend vom Klimawandel verschont bliebe, nur dass er sich eher in steigenden Wasserpegel und höheren Temperaturen bemerkbar machen wird. Insofern sind Hochwasserschutzmaßnahmen zu treffen. Die Vulnerabilität kann als gering eingestuft werden.

6.2.6.2.4 Mangel an Energie- und Personalressourcen

Die große Abhängigkeit von externen Energiequellen (90% der Energie wird importiert) macht den Landkreis besonders verwundbar für eine Störung möglicher Lieferketten oder Handelsbeziehungen, auch wenn der durchschnittliche Verbrauch im Landkreis aufgrund des geringen Anteils an Industrie eher im Mittelfeld liegt. Speicher und Puffer sind quasi nicht vorhanden und werden in der weiteren Betrachtung vernachlässigt, was zusätzlich zu den fehlenden eigenen Steuer- und Regelmöglichkeiten von lokalen Erzeugungsanlagen dazu führt, dass eine Kappung der Zulieferung, egal in welchem Sektor, zu einem Mangel und Ausfall führt. Vom Potential her wird derzeit etwa die Hälfte der nutzbaren Fläche für Energieerzeugung verwendet, hauptsächlich Biomasse.

Die gute Lage des Landkreises nah an Bremen, verringert das Risiko keine Fachkräfte zu finden, was sich in der niedrigen Arbeitslosenquote von 5,7% im Jahr 2008 widerspiegelt, siehe auch Kap. 6.2.1.2. Im Weiteren wirkt sich die gute Einkommenssituation bei Beschäftigten von Energieversorgern, die über dem Durchschnitt liegt, vorteilhaft bei der Anwerbung von Fachkräften aus. Aufgrund der Wirtschaftlichkeitsbestrebungen der Unternehmen ist von einem geringen Anteil an redundanten, quasi im Normalbetrieb nicht ausgelasteten Mitarbeiterstellen zu rechnen. Sie würden ohnehin eher in Task-Forces gebündelt. Als Risiko wirkt sich eine solche Situation eher bei kurzfristigen Störungen aus. Herausforderungen durch den Transformationsprozess lassen sich aufgrund von Lage und Gehaltsniveau wohl ausgleichen.

Die Vulnerabilität wird als mittel bis hoch in diesem Bereich eingeschätzt.

6.2.6.2.5 Skandalisierung des Ausbaus von EE-Anlagen

Die Lage des Landkreises im Speckgürtel von Bremen könnten dazu beigetragen haben, dass der Zusammenhalt in den Gemeinden und das Interesse für gemeinsame Aktivitäten und Projekte, bspw. eine Energiegenossenschaft, eher gering war. Bisher beansprucht die Infrastruktur nur einen marginalen Anteil der Landkreisfläche, dennoch haben sich Initiativen gebildet, die bewirkten, dass bisherige Befürworter der Energiewende verhaltener Handeln. Dies mag zum einen der relativ geringen Wertschöpfung durch Erneuerbare für den Landkreis geschuldet sein, aufgrund des „Ausverkaufs“ der Windflächen an landkreisfremde Investoren. Hinzu kommt, dass sich die Stimmung in der Bevölkerung seit Fukushima im Jahr 2011 verändert hat. Die unmittelbare Angst vor Terroranschlägen und die anhaltenden Sicherheitswarnungen drängen Probleme wie den Klimawandel in den Hintergrund.

Betrachtet man mögliche Anpassungsmöglichkeiten des Systems, z.B. die partizipative Integration von Bürgergruppen in den Energiewende-Prozess im Landkreis, so werden diese derzeit kaum genutzt. Es gibt keine echten regionalen Vermarkter in dem Sinne, dass sie dazu beitragen könnten, Energiemengen in der Region auszugleichen. Es gibt jedoch bei den lokalen Energieversorgern Überlegungen Regionalstromprodukte, also besonders gekennzeichneten Regionalstrom, aufzulegen um auf diese Weise mit einer besonderen Qualität Endkunden an sich zu binden. Problematisch in der Kommunikation könnte sich zudem auswirken, dass die 100% Erneuerbaren Energien Regionen sich bisher stark auf die bilanzielle Eigenversorgung mit Energie fokussiert haben und in dieser Hinsicht Bürgergruppen und Einwohner eingestimmt haben. Die bundesrepublikanische Realität sieht jedoch so aus, dass Regionen wie der Landkreis Osterholz auch Beiträge zur Versorgung von Ballungsgebieten, Großstädten und Industrien leisten müssen. Man denke z.B. an Bremen, Bremerhaven die Stahlwerke oder die Werften. Das bedeutet, dass in den Regionen außerhalb der Ballungsgebiete nicht nur 100% sondern ein Vielfaches davon an Erneuerbarer Energie erzeugt werden muss. Solche Aspekte müssen in der Region rechtzeitig kommuniziert werden, wenn man den Rückhalt in

der Bevölkerung nicht verlieren möchte. Hierfür könnte die Region als „Klimaaktive Region“ gekennzeichnet sowie als energiereiche und Energie exportierende Region dargestellt werden, mit der Perspektive, dass der Landkreis und seine Bewohner bei entsprechender Umsetzung des Ausbaus an der Wertschöpfung durch die Energieerzeugung teilhaben können und dies zu mehr Wohlstand der Region führt.

Aufgrund bisher fehlender Kommunikationsstrategien wird die Vulnerabilität durch Skandalisierung als hoch eingestuft.

6.2.6.3 Potenzielle Auswirkungen von Klimaveränderungen

Auch Klimaveränderungen wirken sich auf das Energiesystem aus. Im Vergleich zur Erzeugung von Strom aus fossilen Quellen, die z.B. durch Engpässe bei der Kühlwasserbereitstellung beeinträchtigt werden kann, sind die Erneuerbaren Energien wesentlich stärker vom Klima und besonders vom durchs Klima beeinflussten Wettergeschehen abhängig. Beispielsweise sinkt bei zunehmendem Bedeckungsgrad oder Schneefall die Leistung von PV-Anlagen. Die durchschnittliche Leistung von Windenergieanlagen ist von der mittleren Windgeschwindigkeit abhängig.

Um den Einfluss des Klimawandels auf die Energieversorgung im Landkreis Osterholz untersuchen zu können, müssen Annahmen über dessen Auswirkungen getroffen werden. Zur Beschreibung der Veränderung der Klimaparameterwurden im Rahmen des Projekts nordwest 2050 regionale Klimaszenarien erstellt (Schuchardt et al. 2010a, 2010b).

Diese Klimaszenarien stellen mögliche mittlere klimatische Randbedingungen für die Metropolregion Bremen-Oldenburg in den Jahren 2050 und 2085 dar.

Die gemäß diesen Klimaszenarien zu erwartenden klimawandelbedingten Trends sind als eher gemäßigt einzustufen (vgl. Abbildung 6.23). Was allerdings auch daran liegt, dass das den Klimaszenarien zu Grunde liegende Emissionsszenario A1B des IPCC[47] als moderates Emissionsszenario bezeichnet werden kann. Aufgrund derzeit schon beobachtbarer höherer Emissionen erscheint es nach (Schuchardt et al. 2010a) auch möglich, dass die Klimamodelle, die diese höheren Emissionen als Input nutzen, ein entsprechend stärkeres Klimasignal produzieren. Daher sollte bei den Klimafolgenanalysen neben den dargestellten oberen Grenzen der Spannweiten auch „mitgedacht werden, was bei extremen oder ungünstigen Klimaänderungen passieren könnte.“ Dies ist insbesondere für den Eintritt von Extremwetterereignissen zu berücksichtigen.

[47] Die Annahmen, die dem Szenario A1B zugrunde liegen sind: rasches Wirtschaftswachstum, rasche Einführung neuer, effizienter Technologien, nach 2050 rückläufige Weltbevölkerung und eine ausgewogene Nutzung aller Energiequellen.

Tabelle 6.37: Veränderung ausgewählter Klimaparameter in den nordwest2050-Klimaszenarien, n.a. = nicht anzugeben, n.v. = nicht verfügbar. (Quelle: Vulnerabilitätsanalyse NW2050, Darstellung nach Schuchardt et al. 2010b)

Parameter	2050 Änderung (Spanne)	2050 absolut (Spanne)	2085 Änderung (Spanne)	2085 absolut (Spanne)
Temperatur	**+1.5°C** (+1 bis +2°C)	**10.7°C** (10.2 bis 11.2°C)	**+2.8°C** (+1.9 bis +4.7°C)	**12.0°C** (11.1 bis 13.9°C)
mittlere Windgeschw. (10m)	**+1,8%** (0 bis +2 %)	**5,8 m/s** (5,7 bis 5,8 m/s)	**+2,5%** (0 bis +3 %)	**5,8 m/s** (5,7 bis 5,9 m/s)
maximale Windgeschw. (10m)	**+3,8%** (n.v.)	**19,1 m/s** (n.v.)	**+11,0%** (n.v.)	**20,7 m/s** (n.v.)
Bedeckungsgrad	**+0,1%** (-1 bis +1%)	**67,6%** (66 bis 68%)	**+0,7%** (-6 bis +2%)	**68%** (63 bis 69%)
Niederschlag (Sommer - JJA)	**-3%** (-13 bis +8%)	**200 mm** (181 bis 225 mm)	**-17%** (-46 bis -9%)	**160 mm** (112 bis 189 mm)
Niederschlag (Winter - DJF)	**+9%** (+9 bis +27%)	**187 mm** (183 bis 213 mm)	**+25%** (+17 bis +44%)	**225 mm** (197 bis 242 mm)
Sturmwasserstände	**+43 cm** (+19 bis +111 cm)	n.a.	**+90 cm** (+53 bis +216 cm)	n.a.

Mittels technischer Modelle wurde die Sensitivität der Erzeugung von Solar- und Windenergie unter den Klimaprojektionen untersucht. Aus den Bedeckungsdaten der regionalen Klimaprojektionen für das A1B-Szenario ergibt sich, dass sich der sommerliche Höhepunkt der Globalstrahlung in der Region verstärkt und damit der Kapazitätsfaktor geringfügig erhöht, siehe Abbildung 6.26.

Dadurch wird allerdings das saisonale Profil der regionalen Solarstromproduktion auf Grund des breiten Spektrums von Neigungswinkeln der regionalen PV-Module nicht signifikant beeinflusst. Die etwas höheren Windgeschwindigkeiten im Herbst und Winter wirken sich jedoch aufgrund der kubischen Abhängigkeit von Windgeschwindigkeiten stark auf die Produktion von Windenergie aus. Als Folge würde das saisonale Profil der Windenergieerzeugung bis zur Mitte des Jahrhunderts einen ausgeprägten saisonalen Höhepunkt im Herbst und bis zum Ende des Jahrhunderts eine noch ausgeprägtere Spitze im Winter ausbilden, siehe Abbildung 6.27.

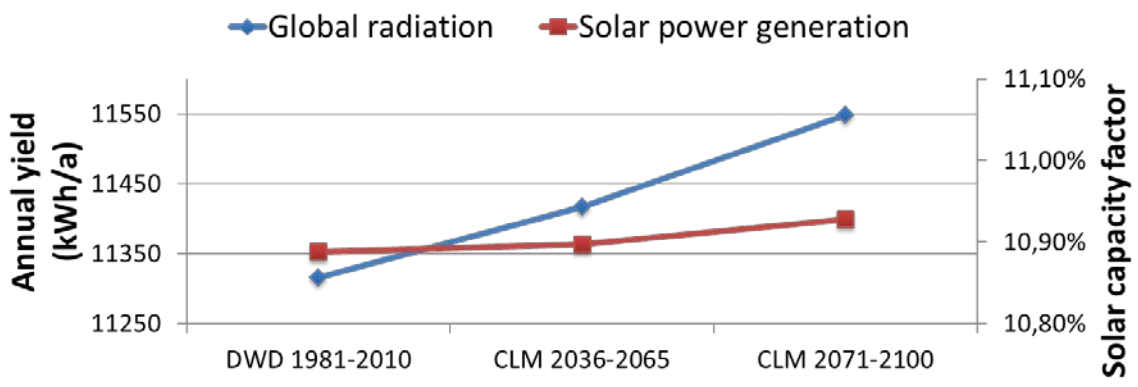


Abbildung 6.26:Veränderung des Kapazitätsfaktors (rechte Achse) für Photovoltaik unter Klimawandel (aus NordWest2050 VA Bericht).

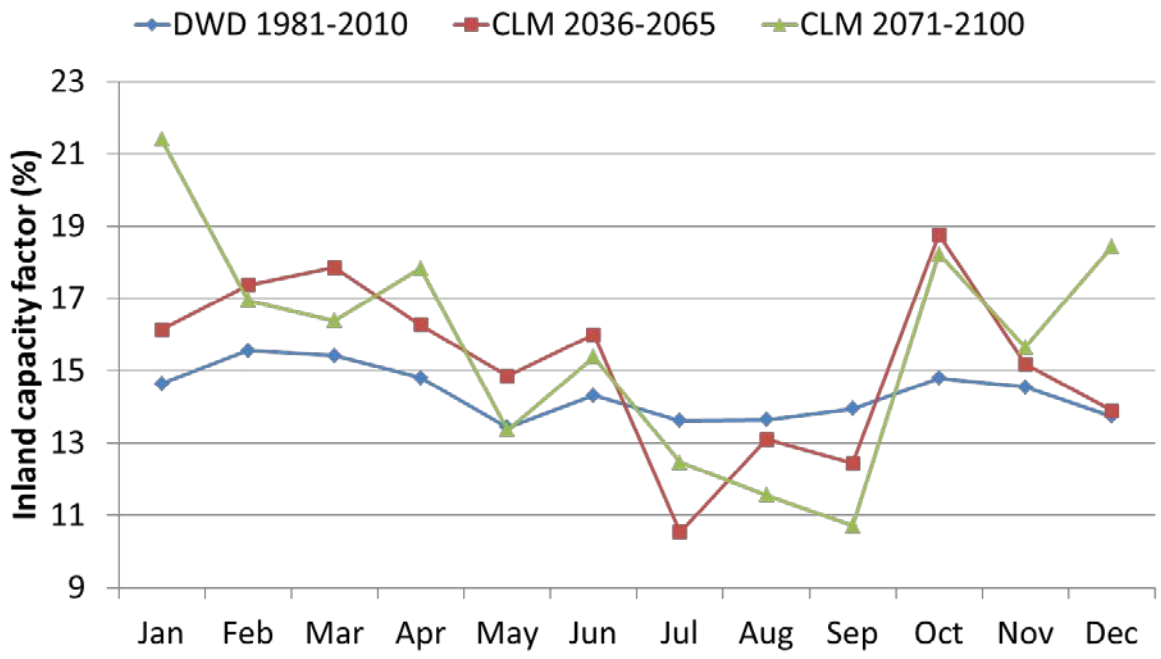


Abbildung 6.27: Saisonaler Kapazitätsfaktor für Windenergie in der Metropolregion Bremen-Oldenburg (Inlandstandorte) unter Bedingungen des Klimawandels. Die Ungleichverteilung des Erzeugungsanteils im Winter wird zum Ende des Jahrhunderts hin deutlicher. (Wachsmuth et al. 2013)

Zusammengefasst kann aus den Daten geschlossen werden, dass die Klimaänderung im Nordwesten Deutschlands dazu führen wird, dass die Heizperiode kürzer wird und der Kühlbedarf steigen wird. Es wird trockenere Sommer und feuchtere Winter geben, was den Biomasseertrag beeinflussen wird.

Insgesamt kann die Vulnerabilität des Energiesystems gegenüber Klimaveränderungen als gering eingestuft werden, da diese sich nach derzeitigem Kenntnisstand in Grenzen halten werden. Die Sensitivität wird als gering eingestuft, da die Systeme für die erwartbaren Veränderungen bereits gerüstet sind.

6.2.6.4 Ergebnisse Brainstorming zu Ausfällen, Störung aus Leitfadengeführten Interviews, Gespräche und Workshops

Eine Auswertung von Zeitungsartikel zu Störungen und Ausfällen im Energiesystem ergab, dass es sich meistens um bekannte Fehlerquellen handelte. Häufig treten Kabelfehler oder ein Ausfall von Betriebsmitteln ein. Auffällig ist, dass gerade bei größeren Störfällen keine genaue Einzelursache bestimmt werden kann. Meist wirken mehrere Ursachen zusammen und verursachen im Sinne eines Domino oder Kaskaden-Effekts den Ausfall. Die Unterabteilung FNN des Verbands der deutschen Ingenieure (VDE) ermittelt in jährlichen Umfragen bei den Mitgliedsunternehmen eine Störungsstatistik.

Bei unterschiedlichen Interviews mit Netzverantwortlichen wurde vor allem die starre Kopplung an das Übertragungsnetz thematisiert. Als weiteres Thema kristallisierte sich heraus, dass das ungesteuerte Laden von E-Mobilen zukünftig eine Herausforderung für das regionale Energiesystem darstellen könnte. Dies liegt daran, dass die Anschlussleistung eines Hausanschlusses 30 kW beträgt. Bei der Planung der Netze werden aufgrund von Erfahrungswerten mit der Gleichzeitigkeit höchstens 2-3 kW pro Haushalt berücksichtigt. Durch neue Verbraucher wie z.B. Elektromobile könnte die bisherige Praxis der Netzauslegung dem Netzbetreiber zum Problem werden. Eine Faustformel besagt, dass je Trafostation etwa 10 E-mobile gleichzeitig geladen werden können. An einem Transformator sind jedoch normalerweise viel mehr Wohneinheiten angeschlossen. Die Installation einer Ladebox mit 22 kW Ladeleistung ist nicht anmeldepflichtig und kann vom Netzbetreiber auch nicht verhindert werden. Es ist zu befürchten, dass wenn an einem einzelnen Verteilnetzstrang mehrere E-Mobile mit Maximalleistung geladen werden, die dadurch verursachte Netzüberlastung zu Ausfällen und Störungen im Netzgebiet führt.

6.2.6.5 Zusammenfassung der strukturellen Vulnerabilitätsanalyse für den Landkreis Osterholz

Die Analyse struktureller Vulnerabilitäten im Landkreis Osterholz gliederte sich in vier Bereiche. In der Systemanalyse und Modellierung wurde das System weitergehend mit Fokus auf die Ermittlung von Schwachstellen beschrieben. Die daran anschließende Betrachtung und Bewertung von Ausfällen auf Basis einer Checkliste untersuchte potenzielle Störungen und ihre Auswirkungen auf die Systemleistungen. Abschließend wurde noch auf die möglichen Auswirkungen durch den Klimawandel eingegangen sowie auf bekannte und denkbare Herausforderungen, die von den regionalen Akteuren in Workshops und Interviews genannt wurden. Im Ergebnis lässt sich festhalten, dass das Energiesystem des Landkreises Osterholz Schwachstellen aufweist, die hauptsächlich von der starren Kopplung an die vorgelagerten Netzebenen ausgehen und von der fehlenden Autonomie im Bereich der Netzregelung und Steuerung. Hinzu kommen der die Diversität senkende einseitige Ausbau erneuerbarer Ener-

giequellen, der mögliche Widerstand aus der Bevölkerung und eine heterogene, nicht besonders organisierte und institutionalisierte Akteursstruktur, die es zugelassen hatte, dass fast alle verfügbaren Windanlagenstandorte von externen Investoren gepachtet wurden. Dies wirkt sich negativ auf die regionale Wertschöpfung aus und wird bis 2030 zu einem massiven Abfluss an Mitteln führen. Die Veränderung des Verbraucherverhaltens, z.B. durch eine private Ladeinfrastruktur für E-Mobile oder die Entwicklung von Verbrauchern zu Prosumern, stellt nach Ansicht der lokalen Netzbetreiber die größte Herausforderung dar.

Die durchgeführte Vulnerabilitätsanalyse betrachtet hauptsächlich das Grundjahr 2013, bezieht jedoch auch Vulnerabilitäten in den Zukunftsszenarien der Jahre 2030 und 2040 mit ein. Mit Blick auf die Netzstruktur lassen sich keine besonderen Verwundbarkeiten erkennen, da hauptsächlich Erdkabel verlegt sind und bei den Netzen das n-1 Kriterium beachtet wird. Allenfalls das Strahlennetz auf der Niederspannungsebene birgt ein erhöhtes Risiko gegenüber Ausfällen im Vergleich zu denjenigen Teilen, in denen die Struktur maschenförmig ist. Eine höhere Verwundbarkeit zeigt das Energiesystems des Landkreises Osterholz in Bezug auf die fehlende eigenständige Steuerung und Regelung, welche eine Versorgung aus lokalen Erzeugungsanlagen möglich machen würde. Der Landkreis Osterholz ist in vier Gemeinden über Umspannwerke (Kupplungsstellen), die von der EWE betrieben werden, mit dem vorgelagerten Verteilnetz (110 kV) der Avacon (EON) verbunden und aufgrund der fehlenden Fähigkeit zum Inselnetzbetrieb vollständig vom diesem abhängig.

Bei der Erzeugung ergibt sich jedoch zunächst ein Anstieg der berechneten Diversität von 0,58 (2013) auf über 0,67 (2030 b), dann aber ein Rückgang auf bis zu 0,38 (2040). Dies liegt daran, dass sich mit steigendem Anteil an Eigenerzeugung die Diversität im Landkreis zunächst steigt. Bei weiterem Ausbau von lediglich zwei Erzeugungs- bzw Einspeisequellen, nämlich Windkraft und Photovoltaik sinkt für die regionale Zelle die Diversität dann wieder. Dies könnte mit Speichern ausgeglichen werden, die bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt wurden. Bei den Verbrauchern ist eine hohe Diversität gegeben, ebenso eine hohe Dispersion bei der geographischen Verteilung der Erzeugungsanlagen.

Durch den Zubau an Windkraftanlagen verändern sich in den Szenarien 2030 und vor allem 2040 die Netzbelastungen im Netz, die über die Gradienten der Residuallast ermitteln wurden, was demzufolge eine höhere Vulnerabilität in diesem Bereich anzeigt. Photovoltaikanlagen, vor allem wegen ihrer tagesrythmischen Leistungscharakteristik, werden erst im Szenario 2040 zu höheren Netzbelastungen führen, da der Ausbau verglichen mit der Windkraft relativ gering ist. Dennoch werden bereits jetzt in einigen entlegenen Gebieten, z.B. einem Ortsteil in Schwanewede, regelbare Ortsnetztransformatoren eingesetzt.

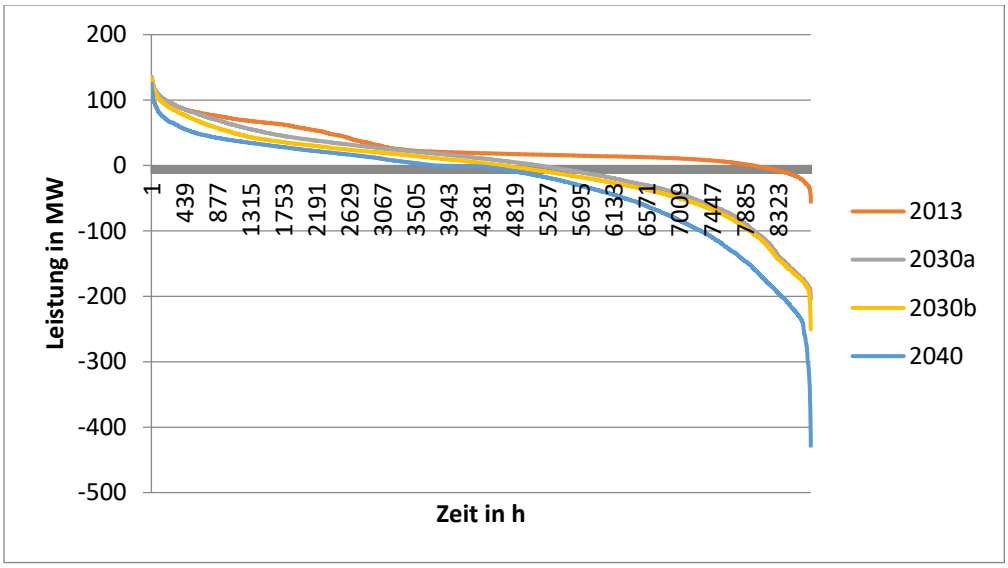


Abbildung 6.28: Residuallastkurven für das Jahr 2013 und die Szenarien 2030a 2030 b und 2040 (Quelle: Eigene Darstellung)

Mit dem Open Energy Modelling Framework wurde ein Modell des bestehenden Energiesystems im Landkreis Osterholz erstellt mit Erzeugungs- und Verbrauchscharakteristik für die Zukunftsszenarien 2030 a und b, ebenso eine kostenoptimierte Konfiguration für die Realisierung des Landkreises als regionale Zelle.

Die in Abbildung 6.28 dargestellten Residuallastkurven für unterschiedliche Szenarien und den Status quo im Jahr 2013 zeigen, dass die Entnahmeleistung aus dem vorgelagerten Netz, trotz erheblichen Zubaus an Erzeugungsanlagen unverändert bleibt. In der Konsequenz bedeutet dies, dass die zunehmende regionale Versorgung zu einem weiteren Ausbau von Netzkapazitäten des Verteilnetzes führen muss. Die importierten Strommengen verringern sich je nach Szenario und die Strommengen und Spitzenleistungen, die abgeführt werden müssen, erhöhen sich maximal bei Szenario 2040. Demzufolge wird im Szenario 2040 empfohlen, die Leistung der Erzeugungsanlagen bei einer negativen Residuallast über 250 MW zu reduzieren, um die Ausbaukosten der Netze wirtschaftlich zu halten. Die Mengen unterhalb dieser Schwelle sind durch Flexibilisierungsmaßnahmen, bspw. Power-to-X Anlagen, in geeignete Energieträger, Wärme oder Gas umzuwandeln oder zu speichern. Die Flexibilisierungsmaßnahmen sind an geeigneten Stellen im Verteilnetz zu platzieren, in der Art, dass der Netzausbau so gering wie möglich gehalten wird, jedoch Ausfälle der Flexibilisierungsmechanismen die Versorgungssicherheit nicht gefährden. Dies wird im Einzelfall vertieft zu untersuchen sein. Die Betriebsweise der Biogasanlagen ist derart zu verändern, dass das Biogas für Dunkelflautezeiten gespeichert wird, ohne direkt verstromt zu werden. Die Flexibilisierungsmaßnahmen werden auch eine Flexibilisierung des Verbrauchs erfordern, wozu es derzeit an Automatisierungs-, Regel- und Steuerinfrastruktur fehlt (Universität Bremen 2015). Hierfür wäre z.B. zukünftig ein über den Strompreis gesteuertes Demand-Side-Management privater Haushalte denkbar.

Die Auswertung von möglichen Ausfällen des sozio-technischen Systems nach der Checkliste, die im Methodenkapitel der Vulnerabilitätsanalyse (Kapitel 5.6) dargestellt wurde, ergab, dass im Falle von Infrastruktur und Komponenten die Kupplungsstellen (Umspannwerke, Transformatoren) Schwachstellen darstellen. Diese werden dazu noch durch die fehlende lokale Steuerung und Regelinfrastruktur weiter geschwächt. Durch letztere wäre eine Versorgung aus regionalen Anlagen zu bestimmten Zeitpunkten zumindest theoretisch möglich. Insofern ist derzeit ein Ausfall von Erzeugungsanlagen im Landkreis unproblematisch und dürfte von den Verbrauchern nicht bemerkt werden. Der Ausfall der Stromversorgung über einen längeren Zeitraum führt auf Seiten der Verbraucher zu großen Einschnitten, da diese auf Blackouts nicht vorbereitet sind und im Allgemeinen die Verfügbarkeit von Energie nicht besonders reflektiert wird. Eine entsprechende Sensibilisierung der Bevölkerung, vor allem im eher ländlich geprägten Landkreis, kann als wichtigste Vorsorgemaßnahme begriffen werden, neben Maßnahmen zur Verbesserung der Solidarität und des Organisationsgrads in der Bevölkerung.

Der Ausfall von Marktakteuren ist mit Blick auf die Energieversorgung aufgrund des liberalisierten Strommarktes nicht weiter kritisch, monopolisierte Zuständigkeiten, wie die der Netzbetreiber, bilden hier eine Ausnahme. Aufgrund der gesetzlichen Vorschriften wird aber bei letzteren ein Ausfall aus sehr unwahrscheinlich gesehen, sodass die Vulnerabilität für den Landkreis gering ausfällt. Diese Einschätzung kann auch für einen Verlust an Prognosesicherheit für die Erzeugung von Energie aus Erneuerbaren Quellen gelten. Die Gründe hierfür liegen hauptsächlich daran, dass die regionale Erzeugung noch nicht zur Systemsicherheit beizutragen vermag und die erwartbaren klimabedingten Veränderungen nach heutigem Wissen mit Blick auf Vulnerabilitäten eher vernachlässigbar ausfallen. Die Auswertung von drei aktuell verfügbaren Klimamodellen, CLM, REMO und WETTEREG deuten keine größeren klimatischen Beeinträchtigungen der Energieversorgung im Landkreis Osterholz an. Aufgrund der unterschiedlichen Neigungswinkel der Photovoltaikanlagen wird das saisonale Profil nicht signifikant beeinflusst. Bei der Windkraft wird es zur verstärkten Einspeisung im Herbst und Winter kommen. Aufgrund einer geringen Sensibilität ist die Verwundbarkeit als gering einzustufen.

Wenn Ressourcen, wie Fachkräfte oder Lieferketten für Rohstoffe ausfallen, kann aufgrund der guten Lage, nah an einer Großstadt und zu wichtigen Häfen ein Teil der Bedrohungen abgefangen werden, sodass die Vulnerabilität als Mittel eingestuft wird.

Anders sieht es bei der Skandalisierung von Erzeugungsanlagen, insbesondere von Windkraftanlagenaus. Aufgrund der derzeitigen Bevölkerungsstruktur und aufgrund ausbleibender Maßnahmen zur Stärkung der Solidarität und des Zusammenhalts wird die Anpassungsfähigkeit als gering erachtet und die Vulnerabilität als hoch eingestuft.

Eine steigende Fluktuation nicht kompensierte Stromerzeugung sowie des Verbrauchs, z.B. durch neue Anwendungsfelder wie Ladeeinrichtungen für Elektromobile, und die damit verbundene Gefahr einer Verletzung der Qualitätskriterien der Stromversorgung, stellt eine Schwachstelle auf der Ebene der Verteilnetzen dar, die in Zukunft ohne geeignete Gegenmaßnahmen noch relevanter werden wird.

Auf diese Ergebnisse der Vulnerabilitätsanalyse wird später im Gestaltungsleitbild noch einmal Bezug genommen, wenn das regionale Energiesystem als Zelle modelliert wird.

6.2.7 Gestaltungsleitbild „Resilientes regionales Energiesystem im Landkreis Osterholz“

Das Gestaltungsleitbild Resilientes Regionales Energiesystem im Landkreises Osterholz“ auf der Basis von Erneuerbaren Energien skizziert das Ergebnis einer Spezifizierung und Operationalisierung des Leitkonzeptes ‚Resilientes Energiesystem‘ bezogen auf die Region. Es baut – neben dem Leitkonzept - auf sozio-technischen Untersuchungen des regionalen Energiesystems auf und berücksichtigt dabei die Ergebnisse der Analyse der bestehenden Energieversorgungsinfrastruktur (vgl. Kap 6.2.1), der Akteursanalyse mit den vorhandenen Leitorientierungen (vgl. Kap. 6.2.2 und Kap. 6.2.3) sowie die Ergebnisse der Vulnerabilitätsanalyse des Energiesystems im Landkreis Osterholz (vgl. Kap. 6.2.6). Das Gestaltungsleitbild stellt also eine Synthese dar, zwischen dem Leitkonzept und den regionalen Gegebenheiten mit ihren Notwendigkeiten, Möglichkeiten und Grenzen. In einem weiteren Schritt wird dann noch das aktuell in der Diskussion befindliche Leitkonzept eines zellularen Systems im Landkreis in der Gestaltungsform einer regionalen Zelle als erste Annäherung an das Gestaltungsleitbild diskutiert. Hieraus werden Maßnahmen zur Umsetzung entwickelt.

Wie in Kapitel 2 bereits ausführlich dargestellt dient ein Leitkonzept, wie das Leitkonzept ‚Resiliente Systeme‘ oder ‚Resilientes Energiesystem‘, dazu den Akteuren als Orientierung zu dienen. Auch schon das Leitkonzept vereint die Aspekte des sowohl Erwünschten als auch Umsetzbaren. Das Gestaltungsleitbild geht noch einen Schritt weiter, es spezifiziert das Leitkonzept mit auf einen besonderen Gegenstandsbereich, hier eine bestimmte Region und entwickelt entsprechende Handlungsempfehlungen für die Umsetzung. Für die Entwicklung des Gestaltungsleitbildes ist zudem entscheidend wer der Adressat des Gestaltungsleitbildes sein soll. Das Gestaltungsleitbild muss anschlussfähig an die vor Ort befindlichen Akteure sein und deren Leitorientierungen aufnehmen. Dies wurde bei der Erstellung des Gestaltungsleitbildes für den Landkreis Osterholz dadurch sichergestellt, dass sowohl das Leitkonzept mit seinen Fähigkeiten und Gestaltungselementen als auch ein Vorentwurf des Gestaltungsleitbildes zusammen mit den Akteuren auf zwei Workshops (Dez. 2015 und Okt. 2016) diskutiert und gemeinsam weiterentwickelt wurde. An den Workshops nahmen ausgewählte Akteure des Landkreises Osterholzes, die sich im Energiewendeprozess engagieren teil. Diese wurden bereits

in der Akteursanalyse vorgestellt und setzen sich im Wesentlichen aus den zuständigen Dezernenten und der Regionalmanagerin, den regionalen EVUs sowie ansässigen Ingenieuren und Installationsbetrieben zusammen (vgl. Kapitel 5.2). Der Gestaltungsleitbildprozess kann in vier Phasen aufgeteilt werden, vgl. Kapitel 4.1.2. Für den Landkreis Osterholz wurden wie bereits in der Leitorientierungsanalyse, vgl. Kapitel. 6.2.3, dargestellt nur die Phasen „Anstoß“ und „Spezifizierung der Leitkonzeptidee zu einem Gestaltungsleitbild“ durchgeführt. Dabei überlappten beide Phasen und dauerten von April 2015 bis Oktober 2016 an. Hierzu wurden Akteure interviewt, Treffen vereinbart und im Rahmen von Workshops Leitkonzeptideen und Maßnahmen diskutiert sowie Input der Teilnehmer eingeholt.

Das Gestaltungsleitbild setzt sich aus folgenden Bausteinen zusammen:

- Identifizierung und Konkretisierung von Gestaltungsleitbildelementen resilienter Energiesysteme für den Landkreis Osterholz
- Darlegung des notwendigen Ausbaus im Sinne einer regionalen Zelle (Modellierung)
- Formulierung von Handlungsempfehlungen zu sozioökonomischen Rahmenbedingungen (Gründung Genossenschaft, Öffentlichkeitskampagne, Vermarktungsmodelle für regionalen Strom und erste Bildung von kleinen Zellen)

Der Landkreis Osterholz hat 2008 im Rahmen des Projektes „Energiewende Osterholz 2030“ eine Potentialanalyse erstellen lassen, die zum Ergebnis kam, dass eine bilanzielle Energieautarkie bis 2030 möglich wäre (Landkreis Osterholz 2016e). Es wurde festgestellt, dass im Stromsektor eine Selbstversorgung von bis zu 109% möglich ist. Bei der Wärmeversorgung existieren Potentiale für eine Abdeckung bis zu 83% aus regionalen Quellen. Des Weiteren werden Energieeinsparungen bis zu -30% im Strombereich und bis zu -40% im Wärmebereich für möglich gehalten. Im den weiteren Jahren verfestigten sich die damit zusammenhängenden Leitorientierungen *bilanzielle Selbstversorgung* und *regionale Wertschöpfung*. Hieran wird das Gestaltungsleitbild *resilientes regionales Energiesystem* anknüpfen. In der Systembeschreibung und Vulnerabilitätsanalyse wurde schon dargelegt, dass der derzeitige Energieverbrauch von ca. 2.200 Mio. kWh pro Jahr beträgt, wovon ca. 50% für die Wärmeerzeugung benötigt werden. Aufgrund der im Jahre 2013 erzeugten 152 Mio. kWh Strom aus Erneuerbaren Quellen, wird deutlich, welche Kraftanstrengung notwendig sein wird, um das Ziel der bilanziellen Energieautarkie und damit der gewünschten regionalen Wertschöpfung zu erreichen (vgl. Tabelle 6.3).

Im Leitkonzept „Resilientes Energiesystem“, vgl. Kapitel 2, wurden Gestaltungsprinzipien und –elemente in drei Schritten hergeleitet und weiter spezifiziert, vgl. die Graphiken 1. Biomimetik, 2. Erfahrungen aus dem Risikomanagement, 3. Leitkonzept Resilientes Energiesystem.

Die in diesem Zuge gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Erstellung, der auf die Region spezifizierten Gestaltungsleitbilder mit ein. Der sich anschließende Schritt beinhaltet einen Abgleich und die weitere Konkretisierung bzw. Anpassung an die jeweils vor Ort existierenden Gegebenheiten. Das Ergebnis ist zusammengefasst in Abbildung 6.29 dargestellt.

Abbildung 6.29: Gestaltungsleitbildelemente für ein ‚Resilientes Regionales Energiesystem Osterholz' (grün) zugeordnet zu den Fähigkeiten (blau) eines Resilienten Energiesystems (Quelle: eigene Darstellung)

Eine detaillierte Beschreibung der Gestaltungsprinzipien und –elemente findet sich im Kapitel 2.5. Für den Landkreis Osterholz wurden auf Grundlage der sozio-technischen Untersuchungen spezifische ausgewählt und ergänzt. Gestaltungsleitbildelemente die nicht schon beim Leitkonzept „Resilientes Energiesystem" auftauchen werden im Folgenden beschrieben. Bei der Kommunikation mit den Akteuren und der folgenden Akteursanalyse konnte festgestellt werden, dass es am Zusammenhalt fehlt. Aktive Akteure wünschen sich eine gewichtigere Rolle der Osterholzer Stadtwerke mit dem Ziel die Selbstversorgung im Landkreis zu erhöhen. Auch wurde festgestellt, dass Bürger, die keinen besonderen Bezug zu Energie haben bisher noch kein Interesse gezeigt haben sich an Anlagen zu beteiligen. Mehr noch, wie in der Vulnerabilitätsanalyse festgestellt wurde, stellen sie durch ein hohes Skandalisierungspotential, sogar eine Gefahr für die Transformation in der Region dar. Insofern spielt die *Organisation von Akteuren,* worunter die Gründung von Genossenschaften, Bildung von Netzwerken und Entwicklung einer gemeinsamen Leitorientierung, verstanden werden eine gewichtige Rolle. Dies wird bei den weiter unten dargestellten Maßnahmenempfehlungen ausführlicher dargestellt. Als weitere Schwäche wurde der einseitige Ausbau bestimmter Energieträger, bspw. von Wind identifiziert. Der Grund des starken Ausbaus ist auf ein hohes Potential in der Region

gekoppelt mit fehlenden Anreizen zur Diversifizierung. Die damit erzeugten Stromspitzen sollten durch Flexibilisierungsmaßnahmen, bspw. Power-to-X Anlagen, in geeignete Energieträger, z.B. Wärme oder Gas, umzuwandeln oder gespeichert werden. Dies erhöht zum einen die Diversität, Puffer, Speicher und Redundanzen, führt aber auch zu optionalen Kopplungen und einer Modularisierung des Systems. Es wird empfohlen diese Flexibilisierungsmaßnahmen an geeigneten Stellen im Verteilnetz zu platzieren.

Eine Erhöhung der Diversität und Redundanzen wird auch durch Speicherung und Umwandlung erreicht, die zu einer Diversifizierung der Energieträger führt. Hierfür ist die Betriebsweise der Biogasanlagen derart zu verändern, dass das *Biogas* für Dunkelflautezeiten gespeichert wird, ohne direkt verstromt zu werden. Entsprechenden *BHKW*s sollten in der Art dimensioniert werden, dass die benötigte Leistung des Landkreises gedeckt werden kann. Für die Mobilität sind im Weiteren unterschiedliche Antriebsarten und Kraftstoffe, wie z.B. *Wasserstoff*- oder Elektromobilität zu fördern. Nicht zu vernachlässigen ist, dass auch Verhaltensänderungen von Verbrauchern, bspw. zu *Prosumern*, zu einer Diversifizierung führen können und zusätzliche Ressourcen darstellen. In der Vulnerabilitätsanalyse wurde dies jedoch auch als Risiko identifiziert, wenn die Ortsverantwortlichen auf diese Innovationen nicht reagieren bzw. Anpassungen so spät vornehmen. Wichtig ist, dass die Gestaltung von Infrastruktur nicht starr erfolgt, sondern flexibel. In diese Kategorie lassen sich auch die Vulnerabilitäten der Regionen einordnen, die durch mangelnde Steuer und Regelinfrastruktur sowie Automatisierung verursacht werden. Damit Netzbetreiber flexibel planen können und auch Neues ausprobieren dürfen Bedarf es unterstützender Maßnahmen in den Regulierungsverordnungen für die Netzbetreiber. Nicht zuletzt, damit Netzbetreiber diese zusätzlichen Sicherungsmaßnahmen auch vergütet bekommen. Auf lokaler Ebene lassen sich aber auch schon durch kleinere Anpassungen und Maßnahmen, wie z.B. der Belieferung von kritischen Infrastrukturen und anderen größeren Einrichtungen mit vor Ort produziertem Erneuerbaren Strom, der auch lokal gespeichert werden kann, zusätzliche Sicherheit erreichen. Dieses Bilden von sogenannten Microzellen, die aufgrund von vorhandenen Regel und Steuerungsinstrumenten autark sind, könnte den Anfang darstellen, um ein Notstromnetz zu bilden und Erfahrung mit Inselnetzen und Inselnetzfähigkeit erlangen. Ergänzend sollte ein regionaler Markt für Energie gebildet werden, um Regionalität auch im Energiebereich als Qualitätskriterium einzuführen. Besitzern von Solaranlagen, die in wenigen Jahren aus der Solarförderung rausfallen, könnten die ersten Lieferanten für den Regionalstrom sein.

Ein Teil der oben angesprochenen Gestaltungselemente und entsprechende Maßnahmen wurden auch von den Teilnehmer im Rahmen des ersten Workshops im Landkreis Osterholz genannt, um das Energiesystem im LK OHZ resilienter zu machen (vgl. Tabelle 6.38 in Klammern: Zuordnung zum Gestaltungselement).

Tabelle 6.38: Gestaltungselemente, die von Teilnehmern auf dem 1. Workshop im Landkreis Osterholz genannt wurden. In Klammern ist die Zuordnung zum jeweiligen Gestaltungselement dargestellt. (Universität Bremen 2015)

- Lithium-Ionen-Speicher (Puffer)
- Stärkung PV-Eigennutzung durch Speicherung (Ressourcen)
- Mindestmaß an Eigenerzeugung (Diversität)
- Eigenversorgung bis zur Grenze der Überschusseinspeisung (Ressourcen)
- lokale Versorgungskonzepte <nicht autark> (Modularität)
- Insellösung modellhaft erproben (Innovationsfähigkeit)
- sinnvolle Verknüpfung zentraler und dezentraler Versorgung (Systemarchitektur - Subsidiarität)
- höhere Datenerfassung nötig, um mehr steuern zu können (Rückkopplungsmechanismen)
- PtF-Konzepte für Notstromlösungen (Speicherkapazitäten)
- regulatorische Diskussion (Systemaufbau)

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass aus den durchgeführten Analysen eine Tendenz im Landkreis festzustellen sind, die einem zellularen System aufgeschlossen sind, dies aber noch nicht die Mehrheitsmeinung ist. Das zellulare System war als Hilfskonzept hin zu einem Resilienten Regionalem Energiesystem hilfreich und teilweise anschlussfähig. Eine konkrete Ausgestaltung wird im folgenden Abschnitt vorgestellt.

6.2.7.1 Spezifizierung der Konfiguration der regionalen Zelle anhand einer Modellierung

Als Annäherung an das Gestaltungsleitbild ‚Resilientes Regionales Energiesystem für die Region Osterholz' wurde das aktuell in der Diskussion befindliche (und damit sehr gut anschlussfähige) Konzept des ‚zellularen Systems' identifiziert, vgl. Kapitel 2.4.11. Ein zellulares System ist mit den bei den Akteuren in der Region vorfindbaren und vorhandenen Leitorientierungen, wie „*bilanzielle Energieautarkie*", „*regionale* Wertschöpfung", „*Dezentralisierung"* 3.5.2 und „*regionale Unabhängigkeit*" vereinbar, was auf dem ersten Workshop im Dezember 2015 durch die Äußerungen der Akteure bestätigt wurde. Keine Kompatibilität konnte jedoch mit der Leitorientierung „*Wirtschaftlichkeit*" festgestellt werden.

Das allgemeine Konzept ist als Gestaltungsleitbild im Kapitel Leitkonzept „Resilientes Energiesystem" dargestellt worden. Eine spezifische Konfiguration der Erzeugungsanlagen kann auf unterschiedliche Weise ermittelt werden. In der Leitorientierungsanalyse war festgestellt worden, dass besonders die Leitorientierung „Wirtschaftlichkeit" und „regionale Selbstversorgung" eine wichtige Rolle spielen. Um diese beiden Aspekte, die bei der Bildung einer regio-

nalen Zelle eher nachrangig behandelt werden zu berücksichtigen, wurde eine kostenoptimierte Modellierung im Rahmen eines OEMOF Modells für das Szenario 2040 durchgeführt. Bei dem Szenario wird dabei von einer quasi teil-autonomen Versorgung im Landkreis ausgegangen. Die Modellierungsergebnisse wurden im Kapitel 6.2.6 dargestellt. Als Output liefert das Modell stündlich aufgelöste Zeitreihen für die einzelnen Komponenten, Erneuerbarer Energien Erzeugungsanlagen, Gaserzeugungsanlagen, elektrische Speicher, P2G Umwandler, Wärmepumpen, Wärme- und Gasspeicher. Eine Liste der Komponenten findet sich in Tabelle 6.39: Darstellung der Modellierungsergebnisse für die regionale Zelle – Landkreis Osterholz. Die benötigte installierte Leistung der Erzeuger in MW und Speicherkapazität in MWh stellt die Erfordernisse einer regionalen Zelle mit lokaler Erzeugung dar **(Quelle: Eigene Berechnungen).**Im Weiteren soll nur noch auf die möglichen Beiträge zum Gestaltungleitbild eingegangen werden.

Die Modellierung zeigt auf, dass etwa 294 MW Windkraftanlagen und 258 MW Photovoltaikanlagen zu installieren wären. Die Biogaserzeugung, deren Ausbau wir auf etwa 17 MW beschränkt haben, wird vollständig ausgeschöpft. An ihrer Leistung hängt die Strom und Wärmeerzeugung über Blockheizkraftwerke. Um die Beschränkung des Gasimportes aufzufangen, müssen in dieser Konfiguration etwa 22 MW Leistung an Power-to-Gas Anlagen installiert werden. 16 MW Wärmepumpenleistung und 1562 MWh Gasspeicher werden benötigt.

Tabelle 6.39: Darstellung der Modellierungsergebnisse für die regionale Zelle – Landkreis Osterholz. Die benötigte installierte Leistung der Erzeuger in MW und Speicherkapazität in MWh stellt die Erfordernisse einer regionalen Zelle mit lokaler Erzeugung dar (Quelle: Eigene Berechnungen).

	Installierte Leistung [MW]
Photovoltaik	257,73
Wind	294,37
Biogaserzeugung	16,93
BHKW Leistung (Gas)	16,92
BHKW Leistung elektrisch	7,27
Power-to-Gas Leistung	22,45
Wärmepumpen Leistung	16,25

	Speicherkapazität in [MWh]
Elektrizitätsspeicher	395,46
Gasspeicher gesamt	13518,32
Gasspeicher intern	534,48
Gasspeicher extern	12983,85
Wärmespeicher	1562,28

Die Implementierung ist jedoch aufgrund von zwei unterschiedlichen Netzbetreibern im LK OHZ schwierig und die Umsetzungsbereitschaft bei den Stadtwerken nur begrenzt vorhanden,

da diese keine größeren Erzeugungskapazitäten in der Region haben, sondern über den Verbund Trianel einkaufen (Brand 2015).

6.2.7.2 *Abgleich der Modellierungsergebnisse mit dem derzeitig vorhandenen System*

Wählt man als Zelle Regionen mit Mittelspannung und Niederspannungsnetzen und einen Anschluss an das Hochspannungsnetz, so wie bei den Fallstudien Landkreis Osterholz und Stadt Wolfhagen, so sind derzeit außer den Erzeugern keine Steuerelemente oder Speicher vorhanden. In diesem Abschnitt wird abgeglichen welche Komponenten im Landkreis Osterholz vorhanden sind, und es wird ermittelt was noch notwendig wäre, um daraus eine regionale Zelle zu gestalten. Grundlegende Aspekte sind dabei:

- Subsidiarität (d.h. Möglichkeit zur regionale Steuerung und Regelung)
- Teilautonomie
- Schwarzstartfähigkeit

Standorte der Erzeugungsanlagen laut vorherigem Modell:

Tabelle 6.40: Darstellung des Bestandes an Windkraftanlagen im Landkreis Osterholz im Jahr 2013, des benötigten Zubaus sowie der Gesamtleistung im Jahre 2040. Alle Angaben in MW. (Eigene Zuordnung gemäß unserem Modell und den entwickelten Szenarien)

	Bestand 2013 [MW]	Bestand 2030 [MW]	Zubau [MW] zwischen 2030 u. 2040	Bestand 2040 [MW]
Region 1	5,88	60,3	27,47	87,67
Region 2	22	65,1	27,42	92,52
Region 3	10,7	72,4	30,21	102,61
Region 4	0	2,7	1,7	4,4
Region 5	12,71	5,2	1,98	7,18

Den Simulationsläufen zufolge wäre eine Versechsfachung der Windanlagenleistung notwendig. Wie im Szenario 2030 dargestellt wurden in den Jahren 2015 bis 2017 50 Neuanlagen inkl. Repowering mit einer durchschnittlichen Leistung von 2,8 MW installiert. Wenn diese Anlagen nach 20 Jahren abgebaut werden, ließe sich mit 50 Anlagen mit einer durchschnittlichen Leistung über 4,5 MW je Anlage die benötigte Leistung im Landkreis erreichen.

Die benötigte Solaranlagenleistung im Landkreis zu erreichen erscheint als durchaus realistisch, da das Solarpotential im Landkreis weitaus höher liegt, nämlich bei über 500 MW (Energiewende Osterholz 2030 2015), als der simulierte Wert von 258 MW an Photovoltaikanlagen.

6.2.7.2.1.1.1 Weitere Fragestellungen der Modellierung

Zusätzlich zu den bereits dargestellten Ergebnissen wurden im Rahmen des Projektes im Rahmen der Masterarbeit von Konstantin Kubina weitergehende Fragestellungen bearbeitet. So

stellte sich die Frage, ob die Einführung von regionalen Netzentgelten einen Effekt auf den Zubau von Erneuerbaren Energieanlagen hätte. Hierzu wurde eine Konfiguration simuliert, bei der Entgelte für den regionalen Transport auf der Niederspannungs- und Mittelspannungsebene und ein zusätzlich zu zahlendes Entgelt für den Bezug aus dem vorgelagerten Netz erhoben wurden. Im Modell wurden verschiedene Entgeltstrukturen durchgespielt, welche von 2,5 ct bis 50 ct für den Import aus dem vorgelagerten Netz, von 2 bis 7,5 ct für die Regionen-Ebene und von 3 bis 20 ct für die Gemeindeebene reichten. Die Ergebnisse zeigten, dass für Netzentgelte unter 10 ct/kWh der Import günstiger ausfällt, als die Errichtung zusätzlicher Erzeugungskapazitäten im Landkreis. Erst bei einem Aufschlag, also von Netzentgelten für den Import, zwischen 10 bis 50 ct/kWh ist ein Effekt beim regionalen Zubau von Erzeugungs- und Speicheranlagen zu erwarten. Bedenkt man, dass die derzeit durchschnittlichen Netzentgelte bei 5-7 ct/kWh liegen, würde dies eine sehr starke Verteuerung bedeuten, die schwer zu kommunizieren wäre. Des Weiteren stellt sich die Frage, ob statische Netzentgelte der richtige Weg sind, oder ob nicht doch die in der Diskussion stehenden variablen Netzentgelte eher eine Lastverschiebung begünstigen und damit zu einer Entlastung der Netze führen würden.

Im Weiteren wurde der Fragestellung nachgegangen wieviel Import noch notwendig wäre, wenn Szenario 2030 a umgesetzt würde. Dabei wurden drei Unterszenarien(US) berücksichtigt: US1: keine Speicher; US2: geringer Speicherausbau mit Speichergrößen(1MWh Batteriespeicher, 10 MWh Gasspeicher; 1 MWh Wärmespeicher); US3: keine Limitation beim Speicherausbau. Das Ergebnis zeigt, dass 34% der Elektrizität importiert werden und 25% der Energie zu Zeiten hohen Überschusses exportiert wird. Der Import findet über sämtliche Stunden des Tages gleichverteilt statt, wobei in den Nachmittagsstunden weniger Import stattfindet.

Die Gasbilanz sieht folgendermaßen aus. Im US1 werde 37,7 MWhgas und im US2 20,3 MWhgas importiert. Der Import von Gas beträgt im US1: 150 MWhgas und im US3: 110,3 MWhgas.

Eine weiterführende Darstellung mit Graphiken findet sich in (Kubina 2016).

6.2.7.3 Maßnahmen in Richtung eines Resilienten Regionalen Energiesystems

Unsere vorgeschlagenen Maßnahmen betreffen drei Aspekte. Zum einen werden Maßnahmen vorgeschlagen, die den **Organisationsgrad der Akteure erhöhen**, wodurch sowohl ein weiterer Ausbau von Anlagen verfolgt, als auch eine Erhöhung der regionalen Wertschöpfung erreicht werden kann. Des Weiteren schaffen die **regionale Vermarktung** und der Ausgleich von Energie über regionale Tarife und Produkte einen Anreiz für die Installation von Speichern und ein netzdienliches Verhalten. Als letzten Punkt werden Möglichkeiten vorgestellt **Zellen im Landkreis aufzubauen**. Als Zelle werden in diesem Fall Leuchtturmprojekte vorgeschlagen, wie bspw. die zusätzliche Versorgung von kritischen Infrastrukturen mit Erneuerbaren

Energien. Diese sollen mit Regelinfrastruktur und Speichern bestückt werden. Mit einer zukünftigen Vernetzung der autonom betriebenen KRITIS-Standorte ließe sich zukünftig, mit geeigneter Netztechnik, gegebenenfalls auch ein Notnetz aufbauen.

6.2.7.3.1 Erhöhung des Organisationsgrades der Akteure im Landkreis

Der weitere Ausbau der Erneuerbaren Energien stellt die Gesellschaftsstrukturen in Gemeinden, Städten und Landkreisen vor gewaltige Herausforderungen. Die Akzeptanz dieses Ausbaus wird im großen Stil zukünftig nur durch eine enge Einbindung der Akteure und Bürger zu erreichen sein. Hierzu bedarf es neuer Organisationsstrukturen. Als wichtigste Maßnahme hierfür wird die *Gründung einer breit aufgestellten Dachorganisation oder eines Netzwerks* gesehen, in die alle an der Energiewende beteiligten Personen (Flächenbesitzer, Anwohner, Unternehmen, Finanzierer, Stadtwerke, Gemeinden, Regionalmanagement, …) eingebunden sind. Eine solche Vernetzung war wohl ursprünglich in Gemeinden aufgrund der gegenseitigen Abhängig- und Bedürftigkeit natürlicherweise vorhanden. Jetzt muss sie aktiv vorangetrieben werden. Durch Individualisierung und Anonymisierung und nicht zuletzt durch Digitalisierung, nehmen der nachbarschaftliche Austausch und die Solidarität unter den Bewohnern ab. Die Situation, dass ein Großteil der Flächen, die für Windanlagen geeignet waren, an fremde Investoren verpachtet wurde, darf sich nicht wiederholen. Immerhin haben derzeit 83,8% der Eigentümer der Flächen in den Vorranggebieten ihren Wohnsitz im Landkreishaben. Eine Dachorganisation bzw. ein entsprechendes Netzwerk könnte für die Beteiligten, z.B. Flächenbesitzer, als direkter Ansprechpartner dienen und ihnen aufwendige und mühselige Recherchen ersparen. Auf lange Sicht gesehen wird auch die Teilnahme an Vernetzungstreffen dazu führen, dass sich die Beteiligten besser kennenlernen und Projekte gemeinsam angehen. Eng verknüpft mit der Frage wie die Akteure untereinander vernetzt werden können, ist die *Entwicklung einer gemeinsamen Leitorientierung* (Leitkonzept, Gestaltungsleitbild welche von der Bevölkerung in den Gemeinden des Landkreises getragen wird. Dabei geht es um einen Konsens darüber, wie genau die erwünschte Ausgestaltung der Energiewende in der Region aussehen soll. Solche gemeinsam getragene Positionen sind ein starkes Signal nach Innen und Außen und verringern die Anfälligkeit des Systems gegenüber Blockaden. Im Leitkonzept könnten auch positive Botschaften enthalten sein, die normalerweise Teil einer Kampagne wären, bspw. dass sich Photovoltaik auf Dächern weiterhin lohnt. Im Weiteren würde eine *Risiko-Aufklärung der Bevölkerung*, z.B. über Informationskampagnen, helfen sowie die Ergreifung und Etablierung von Vorsorgemaßnahmen, bspw. Energiesparmaßnahmen oder der generelle Verzicht bzw. die weitest gehende Vermeidung von fossilen Technologien, z.B. Gasheizung, um Fehlinvestitionen zu vermeiden. Dies ist notwendig, da die Klimaziele von Paris eine klare Begrenzung der Treibhausgas-Emissionen fordern, welche nur auf diesem Weg erzielt werden kann.

Dass über die Einbindung von Bürgern die regionale Wertschöpfung erhalten bleiben kann, scheint auf der Hand zu liegen. Ein Schritt hierzu ist die Gründung einer Genossenschaft mit der BürgerInnen in lokale Energiewendeprojekte investieren oder auch schon. bestehende Anlagen aufkaufen könnten. Dies sollte mit Unterstützung wichtiger Akteure bspw. dem Landkreis, den Stadtwerken, etc. durchgeführt werden und war schon beim ersten Workshop auf große Zustimmung gestoßen. Eine weitere Möglichkeit regionale Initiativen zu stärken, wäre das Auflegen von regionalen Anlageprodukten für Bürger, die das Risiko einer direkten Beteiligung an Anlagen meiden. Das Produkt sollte über die ortsansässige Bank ausgegeben werden. Das Ziel dieser Maßnahmen wäre die Stärkung der regionalen Wertschöpfung und die Schaffung von Möglichkeiten die Geldflüsse in der Region zu halten. Die letzte hier vorgeschlagene Maßnahme, die bei der Erhöhung des Organisationsgrades der Akteure in der Region hilfreich ist, ist die Schaffung eines Contractors, der als Risikokapitalgeber für innovative Produkte fungiert. Die Stadtwerke bieten bereits Photovoltaik-Anlagen und Gasheizungen im Contracting an und eignen sich aufgrund der starken regionalen Verankerung sehr gut als Contracting-Akteur. Diesem wäre es damit auch in einem gewissen Rahmen möglich, Innovationen umzusetzen und neuartige Produkte anzubieten, wie bspw. bivalente Wärmepumpen. Der Betrieb der bivalenten Wärmepumpen sollte netzdienlich erfolgen und einen Ausgleich regenerativer Überschüsse in der Region ermöglichen. Des Weiteren sollte die Kopplung an die Einspeisung einer eigenen PV-Anlage möglich sein, um möglichst bereits auf der untersten Netz-Ebene Erzeugung und Verbrauch auszugleichen. Den Stadtwerken beistehen könnte die Stiftung der Volksbank im Landkreis Osterholz. Hierzu müsste der Stiftungszweck geändert werden. Im Weiteren könnte sich eine Möglichkeit Erneuerbarer Energie Anlagen in der Region weiter auszubauen, über das Auflegen von Finanzanlagen erschließen, die die Wertschöpfung im Landkreis erhöhen und gleichzeitig das Energiesystem umweltfreundlicher und versorgungssicherer machen. Die Anlagenformen könnten als Zusammenarbeit von lokalen Finanzinstituten mit lokalen Leitakteuren entstehen und unterschiedliche Gestaltungsform haben, z.B. als Genossenschaft, Fond,... etc. Investiert würde in innovative Leuchtturmprojekte, z.B. Energiehub inkl. Schnellladestation mit angeschlossenem Batteriespeicher, die Erzeugung von flüssigen synthetischen Kraftstoffen und Gasen im Landkreis, oder in gewöhnliche EE Erzeugungsformen bspw. Wind (Repowering) u. PV-Anlagen.

6.2.7.3.2 Regionale Vermarktung und Ausgleich im Landkreis Osterholz

Eine regionale Vermarktung und ein Ausgleich von elektrischer Energie in der Region können dazu beitragen die Netze zu entlasten und die Nutzung von Speichern zu fördern. *Regionale Energieprodukte* sind noch recht selten und werden derzeit teils von Genossenschaften nur in ausgewählten Gebieten angeboten.

Hauptsächlich betrachten wir in dieser Analyse den Stromsektor. Der Wärmesektor ist aus physikalischen Gründen eher regional organisiert. Der Mobilitätssektor bricht mit einer festen Lokalisierung, da an unterschiedlichen Orten Energie bezogen wird. Mit dem neuen EEG 2017 und dem § 79a "Regionalnachweise für direkt vermarkteten Strom aus erneuerbaren Energien" haben sich die Möglichkeiten für eine regionale Grünstromkennzeichnung verbessert. Dabei handelt es sich bisher aber noch nicht um ein Vermarktungssystem, sondern eine „bloße“ Änderung der Stromkennzeichnung mit dem Ziel eine regionale „Färbung“ zu erhalten. Der Regionalnachweis für Strom erfolgt im Postleitzahlen-Gebiet 50 km um die Verbraucher. Bei der Vermarktung entscheidend wäre, dass Regionalnachweise nur für Strom in der geförderten Direktvermarktung mit Marktprämie ausgegeben werden. Mit der Erstellung der Regionalnachweise verbunden ist die Reduktion der Marktprämie um 0,1 ct/kWh, (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz 2017, EEG § 53). Der wesentliche Unterschied zum Herkunftsnachweisregister ist, dass eine Übertragung des Regionalnachweises nur bei vertraglicher Kopplung an den Strom erfolgt (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz 2017, EEG § 79a Abs. 5 S. 3). Die notwendigen Prozesse werden derzeit vom Umweltbundesamt entwickelt. Interesse an einer *Regionalstromkennzeichnung* wurde bisher von Genossenschaften, grünen Energiestartups und Stadtwerken bekundet. Eine repräsentative Umfrage der Fachagentur Windenergie an Land vom Frühjahr 2016 zur Akzeptanz der Windenergie hat ergeben, dass 66% der Befragten bevorzugt Strom aus regionalen Windenergieanlagen kaufen würden, wenn er dementsprechend gekennzeichnet wäre (FA Wind 2016). Wie die Osterholzer Stadtwerke auf dem Abschlussworkshop mitteilten werden bereits Schritte unternommen, um mit einem Dienstleister regionalen Strom aus den Anlagen, die mit auslaufender Förderung aus dem EEG fallen, zu vermarkten.

Zukünftig könnte die Digitalisierung neue Möglichkeiten bieten Energiehandel ohne Zwischenhändler (bspw. im peer-to-peer Verfahren) durchzuführen. Dies kann z.B. über Blockchains erfolgen, eine Methode der erweiterten Liste von Datensätzen, die auch für Bitcoins verwendet wird (PwC 2017). Eine Verbreitung dieser Vermarktungsmöglichkeit hätte zur Konsequenz, dass bisher etablierte Händler den Verlust von Marktanteilen hinnehmen müssen. “Prosumer”, kleinere Betreibergesellschaften und weitere Anlagenbetreiber könnten als Dienstleistungskunden betrachtet werden. Die Stadtwerke blieben damit erster Ansprechpartner für die Energievermarktung in der Region.

6.2.7.3.3 Aufbau von Zellen

Dieser Abschnitt beschreibt Ansätze wie sich Zellen im Landkreis aufbauen lassen. Die Installation von *Regelungs- und Automatisierungstechnik* zusätzlich zu einer Erzeugungsanlage, z.B. Photovoltaik oder BHKW sowie Speicher in Gebäuden des Landkreises, verursacht hohe

Zusatzkosten. Teile davon ließen sich evtl. unterstützt durch ein Drittmittel finanziertes Forschungs- und Entwicklungsprojekt umsetzen. Für ein richtiges Leuchtturmprojekt, welches neben der reinen Erprobung von Technologie auch öffentlichkeitswirksame Ausstrahlung habe sollte, ist dies weniger geeignet. Eine Aufrüstung kritischer Infrastrukturen, bspw. des Rathauses oder des Kreishauses zur *erneuerbaren multimodalen Energiezentrale* wäre evtl. besser geeignet. Eine mögliche Konfiguration, die hier nur konzeptartig vorgestellt wird und keinesfalls auslegungsreif ist, würde eine größere Photovoltaik-Dachanlage mit etwa 100 kWp zur Energieerzeugung vorsehen, einen großen elektrischen Speicher mit einer Speicherkapazität von etwa 500-1000 kWh sowie Regelsoftware und Prognosetools für die optimale Speicherauslastung und Koordination mit dem Notstromaggregat in Notfallsituationen. Am elektrischen Speicher könnte eine Schnellladestation mit verschiedenen Ladestandards (Chademo & CCS-T2) installiert werden mit der Elektro-Dienstfahrzeuge geladen werden können. Diese Fahrzeuge werden außerhalb der Geschäftszeiten in einem öffentlichen Carsharing der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Durch die Kombination und Installation verschiedener Resilienz erhöhender Elemente und ihrer Sektor übergreifenden Verzahnung würde die Versorgungssicherheit der ausgestatteten Gebäude deutlich erhöht.

Im Regulärbetrieb trägt der Speicher dazu bei den Eigenversorgungsgrad zu erhöhen. Außerdem lassen sich Leistungsspitzen, die beim Betrieb der Schnellladestation entstehen, durch den vorgeschalteten elektrischen Speicher abpuffern. Damit die Komponenten auch im Notbetrieb einsatzfähig sind und eine zusätzliche Versorgungsoption, sowohl strommäßig als auch bezüglich der Mobilität, zum Notstromaggregat bilden, wird nur ein bestimmter Teil der Leistung für den Regulärbetrieb freigegeben. Die zuverlässige Versorgung von kritischer Infrastrukturen mit Energie liegt im Interesse der öffentlichen Hand. An dieser läge es auch zusätzliche Kosten zu tragen, sollte eine Förderung der Finanzierung über z.B. LEADER-Projektmittel nicht möglich sein. Des Weiteren gibt es für die einzelnen Elemente auch zusätzliche Förderprogramme, wie bspw. die Ladesäulenförderung und Speicherförderung. Es wird vorgeschlagen auf ein *breites Akteurskonsortium* zurückzugreifen. Die Stadtwerke wären mit ihrem technischen Know-How für den Betrieb prädestiniert. Der Landkreis bringt Fördermittel ein und trägt ein Teil des Risikos, ebenso wie die Stadt, falls diese konkret über das zur Verfügung stellen von Dachflächen beteiligt wird. Die Finanzierung soll sowohl durch eine Bürgergesellschaft, als auch durch ein offenes Finanzprodukt der Volksbank Osterholz-Scharmbeck unterstützt werden.

Die multimodale Energiezentrale könnte auch breitere Unterstützung durch Dienstleistungen in Notfallzeiten mobilisieren. Der Öffentlichkeit sollte z.B. die Möglichkeit gegeben werden dort Kommunikationsgeräte wie Mobiltelefone oder Laptops zu laden. Die Energiezentrale bietet also einen möglichen Weg das Leitkonzept Resilientes Energiesystem in der Gesellschaft zu

etablieren und das Bewusstsein zu verbreitern, dass es der *Vorsorge* bedarf um auf Überraschungen vorbereitet zu sein. Dies geschieht allein schon durch eine Flächendeckende Information darüber, dass es Stellen im Landkreis gibt an denen man auch bei einem Stromausfall elektrische Energie beziehen könnte.

Sobald mehrere Kritische Infrastrukturen über eine zusätzliche Versorgung mit Erneuerbaren Energien und einer zugehörigen Regelung und Steuerung verfügen, ließen sich diese zu einem Notnetz verbinden. Damit hierzu das öffentliche Netz genutzt werden kann, müssten alle übrigen Verbraucher abgekoppelt werden. Die dafür nötigen fernsteuerbaren Schalter wären noch zu installieren.

Als zweites *Leuchtturmprojekt bietet sich die Umwandlung von Strom in Gas (Wasserstoff oder Methan) oder auch zu synthetischen Kraftstoffen (P2F)*. Bei letzteren wäre die Nähe zu Biogasanlagen, als Kohlenstoffquelle notwendig, außer dieser wird aus der Luft gewonnen. Im Weiteren gehen wir von der Erzeugung von Wasserstoff aus, da bei diesem die Umwandlungsverluste am geringsten sind. Es bietet sich an einen sogenannten „Wasserstoffhub“ in der Nähe eines Windparks zu installieren. Hierzu zählen ein Elektrolyseur und ein Speicher zur Lagerung des Wasserstoffs, eine Brennstoffzelle zur Rückverstromung, sodass Regelenergie zur Verfügung gestellt werden kann sowie eine Wasserstofftankstelle zur Versorgung von Fahrzeugen mit grünem Wasserstoff. Diese Anlage koppelt zum einen die Strom und Gasnetze und zum anderen die Stromversorgung und die Mobilität miteinander. Als Betreiber der Anlage kommen die Betreiber der Windkraftanlagen in Betracht, da diese auch die meisten Vorteile bei einem Verkauf des veredelten Produktes, in diesem Fall Wasserstoff, haben. Als Förderung bietet sich die Initiative H_2 Mobility an. Grundsätzlich sind in den nächsten Jahren bis zu 400 Wasserstofftankstellen geplant (BMVI 2016).

6.2.7.4 Zusammenfassung des Gestaltungsleitbildes für den Landkreis Osterholz

Für den Landkreis Osterholz wurde auf Grundlage verschiedener Analysen ein Gestaltungsleitbild für ein Resilientes Regionales Energiesystem erstellt und Maßnahmen formuliert, die zu einer Resilienzsteigerung führen. Die Maßnahmen orientieren sich am übergeordneten Gestaltungsansatz, der aus dem Leitkonzept und daraus folgenden Gestaltungsprinzipien und -elementen abgeleitet worden war. Und sie werden ergänzt durch das aktuell in der Diskussion befindliche Konzept eines zellularen Systems. Zudem hat die strukturelle Vulnerabilitätsanalyse aufgezeigt wo die Schwächen der derzeitigen Versorgung liegen. Die Zuordnung der jeweiligen Beiträge zu den Fähigkeitsdimensionen und Designprinzipien eines Resilienten Regionalen Energiesystems ist in Abbildung 6.29 dargestellt. Insbesondere in drei Bereichen wurden Empfehlungen und Maßnahmen formuliert, beim Organisationsgrad der Akteure, der Regionale Vermarktung und der Bildung von Zellen im Landkreis.

Die *Widerstandsfähigkeit* der Energieversorgung wird über die vorbereitenden Maßnahmen zum Aufbau von Zellen, einer Energiezentrale und von Wasserstoffhubs verstärkt.

Die Redundanz würde durch dezentrale Speicher gefördert, die zusammen mit gekoppelten EE-Anlagen an kritischen Infrastruktureinrichtungen (wie dem Krankenhaus, der Verwaltung, Polizei, Feuerwehr usw.) installiert sind.

Neben diesen regelbaren Erzeugungsanlagen würde auch eine Power-to-Heat-Anlage mit angeschlossenem Heißwasserspeicher im Sinne einer flexiblen Kopplung von Elektrizitäts- und Wärmenetz zur Widerstandsfähigkeit der Energieversorgung im Landkreis Osterholz beitragen. Eine Power-to-Heat Anlage und Wärmespeicher tragen zur negativen Residuallast bei, könnten also die Überschüsse im Netz des Landkreises abgefangen. Damit könnte nicht nur das Netz entlastet, sondern auch die lokal erzeugte Energie in erhöhtem Maße vor Ort genutzt werden.

Zur Verbesserung der *Adaptivität* könnten die letztgenannten Anlagen ebenfalls beitragen, indem sie einen Teil der vermutlich ansteigenden Energiemengen aus den zahlreicher werdenden PV-Dachanlagen abnehmen und für örtliche Wärmeabnehmer erschließen. Daneben würden dezentrale Speicher an kritischen Infrastruktureinrichtungen zu einer erhöhten Adaptivität beitragen, wenn sie durch entsprechende Fernsteuerung zur Speicherung von Überschüssen aus dem Netz im Landkreis Osterholz herangezogen würden.

Diese Rückkopplungsmechanismen im Sinne der Subsidiarität wirken sich positiv auf die Adaptivität aus, ebenso eine erhöhte Ressourcenverfügbarkeit durch das Ausschöpfen von Möglichkeiten der Regionalen Vermarktung und der Stützung von Prosumern, die sich Netz entlastend verhalten.

Auf lange Sicht kann sich das Netzmonitoring zudem auch positiv auf die *Innovationsfähigkeit* auswirken, wenn damit gezielte Maßnahmen zur Verstärkung der Netzinfrastruktur bzw. der Regelung ermöglicht werden. In diesem Zusammenhang wären vor allem regelbare Ortsnetztransformatoren hilfreiche Elemente in Netzgebieten mit stark schwankenden Lasten. Hierzu tragen auch die Akteure bei, die über Netzwerkbildung, eine gemeinsame Leitorientierung sowie Risikoaufklärung die Innovationsfähigkeit im Landkreis steigern können.

6.2.8 Richtungsgebende Einflussfaktoren "Schildkröte"

6.2.8.1 Impulse in Richtung auf ein „Resilientes Regionales Energiesystem“

Im vorigen Kapitel wurde das Gestaltungsleitbild „Resilientes Regionales Energiesystem im Landkreis Osterholz“ vorgestellt, ebenso die Annäherung an dieses Gestaltungsleitbild in Form des Gestaltungsleitbilds “Zelluläres System“. Diese Gestaltungleitbilderwerden sich in Osterholz nur realisieren lassen, wenn hierfür weitreichende Änderungen der Rahmenbedingungen

vollzogen und wesentliche Richtungsimpulse aktiviert werden können. Um welche Rahmenbedingungen bzw. Richtungsimpulse es sich hierbei handelt, wird in diesem Kapitel näher beleuchtet. Zur Strukturierung dieser Richtungsimpulse wurde das „Schildkrötenmodell der richtungsgebenden Einflussfaktoren“ herangezogen (vgl. Kapitel 4). Mit Hilfe dieses Modells wurden existierende sowie zukünftig notwendige Impulse in Richtung auf ein Resilientes Regionales Energiesystem im LK OHZ erfasst und strukturiert dargestellt nach den neun übergeordneten richtungsgebenden Einflussfaktoren Regulativer Push, Anreiz Pull, Skandalisierungs Push, Technologischer Push, Market Pull, Vision Pull, Leitakteure, Netzwerk der Leitakteure und Metafaktoren.

6.2.8.1.1 Regulativer Push

Vorhanden:

Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG): Der Einsatz von erneuerbaren Energien (EE), die bspw. für die zusätzliche Versorgung von kritischen Infrastrukturen (KRITIS) relevant wären, wird durch bereits existierende Gesetzgebungen gefördert. Dazu zählt das EEG, welches den Einspeisevorrang von EE regelt. Ebenso entfällt mit der EEG-Reform 2016/2017, die am 01.01.2017 in Kraft tritt, eine doppelte EEG-Umlagepflicht für die Speicherung von Strom, was für die Umsetzung von Speichern (als wichtigem Gestaltungsprinzip eines Resilienten Energiesystems) förderlich sein dürfte (EEG 2017). Die EEG-Novelle 2016/2017 ermöglicht es zudem, über §79a "Regionalnachweise für direkt vermarkteten Strom aus erneuerbaren Energien" eine regionale Grünstromkennzeichnung einzuführen und könnte damit den Bezug regionaler Produkte stärken.

EEWärmeG, EnEV, KWKG: Gesetzgebungen und Verordnungen, welche die Verwendung von Resilienz steigernden Technologien und Maßnahmen regulieren, wurden durchaus schon auf Bundesebene implementiert. Die Reform der Energieeinsparverordnung (EnEV) in 2009 führte bspw. zu strengeren Anforderungen an die Energieeffizienz von technischen Anlagen in Neubauten (EnEV 2009). Planer, Architekten und Nutzer von neuen Büro- und Verwaltungsgebäuden zogen dementsprechend anstelle konventioneller Lösungen (z.B. separate Klimaanlage und Heizung) vermehrt alternative Kältetechniken wie die integrierte Kälte- und Wärmeversorgung durch Erdsondenfelder heran (Clausen 2014). Ebenso ist die Nutzung von Abwärme, die u.a. auch einen Beitrag zur Entlastung des Stromnetzes leisten kann, in mehreren Gesetzen festgeschrieben. Das Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz (KWKG) reguliert bspw., dass die Abwärmenutzung von biogasbetriebenen BHKW-Anlagen verpflichtend ist (KWKG 2012, 2016), was indirekt auch einen Anreiz zur Wärme-Kälte-Wandlung impliziert. Laut Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG §7 Absatz 1) muss der Wärme- oder Kältebedarf anteilsmäßig durch erneuerbare Energien gedeckt werden. Als Alternative kann die Nutzungspflicht

durch Ersatzmaßnahmen wie die Ausnutzung von Abwäme z.B. von Abluft- oder Abwasserströmen oder von KWK-Anlagen erfüllt werden (EEWärmeG 2015).

Zukünftig notwendig:

Regulierungen, welche den Einsatz von Resilienz fördernden Gestaltungsprinzipien im regionalen Energiesystem vorschreiben, sind bislang noch wenig etabliert (Ausnahmen: n-1-Sicherheit, Regelfähigkeit (Verordnung zu abschaltbaren Lasten) etc.). Aber auch die Notwendigkeiten zur Realisierung der in Paris vereinbarten Klimaschutzziele sind auf der aktuellen Agenda noch nicht angemessen berücksichtigt. Dementsprechend sollten hier neue Gesetzgebungen eingeführt werden, z.B.:

Reformierung des EU-Emissionshandelssystem/ CO_2-Besteuerung: Durch eine im Zuge der Einhaltung der Klimaschutzziele notwendige deutliche Erhöhung des Preises für CO_2-Zertifikate können regionale Industrieunternehmen zu einer Abkehr von fossiler Energie motiviert werden. Gleichzeitig kann der Umstieg auf erneuerbare Energien aufgrund von wirtschaftlichen Vorteilen dazu führen, dass verstärkt Technologien zur Nutzung des Überschussstroms aus volatilen Quellen (z.B. Power-to-Fuel) eingesetzt werden. Auch der Ausbau von Speichern kann dementsprechend die Resilienz des regionalen Energiesystems erhöhen.

Regulative Maßnahmen zur Förderung von zellulären Systemen: Um die Umsetzung der Gestaltungleitbilder voranzutreiben, sind maßgebliche Änderungen der derzeitigen Regulierung erforderlich. Möglichkeiten der regionalen Abkopplung und bessere Bedingungen für die Errichtung von Energiegenossenschaften sind nur einige der zu nennenden Reformen, die eingeführt werden sollten. So betonten Akteure wie OHZ3 und OHZ2, dass Inselsysteme zwar technisch möglich, aber mit Blick auf die regulativen Rahmenbedingungen kaum oder nicht umsetzbar seien. Auch gäbe es keine Regularien, welche netzdienliches Verhalten ausreichend fördern. Für eine detailliertere Beschreibung notwendiger Änderungen wären jedoch tiefergehende Untersuchungen in der Region notwendig.

6.2.8.1.2 Anreiz Pull

Vorhanden:

Förderprogramme des Bundes (BAFA, KfW etc.): Anreize, welche die Umsetzung von Resilienz steigernden Technologien fördern (z. B. KWK-Anlagen, energieeffiziente Kältetechniken, Geothermieanlagen, Wärme-/Kältenetze/-speicher), sind im Rahmen von Förderungen des Bundes und der Länder gegeben. So wird die Errichtung von KWK-Anlagen bis 20 kW durch das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) mit einem Investitionszuschuss gefördert (BAFA 2016b). Das KWK-Gesetz sieht einen Zuschuss für Strom aus KWK-Anlagen bis 100 kW vor, ebenso einen Zuschuss für den Aus- und Neubau von Wärme- und Kältenet-

zen und -speichern (KWKG 2016). Das BAFA fördert die Errichtung bzw. Sanierung von energieeffizienten und klimaschonenden Kältetechniken (u.a. Sorptionskältemaschinen) sowie damit verbundene Beratungsleistungen (BAFA 2016a). Weitere Förderungen existieren z.B. seitens der KfW (Kreditinstitut für Wiederaufbau) für KWK-Anlagen und Geothermieanlagen (KfW 2016).

EEG-Vergütung: Ebenso fördert die EEG-Vergütung den Einsatz von EE und damit indirekt auch den Einsatz von EE im KRITIS-Bereich (EEG 2014).

Forschungsprojekt RESYSTRA: Im Rahmen von Resilienz geprägten Forschungsprojekten wie dem vom BMBF geförderten Projekt RESYSTRA (Universität Bremen 2014) haben sich für regionale Akteure (Energieversorger, Berater, Landesverwaltung, Pioniere etc.) im Landkreis Osterholz (LK OHZ) Möglichkeiten eröffnet in Kooperation mit den Wissenschaftlern die Ausgestaltung und die Umsetzungswege zu einem Resilienten Regionalen Energiesystem zu erarbeiten. Die Forschungsförderung hat es ermöglicht, sich mit solchen Themen zu beschäftigen, einen vereinfachten Zugang zum Thema „Resilienz“ zu erhalten sowie den Zugang zu Informationen, die sonst ggf. nur über externe Berater zugänglich wären.

Zukünftig notwendig:

Strukturierte Förderprogramme des Bundes (BAFA, KfW etc.) für unterschiedliche Akteure: Die eben beschriebenen, bereits vorhandenen Anreize seitens der BAFA, KfW etc. sind oft undurchsichtig. So berichteten die befragten regionalen Akteure, dass eine Vielzahl an Förderprogrammen existiert, die ständigen Änderungen unterliegen und damit nicht verlässlich seien (OHZ-WS2). Dies verunsichere die Akteure und halte von Investitionen in solche Technologien ab. Zudem begrenzen sich diese Förderungen auf Privathaushalte sowie kleine und mittlere Unternehmen (KMU). Größeren Unternehmen wie Energieversorgern würde bislang keine Förderung zustehen.

Bonus für Bezug von regionalem Strom/Wärme und Einführung eines Geschäftsmodells Speicher & Direktvermarktung (Strom/Wärme): Netzentgelte werden bislang unabhängig von den vom Strom passierten Netzebenen bzw. von der von Wärme (z.B. Gas) passierten Durchleitungslänge fällig, so dass kein Anreiz existiert Strom und Wärme regional zu speichern, auszugleichen bzw. zu vermarkten. Daher sollte der Bezug von regionalem Strom und Wärme belohnt werden, indem z.B. eine Netzentgeltbefreiung des regionalen (zellinternen) Strom- bzw. Wärmeflusses erfolgt. Dies könnte auch in einem regionalen Geschäftsmodell münden, welches sich auf die Direktvermarktung und Speicherung von regionalem Strom und Wärme stützt.

Förderung des Einsatzes von netzdienlichen Steuerungs- und Messsystemen: Für ein Resilientes Regionales Energiesystem sind ein Monitoring, Messungen auf den unteren Netzebenen und eine netzdienliche Steuerungsinfrastruktur nötig. Die Integration der entsprechenden Komponenten (Messsysteme, intelligente Ortsnetzstationen etc.) sollte für Netzbetreiber zusätzlich vergütet werden, was einen wichtigen Anreiz zur Umsetzung dieser Komponenten darstellen könnte.

Förderung von Leuchtturmprojekten: Über Forschungsprojekte hinaus ist es zukünftig für die Umsetzung eines Resilienten Regionalen Energiesystems nötig Leuchtturmprojekte mit konkreten Praxisbeispielen (z.B. Sektorkopplung, intelligente Ortsnetzstationen, Low Exergy Solutions, Modellierung und Simulation von regionalen Zellen) zu realisieren, die staatlich gefördert werden. Diese können eine bedeutende Vorbildfunktion im Sinne des „Es geht doch!“ einnehmen (technische und finanzielle Machbarkeit eines Resilienten regionalen Energiesystems bzw. ausgewählter Komponenten für den Landkreis OHZ und auch für andere Regionen). Die Möglichkeit zur Umsetzung von geförderten Leuchtturmprojekten sollte unterschiedlichen Akteure offen stehen (KMU, Großunternehmen, Wissenschaft, Politik & Verwaltung etc.).

Bonus für zusätzliche Versorgung von Kritischen Infrastrukturen (KRITIS) mit EE: Die Versorgung von KRITIS erfolgt derzeit vorwiegend über fossile Energieträger. Auch die Notstromversorgung z.B. von Krankenhäusern basiert auf fossilem Diesel und ist zudem meist nur für wenige Stunden oder Tage ausgelegt. Insbesondere mit Blick auf Lieferengpässe von fossilen Energieträgern wäre eine (zusätzliche) Notstromversorgung mit EE, ggf. in Kombination mit elektrischen Energiespeichern sowie auch mit Wasserstoff oder synthetischen Treibstoffen, von Vorteil (Redundanz, Diversität, Varietät), welche durch Boni angereizt werden sollte.

Energiegenossenschaften (Beteiligung/Anlage): Im Vergleich zu Einzelakteuren ist eine Organisation von regionalen Akteuren über spezifische Unternehmensformen, bspw. über regionale Energiegenossenschaften, eher in der Lage Investitionen zu tätigen und damit die Umsetzung von kostenintensiven Resilienz steigernden Gestaltungselementen (z.B. Quartiersspeicher, intelligente Ortsnetzstationen, Power-to-Gas-Anlagen) zu stemmen und damit nicht zuletzt auch die regionale Wertschöpfung zu erhöhen. Solche regionalen Zusammenschlüsse dürften außerdem zu einer erhöhten Akzeptanz von energiewirtschaftlichen Maßnahmen führen, zum einen bei den Bürgern, die selbst an einer solchen Energiegenossenschaft beteiligt sind bzw. dort investiert haben und damit Mitspracherecht haben, und zum anderen bei nicht beteiligten Bürgern, weil mit dem Genossenschaftsgedanken noch die Gemeinnützigkeit mitschwingt. Dementsprechend wäre die Gründung von Energiegenossenschaften im LK OHZ eine wichtige Voraussetzung für weitere Schritte in Richtung auf ein nachhaltigeres und Resilientes Regionales Energiesystem.

Öffentlichkeitsarbeit zur Sensibilisierung der Bürger: Im Landkreis Osterholz wurden und werden in Zukunft Informationskampagnen von Seiten der Landesverwaltung teilweise in Kooperation mit anderen Akteuren (z.B. Klimaschutz- und Energieagentur Niedersachsen) durchgeführt, um die Bürger stärker für die Energiewende zu sensibilisieren. Bspw. wurde die Kampagne „Clever heizen“ initiiert, in der Hauseigentümer über Optimierungsmöglichkeiten ihres Heizverhaltens und Energieeffizienzmaßnahmen an Heizungsanlagen kostenfrei von Energieberatern informiert werden (Landkreis Osterholz 2016a). Für die Sensibilisierung für das Leitkonzept Resilientes System können solche Anreize genauso ein wichtiges Instrument darstellen.

6.2.8.1.3 Vision Pull

Vorhanden:

100% Erneuerbare-Energie-Region bis 2030 (bilanziell): Die Verwaltung des LK OHZ hat in ihrem Prozess Energiewende 2030 das Gestaltungsleitbild formuliert, sich bis 2030 zu 100 % bilanziell selbst mit EE im Strombereich versorgen zu können, was durch den Ausbau der erneuerbaren Energien im Landkreis erreicht werden soll. Zusätzlich soll eine Senkung des Energieverbrauchs durch Energiesparmaßnahmen und eine Steigerung des Eigenverbrauchs an lokal erzeugtem Strom realisiert werden (Landkreis Osterholz 2016e). Dieses Gestaltungsleitbild ist nicht nur für die Umsetzung eines nachhaltigeren Energiesystems, sondern auch für die Umsetzung eines resilienteren regionalen Energiesystems von enormer Bedeutung. So impliziert der angestrebte höhere Anteil an EE eine Abkehr von fossilen Energieträgern, die aufgrund der Importabhängigkeit und längerfristig auch ihrer Endlichkeit die Versorgungssicherheit nicht gewährleisten könnten. Ebenso unterstützt der Umstieg auf EE die Versorgung von KRITIS mit EE. Die intendierten Energiesparmaßnahmen können gleichzeitig zu geringeren Netzbelastungen im Sinne der Resilienz führen. Ein Streben nach einem höheren Selbstversorgungsanteil unterstützt zudem das Resilienz steigernde Gestaltungsleitbild einer regionalen Zelle: Im LK erzeugte Energie wird auch im LK genutzt. Damit macht sich der LK unabhängig von anderen Regionen und die Kopplung wird flexibler.

Regionale Wertschöpfung, Unabhängigkeit von Energieimporten und Vorbild Güssing: Mit dem im LK OHZ vorherrschenden Gestaltungsleitbild *100% Erneuerbare-Energie-Region* wird übergeordnet u.a. eine höhere *Regionale Unabhängigkeit von Energieimporten* intendiert. Einige regionale Akteure gehen noch weiter und streben eine Energieautarkie an, d.h. eine von außen abgegrenzte regionale Erzeugung, Speicherung und Nutzung von Strom (und ggf. Wärme). Ebenso wird mit dem beschriebenen Gestaltungsleitbild eine Erhöhung der *Regionalen Wertschöpfung* verfolgt. Ausgaben für Energieimporte sollen reduziert werden, lokale EE-Anlagen in der Hand von lokalen Investoren liegen und Energieeffizienzmaßnahmen durch lokale Handwerker durchgeführt werden. Damit soll die Kaufkraft an die Region gebunden

werden. Gegenwärtig geben die 112.000 Einwohner des LK OHZ etwa 146 Millionen Euro für Strom und Wärme aus, was ein enormes Potenzial an regionaler Wertschöpfung bedeutet. Als Vorbild für eine regionalen Wertschöpfung und Unabhängigkeit dient die *Stadt Güssing* in Österreich, welche erfolgreich eine 100% EE-Versorgung umsetzen und damit ihre regionale Wertschöpfung enorm steigern konnte (Koch 2006; Osterndorf 2014).

Zukünftig notwendig

100% Erneuerbare-Energie-Region Sektor übergreifend: Das in der Region geteilte Gestaltungsleitbild *100% Erneuerbare-Energie-Region* bis 2030 ist bislang vornehmlich stromzentriert und berücksichtigt die Sektoren Wärme und Verkehr wenig bis gar nicht. Zwar wurden sowohl die Energieeinsparung im Strombereich als auch die Energieeinsparung im Wärmebereich als Ziele für den LK OHZ im Jahr 2030 explizit formuliert (Landkreis Osterholz 2016e), doch die forcierte Energieeinsparung im Wärmebereich wurde bisher nur im Rahmen von Informationskampagnen aktiv verfolgt . Der Verkehrssektor, der bezogen auf Deutschland immerhin 30% des Endenergiebedarfs und damit den höchsten Anteil im Vergleich zu den Sektoren Industrie, Haushalte und Gewerbe/Handel/Dienstleistungen ausmacht (Umweltbundesamt 2014), wurde bislang gar nicht berücksichtigt.

Gelebte regionale Wertschöpfung: Zur Erhöhung der erwünschten regionalen Wertschöpfung wurden bereits einige Aktivitäten im Landkreis angestoßen, bspw. die Unterstützung von Investitionen in privaten und gemeinschaftlichen EE-Anlagen (z.B. gemeinschaftliche Finanzierung von Solaranlagen) und die Förderung von Energieeffizienzmaßnahmen an Gebäuden (z.B. Bürgerinformationskampagnen). Gleichzeitig führen die Installation und Wartung dieser Anlagen und Maßnahmen durch regionale Unternehmen und Handwerker zu einer höheren *Regionalen Wertschöpfung.* Teilweise wird das Leitbild im LK OHZ jedoch noch nicht ganzheitlich „gelebt“, blickt man bspw. auf einen Großteil der Windkraftanlagen, der von überregionalen Investoren betrieben wird (Landkreis Osterholz 2016d). Dies führt dazu, dass Gewerbesteuern nur zu einem geringeren Teil im Landkreis verbleiben. Hier sollte das Leitkonzept *Regionale Wertschöpfung* die Entscheidungs- und Umsetzungsstrukturen teils noch stärker prägen, was wiederum durch verantwortliche Koordinatoren (Kümmerer), die an das Leitkonzept erinnern, unterstützt werden sollte.

Erweiterte Versorgungssicherheit, langfristige Wettbewerbsfähigkeit, Regionalität: Für ein Resilientes Regionales Energiesystem relevante, aber teils noch wenig ausgeprägte Zukunftsvorstellungen sind bspw. eine *Erweiterte Versorgungssicherheit, Langfristige Wettbewerbsfähigkeit* und *Regionalität*.

Zwar hat das Thema *Versorgungssicherheit* nach wie vor eine maßgebliche Bedeutung bei zivilgesellschaftlichen Akteuren und regionalen Energieversorgern (z.B. als Teil des energie-

politischen Zieldreiecks), aber in Entscheidungssituationen für bzw. gegen Investitionen überwiegt derzeit noch der Aspekt der *(kurzfristigen) Wirtschaftlichkeit* (Effizienz). Da das Stromsystem des Landkreises trotz der bereits hohen Einspeisung von fluktuierenden erneuerbaren Energien (teils bei über 75%, EWE 2016b) von niedrigen Ausfallzeiten geprägt ist, wird eine *erweiterte Versorgungssicherheit* in den anstehenden Phasen des weiteren Umbaus sowie gegenüber etwaigen unerwarteten Überraschungen von den lokalen EVUs derzeit nicht für notwendig erachtet. Eine höhere Sensibilität der Akteure in der Region für eine resiliente Energieversorgung, die auch die Energiewende als Ganzes unter Einbeziehung von Wärme und Mobilität in den Blick nimmt und ebenso auf die möglichen instabilen Phasen im Prozess des damit verbundenen Umbaus des regionalen Energiesystems reflektiert, wäre für die Umsetzung eines Gestaltungsleitbildes Resilientes Regionales Energiesystem Osterholz ausgesprochen förderlich.

Eng verknüpft mit der *erweiterten Versorgungssicherheit* ist das Leitkonzept der *Langfristigen Wettbewerbsfähigkeit*. Aufgrund eines zunehmenden Wettbewerbsdrucks und erlittener Verlustgeschäfte (EWE AG 2012) lag insbesondere bei dem regionalen Energieversorger EWE der Fokus lange Zeit auf der kurzfristigen Wettbewerbsfähigkeit. Investitionen mit langen Amortisationszeiträumen, die mit Blick auf eine Versorgungssicherheit erst langfristig bspw. aufgrund des stetig wachsenden Anteils von EE notwendig werden (z.B. Messsysteme, Speicher, intelligente Ortsnetzstationen), wurden in der Vergangenheit nicht oder nur zögerlich angegangen. Dieser temporäre Stillstand in der Region könnte sich rächen, wenn insbesondere vor dem Hintergrund der Beschlüsse von Paris zur Einhaltung des 1,5 Grad-Ziels in naher Zukunft drastische CO_2-Emissionsreduktionen verlangt und durch z.B. drastische Erhöhungen der Zertifikatspreise und deutliche Senkungen der betrieblichen CO_2-Emissionsquoten durchgesetzt werden. Bei der EWE sind zwar Tendenzen zu erkennen, dass das Thema Versorgungssicherheit eine wachsende Bedeutung im Unternehmen gewinnt (bspw. im Nachhaltigkeitsbericht 2014, EWE AG 2014), auf der anderen Seite zieht sich der Energieversorger aber aus dem Forschungsinstitut NEXT ENERGY zurück, welches besonders in der Speichertechnologie und im Bereich Sektorkopplung wissenschaftlich aktiv ist (NWZ 2016).

Bei den Stadtwerken Osterholz ist eine Strategieabteilung verortet, die sich mit langfristigen Planungen beschäftigt (OHZ-WS2). Dort wird das Thema Resilienz für den Energiebereich jedoch erst als langfristig bedeutend erachtet und ein Handlungsbedarf zur Umsetzung von Resilienzmaßnahmen momentan nicht gesehen (vgl. auch Leitorientierungsanalyse OHZ, Kapitel 6.2.3). Für die Umsetzung von Resilienz steigernden und damit vorsorgeorientierten Maßnahmen wäre es somit hilfreich, wenn die regionalen Akteure auch ihre langfristige Wettbewerbsfähigkeit im Blick behalten würden.

Für einen Großteil der Konsumenten ist bislang weniger relevant, woher sie ihre Energie beziehen. Es überwiegt nach wie vor die Ansicht „Strom kommt aus der Steckdose und was dahinter ist, interessiert mich nicht“ (Henseler 2006). Auf der anderen Seite hat das Leitkonzept *Regionalität* im Lebensmittelbereich bereits eine hohe Bedeutung. Auch im Energiebereich könnte eine derartige Regionalorientierung hilfreich sein für die Umsetzung eines zellulären Systems und damit für eine verstärkte Nutzung und Nachfrage nach Regionalstrom. Dementsprechend sollte das Leitkonzept *Regionalität* auch unter Nachfragegesichtspunkten stärker im LK propagiert und implementiert werden.

Bürgerbeteiligung: Die Beteiligung von zivilgesellschaftlichen Akteuren sowie Konsumenten bzw. Prosumern im Energiewendeprozess spielte bislang im LK OHZ eine eher untergeordnete Rolle. Auf der anderen Seite haben sich in der Vergangenheit mehrere Bürgerinitiativen gegen den Ausbau von erneuerbaren Energien (Windkraft) im LK gebildet (Osterndorf 2014). Zivilgesellschaftliche Akteure stellen eine sehr bedeutende Gruppe dar, wenn es um die Umsetzung eines gesellschaftlich akzeptierten Energiesystems geht. Nur mit ihrer Partizipation im Energiewendeprozess können ihre Wünsche und Bedürfnisse hinreichend einbezogen und Rahmenbedingungen für die Akzeptanz der Transformationsprozesse geschaffen werden. Durch die Einbeziehung solcher Akteure können Leitkonzepte wie *Resilienz* (*Erweiterte Versorgungssicherheit)* und *Regionalität* auf eine breite Basis gestellt werden und im bestmöglichen Fall zu gelebten Leitkonzepten transformieren. Somit sollte die Bürgerbeteiligung noch stärkeren Eingang in den Transformationsprozess des Energiesystems des LK finden und gelebt werden.

6.2.8.1.4 Market Pull

Vorhanden:

Nachfrage nach Energieeffizienzmaßnahmen: Es ist deutschlandweit festzustellen, dass die Anzahl der Effizienzmaßnahmen an Gebäuden und Anlagetechniken seitens Haus- und Wohnungseigentümern sowie der Wirtschaft – wenn auch langsam - steigt (DIHK 2014; UBA 2016). Dies ist z.T. getrieben von Richtungsimpulsen im Regulativen Push (z.B. EEWärmeG, EnEV) und im Anreiz Pull (z.B. Förderungen des Bundes wie BAFA, KfW), aber auch von Überzeugungen der Eigentümer zum Umwelt- und Klimaschutz.

Zukünftig notwendig:

Nachfrage nach Regionalstrom: Das noch nicht hinreichend gelebte Leitkonzept *Regionalität* im Vision Pull könnte gleichzeitig zu einer hohen Nachfrage nach Regionalstrom führen, was die Nutzung/Speicherung von regionalem Strom auf Verteilnetzebene und damit den Ansatz einer regionalen Zelle vorantreiben könnte. Förderlich für die Nachfrage könnte auch die in der EEG-Novelle 2016/2017 enthaltene regionale Grünstromkennzeichnung sein.

Nachfrage nach Versorgungssicherheitstarifen: Ebenso könnten die derzeit noch eher schwachen Leitkonzepte *Erweiterte Versorgungssicherheit* und *Langfristige Wettbewerbsfähigkeit* im Zuge ihres Bedeutungsgewinns zu einer höheren Nachfrage von besonders auf Versorgungssicherheit angewiesenen lokalen Unternehmen und Bürgern führen. Mit Versorgungssicherheitstarifen sind Tarife intendiert, die eine besonders versorgungssichere Versorgung mit Strom (in einem besonders engen Bereich von Spannung und Frequenz) und Wärme garantieren und dementsprechend höher sind als Standardtarife. Letztendlich würde eine solche Nachfrage bei den Energieversorgern, Energievermarktern und Netzbetreibern einen Impuls auslösen, um Steuer- und Regelmechanismen einzuführen, die Systemdienstleistungen auf den untersten Ebenen zur Verfügung stellen. Dies wäre ein weiterer Schritt zur Etablierung einer regionalen Zelle.

Nachfrage nach Speichern: Eine verstärkte Nachfrage nach Speichern wäre ebenfalls wünschenswert für die Umsetzung eines Resilienten Regionalen Energiesystems. Die Erleichterung für den Betrieb von Speichern durch den Wegfall der doppelten EEG-Umlagepflicht ab 2017 könnte die Speichernachfrage zukünftig erhöhen.

6.2.8.1.5 Technology Push

Vorhanden:

Technologien wie (bivalente) Wärmepumpen, integrierte Kälte- und Wärmeversorgung mittels Erdsondenfelder: Viele technologische Komponenten, welche zur Stärkung der Resilienz des Energiesystems beitragen, sind bereits entwickelt. Bspw. führen Wärmepumpen und Erdsondenfelder dazu, dass niederexergetische Quellen wie Erdwärme lokal für Wärme- und Kältedienstleistungen genutzt werden können (Clausen 2014). Solche Technologien können den zusätzlichen Strombedarf aufgrund der Nutzung ohnehin vorhandener Energiequellen vermindern, die Widerstandsfähigkeit der Energieversorgung durch ihre dezentrale Verteilung erhöhen (unabhängiger von externen Wärmequellen) und damit insgesamt die Stromnetze entlasten (Clausen 2014; Gößling-Reisemann et al. 2015). Im Falle einer bivalenten Wärmepumpe kann außerdem auf unterschiedliche Energieträger zurückgegriffen werden, was die lokale Ressourcenbreite und -diversität erhöht.

Gebäudeeffizienzmaßnahmen: Ebenso sind technologische Möglichkeiten vorhanden, an Gebäuden energieeffiziente Sanierungsmaßnahmen (an Gebäudehülle bzw. Anlagentechnik) durchzuführen, welche den Strom- und Wärmebedarf und damit die Netzbelastung senken. Im Bereich der Dämmmaterialien, der isolierten Fenster sowie insbesondere bei Heizungsanlagen sind in den letzten Jahren erhebliche technische Fortschritte mit Blick auf die Effizienz vollzogen worden (Sprengard et al. 2013)(BDEW 2013);.

Zukünftig notwendig:

Kostendegression bei Speichern und P2X zur Sektorkopplung: Derzeit sind die Investitionskosten für Technologien, welche die Resilienz in regionalen Energiesystem im Sinne einer netzdienlichen Betriebsweise erhöhen können, noch hoch. Bei Wärmepumpen macht sich die Kostendegression mittlerweile bemerkbar. Bei neueren, weniger marktseitig etablierten Technologien wie Speicher und P2X zur Sektorkopplung sind die Investitionskosten jedoch noch sehr hoch, da sie in geringeren Stückzahlen produziert werden (insb. Batteriespeicher, Absorptionskälteanlagen) bzw. bislang nur als Forschungsanlagen (insb. Power-to-X) existieren (Agora Energiewende 2014). Hier ist eine Kostendegression nötig, die u.a. von der Nachfrage und den Regulationen abhängt.

6.2.8.1.6 Skandalisierungs Push

Vorhanden:

Medienberichte über Blackout, über Endlichkeit der Ressourcen und Naturkatastrophen: Derzeit sind es vor allem noch die Medien, die über mögliche Blackout-Szenarien und über die Endlichkeit von Ressourcen berichten und damit mittelfristig eine Wirkung auf die Akteure ausüben können. Sie zeigen auf, welche Gefahren längerfristige Stromausfälle mit sich ziehen können und welche Konsequenzen daraus gezogen werden sollten.

Ausbau fluktuierender Erneuerbarer Energien als Gefährdung der Versorgungssicherheit: Der Ausbau der EE und die damit verbundene volatile Einspeisung sowie der Atomausstieg haben in der Vergangenheit immer wieder die Befürchtung vor einer unzureichenden Versorgungssicherheit aufflammen lassen (dadurch gehen die Lichter aus). Das berechtigte Anliegen der Versorgungssicherheit war gegen den Ausbau der Erneuerbaren gerichtet, was insbesondere von den großen Energieversorgungsunternehmen formuliert wurde (vgl. DUH 2008). Diese Überlegungen waren und sind auch förderlich für den Resilienzdiskurs.

Zukünftig notwendig:

Paradigmenwechsel in der Debatte über Versorgungssicherheit: Die Befürchtung vor Versorgungssicherheitslücken mag für die erste Phase der Energiewende noch nachvollziehbar gewesen sein. Inzwischen dürfte aber deutlich geworden sein, dass die Lichter nicht ausgehen, wenn man Kernkraftwerke und fossile Kraftwerke abschaltet. Heute richtet sich das Thema Versorgungssicherheit auf andere Faktoren wie die Endlichkeit der fossilen Energieträger und mögliche Blackouts durch Extremwetterereignisse, Terrorismus oder Hackerangriffe. Derzeit ist aber noch nicht beobachtbar, dass sich Bürgerinitiativen diesem Thema zuwenden, weder in der Form der Skandalisierung der Unsicherheiten noch in der Form eines neuen Leitkonzepts *Resiliente Energiesysteme*.

6.2.8.1.7 Leitakteure

Vorhanden:

Aktiver und innovativer Landkreis, Unternehmen und Pioniere vor Ort: Im LK OHZ agieren sehr aktive und innovative Unternehmen, Projektierer und Pioniere (u.a. einzelne Installateure, Handwerker, Bürger) sowie eine engagierte Kreisverwaltung, die dem Thema Energiewende offen gegenüberstehen. Alle haben maßgeblich an der Entwicklung des Gestaltungsleitbildes 100% Erneuerbare-Energie-Region bis 2030 mitgewirkt. Diese Leitakteure könnten durch ihre auch an Resilienz anschlussfähigen Zielvorstellungen und Leitorientierungen wie *Regionale Wertschöpfung* und *Regionale Unabhängigkeit* auch das Gestaltungsleitbild Resilientes Regionales Energiesystem im Landkreis Osterholzvorantreiben und etablieren.

6.2.8.1.8 Netzwerk der Leitakteure

Vorhanden:

Zusammenarbeit der Leitakteure unter Einbeziehung von Forschungsinstitutionen: Die eben genannten Leitakteure arbeiteten in der Vergangenheit im Rahmen von Förderprogrammen und Initiativen im Energiebereich zusammen, z.B. im Rahmen der Initiative „Energiewende Osterholz 2030“, welche gefördert wurde durch das europäische Nordseeprogramm Interreg IV B „North Sea Sustainable Energy Planning“ (NorthSea SEP, 2009 bis 2012), das LEADER finanzierte Projekt „Green Tech OHZ“ (2011) und das EFRE geförderte regionale Wachstumsprojekt „Energiekompetenz Osterholz“ (2011-2014). Außerdem existiert im Landkreis OHZ ein Energieberater-Netzwerk (ENERKOM-OHZ), in dem sich hauptberufliche Energieberater, Ingenieure, Architekten und Handwerksmeister zusammengeschlossen haben und Bürgern Dienstleistungen im Bereich des energiebewussten Bauens und Sanierens anbieten. Im Rahmen der Zusammenarbeit sind Leuchtturmprojekte in der Region umgesetzt worden, z.B. der Grüne Campus in Osterholz-Scharmbeck, welcher nach energetischen Gesichtspunkten errichtet wurde, ein Blockheizkraftwerk am Worpsweder Hallenbad und eine Biogasbetriebene "Nahwärmeinsel" in Hambergen.

Auffällig ist, dass die Akteure vergleichsweise homogene Zielvorstellungen verfolgen wie *Regionale Wertschöpfung, Regionale Unabhängigkeit* und *100% Erneuerbare Energien*. Mit solchen gemeinsamen Orientierungen können sie als starkes Netzwerk agieren, das gemeinsam in der Lage ist Strategien und Maßnahmen zur Umsetzung des Leitkonzeptes Resilienz zu entwickeln und zu implementieren. Hierfür wäre auch in Zukunft eine Unterstützung durch und ein Bemühen um Förderprogramme (Anreiz Pull) hilfreich, die einen gemeinsamen Diskussions-, Entscheidungs- und Handlungsraum für die regionalen Akteure bieten können. Förderlich ist hierfür, dass die regionalen Akteure Kontakte zu Forschungsinstitutionen und -netzwerken pflegen, die sich mit der Energiewende hin zu einem nachhaltigeren und resilienteren

Energiesystem beschäftigen. So wurde in der Vergangenheit gemeinsam mit Energieversorgern, Wissenschaft und regionalen Pionieren ein Quartiersspeicher in der Region geplant, dessen Umsetzung jedoch u.a. an regulativen Rahmenbedingungen scheiterte.

Koordinator des Netzwerkes: Zum Aufbau derartiger Netzwerke aus Leitakteuren und zur Verstetigung von Maßnahmen braucht es in der Regel einen übergeordneten Koordinator als eine Art „Kümmerer“ (einzelner Akteur oder Zusammenschluss von Akteuren). Dieser sollte die unterschiedlichen Akteure und Interessen zusammenbringen und zur Erarbeitung von gemeinsamen Zielvorstellungen bzw. Strategien anregen. Ebenso sollte ein solcher „Kümmerer“ alle Akteursgruppen (z.B. auch die Zivilgesellschaft) des Energiesystems im Blick haben und bspw. Bürgerbeteiligungsprozesse anstoßen. Sein Augenmerk könnte bspw. auch auf die Verwaltung lokaler Flächen gerichtet sein, so dass dafür Sorge getragen wird, dass diese im Sinne der regionalen Wertschöpfung in Hand regionaler Akteure bleiben. Als ein solcher Koordinator fungiert seit kurzem die Landkreisverwaltung. Mit einem Regionalmanager und Klimaschutzmanager koordiniert sie die Energiewendeaktivitäten und könnte in Zukunft auch die Umsetzung des Gestaltungsleitbildes vorantreiben.

Zukünftig notwendig:

Zusammenarbeit der lokalen EVUs mit Leitakteuren: Es konnte festgestellt werden, dass teilweise eine noch engere Kooperation der Leitakteure wie Politik, Wirtschaft, Handwerker und Wissenschaft mit den lokalen Energieversorgern von Vorteil wäre. Als Herausforderung stellte sich heraus, dass im Landkreis zwei Energieversorger (gleichzeitig Netzbetreiber) existieren, die zwar durch ihre Anteilseigner Verbindungen aufweisen (vgl. Kapitel 6.2.1), aber weitestgehend unabhängig voneinander ihre Netzgebiete verwalten. Bei dem direkt im Landkreis verorteten Energieversorger, den Stadtwerken OHZ, ließ sich ermitteln, dass er durch seinen regionalen Bezug in eine Vielzahl von regionalen Energiewendeaktivitäten der Leitakteure involviert ist (z.B. Grüner Campus, Quartiersspeicher). Die EWE als weiterer Energieversorger ist dagegen weniger in Form von gemeinsamen Netzwerken und Wissenstransfer regional aktiv. Die Zusammenarbeit unter den Energieversorgern und mit weiteren Leitakteuren sollte daher optimiert werden, insb. unter dem Aspekt, dass die EVUs bedeutende Akteure für die Umsetzung eines resilienteren Energiesystems im LK OHZ darstellen und als wichtige Leitakteure fungieren könnten.

6.2.8.1.9 Metafaktoren

Vorhanden:

Stromausfälle durch Wetterextreme und Terrorangriffe: Es zeigt sich nicht nur regional die Tendenz, dass die Bedeutung von Vorsorge nicht nur gegenüber bekannten Störereignissen,

sondern ebenso gegenüber unbekannten Störereignissen und Überraschungen in der Gesellschaft steigt (Risikogesellschaft). Damit erreichen Zukunftsvorstellungen wie erweiterte Versorgungssicherheit (zumindest bei Zivilgesellschaft und NGOs) ein neues Niveau. Dafür verantwortlich sind insbesondere auch Metafaktoren wie Stromausfälle durch Wetterextreme und Terroranschläge/-angriffe, die dazu beitragen die Akteure für solche unvorhersehbaren Störereignisse zu sensibilisieren.

Sinkendes Zinsniveau: Das sinkende Zinsniveau und die damit verbundene unwirtschaftliche Geldanlage im Rahmen von konventionellen Tagesgeld- und Sparkonten könnte dazu führen, dass Akteure vermehrt in den Wärmeschutz investieren sowie in komplexere Projekte, wie z.B. in den Aufbau von EE-Erzeugungsanlagen im Rahmen von Energiegenossenschaften. Dies könnte gleichzeitig förderlich für die Gründung von Energiegenossenschaften sein (Anreiz Pull). Derzeitig ist jedoch aufgrund der EEG-Novelle und fehlender Geschäftsmodelle für Energiegenossenschaften eher ein Rückgang dieser Aktivitäten zu verzeichnen (DGRV 2016).

Die nachfolgende Abbildung 6.30 zeigt die eben erläuterten Richtungsimpulse und deren Wechselwirkungen auf.

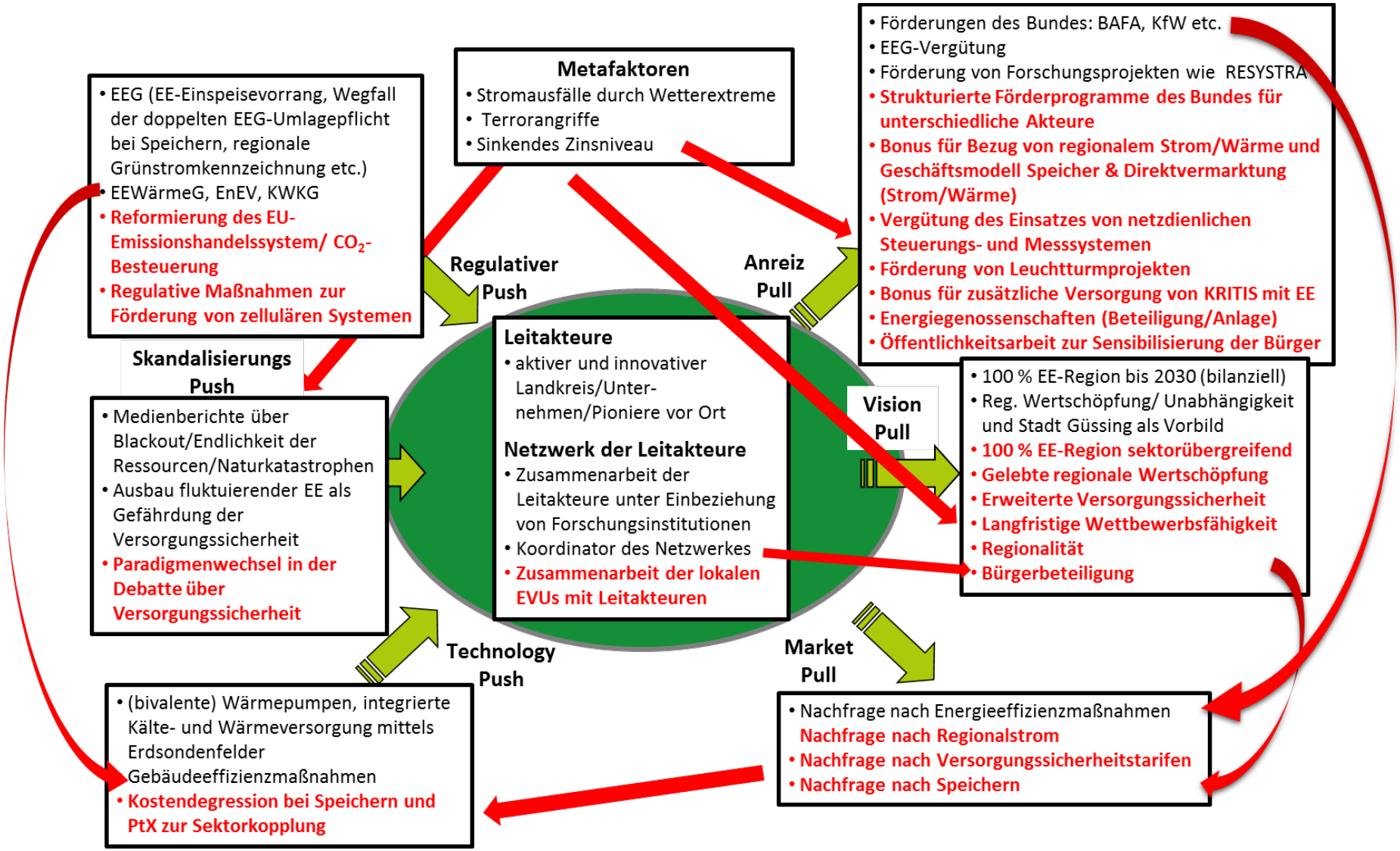


Abbildung 6.30: Schildkrötenmodell mit Impulsen in Richtung auf ein resilienteres Energiesystem des Landkreises Osterholz; Richtungsimpulse schwarz: bereits vorhanden, rot: zukünftig notwendig (in Anlehnung an (Brand 2016)

6.2.9 Zusammenfassung und Fazit der Fallstudie Landkreis Osterholz

Der Landkreis Osterholz befindet sich im Norden Niedersachsens und grenzt im Süden an die Stadt Bremen an. Er hatte im Jahr 2105 113.579 Einwohner und umfasst eine Fläche von 650,81 km², wovon 65,6% landwirtschaftlich genutzt werden. Verglichen mit anderen Landkreisen liegt der Landkreis auf den hinteren Plätzen im Regionalranking. Dies gilt auch für die Einkommensverhältnisse. Bei Kaufkraft und Neugründungen ist der Landkreis jedoch eher im oberen Viertel des Reginalrankings. Die Energieinfrastruktur für Strom und Gas wird im Landkreis von zwei unterschiedlichen Netzbetreibern bereitgestellt. In den Gemeinden Osterholz-Scharmbeck, Ritterhude und Lilienthal verantworten die Osterholzer Stadtwerke den Betrieb und im übrigen Gebiet die EWE mit Sitz in Oldenburg. Im Jahr 2013 wurden 152 Mio. kWh Elektrizität hauptsächlich aus Erneuerbaren Energien im Landkreis erzeugt. Die Diversität des Stromverbrauches (42% privat, 36% produzierendes Gewerbe) und der Erzeugung ist recht ausgeglichen, was positiv zu werten ist, da keine Verbrauchsgruppe dominiert. Die Wärmeversorgung basiert derzeit noch hauptsächlich auf Erdöl oder Flüssiggas (LPG). Der motorisierte Individualverkehr auf Basis von Verbrennungsmotoren und der Nutzung fossiler Kraftstoffe dominiert das Verkehrsgeschehen.

Im Rahmen des Projektes wurde mit den aktiven Akteuren im Landkreis aus Politik und Verwaltung, Wirtschaft und Projektierer eng kooperiert. Zudem wurden Interviews durchgeführt, die im Rahmen einer Akteursanalyse ausgewertet wurden. Des Weiteren wurden mehrere problemorientierte Workshops mit wichtigen Stakeholdern in der Region durchgeführt. Im Rahmen der Leitorientierungsanalyse stellte sich heraus, dass die identifizierten und vorhandenen Leitorientierungen, wie „bilanzielle Energieautarkie“, „regionale Wertschöpfung“, „Dezentralisierung“ und „regionale Unabhängigkeit“ anschlussfähig sind an das Leitkonzept Resilientes Energiesystem, wie es exemplarisch im Rahmen des ersten Workshops im Landkreis (04.12.2015) aufgezeigt werden konnte. Das Leitkonzept steht allerdings auch im Spannungsverhältnis zur Leitorientierung Wirtschaftlichkeit, die besondere Bedeutung im Landkreis hat.

Für prospektive Betrachtungen der Wertschöpfungs- und Vulnerabilitätsanalyse sowie für die Entwicklung von Gestaltungsoptionen (Gestaltungsleitbild) wurden Szenarien für die Jahre 2030 und 2040 erstellt und mit dem Status Quo im Jahr 2013 verglichen. Dabei wurden für die Erstellung der Szenarien zwei unterschiedliche Verständnisse angewandt. Die Zukunftsszenarien 2030 a und b (verstärkter PV Ausbau) sollen eine möglichst realistisch mögliche Zukunft beschreiben. Diese Szenarien bilden die Grundlage für die Wertschöpfungsanalysen, welche auf besonders großes Interesse der regionalen Akteure trafen, da die Erhöhung der Wertschöpfung die Hauptmotivation für das Streben nach regionaler Selbstversorgung ist. Um die Anschlussfähigkeit der Szenarien sicherzustellen, wurde bei der Erstellung auf vorhandene

Planungen, wie bspw. der Raumordnungspläne sowie Einschätzungen der örtlichen Verwaltung zurückgegriffen.Das Szenario 2040 ist dagegen ein das Leitkonzept umsetzendes (wünschenswertes) Szenario. Grundlage hierfür bildete das Gestaltungsleitbild der regionalen Zelle (im Kontext der Vorstellung eines zellular aufgebauten Energiesystems). Dazu wurde eine modellbaiserte Simulation (basierend auf dem quelloffenen Open Energy Modelling Framework (OEMOF) durchgeführt.

Die Modellierung des regionalen Energiesystems als regionaler Zelle mit einem maximalen Stromimport von 5% und Gasimport von 10% des Gesamtverbrauchs ergab, dass für die quasi-autarke Versorgung ein Ausbau an Erzeugungsleistung aus Windkraft auf 258 MW und der Photovoltaik auf 295 MW nötig wären, bei gleichbleibender Biogaserzeugung. An Wandlern werden 23 MW Power-to-Gas Leistung und 16 MW Wärmepumpen sowie Speicherkapazitäten in Höhe von 395 MWh elektrisch, ~ 14.000 MWh Gas- und 1.562 MWh Wärmespeicher benötigt. Dabei wurden Energieträger für den Strombedarf, die Wärmeversorgung und Mobilitätsbedarf im Landkreis in Betracht gezogen. Des Weiteren wurde angenommen, dass es aufgrund von Energieeinsparungen zu einem deutlichen Verbrauchsrückgang im Jahr 2040 in Höhe von etwa 37% gegenüber dem Verbrauch im Jahr 2013 kommt.

Die Wertschöpfungsanalyse ergab ein großes Potential für die Erhöhung der regionalen Wertschöpfung. Derzeit stellt sich Lage so dar, dass bei WKA die Mehrheit der Pächter und Investoren ihren Firmensitz außerhalb des Landkreises haben. Die Wertschöpfungseffekte durch erneuerbare Energien auf regionaler Ebene betragen im Jahr 2013 3,0 Mio. Euro. Im Zukunftsszenario 2030 a erhöht sich durch en Zubau and WKA und PV die Wertschöpfung auf knapp 4,7 Mio. Euro. Der größte Anteil der regionalen Wertschöpfung entfällt im Jahr 2030 auf PV-Anlagen, da bei den neuen Windkraftanlagen angenommen wurde, dass sich keine nennenswerten Änderungen bei den Besitzverhältnissen ergeben werden. Zusätzlich wurden 2 Varianten gerechnet um auch das maximale Potential der Wertschöpfung für die Region zu ermitteln. Im Szenario 2 erhöht sich die Wertschöpfung um 147 % auf 11,6 Mio Euro pro Jahr. Diesem Maximalszenrio liegt die Annahme zugrunde, dass alle Wertschöpfungsstufen von Akteuren die ausschließlich in der Region verortet sind durchgeführt werden, was bei der Herstellung von Windkraftanlagen und Photovoltaikmodulen unrealistisch ist. Szenario 1, welches die Effekte aufzeigt die zu erwarten wären, wenn die Betreibergesellschaften der EE-Anlagen und die Eigenkapitalgeber/innen zu 100 % im Landkreis ansässig wären zeigt immer noch ein Erhöhungspotential um 123% auf 10,5 Mio Euro pro Jahr.

Die Vulnerabilität des Landkreises rührt hauptsächlich daher, dass keine Steuer- und Regelmechanismen vorhanden sind und damit eine komplette Abhängigkeit der Netzführungsgrößen (Frequenz) und der Energie aus dem vorgelagerten Netz besteht. Wie erwartetet steigen

die Netzlasten mit dem Ausbau der Erneuerbarer Energien. Die Leistung, die aus dem vorgelagerten Netz benötigt wird, ändert sich jedoch in den betrachteten Szenarien nicht. Bei einer Betrachtung von potenziellen Ausfällen im Rahmen der Vulnerabilitätsanalyse gelten Umspannstationen und Transformatoren als besondere Schwachstellen. Aber auch die Skandalisierung des weiteren Ausbaus von EE sowie eine fehlende Diversifizierung durch einen potentiell einseitigen Ausbau von Erneuerbaren Energien, in diesem Fall der Windkraft, wurden als Schwächen identifiziert. Auch fehlen Mechanismen um Anlagen vor Ort einzubinden und deren Energieproduktion zu vermarkten. Sich änderndes Verbraucherverhalten, bspw. die Verbreitung der E-Mobilität und Wandlung des Verbrauchers zum Prosumer setzen die regionalen Infrastrukturverantwortlichen unter Druck.

Die potenzielle Klimaveränderung innerhalb der kommenden 20 Jahre deutet auf geringe Veränderungen hin, mit einer Verringerung des PV-Ertrags durch einen sehr leichten Anstieg der Bedeckung und eine Windertragszunahme aufgrund von steigenden Windgeschwindigkeiten.

Die Konfiguration einer regionalen Zelle und deren Bestandteile ist im Kapitel 3 bereits erläutert worden. Das Zellulare System bildet dabei eine Brücke zum Gestaltungsleitbild „Resilientes Regionales Energiesystem“. Dabei ist die Zelle dadurch charakterisiert, dass sie Sektor übergreifend Energieträger regional einbindet, sich über eine gewisse Zeit selber versorgen und regeln kann, im Falle einer Abkopplung vom vorgelagerten Netz. Um zu einer regionalen Zelle zu kommen wurden Maßnahmen empfohlen. Zum einen die Organisation und Beteiligung von Bürgern im Transformationsprozess zu erhöhen. Dies kann erreicht werden durch die Gründung einer breitaufgestellten Dachorganisation / eines Netzwerks, bei der alle an der Energiewende beteiligten Personen (Flächenbesitzer, Anwohner, Unternehmen, Finanzierer, Stadtwerke, Gemeinden, Regionalmanagement, …) eingebunden sind. Des Weiteren ist die Entwicklung eines gemeinsamen Leitbildes, aus dem die erwünschte konkrete Gestaltung der regionalen Energiewende deutlich ersichtlich wird hilfreich. Auch sind Maßnahmen wie Aufklärung der Bevölkerung sowie Ergreifen von Vorsorgemaßnahmen, wie z.B. Energiesparmaßnahmen und denm Ersatz der auf der Nutzung fossiler Energien beruhenden Anlagen, wie bspw. Gasheizung durchzuführen. Ziele sind dabei den weiteren Ausbau erneuerbarer Energien zu forcieren, die regionale Wertschöpfung zu erhalten und zu erhöhen und Vorsorgemaßnahmen umzusetzen.

Im Weiteren sind die regionale Vermarktung und der Ausgleich in der Region zu stärken. Für den ersten Punkt sind regionale Tarife und Produkte hilfreich, da diese die Identifikation erleichtern. Die Installation von Speichern und die Belohnung von netzdienlichem Verhalten stärken den Energieausgleich in der Region.

Last but not least gilt es sukzessive darum die Basis für ein zellulares System im Landkreis zu legen und zu entwicklen. Hierzu ist neben dem Vorhandensein von Erzeugungsquellen die

Installation von Speichern und Regelinfrastruktur notwendig. Leuchtturmprojekte an KRITIS-Standorten sollten favorisiert werden, da vorstellbar ist, dass an diesen Standorten die Bereitschaft Mehrausgaben im Sinne der Versorgungssicherheit zu tätigen. Als zweites Leuchtturmprojekt könnte ein Wasserstoff-Hub eingerichtet werden, also eine H_2-Tankstelle an einem Windrad.

Mit der Schildkröte wurden die Richtungsgebenden Impulse für den Landkreis ermittelt. Hier zeigte sich, dass vor allem die zivilgesellschaftlichen Akteure über Skandalisierung und Visionen enormen Einfluss auf die Veränderung des regionalen Energiesystems in Osterholz ausüben können. Dabei erwies sich Die Handlungsebene „Region“ als zu weit untergeordnet, um die notwendigen Veränderungen der Rahmenbedingungen zu steuern.

Mit den durch die EEG-Reformen 2014 veränderten Rahmenbedingungen stagnierte in den darauffolgenden Jahren der Ausbau der Photovoltaik in der Region. Trotz der Verbesserung der Möglichkeiten zur Eigennutzung des erzeugten Stroms und zur Verwendung von Speichertechnologien bei Privathaushalten, die einen Beitrag zur Resilienzerhöhung leisten könnten, blieb der Ausbau in den Jahren bis 2016 unterhalb des gewünschten Ausbaukorridors.

Fazit

Das Gestaltungsleitbild Resilientes Energiesystem war nur bedingt anschlussfähig an die Vorstellungen der maßgeblichen regionalen Akteure. Die Vertreter der Stadtwerke, die beim regionalen Abschlussworkshop anwesend waren befürchteten einen Vertrauensverlust, wenn sie die Bevölkerung auf die Möglichkeit von Stromausfällen hinweist. Zudem ist Wirtschaftlichkeit das dominierende Leitbild im Landkreis Osterholz. Dabei wird der Wirtschaftlichkeit eine höhere Bedeutung zugemessen, als dem Handlungsbedarf der sich mit einem resilienten regionalen Energiesysstem ergibt. Um den Weg in Richtung eines resilienteren Energiesystems im Einklang mit den regionalen wirtschaftlichen Möglichkeiten weiterzugehen, müssten die Rahmenbedingungen geeignete Geschäftsmodelle, bei denen die Versorgungssicherheit im Vordergrund steht, zulassen. Ein erster Schritt hierzu könnten regionale Stromtarife sein. Weiter ist der Organisationsgrad und Zusammenhalt der Akteure zu stärken, sodass der Vorteil des lokalen Wissens genutzt wird. Im Weiteren würden vor allem eine weitere Kostendegression bei relevanten Technologien (z.B. Speichern), ein erhöhter Stellenwert der erweiterten Vorsorge und der Versorgung kritischer Infrastrukturen mit Erneuerbaren Energien in Form z.B. eines Energiehubs als Leuchtturmprojekt, die Verpflichtungen zur Mess- und Regelfähigkeit in den unteren Netzebenen zur regionalen Umsetzung von Resilienz steigernden Maßnahmen beitragen.

6.3 Fallstudie resiliente regionale Selbstversorgung der Stadt Wolfhagen[48]

Die nordhessische Stadt Wolfhagen liegt rund 25 km westlich von Kassel. Mit ihren ca.13.000 Einwohnern repräsentiert sie das Mittelzentrum im Wolfhager Land. Die 12 Stadtteile mit einer Gesamtfläche von 112 km^2 sind nur in geringem Maße urbanisiert (ca. 50% der Wolfhager Fläche wird landwirtschaftlich genutzt, ca. 30% Waldgebiet). Die Einwohnerdichte ist mit ca. 117 Einwohner pro km^2 vergleichsweise niedrig (BRD ca. 230 EW/km^2) (vgl. Aring et al. 2010). 2010 wohnten ca. 7.200 Einwohner in der Kernstadt.

6.3.1 Sozioökonomische Hintergrund der Stadt Wolfhagen

Die Gemeinde Wolfhagen liegt in Nordhessen, einer Region, deren Regionalplan 2009[49] langfristig von einer Schrumpfung (abnehmende Zahl von Arbeitsplätzen und Einwohnern) ausging. Wie der Landkreis Osterholz kann die Stadt Wolfhagen mit einem Pendlersaldo von -3.135 als eine Auspendlerkommune bezeichnet werden (Vgl. Aring et al. 2010). Dies ist ein Indiz dafür, dass attraktive Arbeitgeber in der Gemeinde fehlen. Zu den größten wirtschaftlichen Problemen in Wolfhagen zählen die Schließung der „Pommernkaserne“ im Jahre 2008 im Rahmen der allgemeinen Standortverringerung der Bundeswehr sowie (Landes-) Behördenschließungen.

Vergleichsweise positiv ist die Arbeitslosenquote in Wolfhagen (4,5% in 2013, zum Vergleich Landkreis Kassel: 7,3%). Zudem hat die Stadt in den letzten Jahren Fortschritte bei der Konsolidierung des öffentlichen Haushalts gemacht. Im Vergleich zum Defizit von 1,4 Mio. Euro im Jahre 2011 wurde für 2014 ein ausgeglichener Haushalt beschlossen. Weiterhin liegt in der Gemeinde eine der größten Gesamtschulen Hessens, sowie eine große Berufsschule, die seit einigen Jahren am Konversionsstandort in einem ehemaligen Kasernengebäude untergebracht ist. Dadurch ist Wolfhagen für die Region ein bedeutender Schulstandort (Vgl. Aring et al. 2010).

Die Gemeinde verfügt mit dem ehemaligen Gelände der Pommernkaserne neben dem Gewerbepark Hiddeser Feld (Gewerbepark A44) mittlerweile über einen zweiten Standort zur Ansiedlung von Unternehmen. Auf dem früheren Kasernengelände (Kasernenfläche 42 ha, Standortübungsplatz 257 ha) sollen weitere Bildungsinstitutionen und innovative Unternehmen angesiedelt werden, aber auch Wohn- und Freizeitanlagen entstehen. Dies gelang zum Teil

[48] Die im Kapitel enthaltenen Zitate stammen aus Interviews mit regionalen Akteuren. Vgl. Kapitel 5.2 zu den Erhebungsmethoden.

[49] Regionalplan Nordhessen 2009, bekannt gemacht im Staatsanzeiger für das Land Hessen Nr. 11 vom 15.03.2010

auch bereits, wie das Beispiel der Firma Energy Glas zeigt, welche moderne Isolierverglasungen herstellt und zudem in die Entwicklung fassadenintegrierter Solarthermiekonzepte investiert.

6.3.2 Politische Gegebenheiten

Wie auch bereits in der vorherigen Wahlperiode stellt die SPD nach den Wahlen am 27.03.2011 die stärkste Fraktion in der Wolfhager Stadtverordnetenversammlung (vgl. Abbildung 6.31).[50]

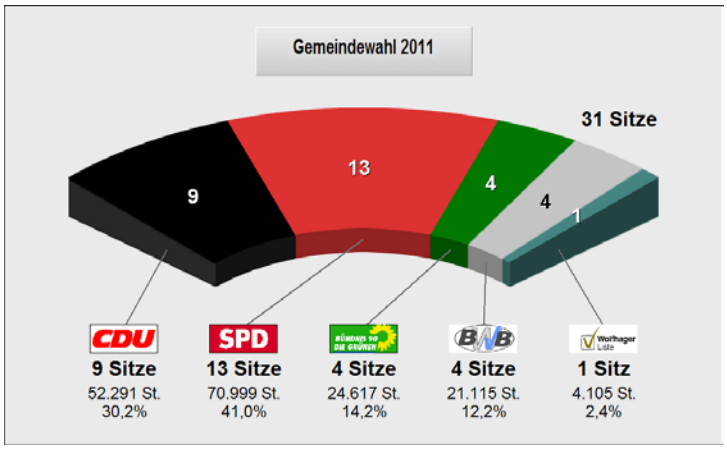


Abbildung 6.31: Gemeindewahl 2011 in Wolfhagen (Quelle: Wolfhagen 2015)

SPD und CDU beschlossen gemeinsam - teilweise auch mit den anderen Fraktionen - die wichtigsten Entscheidungen im Rahmen der Energiewendeaktivitäten (vgl. Interviewpartner[51] I-WHG2: 30). Mit dem Plan, einen Windpark unter Beteiligung der Stadt und der Bürger zu errichten, entwickelte sich jedoch eine Opposition in der Gemeinde, die sich auch in den Abstimmungen der Stadtverordnetenversammlung widerspiegelte. Zunächst kam Widerstand von der Fraktion von Bündnis 90/Die Grünen. Er verstärkte sich mit dem Einzug des Bündnis Wolfhager Bürger (BWB), einer primär gegen die Windparkpläne gerichteten Vereinigung (vgl. I-WHG2: 34-48).

6.3.3 Ziele und Motivation der Energiewende in Wolfhagen

Die Wolfhager Stadtverordnetenversammlung beschloss im April 2008 einstimmig die Stromversorgung bis 2015 vollständig aus erneuerbaren Energien zu decken (vgl. I-WHG6: 64). Im Gebiet der Gemeinde sollte die im Jahresmittel benötigte Menge an elektrischer Energie, d.h. ca. 50 Mio. kWh, aus erneuerbaren Quellen gewonnen werden. Dabei sollte neben der bilanziellen Selbstversorgung auch ein möglichst hoher Anteil des Direktverbrauches gefördert wer-

[50] Kommunalwahlen 2011 in Hessen. (o.J.). Zugriff am September 09, 2016, von http://www.statistik-hessen.de/K2011/TG633028.htm

[51] Für eine Übersicht der Interviewpartner siehe das Kapitel zu den Erhebungsmethoden, Kap. 5.2

den, um sich einer „Autarkie“ anzunähern (vgl. I-WHG6: 68). Die Umstellung der Stromversorgung auf Erneuerbare Energien ist in Wolfhagen Teil einer übergeordneten Strategie, bis 2030 eine klimaneutrale Kommune zu werden. Neben dem Ziel des Klimaschutzes und der Klimaneutralität wurde eine bürgernahe Energiewende mit größtmöglicher regionaler Wertschöpfung angestrebt.[52]

„*Das Hauptziel war im Bereich Klimaschutz etwas zu tun. Gerade so die Anfänge der Solarenergie, da war auch so das Ziel: Komm, wir wollen politisch mal ein Zeichen setzen“* (I-WHG6: 52)

„Und das ist ja ein Ziel auch gewesen der hiesigen dezentralen Energiewende, dass auch eine erhöhte Wertschöpfung stattfindet“ (I-WHG2: 416)

Erneuerbare Energien werden in Wolfhagen neben ihrer Bedeutung für den Klimaschutz vor allem auch als Element einer nachhaltigen wirtschaftlichen Entwicklung gesehen, mit denen der Kapitalabfluss von ca. 18 Mio. Euro jährlich für sämtliche Energieimporte (Strom, Gas, Treibstoffe) aus der Kommune eingeschränkt werden soll (vgl. I-WHG5: 3).

Neben der wirtschaftlichen Verbesserung für die Stadt Wolfhagen durch Einnahmen aus der Gewerbesteuer und Beteiligung der Bürger an der Wertschöpfung soll mit der regionalen Energiewende im Rahmen der Aktivitäten zur Klimaneutralität auch eine größere Energieunabhängigkeit und damit Krisensicherheit erreicht werden (Vortrag WHG5 2008). Versorgungssicherheit gehörte demnach auch bereits zu Beginn der Energiewendeaktivitäten zu den ausschlaggebenden Motiven.

Des Weiteren wird in dem Ort auch ein höchstmöglicher Grad an Energieeffizienz angestrebt. Beratungsmöglichkeiten und effiziente Technologien in privaten und öffentlichen Gebäuden sollen den Energieverbrauch in der Stadt reduzieren.

„Ich würde […] jetzt mal auf die Energieeffizienz und -einsparung kommen. Das ist ja sowohl von unser Genossenschaft ein wichtiges Ziel, der Stadtwerke auch generell der Politik. Deshalb auch das Projekt Energieoffensive 2000“ (I-WHG2: 242).

6.3.3.1 Bedeutung von Resilienz

In der Gemeinde Wolfhagen wurde die Bedeutung des Konzeptes Resilienz auch mit der erweiterten Versorgungssicherheit, also der Vermeidung von Stromausfällen assoziiert, wobei der Begriff nicht jedem der Akteure vorher geläufig war. Als praktische Maßnahme zu einer möglichen Steigerung der Resilienz im Elektrizitätsbereich wurde in erster Line der Ausbau von Speichertechnologien erwähnt (vgl. I-WHG6: 124). Aufbauend auf dieser Erhöhung der

[52] Stadt Wolfhagen. (o.J.). Zugriff am August 07, 2016, von http://www.wolfhagen.de/de/wirtschaft/energiewende/energiewende.php?navanchor=1110131

elektrischen Versorgungssicherheit wurden auch der mögliche Ausbau der Netze, Flexibilisierungsmaßnahmen und die Verwirklichung eines inselfähigen Systems diskutiert. Zudem betonte WHG6, dass ein solches System das Auftreten von Stromausfällen nicht zu 100% vermeiden müsse, um als resilient zu gelten.

„Ich würde sagen, aus meiner Sicht kann es durchaus auch mal häufiger zu Unterbrechungen kommen. Das muss jetzt nicht täglich eine Viertelstunde sein, das geht sicher nicht. Aber in Einzelfällen ist das sicher vertretbar und auch handhabbar“ (I-WHG6: 156).

6.3.4 Historie der Energiewende in Wolfhagen

Schon vor dem Bürgerschaftsbeschluss im Jahre 2008 zur Umstellung auf Erneuerbare Energien in der Stromversorgung wurden wichtige Schritte auf dem Weg der Energiewende in Wolfhagen eingeleitet. Die Energieagentur „Energie 2000 e. V.“ sowie die als Bürgerinitiative begründete „Klimaoffensive Wolfhagen“ bestanden schon vor 2008 (vgl. I-WHG5: 14). Ein wichtiger Schritt in Richtung der Selbstständigkeit in Energiefragen erfolgte bereits 2006 mit dem Rückkauf des Wolfhager Stromnetzes von E.ON durch die Stadtwerke Wolfhagen (SWW) auf der Basis einer Entscheidung der Stadtverordneten aus dem Jahre 2003 (vgl. I-WHG2: 64). Damit war Wolfhagen die erste Kommune in Nordhessen, die ihr Netz zurück gekauft hat. Seit 2011 sind zudem die fünf nordhessischen Stadtwerke Wolfhagen, Eschwege, Kassel, Bad Sooden-Allendorf, Homberg und Witzenhausen in der Region zur Stadtwerke-Union Nordhessen (SUN) zusammen geschlossen.[53] Die in Wolfhagen im Gebäude der dortigen Stadtwerke ansässige SUN hat sich zum Ziel gesetzt, die Rekommunalisierung der Netze voranzutreiben und die Erneuerbaren Energien auszubauen.

2009 wurde in Wolfhagen eine Bürgermesse unter dem Titel „Mehr als genug Energie“ im Rahmen des Projekts „Energieeffiziente Stadt“ durchgeführt, bei der neben der Präsentation von Produkten aus dem Bereich der Energieeffizienz und der Erneuerbaren Energien auch verschiedene Fachvorträge gehalten wurden.[54]

Von Beginn an wurden drei technische Umsetzungsvarianten zur Umstellung der Stromerzeugung auf Erneuerbare Energien in die Planungen mit einbezogen:

a) Ausbau von Photovoltaikanlagen
b) Errichtung eines Bürgerwindparks
c) Errichtung eines Biomassekraftwerks

Um das Ziel einer klimaneutralen Kommune zu erreichen, wurden auch Schritte zur Verringerung des Wärmeenergiebedarfs und zur Umstellung der Wärmeversorgung auf Erneuerbare

[53] Kassel, S. W. (o.J.). Herzlich willkommen bei der SUN. Zugriff am 07, 2016, von http://www.sun-stadtwerke.de/

[54] Stadt Wolfhagen. (o.J.). Zugriff am September 07, 2016, von http://www.wolfhagen.de/de/wirtschaft/energiewende/energiewende.php?navanchor=1110131

Energiequellen unternommen. Im Zentrum standen die Teilnahme an einem kommunalen Förderprogramm zur energetischen Gebäudesanierung (hoher Sanierungsbedarf, historischer (Fachwerk-)Gebäudebestand) und der Ausbau der Wärmeversorgung aus Blockheizkraftwerken (BHKW) über Nahwärmenetze. Folgende Maßnahmen und Projekte wurden zur Verbesserung der Energieeffizienz durchgeführt bzw. begonnen:

- Klimaoffensive Wolfhagen (Gründung 2007)
- Beratung energieeffiziente Geräte
- Nahwärmenetz auf dem Gelände der ehemaligen Pommernkaserne (in Betrieb)
- Nahwärmenetz Altenheim (in Betrieb)
- Nahwärmenetz Schule/Schwimmbad (in Betrieb)
- Umrüstung der Straßenbeleuchtung auf LED-Technik
- Teilnahme an der BMBF-Förderinitiative ‚Wettbewerb Energieeffiziente Stadt' als eine von fünf deutschen Städten (ca. 1 Mio. Euro Fördermittel pro Jahr) unter dem Projekttitel „Energie Offensive Wolfhagen", Laufzeit 5 Jahre, Start: November 2012, Projektpartner: Kompetenznetzwerk Dezentrale Energietechnologien (deENet), Fraunhofer Institut für Bauphysik in Kassel (IBP) - Abteilung Energiesysteme, Zentrum für Umweltbewusstes Bauen (ZUB) im Fachgebiet Bauphysik der Universität Kassel, Stadt Wolfhagen, SWW, Energieagentur des Landkreises Kassel „Energie 2000"
- „Wolfhagen 100% EE" als BMBF-gefördertes Projekt zur Entwicklung eines Konzeptes für die nachhaltige Energieversorgung der Stadt; gemeinsam mit der SWW, deENet und anderen entwickelt das Fraunhofer IBP ein zu 100% auf erneuerbarer Energie basierendes Energieversorgungskonzept; Projektpartner: Kompetenznetzwerk Dezentrale Energietechnologien (deENet), Fraunhofer Institut für Bauphysik in Kassel (IBP) - Abteilung Energiesysteme, Zentrum für Umweltbewusstes Bauen (ZUB) im Fachgebiet Bauphysik der Universität Kassel, Stadt Wolfhagen, SWW, Energieagentur des Landkreises Kassel „Energie 2000", Kommunikationsbüro eyedexe GmbH
- BMBF-gefördertes Modellprojekt der SWW zum Einsatz energiesparender Geräte (Feldversuch zur aktiven Verbrauchssteuerung energieintensiver elektrischer Verbraucher in Haushalten – lokale Harmonisierung von Stromangebot aus erneuerbaren Energien und Stromnachfrage durch Demand-Side-Management)
- Einbau von Wärmepumpen in Privathäusern sowie öffentlichen Gebäuden (Feuerwehrhaus Bründersen)
- unter Koordination von deENet (Kompetenznetzwerk dezentrale Energietechnologien e. V.) beteiligt sich Wolfhagen als eine von drei Modellkommunen am Projekt „Klimaneutrale Kommune" (gefördert vom Hessischen Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz)

- „Energiewende Nordhessen- Szenarien für den Umbau der Stromversorgung auf eine dezentrale und erneuerbare Erzeugungsstruktur“, Projekt im Auftrag der Stadtwerke Union Nordhessen (SUN)

Neben der Wärme- und Stromversorgung wurde ansatzweise auch der Mobilitätssektor in die Bemühungen um Klimaneutralität einbezogen. Die SWW bieten seit Januar 2015 ein Elektrofahrzeug kostenlos für Probefahrten an, besitzen selbst noch zwei weitere elektrische Dienstfahrzeuge und betreiben in Wolfhagen zwei Elektrotankstellen.

Ein Planungs- und Diskussionsprozess zum Bürgerwindpark mit breiter Öffentlichkeitsbeteiligung wurde 2008 begonnen. Nicht nur zur weiteren Planung des Windparks, sondern auch mit der Aufgabe, Vorschläge für einen gemeinsamen weiteren energiepolitischen Weg zu entwickeln und Spaltungen innerhalb der Kommune entgegen zu wirken[55], wurde eine Steuerungsgruppe einberufen.

Mit der Zukunftskonferenz[56] „Energiewende in Wolfhagen“ am 10. März 2012 wurde eine Veranstaltung durchgeführt, die in kleineren Arbeitsgruppen die Beteiligung und Information der Bürger ermöglichte. Auch die Bürgerinitiative „Keine Windkraft in unseren Wäldern“ hatte auf dieser Veranstaltung einen eigenen Stand.

6.3.5 Stand der Energiewende

Seit Beginn des Jahres 2015 kann sich Wolfhagen theoretisch bilanziell zu 100 % mit elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen versorgen, deren Anlagen im Gebiet der Gemeinde installiert sind. Der zeitgleiche Eigenversorgungsgrad[57] mit elektrischer Energie betrug unter Berücksichtigung der ab 2015 neu hinzugekommenen Windkraftanlagen für das Jahr 2013 ca. 70% (Anteil des Windparks wurde anhand von Daten eines Windmessmastes des Fraunhoferinstituts IWES am gleichen Standort modelliert).

Im Bereich der Wärmeversorgung sieht die Bilanz weniger gut aus. Es gibt zwar mit den Nahwärmenetzen erste Ansätze für eine Fernwärmeversorgung auf der Basis von erneuerbarer Energie. Von ihnen wird aber nur ein sehr kleiner Teil der Gebäude versorgt. Solarthermie ist jedoch stark verbreitet. Neben den 552 dachintegrierten PV-Anlagen mit bis zu 30 kW existieren 420 Solarthermieanlagen mit bis zu 20 m^2 (Stand 2013).

Im Folgenden wird genauer auf die unterschiedlichen Anlagentypen eingegangen:

[55] Laut „KOMMUNALVERTRETER-SERIE ZUM ENERGIEKONZEPT WOLFHAGEN“

[56] Die Zukunftskonferenz ist mit einem Abschlussbericht ausführlich dokumentiert. Der Bericht ist erhältlich unter http://www.wolfhagen.de/de/downloads/rathaus/buergerbeteiligung/Abschlussbericht_Zukunftskonferenz_Wolfhagen_Druckversion_PDF.pdf

[57] Der Begriff „zeitgleicher Eigenversorgungsgrad“ bezieht sich auf das zeitgleiche Verhältnis von Erzeugung und Verbrauch und stellt damit den jährlichen Durchschnitt dieses Verhältnisses dar, ermittelt in Zeitintervallen von beispielsweise Viertelstundenwerten.

Die Windkraftanlagen im Gebiet von Wolfhagen haben eine Gesamtleistung von 20 MW und sind in drei Windparks konzentriert. Der im Jahre 2014 neu errichtete Windpark der SWW hat eine Maximalleistung von 12 MW (4x 3MW). Der Windpark einer Enercon-Tochtergesellschaft mit einer Maximalleistung von 5,6 MW (7x 800kW) wurde im Jahre 2007 errichtet. Dieser Windpark speist nicht ins Netz der SWW ein. Er befindet sich aber auf dem Gemeindegebiet von Wolfhagen. Der älteste Windpark in Wolfhagen stammt aus den neunziger Jahren und leistet maximal 2,4 MW (4x600 kW). Dieser Windpark wird von der Wolfhagener Firma BLG Project betrieben und speist ebenfalls nicht ins Netz der SWW ein.

Die PV-Anlagen in Wolfhagen teilten sich 2013 auf in 552 Dachanlagen mit weniger als 30 kWp, 23 größeren Dachanlagen mit mehr als 30 kWp sowie 3 Freiflächenanlagen. Zwei der Freiflächenanlagen, eine Anlage mit 2 MWp aus dem Jahre 2009 und eine mit 5 MWp aus 2012, werden von der BLG Project betrieben. Beide Anlagen gehören mehreren Teilhabern. Die dritte Freiflächenanlage leistet 5 MWp. Sie wurde zeitgleich mit dem 5 MWp-Park der BLG Project im Jahre 2012 am gleichen Standort durch die Kooperation von Bürgerenergiegenossenschaft (BEG) und SWW ermöglicht und wird von den SWW betrieben.

Die Leistung aus Biomasse wird von BHKWs erbracht, die von einer Biogasanlage, Holzvergasungsanlagen sowie der Kläranlage Wolfhagen mit Gas versorgt werden. Dabei speist die Biogasanlage ein BHKW mit 530 kW am Anlagenstandort der Biogasanlage sowie ein Satelliten-BHKW in der Innenstadt von Wolfhagen mit ebenfalls 530 kW, dass zudem eine Schule und ein Schwimmbad mit Wärmeenergie versorgt. Jedes der Holzgas-BHKWs hat eine Leistung von 150 kW[58]. Beide Anlagen stammen von der Firma Kuntschar, einem ortsansässigen Hersteller von Holzgas-BHKWs. Das Kläranlagen BHKW ist mit weniger als 50 kW die kleinste dieser biogasverwertenden Anlagen.

In Wolfhagen gibt es zudem drei Nahwärmenetze, die mit Anlagen zur Elektroenergieerzeugung verknüpft sind. Das Nahwärmenetz des ehemaligen Kasernengeländes hat eine Länge von 2.000 m und gehört – genauso wie das Nahwärmenetz des Altenheims mit einer Länge von nur 50 m – ebenfalls den Stadtwerken. Das 1.500 m lange Netz der Biogas Wolfhagen GmbH wird vom oben erwähnten Satelliten BHKW gespeist.

Anzahl und Leistung aller genannten Anlagenkategorien sind in Tabelle 6.41 und Tabelle 6.42 zusammengefasst dargestellt.

[58] Die Holzgasanlagen sind mittlerweile wieder außer Betrieb genommen worden.

Tabelle 6.41: EE-Anlagen in Wolfhagen 2013 (Windpark Rödeser Berg mit 4 Anlagen à 3.000 kWel kam 2014 hinzu) (Universität Bremen 2015). *Wertschöpfung und Beschäftigung durch regionale Selbstversorgung mit erneuerbaren Energien.)*

	Bestand 2013		Zubau 2013	
	Anzahl	[kW_{el}]	Anzahl	[kW_{el}]
Wind Onshore[59]	11	8.000	0	0
Photovoltaik	552	19.404	37	443
davon PV Dach	549	7.429	37	443
davon PV Freiflächen	3	11.975	0	0
Biogas	2	1.060	1	530
Holzvergaser	2	300	0	0

Tabelle 6.42. Wärmeversorgung in Wolfhagen (Quelle: Universität Bremen und IÖW 2015). *Wertschöpfung und Beschäftigung durch regionale Selbstversorgung mit erneuerbaren Energien.)*

	Bestand 2013		Zubau 2013	
	Anzahl	[kW_{th}]	Anzahl	[kW_{th}]
Wärmepumpen	2	25	0	0
	Anzahl	[m^2]	Anzahl	[m^2]
Solarthermie	420	3.612	12	123
	Anzahl	[Trm]	Anzahl	[Trm]
EE-Wärmenetz	2	2.050	0	0

Trm = Trassenmeter

6.3.5.1 Die Struktur des Wolfhagener Stromnetzes

Das Netz der SWW ist vorwiegend als Ringnetz mit Stichversorgungen vereinzelter Ortsteile auf der Mittelspannungs-Ebene (MS) ausgelegt. Das Wolfhagener Stromnetz ist über nur eine Kopplungsstelle (Umspannstation) an das Hochspannungsnetz angeschlossen. Die gesamte Leitungslänge auf der MS-Ebene verteilt sich auf 69 km Erdkabel und 8 km Freileitung. Auf der Niederspannungs-Ebene verfügt das Netz über insgesamt 235 km Erdkabel. Redundanz der Betriebsmittel ist auf der NS-Ebene nur teilweise vorhanden. Zwischen der MS- und der NS-Ebene existieren 15 Umspannstationen. Die Bemessungsleistung der Trafos aller Ebenen liegt zwischen 50 und 2.000 kVA. Keine der Umspannstationen ist mit einem regelbaren Ortsnetztrafo ausgerüstet. Auf der MS-Ebene gibt es insgesamt nur 21 Entnahmestellen wohingegen auf der NS-Ebene 8.207 Entnahmestellen vorhanden sind.

6.3.5.2 Wertschöpfung

Für Wolfhagen wurde eine Analyse der regionalen Wertschöpfungsketten im Bereich der erneuerbaren Energien durchgeführt (vgl. Kap. 6.3.8). Dabei wurde ermittelt, dass die regionale

[59] Der im Jahre 2014 errichtete Windpark mit einer Leistung von insgesamt 12.000 kWel ist in dieser Aufzählung noch nicht enthalten. Er wurde jedoch in der Wertschöpfungsanalyse sowie der Analyse der Netzlasten berücksichtigt.

Wertschöpfung durch erneuerbare Energien im Jahre 2013 insgesamt rund 1,6 Mio. Euro erreichte. Zudem waren 2013 knapp 5 Vollzeitarbeitsplätze mit der Planung und Installation sowie dem Betrieb von EE-Anlagen in Wolfhagen verbunden. Diese Daten schließen jedoch noch nicht die Errichtung des Windparks am Rödeser Berg ein, welcher in großem Maße zur lokalen Wertschöpfung beiträgt. Für Montageleistungen wurden bevorzugt regionale Elektro – und Handwerksbetriebe beauftragt. Die bewusste Entscheidung für regionale Akteure zielte darauf ab, die Beteiligung der Bürger weiter zu verstärken und die Wertschöpfung vor Ort zu halten (vgl. I-WHG1: 19).

Angesichts der in den letzten Jahren nur sehr geringen möglichen Zinserträge galten Kapitalinvestitionen in EE-Anlagen der BEG und der SWW sowie in private Solaranlagen und Energieeffizienzmaßnahmen im Vergleich zu anderen Anlageformen als lukrative Anlagemöglichkeit. Somit konnte die lokale Wertschöpfung durch langfristige Einsparungen und entsprechende Renditen gesteigert werden. WHG5 sprach von einer Anlagerendite von ca. 3% (vgl. I-WHG5: 26). Zusätzlich konnte die Stadt Wolfhagen durch Gewerbesteuer- und Pachteinnahmen zusätzliche Einnahmen erzielen. Da der Großteil der involvierten Unternehmen vor Ort angesiedelt ist, verbleibt ein entsprechend hoher Anteil der Gewerbesteuer in Wolfhagen.

Landwirtschaftliche Betriebe profitieren von dem Betrieb der Biogasanlage und erzielten Pachteinnahmen, z.B. durch die Fläche des Solarparks, welche landwirtschaftlich nur bedingt nutzbar ist.

„Also die [...] die Eigentümer der Flächen, von dem großen Solarpark die waren glaube ich ganz froh dass sie die Flächen dort unterbringen konnten, weil die wohl nicht so besonders wertvoll waren, landwirtschaftlich.“ (I-OHZ5: 35).

6.3.5.3 Kritische Stimmen zum Energiewendeprozess in Wolfhagen

WHG5 äußerte sich kritisch in Bezug auf den bisherigen Bürgerbeteiligungsprozess. Der Prozess müsse dynamischer gestaltet werden:

„… den Bürgerbeteiligungsprozess, den würde ich heute anders machen. […] Also ich würde heute viel früher mit anderen Beteiligungsprozessen arbeiten. […] Was im Nachhinein sehr gut war, war diese Veranstaltung in der Kulturhalle, die offen war für alle Bürgerinnen und Bürger. Wo wir aus allen Bevölkerungsschichten Leute ausgewählt haben, damit es auch gemischt wird, und nicht so einseitig wird oder nicht so politisch wird. Und wo wir dann mit externer Moderation sehr intensiv […] von morgens bis abends alle Themenfelder, alle kritischen Themenfelder beackert haben. Es gab also verschiedene Stationen, die die Besucher und Teilnehmer durchlaufen haben an diesem Tag. […] Für die Zukunft werden wir viel stärker solche Prozesse viel früher beginnen.“ (I-WHG5: 25).

Eine weitere Kritik bezieht sich die Versorgungssicherheit aufgrund der Form und des Grads der Vernetzung.

„Ich sehe das natürlich auch zunehmend als Problem mit der fortschreitenden Vernetzung der Elektrizitätsversorgung und der Fernsteuerung, dass man immer weniger Möglichkeiten hat manuell Anlagen ins Netz zu nehmen, hochzufahren, zu bedienen. Da sehe ich schon ein Risiko für die Zukunft. Das wird aus meiner Sicht noch sehr einseitig gesehen, durch die ganzen Vorteile die diese Vernetzung bietet. Aber wenn ich alles nur noch über den PC mache, und das fällt aus, und ich habe vielleicht auch noch eine Backupebene, die dann auch noch irgendwo gestört ist, dann habe ich ein Problem.“ (I-WHG6: 180)

6.3.5.4 Herausforderungen

Wie beim Landkreis Osterholz kann auch für Wolfhagen festgehalten werden, dass die Energiewende in besonderem Maße auf die Steigerung der regionalen Wertschöpfung zielt und somit von einem ökonomischen Ziel dominiert wird. Der Stadt Wolfhagen gelang es, ein strategie- und ein Akteur übergreifendes Verständnis für ein regionales Wertschöpfungskonzept zu etablieren.

Um den Energiewendeprozess weiterhin erfolgreich voranzutreiben und am Leben zu erhalten, müssen laut den befragten Interviewpartnern weitere Verbesserungen im Bereich Wärme und Mobilität erfolgen. In diesen Bereichen besteht noch großes Potential, die Energiewende in Wolfhagen voranzutreiben und die lokale Wertschöpfung zu erhöhen. (Vgl. I-WHG6: 244) Dabei sollen im Wärmesektor vor allem die Bereiche Energieeffizienz und Speichertechnologie vorangetrieben werden mit Blick auf den Mobilitätsbereich wurden hingegen kaum Vorstellungen formuliert:

„Herausforderungen für die Zukunft, wir hatten eben schon kurz darüber gesprochen, auf der technischen Ebene die Speicher die benötigt werden aus ihrer Sicht, um diese Lastverschiebung zu ermöglichen.“

„Die Entwicklungen zu verstetigen, also diesen Pfad: Mehr Energieeffizienz, verstärkte Sanierungen, moderater weiterer Ausbau der erneuerbaren Energien und eine stärkere Systemintegration voranzutreiben.“ (I-WHG4: 95).

Um in privaten Haushalten eine Steigerung der Energieeffizienz zu ermöglichen, sollen die örtlichen Handwerksbetriebe stärker in den Prozess mit eingebunden werden, als es momentan der Fall ist. Der Versuch, das örtliche Handwerk stärker in den Energiewendeprozess einzubeziehen, gestaltete sich laut den Interviewpartnern jedoch bis dato als äußerst schwierig (vgl. I-WHG6: 248).

„Baugewerbe, gerade Maler, Hochbauer, Zimmerleute, Dachdecker, wo es wirklich um Gebäudedämmung geht. Fensterbauer, da ist immer noch sehr viel 08/15, die verdienen alle im

Moment ganz gut. Sind ausgelastet und da bloß nicht mit neuen Anforderungen, neuen Techniken kommen.“ (I-WHG6: 252).

Die Akteure in Wolfhagen (ähnlich Osterholz) verweisen auf die Herausforderungen, die die Veränderungen der Rahmenbedingungen (insb. Novellierungen des EEG) mit sich bringen, sodass eine hohe Flexibilität erforderlich ist. Permanente Änderungen der gesetzlichen Rahmenbedingungen reduzieren die Planungssicherheit für EE-Projekte und stellen ein Investitionshemmnis dar. Auch in Wolfhagen wurde der Bereich Solarenergie zunächst stark ausgebaut. Er wurde jedoch durch das EEG 2014 unattraktiv (vgl. I-WHG2: 422).

Des Weiteren wird über die Möglichkeit diskutiert, ein inselfähiges System auf regionaler Ebene zu etablieren, um ein resilienteres System zu schaffen, welches auch nach Ausfall des supra-regionalen Systems noch eine konstante Stromversorgung garantieren kann. Zu diesem Thema gibt es bisher jedoch keine konkreten Ansätze.

„*Also wenn man jetzt den Istzustand ansieht, dann sind wir natürlich in erster Linie vom Stromnetz abhängig, das heißt wenn das überregionale Stromnetz derzeit zusammenbrechen würde, könnten wir hier vor Ort nach meiner Kenntnis auch nicht zu allzu viel machen. Ich weiß nicht in welcher Größenordnung wir hier eine stabile Insel aufbauen könnten. Aber da bin ich auch kein Fachmann. Da müsste man wirklich mit den Netzbetreibern sprechen, wo die trennen können und sagen: Hier habe ich die Möglichkeit eine Insel aufzubauen, ich habe ein Kraftwerk, was die Frequenz halten kann, ein Führungskraftwerk. Da sehe ich im Moment die größte Gefahr. Und das wird sicher auch noch eine Weile so sein. Das wird lange, dass man wirklich 100 % auch noch abhängig ist vom vorgelagerten Netz“* (I-WHG6: 176)

Investitionen zugunsten der Resilienz des Gesamtsystems sind nicht so ohne weiteres vermittelbar. Anschlussfähig sind diese Maßnahmen eher bei Betreibern von EE-Anlagen (z.B. PV) oder Gewerbe mit kritischen Anlagen (z.B. Melkanlagen). Die Genossenschaft könnte am ehesten ein Bewusstsein für die Bedeutung von Resilienz wecken. Als Risikokapitalgeber und für die Einführung neuer Technologien fehlen in Wolfhagen die Expertise und die Bereitschaft, Personal aufzubauen und zu bezahlen. Die Ämter werden dort bislang ehrenamtlich geführt. Für die Stadtwerke sind konkrete Maßnahmen nur möglich, wenn für sie auch ein passendes Geschäftsmodell existiert. Für kleine private Investoren gilt dies ohnehin. Des Weiteren sind für notwendige Maßnahmen, wie z.B. differenzierte Netzentgelte oder Geschäftsmodelle für eine bedarfsabhängige Steuerung von Erzeugern, die Rahmenbedingungen nicht gegeben. In Zukunft wird allerdings eine netzdienliche Steuerung aller Komponenten notwendig, um Lasten zu verringern (z.B. bei Speichern privater PV-Anlagen).

6.3.6 Anlagen zur Elektroenergiegewinnung — Szenario für 2030

Bereits mit dem im Jahre 2014 in Betrieb genommenen Windpark am Rödeser Berg hat Wolfhagen das Ziel einer 100-prozentigen bilanziellen Selbstversorgung aus Erneuerbaren Energien im Stromsektor erreicht. Gespräche mit Akteuren aus Wolfhagen ergaben, dass auch für die Zukunft weitere Investitionen in Anlagen des Elektroenergiesystems geplant sind, die eine bessere Abstimmung von Verbrauch und Erzeugung bzw. einen ökonomischeren Betrieb ermöglichen. Zudem ist in der Zukunft mit Investitionen in die bereits seit längerem bestehenden Windenergieanlagen zu rechnen (Repowering). Auch im PV-Bereich wird sich der Anlagenbestand voraussichtlich weiter vergrößern. Dabei kommt es vermutlich zu einer Verknüpfung von PV-Modulen mit kleinen Batteriespeichern im Bereich der privaten PV-Anlagen. Im Bereich der Stromerzeugung aus Biomasse hingegen wird mit Stagnation gerechnet.

Um bei der Analyse der Vulnerabilität und möglicher Resilienz fördernder Elemente eines zukünftigen Energiesystems auch die absehbare Entwicklung berücksichtigen zu können, wurde für das Bezugsjahr 2030 ein Szenario des Elektroenergiesystems von Wolfhagen entworfen. Dieses Szenario basiert auf den Erkenntnissen zweier Workshops mit Akteuren in Wolfhagen, direkten Befragungen von Wolfhagener Akteuren und Planungen der SWW. Die zukünftige Leistung der Anlagen im Bereich PV, WKA, Biomasse, BHKW und Speicher sind im Vergleich zum Status quo 2013 in der Tabelle 6.43 dargestellt.

Tabelle 6.43: Szenarien für die Entwicklung der Stromerzeugung und Speicherung in Wolfhagen.

	Wolfhagen 2013 (inkl. Windpark Rödeser Berg)	Minimalszenario 2030	Maximalszenario 2030
WKA	20,2 MW (davon 12,2 MW im Netz der SWW)	23 MW (davon 12,2 MW im Netz der SWW)	28,2 MW (davon 12,2 MW im Netz der SWW)
PV	19,4 MW (~12,0 MWp Freiflächenanlagen, ~7,4 MWp Dachanlagen)	22 MW (durch Zuwachs bei Dachanlagen)	24,3 MW (durch Zuwachs bei Dachanlagen)
Biogas/Holzgas	1,4 MW (davon 0,8 MW im Netz der SWW)	1,1 MW (davon 0,5 MW im Netz der SWW)	1,4 MW (davon 0,8 MW im Netz der SWW)
Speicher	Vernachlässigbar	0 MW	2-3 MW (dezentrale PV-Anlagenspeicher bzw. zentraler Speicher)
Optional: Erdgas-BHKW	0 MW	0 MW	1,76 MW

Das Szenario für 2030 teilt sich in eine Maximal- und eine Minimalvariante des Ausbaus der Energiesystemkomponenten. Für die Entwicklung der Windkraft wird davon ausgegangen, dass die im Besitz der SWW befindlichen Anlagen weder erweitert noch erneuert werden, da

sie erst im Jahre 2014 errichtet wurden und mit ihnen die Lücke in der bilanziellen Selbstversorgung mit elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen geschlossen wurde. Im Minimalszenario des WKA-Ausbaus wird lediglich ein Repowering des nicht an das Netz der SWW angeschlossenen, aus dem Jahre 2007 stammenden Windparks von insges. 5.600 kW (7 x 800 kW) auf insges. 8.400 kW angenommen. Für das Maximalszenario des WKA-Ausbaus wird davon ausgegangen, dass die Gesamtleistung dieses Parks um insges. 6.400 kW gesteigert wird und zusätzlich der dritte auf dem Gebiet der Gemeinde Wolfhagen befindliche Windpark in seiner Leistung von bisher 2.400 kW (4 x 600 kW) auf 4.000 kW gesteigert wird.

Bei PV-Anlagen wird im Minimalszenario bis zum Jahre 2030 ein moderater Zuwachs von 2.600 kW veranschlagt und für den maximalen Zubau werden 4.900 kW angenommen. In beiden Fällen wird davon ausgegangen, dass lediglich PV-Dachanlagen, aber keine PV-Anlagen auf Freiflächen hinzugebaut werden.

Da sich die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für den Biomassebereich verschlechtert haben, wird im Maximalszenario für die Elektrizitätserzeugung aus Biogas bzw. Holzgasanlagen lediglich von einem Erhalt der Erzeugungsleistung bis 2030 ausgegangen. Im Minimalszenario wird angenommen, dass sich die Erzeugungsleistung um 300 kW verringert.

Für das Maximalszenario wird angenommen, dass zusätzlich zu den bereits bestehenden Anlagen ein BHKW auf Erdgasbasis zur Abfederung von Bedarfsspitzen mit einer Leistung von voraussichtlich 1.760 kW sowie Speicher in Kombination mit privaten PV-Dachanlagen mit einer Gesamtleistung von 2-3.000 kW hinzukommen.

6.3.7 Strukturelle Vulnerabilitätsanalyse des Elektroenergiesystems

Die Analyse der Verletzlichkeiten, also der Vulnerabilität des Energiesystems zielt darauf hin, Schwachstellen zu erkennen. Geeignete Maßnahmen zur Erhöhung der Resilienz des regionalen (Elektro)Energiesystems liegen dann zum einen in der Beseitigung oder Minimierung derartiger Schwachstellen und darüber hinaus in der Verwirklichung von generellen Bauprinzipien eines resilienten Energiesystems.

Eine Vulnerabilitätsanalyse kann als ereignisbezogene oder strukturelle Analyse durchgeführt werden (Gößling-Reisemann, Wachsmuth et al. 2013).

Die strukturelle Vulnerabilitätsanalyse (SVA) erfasst Schwachstellen des Energiesystems, indem sie die potenziellen Auswirkungen von äußerem Stress sowie von Ausfällen von Systemelementen auf die Erbringung Systemleistung ermittelt. Ein zweiter Blick richtet sich dann auf die Anpassungskapazitäten des Systems. Aus der Kombination der potenziellen Auswirkungen mit der jeweils verfügbaren Anpassungskapazität ergibt sich schließlich die strukturelle

Vulnerabilität des Systems. Sowohl potenziellen Auswirkungen als auch die Anpassungskapazitäten können quantitativ oder qualitativ bewertet werden (vgl. Gößling-Reisemann, Wachsmuth et al. 2013).

Geringe potenzielle Auswirkungen liegen vor, wenn weder die Qualitätskriterien von Elektrizitäts- und Wärmeversorgung noch die tatsächliche Erbringung (Mengenkriterium) der Dienstleistungen selbst substantiell beeinträchtigt werden (vgl. Tabelle 6.44).

Mittlere potenzielle Auswirkungen liegen vor, wenn nicht die tatsächliche Erbringung (Mengenkriterium) von Elektrizitäts- und Wärmeversorgung, aber mindestens eines ihrer Qualitätskriterien substantiell beeinträchtigt wird (vgl. Tabelle 6.44).

Hohe potenzielle Auswirkungen liegen vor, wenn die tatsächliche Erbringung (Mengenkriterium) von Elektrizitäts- und Wärmeversorgung substantiell beeinträchtigt wird (vgl. Tabelle 6.44).

Tabelle 6.44: Schema der Bewertung von potenziellen Auswirkungen auf die Systemleistungen im Rahmen der Vulnerabilitätsanalyse (Gößling-Reisemann, Wachsmuth et al. 2013).

	Dienstleistungserbringung	
Qualitätskriterien	nicht beeinträchtigt	beeinträchtigt
nicht beeinträchtigt	geringe Auswirkungen	hohe Auswirkungen
Beeinträchtigt	mittlere Auswirkungen	hohe Auswirkungen

Wie bereits erwähnt, ergibt die Kombination der potenziellen Auswirkungen mit der jeweiligen Anpassungskapazität die Vulnerabilität des Systems. Die Anpassungskapazität geht dabei qualitativ, unterteilt in drei Stufen, in die Bestimmung der Vulnerabilität ein (Gößling-Reisemann, Wachsmuth et al. 2013) (vgl. Tabelle 6.45)

Tabelle 6.45: Schema zur qualitativen Bestimmung der Vulnerabilität als Funktion von potenziellen Auswirkungen der Anpassungskapazität des betroffenen Systems (Gößling- Reisemann et al. 2013)

Potenzielle Auswirkungen	**Anpassungskapazität**	**Vulnerabilität**
Gering	Gering	Mittel
	Mittel	Gering
	Hoch	Gering
Mittel	Gering	Hoch
	Mittel	Mittel
	Hoch	Gering

Hoch	Gering	Hoch
	Mittel	Hoch
	Hoch	Mittel

Eine *geringe Anpassungskapazität* liegt vor, wenn in einer Wertschöpfungsstufe weder Anpassungsmaßnahmen zur Vermeidung potenzieller Auswirkungen noch die Anpassungsbereitschaft und Maßnahmen der betroffenen Erbringer und/oder Nutzer zur Minderung der potenziellen Auswirkungen bestehen bzw. vorgehalten werden.

Eine *mittlere Anpassungskapazität* liegt vor, wenn hinsichtlich der potenziellen Auswirkungen in einer Wertschöpfungsstufe zumindest eine Erfolg versprechende Anpassungsmaßnahme zur Vermeidung der Auswirkungen oder die Anpassungsbereitschaft der betroffenen Erbringer und/oder Nutzer zur Minderung potenzieller Auswirkungen besteht.

Eine *hohe Anpassungskapazität* liegt vor, wenn hinsichtlich der potenziellen Auswirkungen in einer Wertschöpfungsstufe sowohl eine Erfolg versprechende Anpassungsmaßnahme zur Vermeidung der Auswirkungen als auch die Anpassungsbereitschaft und –fähigkeit der betroffenen Erbringer und/oder Nutzer zur Minderung potenzieller Auswirkungen besteht.

6.3.7.1 Untersuchte Elemente

Die Auswirkungen von potenziellen Ausfällen von Elementen des elektrischen Energiesystems unter Stress stehen im Mittelpunkt der SVA. Dabei werden die Struktur sowie die Auslastung des Systems untersucht, um kritische Elemente bzw. Zustände zu identifizieren. Basierend auf der in Kapitel 6.3.5 vorgestellten Struktur des Wolfhagener Energiesystems sind dessen wichtigste Elemente in Abbildung 6.32 schematisch dargestellt.

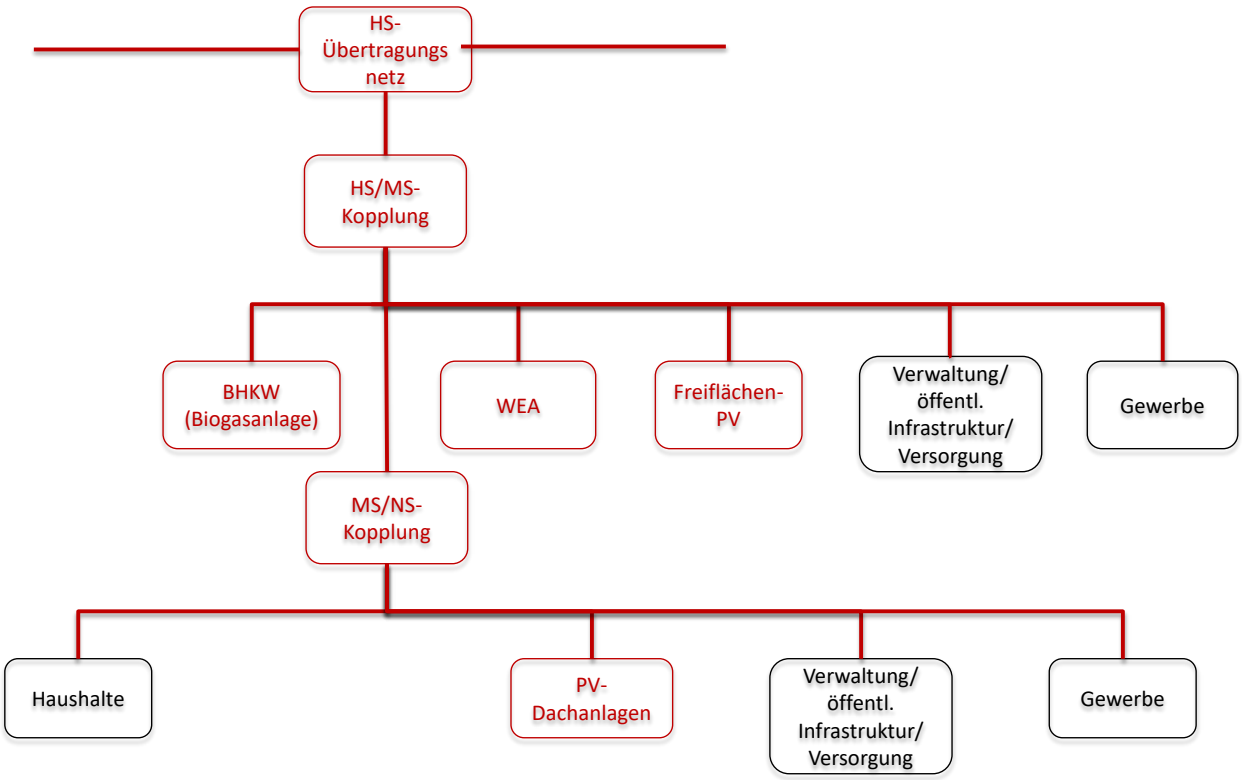


Abbildung 6.32: Vereinfachtes Netzschema für die Elektrizitätsversorgung von Wolfhagen. Abkürzungen: HS = Hochspannung, MS = Mittelspannung, Kopplung = Transformatorenstation zur Spannungswandlung zwischen Netzebenen, BHKW = Blockheizkraftwerk, WKA = Windenergieanlage, PV = Photovoltaikanlage

Die Elemente gliedern sich in das Elektrizitätsnetz bestehend aus a) der Hochspannungsebene und den Kopplungen zwischen b) der Hoch- und Mittelspannungsebene sowie c) der Mittel- und Niederspannungsebene und schließlich einer Netzsteuerung auf der Hochspannungsebene (nicht dargestellt). Eine weitere Elementegruppe bilden die Erzeuger, zu denen a) die PV-Freiflächenanlagen, b) die PV-Dachanlagen, c) die Windenergieanlagen, d) die BHKW der Biogasanlage sowie kleinere BHKW einzelner Haushalte gehören. Die dritte Elementegruppe der Verbraucher besteht aus Gewerbebetrieben, Verwaltungseinrichtungen bzw. Einrichtungen der öffentlichen Versorgung wie z.B. das Wolfhagener Krankenhaus oder Schulen sowie letztendlich den Haushalten, die zahlenmäßig umfangreichste Verbrauchergruppe.

Netzsteuerung

Eine unabhängige Netzsteuerung ist in dem vergleichsweise kleinen Netzgebiet von Wolfhagen nicht vorhanden. Die Führungsgrößen Spannung und Frequenz werden infolge der starren Kopplung von Hoch- Mittel- und Niederspannungsebene durch das Hochspannungs-Übertragungsnetz bestimmt. Die zunehmende dezentrale Einspeisung wirkt hierbei destabilisierend.

Tabelle 6.46: Diversitäts- und Lastindikatoren der Wolfhagener Elektrizitätsversorgung

Kriterium	Status quo 2013 (inkl. modelliertem Windpark Rödeser Berg)
Volatilität: Residuallast	5,1 MW (92 % mittlerer Entnahmeleistung)
mittlerer Residuallastgradient	0,9 MW/0,25h (Maximum: 11,7 MW)

Die Volatilität[60] der Residuallast[61] im Wolfhager Netz ist unter Berücksichtigung des Windparks Rödeser Berg mit 5,1 MW bereits fast so hoch wie die mittlere Entnahmeleistung. Der viertelstündliche Residuallastgradient liegt im Mittel bei 0,9 MW, wobei über den Jahresgang auch Gradienten von mehreren Megawatt (bis zu knapp 12 MW) erreicht werden (vgl. Tabelle 6.46). Der Großteil dieser Schwankungen in der Netzlast beruht auf der fluktuierenden Einspeiseleistung der Anlagen erneuerbarer Energien (EE-Anlagen) im Wolfhager Netz, die in Zukunft mit großer Wahrscheinlichkeit noch zunehmen wird.

Netzstruktur

Unter der Annahme, dass eine Entlastung des gesamten Elektrizitätssystems durch eine zuverlässige regionale Versorgung erreicht werden kann, ist zur langfristigen Beurteilung der Vulnerabilität der regionalen Stromversorgung eine Gesamtschau der lokalen Erzeugerstruktur und der zugehörigen Netzlasten notwendig.

Die Struktur der lokalen Erzeugungsanlagen kann im Sinne einer Vulnerabilitätsanalyse mit Hilfe des Kriteriums der Diversität untersucht werden. Diversität wird dabei auf zwei Arten betrachtet: einerseits funktionelle Diversität, d.h. es wird die Vielfalt der Arten der Stromerzeugung beurteilt, und andererseits räumliche Diversität, indem ihre regionale Verteilung beurteilt wird. In Wolfhagen kann von einer hohen räumlichen Diversität ausgegangen werden, da sich alle Erzeugungsanlagen an unterschiedlichen Standorten im Gemeindegebiet befinden und keine Kombinationen festzustellen sind, die den gleichzeitigen Ausfall mehrerer Anlagen im Falle der Beeinträchtigung eines Standorts durch Umwelteinwirkungen zur Folge hätten.

Die funktionelle Diversität der Energieerzeugung (D) kann mit einem von Molyneaux vorgeschlagenen Maß für die Diversität beschrieben werden, das auf dem Anteil unterschiedlicher Energiequellen (E) an der Gesamtenergieerzeugung beruht. Mit diesem Diversitätsindex wird die Wahrscheinlichkeit angegeben, mit der die nächste Einheit elektrischer Energie aus einer anderen Quelle stammt:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^{N} E^2$$

[60] Als Standardabweichung der viertelstündlichen Residuallaständerungen.

[61] Die Residuallast berücksichtigt nicht den Bedarf des vom Netz der SWW gespeisten Mineralwasserherstellers Vitaqua, da er einen für den Typ der untersuchten Region unverhältnismäßig hohen Stromverbrauch aufweist.

Die möglichen Werte beginnen bei null falls keine Diversität vorliegt und die gesamte Erzeugung auf nur einen Anlagentyp zurückgeht[62] (vgl. Tabelle 6.47). Sehr hohe Diversitäten nähern sich dem Index 1 an. Die für Wolfhagen im Jahre 2013, beim Status quo (d.h. inkl. Windpark Rödeser Berg) bzw. den Zukunftsszenarien für 2030 erreichten Werte sind in der Tabelle 6.47 dargestellt. Die funktionelle Diversität der Erzeugungsstruktur Wolfhagens liegt im mittleren Bereich und verändert sich nach Anschluss des Windparks für das Maximal- und das Minimalszenario 2030 nur wenig, weil sich lediglich die Mengen der bereits dominierenden PV- oder Windkraftanlagen erhöhen.

Tabelle 6.47: Diversität der Energieerzeugung der Wolfhagener Elektrizitätsversorgung

Kriterium	2013	2013 inkl. modelliertem Windpark Rödeser Berg	2013 inkl. modell. Windpark + zusätzl. BHKW	2030 Minimalszenario	2030 Maximalszenario
Diversität der Erzeugung	0,59	0,68	0,73	0,67	0,69

Neben der Diversität der Energieerzeugung soll zur Beurteilung der Vulnerabilität eines Energiesystems auch die Diversität der Verbraucher ermittelt werden. Dabei soll im Rahmen dieser Analyse nur die Größe der Verbraucher, d.h. ihr geschätzter Anteil an der gesamten Netzlast bewertet werden. Die Vulnerabilität des Netzes steigt mit dem Anteil der Großverbraucher an der gesamten Netzlast, weil sie signifikante Lastwechsel bewirken können. Für Wolfhagen kann angenommen werden, dass auf Großverbraucher nicht mehr als 10% der Netzlast zurückgehen. Allerdings wurde bei dieser Annahme der an das Stromnetz der SWW angeschlossene Mineralwasserhersteller „Vitaqua“ von der Betrachtung ausgeschlossen, da für seinen Verbrauch keine Daten vorlagen.

[62] Nach Molyneaux kann die funktionelle Diversität der Stromerzeugung als Quadratsumme der Leistungsanteile der unterschiedlichen Erzeugerarten an der gesamten Erzeugungsleistung dargestellt werden (Molyneaux et al. (2012)).

6.3.7.2 Analyse der Netzelemente

Das Hochspannungsnetz

Aufgrund der im vorangegangenen Absatz zur Netzsteuerung beschriebenen Abhängigkeiten müssen die potenziellen Auswirkungen eines Ausfalls der vom Hochspannungs- Übertragungsnetz geleisteten Erhaltung von Spannung und Frequenz als hoch und die Anpassungskapazität wegen der fehlenden Mittel zur eigenständigen Netzsteuerung – geschweige denn zur Abkopplung des Wolfhager Netzes – als gering bewertet werden. Daraus ergibt sich eine hohe Vulnerabilität gegenüber dem Ausfall des Hochspannungs- Übertragungsnetzes, der einen Stromausfall im gesamten Wolfhagener Netz zur Folge hätte.

HS/MS-Kupplungsstellen

Mit der im Abschnitt zur Netzsteuerung dargestellten Belastung des Elektrizitätsnetzes durch die fluktuierende Einspeisung der EE-Anlagen steigt neben der höheren Strombelastung auch die Wahrscheinlichkeit einer Überschreitung des Spannungsbandes, die zur Beschädigung oder zum Ausfall von Verbrauchern führt. Der Ausfall der HS/MS-Kopplung durch zu hohe Strombelastung würde einen Stromausfall im gesamten Wolfhagener Elektrizitätsnetz zur Folge haben, da nur eine Kupplungsstelle zum HS-Netz vorhanden ist.

Die potenziellen Auswirkungen einer Überlastung bzw. eines Ausfalls (durch Blitzschlag oder techn. Defekt der Betriebsmittel) der HS/MS-Kupplungsstelle müssen entsprechend als hoch bewertet werden. Da keine Möglichkeiten zum Gegensteuern vorhanden sind, ist die Anpassungskapazität gering und die Vulnerabilität folglich als hoch einzustufen.

MS/NS-Kupplungsstellen

Für die Kupplungsstellen zwischen Mittel- und Niederspannung gilt ebenfalls die bereits zu den HS/MS-Kupplungsstellen formulierte Einschätzung zur Belastung und den möglichen Folgen. Allerdings sind von Ausfällen der MS/NS-Kupplungsstellen nur einzelne Bereiche des Netzes betroffen. Dem entsprechend sind infolge einer Überlastung bzw. eines Ausfalls nur mittlere Auswirkungen zu befürchten. Auf die Anpassungskapazität an die unterschiedlichen Netzlasten wirken sich die im gesamten Netz fehlenden regelbaren Ortsnetztransformatoren negativ aus. Andererseits kann davon ausgegangen werden, dass Ersatzbetriebsmittel für Netzkupplungen auf dieser Spannungsebene in kurzer Zeit zur Verfügung gestellt werden können. Insgesamt wird für die MS/NS-Kupplungsstellen deshalb eine mittlere Anpassungskapazität angenommen, woraus sich eine mittlere Vulnerabilität ergibt.

WKA und PV-Anlagen

Die WKA- und PV-Anlagen im Wolfhagener Netz dienen der Stromerzeugung zur Einspeisung in das nationale Netz. Die eigene regionale Versorgung kann mit ihnen nicht kontinuierlich gesichert werden, weil Speicher oder andere Verfahren zur Anpassung der fluktuierenden

Stromerzeugung an den Verbrauch nicht vorhanden sind. Ein Ausfall der regionalen Anlagen wird deshalb auch keine Auswirkungen auf die Wolfhagener Stromversorgung haben. Ein Ausgleich wird – wie auch bei Flauten oder starkem Bedeckungsgrad – durch einen erhöhten Stromimport aus den vorgelagerten Netzebenen ermöglicht. Allerdings könnten plötzliche Änderungen der Einspeiseleistung (z.B. durch die Abschaltung alter PV-Anlagen bei einem Anstieg der Netzfrequenz auf 50,2 Hz) zu einer zusätzlichen Belastung des Netzes führen. Zusammenfassend kann von einer geringen Höhe der möglichen Auswirkungen eines Ausfalls der WKA sowie der auf Freiflächen und Dächern befindlichen PV-Anlagen ausgegangen werden. Verbunden mit der hohen Anpassungsfähigkeit durch zusätzlichen Strombezug aus dem Hochspannungsnetz ergibt sich eine lediglich geringe Vulnerabilität der Wolfhagener Stromversorgung in Bezug auf den Betrieb der regionalen WKA und PV-Anlagen.

Biomasse-BHKWs

Für die mit dem Gas der örtlichen Biogasanlage versorgten BHKWs kann die für WKA und PV-Anlagen getroffene Einschätzung übernommen werden, da auch die Biomasse-basierte Stromerzeugung nicht als Element der eigenen Bedarfsdeckung betrieben wird. Auch hier ergibt sich eine nur geringe Vulnerabilität.

Erdgas-BHKW

Bei dem im Zukunftsszenario vorgesehenen erdgasbetriebenen BHKW handelt es sich um eine zusätzliche Anlage, die bei Phasen hohen Bedarfs in Wolfhagen zur Reduktion des Strombezugs aus dem Hochspannungsnetz beitragen soll. Auch für diese Anlage können trotz ihres netzdienlichen Betriebs die bereits für die übrigen EE-Anlagen getroffenen Annahmen übernommen werden und somit an dieser Stelle für den Fall ihres Ausfalls durch technischen Defekt oder die Unterbrechung der Gasversorgung eine nur geringe Vulnerabilität der Wolfhagener Stromversorgung angenommen werden. Dabei wird allerdings vorausgesetzt, dass auch bei der zukünftigen Auslegung der Betriebsmittel des Wolfhagener Netzes mit einem Ausfall dieses BHKWs, d.h. mit dem Wegfall seiner Residuallast-mindernden Wirkung gerechnet wird.

Vulnerabilität von Haushalten, Gewerbe und öffentlichen Einrichtungen

Für die an das Elektrizitätsnetz angeschlossenen Haushalte werden im Falle eines Stromausfalls mittlere Auswirkungen angenommen, da voraussichtlich bis auf Kühl- und Gefriergeräte, Computer oder Wärmepumpen, die im Winter auf eine Stromversorgung angewiesen sind, keine weiteren Geräte oder Prozesse vorhanden sind, deren Versorgungsunterbrechung einen hohen Schaden verursachen könnte. Allerdings ist diese Bewertung abhängig von der Dauer des Ausfalls. Mit zunehmender Dauer werden die Auswirkungen (z.B. durch die feh-

lende Kommunikationsinfrastruktur) schwerwiegender und es müssen hohe Auswirkungen angenommen werden. Die Anpassungskapazität ist im Bereich der privaten Haushalte voraussichtlich noch recht gering. Nur ein geringer Teil von ihnen wird über Vorrichtungen zur Notstromversorgung oder Speicher verfügen, die im Falle eines Stromausfalls genutzt werden können. Die Vulnerabilität der Haushalte sollte entsprechend als hoch bewertet werden.

Für Gewerbebetriebe gilt die gleiche Annahme. Bei ihnen sind zudem die Auswirkungen eines Stromausfalls als hoch einzustufen, weil potenziell von einem Schaden an den Produktionsanlagen oder Werkzeugen ausgegangen werden muss.

Die Anpassungskapazität öffentlicher Einrichtungen, der Infrastruktur sowie von Versorgungseinrichtungen gegenüber Stromausfällen hängt von deren Ausstattung mit Anlagen zur Notstromversorgung ab. Für die meisten Einrichtungen kann hier nur von einem sehr begrenzten Umfang an Notstromversorgungskapazität ausgegangen werden. Es gelten deshalb die gleichen Annahmen wie für Gewerbebetriebe.

Gesamtbetrachtung der Vulnerabilität der Elemente des Wolfhagener Elektrizitätssystems

Betrachtet man die Vulnerabilität des Wolfhagener Elektrizitätssystems unter der Annahme, dass die Versorgung Wolfhagens und nicht die Versorgungssicherheit des gesamten Elektroenergiesystems bewertet wird, so zeigt sich das Wolfhager System mit seinen sehr abhängigen und damit auch verletzbaren Verbrauchern als vollständig auf die Versorgung durch das vorgelagerte Hochspannungsnetz angewiesen. Das Wolfhager Netz ist deshalb an der Kopplungsstelle von der HS- zur MS-Ebene besonders vulnerabel. Kopplungen von der MS- zur NS-Ebene sind für das lokale Netz weniger bedeutend, da jeweils nur Teile des lokalen Netzes von einem Ausfall betroffen sind und zudem Ersatz für die defekten Betriebsmittel wahrscheinlich schneller zur Verfügung steht. Von seinen Anlagen zur Stromerzeugung ist die Versorgung Wolfhagens nicht abhängig, deshalb besteht auch nur eine geringe Vulnerabilität. Der (plötzliche) Ausfall von Erzeugungsanlagen hat lediglich temporär eine höhere Netzbelastung infolge des Lastwechsels zur Folge. Daneben sind wirtschaftliche Einbußen mit einem langfristigen Ausfall dieser Anlagen zu befürchten.

Tabelle 6.48: Zusammenfassende Bewertung der Vulnerabilität im Elektrizitätssystem Wolfhagen

	HS-Netz	HS/MS-Kopplung	Kurz-läufer BHKW	Bio-gasan-lage	WKA	Frei-flä-chen-PV	MS/NS-Kopplung	PV klein	Haus-halte	Be-triebe	Verwaltung/öfftl. Infrastruktur/ Ver-sorgung
Potenzielle Auswirkun-gen	Hoch	hoch	gering	gering	ge-ring	gering	mittel	ge-ring	mittel	hoch	hoch
Anpas-sungskapa-zität	gering	gering	hoch	hoch	hoch	hoch	mittel	hoch	gering	gering	gering
Vulnerabili-tät	**Hoch**	**hoch**	**gering**	**gering**	**ge-ring**	**gering**	**mittel**	**ge-ring**	**hoch**	**hoch**	**hoch**

Über diese einfache qualitative Analyse der Elemente des lokalen Elektrizitätsnetzes hinaus kann eine Analyse des Verhältnisses von Bedarf und Erzeugung im lokalen Netz Aufschluss über die Belastung der vorgelagerten Netzebenen bzw. die Fähigkeit zu einer möglichen lokalen zeitgleichen Eigenversorgung geben. Dieses Verhältnis ist somit ein wichtiger Indikator für die Vulnerabilität der Energieversorgung und gibt zudem Aufschluss über die Realisierbarkeit einer lokalen Eigenversorgung.

6.3.7.3 Analyse der Netzlasten und der Bedarfsdeckung

Ergänzend zur strukturellen Vulnerabilitätsanalyse wurde für das Netz der SWW eine Analyse der Lasten und der Bedarfsdeckung (im Sinne von zeitgleicher Selbstversorgung) durch eigene Anlagen durchgeführt. Die Grundlage für die Modellierung der dazu ermittelten Residuallastkurven bilden Jahreslastgänge des Stromverbrauchs sowie der Stromerzeugung durch WKA, PV-Anlagen und Biomasseverwertung im Netz der SWW für das Jahr 2013. Dabei wurde der im Jahre 2014 ans Netz gegangene Windpark Rödeser Berg unter Zuhilfenahme eines modellierten Jahreslastganges der potenziellen Erzeugungsleistung in die Ermittlung der Lasten und der zeitgleichen Selbstversorgung für den Status quo mit aufgenommen. Die Modellierung der Erzeugungsleistung des Windparks basiert auf den Messungen eines auf dem Rödeser Berg am Windpark gelegenen Windmessmasts. In dem von den SWW dankenswerter Weise zur Verfügung gestellten Bedarfslastgang ist der an das Stromnetz der SWW angeschlossene Mineralwassserhersteller „Vitaqua“ nicht enthalten[63], da er einen für den Typ der untersuchten Region unverhältnismäßig hohen Stromverbrauch aufweist.

Mithilfe der im Kapitel 6.3.6 vorgestellten Szenarien für die zukünftige Struktur der Stromerzeugung in Wolfhagen wurden zudem die Lasten und die zeitgleiche Selbstversorgung für das Bezugsjahr 2030 modelliert.

Für die Modellierung wurde die vom Reiner Lemoine Institut für Energiesysteme entwickelte quelloffene Modellierungssoftware OEMOF (Open Energy-System Modelling Framework) in der Version 0.0.7 verwendet (Free Software Foundation 2016). Die Netzlasten wurden in stündlicher Auflösung in die Modellierung einbezogen.

6.3.7.4 Abbildung der Elemente des lokalen Energiesystems in der Modellierung

Die Elemente des Netzes der SWW wurden vereinfachend in die Klassen

1) Übertragungsnetz mit den Netzebenen Hochspannung, Mittelspannung und Niederspannung,

2) Transformatoren für die Verbindung der Netzebenen,

3) Energieerzeuger als Quellen (Source) mit einer maximalen Leistung in MW und einer im Jahresgang variablen Einspeiseleistung entsprechend

[63] Mündliche Information der SWW.

a) einer zugeordneten Jahresdauerlinie oder

b) den Erfordernissen einer Optimierung der Bilanz der Energieversorgung im lokalen Netz,

4) Speicher mit einer maximalen Speicherfähigkeit, festen Werten für den Wirkungsgrad sowie ihre Lade- und Entladerate und entsprechend den Erfordernissen der Optimierung im Jahresgang variablen Werten der Speicherladung,

5) Verbraucher (Sink), deren Last bei allen Modellierungsansätzen im Jahresgang entsprechend einer vorliegenden Jahresdauerlinie variiert wird, sowie

6) einem Speicher des Übertragungsnetzes mit unendlicher Speicherfähigkeit, um die Rückspeisung ins vorgelagerte Hochspannungsnetz im Jahresgang modellieren zu können.

6.3.7.5 Ermittlung der Modellierungsgüte

In einem ersten Schritt der Modellierung wurden alle Elemente entsprechend ihrer realen Leistung im Modell abgebildet, wobei allen Erzeugern vorhandene Jahresdauerlinien der Erzeugungsleistung zugeordnet wurden. Der Vergleich des erzeugten Residuallastganges mit dem realen Jahresgang der Residuallast ergab bis auf einen kleinen, vor allem in den Sommermonaten auftretenden, Betrag der Überspeisung eine große Übereinstimmung des realen und des modellierten Jahresgangs (vgl. Abbildung 6.33 und Abbildung 6.34).

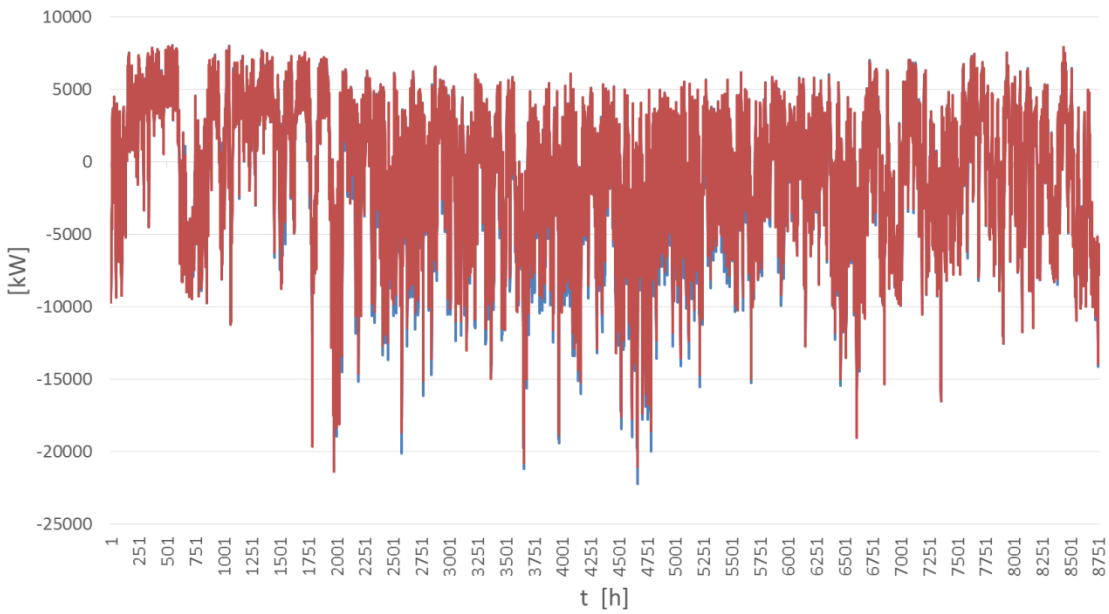


Abbildung 6.33: Ganglinien der realen (blau) und der modellierten Residuallast (rot) im Netz der SWW Wolfhagen. Die reale Residuallast wurde unter Annahme des Status quo für 2013 und unter Berücksichtigung des modellierten theoretischen Erzeugungslastganges des Windparks Rödeser Berg berechnet.

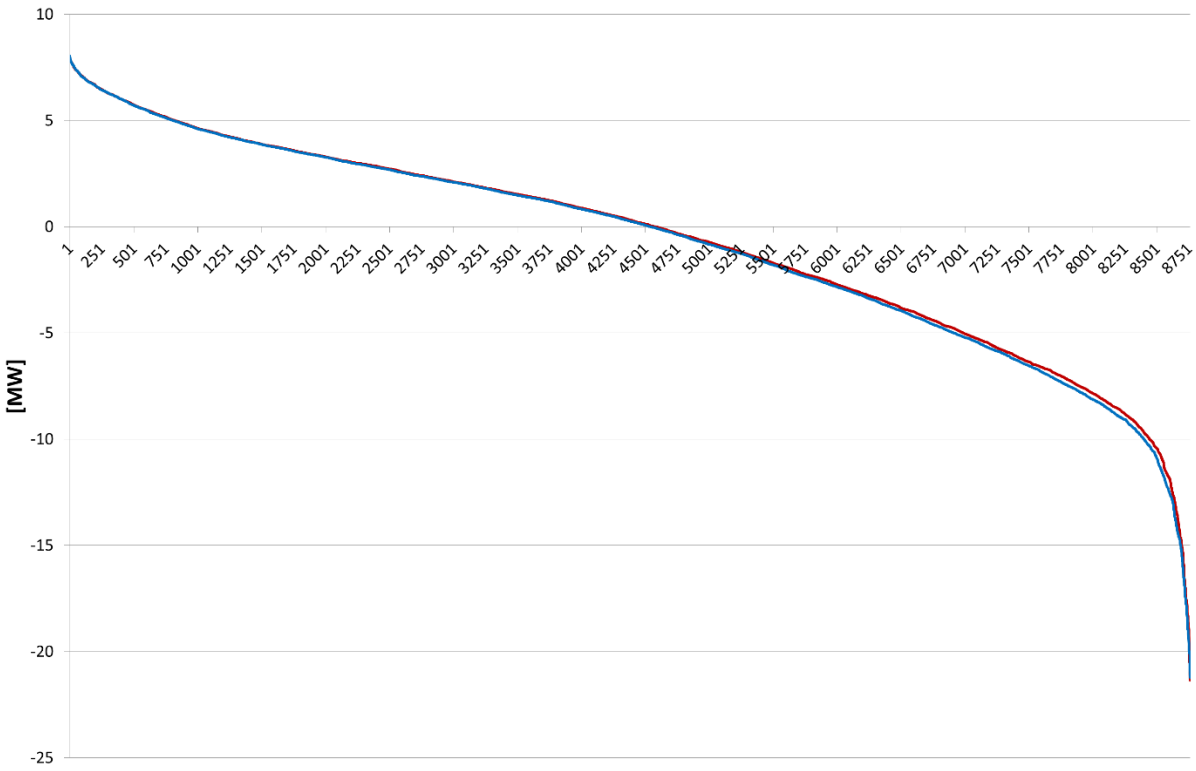


Abbildung 6.34: Geordnete Jahresdauerlinie der realen (blau) und der modellierten Residuallast (rot) im Netz der SWW Wolfhagen. Die reale Residuallast wurde unter Annahme des Status quo für 2013 und unter Berücksichtigung des modellierten theoretischen Erzeugungslastganges des Windparks Rödeser Berg berechnet.

Die reale Leistung der Energieerzeugungsanlagen in Wolfhagen scheint also die im Modell eingestellte Gesamtleistung der Erzeugungsanlagen leicht zu übertreffen. Vermutlich liegt die Ursache bei alten PV-Anlagen, die noch nicht im EEG-Anlagenregister erfasst wurden. Im Modell wurden nur die in der Anlagenstammliste der SWW[64] eingetragenen Erzeugungsanlagen berücksichtigt.

Tabelle 6.49: Leistungssummen in der Jahresbilanz für die Modellierung des Netzes der SWW im Vergleich mit den realen Werten aus 2013. Die reale Residuallast wurde unter Berücksichtigung des modellierten theoretischen Erzeugungslastganges des Windparks Rödeser Berg berechnet.

	Einspeisung [GWh/a]	Entnahme [GWh/a]	Unterspeisung [MWh/a]	Überspeisung [GW/a]
modelliert für 2013	53,8	48,0	-14,3	20,0
real 2013	54,8	48,0	-14,5	21,2

[64] Anlagenstammliste EEG-Einspeisungen im Verteilnetz der Stadtwerke Wolfhagen GmbH, Stand 31.12.2013.

6.3.7.6 Szenarien zukünftiger Netzlasten

Damit mögliche Maßnahmen zur Verringerung der Netzlasten auch vor dem Hintergrund der potenziellen zukünftigen Entwicklung bewertet werden können, wurden, ausgehend von den im Kapitel 6.3.6 vorgestellten Szenarien, Jahresbilanzen erstellt und der Verlauf der Residuallast ermittelt. Der beim Status quo 2013 zugrunde gelegte Verbrauchslastgang wurde dabei auch für die Szenarien beibehalten. Denn trotz eines wahrscheinlich leichten Bevölkerungsanstiegs wird aufgrund von Effizienzsteigerungen mit einem gleichbleibenden Stromverbrauch gerechnet.

Das Minimalszenario zukünftiger Energieversorgung

Basierend auf den in Kapitel 6.3.6 vorgestellten Minimalannahmen zur Erzeugungsleistung im Netz der SWW für das Zieljahr 2030 wurden die Lasten im Jahresgang in stündlicher Auflösung berechnet und mit dem Status quo verglichen. In der Verteilung der Residuallast (siehe Abbildung 6.35) ergibt sich eine leichte Erhöhung der Unterspeisung um 0,7 GWh pro Jahr, die auf den Wegfall des Beitrags der beiden Holzgas-BHKWs mit jeweils 0,15 MW maximaler elektrischer Leistung im Minimalszenario zurückzuführen ist. Trotz des im Szenario angenommenen Zuwachses im Bereich der PV-Dachanlagen von 2,6 MWp nimmt dadurch auch der zeitgleiche Eigenversorgungsgrad um 2 % ab (vgl. Tabelle 6.49).

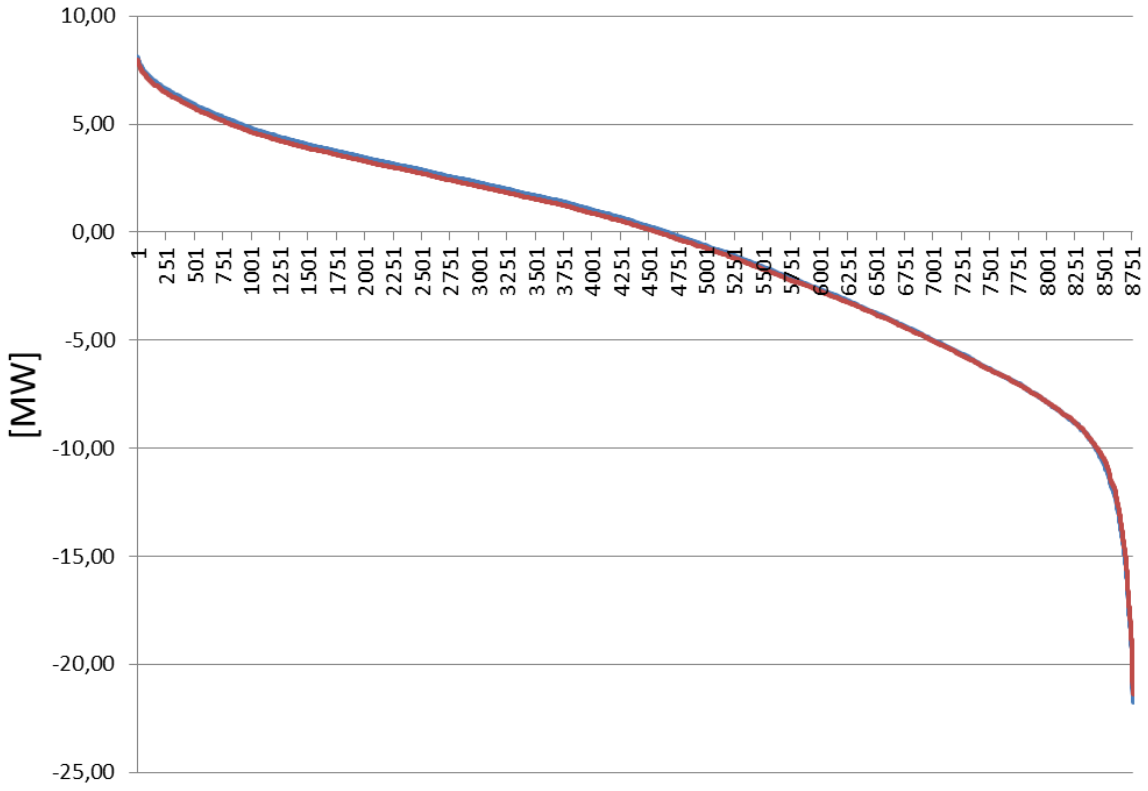


Abbildung 6.35: Jahresgang der geordneten Residuallastkurven für das Minimalszenario 2030 (blau) und den Status quo (rot).

Das Maximalszenario zukünftiger Energieversorgung (ohne Speicher)

Auch die Maximalannahmen zur Erzeugungsleistung im Netz der SWW für das Zieljahr 2030 (vgl. Kapitel 6.3.6) wurden im Jahresgang mit dem Status quo verglichen. Dabei wurde zunächst keine Speicherkapazität berücksichtigt. Auch das Maximalszenario, bei dem ein Zuwachs von 4,9 MWp bei der PV-Leistung angenommen wurde, weicht in der Summe der Lasten nur leicht vom Status quo ab (vgl. Abbildung 6.36).
Weil keine Erzeugungsanlagen wegfallen, nimmt die Unterspeisung jedoch nicht zu, sondern verringert sich gegenüber dem Status quo leicht um 0,4 GWh. Im Unterschied zum Minimalszenario kommt es zu einer Erhöhung der Überspeisung um 2,3 GWh, was auf den stärkeren Zuwachs bei den PV-Dachanlagen bei gleichzeitigem Erhalt der beiden Holzgas-BHKWs mit insges. 0,3 MW Leistung zurückzuführen ist.

Dies zeigt sich auch in der Ganglinie der Residuallast, die gegenüber dem Status quo stärkere Ausschläge der negativen Residuallast aufweist (vgl. Abbildung 6.37). Die gesamte Einspeisung erhöht sich gegenüber dem Status quo um 2,7 GWh auf insgesamt 56,5 GWh. Auf den zeitgleichen Versorgungsgrad hat diese Erhöhung jedoch nur geringe Auswirkungen. Er steigt gegenüber dem Status quo um lediglich 1%. Der Grund liegt im unveränderten Tagesgang der zusätzlichen PV-Leistung. Die zusätzliche PV-Leistung kann keine Bedarfsspitzen zu anderen Tageszeiten kompensieren.

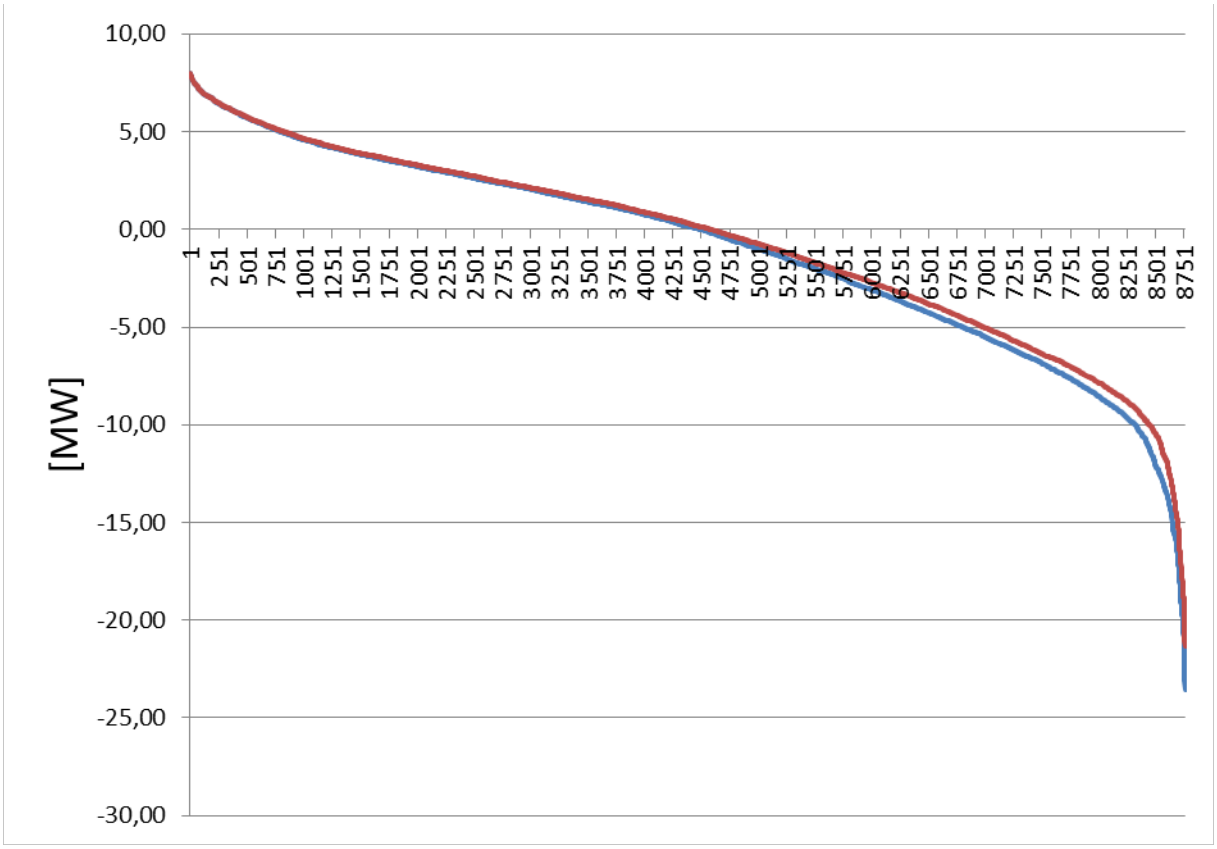


Abbildung 6.36: Jahresgang der geordneten Residuallastkurven für das Maximalszenario 2030 (blau) und den Status quo (rot).

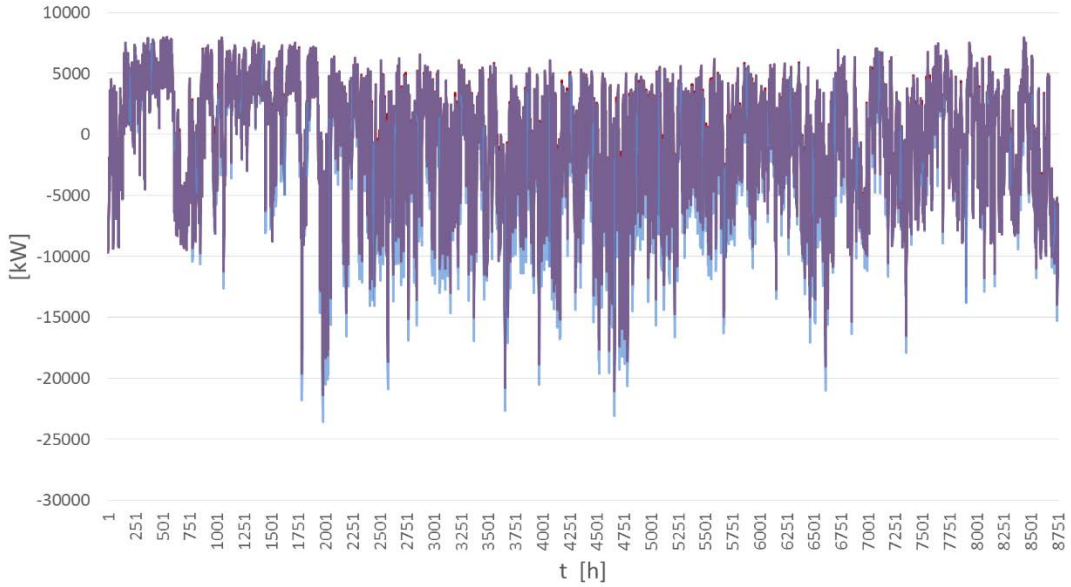


Abbildung 6.37: Überlagerte Ganglinien der modellierten Residuallast im Netz der SWW für den Status quo (2013) (rote Linie) sowie das Maximalszenario für 2030 (blaue halbtransparente Linie).

Das Maximalszenario zukünftiger Energieversorgung inkl. dezentralen PV-Speichern

Ausgehend von den 2013 in Wolfhagen installierten 526 PV-Dachkleinanlagen (<30 kWp) mit einer Gesamtleistung von ca. 7,4 MWp und dem im Maximalszenario für 2030 angenommenen Zubau von 4,9 MWp liegt es nahe, auch eine Ausstattung neuer und bestehender Anlagen mit Stromspeichern anzunehmen. Bei geschätzten 300 Speichern mit einer mittleren Speicherleistung von 7,5 kWh ergibt sich eine Gesamtspeicherleistung von 2,25 MWh. Für diese Speicher wird in der Modellierung ein mittlerer Wirkungsgrad von 95% sowie eine mittlere Lade- bzw. Entladerate (C-Rate) von 1 bzw. 0,5C angenommen.

In der Modellierung orientierte sich der Speicherbetrieb an der Verringerung der Residuallast. Da OEMOF für die ökonomische Analyse ausgelegt ist, wurden zu diesem Zweck die Rückspeisung und der Bezug elektrischer Energie aus dem Hochspannungsübertragungsnetz sowie auch die Transformation zwischen den Spannungsebenen mit einem festen Kostenbetrag pro MWh belegt[65].

Die Modellierung ergibt für den optimalen Fall einer synchronen netzdienlichen Steuerung der PV-Speicher im Vergleich zum Maximalszenario ohne Speicher eine Erhöhung der zeitgleichen Eigenversorgung um lediglich 1%. Die Unterspeisung verringert sich leicht um 0,7 GWh/a und die Überspeisung sinkt um 1 GWh/a. Die Ausstattung mit Speichern hat also im betrachteten Umfang

[65] Für alle Anlagen zur Stromerzeugung- und Speicherung wurden dabei Kosten von 0,- Euro pro MWh angenommen. Für den Bezug und die Rückspeisung ins Hochspannungsnetz sowie die Transformation zwischen den Netzebenen wurden jeweils Kosten in Höhe von 1,- Euro pro MWh in der Modellierung angenommen, um die Eignung der Erzeuger- und Speicherkombinationen unter der Zielstellung eines möglichst hohen Ausgleichs innerhalb der Netzebenen bzw. innerhalb des regionalen Stromnetzes zu ermitteln. Durch diese Kostenaufteilung werden im Modell zuerst die lokalen Anlagen zur Stromerzeugung- und Speicherung ausgereizt, bevor auf den Bezug oder die Rückspeisung ins Hochspannungsnetz zum Ausgleich von Bedarf oder Übererzeugung zurückgegriffen wird.

auch unter Annahme einer optimalen Steuerung nur geringe Auswirkungen auf die Netzlast. Dieses Ergebnis spiegelt sich auch in der Residuallastkurve wieder, die kaum vom Status quo abweicht (vgl. Abbildung 6.38).

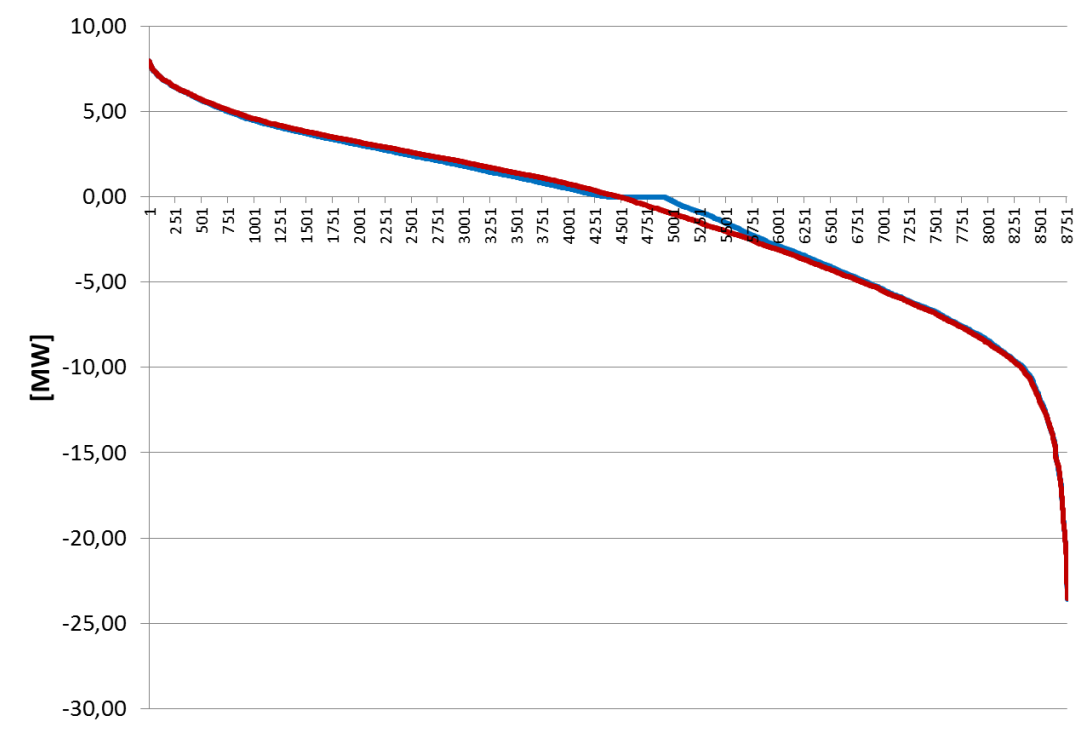


Abbildung 6.38: Jahresgang der geordneten Residuallastkurven für das Maximalszenario 2030 (inkl. einer Speicherleistung von 2,25 MW) (blau) und den Status quo (rot). Für die Szenario Modellierung wurde eine synchrone Steuerung der dezentralen PV-Speicher zur Reduktion der Unterspeisung im regionalen Netz angenommen.

6.3.7.7 Potenzielle Auswirkungen von Klimaveränderungen

Auch Klimaveränderungen wirken sich auf das Energiesystem aus. Im Vergleich zur Erzeugung von Strom aus fossilen Quellen, die z.B. durch Engpässe bei der Kühlwasserbereitstellung beeinträchtigt werden kann, sind die Erneuerbaren Energien wesentlich stärker vom Klima und Wettergeschehen abhängig. Beispielsweise sinkt bei zunehmendem Bedeckungsgrad oder Schneefall die Leistung von PV-Anlagen. Die durchschnittliche Leistung von Windenergieanlagen ist von der mittleren Windgeschwindigkeit abhängig.

Um eine grobe Abschätzung relevanter Klimaveränderungen für Wolfhagen zu erhalten, wurden die hessischen Modell-Werte[66] der Windgeschwindigkeit und des Bedeckungsgrades für den Zeitraum 2020 bis 2050 aus dem regionalen Klimamodell Cosmo-CLM gemittelt (wobei beide Läufe des Klimamodells betrachtet wurden). Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.39 nach Jahreszeiten getrennt dargestellt.

[66] Umweltatlas Hessen (2016), Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie http://atlas.umwelt.hessen.de/servlet/Frame/atlas/klima/inhalt-klima.htm [Zugriff am 10.08.2016]

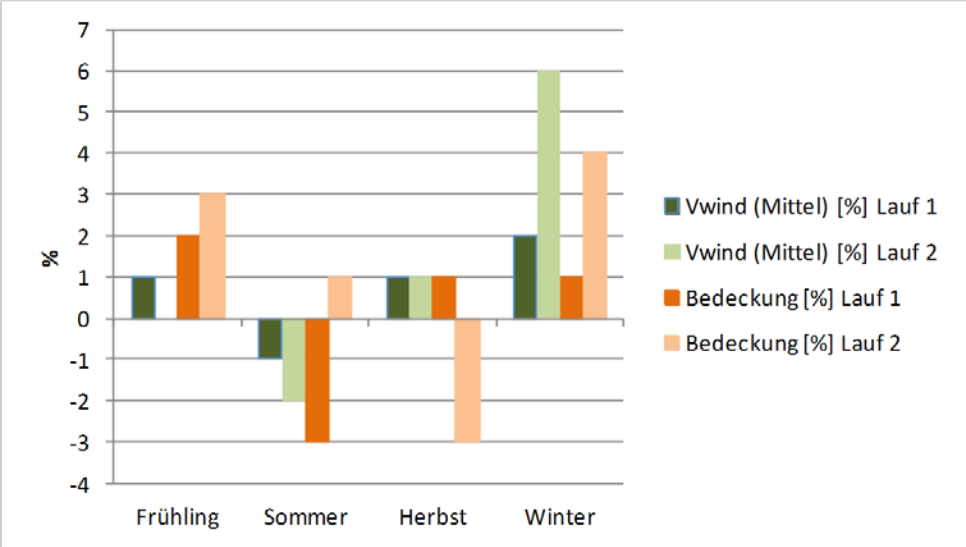


Abbildung 6.39: Veränderung von Windgeschwindigkeit und Bedeckungsgrad in Hessen (Szenario A1B, regionales Klimamodell Cosmo-CLM, Mittelwerte für Zeitraum 2020-2050; Quelle: Umweltatlas Hessen (2016), Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie) (Annahmen für Szenario A1B: rasches Wirtschaftswachstum, rasche Einführung neuer, effizienter Technologien, nach 2050 rückläufige Weltbevölkerung, ausgewogene Nutzung aller Energiequellen)

Das Ergebnis ist von großen Differenzen zwischen den beiden Läufen des Klimamodells gekennzeichnet. Trotzdem ist eine Tendenz zu stärkerer Bedeckung im Winter und im Frühling erkennbar. Während für den Herbst und vor allem für die Wintermonate eine Erhöhung der mittleren Windgeschwindigkeit erwartet wird, geht das Modell für den Sommer im Mittel von abnehmenden Windgeschwindigkeiten aus. Im Sommer und Herbst schwanken die Angaben für den Bedeckungsgrad zu stark zwischen den einzelnen Läufen, sodass keine Aussage über ihre erwartbare Veränderung getroffen werden kann.

Insgesamt ergibt die Auswertung der nach dem Szenario A1B modellierten Klimaentwicklung eine bis auf den Sommer voraussichtlich eher ausgeglichene Energieerzeugung, da bei abnehmender Stromerzeugung durch PV-Anlagen eine gewisse Kompensation durch die Windenergieanlagen zu erwarten ist.

6.3.7.8 Optionen zum verbesserten Ausgleich von Stromerzeugung und Stromverbrauch

Sowohl das Minimal als auch das Maximalszenario der Netzlast im Jahre 2030 zeigten in der Modellierung keine gravierende Verringerung der Netzlasten. Auch der Eigenversorgungsgrad änderte sich nicht wesentlich. Ausgehend vom Status quo wurden deshalb einige technische Optionen zur Resilienz erhöhenden zusätzlichen Energiegewinnung und zur Speicherung modelliert, die für ein Netz dieser Größenordnung nicht unrealistisch erscheinen bzw. teilweise sogar vor Ort bereits angedacht waren. Im Folgenden werden die Einflüsse dieser Optionen auf die bereits für den Status quo ermittelten Lastparameter des Netzes vorgestellt.

Ziel dieser Modellierungen war die optimale Abstimmung von Erzeugung und Verbrauch, sodass möglichst wenig elektrische Leistung in das vorgelagerte Netz (die Hochspannungsebene) zurückgespeist wird. Entsprechend der Orientierung von OEMOV an ökonomischen Parametern wurden dazu die Rückspeisung und der Bezug elektrischer Energie aus dem Hochspannungsübertragungsnetz sowie auch die Transformation zwischen den Spannungsebenen mit einem festen Kostenbetrag pro MWh belegt[67]. Die Modellierungsergebnisse repräsentieren die für das abgebildete Energiesystem kostengünstigste Fahrweise der variablen Stromerzeuger- bzw. Speicherelemente.

Status quo inkl. 3 MW-Speicher

Zunächst wurde in der Modellierung der Einfluss von Speichern, die ausschließlich bedarfsabhängig betrieben werden, auf die Netzlasten im Jahresgang untersucht. Für die Verwendung eines Speichers mit 3 MW Gesamtspeicherleistung, einem Wirkungsgrad von 95%, einer Laderate 1C und einer Entladerate 0,25C ergibt sich im Vergleich zum Status quo eine leichte Verringerung von Unter- und Überspeisung. Der Eigenversorgungsgrad steigt dabei nur um 2% (vgl. Tabelle 6.50).

Status quo incl. 12 MW-Speicher

Bei der Verwendung eines 12 MW-Speichers mit gleichen Eigenschaften steigt der zeitgleiche Eigenversorgungsgrad um 6% auf 77% (siehe Tabelle 6.50). In der geordneten Jahreskurve der Residuallast machen sich die nun schon deutlicher verringerten Werte der Unter- und Überspeisung bemerkbar (vgl. Abbildung 6.40).

Status quo inkl. bedarfsgesteuerter Biomasse-BHKW

Um die Wirkung variabler (d.h. positiv und negativ regelbarer) Erzeugungsanlagen auf die Netzlast im Sinne eines Ausgleichs von Bedarf und Erzeugung zu untersuchen, wurde zunächst die bedarfsabhängige Steuerung der bereits im Netz vorhandenen Biomasse-BHKWs (ein Biogas-BHKW und zwei Holzgas-BHKW mit insges. 0,8 MW) simuliert. Dazu wurde die Einspeiseleistung der BHKWs nicht wie bei den vorherigen Modellierungen gemäß des historischen Jahresgangs der Erzeugungsleistung für das Jahr 2013 in die Simulation eingebracht, sondern stattdessen ausschließlich zum Ausgleich der Unterspeisung im Netz modelliert. Im Ergebnis zeigt sich, dass mithilfe der BHKWs in dieser Fahrweise – trotz der im Vergleich zu den simulierten Speichervarianten von 3 bzw. 12 MW eher geringen Leistung – bereits eine Erhöhung des zeitgleichen Eigenversorgungsgrades von 71 auf 75 % erreicht wird. Die Überspeisung wird dabei allerdings

[67] Für alle Anlagen zur Stromerzeugung- und Speicherung wurden Kosten von 0,- Euro pro MWh angenommen. Für den Bezug aus und die Rückspeisung ins Hochspannungsnetz sowie die Transformation zwischen den Netzebenen wurden jeweils Kosten in Höhe von 1,- Euro pro MWh in der Modellierung angenommen, um die Eignung der Erzeuger- und Speicherkombinationen unter der Zielstellung eines möglichst hohen Ausgleichs innerhalb der Netzebenen bzw. innerhalb des regionalen Stromnetzes zu ermitteln.

leicht erhöht, wobei sich die Unterspeisung stärker verringert, als es bei den getesteten Speichervarianten der Fall war (vgl. Tabelle 6.50).

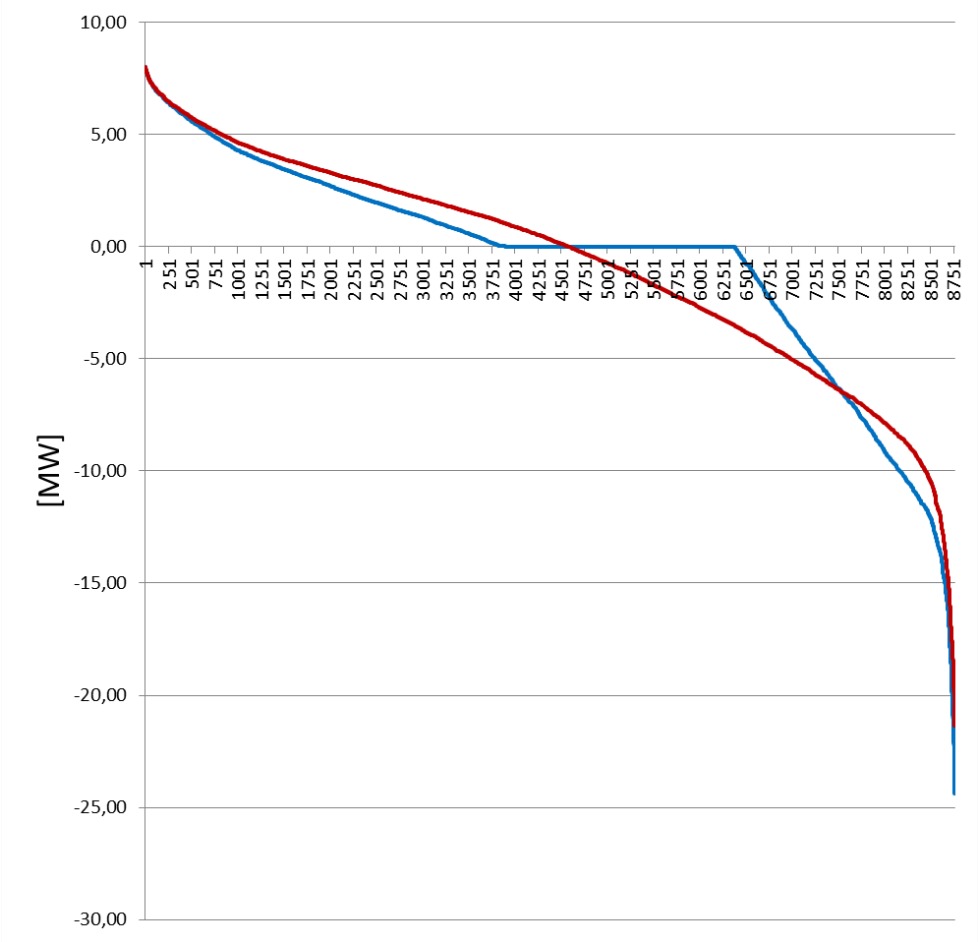


Abbildung 6.40: Jahresgang der geordneten Residuallastkurven für den Status quo inkl. eines 12 MW-Speichers (blau) sowie den unveränderten Status quo (rot).

Status quo inkl. bedarfsgesteuertem Erdgas-BHKW

Wenn anstelle der bedarfsabhängig gesteuerten Biomasse-BHKW ein zusätzliches Erdgas-BHKW im Sinne eines Ausgleichs von Bedarf und Erzeugung in der Modellierung simuliert wird, ergibt sich mit 88% (im Vergleich zu den mit den variablen Biomasse-BHKW erreichten 78%) ein weitaus höherer zeitgleicher Eigenversorgungsgrad. Dies ist auf die höhere Leistung des Erdgas-BHKW von 1,76 MW zurückzuführen. Zudem war das Erdgas-BHKW in der Residuallast des Status quo im Gegensatz zu den Biomasse-BHKW nicht von vornherein mit enthalten. Die Überspeisung wird durch das Erdgas-BHKW leicht erhöht. Die Unterspeisung wird jedoch halbiert (vgl. Abbildung 6.41 sowie Tabelle 6.50).

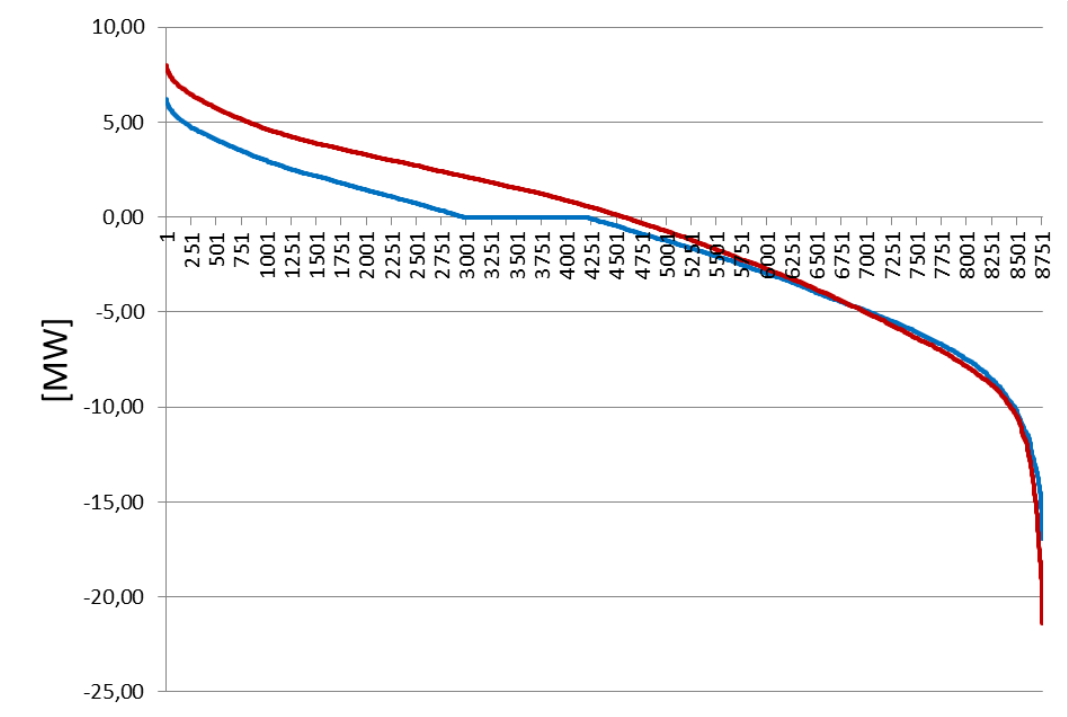


Abbildung 6.41: Jahresgang der geordneten Residuallastkurven für den Status quo inkl. bedarfsabhängig gesteuertem Erdgas-BHKW mit einer Gesamtleistung von 1,76 MW zur Verringerung der Residuallast (blau) im Vergleich zum unveränderten Status quo (rot).

Status quo inkl. bedarfsgesteuerten Erdgas- und Biomasse BHKWs

Wenn die Biomasse-BHKWs und auch das Erdgas-BHKW im Sinne eines Ausgleichs von Bedarf und Erzeugung in der Modellierung simuliert werden, steigt der zeitgleiche Eigenversorgungsgrad im Vergleich zur oben dargestellten alleinigen bedarfsabhängigen Nutzung des Erdgas-BHKWs nochmals leicht an auf insgesamt 89%. In dieser Betriebsart wird zudem die Überspeisung im Vergleich zur vorangegangenen Modellierung leicht erniedrigt (von 20 auf 17,8 GWh/a), weil auch die Biomasse-BHKWs in einem netzdienlichen Betrieb gefahren werden. Zudem sinkt auch die Unterspeisung im Vergleich zu der mit dem Erdgas-BHKW erzielten Verringerung noch einmal um knapp 1 GWh/a auf 6,2 GWh/a (vgl. Abbildung 6.42).

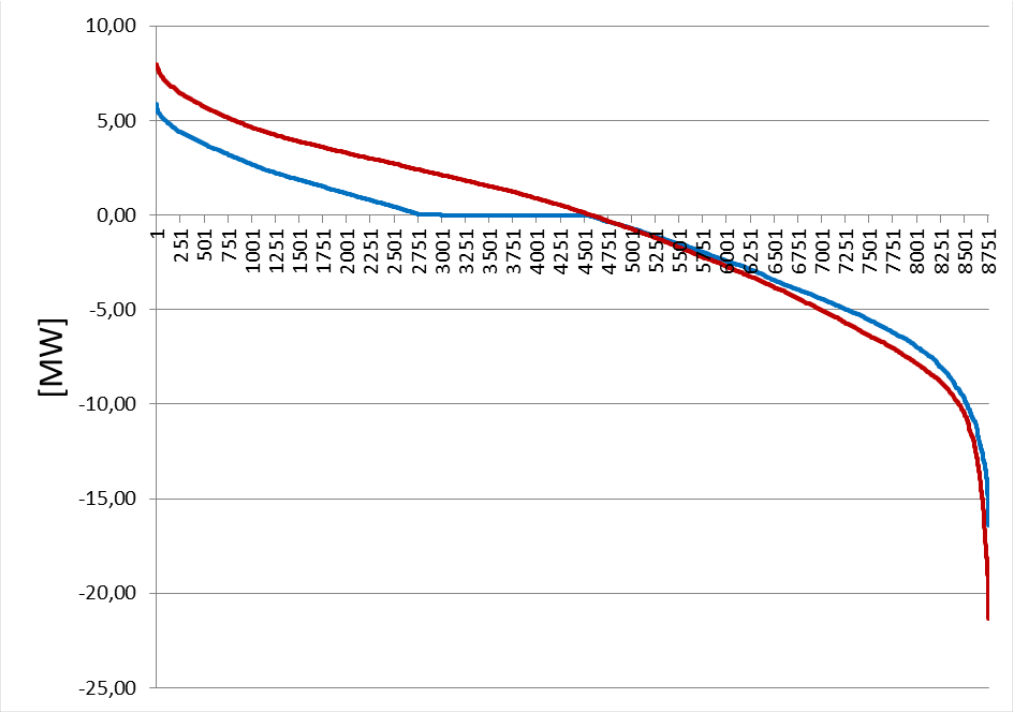


Abbildung 6.42: Jahresgang der geordneten Residuallastkurven für den Status quo inkl. bedarfsabhängig gesteuerten Biomasse- und Erdgas-BHKWs mit einer Gesamtleistung von 2,56 MW zur Verringerung der Residuallast (blau) im Vergleich zum unveränderten Status quo (rot).

Status quo inkl. bedarfsgesteuertem 3 MW-Speicher und Erdgas-BHKW

In den bisher betrachteten Varianten zur Untersuchung der Wirkung von Speichern oder regelbaren Anlagen zur Stromerzeugung wurden Speicher und Stromerzeuger jeweils getrennt betrachtet. Um die Wirkung der Kombination beider Anlagentypen zu untersuchen, wurden in einer Modellierung auf der Basis des Status quo ein Speicher mit einer maximalen Speicherleistung von 3 MW (Wirkungsgrad 0,95, Laderate 1C, Entladerate 0,25C) sowie das Erdgas-BHKW mit einer Leistung von 1,76 MW in der Modellierung auf den maximalen netzdienlichen Beitrag der beiden Anlagen hin untersucht. Im Ergebnis zeigt sich, dass diese Kombination gegenüber der im vorangegangenen Abschnitt untersuchten Kombination von Erzeugern in der Modellierung unterlegen ist. Der zeitgleiche Eigenversorgungsgrad liegt mit 86% um 3% unter dem mittels Biomasse- und Erdgas-BHKW erreichten Wert und auch die Unterspeisung wird weniger stark verringert (vgl. Abbildung 6.43). Mit 20,7 GWh/a wird die Überspeisung gegenüber dem Status quo (20 GWh/a) leicht erhöht. Was die Einspeisung betrifft, so werden die vorgelagerten Netzebenen in dieser Variante also nicht entlastet.

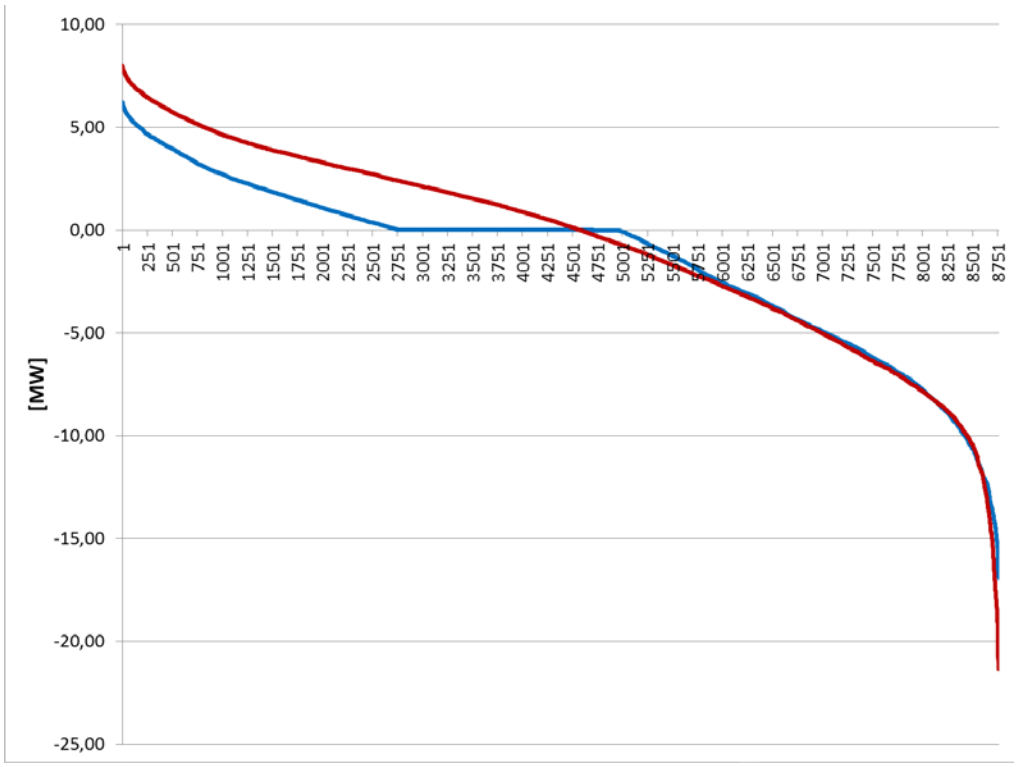


Abbildung 6.43: Jahresgang der geordneten Residuallastkurven für den Status quo inkl. bedarfsabhängig gesteuertem 3 MW-Speicher und Erdgas-BHKWs mit 1,76 MW zur Verringerung der Residuallast (blau) sowie dem unveränderten Status quo (rot).

6.3.7.9 Zusammenfassung der strukturellen Vulnerabilitätsanalyse und möglicher Ausgleichsoptionen

Die Gradienten der Residuallast im Wolfhagener Elektrizitätsnetz sind neben der Stromerzeugung aus WKA auch auf den hohen Anteil an PV-Anlagen zurückzuführen. In Zukunft ist durch den in den Szenarien angenommenen Zuwachs an PV-Anlagen mit ihrer tagesrythmischen Leistungscharakteristik eine Verstärkung dieser Lastwechsel zu befürchten. Eine flexible Anpassung der MS/NS-Kupplungsstellen ist derzeit noch nicht möglich.

Eine Ausgleichsoption zur Verringerung der Residuallast böten die BHKW der Biogasanlage, die aber noch nicht in einem netzdienlichen Betrieb gefahren werden. Eine Minderung des Bedarfs auf der Basis eines von den Stadtwerken über den Strompreis gesteuerten Demand-Side-Managements privater Haushalte befindet sich erst im Erprobungsstadium.

Positiv ist auch die funktionell diverse und geografisch verteilte Struktur von Stromerzeugungsanlagen zu bewerten. Das Wolfhagener Netz ist aber nur durch eine Kupplungsstelle mit dem vorgelagerten Verteilnetz (110 kV) verbunden und aufgrund der fehlenden Fähigkeit zum Inselnetzbetrieb vollständig vom Verteilnetz abhängig.

Die potenzielle Klimaveränderung innerhalb der kommenden 20 Jahre deutet auf eine Verringerung des PV-Ertrags in Winter und Frühling, eine Windertragszunahme in Herbst und Winter sowie eine Verringerung des Windertrags im Sommer hin.

Auf die Wolfhagener Bedarfsdeckung haben die lokalen Anlagen zur Energiegewinnung und die Struktur des lokalen Elektroenergiesystems derzeit nur wenig Einfluss. Der Betrieb des regionalen Netzes und die lokale Versorgung sind vollständig abhängig vom Übertragungsnetz. Allerdings stellt die in ihrer Fluktuation nicht kompensierte Stromerzeugung und die damit verbundene Gefahr einer Verletzung der Qualitätskriterien der Stromversorgung eine Schwachstelle des lokalen Netzes dar, die in Zukunft ohne geeignete Gegenmaßnahmen noch relevanter werden wird.

Mithilfe des Programms OEMOF konnten die Netzlasten im Jahresverlauf für Wolfhagen simuliert werden. Neben der Simulation der Lasten für 2013 (Status quo) sowie den Szenarien für 2030 konnten neue Stromerzeuger- und Speicherkombinationen im regionalen Netz auf ihre Eignung zur Verringerung der Netzlasten untersucht werden (vgl. Tabelle 6.50 sowie Abbildung 6.44 und Abbildung 6.45).

Die hauptsächlich durch den Zuwachs an PV-Leistung bestimmten Szenarien zeigen in der Modellierung keine großen Veränderungen gegenüber dem Status quo. Das Minimalszenario führt zu einer Verschlechterung aller Werte inklusive des zeitgleichen Eigenversorgungsgrades. Der Grund für dieses Ergebnis liegt im Wegfall der Holzgas-BHKW, deren Beitrag durch den im Minimalszenario angenommenen moderaten PV-Zubaus von 2,6 MWp nicht ausgeglichen werden kann. Ein Zuwachs an PV-Leistung wirkt sich generell nur schwach auf die Erhöhung des zeitgleichen Eigenversorgungsgrades aus, weil der Zeitverlauf der PV-Einspeisung durch den Tagesgang der Strahlungsintensität der Sonne bestimmt ist und der Strom aus PV-Anlagen somit nicht zu anderen Zeiten für die Bedarfsdeckung zur Verfügung steht. Auch das Maximalszenario, bei dem, neben dem Erhalt der Holzgas-BHKW, ein Anstieg der installierten PV-Leistung um 4,9 MWp angenommen wurde, führt nur zu einer leichten Verbesserung der Werte.

Tabelle 6.50: Gesamtergebnis der Modellierung von Netzlasten und Bedarfsdeckung unter Berücksichtigung verschiedener Optionen zur netzdienlichen Integration von Speichern und Stromerzeugern

Szenario	Einspeisung [GWh/a]	Entnahme [GWh/a]	Unterspeisung [GWh/a]	Überspeisung [GW/a]	Eigenversorgungsgrad (stündlich)
2013	53,8	48,0	-14,3	20,0	71%
2030 minimal	52,9	48,0	-15,0	19,9	69%
2030 maximal	56,5	48,0	-13,9	22,3	72%
2030 maximal incl. 2,25 MW-Speicher (C_{out} = 0,5)	56,2	48,0	-13,2	21,3	73%
2013 incl. 3 MW-Speicher (C_{out} = 0,25)	53,6	48,0	-13,4	19,0	73%
2013 incl. 12 MW-Speicher (C_{out} = 0,25)	53,0	48,0	-11,7	16,7	77%
2013 incl. variables Biomasse-BHKW	57,3	48,0	-12,6	21,9	75%
2013 incl. variables Erdgas-BHKW	61,1	48,0	-7,1	20,1	88%
2013 incl. variables Biomasse-BHKW + variables Erdgas-BHKW	59,6	48,0	-6,2	17,8	89%
2013 incl. 3 MW Speicher (C_{out}= 0,25) + variables Erdgas-BHKW	60,7	48,0	-8,0	20,7	86%

Verbunden mit einer fortschreitenden Ausstattung kleiner PV-Anlagen mit Batteriespeichern wurde das Maximalszenario für 2030 um ein Speichervolumen von 2,25 MWh ergänzt und der netzdienliche Betrieb des gesamten Speicherumfangs zur Verringerung der Residuallast simuliert. Jedoch konnte auch für diese Konstellation nur eine leichte Reduktion der Lasten erzielt werden. Gleiches gilt für die Integration eines an den Eigenschaften von Batteriespeichern orientierten 3 MW-Speicherelements in das lokale Netz zur Residuallastverringerung. Die Vergrößerung der Speicherkapazität auf 12 MWh ergibt eine stärkere Verringerung der Lasten, wobei der zeitgleiche Eigenversorgungsgrad um 6 % ansteigt.

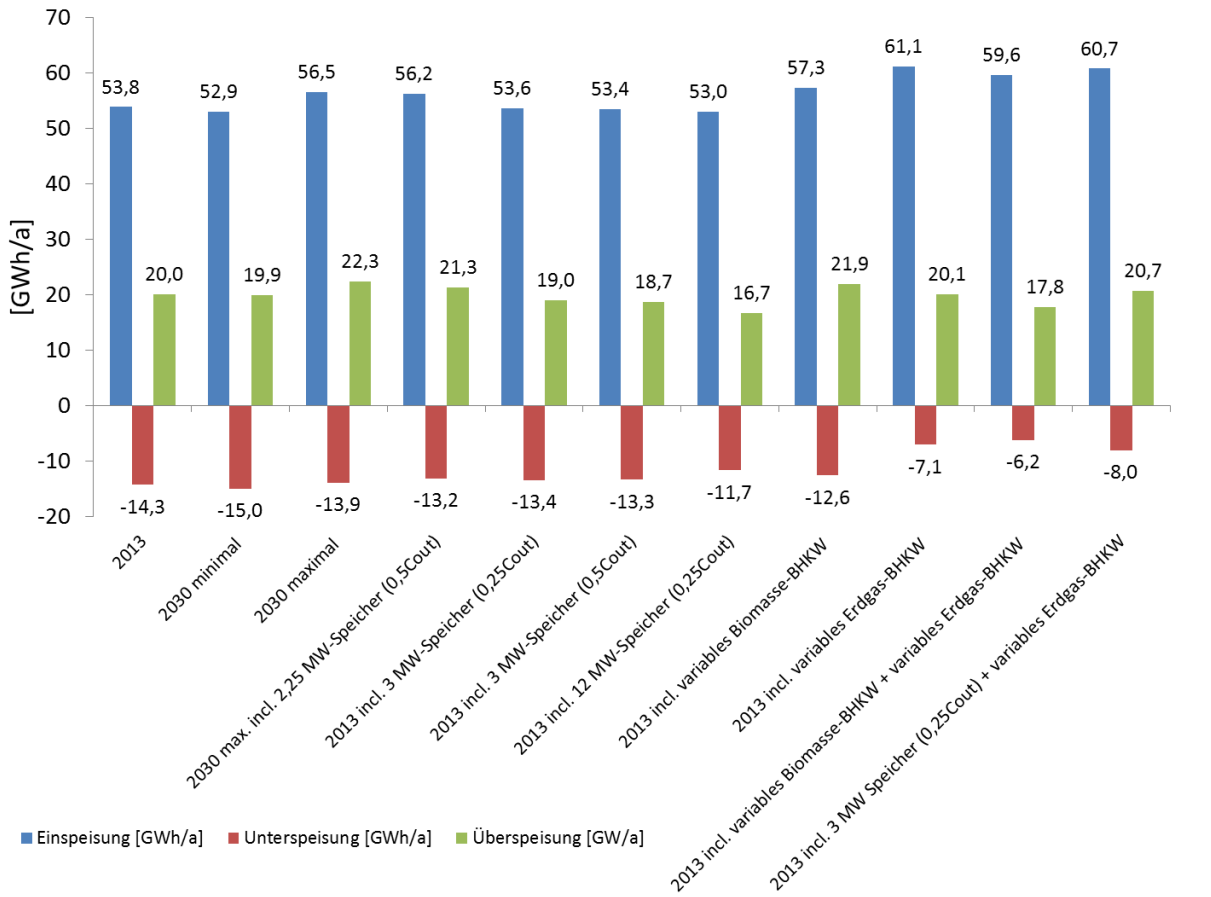


Abbildung 6.44: Darstellung der modellierten jährlichen Einspeisung aller Erzeuger des Elektrizitätsnetzes Wolfhagens sowie der jährlichen Unter- und Überspeisung unter Berücksichtigung verschiedener Optionen zur netzdienlichen Integration von Speichern und Stromerzeugern.

Die mit diesem nach heutigen Maßstäben sehr großen Batteriespeicher erzielbaren Effekte werden aber von den ebenfalls modellierten, ausschließlich zur Reduktion der Residuallast betriebenen BHKW trotz insgesamt geringerer zur Verfügung stehender Leistung noch übertroffen: Der netzdienliche Betrieb der lokalen Biomasse-BHKW mit einer Gesamtleistung von 0,8 MW übertrifft schon die Wirkung des 3 MW-Speichers. Die Integration eines unter der gleichen Zielstellung betriebenen Erdgas-BHKW mit einer Gesamtleistung von 1,76 MW übertrifft selbst den mithilfe des 12 MW-Speichers erzielten Eigenversorgungsgrad. Lediglich die Überspeisung ist bei den beiden letztgenannten BHKW-Varianten höher als bei der Verwendung von Speichern. Die Kombination von Biomasse und Erdgas-BHKWs ermöglicht gegenüber dem alleinigen netzdienlichen Betrieb des Erdgas-BHKW noch einmal eine leichte Verringerung der Lasten.

Neben der alleinigen Verwendung von Speichern oder variablen Erzeugern wurde auch die Kombination eines 3 MW-Speichers mit dem Erdgas-BHKW in der Modellierung getestet. Das Ergebnis zeigt, dass diese Kombination dem alleinigen Betrieb des Erdgas-BHKW unter den gewählten Bedingungen leicht unterlegen ist.

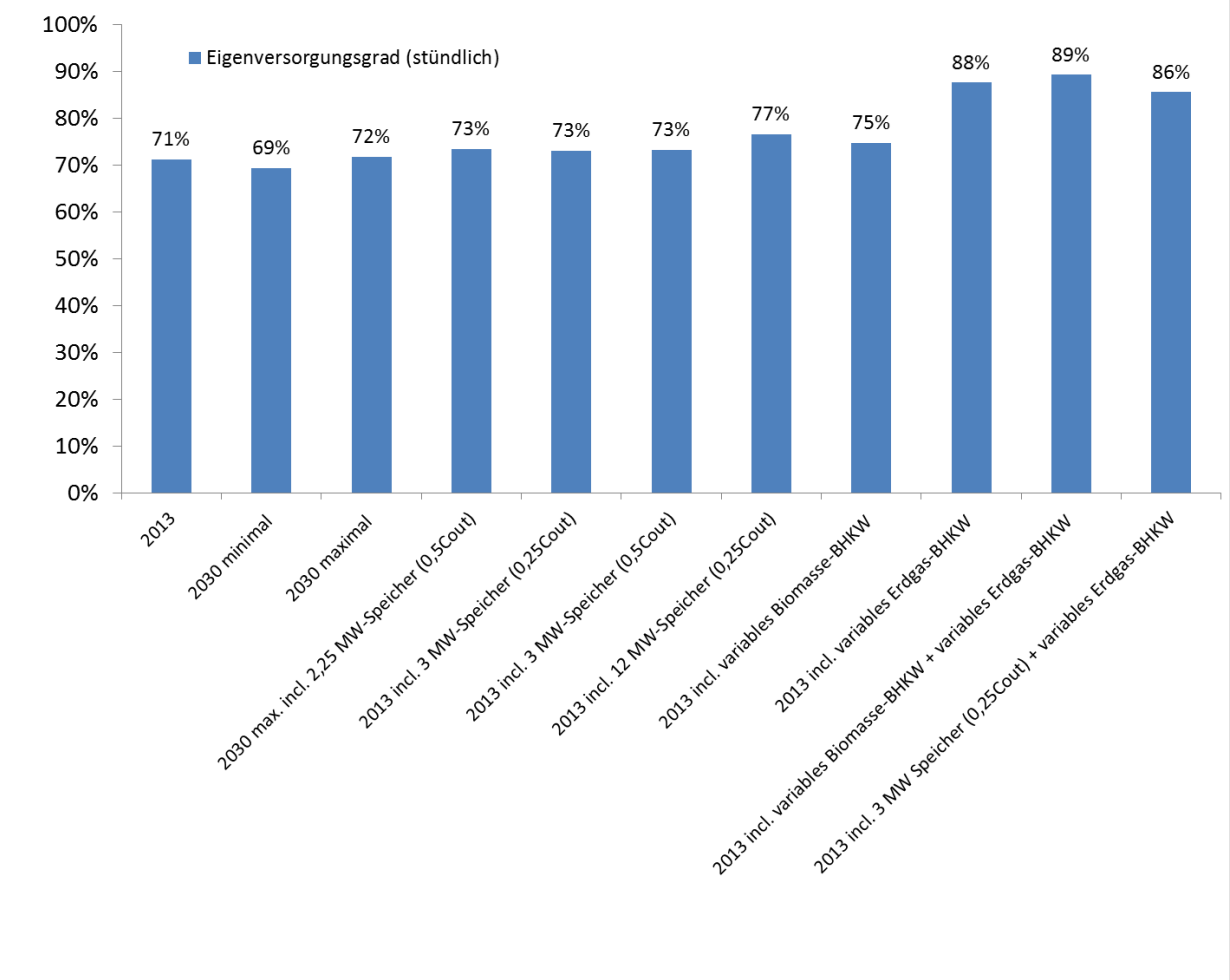


Abbildung 6.45: Darstellung des modellierten jährlichen zeitgleichen Eigenversorgungsgrades der Elektrizitätsversorgung Wolfhagens unter Berücksichtigung verschiedener Optionen zur netzdienlichen Integration von Speichern und Stromerzeugern.

Die Modellierungsergebnisse deuten insgesamt darauf hin, dass die Szenarien für 2030 nicht zu einer Verringerung der Residuallast im lokalen Stromnetz von Wolfhagen führen werden. Speicher scheinen erst in einem für die lokalen Verhältnisse noch unüblichen Kapazitätsbereich wirksam zu werden. Demgegenüber wurden mit der Modellierung von ausschließlich zur Verringerung der Residuallast betriebenen BHKWs die besten Ergebnisse erzielt. Der Betrieb eines BHKW auf Basis fossiler Rohstoffe (Erdgas) ist allerdings nicht klimaverträglich und führt global betrachtet zur Erhöhung der Vulnerabilität.

6.3.8 Wertschöpfungsanalyse

6.3.8.1 Status quo 2013

Eingangsdaten und Modellparameter

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die im Stadtgebiet Wolfhagen installierten EE-Anlagen. Die **Angaben zu Bestand und Zubau** sind – zusammen mit den Annahmen zur regionalen Ansässigkeit der Akteure – Grundlage für die Berechnung der Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen. Ein Blick auf die installierte

Leistung der EE-Technologien macht deutlich, dass in Wolfhagen der Windenergie und der Photovoltaik die größte Bedeutung zukommt. Zu einigen Technologien (holzbefeuerte Zentralheizungsanlagen und Holzheizwerke) konnten keine Daten zu Bestand und Zubau ermittelt werden. Dementsprechend können für diese Technologien auch keine Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte ausgewiesen werden. Zudem konnten die Effekte durch den Betrieb des Klärgas-BHKW in der Kommune nicht mit ausgewiesen werden, da die Energieerzeugung aus Klärgas im WeBEE-Modell derzeit noch nicht abgebildet ist.

Tabelle 6.51 Bestand und Zubau an EE-Anlagen in Wolfhagen im Jahr 2013. Der Bestand im Jahr 2013 ergibt sich aus dem Bestand zum Jahresende 2012 zzgl. der Hälfte des Zubaus im Jahr 2013. (Quellen: Erhebung des Fachgebiets Technikgestaltung, Universität Bremen 2015.)

	Bestand 2013		**Zubau 2013**	
	Anzahl	[kW_{el}]	Anzahl	[kW_{el}]
Wind Onshore	11	8.000	0	0
Photovoltaik	534	19.182	37	443
davon PV Dachanlagen	531	7.207	37	443
davon PV Freiflächenanlagen	3	11.975	0	0
Biogas	2	795	1	530
Holzvergaser	2	300	0	0
	Anzahl	[kW_{th}]	Anzahl	[kW_{th}]
Wärmepumpen	2	26	0	0
Zentralheizungsanlagen holzbefeuert	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Holzheizwerke	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

	Bestand 2013		**Zubau 2013**	
	Anzahl	[m^2]	Anzahl	[m^2]
Solarthermie	414	3.551	12	123
	Anzahl	[Trm]	Anzahl	[Trm]
EE-Wärmenetz	2	2.050	0	0
Mikrogasleitungen	1	1.200	0	0

Wie in Kapitel 5.4.3 beschrieben, wurden die Annahmen bezüglich der **lokalen Ansässigkeit von Unternehmen, BetreiberInnen und InvestorInnen** entlang der EE-Wertschöpfungsketten in Wolfhagen mittels einer Befragung der EE-AnlagenbetreiberInnen und weiterer lokaler ExpertInnen ermittelt. In einigen Fällen mussten zudem Annahmen getroffen werden. Letzteres geschah auf Grundlage von Erfahrungen aus früheren Regionalstudien und unter Berücksichtigung der regionalen Besonderheiten in der Stadt Wolfhagen.

In Wolfhagen wurde 2014 der Windpark „Rödeser Berg“ in Betrieb genommen. Dieser ist ein wesentlicher Meilenstein auf dem Weg der Stadt zu einer 100 %-ig erneuerbaren Stromversorgung. Da das Basisjahr für die Berechnungen im Rahmen des Projektes auf das Jahr 2013 festgesetzt wurde, sind die Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch den 2014 in Betrieb genommenen Windpark in den Ergebnissen für den Status quo noch nicht berücksichtigt. Da der Windpark jedoch ein zentrales Projekt der SWW ist und einen wichtigen Beitrag zur lokalen EE-Erzeugung leistet, wurde ergänzend eine vereinfachte Rechnung für das Jahr 2014 durchgeführt. Diese soll veranschaulichen, welche Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch den Windpark „Rödeser Berg“ zusätzlich zu erwarten sind. Die Berechnungen wurden dabei mit dem für 2013 angepassten WeBEE-Modell durchgeführt, und der Bestand und Zubau der anderen EE-Anlagen wurde nicht für das Betrachtungsjahr 2014 angepasst. In der nachfolgenden Tabelle 6.52 ist der Bestand und Zubau an Windenergieanlagen für 2014 aufgeführt, welcher den ergänzenden Berechnungen zugrunde liegt. Da es sich bei der Berechnung für 2014 um eine vereinfachte Berechnung handelt, mit der aufgezeigt werden soll, in welcher Größenordnung zusätzliche Effekte durch den in 2014 zugebauten Windpark der Stadtwerke zu erwarten sind, wurde in diesem Fall - abweichend von der oben beschriebenen Vorgehensweise - für den Bestand 2014 nicht nur die Hälfte des Zubaus, sondern die gesamte in 2014 neu installierte Anlagenleistung bei den Berechnungen berücksichtigt.

Tabelle 6.52: Bestand und Zubau an Windenergieanlagen in Wolfhagen im Jahr 2014. Der Bestand im Jahr 2014 ergibt sich aus dem Bestand zum Jahresende 2013 zzgl. der in 2014 zugebauten Anlagen. (Quellen: Erhebung des Fachgebiets Technikgestaltung, Universität Bremen 2015.)

	Bestand 2014		**Zubau 2014**	
	Anzahl	[kW_{el}]	Anzahl	[kW_{el}]
Wind Onshore	15	20.000	4	12.000

Ergebnisse

Mit dem in Kapitel 6.3.6 dargestellten Bestand und Zubau an lokalen EE-Anlagen und den Annahmen zur regionalen Ansässigkeit von Akteuren entlang der Wertschöpfungsketten wurde für die Stadt Wolfhagen im Jahr 2013 **eine regionale Wertschöpfung durch erneuerbare Energien von insgesamt 1,6 Mio. Euro** ermittelt. Zudem waren 2013 knapp 5 **Vollzeitarbeitsplätze**

mit der Planung und Installation sowie dem Betrieb von EE-Anlagen in Wolfhagen verbunden. Rund 74% der Wertschöpfung auf regionaler Ebene sind Gewinne der Unternehmen nach Steuern, ca. 11% entfallen auf Nettoeinkommen der Beschäftigten und 16% auf Steuern, welche dem kommunalen Haushalt zufließen. Mit 1,4 Mio. Euro und knapp 4 Vollzeitarbeitsplätzen entfällt ein Großteil der Effekte auf die im Stadtgebiet installierten Photovoltaikanlagen. Die regionale Wertschöpfung durch Windenergie ist dagegen vergleichsweise gering (6% der regionalen Wertschöpfung und 7% der Vollzeitäquivalente). Dies liegt u.a. darin begründet, dass der Windpark „Rödeser Berg“ bei den Berechnungen noch nicht berücksichtigt wurde, da dieser erst im Jahr 2014 in Betrieb genommen wurde und demnach für das Betrachtungsjahr 2013 noch keine Bedeutung hat. Zudem ist der Anteil regional ansässiger Betreibergesellschaften und EigenkapitalgeberInnen bei den 2013 bereits installierten Windparks in Wolfhagen relativ gering, so dass ein Großteil der Gewinne sowie die darauf zu zahlenden Steuern aus Wolfhagen abfließen. Mit der Annahme einer 100%-igen regionalen Ansässigkeit der BetreiberInnen und InvestorInnen bei den Windenergieanlagen, würde sich eine um den Faktor 4 höhere regionale Wertschöpfung in diesem Bereich ergeben, wie der Vergleich mit den Ergebnissen des Szenario 1 zeigt (siehe Tabelle 6.56:.). Die erneuerbare Wärmebereitstellung spielt mit Blick auf die regionale Wertschöpfung nur eine untergeordnete Rolle. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass für den Bestand an Heizkesseln, welche mit biogenen Brennstoffen betrieben werden, keine Daten zur Verfügung standen und für diese Anlagen demnach auch keine regionalökonomischen Effekte berechnet werden konnten, so dass die Effekte im Bereich Wärme wohl unterschätzt werden. Die nachfolgenden Tabelle 6.53 und Abbildung 6.46 zeigen die Ergebnisse differenziert nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen.

Tabelle 6.53: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen (Quelle: Eigene Berechnungen des IÖW.)

2013	Gewinne nach Steuern	Nettoeinkommen durch Beschäftigung	Steuern an die Kommunen	**WS kommunale Ebene**	Vollzeitbeschäftigte
	[Tsd. Euro]				[VZÄ]
Photovoltaik	1.072,7	143,2	185,5	1.401,4	3,8
Windenergie	38,0	11,4	48,1	97,5	0,3
Bioenergie (Strom)	60,8	13,4	14,8	89,0	0,4
Summe Strom	**1.171,6**	**167,9**	**248,5**	**1.588,0**	**4,6**
Solarthermie	1,7	3,7	0,5	5,9	0,1
Wärmepumpen	0,1	0,1	0,0	0,2	0,0
Nahwärmenetze	20,3	1,1	3,8	25,2	0,0
Summe Wärme	**22,1**	**4,9**	**4,3**	**31,3**	**0,1**
Summe	**1.193,7**	**172,9**	**252,7**	**1.619,3**	**4,7**

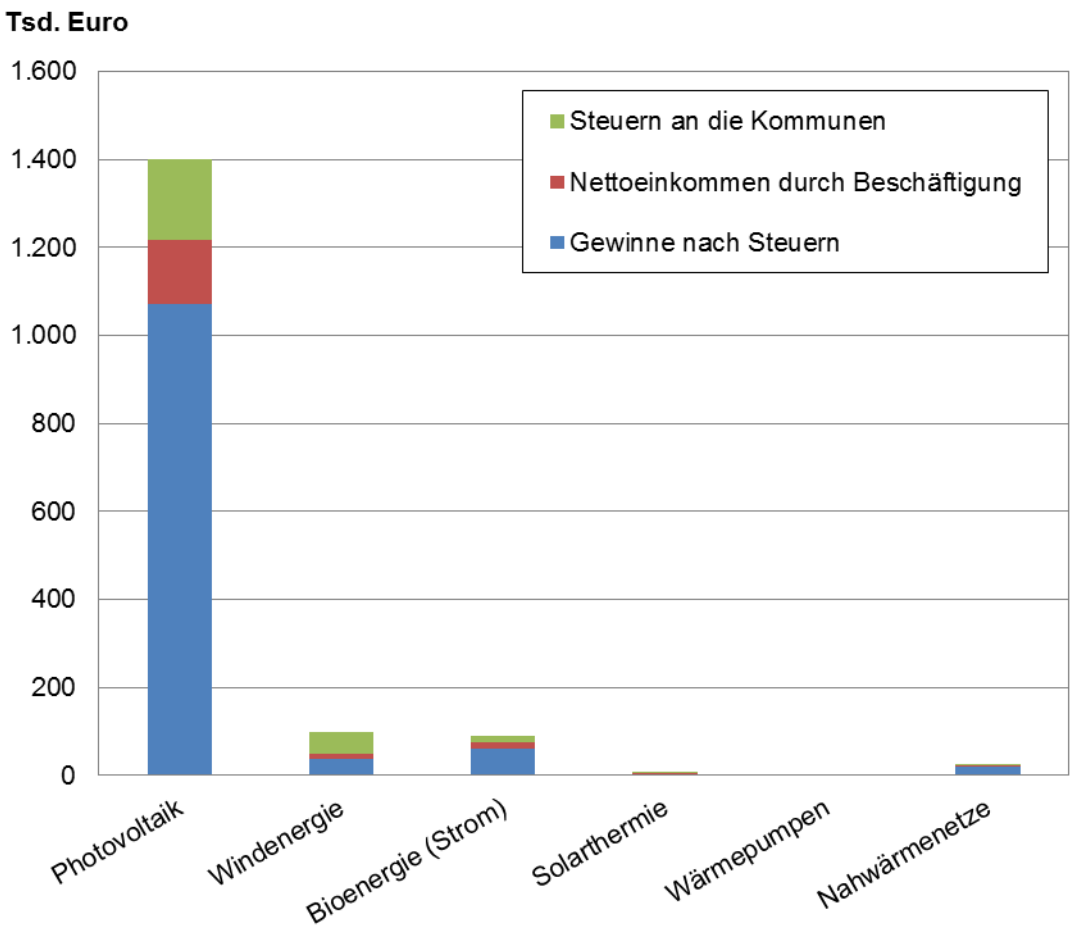


Abbildung 6.46: Regionale Wertschöpfungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen (Quelle: Eigene Darstellung des IÖW).

In Tabelle 6.54 und Abbildung 6.47 sind die Ergebnisse für Wolfhagen differenziert nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen dargestellt. Es wird deutlich, dass nahezu 100% der regionalen Wertschöpfung auf den Betrieb der EE-Anlagen zurückzuführen sind, die Effekte durch die Planung und Installation von Anlagen sind vernachlässigbar gering. Lediglich mit Blick auf die Beschäftigung kommt dieser Wertschöpfungsstufe mehr Bedeutung zu: Mit der Planung und Installation von EE-Anlagen waren im Jahr 2013 rund 0,3 Vollzeitarbeitsplätze verbunden, der Anlagenbetrieb und die Wartung der Anlagen mit 4,4 Vollzeitbeschäftigten. Ein Leistungszubau fand 2013 vor allem bei den Technologien Photovoltaik und Biogas statt. Die damit verbundenen Arbeiten wurden bei den PV-Anlagen jedoch nur zum Teil und bei Biogas gar nicht durch lokal ansässige Unternehmen abgedeckt. Bei den betriebsbezogenen Stufen entfällt ein Großteil der Effekte auf die Gewinne der AnlagenbetreiberInnen zzgl. der kommunalen Steuern. Betreibergewinne werden nur bei gewerblich betriebenen Anlagen, d.h. bei einem Verkauf von Strom und/oder Wärme, generiert. Bei einer reinen Eigennutzung (bspw. bei Wärmepumpen oder holzbefeuerten Kleinfeuerungsanlagen) fallen deswegen grundsätzlich keine Betreibergewinne an. Entsprechend dem hohen Anteil an den Gesamteffekten zeigt sich auch auf der Stufe der Betreibergewinne die hohe Bedeutung der Photovoltaik (siehe Abbildung 6.47).

Tabelle 6.54: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen (Quelle: eigene Berechnungen des IÖW)

2013	Planung & Installation	Anlagenbetrieb & Wartung	Betreibergewinne	**WS kommunale Ebene**
	[Tsd. Euro]			
Photovoltaik	12,4	197,9	1.191,1	1.401,4
Windenergie	0,0	52,3	45,2	97,5
Bioenergie (Strom)	0,0	22,2	66,8	89,0
Summe Strom	**12,4**	**272,4**	**1.303,1**	**1.588,0**
Solarthermie	2,0	3,9	0,0	5,9
Wärmepumpen	0,0	0,2	0,0	0,2
Nahwärmenetze	0,0	1,8	23,4	25,2
Summe Wärme	**2,0**	**5,9**	**23,4**	**31,3**
Summe	**14,4**	**278,4**	**1.326,5**	**1.619,3**
	[VZÄ]			
Vollzeitbeschäftigte	**0,3**	**4,4**	**-**	**4,7**

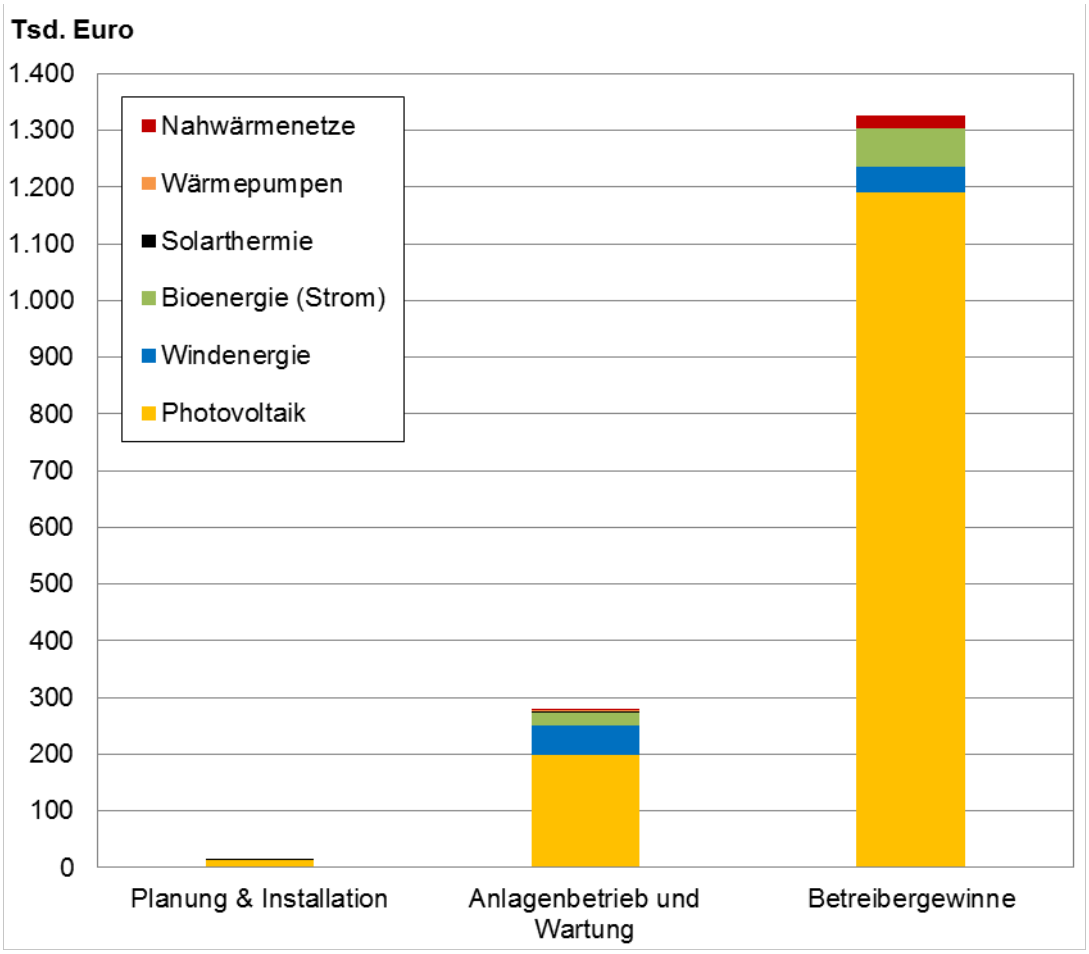


Abbildung 6.47: Regionale Wertschöpfungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen (Quelle: eigene Darstellung des IÖW.)

Die nachfolgenden Tabellen und Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Berechnungen für Wolfhagen und die zwei hypothetischen Fälle Szenario 1 und Szenario 2 im Betrachtungsjahr 2013. Wie in Kapitel 5.4.3 erläutert, wurde im Szenario 1 angenommen, dass die Betreibergesellschaften sowie die EigenkapitalgeberInnen zu 100% in der Stadt ansässig sind. Die Prozentsätze für die anderen Wertschöpfungsschritte wurden unverändert beibehalten. Im Szenario 2 wurde für alle betrachteten Wertschöpfungsschritte eine 100%-ige Ortsansässigkeit der Akteure unterstellt (maximal mögliche Wertschöpfung). Im Szenario 1 ergibt sich in Summe eine regionale Wertschöpfung von 2,2 Mio. Euro, was einer Zunahme der Effekte um knapp 40% entspricht (siehe Tabelle 6.55) und insbesondere auf die Steigerung der Wertschöpfungseffekte bei der Windenergie und der Photovoltaik zurückzuführen ist. Die Zahl der Vollzeitarbeitsplätze liegt im Szenario 1 rund 15% höher: in Summe ergeben sich 5,4 Vollzeitäquivalente. Da in Szenario 1 lediglich die Annahmen zum Sitz der Betreibergesellschaften und der EigenkapitalgeberInnen geändert wurden, zeigen sich die Auswirkungen entsprechend vor allem bei den Betreibergewinnen zzgl. den darauf gezahlten Steuern (siehe Tabelle 6.56).

Tabelle 6.55: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen – Szenario 1 (Quelle: eigene Berechnungen des IÖW.)

2013 Szenario 1	Gewinne nach Steuern	Nettoeinkommen durch Beschäftigung	Steuern an die Kommunen	**WS kommunale Ebene**	Vollzeitbeschäftigte
	[Tsd. Euro]				[VZÄ]
Photovoltaik	1.283,5	144,8	189,6	1.617,9	3,8
Windenergie	298,8	37,0	89,1	425,0	1,0
Bioenergie (Strom)	120,4	13,4	15,2	148,9	0,4
Summe Strom	**1.702,7**	**195,2**	**293,9**	**2.191,8**	**5,3**
Solarthermie	1,7	3,7	0,5	5,9	0,1
Wärmepumpen	0,1	0,1	0,0	0,2	0,0
Nahwärmenetze	20,3	1,1	3,8	25,2	0,0
Summe Wärme	**22,1**	**4,9**	**4,3**	**31,3**	**0,1**
Summe	**1.724,8**	**200,2**	**298,1**	**2.223,1**	**5,4**

Tabelle 6.56: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen – Szenario 1 (Quelle: Eigene Berechnungen des IÖW.)

2013 Szenario 1	Planung & Installation	Anlagenbetrieb & Wartung	Betreibergewinne	**WS kommunale Ebene**
	[Tsd. Euro]			
Photovoltaik	12,4	199,7	1.405,8	1.617,9
Windenergie	0,0	79,3	345,6	425,0
Bioenergie (Strom)	0,0	22,2	126,7	148,9
Summe Strom	**12,4**	**301,2**	**1.878,2**	**2.191,8**
Solarthermie	2,0	3,9	0,0	5,9
Wärmepumpen	0,0	0,2	0,0	0,2
Nahwärmenetze	0,0	1,8	23,4	25,2
Summe Wärme	**2,0**	**5,9**	**23,4**	**31,3**
Summe	**14,4**	**307,1**	**1.901,6**	**2.223,1**
	[VZÄ]			
Vollzeitbeschäftigte	**0,3**	**5,2**	**-**	**5,4**

Welche Wertschöpfung und Beschäftigung zu erwarten wäre, wenn alle Unternehmen und weiteren Akteure entlang der Wertschöpfungskette zu 100% in der Stadt verortet wären, zeigen die Ergebnisse des Szenarios 2. In Summe würden sich dann im Zusammenhang mit der Planung und Installation sowie dem Betrieb der EE-Anlagen in Wolfhagen eine regionale Wertschöpfung in Höhe von rund 2,3 Mio. Euro sowie rund 7 Vollzeitarbeitsplätze im Jahr 2013 ergeben (siehe Tabelle 6.57). Im Unterschied zu Szenario 1 wirken sich die Annahmen in Szenario 2 auf die Effekte in allen Wertschöpfungsstufen aus. Auf der Stufe Planung und Installation zeigt sich gegenüber dem Status quo sowohl eine Verdopplung der Wertschöpfungs- als auch Beschäftigungseffekte (siehe Tabelle 6.58). Die regionale Wertschöpfung und Beschäftigung im Zusammenhang mit dem Anlagenbetrieb und der Wartung erhöht sich um den Faktor 1,5. Auf der Stufe der Betreibergewinne zeigt sich die größte Steigerung der regionalen Wertschöpfung gegenüber dem Status quo (+140%).

Die beiden Abbildung 6.48 und Abbildung 6.49 zeigen die Ergebnisse zu Wertschöpfung und Beschäftigung in Wolfhagen für den Status quo im Jahr 2013 sowie die Szenarien 1 und 2 im Vergleich.

Tabelle 6.57: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen – Szenario 2 (maximale Wertschöpfung) (Quelle: Eigene Berechnungen des IÖW)

2013 Szenario 2	Gewinne nach Steuern	Nettoeinkommen durch Beschäftigung	Steuern an die Kommunen	**WS kommunale Ebene**	Vollzeitbeschäftigte
	[Tsd. Euro]				[VZÄ]
Photovoltaik	1.316,8	176,7	195,4	1.688,9	4,7
Windenergie	310,9	53,0	92,0	455,9	1,5
Bioenergie (Strom)	124,3	21,0	16,2	161,5	0,7
Summe Strom	**1.752,0**	**250,7**	**303,6**	**2.306,3**	**6,9**
Solarthermie	3,8	7,9	1,0	12,7	0,2
Wärmepumpen	0,1	0,1	0,0	0,2	0,0
Nahwärmenetze	20,8	1,3	3,9	25,9	0,0
Summe Wärme	**24,6**	**9,3**	**4,9**	**38,9**	**0,3**
Summe	**1.776,6**	**260,1**	**308,6**	**2.345,2**	**7,1**

Tabelle 6.58: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen im Jahr 2013 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen – Szenario 2 (maximale Wertschöpfung) (Quelle: Eigene Berechnungen des IÖW.)

2013 Szenario 2	Planung & Installation	Anlagenbetrieb & Wartung	Betreibergewinne	**WS kommunale Ebene**
	[Tsd. Euro]			
Photovoltaik	24,8	258,2	1.405,8	1.688,9
Windenergie	0,0	110,3	345,6	455,9
Bioenergie (Strom)	0,0	34,8	126,7	161,5
Summe Strom	**24,8**	**403,3**	**1.878,2**	**2.306,3**
Solarthermie	4,1	8,7	0,0	12,7
Wärmepumpen	0,0	0,2	0,0	0,2
Nahwärmenetze	0,0	2,6	23,4	25,9
Summe Wärme	**4,1**	**11,5**	**23,4**	**38,9**
Summe	**28,9**	**414,8**	**1.901,6**	**2.345,2**
	[VZÄ]			
Vollzeitbeschäftigte	**0,6**	**6,6**	**-**	**7,1**

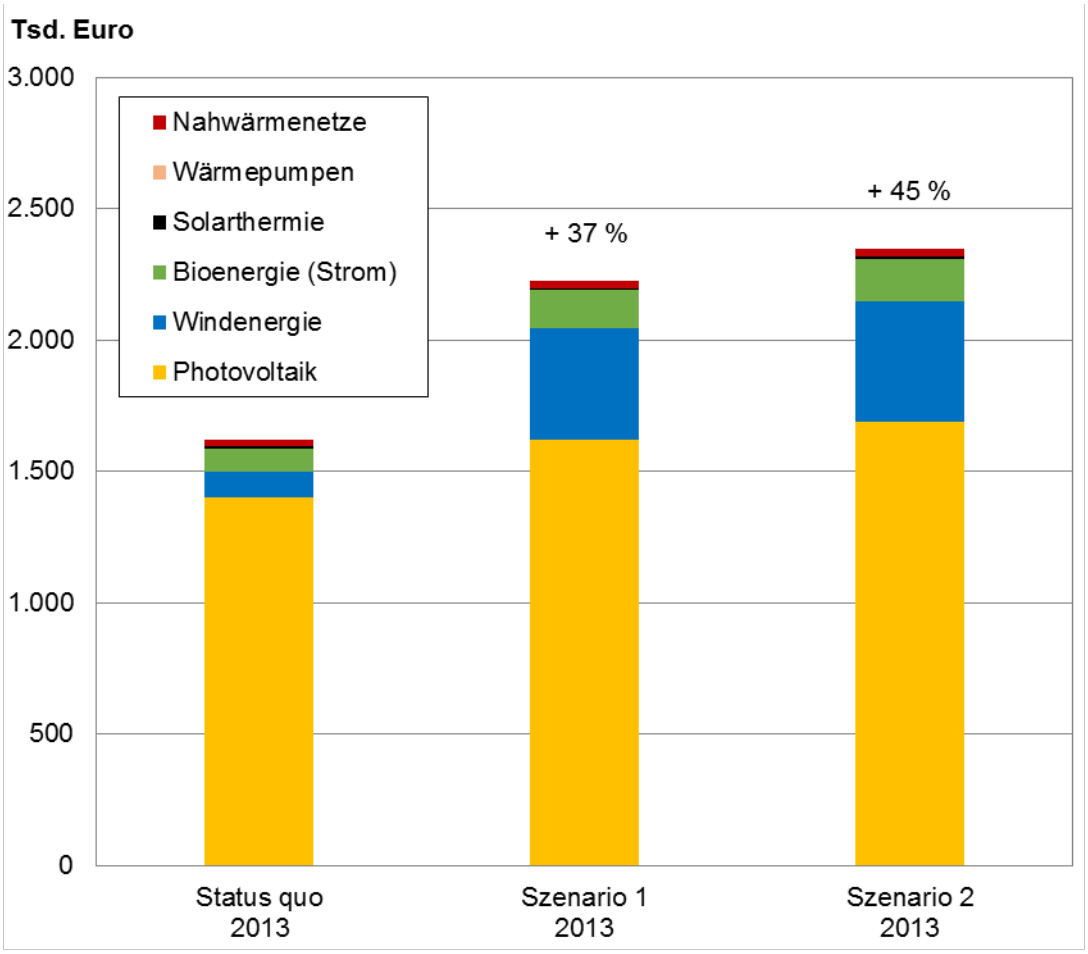


Abbildung 6.48: Regionale Wertschöpfungseffekte durch erneuerbare Energien nach Technologiebereichen in Wolfhagen im Jahr 2013 (Quelle: eigene Darstellung des IÖW.)

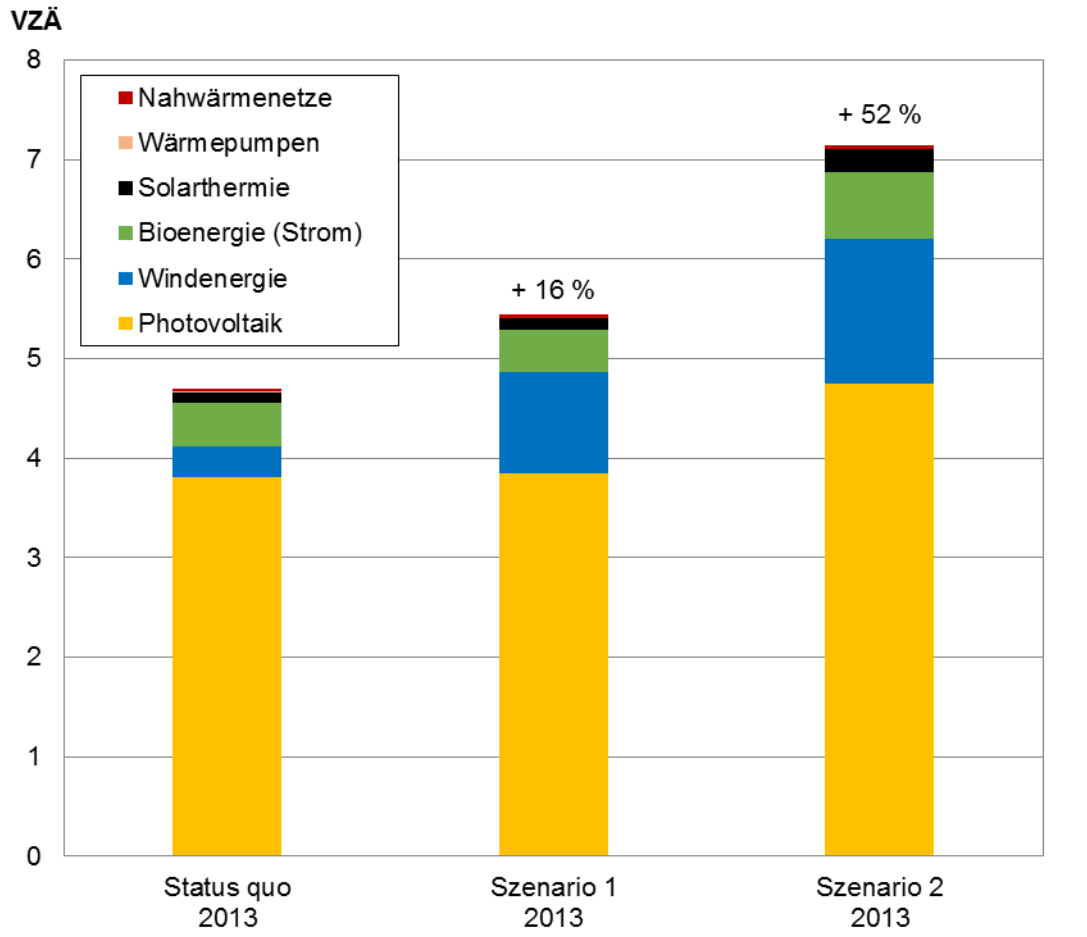


Abbildung 6.49: Beschäftigungseffekte (Vollzeitäquivalente) durch erneuerbare Energien nach Technologiebereichen in Wolfhagen im Jahr 2013 für den Status quo und die Szenarien 1 und 2 (Quelle: Eigene Darstellung des IÖW)

Mit der zusätzlichen Berücksichtigung des Windparks „Rödeser Berg“ erhöht sich die regionale Wertschöpfung um rund 0,4 Mio. Euro auf 2,0 Mio. Euro und die damit verbundenen Vollzeitarbeitsplätze um rund 6 VZÄ auf knapp 11 VZÄ. Mit Blick auf die Wertschöpfungsbestandteile zeigt sich der größte zusätzliche Effekt bei den Nettoeinkommen der Beschäftigten, was auf die vergleichsweise beschäftigungsintensiven, einmaligen Arbeiten bei der Planung und Installation der Windenergieanlagen zurückzuführen ist (siehe Tabelle 6.59). Entsprechend zeigt sich auch bei der Betrachtung der Effekte nach Wertschöpfungsstufen die größte Steigerung der Effekte durch Windenergie auf der Stufe Planung und Installation (siehe Tabelle 6.60).

Tabelle 6.59: Vereinfachte Abschätzung der regionalen Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte in Wolfhagen nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen unter Berücksichtigung des Windparks „Rödeser Berg“ (Quelle: Eigene Berechnungen des IÖW)

2013 inkl. WKA 2014	Gewinne nach Steuern	Nettoeinkommen durch Beschäftigung	Steuern an die Kommunen	**WS kommunale Ebene**	Vollzeitbeschäftigte
	[Tsd. Euro]				[VZÄ]
Photovoltaik	1.072,7	143,2	185,5	1.401,4	3,8
Windenergie	183,7	238,2	86,7	508,6	6,5
Bioenergie (Strom)	60,8	13,4	14,8	89,0	0,4
Summe Strom	**1.317,3**	**394,8**	**287,0**	**1.999,1**	**10,7**
Solarthermie	1,7	3,7	0,5	5,9	0,1
Wärmepumpen	0,1	0,1	0,0	0,2	0,0
Nahwärmenetze	20,3	1,1	3,8	25,2	0,0
Summe Wärme	**22,1**	**4,9**	**4,3**	**31,3**	**0,1**
Summe	**1.339,4**	**399,8**	**291,3**	**2.030,5**	**10,8**

Tabelle 6.60: Vereinfachte Abschätzung der regionalen Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte in Wolfhagen im Jahr 2014 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen unter Berücksichtigung des Windparks „Rödeser Berg“ (Quelle: Eigene Berechnungen des IÖW)

2013 inkl. WKA 2014	Planung & Installation	Anlagenbetrieb & Wartung	Betreiber-gewinne	**WS kommunale Ebene**
	[Tsd. Euro]			
Photovoltaik	12,4	197,9	1.191,1	1.401,4
Windenergie	223,0	120,9	164,7	508,6
Bioenergie (Strom)	0,0	22,2	66,8	89,0
Summe Strom	**235,4**	**341,1**	**1.422,6**	**1.999,1**
Solarthermie	2,0	3,9	0,0	5,9
Wärmepumpen	0,0	0,2	0,0	0,2
Nahwärmenetze	0,0	1,8	23,4	25,2
Summe Wärme	**2,0**	**5,9**	**23,4**	**31,3**
Summe	**237,4**	**347,0**	**1.446,0**	**2.030,5**
	[VZÄ]			
Vollzeitbeschäftigte	**4,9**	**6,0**	**-**	**10,8**

6.3.8.2 Zukunftsszenario 2030

Eingangsdaten und Modellparameter

In Tabelle 6.61 sind die Annahmen zu den in Wolfhagen im Zieljahr 2030 installierten EE-Anlagen dargestellt. Dabei ist wieder zu beachten, dass sich der in der Tabelle aufgeführte Bestand im Jahr 2030 aus dem Bestand zum Jahresende 2029 zzgl. der Hälfte des Zubaus im Jahr 2030 ergibt. Der Leistungszubau im Bereich Wind ist auf die Inbetriebnahme des Windparks „Rödeser Berg“ und das Repowering bestehender Anlagen zurückzuführen. Im Bereich Photovoltaik wird ein weiterer Ausbau bei den Dachanlagen angenommen. Potenzial für weitere PV-Freiflächenanlagen besteht derzeit nicht. Der Zubau an solarthermischen Anlagen bis 2030 orientiert sich an der Entwicklung der Wärmebereitstellung mittels Solarthermie im Leitszenario 2011 A des BMU (Nitsch, Pregger, Naegler, Heide, Tena, Trieb, Scholz, Nienhaus, Gerhardt, Sterner et al. 2012).

Die Annahmen zur **lokalen Ansässigkeit von Unternehmen, BetreiberInnen und InvestorInnen** entlang der EE-Wertschöpfungsketten im Zukunftsszenario für das Jahr 2030 basieren auf

einer Befragung zentraler AnlagenbetreiberInnen (Erhebung des Fachgebiets Technikgestaltung, Universität Bremen) sowie den Annahmen im Status quo für das Jahr 2013.

Tabelle 6.61: Bestand und Zubau an EE-Anlagen in Wolfhagen im Jahr 2013 und im Zukunftsszenario für das Jahr 2030. Der Bestand im Jahr 2013/2030 ergibt sich aus dem Bestand zum Jahresende 2012/2029 zzgl. der Hälfte des Zubaus im Jahr 2013/2030. (Quellen: Erhebung des Fachgebiets Technikgestaltung, Universität Bremen 2015.)

	Status quo		**Zukunftsszenario**	
	Bestand 2013	Zubau 2013	Bestand 2030	Zubau 2030
	[kW_{el}]	[kW_{el}]	[kW_{el}]	[kW_{el}]
Wind Onshore	8.000	0	28.198	0
Photovoltaik	19.182	443	24.137	287
davon PV Dachanlagen	7.207	443	12.162	287
davon PV Freiflächenanlagen	11.975	0	11.975	0
Biogas	795	530	1.060	0
Holzvergaser	300	0	300	0
	[kW_{th}]	[kW_{th}]	[kW_{th}]	[kW_{th}]
Wärmepumpen	26	0	971	57
Zentralheizungsanlagen holzbefeuert	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Holzheizwerke	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	[m^2]	[m^2]	[m^2]	[m^2]
Solarthermie	3.551	123	14.742	749
	Anzahl	[Trm]	Anzahl	[Trm]
EE-Wärmenetz	2.050	0	2.050	0
Mikrogasleitungen	1.200	0	1.200	0

Zentrales Ziel der SWW ist es, eine 100%-ige Versorgung mit erneuerbaren Energien im Strombereich nicht nur bilanziell zu erreichen, sondern mit einem möglichst hohen Eigenversorgungsgrad. Konkret wird angestrebt, den Eigenversorgungsgrad auf 90% zu erhöhen und gleichzeitig lokal eine Leistungsabdeckung von mindestens 50% der Netzlast sicherzustellen (Rühl 2015).

Hierbei stellt insbesondere die fluktuierende Einspeisung der EE-Technologien Wind und Photovoltaik eine Herausforderung dar. Demnach müssen Maßnahmen ergriffen werden, um vor Ort einen Ausgleich von Stromerzeugung und -entnahme zu erreichen. Mögliche Maßnahmen für einen lokalen Ausgleich der fluktuierenden Einspeisung der erneuerbaren Energien, welche in der Stadt Wolfhagen diskutiert werden, sind u.a.:

– **Spitzenlast-BHKW**

  Kurzläufer-BHKW auf Gasbasis als Ergänzung zu Windenergie und Photovoltaik d.h. Bereitstellung einer gesicherten Leistung durch das Spitzenlast-BHKW vor Ort und damit einhergehend Reduktion der Bestellleistung gegenüber dem Übertragungsnetzbetreiber.

– **Demand-Side-Management (DSM)**

  Flexibilisierung der Nachfrage in Haushalt, Industrie und Gewerbe durch ökonomische Anreize.

– **Power-To-Heat**

  Nutzung von Überschussstrom für den Betrieb von bivalenten Wärmepumpen, um eine Verbesserung des Lastverschiebepotenzials zu erreichen.

– **Batteriespeicher**

Neben den oben aufgeführten Maßnahmen vor Ort ist auch der **Ausgleich innerhalb der Stadtwerke Union Nordhessen (SUN)** ein möglicher Bestandteil des Maßnahmenbündels.

Eine Quantifizierung der Wertschöpfung und Beschäftigung mit dem WeBEE-Modell für das Zieljahr 2030 erfolgte für den im Maximalszenario angenommenen Ausbau der EE-Leistung bis 2030 wie in Tabelle 6.61 dargestellt. Ergänzend zu den Berechnungen für das Zukunftsszenario erfolgte eine qualitative Einschätzung der zu erwartenden Effekte ausgewählter Maßnahmen, mit denen ein lokaler Ausgleich der fluktuierenden Einspeisung der erneuerbaren Energien geschaffen werden soll. Die möglichen Auswirkungen auf die regionale Wertschöpfung und Beschäftigung sowie die wesentlichen Stellschrauben sind in Kapitel 5.4. dargestellt.

Ergebnisse

Wie in Kapitel 6.3.3 dargestellt, verfolgt die Stadt Wolfhagen das zentrale Ziel, den Eigenversorgungsgrad bei der Stromversorgung zu maximieren. Für die Zukunft wird ein weiterer, moderater Ausbau der EE-Leistung angestrebt, und für den Ausgleich von Stromerzeugung und -entnahme ist ein Bündel an Maßnahmen im Gespräch. Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse der Berechnungen für das Zieljahr 2030 wurden auf Grundlage der Annahmen für den Zubau an EE-Leistung im Maximalszenario (siehe Tabelle 6.61) im Stadtgebiet mit dem WeBEE-Modell abgeschätzt.

Durch den weiteren Zubau an EE-Leistung - insbesondere durch den Zubau von PV-Dachanlagen und das Repowering von Windenergieanlagen - könnte im Jahr 2030 **eine regionale Wertschöpfung** von insgesamt **knapp 2 Mio. Euro** und damit verbunden ein **Beschäftigungseffekt** von rund **7 Vollzeitäquivalenten** in der Stadt Wolfhagen erreicht werden. Gegenüber dem Jahr 2013 bedeutet dies bei der **regionalen Wertschöpfung eine Steigerung um 21 % und bei der Beschäftigung eine Zunahme um 50 %.**

Wie die Ergebnisse in

Tabelle 6.62 zeigen, ist die Zunahme der Effekte im Wesentlichen auf den Bereich Wind zurückzuführen. Hier wurde 2014 der Windpark Rödeser Berg in Betrieb genommen und für das Zukunftsszenario die Annahme getroffen, dass bis 2030 ein Repowering bestehender Windkraftanlagen stattfindet. Auch ist der Anteil lokal ansässiger Betreibergesellschaften und EigenkapitalgeberInnen im Zukunftsszenario bei Wind höher, so dass ein größerer Anteil der generierten Unternehmensgewinne und damit verbundenen kommunalen Steuern in der Stadt verbleibt. Im Bereich Photovoltaik zeigt sich im Vergleich zum Status quo ein Rückgang der regionalen Wertschöpfungseffekte. Rund 85% der PV-Anlagen im Segment kleiner Aufdachanlagen, die 2013 in Betrieb waren, wurden noch vor 2012 in Betrieb genommen. Den Berechnungen der Betreibergewinne lag demnach aufgrund der EEG-Vergütung eine vergleichsweise hohe Eigenkapitalrendite zugrunde. Bei den Berechnungen für das Zukunftsszenario wurde die Höhe der Eigenkapitalrendite angepasst, um den niedrigeren Renditeerwartungen bei kleinen Dachanlagen ab dem Jahr 2012 gerecht zu werden (siehe Kapitel 5.4.4). Dadurch sind die Gewinne der PV-AnlagenbetreiberInnen im Jahr 2030 geringer. Auch sind 2030 weniger Neuinstallationen zu erwarten, so dass die Wertschöpfung und Beschäftigung im Zusammenhang mit der Planung und Installation von Photovoltaikanlagen geringer ausfällt (siehe Tabelle 6.63: und Tabelle 6.64:.). Auch wenn Zuwächse bei den Effekten durch den Anlagenbetrieb und die Wartung zu verzeichnen sind, ist die regionale Wertschöpfung durch Photovoltaik in Folge dessen insgesamt geringer.

Tabelle 6.62: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen im Jahr 2013 und im Zukunftsszenario für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen (Quelle: Eigene Berechnungen des IÖW)

2030	**regionale Wertschöpfung**		**Beschäftigung**	
	Status quo (2013)	**Zukunfts-szenario 2030**	**Status quo (2013)**	**Zukunftsszenario 2030**
	[Tsd. Euro]		[VZÄ]	
Photovoltaik	1.401,4	1.376,4	3,8	4,0
Windenergie	97,5	445,0	0,3	2,2
Bioenergie (Strom)	89,0	94,6	0,4	0,4
Summe Strom	**1.588,0**	**1.916,1**	**4,6**	**6,6**
Solarthermie	5,9	15,3	0,1	0,3
Wärmepumpen	0,2	9,1	0,0	0,1
Nahwärmenetze	25,2	25,2	0,0	0,0
Summe Wärme	**31,3**	**49,6**	**0,1**	**0,5**
Summe	**1.619,3**	**1.965,6**	**4,7**	**7,1**

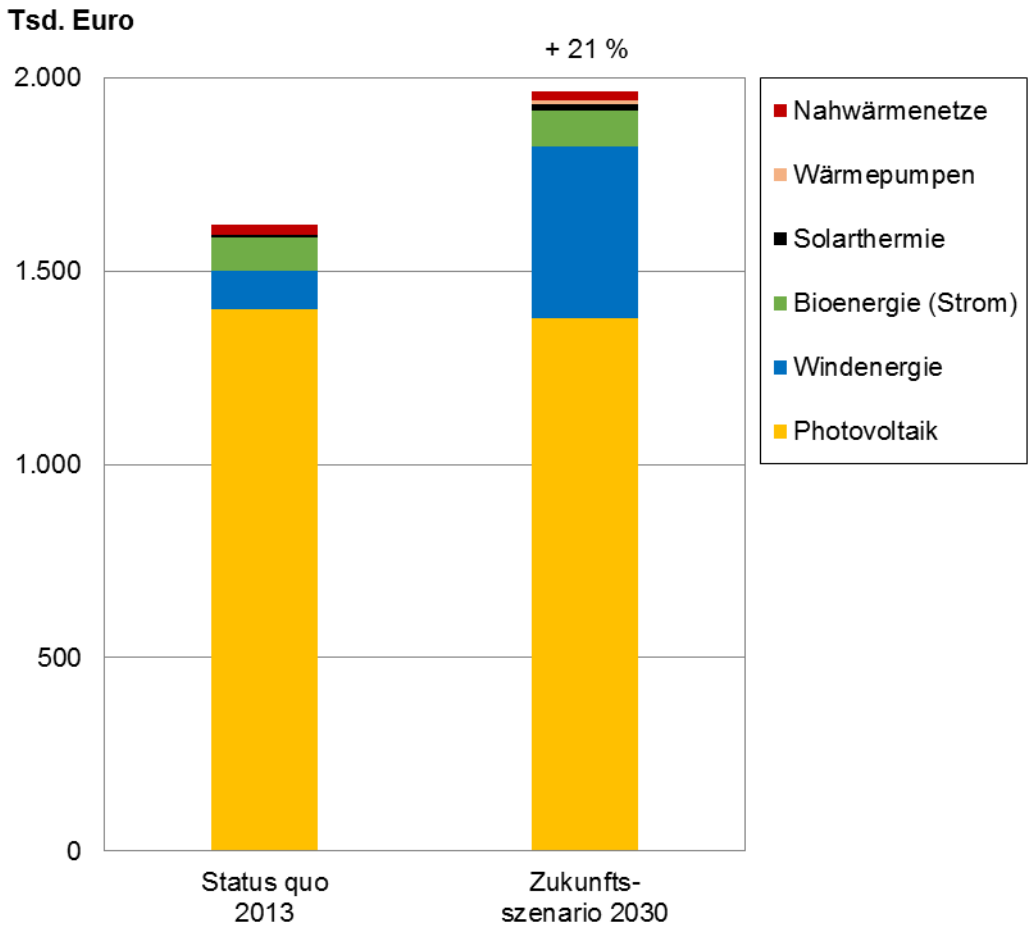


Abbildung 6.50: Regionale Wertschöpfungseffekte durch erneuerbare Energien in der Stadt Wolfhagen im Jahr 2013 und im Zukunftsszenario für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen (Quelle: Eigene Darstellung des IÖW)

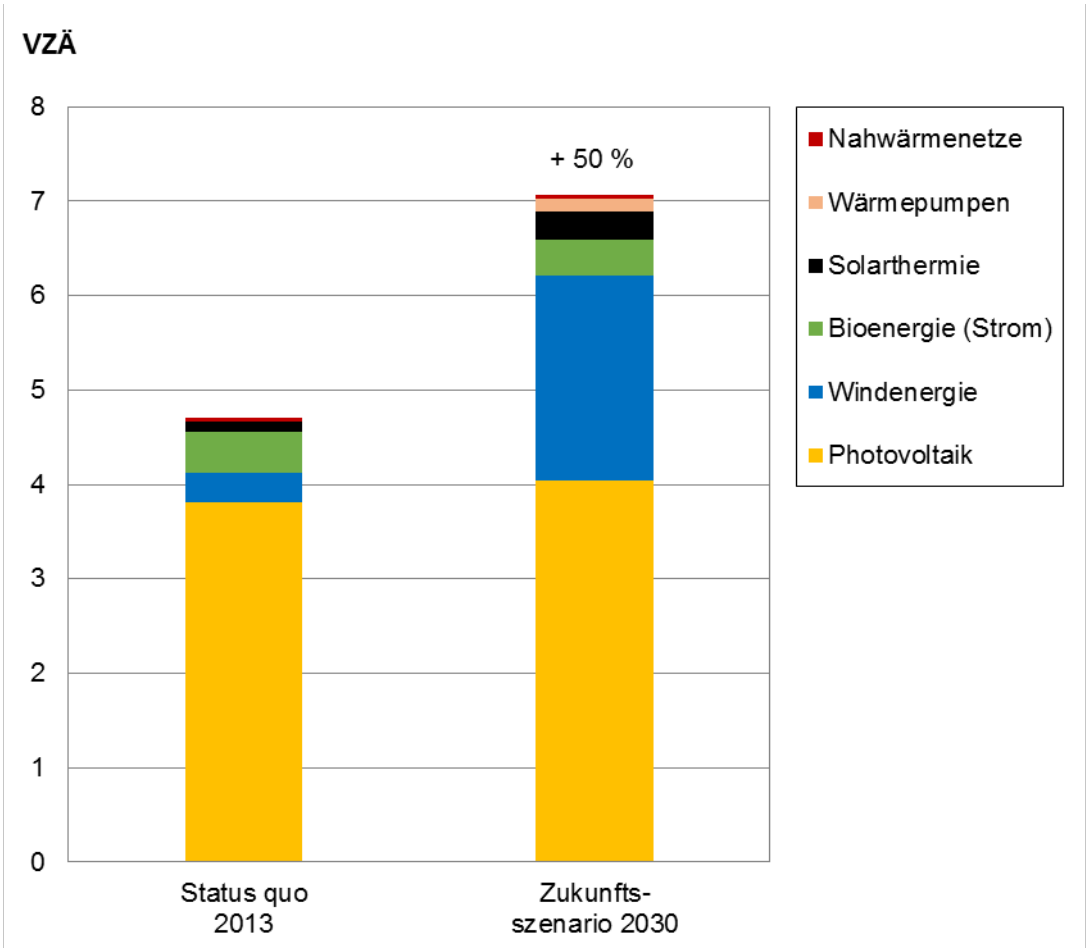


Abbildung 6.51: Beschäftigungseffekte (Vollzeitäquivalente) durch erneuerbare Energien in der Stadt Wolfhagen im Jahr 2013 und im Zukunftsszenario für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen (Quelle: Eigene Darstellung des IÖW)

Tabelle 6.63: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen im Zukunftsszenario für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen (Quelle: Eigene Berechnungen)

2030	Planung & Installation	Anlagenbetrieb & Wartung	Betreibergewinne	**WS kommunale Ebene**
	[Tsd. Euro]			
Photovoltaik	4,1	220,6	1.151,7	1.376,4
Windenergie	0,0	164,1	280,9	445,0
Bioenergie (Strom)	0,0	19,0	75,7	94,6
Summe Strom	**4,1**	**403,7**	**1.508,3**	**1.916,1**
Solarthermie	6,5	8,8	0,0	15,3
Wärmepumpen	0,6	8,6	0,0	9,1
Nahwärmenetze	0,0	1,8	23,4	25,2
Summe Wärme	**7,0**	**19,2**	**23,4**	**49,6**
Summe WS	**11,2**	**422,8**	**1.531,7**	**1.965,6**
	[VZÄ]			
Vollzeitbeschäftigte	**0,2**	**6,8**	**-**	**7,1**

In Tabelle 6.64 sind die Ergebnisse für das Zukunftsszenario 2030 differenziert nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen dargestellt. Die für 2030 ermittelte regionale Wertschöpfung verteilt sich wie folgt auf die Bestandteile: 65% sind Gewinne nach Steuern, 13% entfallen auf Nettoeinkommen der Beschäftigten und 22% auf Steuern an die Kommunen. Trotz der höheren regionalen Wertschöpfung im Bereich Wind, entfällt der größte Anteil der Wertschöpfung und Beschäftigung, wie auch 2013, auf die Photovoltaikanlagen im Stadtgebiet: 70% der regionalen Wertschöpfung und knapp 60% der Beschäftigten sind im Zukunftsszenario auf die Planung und Installation sowie den Betrieb von PV-Anlagen zurückzuführen.

Vergleicht man die für 2030 berechneten Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte im Bereich Wind mit der Abschätzung für das Jahr 2014 inkl. der Effekte des Windparks Rödeser Berg (siehe Kapitel 6.3.8.2) zeigt sich, dass hier die regionalen Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte im Jahr 2014 höher waren. Dies hängt damit zusammen, dass 2014 ein Großteil der berechneten Effekte auf die Arbeiten im Zusammenhang mit der Planung und Installation des Windparks entfiel. Hierbei handelt es sich um einmalige Effekte, die nur im Zusammenhang mit der Errichtung der Anlagen wirksam werden.

Tabelle 6.64: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen im Zukunftsszenario für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen (Quelle: Eigene Berechnungen des IÖW)

2030	Gewinne nach Steuern	Nettoeinkommen durch Beschäftigung	Steuern an die Kommunen	**WS kommunale Ebene**	Vollzeitbeschäftigte
	[Tsd. Euro]				[VZÄ]
Photovoltaik	1.037,2	151,8	187,5	1.376,4	4,0
Windenergie	139,5	80,2	225,3	445,0	2,2
Bioenergie (Strom)	67,2	11,3	16,2	94,6	0,4
Summe Strom	**1.243,8**	**243,3**	**429,0**	**1.916,1**	**6,6**
Solarthermie	4,4	9,6	1,2	15,3	0,3
Wärmepumpen	3,4	4,9	0,8	9,1	0,1
Nahwärmenetze	20,3	1,1	3,8	25,2	0,0
Summe Wärme	**28,2**	**15,6**	**5,8**	**49,6**	**0,5**
Summe	**1.272,0**	**258,9**	**434,8**	**1.965,6**	**7,1**

Auch für Wolfhagen wurden zwei zusätzliche Szenarien für das Bezugsjahr 2030 betrachtet: Szenario 1 zeigt auf, welche Effekte in dem Fall zu erwarten wären, dass die Betreibergesellschaften der EE-Anlagen und die Eigenkapitalgeber/innen zu 100% im Landkreis ansässig sind. Im Szenario 2 wurde für alle betrachteten Wertschöpfungsschritte eine 100%-ige regionale Ansässigkeit der beteiligten Unternehmen und Akteure angenommen und damit die maximal mögliche Wertschöpfung bei dem angenommenen Anlagenbestand und Zubau im Zukunftsszenario berechnet.

Im Szenario 1 summiert sich die **regionale Wertschöpfung** in der Stadt Wolfhagen auf **2,8 Mio. Euro** (+ 44%) und die damit verbundenen Beschäftigungseffekte auf **8 Vollzeitäquivalente** (+ 20%). Etwa zwei Drittel der Differenz zu den Ergebnissen im Zukunftsszenario 2030 sind auf zusätzliche Effekte im Bereich Wind zurückzuführen. Auch wenn bis 2030 von einer Zunahme lokal ansässiger Betreibergesellschaften sowie Eigenkapitalgeber/innen auszugehen ist, fließt auch im Zukunftsszenario immer noch ein Teil der Wertschöpfung an Betreiber/innen und Investor/innen mit Sitz außerhalb der Stadt Wolfhagen ab, wie der Vergleich der Ergebnisse mit den berechneten Effekten für das Szenario 1 zeigt (siehe Abbildung 6.52 und Abbildung 6.53 sowie Kapitel 6.3.8.2.1).

Im Unterschied zu Szenario 1 wirken sich die Annahmen in Szenario 2 auf die Effekte in allen Wertschöpfungsstufen aus: Wären entlang der Wertschöpfungskette alle Akteure ausschließlich in der Region verortet, würden sich im Zukunftsszenario durch die Planung und Installation sowie den Betrieb der EE-Anlagen im Landkreis auf regionaler Ebene **Wertschöpfungseffekte in Höhe von 3,1Mio. Euro** (+ 57%) ergeben. Damit verbunden wären knapp **12 Vollzeitarbeitsplätze** (+ 64%) (siehe Abbildung 6.52 und Abbildung 6.53 sowie Kapitel 6.3.8.2.1).

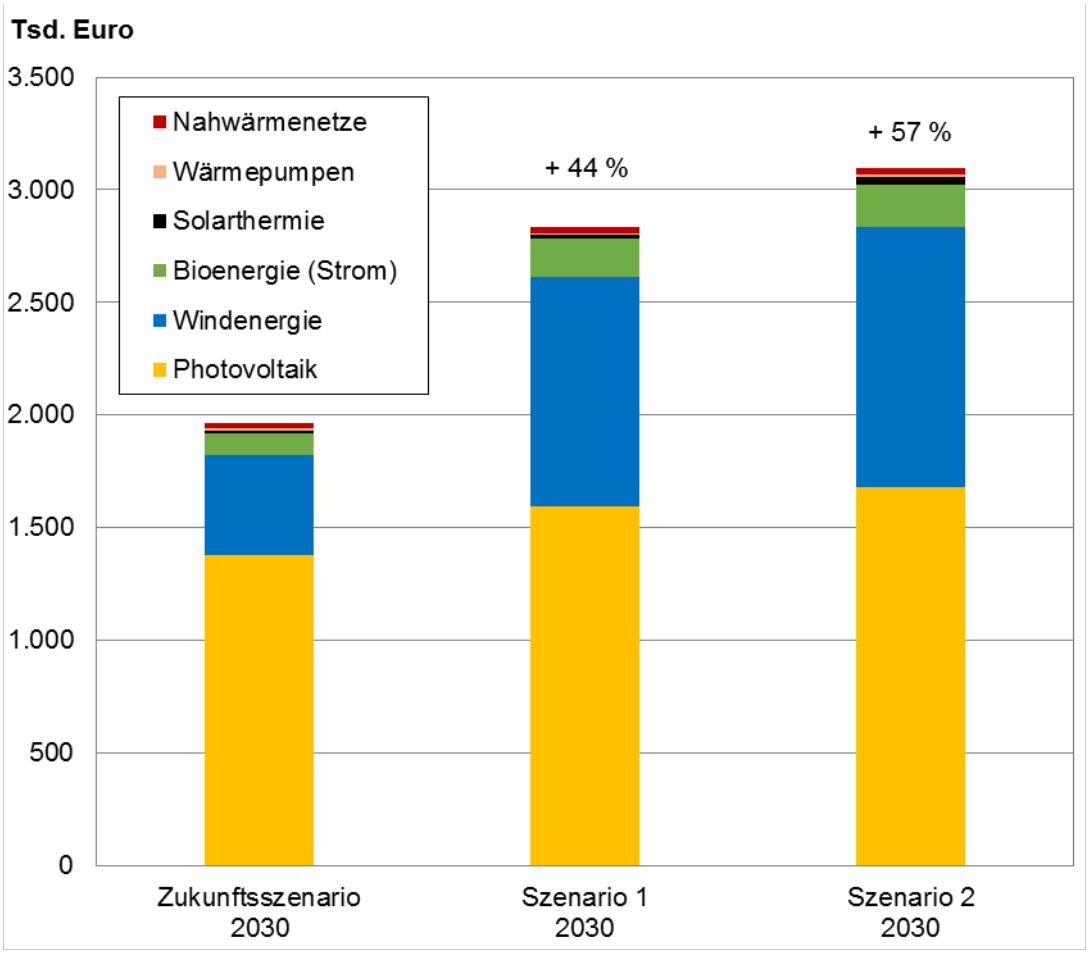


Abbildung 6.52: Regionale Wertschöpfungseffekte durch erneuerbare Energien nach Technologiebereichen in Wolfhagen im Zukunftsszenario für das Jahr 2030 und die Szenarien 1 und 2. (Quelle: Eigene Darstellung des IÖW)

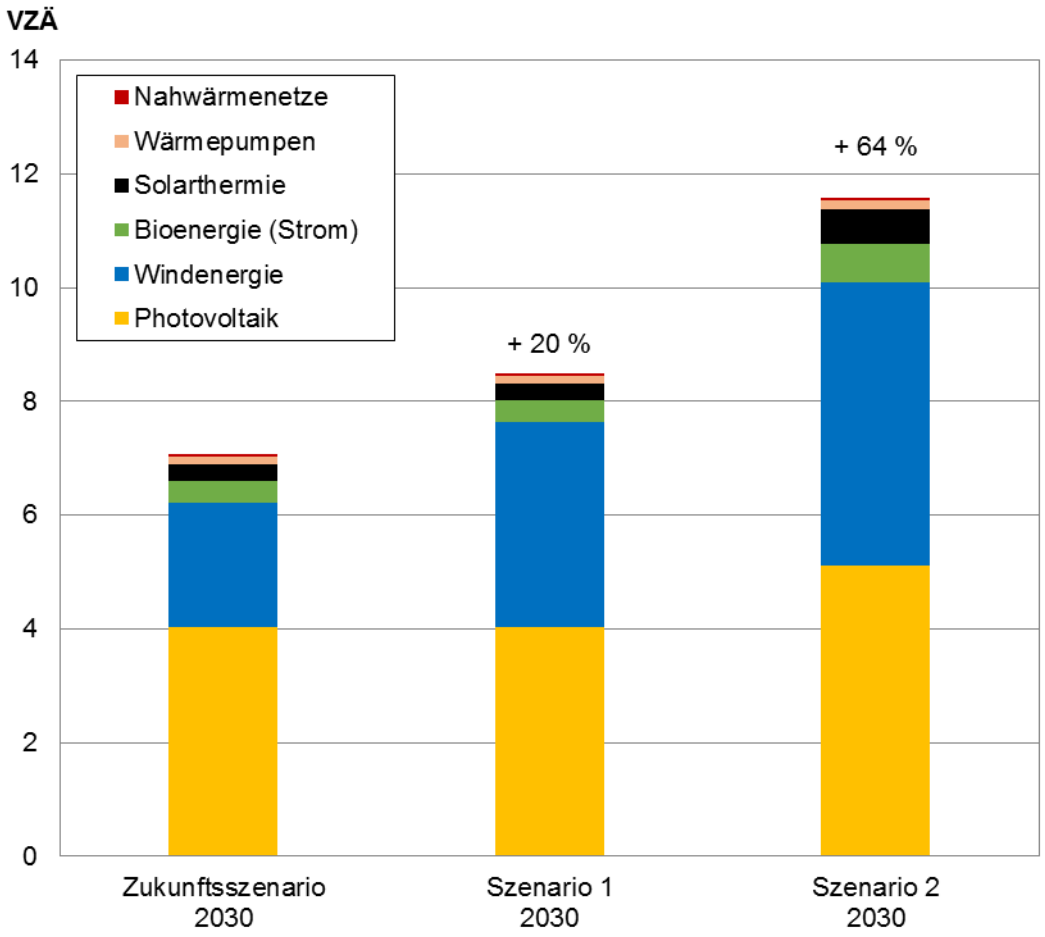


Abbildung 6.53: Beschäftigungseffekte (Vollzeitäquivalente) durch erneuerbare Energien nach Technologiebereichen in Wolfhagen im Zukunftsszenario für das Jahr und die Szenarien 1 und 2. (Quelle: Eigene Darstellung des IÖW)

Derzeit wird die fluktuierende EE-Einspeisung in der Stadt Wolfhagen durch Rückgriff auf die höher gelagerte Netzebene ausgeglichen, d.h. in Zeiten der Übererzeugung findet eine Rückspeisung der Überschüsse in das höher gelagerte Netz statt und in Zeiten der Untererzeugung wird Strom aus dem höher gelagerten Netz bezogen. Folglich muss derzeit für den Fall der Untererzeugung Vorhalteleistung beim Übertragungsnetzbetreiber eingekauft werden. Mit den in Kapitel 6.3.8.2 beschriebenen Maßnahmen möchten die SWW einen möglichst hohen Eigenversorgungsgrad im Netzgebiet erreichen. So ist vorgesehen, die Vorhalteleistung zu einem gewissen Anteil über das eigene Kurzläufer-BHKW zur Verfügung zu stellen. In Kombination mit weiteren Maßnahmen für einen lokalen Ausgleich der fluktuierenden EE-Einspeisung kann so die Bestellleistung gegenüber dem Übertragungsnetzbetreiber reduziert werden.

Die Realisierung der Maßnahmen für einen möglichst hohen Eigenversorgungsgrad wird sich aller Voraussicht nach auch auf die Wertschöpfung und Beschäftigung in der Region auswirken. Denn: die Zahlungen an den Übertragungsnetzbetreiber und damit der Abfluss von Kapital aus der Kommune werden damit gesenkt und die Mittel können Maßnahmen vor Ort zufließen, u.a.

der Bereitstellung einer gesicherten Leistung über den Betrieb eines Kurzläufer-BHKW. Am Beispiel der geplanten Maßnahme des Kurzläufer-BHKW werden die möglichen Effekte sowie die relevanten Stellschrauben im Folgenden qualitativ erörtert.

Von den Stadtwerken wird die Möglichkeit einer zukünftigen Lastflexibilisierung mittels eines erdgasbasierten Spitzenlast-BHKW mit einer Leistung von knapp 2 MWel und 2000 Betriebsstunden pro Jahr untersucht. Wie oben beschrieben, wird die Vorhalteleistung für den Fall der Untererzeugung derzeit beim Übertragungsnetzbetreiber eingekauft. Zukünftig soll die Vorhalteleistung zumindest anteilig über das eigene BHKW d.h. lokal bereitgestellt werden, was mit Minderausgaben an den Übertragungsnetzbetreiber verbunden ist. Grundsätzlich ist zu beachten, dass die vermiedenen Ausgaben nicht mit der möglichen, zusätzlichen Wertschöpfung in der Region gleichgesetzt werden können. Denn bei einer kleinen Region wie der Stadt Wolfhagen ist davon auszugehen, dass eine Vielzahl an Vorleistungen von Wirtschaftsakteuren außerhalb der Stadt bezogen wird. Auch muss bei dem Spitzenlast-BHKW angenommen werden, dass nicht alle Schritte entlang der Wertschöpfungskette durch Unternehmen und Akteure aus der Region abgedeckt werden (bspw. Versicherungsleistungen). Bei den auf die Unternehmensgewinne und die Bruttoeinkommen gezahlten Steuern ist zu beachten, dass diese nur anteilig der Kommune zufließen, da je nach Art der Steuer ein gewisser Anteil an das Land und den Bund zu entrichten ist (siehe Kapitel 5.4.4). Zusammengefasst bedeutet dies, dass die zusätzliche regionale Wertschöpfung geringer ausfallen wird, als die vermiedenen Zahlungen an den Übertragungsnetzbetreiber.

Welche Auswirkungen sind nun durch diese Maßnahme eines Kurzläufer-BHKW mit Blick auf Wertschöpfung und Beschäftigung vor Ort zu erwarten? Zunächst ist festzustellen, dass mit Inbetriebnahme des Kurzläufer-BHKW eine zusätzliche Energieerzeugungsanlage im Stadtgebiet in Betrieb ist und – sofern die Arbeiten durch lokale Akteure abgedeckt werden – zukünftig Effekte auf den Wertschöpfungsstufen Anlagenbetrieb und Wartung sowie Betreibergewinne zu erwarten sind. Dies umfasst im Wesentlichen das Personal für den Anlagenbetrieb, die Wartung und Instandhaltung des BHKW sowie Gewinne aus dem Betrieb des BHKW. Da das Kurzläufer-BHKW im Falle einer Realisierung von den SWW geführt wird, kann angenommen werden, dass ein Großteil der damit verbunden kommunalen Wertschöpfung in der Region verbleibt. Dieser Aussage liegt die Annahme zugrunde, dass das Personal für den Betrieb sowie die Wartung des BHKW bei den Stadtwerken tätig und in der Stadt Wolfhagen wohnhaft ist und die damit verbundene regionale Wertschöpfung somit in der Stadt verbleibt. Zudem sind die potenziellen Gewinne aus dem Betrieb der Anlage den Stadtwerken als Betreiber zuzurechnen. Der Betrieb der Blockheizkraftwerke der Biogasanlage in Wolfhagen ist mit einem Beschäftigungseffekt von rund 0,18 VZÄ verbunden. Durch den Betrieb des Kurzläufer-BHKW sind zukünftig demnach Beschäftigungseffekte in einer ähnlichen Größenordnung zu erwarten. Die SWW gehen von einem zusätz-

lichen Beschäftigungseffekt von 0,25 Vollzeitäquivalenten aus. Gemäß den derzeitigen Planungen ist vorgesehen, dass durch den Betrieb des Kurzläufer-BHKW zukünftig Erlöse über die Spitzenlastreduktion im Netz, die KWK-Vergütung, die Vermarktung des erzeugten Stroms am Spot-Markt sowie ggf. den Verkauf der erzeugten Wärme erwirtschaftet werden. Die Betriebsergebnisse im Jahr 2030 und die damit verbundene regionale Wertschöpfung sind demnach u.a. von der zukünftigen Entwicklung der Erdgaspreise, der Netzentgelte, der Strompreise am Spotmarkt sowie der regulatorischen Rahmenbedingungen abhängig.

6.3.8.2.1 Ergänzende Ergebnisdarstellung für das Zukunftsszenario

Tabelle 6.65: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen im Zukunftsszenario für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen – Szenario 1 (Quelle: Eigene Berechnungen des IÖW)

2030 Szenario 1	Gewinne nach Steuern	Nettoeinkommen durch Beschäftigung	Steuern an die Kommunen	**WS kommunale Ebene**	Vollzeitbeschäftigte
	[Tsd. Euro]				[VZÄ]
Photovoltaik	1.251,7	151,8	192,2	1.595,7	4,0
Windenergie	573,4	132,2	310,9	1.016,5	3,6
Bioenergie (Strom)	144,5	11,3	16,7	172,5	0,4
Summe Strom	**1.969,6**	**295,3**	**519,8**	**2.784,6**	**8,0**
Solarthermie	4,4	9,6	1,2	15,3	0,3
Wärmepumpen	3,4	4,9	0,8	9,1	0,1
Nahwärmenetze	20,3	1,1	3,8	25,2	0,0
Summe Wärme	**28,2**	**15,6**	**5,8**	**49,6**	**0,5**
Summe	**1.997,8**	**310,9**	**525,6**	**2.834,2**	**8,5**

Tabelle 6.66: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen im Zukunftsszenario für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen – Szenario 1 (Quelle: Eigene Berechnungen des IÖW)

2030 Szenario 1	Planung & Installation	Anlagenbetrieb & Wartung	Betreiber-gewinne	**WS kommunale Ebene**
	[Tsd. Euro]			
Photovoltaik	4,1	220,6	1.371,0	1.595,7
Windenergie	0,0	218,9	797,6	1.016,5
Bioenergie (Strom)	0,0	19,0	153,5	172,5
Summe Strom	**4,1**	**458,4**	**2.322,1**	**2.784,6**
Solarthermie	6,5	8,8	0,0	15,3
Wärmepumpen	0,6	8,6	0,0	9,1
Nahwärmenetze	0,0	1,8	23,4	25,2
Summe Wärme	**7,0**	**19,2**	**23,4**	**49,6**
Summe WS	**11,2**	**477,6**	**2.345,4**	**2.834,2**
	[VZÄ]			
Vollzeitbeschäftigte	**0,2**	**8,3**	**-**	**8,5**

Tabelle 6.67: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen im Zukunftsszenario für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsbestandteilen – Szenario 2 (maximale Wertschöpfung) (Quelle: Eigene Berechnungen des IÖW)

2030 Szenario 2	Gewinne nach Steuern	Nettoeinkommen durch Beschäftigung	Steuern an die Kommunen	**WS kommunale Ebene**	Vollzeitbeschäftigte
	[Tsd. Euro]				[VZÄ]
Photovoltaik	1.289,3	190,1	199,0	1.678,4	5,1
Windenergie	655,6	180,5	322,0	1.158,1	5,0
Bioenergie (Strom)	149,4	21,0	18,0	188,4	0,7
Summe Strom	**2.094,3**	**391,6**	**539,0**	**3.024,9**	**10,8**
Solarthermie	10,2	21,1	2,9	34,2	0,6
Wärmepumpen	3,4	4,9	0,8	9,1	0,1
Nahwärmenetze	20,8	1,3	3,9	25,9	0,0
Summe Wärme	**34,4**	**27,3**	**7,5**	**69,3**	**0,8**
Summe	**2.128,7**	**418,9**	**546,5**	**3.094,2**	**11,6**

Tabelle 6.68: Regionale Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte durch erneuerbare Energien in Wolfhagen im Zukunftsszenario für das Jahr 2030 nach Technologiebereichen und Wertschöpfungsstufen – Szenario 2 (maximale Wertschöpfung) (Quelle: Eigene Berechnungen des IÖW)

2030 Szenario 2	Planung & Installation	Anlagenbetrieb & Wartung	Betreibergewinne	**WS kommunale Ebene**
	[Tsd. Euro]			
Photovoltaik	8,3	299,2	1.371,0	1.678,4
Windenergie	0,0	360,4	797,6	1.158,1
Bioenergie (Strom)	0,0	34,9	153,5	188,4
Summe Strom	**8,3**	**694,6**	**2.322,1**	**3.024,9**
Solarthermie	12,9	21,3	0,0	34,2
Wärmepumpen	0,6	8,6	0,0	9,1
Nahwärmenetze	0,0	2,6	23,4	25,9
Summe Wärme	**13,5**	**32,4**	**23,4**	**69,3**
Summe	**21,7**	**727,0**	**2.345,4**	**3.094,2**
	[VZÄ]			
Vollzeitbeschäftigte	**0,4**	**11,2**	**-**	**11,6**

6.3.9 Akteure der Energiewende in Wolfhagen

Als Kernkonsortium, welches den Prozess der Energiewende in Wolfhagen initiiert und entscheidend vorangetrieben hat, werden die Stadtwerke, die Stadtverwaltung, der Bürgermeister Wolfhagens, die Energieagentur 2000, das Fraunhofer Institut für Bauphysik Kassel und die Universität Kassel beschrieben (vgl. I-WHG4: 39). Im folgenden Abschnitt wird dieses Kernkonsortium, dessen Bezüge zur Energiewende in Wolfhagen sowie weitere relevante Akteure vorgestellt.

6.3.9.1 Politische Akteure und Verwaltung

Die Idee, Wolfhagen zu 100% mit Strom aus erneuerbaren Energien zu versorgen, wurde von den Stadtverordneten Wolfhagens angestoßen. Nach der Gemeindewahl 2011 wurde eine Koalition aus CDU und SPD gebildet. Die darauffolgenden Beschlüsse wurden fast alle einstimmig

mit der CDU getroffen. Beide Parteien haben den angestoßenen Prozess maßgeblich mitgetragen (vgl. I-WHG2: 30). Die Stadtwerke und die Kommunalpolitik werden zudem als die Ideengeber des Prozesses angesehen (vgl. I-WHG6: 72). Der Bürgermeister der Gemeinde habe den Prozess ebenfalls von Beginn an unterstützt und fungierte als wesentlicher Treiber (vgl. I-WHG4: 39).

Angesprochen auf eine Resilienzsteigerung betonte WHG5, dass die Gemeinde Vorsorgemaßnahmen gegenüber möglichen Stromausfällen und Black Outs anstrebe. Intelligente Lösungen für den Ausgleich von Angebot und Nachfrage müssten gefunden werden. Des Weiteren betonte der Interviewpartner, dass ein resilienteres Gesamtsystem nur durch den Ausbau der dezentralen Energieversorgung erreicht werden könne.

„Und was die Verletzlichkeit, die Sicherheit anbetrifft, glaube ich schon, dass wir mit der Dezentralität viel stabiler aufgestellt sind für die Zukunft. Also wenn ich mir jetzt vorstelle wir hätten jetzt die Südlink-Trasse und da passiert irgendetwas, da macht jemand einen Anschlag oder irgendetwas, dann ist natürlich sofort der gesamte Stromfluss unterbrochen. Oder wenn jemand auf ein Kraftwerk einen Anschlag verübt“ (I-WHG5: 30).

6.3.9.2 Energieversorger

Die Stadtwerke sind in Wolfhagen für die Strom-, Gas- und Wasserversorgung zuständig. Das Unternehmen befindet sich zu 75% im Besitz der Stadt Wolfhagen und zu 25% im Besitz der Bürgergenossenschaft.

Beginnend mit dem Rückkauf des Wolfhager Stromnetzes von E.ON Mitte im Jahre 2006 kamen wesentliche Impulse im Energiewendeprozess von den SWW. Mit dem bereits 2002 begonnenen Prozess des Netzrückkaufs verfügte die SWW neben dem Vertrieb auch über den Netzbetrieb (Mittelspannungs- und Niederspannungsebene) in Wolfhagen. Damit sollte die SWW durch weitere Erträge und mehr eigene Stromkunden abgesichert werden. Zudem wurde angestrebt, durch Kostensenkungen infolge von Effizienzsteigerungen die Arbeitsplätze in diesem Bereich trotz der absehbar sinkenden Erlöse im Netzbetrieb zu sichern und die eigene Wertschöpfung zu steigern. Im Jahre 2013 konnte die SWW zudem eine weitere Konzession für das Netz der Nachbargemeinde erwerben. Mit dem schrittweisen Ausbau der Erneuerbaren begann die SWW in größerem Umfang auch eigene Energieerzeugungsanlagen zu betreiben. Mehrere Tochterfirmen wurden gegründet, unter anderem für den Betrieb des Windparks am Rödeser Berg (Wind Wolfhagen GmbH, 4x 3 MW) und den Betrieb der PV-Freiflächenanlage (Solar Wolfhagen GmbH, 5 MW). Die Erträge der Tochterfirmen fließen den SWW als Muttergesellschaft zu und werden entsprechend ihrer Beteiligung an die Stadt (75%) sowie an die BEG (25%) ausgeschüttet.

Die SWW engagierte sich mit Filmvorführungen und Podiumsdiskussionen auch in der Öffentlichkeitsarbeit zur Energiewende. Ein wesentliches Ergebnis ihrer Arbeit war die Gründung der

Klimaschutzinitiative im Jahre 2007 in der verschiedenste Akteure (Bürger, Stadtwerke, Energieagentur, Parteien) zusammenarbeiten. Immerhin einige relevante Akteure zeigten sich aufgeschlossen gegenüber der Problematik fehlender Resilienz.

„Es wäre doch anstrebenswert, dass wir eine gewisse Insel-Smart-Start-Fähigkeit und eine Teilautarkie bekommen. Wie gesagt, ich will nicht alles machen, sondern ein Teil des Stromes hier aus diesen Sachen zu vernetzen und selber in der Hand zu haben. Und dabei wäre sozusagen mal eine Einordnung zu geben, ob das nicht auch ein erstrebenswertes Ziel ist um eine selbstbeinflussbare Teilversorgungssicherheit zu bekommen.“ (I-WHG3: 140).

Nach WHG3 müsste ein redundantes Systemelement in Form eines Blockheizkraftwerks installiert werden, welches auch während der Phasen mit fehlender Stromerzeugung aus PV- oder Windkraftanlagen („Dunkelflaute“) die elementare Grundversorgung aufrechterhalten kann. So ein System lasse sich auch bereits ökonomisch sinnvoll gestalten. Somit sei auch ein inselfähiges System realisierbar (I-WHG3: 134). Zellen sollten zudem kaskadiert werden. Elementare Zellen könnten bei Haushalten anfangen und dann Ebene für Ebene in ihrer Größe ansteigen. Durch verbrauchsnahe Erzeugung und Matching von verschiedenen Faktoren würde Wolfhagen mit den Kapazitäten auskommen. Würde man die Zellen im SUN-Gebiet zusammenlegen, könnten Engpässe durch Austausch zwischen den Zellen ausgeglichen werden.[68]

6.3.9.3 Wirtschaft und Projektierer

Die BürgerEnergieGenossenschaft (BEG) wurde gegründet, um eine breite Bürgerbeteiligung und Akzeptanz für die Energiegewinnung aus Erneuerbaren Quellen in Wolfhagen zu ermöglichen. Seit August 2012 ist die BEG im Genossenschaftsregister des Amtsgerichts Kassel eingetragen. Im September 2012 wurde ein Gesellschaftervertrag mit den SWW unterzeichnet, der über eine Kapitalerhöhung die BEG zu 25% an der SWW beteiligt. Die Beteiligung entspricht einem Betrag von 2,3 Mio. Euro. Die Genossenschaft fördert bereits einige Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz, wie Hocheffizienzpumpen und LED-Technologie. Des Weiteren müssten laut den Akteuren intelligente Lösungen entwickelt werden, um auch unter fluktuierenden Energieströmen die Versorgungssicherheit aufrecht zu erhalten. In Wolfhagen wurden bereits entsprechende Monitoringsysteme und Smart-Technologies installiert, um eine konstante Versorgung aufrecht zu erhalten.

„Also das ist alles sehr gut abgesichert. Zu den Windkraftanlagen. Da besteht ein Generalwartungsvertrag, der sicherstellt, dass zu 97 % entsprechender Windhäufigkeit die Anlage in Betrieb ist. Das gleiche gilt für die PV-Anlage. Die wird überwacht, sodass immer gewährleistet ist, wenn mal irgendwo ein Teilausfall ist, selbst wenn nur ein Feld ausfällt, kann man das feststellen, und sofort dafür gesorgt wird, dass das ersetzt wird.“ (I-WHG2: 258).

[68] Protokoll des Resystra Workshop in Wolfhagen vom 01.09.2016

Die BLG Project GmbH ist eine Projektgesellschaft aus Wolfhagen, welche auf die Planung und Realisierung von Solarparks und Photovoltaikanlagen spezialisiert ist.[69] Zusammen mit der SWW betreibt die BLG Project GmbH den großen Photovoltaik-Park in Wolfhagen, welcher gleichzeitig auch einer der größten Parks in Hessen ist. Auf einer Fläche von 18 Hektar wurden 42.000 Solarmodule von der BLG-Project GmbH installiert.

Ein Vertreter aus dem Bereich Energiewirtschaft und Projektierer gab während des Interviews an, dass ihm das Konzept Resilienz noch nicht geläufig war (vgl. I-WHG1: 76). Der Akteur bemängelte jedoch, dass es im System an Speicher- und Puffermöglichkeiten mangelt.

„Also wir haben zu wenig Speicher oder Puffermöglichkeiten. Also im Gasnetz ist das sicher etwas anderes. Aber das Gas ist ja noch auf konventioneller Basis. Die Wärmeversorgung hatten wir angesprochen, ist meist unabhängig von größeren Versorgungssystemen hier in der Region. Und im Strombereich, wie gesagt, da fehlen die Speicher, die Puffermöglichkeiten, vielleicht fehlen aber auch noch zusätzliche Erzeugungseinheiten, die über den ursprünglichen Bedarf hinaus produzieren könnten aber nur herunter geregelt werden müssten. (I: Also regelfähige Erzeugungseinheiten.) Regelfähige Erzeugungseinheiten, genau.“ (I-WHG1: 77).

Die Implementation solcher Anlagen würde zu einer erweiterten Versorgungssicherheit im Sinne des Resilienzkonzeptes führen. Weiterhin führte WHG1 an, dass durch den Zubau von Batterie- und Gasspeichern sowie eines Gaskraftwerks ein intelligenteres System geschaffen werden müsse, welches ggf. inselfähig operieren könne. Zudem müssten die Bürger für das Thema sensibilisiert werden. (vgl. I-WHG1: 77).

6.3.9.4 Die Energieagentur Energie 2000

„Energie 2000“ ist die Energieagentur des Landkreises Kassel. Sie berät Kommunen, kommunale Einrichtungen, Vereine, Privatpersonen und Unternehmen zur Energieeinsparung und Nutzung erneuerbarer Energien. Ihr Geschäftsführer ist neben dem Geschäftsführer der SWW sowie den leitenden Akteuren der BürgerEnergieGenossenschaft (BEG) einer der aktivsten Unterstützer und Organisatoren der E-Wendeaktivitäten in Wolfhagen.

Die Energieagentur betreibt selbst EE-Anlagen (PV-Dachanlagen), die in den vergangenen Jahren auf öffentlichen Gebäuden (zumeist Schulen) errichtet worden sind. Nach Angaben eines Interviewpartners aus dem Bereich der Energieberatung sei die zusätzliche Implementation entsprechender Speichertechnologien notwendig, um die Versorgungssicherheit eines unabhängigen dezentralen Energiesystems zu gewährleisten. Der Bau von Zwischenspeichern, Quartier-

[69] Die BLG Project GmbH. (o.J.). Zugriff am 09, 2016, von http://www.blg.eu/unternehmen/

speichern und Batteriespeichern könne erheblich zur Erhöhung der Versorgungssicherheit beitragen und eine Insellösung für regionale Versorgungssysteme ermöglichen. Dieser Ansatz erfordere aber einen entsprechenden Mehraufwand an Arbeit und Ressourcen.

„ …wenn man regionale Netz hat, ist es natürlich so, wenn irgendwie ein Anlagenteil ausfällt, habe ich eine Lücke, die ich nur bedingt schließen kann. Also die Redundanz ist gering, ich habe ja keine großen Reservekapazitäten hier aufgebaut. Deswegen: Wenn man wirklich autarke Systeme bauen wollte, wäre das noch ein gewaltiger Aufwand die Reserve zu sichern. Das ist in Verbindung mit, oder im Netzverbund natürlich wiederum einfacher“ (I-WHG6: 200).

Weiterhin betonte der Interviewpartner jedoch, dass Stromausfälle, sollten sie in Maßen vorkommen, durchaus vertretbar seien.

6.3.9.5 Wissenschaft

Die Energiewende in Wolfhagen wird maßgeblich vorangetrieben durch die Zusammenarbeit der Stadt Wolfhagen mit dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Kassel, dem Kompetenznetzwerk Dezentrale Energietechnologien e.V. (deENet), dem Zentrum für Umweltbewusstes Bauen (ZUB) Kassel, der Energieagentur Energie 2000 e.V. sowie dem Kommunikationsbüro eyedexe.

Die Stadt ist zudem beteiligt am Forschungsprojekt, „Energieeffiziente Stadt“ gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung. Das Projekt startete im Jahr 2008, die Umsetzungsphase läuft noch bis 2017. Im Rahmen dieses Projektes sollte im Rahmen eines Wettbewerbs ein systematisches Konzept zur Nutzung der Potentiale zur Energieversorgung mit erneuerbaren Energie in den Bereichen Strom und Heizwärme entwickelt werden.[70]

Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickelt in Kooperation mit der SWW und deENet sowie weiteren Netzwerkpartnern ein auf 100% erneuerbaren Energien basierendes Energieversorgungskonzept für Wolfhagen für die zweite Wettbewerbsphase. Zuvor hatte sich die Gemeinde während der ersten Wettbewerbsphase gemeinsam mit 13 weiteren Kommunen gegen mehr als 70 Bewerber durchgesetzt. Ein viel versprechendes Konzept ermöglicht den Einzug in die dritte Projektphase, in welcher drei bis fünf Kommunen über einige Jahre finanzielle Ressourcen im Wert von mehreren Millionen Euro erhalten sollen, um erarbeitete Konzepte umzusetzen.[71]

Das Fraunhofer Institut für Bauphysik übernimmt Aufgaben im Bereich Koordination und Monitoring. Die Koordination umfasst Aufgaben innerhalb des Projektkonsortiums ebenso wie gegenüber der Begleitforschung und dem Fördermittelgeber. Laut Aussagen eines Akteurs hat sich das

[70] Wolfhagen 100% EE. (o.J.). Zugriff am 09, 2016, von http://www.deenet.org/projekte/projekt-archiv/wolfhagen-100-ee/
[71] Wolfhagen 100% EE. (o.J.). Zugriff am 09, 2016, von http://www.deenet.org/projekte/projekt-archiv/wolfhagen-100-ee/

Fraunhofer Institut von sich aus auf die Stadt Wolfhagen zubewegt, da in der Ortschaft bereits aktive Strukturen im Bereich Erneuerbare Energien vorzufinden waren (vgl. I-WHG4: 37).

Auch die Nähe zur Universität Kassel kann als maßgeblicher Treiber für die Energiewende in Wolfhagen gesehen werden. So lag die Verantwortung in dem Forschungsvorhaben für das Modul "Sanierungskonzepte und Weiterbildung" beim Fachbereich Bauphysik der Universität. Des Weiteren werden in Zusammenarbeit mit der Stadt Wolfhagen ein quartiersbezogenes Sanierungskonzept und ein modularer Energieversorgungsansatz unter Berücksichtigung erneuerbarer Energien für die Kernstadt entwickelt. Die Wissenschaftler im Fachbereich erfassen und filtern bestehende Informationen sowie Beratungsangebote und entwickeln daraus eine Auswahl für interessierte Bürger. Somit sollen Vorbehalte und Hemmschwellen unter den Einwohnern abgebaut werden. Mit einem Arbeitspaket namens "Modulares Sanierungskonzept" wird ein neuer Ansatz entwickelt, welcher mittels eines kontinuierlichen Beratungs- und Förderprozesses die Sanierungsrate in Wolfhagen erhöhen soll. Dabei sollen auch Teilsanierungen und einzelnen Maßnahmen angegangen werden. Zudem wird in Wolfhagen ein neues Beratungs- und Qualifizierungsangebot etabliert. Die Qualifikation der Akteure sei bei der weiterführenden Beratung und in der Begleitung von Sanierungsprojekten oftmals nicht umfassend genug gewesen.[72] Der Anstoß zu einem Transformationsprozess, welcher von einer veränderten, gemeinsamen Denk- und Handlungsweise getragen werden muss, wird als wissenschaftliches Gesamtziel beschrieben.[73]

Zusätzlich den bereits erwähnten Forschungseinrichtungen wurde das Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) als Messinstitution in das Projekt ‚Windpark am Rödeser Berg' mit einbezogen.

„…mit dem Rödeser Berg hat man dem Fraunhofer-Institut die Möglichkeit gegeben: Ihr könnt dort einen Messmast aufbauen, um eure verschiedenen Messsysteme zu kalibrieren. Und der wurde dann da hingestellt. Insofern gibt es da eine sehr enge Zusammenarbeit. Wir sind auch bei den Veranstaltungen, kam meist auch ein Theoretiker von IWES“ (I-WHG2: 102).

Laut I-WHG4 werden zukünftig Bilanzkreisverantwortliche mit Blick auf Flexibilitäten viel stärker in die Verantwortung genommen. Derzeit gibt es kein Netzmonitoring (Blindflug). Es wird nur reagiert, wenn etwas ausfällt. In diesem Bereich werden die meisten Möglichkeiten gesehen. Gemeinsam mit dem Fraunhofer IWES wird ein Netzmonitoring angestrebt.[74] Um zukünftig eine sichere Versorgung in Deutschland zu gewährleisten, müsse die Produktion entsprechend der Nachfrage flexibilisiert werden.

[72] Energieoffensive Wolfhagen. (o.J.). Zugriff am 10, 2016, von http://www.energieoffensive-wolfhagen.de/menu/projektpartner/fraunhofer-institut

[73] Energieoffensive Wolfhagen. (o.J.). Zugriff am 10, 2016, von http://www.energieoffensive-wolfhagen.de/menu/projektpartner/fraunhofer-institut

[74] Protokoll des Resystra Workshop in Wolfhagen vom 08.12.2015

„Also im Sinne des Gesamtenergiesystems ist eine höhere Flexibilisierung am Ende der Kette sicherlich sehr sinnvoll. Also ich denke da geht der Trend auch hin, dass wir sagen wir haben bestimmte Verbraucher die lassen sich schalten. Die lassen sich netzdienlich einbinden in dieses System, um dann die Versorgungssicherheit zu erhöhen und die Risiken für einen Ausfall zu reduzieren. Und das ist praktisch mit keiner Komforteinbuße verbunden“ (I-WHG4: 57).

6.3.9.6 Bürgerbeteiligung

Insgesamt zeichnet sich der Energiewendeprozess in Wolfhagen durch seinen hohen Grad an aktiver Bürgerbeteiligung aus, welche in mehreren Facetten erkennbar ist. Die Bürger wurden aktiv in den Prozess des Aufbaus von Projekten mit eingebunden. Der hohe Grad der Beteiligung spiegelt sich wohl am stärksten durch die aktive und finanzielle Beteiligung der BürgerEnergie-Genossenschaft an den Stadtwerken wieder.

„Es gibt dabei unterschiedliche Facetten der Bürgerbeteiligung, die intensivste, die ich kenne haben wir glaube ich hier umgesetzt, mit einem direkten, Bürgergeld an den Stadtwerken. Also mit einer direkten genossenschaftlichen Beteiligung an den Stadtwerken.“

Ca. 700 Bürger der Stadt Wolfhagen sind momentan an der Bürgerenergiegenossenschaft beteiligt (I-WHG3: 111). Die Beteiligung in der Genossenschaft ermöglicht aktiven Einfluss auf kritische Entscheidungsfindungsprozesse durch die Generalversammlung. Da sich die SWW zu 25% in der Hand der BEG und zu 75% in der Hand der Stadt Wolfhagen befinden und zwei Mitglieder der BEG im Aufsichtsrat der Stadtwerke vertreten sind, wird auch hier eine gewisse Bürgernähe gewährleistet.

Des Weiteren haben die Bürger die Möglichkeit, sich an Projekten wie dem Windpark am Rödeser Berg und Bürgersolarparks finanziell zu beteiligen (vgl. I-WHG3: 111). Zusätzlich wird in Wolfhagen versucht, den Prozess der Energiewende durch die Verbreitung von Informationen und Bürgerveranstaltungen transparent zu gestalten.

Zu dem Thema Resilienz und Versorgungssicherheit gebe es den befragten Akteuren zu Folge viel Unwissen in der Bevölkerung. Dem Bürger könne dieses Konzept nur schwer vermittelt werden. Die Netzsicherheit werde vom Bürger nicht angezweifelt, und daher bestehe auch nur eine begrenzte Zahlungsbereitschaft für etwaige Vorhaben. Oft würden solche Vorhaben erst unterstützt, nachdem spürbare Schwierigkeiten aufgetreten sind. In diesem Bereich sei eine verstärkte Aufklärungsarbeit notwendig.[75]

[75] Protokoll des Resystra Workshop in Wolfhagen vom 01.09.2016

6.3.10 Leitorientierungsanalyse

6.3.10.1 Vorhandene Leitorientierungen

In diesem Kapitel werden die im regionalen Energiesystem der Stadt Wolfhagen vorhandenen Leitorientierungen[76] beschrieben, an die ggf. mit dem Leitkonzept resilientes regionales Energiesystem und mit den entsprechenden Gestaltungsleitbildern angeknüpft werden kann. Einige dieser vorhandenen Leitorientierungen sind in die Gestaltungsleitbilder mit eingeflossen. In diesem Zusammenhang war ebenso von Interesse, ob und inwiefern die Berücksichtigung dieser Leitorientierungen die Wirksamkeit der Gestaltungsleitbilder beeinflussen konnte, dies wird in Kapitel 4.2.2 näher thematisiert.

Eine bedeutende Leitorientierung, welche maßgeblich zur Formulierung des Ziels *Bilanzielle Energieselbstversorgung* beigetragen hat, ist die Steigerung der *regionalen Wertschöpfung* (I-WHG 3 und I-WHG 2). Aufgrund der Tatsache, dass in der Region enorme Kaufkraftverluste durch Energieimporte zu verzeichnen waren, wurde vor allem die Erzeugung aus regionalen Energieträgern als Option zur Erhöhung der *Regionalen Wertschöpfung* propagiert. Durch eine steigende Anzahl an Energieerzeugungsanlagen in der Hand von regionalen Akteuren (z.B. private Haushalte, regionale Investoren, SWW und BEG) einschließlich ihrer Installation und Wartung durch regionale Unternehmen und Handwerker, erhoffte sich die Stadt eine gesteigerte *Regionale Wertschöpfung.*

„[...]Dass man da (...). wir aber doch zumindest den Ehrgeiz haben, dass Anlagen, die hier in der Region gebaut werden, mit Bürgerbeteiligung gebaut werden und mit (...) einer Wertschöpfung, die hier in der Region bleibt“ (I-WHG2 X).

„ aber es gibt eine Ermittlung (…) wo um die 18 Millionen Euro aus unserer Stadt abfließen. Alle Bürgerinnen und Bürger geben etwa diese Summe Geld aus für Energie: Strom, Benzin, Öl, alles was so dazu gehört. (…) Und wenn ich mir vorstelle davon bleibt ein erheblicher Teil hier in der Stadt, der nicht mehr wegfließt, dann haben wir davon schon, glaube ich, einen Vorteil, da haben wir einen Gewinn von“. (I-WHG5 X)

Mit der Idee der *(bilanziellen) Energieautarkie* wird auch eine verbesserte Möglichkeit gesehen selbst aktiv zu werden mit Blick auf Maßnahmen gegen den Klimawandel.

„…*Wenn es aber gelingt da die Bürger mitzunehmen, dann ist es eine Förderung der Autonomie, der lokalen Identifizierung, also das kann auch sehr (...) sehr motivierend wirken dann auch in anderen Bereichen etwas zu tun…“ (I- WHG 4 X)*

[76] Im Folgenden findet keine Einordnung der in den Fallstudien erhobenen Zukunftsvorstellungen in das Dreiebenenmodell statt, da das Interesse der Frage galt, welche Zukunftsvorstellungen in den Regionen existierten und weniger, auf welcher Ebene diese verortet waren. Aus Einfachheitsgründen werden die erhobenen Zukunftsvorstellungen als Leitorientierungen bezeichnet, auch wenn der übergeordnete Begriff der Leitorientierungen eigentlich alle Ebenen des Dreiebenenmodells (Weltbilder, Leitkonzepte und Gestaltungsleitbilder) umfasst; vgl. auch Kap. 2.

Eine weitere bedeutende Leitorientierung betrifft die *Regionale Unabhängigkeit*. So hat eine Mehrzahl der regionalen Akteure als Motivation für ein Energiesystem basierend auf regionalen, erneuerbaren Energien die Unabhängigkeit von fossilen, endlichen Ressourcen mit steigenden Kosten gesehen.

„…Regionale Selbstversorgung wäre für mich (...) eine, eine Unabhängigkeit von Importen, sagen wir es jetzt mal ganz einfach (...) Die Energie die unser Netz bräuchte, würden wir auch in unserem Netz selbst erzeugen (I-WHG 1 X)

Einige der befragten Akteure sagten darüber hinaus aus, dass sie nicht nur eine Unabhängigkeit, sondern eine *Autarkie* des Wolfhagener Energiesystems anstreben (u.a. I_WHG 3). Zugleich wird jedoch deutlich, dass diese Auffassung nicht von allen geteilt wird:

„….Es wird häufig mal gesagt: Die wollen autark werden. Gerade hier im Zusammenhang mit Wolfhagen, den Projekten. Das ist nie das Ziel gewesen. Wir haben gesagt, wir wollen uns der Autarkie annähern. Aber gerade die letzten Prozente sind die die schwierig zu erreichen sind, und da fragt man sich, macht das Sinn? Das macht aus meiner Sicht keinen Sinn, denn die Sicherheit des vorgelagerten Netzes im Bereich der Stromversorgung ist ja immer noch ein nicht zu unterschätzender Faktor…“ (I-WHG 6 X)

In Wolfhagen spielte die Leitorientierung *Wirtschaftlichkeit* durchaus eine wichtige Rolle, die einerseits eng mit der Orientierung nach regionaler Selbstversorgung verknüpft ist, aber auch nach den Chancen, die sich aus dem EEG ergeben haben, ermittelt werden. Die Umsetzung von Maßnahmen, auch Maßnahmen der regionalen Selbstversorgung, wird immer auch mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit überprüft:

„…. je nachdem wie betrachtet, sind wir schon in der Lage dazu eine Selbstversorgung durchzuführen. Und darüber hinaus gibt es natürlich Ideen… Das Ganze muss sich nur umsetzen lassen, finanzieren lassen. Diese Zwänge, wir können ja nicht einfach in den blauen Dunst, Überlegungen schon, aber die Planungen müssen ja realistisch sein, fundiert sein“ (I-WHG7 X).

Neben den eben aufgezeigten eher ökonomisch geprägten Leitorientierungen spielten in Wolfhagen somit auch der Beitrag zum *Klima- und Umweltschutz* sowie der *Nachhaltigkeitsgedanke* eine wichtige Rolle. Dabei wird auf die Abwägungsprozesse eingegangen

„Also das ist glaube ich ein ganz entscheidender Aspekt, dass wir nachhaltig die richtigen Wege und Lösungen entwickeln und nicht nur sagen: Kurzfristig, wirtschaftlicher Erfolg und dann ist gut. Das halte ich für völlig falsch. Also ich glaube, dass der Umwelt- und der Nachhaltigkeitsaspekt ein ganz wesentlicher ist. Der ganz vorne angestellt werden muss. Natürlich spielt der Preis auch eine Rolle, ganz klar. Das muss auch einigermaßen passen“ (I-WHG 5).

Ebenso ist offenbar auch ein Prozess der Professionalisierung im Verlauf der Energiewende zu beobachten, in dem die intrinsischen Motivationen sich mit den EE zu befassen in gewissem Maße durch finanzielle Anreize zumindest ergänzt werden:

„….Also wir haben das, merken das im Bereich der Beratung. In der Anfangszeit waren es Idealisten und Leute die sagen: Wir wollen die Umwelt schützen. Photovoltaik bauen, Solarthermie. Und das waren später immer mehr Leute die gesagt haben: Ich muss mal meine Rendite ausrechnen und die steht für mich im Vordergrund, wenn ich da noch meine drei, vier Prozent habe, dann mache ich das. Besser als auf jeder Bank. Und das waren schon einige...(I-WHG 6).

Mit Blick auf die Abnehmerseite werden ebenfalls weitgehende Abwägungsprozesse dargelegt:

„…Da muss man intelligente Lösungen entwickeln, klar. Aber wie gesagt ich denke schon der Umweltaspekt, die Sicherheit, die Nachhaltigkeit auch für zukünftige Generationen, glaube ich ist das Wichtigste erst einmal, dass man das beachtet. Den Preis will ich auch als wichtig beachten, aber nicht so wichtig“. (I-WHG 5)

Der Transformationsprozess in Wolfhagen kann, wie bereits angedeutet, differenziert betrachtet werden. War bei zentralen Akteuren zunächst die Relevanz des Klimawandels vorrangig, so hat sich dies gerade auch mit Blick auf die Förderinstrumente des EEG stark mit der Frage der Erschließung der regionalen Wertschöpfungspotenziale durch zentrale Akteure verbunden, im Sinne der Entwicklung von Geschäftsmodellen.

6.3.10.2 Wirksamkeit des Leitorientierungsprozesses

Inwiefern die in Wolfhagen initiierten Leitorientierungsprozesse wirksam werden konnten, war ein zentrales Thema im Rahmen der Leitorientierungsanalyse. Zum besseren Verständnis soll noch einmal daran erinnert werden, dass die Wirksamkeit von Leitorientierungsprozessen bzw. darin kommunizierter Leitkonzepte bzw. Gestaltungsleitbilder in zwei Stufen analysiert werden sollte (vgl. auch Kapitel 3). Von einer Wirksamkeit kann dann ausgegangen werden, wenn die Leitkonzepte bzw. Gestaltungsleitbilder auf Resonanz treffen (erste Stufe), das bedeutet sie haben eine Relevanz für die Adressaten. Eine noch höhere Wirksamkeitsstufe liegt dann vor, wenn die Leitkonzepte bzw. Gestaltungsleitbilder darüber hinaus handlungsleitend werden, es besteht also eine Bereitschaft sie umzusetzen oder sie werden tatsächlich umgesetzt (Brand 2016).

Zudem muss betont werden, dass die Wirksamkeiten im Rahmen des Projektes RESYSTRA nur über einen kurzen Zeitraum, nämlich die Anstoß- und Spezifizierungsphase des Leitorientierungsprozesses erhoben werden konnte. Um eine längerfristige Wirksamkeit untersuchen zu können, müssten weitere empirische Erhebungen über diese Phasen hinaus vorgenommen werden, was aufgrund der terminierten Projektlaufzeit nicht möglich war.

In Wolfhagen wurde die Relevanz des Leitkonzeptes *Resilienz* bzw. *Resilientes Energiesystem* von den regionalen Akteuren unterschiedlich wahrgenommen. Es ist darauf hinzuweisen, dass

Resilienz i.d.R. nicht in den vielfach komplexen akademischen Bedeutungen interpretiert wurden, wenn dieser Begriff überhaupt eingeordnet werden konnte.

„….Das ist so, ich muss gestehen ich habe es erst mal nachgeschlagen, was bedeutet es denn jetzt in dem Moment. Aber da stehe ich auch nicht alleine da. Gehört schon, aber so richtig einordnen konnte ich es erst einmal nicht...“ (I-WHG 6).

„…Ja, aus dem Krisenmanagement. Resilienz ist praktisch das Vermögen robust zu sein gegenüber Störungen…“ (I-WGH 2)

Die Einordnung des Begriffs der Resilienz wird dabei keineswegs allein auf Wolfhagen bezogen, vielmehr wird auf generelle Strukturen Bezug genommen, die dann wiederum Einfluss auf die Region und deren Resilienz haben kann.

„…Also wenn ich jetzt mal von ganz oben herunter gucke, ist das [das] Vermeiden […] von Monopolen bei der Belieferung. Also das was wir im Augenblick haben, […] ein sehr starkes Monopol […], oder eine Monopolsituation bezüglich Bezug von Erdgas aus Russland, das finde ich sehr bedenklich. Da sollte man sich auf [die] Beine stellen.“ (I-WHG 2

Einzelne Akteure konnten den Begriff auf das regionale Energiesystem bzw. das Stromsystem „anwenden“ und damit quasi für sich operationalisieren:

„…Das würde ich zumindest als, logischerweise wenn Wind und PV da ist, und wir vielleicht sogar mit Speichern nochmal ein bisschen etwas ergänzen, dann würde ich unser System für so resilienzfähig halten, dass wir auf lokaler Ebene in der Lage wären eine Notversorgung hier abzudecken…. (I-WHG 3)

„...Also wir haben zu wenig Speicher oder Puffermöglichkeiten. Also im Gasnetz ist das sicher etwas anderes. Aber das Gas ist ja noch auf konventioneller Basis. Die Wärmeversorgung hatten wir angesprochen ist meist unabhängig von größeren Versorgungssystemen hier in der Region. Und im Strombereich, wie gesagt da fehlen die Speicher, die Puffermöglichkeiten, vielleicht fehlen aber auch noch zusätzliche Erzeugungseinheiten, die über den ursprünglichen Bedarf hinaus produzieren könnten aber nur herunter geregelt werden müssten. (I: Also regelfähige Erzeugungseinheiten.) Regelfähige Erzeugungseinheiten, genau...“ (I-WHG 1)

Wie deutlich wird, ist die Bandbreite der Interpretationen des Resilienzbegriffs hoch, eine gemeinsame Schnittstelle des Begriffsverständnisses lag in der Versorgungssicherheit. Die Möglichkeit die Versorgungsicherheit in der Region, auch und gerade in der Folge von Extremereignissen (bspw. eines terroristischen Anschlags auf den Südlink), wurde durchaus als Option diskutiert. Allerdings wurde auch direkt darauf verwiesen, dass in der Folge mit höheren Kosten zu rechnen ist. Die Zahlungsbereitschaft für diese zusätzlichen Kosten für eine künftige erhöhte Versorgungssicherheit wird allerdings als begrenzt angesehen, gerade vor dem Hintergrund, dass die Stabilität des bestehenden Systems als hoch eingeschätzt wird.

Einige lokale Akteure haben dementsprechend darauf verwiesen, dass, soweit sie selbst Handlungsmöglichkeiten im Sinne der Resilienz haben, dass diese durch geeignete Geschäftsmodelle erschlossen und damit refinanziert werden müssen. Sie vertraten in dem Kontext überwiegend die Auffassung, dass die Resilienz Rahmenbedingungen erforderlich macht wie sie bspw. im Kontext der Energiewende zur Förderung der Erneuerbaren existieren bzw. teilweise nicht länger existieren.

Das Leitkonzept Resilienz, das bei den Akteuren in Wolfhagen eng mit Versorgungssicherheit verbunden wurde, ermöglichte durchaus Resonanz. Dies war insbesondere bei einem wichtigen Akteur der Fall, der Andockungsmöglichkeiten für Konzepte entwickeln konnte, die eng mit weiteren Ideen verbunden waren. Die Idee im Rahmen der Energiewende die Wertschöpfung in der Region (also nicht allein Wolfhagen) zu halten, konnte also mithilfe des Prozesses des Leitkonzepts Resilienz einen gewissen Anklang finden, wirkte sich jedoch bislang nicht handlungsleitend aus. Als Haupthemmnis erwies sich dabei, dass es Schwierigkeiten bereitet entsprechende Maßnahmen durch geeignete Geschäftsmodelle zu refinanzieren. Dies gilt dabei besonders für solche Maßnahmen, die von Seiten der jeweiligen Energieversorger erbracht werden. Individuelle Lösungen, bspw. Speicher für die private Nutzung, unterliegen dabei meist einem anderen Nutzen / Kosten Kalkül.

Lösungen wie Inselnetze, also die autarke Versorgung von Teilsystemen, wurden überwiegend abgelehnt, wenn tatsächlich auf dauerhafte Autarkie gesetzt werden sollte. So haben einige regionale Akteure Inselnetze als durchaus bedeutende Option wahrgenommen, andere Akteure wiederum waren der Ansicht, dass eine Vernetzung zum übergeordneten Netz unabdingbar sei, so wie es auch in RESYSTRA mit den Gestaltungselementen von Resilienz propagiert wurde.

„...Wir haben gesagt, wir wollen uns der Autarkie annähern. Aber gerade die letzten Prozente sind die die schwierig zu erreichen sind... Das macht aus meiner Sicht keinen Sinn, denn die Sicherheit des vorgelagerten Netzes im Bereich der Stromversorgung ist ja immer noch ein nicht zu unterschätzender Faktor…“ (I-WHG 6 X)

6.3.10.3 Inhalts-, prozess- und system-/inhaltsbezogene Wirksamkeitsfaktoren

Nachfolgend werden die identifizierten Treiber und Hemmnisse des Leitorientierungsprozesses in Wolfhagen, sowie daraus abzuleitende Wirksamkeitsfaktoren erläutert. Unterschieden wird hierbei zwischen inhalts-, system-, prozess- und akteursbezogenen Faktoren. Die letztgenannten Faktoren werden – wenn möglich – nach den jeweiligen Prozessphasen unterteilt. Der Prozess konnte, wie erwähnt, nur bis zur Spezifizierungsphase begleitet werden, also bis zur gemeinsam mit ausgewählten Adressaten vorgenommenen Spezifizierung des Leitkonzeptes Resilienz in ein Gestaltungsleitbild einschließlich dessen Verbreitung, zumindest unter den involvierten Adressaten. Deshalb wird der Fokus auf die Wirksamkeitsfaktoren in den ersten beiden Prozessphasen

gerichtet. Die Verbreitungs- und Umsetzungsphase wird dementsprechend nicht näher beleuchtet. Es kann somit die Wirksamkeit des Leitkonzeptes Resilienz und der damit kommunizierten Gestaltungselemente (vgl. Kapitel 2.4) näher dargestellt werden, nicht aber die des Gestaltungsleitbildes, das erst gegen Projektende final entwickelt werden konnte.

6.3.10.4 Inhaltsbezogene Wirksamkeitsfaktoren

Die meisten involvierten Akteure waren vor dem Leitorientierungsprozess nicht mit dem Begriff Resilienz in Berührung gekommen. Die Begrifflichkeit wurde zunächst durchaus unterschiedlich interpretiert, allerdings gelang es bei einigen Akteuren Resonanz dahingehend zu erzeugen, dass sie einige aktuelle Herausforderungen mit dem Begriff der Resilienz in Bezug bringen konnten. Allerdings ist anzumerken, dass dies im Wesentlichen für solche Akteure gilt, die wirtschaftlich-technisch in die lokalen oder regionalen Energiewendeprozesse miteinbezogen waren. Letztlich erwies sich, dass zwar viele Dimensionen des Resilienzbegriffs angesprochen wurden, dass aber, vor dem Hintergrund der Handlungsmöglichkeiten der regionalen Akteure, nämlich nicht oder nur begrenzt die Rahmenbedingungen zu beeinflussen, es letztlich entscheidend ist, dass zusätzliche Aufwendungen, wie sie mit der Umsetzung des Resilienzkonzepts verbunden werden, auch von neuen Geschäftsmodelle refinanziert werden können. Insofern wurde kommunikativ der Umweg über eine erweiterte Versorgungssicherheit eingeschlagen, weil sich damit der Zusatznutzen kommunizieren ließ (dies im Übrigen relativ unabhängig davon, dass die Einschätzung abgegeben wurde, dass die Zahlungsbereitschaft letztlich nicht vorhanden sei).

Die Herausforderungen des Begriffs der Resilienz sind zweifelsohne groß, dies sowohl im akademischen Diskurs - in welchem durchaus heterogene Interpretationen existieren und in welchem die Definition von Resystra eine unter vielen ist - als auch mit Blick auf die Praxisakteure, die jeweils ihre eigene Resonanz zu ihnen geläufigeren Konzepten herstellten.

Dies wurde letztlich auch in Resystra realisiert, indem einerseits auf Gestaltungselemente von Resilienz (z.B. Dämpfer, Puffer, Speicher, Redundanzen) fokussiert wurde und andererseits in Kooperation mit den Akteuren vor Ort ein Gestaltungsleitbild konkret bezogen auf Wolfhagen erarbeitet wurde. Hierbei wurde positiv herausgestellt, dass es sich bei den Elementen um „machbare“, also technisch umsetzbare Maßnahmen handelt (z.B. Speicher, Mess- und Regelsysteme). Es war also durchaus möglich, realisierbare Schritte auf der Basis des Leitkonzepts Resilienz zu spezifizieren. Dabei muss jedoch die Frage offenbleiben, wie angemessen es ist, wenn auf der Basis des Leitkonzepts einzelne Aspekte ausgewählt werden, ohne die Gesamtheit der Begriffsbedeutung zu erfassen.

Abschließend können folgende inhaltsbezogene Wirksamkeitsfaktoren für das Leitkonzept *Resilienz* bzw. *Resilientes Energiesystem* als Ergebnisse der Leitorientierungsanalyse im Fallbeispiel Wolfhagen festgehalten werden:

- Das Leitkonzept stieß auf unterschiedliche Resonanz bei den Akteuren. Bemerkenswert war, dass der Begriff bei zentralen Akteuren der regionalen Energiewende eine gute Resonanz erzeugte und Anschlussmöglichkeiten zu bereits bestehenden Entwicklungsvorstellungen eröffnete, die allerdings nicht mit Blick auf die Begrifflichkeit Resilienz entwickelt wurden). In starkem Maße wurden Überlegungen angestellt, wie eine In-Wert-Setzung von Maßnahmen zur Verbesserung der Resilienz ermöglicht werden könnte. Die Anschlussfähigkeit reichte von Vorstellungen einer möglichen neuen Qualität der regionalen Selbstversorgung bis zu der Steuerungsfähigkeit der regionalen Netze auch im Sinne eines zellularen (nicht autarken) Systems. Im Grundsatz wurde von diesen Akteuren das Konzept der Resilienz eng verbunden mit der Weiterentwicklung der Idee der regionalen Selbstversorgung und der Steuerungsfähigkeit der Netze. Dies wurde allerdings nicht im Sinne der Autarkie verstanden, sondern im Sinne einer neuen Form der regionalen Kooperation.
- Das Leitkonzept bot demnach genügend Interpretationsspielraum, um Diskussionen im Wolfhagen anzuregen und Verständigungs- und Aushandlungsprozesse in Gang zu setzen. Gleichwohl wurde auch darauf verwiesen, dass es gegenwärtig für die Region eine Rolle spielen kann, dass aber letztlich der Hebel zur Handlung in der Region bzw. der Stadt nur begrenzt existiert. Es braucht mithin, so die einhellige Auffassung, eine Veränderung der Rahmenbedingungen, die vor Ort nur begrenzt beeinflusst werden können.
- In der Summe war die Anschlussfähigkeit des Leitkonzeptes Resilienz hoch und insbesondere waren die Gestaltungselemente und Gestaltungsleitbilder für die Akteure auch plausibel entwickelbar Gleichwohl erwies sich die Handlungsebene Region als nicht hinreichend.

6.3.10.5 Systembezogene Wirksamkeitsfaktoren

Mit dem Transformationspfad „Regionale Selbstversorgung mit erneuerbaren Energien“ im Rahmen der Resilienzuntersuchungen wurde ein für die Stadt Wolfhagen bedeutendes Thema aufgegriffen. Die Resonanz die es vor allem erzeugte lag vor allem in der Frage, welche weiteren Handlungsmöglichkeiten in der Region existieren, wo ja u.a. mit der Bürgerenergiegenossenschaft wichtige Impulse gesetzt worden sind und zudem mit den vielfältigen energiebezogenen Forschungsvorhaben in der Region kontinuierlich neue Aktivitäts- und Geschäftsfelder ausgelotet worden sind. In dem Sinne hat die Vorstellung eines „zellulären Systems“, das mit dem Leitkonzept Resilienz in durchaus enger Verbindung steht Handlungsorientierungen aufgezeigt.

Das Ziel der (erweiterten) Versorgungssicherheit, das ja mit dem Resilienzkonzept in Verbindung gebracht wurde, steht allerdings bei den regionalen Akteuren gegenwärtig nicht an zentraler Stelle der Handlungsnotwendigkeiten. Da zudem die Nachfrage nach erweiterter Versorgungssicherheit nur begrenzt ist, steht die Refinanzierung von aufwändigen Resilienzmaßnahmen in

Frage und wird dementsprechend nicht systematisch erschlossen. Dies umso mehr, als die regionale In Wertsetzung von Resilienzmaßnahmen vielfach nicht gegeben ist und die Rahmenbedingungen noch nicht geschaffen sind (z.T. fällt der Nutzen entsprechender Maßnahmen (bspw. Aufbau zellulärer Systeme und ggf. die geminderte Notwendigkeit des Netzausbaus) auch nicht in der Region an).

Immerhin bestätigte sich beim Leitkonzept Resilienz mit seinen Gestaltungselementen der Vorteil, dass es viele Anknüpfungspunkte eröffnet für ein Gestaltungsleitbild unter Berücksichtigung der in der Region existierenden Leitorientierungen, der Gegebenheiten vor Ort und der realisierbaren nächste Schritte (vgl. dazu die Ausführungen zum Landkreis Wolfhagen).

Es wird also deutlich, dass mit dem Leitkonzept Resilienz und seinen Gestaltungselementen Anknüpfungsmöglichkeiten ähnlich wie im Landkreis Osterholz, auch in Wolfhagen an viele existierenden sowohl speziellen als auch generelleren Leitorientierungen bestehen. Ob dies tatsächlich in Zukunft selbsttragend zu einer (handlungsleitenden) Wirksamkeit in Wolfhagen führt, kann nur langfristig ermittelt werden. Offen bleibt zudem, wie relevant die Herstellung derartiger Bezüge zu existierenden Leitorientierungen im Vergleich zu anderen Wirksamkeitsfaktoren ist. Schließlich sollte der Kern eines erfolgreichen Leitkonzepts mehr transportieren als die Summe (oder gar nur den kleinsten gemeinsamen Nenner) aller schon vorfindbaren Leitorientierungen.

Aus den eben aufgezeigten Ergebnissen können folgende <u>systembezogene Wirksamkeitsfaktoren für das Leitkonzept Resilienz</u> identifiziert werden:

- Im Wolfhagen existierten Problemstellungen zu deren Lösung die Umsetzung des Leitkonzeptes Resilienz beitragen würde.
- Propagierte Leitkonzepte sollten möglichst komplementär und kompatibel zu weiteren Richtungsimpulsen sein. Auf regionaler bzw. nationaler Ebene existierten einige dieser kompatiblen bzw. komplementären Richtungsimpulse, gleichwohl erweisen sich diese als nicht oder nur begrenzt umsetzbar, auch aufgrund fehlender Anreizsysteme auf nationaler Ebene,
- Das Leitkonzept wies Bezüge zu (eher erwünschten) Weltbildern wie Autonomie, Sicherheit und intergenerationelle Gerechtigkeit auf, die den nötigen Resonanzraum eröffneten.

6.3.10.6 Prozess- und akteursbezogene Wirksamkeitsfaktoren

Phase 1 – Aufgreifen von Weltbildern (erwünschte Richtung) mit Leitkonzept:

Die *Vorsorge* gegenüber bekannten, aber auch unbekannten Störereignissen und Überraschungen im Sinne des „(Fast-)Egal was kommt-Ansatzes“ erlangt zunehmende Bedeutung in der Gesellschaft (vgl. Bankoff 2003; Bonß 2015; Fekete et al. 2016; Imbusch 2015; Kaufmann 2015;

Promberger et al. 2015). Es wird nicht mehr nur mit bestimmten bzw. bestimmbaren Gefährdungen und Bedrohungslagen gerechnet, sondern auch mit noch unbekannten echten Überraschungen (sog. Schwarzen Schwäne, vgl. Taleb 2008), was in der Einsicht einer generellen gesellschaftlichen Verletzlichkeit mündet und schon seit geraumer Zeit z.B. unter dem Begriff „Risikogesellschaft“ diskutiert wird (Beck 1993; Brand 2016; Kaufmann 2015). Daneben spielen noch weitere konsensträchtige Weltbilder wie *Autonomie, Sicherheit*, *Gerechtigkeit* und *Leben in Einklang mit der Natur* eine wichtige Rolle, die auch in Osterholz als wichtig erachtet und als erwünschte Richtung bezeichnet werden. Zunächst haben vor allem die unmittelbar im Projekt Resystra Engagierten (Prozessträger) ein adäquates Leitkonzept identifizieren und propagieren können, welches Anknüpfungspunkte eröffnete für die bei den regionalen Akteuren vorfindbaren Werte, Weltbilder und spezifischeren Leitorientierungen (z.B. Wettbewerbsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit, regionale Wertschöpfung und Unabhängigkeit). Sie haben die Überzeugungskraft und den Durchsetzungswillen aufgebracht, dieses Leitkonzept im BMBF-Forschungsprojekt RESYSTRA zu etablieren und damit die anschließenden Prozessphasen in Wolfhagen in Gang zu setzen. Berücksichtigt haben diese Prozessträger außerdem weitere förderliche inhalts- und systembezogene Faktoren, z.B. einen ausreichenden Interpretationsspielraum und eine Problemlösungsfähigkeit.

Das Leitkonzept *Resilientes Energiesystem* konnte mithilfe von Fachexperten (insb. Wissenschaftlern) aus dem Kreis der Prozessträger auf regionale Energiesysteme und im speziellen auf das regionale Energiesystem in Wolfhagen übertragen werden. Bei diesem Schritt konnte auf Vorarbeiten aus vorherigen wissenschaftlichen Projekten und dabei gewonnene Erkenntnisse und Erfahrungen aufgebaut werden.

Als Schwierigkeit erwies sich jedoch eine leider vergleichsweise hohe Fluktuation im Projektteam selbst, so dass ein einvernehmliches Verständnis und eine gemeinsame Überzeugung mit Blick auf das doch sehr komplexe Resilienzkonzept immer wieder neu erarbeitet werden musste. Dies hatte zur Folge, dass die Phase 1 des Leitorientierungsprozesses sich über einen längeren Zeitraum hinzog und damit teilweise sogar parallel zur Spezifizierungsphase (Phase 2) verlief.

Somit können folgende prozess- und akteursbezogene Wirksamkeitsfaktoren für die erste Phase des Leitorientierungsprozesses identifiziert werden:

- Es waren Prozessträger vorhanden, welche *Resilienz* bzw. *Resilientes Energiesystem* als adäquates Leitkonzept hinsichtlich der erwünschten Richtung identifizierten sowie die Überzeugungskraft hatten, es im Forschungsprojekt RESYSTRA zu etablieren.
- Die Etablierung des Leitkonzeptes *Resilientes Energiesystem* im Projekt und in die damit verbundenen Fallbeispiele (regionale Resiliente Energiesysteme) wurde von Fachpromotoren unterstützt, die Wissen und Erfahrungen aus zuvor durchgeführten Projekten aufwiesen, in denen das Resilienzkonzept schon eine Rolle spielte.

- Die Prozessträger haben ein Leitkonzept ausgewählt, das den in Kapitel 4.2.2 vorgeschlagenen inhalts- und systembezogenen Faktoren weitgehend entspricht, indem es z.B. einen ausreichenden Interpretationsspielraum und einen Problemlösungsbeitrag aufweist.
- Kontinuität in der Gruppe der Prozessträger über den gesamten Prozess ist wichtig, damit ein gemeinsames und zunehmend vertieftes Verständnis und eine entsprechende Überzeugung stabil über den gesamten Projektverlauf erhalten werden kann.

Phase 2 – Spezifizierung des Leitkonzeptes in Gestaltungsleitbilder und Praxisbeispiele

Eine Herausforderung in der Spezifizierungsphase bestand darin, das bislang wenig handlungsorientierte Leitkonzept Resiliente Systeme auf den Energiebereich zu übertragen und in Form von Gestaltungselementen zu spezifizieren. Im zweiten Schritt ging es darum, dieses Leitkonzept auf das spezifische regionale Energiesystem von Wolfhagen in Form eines Gestaltungsleitbildes zu übertragen. Wichtige Unterstützer dieses Prozesses waren die Fachexperten (bspw. Wissenschaftler mit Energiewissen) unter den Prozessträgern.

Sie kooperierten dabei intensiv mit einem schon vorhandenen Netzwerk regionaler Akteure (z.B. Energieversorger, regionale Handwerker, Projektierer, Unternehmen, Regionalpolitik). Über Experteninterviews und Workshops, aber auch durch die Bereitstellung wichtiger Daten für die Modellierung leisteten diese regionalen Akteure einen unersetzlichen fachlichen Input für diese Spezifizierungsarbeit. Damit konnten nicht nur Verletzlichkeiten des Systems analysiert (vgl. Kapitel 6.3.7), sondern auch mögliche Ausbaupfade, einschließlich möglicher Resilienz steigernder Maßnahmen, kooperativ erarbeitet werden (vgl. Kapitel 6.3.7 bis 6.3.8). Ein Ziel war dabei, den regionalen Akteuren das Resilienzkonzept näher zu bringen, indem ein Gestaltungsleitbild erarbeitet wurde, das nicht nur die regionalen natürlichen, technischen und strukturellen Gegebenheiten berücksichtigt, sondern auch ihre Ziele und Werte sowie ihre realistischen Einschätzungen (ihr lebensweltliches Wissen und ihre Ortskenntnis) angemessen berücksichtigt.

Besonders umworben durch die Prozessträger war die Partizipation von Entscheidungsträgern (z.B. BGE Abteilungsleiter/Geschäftsführer aus Wirtschaftsunternehmen) und Funktionsträgern (z.B. Mitarbeiter im Bereich Unternehmensentwicklung). Damit verbunden war der Wunsch nicht nur nach Akzeptanz, sondern auch nach (politischer und institutioneller) Legitimation und nach einer Verstetigung des Prozesses, indem Entscheidungsträger den Weg für die Umsetzung des Leitkonzeptes, z.B. in Form von Beschlüssen im Landkreis, ebnen und Funktionsträger die Verantwortung für den Prozess langfristig übernehmen.

Neben Entscheidung- und Funktionsträgern konnten Akteure im Leitorientierungsprozess identifiziert werden, die als Pioniere der Umsetzung von erneuerbaren Energien eine besondere Rolle im Landkreis einnahmen. Sie waren sehr überzeugt von der Energiewende und hatten eine hohe Präsenz in der Region. Diese Akteure waren für die Spezifizierungsphase besonders wichtig,

verbunden mit der Hoffnung, dass sie ihre Überzeugungen und ihr Engagement auch auf das Leitkonzept und das regionale Gestaltungsleitbild ‚regionales resilientes Energiesystem in Wolfhagen ausdehnen und dessen Umsetzung als Leitakteure oder Diffusionsintermediäre unterstützen. Auch hier fehlte es jedoch an Kontinuität. Möglicherweise hatten auch die Projektbeteiligten ihren Anteil an dieser unbefriedigenden Situation. Vielleicht hätten sie den Kontakt zu diesen Akteuren noch stärker aufrechterhalten und pflegen müssen, um eine stetige Beteiligung zu erzielen. In diesem Zusammenhang gibt die deutlich geringere Teilnehmerzahl beim Abschlussworkshop im Vergleich zum Auftaktworkshop zu denken. Es stellt sich die Frage, ob die Relevanz des Themas den Akteuren beim ersten Workshop nicht adäquat kommuniziert wurde, oder ob die Bedürfnisse der involvierten Akteure nicht ausreichend berücksichtigt wurden, oder ob noch andere Gründe für die sinkende Teilnahme verantwortlich waren (vgl. auch Kap. 6.3.12.8). Blickt man bspw. auf Praxisbeispiele, die in anderen Leitorientierungsprozessen als besonders wichtig erachtet wurden, da sie das Leitkonzept machbarer und greifbarer erscheinen lassen können, dann kann auch hier ein wichtiger Aspekt vermutet werden. Beispiele aus der Praxis wurden, über Präsentationen hinaus z.B. durch Exkursionen, nicht in den Prozess eingebracht. Dies liegt allerdings auch daran, dass bisher noch relativ wenige Umsetzungsbeispiele bezogen auf resiliente Energiesysteme im Sinne des Projektes existieren.

Als Abschluss der Spezifizierungsphase wurde das entwickelte Gestaltungsleitbild auf dem Abschlussworkshop vorgestellt sowie in Form des hier vorliegenden Projektberichtes dokumentiert. Eine schriftliche Fixierung stellte sich in anderen untersuchten Leitorientierungsprozessen als hilfreich heraus. Inwiefern die schriftliche Fixierung im Fallbeispiel Wolfhagen zu einer Verbindlichkeit und Verbreitung führen wird, kann gegenwärtig aber noch nicht eigeschätzt werden.

Somit können folgende prozess- und akteursbezogene Wirksamkeitsfaktoren für die zweite Phase des Leitorientierungsprozesses identifiziert werden:

- Es waren Fachpromotoren unter den Prozessträgern, die mit ihrem Wissen die Spezifizierung des Leitkonzeptes Resilienz bezogen auf das regionale Energiesystem Osterholz beschleunigen konnten.
- Die für die Energiewende engagierten Akteure in der Region waren fast ausschließlich auf den Elektrizitätssektor fokussiert. Wärme spielte nur zum Teil, Mobilität fast gar keine Rolle. Eine alle Bereiche umfassende Verankerung des Konzepts ‚Regionales resilientes Energiesystem in Wolfhagen ‘ und die Erarbeitung eines entsprechend breiten Gestaltungsleitbilds konnte im Rahmen der Projektlaufzeit nicht gelingen. Anzumerken bleibt dabei aber auch, dass die sowohl im Bereich Wärrme als auch im Bereich Mobilität die Problemkontexte und –strukturen sich deutlich vom Elektrizitätsbereich unterscheiden und die Handlungsmöglichkeiten für die regionalen Akteure deutlich begrenzter sind.

- Die Prozessträger kooperierten in die Spezifizierungsphase mit einem schon existierenden Netzwerk regionaler Akteure, die sich der Energiewende unter besonderer Berücksichtigung der regionalen Selbstversorgung mit Erneuerbaren mit Fokus auf Elektrizität verschrieben haben. Im Rahmen der Kooperation erfolgte mit dem Ziel der gemeinsamen Erarbeitung eines Gestaltungsleitbildes ein vergleichsweise intensiver Austausch von Zielen und Wünschen, Erkenntnissen und Erfahrungen, welche die Verletzlichkeit Energiesystems von Wolfhagen und der Region und den Bedarf an Resilienzmaßnahmen betrafen.
- Es wurden gezielt Entscheidungs- und Funktionsträger, Leitakteure und Diffusionsintermediäre angesprochen, um Akzeptanz für den Prozess schaffen und ihn langfristig in der Region verstetigen zu können. Möglicherweise wurden allerdings, nicht zuletzt aufgrund der Fluktuation im Projektteam, dann die gewonnenen Kontakte durch die Prozessträger zu wenig gepflegt.
- Das Aufzeigen von Praxisbeispielen ist gerade für ein so komplexes Leitkonzept wie Resilienz ein wichtiges Kommunikationsinstrument. Im untersuchten Leitorientierungsprozess wurde es aus verschiedenen Gründen nur wenig genutzt.
- Die schriftliche Dokumentation des entwickelten Gestaltungsleitbildes kann seine Verbindlichkeit und Verbreitung erhöhen. Sie kam allerdings erst gegen Ende des Projekts zum Abschluss.

6.3.11 Gestaltungsleitbild regionale Selbstversorgung

Das vorgefundene dominierende Leitbild ist in Wolfhagen wie in Osterholz zunächst einmal die regionale Selbstversorgung vor allem mit Elektrizität. Das Leitkonzept ‚Resilientes Energiesystem unter Einbeziehung der Sektorkopplung (Elektrizität, Wärme, Mobilität) war zunächst nur bei einigen Akteuren auf Resonanz gestoßen, obwohl natürlich die Bemühungen um eine regionale Selbstversorgung auch als wichtige Beiträge zu einem resilienteren Energiesystem verstanden werden können. Als Beiträge zur stärkeren Verankerung des Leitkonzepts Resilientes Energiesystem wurden im Rahmen des Projekts Resystra zum einen eine Vulnerabilitätsanalyse durchgeführt und zum anderen ein Gestaltungsleitbild für ein resilienteres regionales Energiesystem der Stadt Wolfhagen erarbeitet. Zur Erreichung dieses Ziels werden im Folgenden Vorschläge für Resilienz steigernde Gestaltungselemente im regionalen Energiesystem und zur überregionalen Verknüpfung diskutiert und Handlungsempfehlungen formuliert, die sich an den Zielsetzungen der Zukunftsszenarien für Wolfhagen (vgl. 6.3.6) orientieren.

Wolfhagen hat sein selbstgestecktes Energiewendeziel einer bilanziellen Eigenversorgung mit elektrischer Energie aus Erneuerbaren Energien bereits im Jahre 2015 erreicht. Seitdem werden

mehr als ein Drittel der Strommengen, die nicht zeitgleich im Netzgebiet der Stadtwerke Wolfhagen genutzt werden können, an das vorgelagerte Netz abgegeben. Aufgrund der verpflichtenden Marktprämie wird aber de facto die gesamte Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien, die über das EEG vergütet, wird an der Börse vermarktet. Die Stromerzeugung in Wolfhagen basiert hauptsächlich auf Photovoltaik- und Windkraftanlagen. Ein kleinerer Anteil geht auf die örtliche Biogasanlage zurück. Bis auf die Leistung dieser Biogasanlage fluktuieren die beiden anderen Anlagen in ihrer Leistungsabgabe naturgemäß recht stark und belasten, auch wegen fehlender steuerbarer Verbraucher von nennenswerter Größenordnung, das lokale Netz.

Aufgrund der geringen Größe der Untersuchungsregion konnten im Rahmen der Vulnerabilitätsanalyse keine vollständigen Wertschöpfungsketten der Energiebereitstellung untersucht werden. Der Schwerpunkt der Analyse wurde vielmehr auf die Untersuchung der Abhängigkeit von verschiedenen Elementen des elektrischen Energiesystems (also deren Kritikalität) und auf die Belastung des Systems durch lokale Schwankungen in Erzeugung und Verbrauch gelegt (vgl. 6.3.7 zur Vulnerabilitätsanalyse).

Parallel zur technischen und wirtschaftlichen Untersuchung der Stadt Wolfhagen wurden in mehreren Treffen mit den Akteuren vor Ort zwischen November 2014 und September 2016 folgende Punkte analysiert und diskutiert:

a) Resilienz und das Leitkonzept eines Resilienten Energiesystems (v.a. im Rahmen von Workshops)
b) Möglichkeiten und Grenzen einer gezielten Transformation hin zu einem resilienteren Energiesystem in Wolfhagen: Rahmenbedingungen und Leitorientierungen einzelner Akteure erkundet (v.a. im Rahmen von Interviews und Workshops)
c) Mögliche Gestaltungselemente für die Erhöhung der Resilienz des regionalen Elektrizitätssystems besprochen (v.a. im Rahmen von zwei Workshops (Dez 2015 u. Sept. 2016)).

Wie auch beim Gestaltungsleitbild für eine resilientere Gestaltung des Energiesystems im Landkreis Osterholz (vgl. Kapitel 6.2.3) bildet bei den im Folgenden dargestellten Empfehlungen für die Stadt Wolfhagen die Zielvorstellung einer zellulären Struktur (vgl. Kapitel 2.4.11) den Kern der Überlegungen. Die zelluläre Struktur kann als Bindeglied verstanden werden zwischen den identifizierten Leitorientierungen der Akteure in Wolfhagen („bilanzielle Energieautarkie“, „Stärkung der regionalen Wertschöpfung“, „Dezentralität“ und „regionale Unabhängigkeit“) und dem Gestaltungsleitbild eines resilienteren Energiesystems in der Region. Allerdings stehen, wie auch in Osterholz, die kostenintensiven Maßnahmen zur Erhöhung der Resilienz im Spannungsverhältnis zur Orientierung an einer möglichst hohen Wirtschaftlichkeit des zukünftigen Energiesystems. Es ist allerdings davon auszugehen, dass sich das Verhältnis von Effizienz und Resilienz

entspannt, wenn nicht nur kurzfristige, sondern auch langfristige ökonomische Überlegungen einbezogen werden. Inwieweit und wann dies bei den Akteuren in der Region zum Tragen kommt, kann derzeit noch nicht abgeschätzt werden.

6.3.11.1 Konkretisierung der Gestaltungselemente für die Region Wolfhagen

Ergänzend zu den Gestaltungselementen, die, sozusagen top down, im Leitkonzept resiliente Energiesysteme den Fähigkeiten eines resilienten Systems zugeordnet wurden (vgl. Kapitel 2.4), können für Wolfhagen auf der Grundlage der Ergebnisse von Vulnerabilitäts- und Wertschöpfungsanalyse auch bottom-up-Vorschläge für strukturelle und apparative Änderungen bzw. Ergänzungen gemacht werden. Im Sinne der Erhöhung der Resilienz des gesamten Elektrizitätsnetzes und auch des lokalen Netzes liegt der Schwerpunkt der im Gestaltungsleitbild vorgeschlagenen Maßnahmen auf dem Ausgleich der stark fluktuierenden Erzeugungskapazitäten. Diese Gewichtung ist sehr gut anschlussfähig an die vorfindbaren Leitorientierungen ‚Dezentralität' und ‚regionalen Unabhängigkeit', denn mit der eigenen Ausgleichskapazität wird über die bilanzielle Energieautarkie hinaus die regionale Selbstversorgung verbessert und dabei auch die regionale Wertschöpfung erhöht.

6.3.11.2 Empfehlungen

Angesichts der zeitlich nicht nutzbaren Mengen an elektrischer Energie in Wolfhagen (ca. 37% mit dem ab 2015 einspeisenden Windpark Rödeser Berg), der gesamten jährlichen Einspeisung und der stark fluktuierenden lokalen Energieerzeugung erscheint im Sinne einer Dämpfung der Erzeugungsspitzen und einer Bevorratung für spätere Phasen hohen Bedarfs die Speicherung dieser elektrischen Energie prioritär.

Der Anschluss einer Elektrolyseanalage zur Erzeugung chemischer Energieträger (P2G bzw. P2X) ist angesichts der starken Residuallastschankungen nur empfehlenswert, wenn eine genügend standfeste Auslegung zur Verfügung steht.

Wie die Modellierung zeigte, kann eine spürbare Verringerung der Unter- und Überschüsse erst mit Batteriespeichern großer Kapazität erreicht werden (vgl. Kapitel 6.3.7). In der Modellierung konnte der zeitgleiche Eigenversorgungsgrad bei einer Speicherkapazität von 12 MWh und einer für Batteriespeicher typischen Charakteristik von 71% auf 77% gesteigert werden. Demgegenüber erreichten Speicher mit einer Kapazität von 3 MWh in der Modellierung nur eine geringfügige Verbesserung des Eigenversorgungsgrades von 71% auf 73%. Bei Batteriespeichern wirkt sich aufgrund der im Vergleich zu den Lastwechselgradienten langen Lade- und Entladezeiten erst eine verhältnismäßig große Kapazität spürbar fluktuationsdämpfend aus. In Wolfhagen beträgt die jährliche Standardabweichung der viertelstündlichen Residuallaständerungen ca. 5 MW. Der mittlere viertelstündliche Residuallastgradient liegt bei 0,9 MW. Ein Batteriespeicher mit 3 MWh maximaler Kapazität und Lade- bzw. Entladezeiten, die im Stundenbereich liegen, ist deshalb nur

begrenzt in der Lage, einen Ausgleich zwischen Bedarf und Erzeugung im Netz herzustellen (zu den Spezifikationen der modellierten Speicher vgl. Kapitel 6.3.7: „Optionen zum verbesserten Ausgleich von Stromerzeugung und Stromverbrauch“).

Ein beispielhafter Ausschnitt, in dem die steilen Gradienten der Residuallastkurve sowie die Stärke der Lastwechsel deutlich werden, ist in Abbildung 6.54 dargestellt.

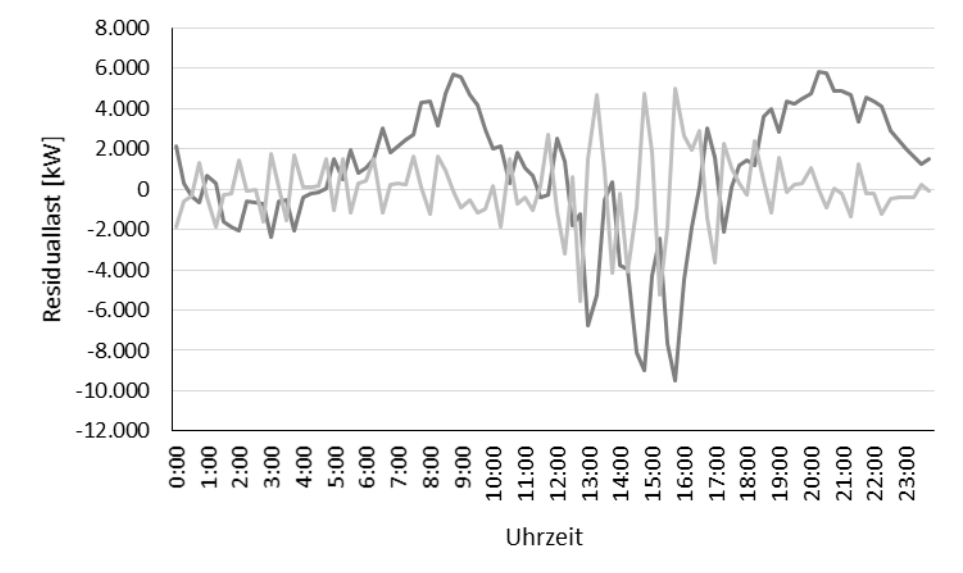


Abbildung 6.54: Residuallast im Netz der SWW, inkl. der modellierten Leistung des Windparks Rödeser Berg am 10.April 2013. Grau = Residuallast, hellgrau = Residuallastgradient viertelstündlich

Wenn ein Batteriespeicher möglichst viele dieser Lastwechsel ausgleichen soll, könnte er bereits nach kurzer Zeit an die Grenzen seiner Lebensdauer stoßen. Gegenüber einem Lithium-Ionen-Akku, der bis zu 5.000 Vollzyklen verkraftet[77], würde eine Redox-Flow-Batterie, die mehr als 10.000 Vollzyklen erreicht[78], die Lebensdauer des Speichersystems verdoppeln. Allerdings erreichen Redox-Flow Batterien nicht den Wirkungsgrad von Lithium-Ionen-Akkus, was aber für den stationären Betrieb keine entscheidende Rolle spielt. Wichtiger erscheint die Tatsache, dass Lithium-Ionen mehr verbreitet sind und aufgrund der Preisdegression und Erfahrung die häufiger eingesetzt werden.

Die energiebezogenen Investitionskosten für einen 3 MWh Batteriespeicher (Lithium-Ionen-Akku) liegen im hohen sechsstelligen Bereich[79]. Die Investitionskosten für ein BHKW mit einer elektrischen Leistung im Bereich von 1,5 bis 2 MW sind rund doppelt so hoch[80]. Wie in der Modellierung gezeigt werden konnte, ist bei einem BHKW mit einer Leistung von ca. 1,8 MW die Wirkung auf

[77] Siehe http://www.speichermonitoring.de/ueber-pv-speicher/batterietechnologien.html (Zugriff am 16.02.2017)

[78] ebenda

[79] Für Lithium-Ionen-Batterien kann mit 250 Euro pro kWh energiebezogenen Investitionskosten gerechnet werden. Quelle: Speicher Monitoring des Instituts für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), Aachen; http://www.speichermonitoring.de/ueber-pv-speicher/batterietechnologien.html (Zugriff am 10.02.2017)

[80] Spezifische Investitionskosten für das BHKW einer Biogasanlage mit Steuerung und Gasfackel. Quelle: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow; http://biogas.fnr.de/daten-und-fakten/faustzahlen/ (Zugriff am 16.02.2017)

den zeitgleichen Eigenversorgungsgrad mit einer Steigerung von 71% auf 88% gegenüber den Batteriespeichern weitaus höher. Alternativ würde der Modellierung zufolge schon eine entsprechende netzdienliche Fahrweise des vorhandenen mit der örtlichen Biogasanlage gekoppelten BHKW (insges. 1,06 MW) eine Erhöhung des Eigenversorgungsgrades von 71% auf 75% ergeben.

Woher der Brennstoff des zusätzlichen BHKWs stammt, ist im Zusammenhang mit der Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Quellen eine wichtige Frage. Da aufgrund der schlechten ökonomischen Rahmenbedingungen nicht mit einer Vergrößerung der Kapazitäten der örtlichen Biogasanlage gerechnet werden kann, sollte ein zusätzliches BHKW zumindest mit Bioerdgas betrieben werden.

Mit dem Brennstoffeinkauf geht natürlich Wertschöpfung verloren. Im Sinne einer Erweiterung der regionalen Wertschöpfungstiefe wird deshalb empfohlen, zu prüfen, ob durch Maßnahmen zur Lastverschiebung die Grundlast für eine Power-to-Gas Anlage für die Erzeugung von synthetischem Gas aus eigenen Stromüberschüssen zur Verfügung gestellt werden kann und die Gesamtanlage eine ökonomisch vertretbare Alternative darstellt. Evtl. könnten hier gemeinsame Investitions- und Nutzungsvereinbarungen innerhalb der Stadtwerkeunion Nordhessen getroffen werden. Das erzeugte Gas würde dann entweder lokal in Zeiten hohen Bedarfs rückverstromt oder ins Erdgasnetz eingespeist werden. Es könnte zudem über eine Wasserstoffinfrastruktur für Brennstoffzellenfahrzeuge mit dem Mobilitätssektor gekoppelt werden.

Eine Bewertung von Maßnahmen zum Ausgleich der Residuallastschwankungen konnte nur auf der Basis der Gesamtbilanz des Wolfhager Netzes durchgeführt werden. Die spezifischere Analyse möglicher Maßnahmen, die einzelne Netzabschnitte und Ebenen entlasten würden, war mit den zur Verfügung stehenden Daten nicht möglich. Deshalb wird als nächster Schritt empfohlen, die Netzebenen des lokalen Elektrizitätsnetzes mit Messeinrichtungen auszustatten, um die örtliche Auslastung erfassen und, falls notwendig, auch die vorhandenen Betriebsmittel den Lasten entsprechend anzupassen zu können. Für Wolfhagen ist bis 2030 entsprechend dem Maximalszenario (vgl. Kapitel 6.3.6) ein Zubau von PV-Anlagen mit einer Leistung von 5 MWp erwartbar[81]. Das entspräche 1000 PV-Anlagen mit einer Leistung von 5 kWp. Mit der verfügbaren Dachfläche, die in Wolfhagen laut Aussage lokaler Akteure bei 4000 Dächern liegt, von denen ca. 1.500 bereits mit PV-Modulen bestückt sind, ist dieser Zuwachs durchaus vereinbar. Angesichts der damit verbundenen weiteren Erhöhung der Netzlasten, sollte neben der Anpassung der Betriebsmittel und der Etablierung eines Netzmonitorings auch die Regelfähigkeit verbessert werden, z.B. durch die Installation regelbarer Ortsnetztransformatoren.

[81] Die Abschätzung beruht auf Informationen von lokalen Akteuren aus zwei Projektworkshops (2015 und 2016) in Wolfhagen.

6.3.11.3 Zusätzliche empfohlene Maßnahmen

Alternativ zu einem zentralen Batteriespeicher bietet sich die netzdienliche Steuerung dezentraler Speicher an[82]. Zudem sollte auch der kritischen Infrastruktur im Sinne einer Absicherung gegen Versorgungsausfälle erhöhte Aufmerksamkeit gewidmet werden. Beides könnte mit dezentralen Speicheranlagen erreicht werden, die zusätzlich mit EE-Anlagen gekoppelt sind. Die sehr kleinen Speicher privater Haushalte werden für eine externe Steuerung im Sinne des Residuallastausgleichs vermutlich nur in sehr begrenztem Umfang zur Verfügung stehen, denn voraussichtlich sind nicht alle Inhaber bereit, dafür auf die Maximierung ihres Eigenbedarfs zu verzichten. Aus diesem Grunde sollte geprüft werden, ob eine Vermietung von Speichern an Haushalte durch die Stadtwerke eine wirtschaftlich vertretbare Option darstellt. Mit den Haushalten könnten Mindestkapazitäten zu bestimmten Tageszeiten vereinbart werden, um trotz der Fernsteuerung der Speicher einen gewissen Beitrag zur Eigenverbrauchserhöhung der Haushalte zu sichern. Gebäude der kommunalen Verwaltung, die Stadtwerke, die Feuerwehr und das Krankenhaus könnten jedoch durch die Ausrüstung mit Speichern einerseits gegen Stromausfälle (zusätzlich) abgesichert werden und andererseits durch die externe Steuerung dieser Speicher zur Deckung des Eigenbedarfs durch lokal erzeugten Strom beitragen. Ergänzend zu den Stromspeichern sollten diese Einrichtungen auch mit PV-Anlagen ausgestattet werden, um (zusätzlich zu evtl. bereits vorhandenen Notstromeinrichtungen) im Falle einer Netzunterbrechung die eigenen Speicher zumindest teilweise aus eigener Kraft laden zu können.

Neben den Speichern zur Rückverstromung wird im Sinne der Sektorkopplung die Installation einer Power-to-Heat-Anlage in Verbindung mit einem Heißwasserspeicher empfohlen, um die temporären Überschüsse zur Wärmegewinnung zu nutzen. Der Heißwasserspeicher sollte so integriert sein, dass er auch mit dem vom zusätzlichen BHKW erhitzten Wasser gespeist werden kann. Auf dem ehemaligen Kasernengelände könnte ein Speicher in das vorhandene Wärmenetz integriert werde n. Als weiterer Standort bietet sich die Innenstadt an, sodass mit der Versorgung des dortigen Wärmenetzes auch das Schwimmbad versorgt wird. Damit wäre auch außerhalb der Heizperiode ein relativ großer Wärmeabnehmer vorhanden.

Eine weitere Entlastung des lokalen und auch der vorgelagerten Netze kann über die Steuerung des Verbrauchsverhaltens erreicht werden. Allerdings scheint eine Steuerung von industriellen Verbrauchern (den Mineralbrunnen ausgenommen) aufgrund der ländlichen Struktur der Kommune nur sehr begrenztes Potenzial zu besitzen. Ein Demand-Side-Management (DSM) der Haushalte, also eine auf preislichen Anreizen basierende externe Steuerung von Verbrauchern,

[82] Vgl. hierzu auch Krzikalla et al. (2013), die in ihrer Studie „Möglichkeiten zum Ausgleich fluktuierender Einspeisungen aus Erneuerbaren Energien“ auf diese Problematik hinwiesen: „Die heute verfügbaren Batterien beschränken sich im Wesentlichen auf Blei-Säure- und Lithium-Ionen-Akkumulatoren. Die Kosten sind derzeit noch so hoch, dass sich die Speicherung nicht lohnt, es sei denn die Speicherung erfolgt in Batterien, die aus anderen Gründen vorhanden sind wie bei der Elektromobilität.“ (S. 68)

wird noch nicht umgesetzt. Im Haushaltsbereich fehlt es im Gegensatz zum Industriekundenbereich derzeit noch an wirtschaftlichen Möglichkeiten, flexible Stromtarife anzubieten. Zudem ist das Potenzial dieser Methode noch nicht absehbar. Immerhin zeigte die im Rahmen eines Modellprojekts untersuchte Bereitschaft zur Orientierung an lastabhängigen Tarifen, dass die Haushalte sich in ihrem Verbraucherverhalten durchaus über eine preisbasierte Steuerung beeinflussen lassen. Ein DSM der Haushalte hat also Potenzial. Deshalb wird empfohlen, den notwendigen Aufwand an Information- und Kommunikationstechnologie für die flächendeckende Einführung dieser Methode der Lastverschiebung zu bestimmen.

Zusätzlich sollte untersucht werden, welche Kundengruppen (Haushalte, Gewerbe, Industriebetriebe) bereit sind, für einen ermäßigten Tarif Versorgungsunterbrechungen in einem jeweils festzulegenden zeitlichen Rahmen zu tolerieren. Denn auch über diese zeitliche Einschränkung der Belieferung mit Strom könnte eine regionale Lastverschiebung unterstützt werden.

Wie die Modellierungsergebnisse zeigten, ist eine Erhöhung des zeitgleichen Eigenversorgungsgrades auf 100% nur mit großem Aufwand erreichbar. Eine solche vollständige elektrische Autarkie wäre im Sinne einer zellulären Struktur des Energiesystems, in dem bei Bedarf ein gewisser Lastausgleich zwischen einzelnen Zellen stattfindet, auch nicht nötig. Sinnvoller wäre es, einen regionalen Ausgleich der Residuallast innerhalb der Stadtwerkeunion Nordhessen anzustreben.

Einen Beitrag zur Verbesserung der ökonomischen Bedingungen und damit zur entsprechenden Resilienzerhöhung böte die regionale Vermarktung des lokal erzeugten Stromes. Mit der aktuellen Novelle des EEG sind hierfür verbesserte Rahmenbedingungen geschaffen worden. Die Vermarktung als regionaler Strom ist laut § 79a des EEG 2017 möglich, sofern eine vertraglich vereinbarte Lieferkette zu einem Letztverbraucher in einem Postleitzahlen-Gebiet mit einer maximalen Distanz von 50 km vorliegt. Mit diesem Radius ist mehr als das Netzgebiet Wolfhagens abgedeckt. Die regionale Kennzeichnung des Stromes könnte insbesondere auch die Mitgliedschaft in der Wolfhagener Bürgerenergiegenossenschaft attraktiver machen, womit die Kapitalbasis der Genossenschaft und damit auch der Stadtwerke gestärkt würde.

Eine solche direkte regionale Vermarktung bietet sich zukünftig vor allem für Anlagen an, die aufgrund ihrer langen Laufzeiten nicht mehr im Rahmen der EEG-Umlage gefördert werden. Dazu zählen in den kommenden Jahren zwar nicht die im Besitz der Stadtwerke befindlichen Anlagen, aber die älteren Wolfhagener Windparks kämen hierfür in Frage.

6.3.11.4 Zusammenfassung

Die für Wolfhagen vorgeschlagenen Maßnahmen tragen zur Resilienzsteigerung in unterschiedlichem Maße bei. Ihre Zuordnung zu den Fähigkeiten und Designprinzipien resilienter Systeme zeigt, dass ein positiver Beitrag zur Widerstandsfähigkeit und Adaptivität erwartbar ist (vgl. Tabelle 6.69).

Die *Widerstandsfähigkeit* der Energieversorgung kann mithilfe des zusätzlichen BHKW gesteigert werden, weil mit dieser zusätzlichen Anlage die funktionelle Redundanz in der Erzeugung erhöht wird, was insbesondere für mögliche zukünftige Insellösungen wertvoll ist. Redundanz würde auch durch dezentrale Speicher gefördert, die zusammen mit gekoppelten EE-Anlagen an kritischen Infrastruktureinrichtungen (wie dem Krankenhaus, der Verwaltung, Polizei, Feuerwehr usw.) installiert sind. Im Sinne einer klimaschonenden Stromerzeugung sollte (bilanziell) ein Betrieb des BHKW auf der Basis von erneuerbarem Methan angestrebt werden.

Daneben kann das BHKW vor allem auch auf die höher gelagerten Netzebenen dämpfend wirken, indem es Bedarfsspitzen abfängt. Dies gilt ebenso für eine stromgeführte Fahrweise der bereits vorhandenen BHKW der Biogasanlage.

Neben diesen regelbaren Erzeugungsanlagen würde auch eine Power-to-Heat-Anlage mit angeschlossenem Heißwasserspeicher im Sinne einer flexiblen Kopplung von Elektrizitäts- und Wärmenetz zur Widerstandsfähigkeit der Energieversorgung in Wolfhagen beitragen. Im Unterschied zum zusätzlichen BHKW, das für die Reduktion positiver Residuallast zuständig ist, würde über Power-to-Heat und den Heißwasserspeicher die negative Residuallast, also die Überschüsse im Wolfhagener Netz abgefangen. Damit könnte nicht nur das Netz entlastet, sondern auch die lokal erzeugte Energie in erhöhtem Maße vor Ort genutzt werden.

Tabelle 6.69: Zuordnung der für Wolfhagen vorgeschlagenen Maßnahmen (grün) zu den Fähigkeiten und Designprinzipien resilienter Systeme.

Widerstandsfähigkeit	Adaptivität	Innovationsfähigkeit	Improvisationsfähigkeit
Speicher/ Puffer / Redundanz: zusätzl. BHKW für Bedarfsspitzen + netzdienliche Fahrweise der Biogasanlage, Power-to-Heat und Heißwasserspeicher, dezentrale Speicher an kritischer Infrastruktur, netzdienliche Steuerung dezentraler Speicher Betrieb einer Power-to-Gas (PtG) Anlage im Stadtwerkeverbund Nordhessen, Residuallastausgleich im Stadtwerkeverbund Nordhessen	**Optionale Kopplungen:** Power-to-Heat und Heißwasserspeicher für Wärmenetze, Wärmeauskopplung bei Rückverstromung des Gases aus PtG-Anlage bzw. Nutzung des Gases im Verkehrssektor **Rückkopplungen, Subsidiarität:** Netzmonitoring, (regelbare Ortsnetztransformatoren) **Ressourcenverfügbarkeit:** Demand-Side-Management, Versorgungssicherheitstarife, Prosumerhaushalte mit netzdienlich regelbaren Stromspeichern	**Reorganisationsfähigkeit/ Driftkorrektur/Erkennen:** Datenbasis aus Netzmonitoring **Akteure (handlungsbereit und –fähig):** Regionale Vermarktung, Entwicklung einer gemeinsamen Leitorientierung	**Erhöhte Leistungsreserven/ Ressourcen durch Reduzierung der Anforderung an Systemleistungen:** dezentrale Speicher an kritischer Infrastruktur und in Prosumerhaushalten **(unverplante) Ressourcen:** technisch, institutionell, finanziell

Zur Verbesserung der *Adaptivität* könnten die letztgenannten Anlagen ebenfalls beitragen, indem sie einen Teil der vermutlich ansteigenden Energiemengen aus den zahlreicher werdenden PV-Dachanlagen abnehmen und für örtliche Wärmeabnehmer erschließen. Daneben würden dezentrale Speicher an kritischen Infrastruktureinrichtungen zu einer erhöhten Adaptivität beitragen, wenn sie durch entsprechende Fernsteuerung zur Speicherung von Überschüssen aus dem Wolfhagener Netz herangezogen werden. Der Adaptivität könnte auch das zusätzliche BHKW dienen, denn mit ihm stünde eine Ressource zur Verfügung, die im Bedarfsfall auch über die ihr zugedachte Funktion der Reduktion von Lastspitzen hinaus als kontinuierliche Erzeugungsanlage fungieren kann. In dieser Betriebsweise kann das BHKW der Wärmeerzeugung dienen oder, falls die Netzstruktur dies zulässt, einen zumindest teilweisen Inselbetrieb ermöglichen.

Auf lange Sicht kann sich das Netzmonitoring zudem auch positiv auf die *Innovationsfähigkeit* auswirken, wenn damit gezielte Maßnahmen zur Verstärkung der Netzinfrastruktur bzw. der Regelung ermöglicht werden. In diesem Zusammenhang wären vor allem regelbare Ortsnetztransformatoren hilfreiche Elemente in Netzgebieten mit stark schwankenden Lasten.

Die Designprinzipien Diversität, Modularität, Effizienz, Ressourcenverfügbarkeit sowie handlungsbereite und fähige Akteure wurden von den mithilfe der Vulnerabilitätsanalyse abgeleiteten Maßnahmenempfehlungen nicht abgedeckt. Im Rahmen der Analyse wurden keine auffallenden Defizite identifiziert, die ihre besondere Betonung erforderten. Das heißt nicht, dass eine Stärkung

dieser Prinzipien unnötig ist. Ihre Berücksichtigung bei zukünftigen Änderungen und Ergänzungen des lokalen Energiesystems würde in jedem Falle auch zur Erhöhung der Resilienz beitragen.

6.3.12 Richtungsgebende Einflussfaktoren

Wie in Kapitel 6.2.8 werden in den folgenden Abschnitten Treiber und Hemmnisse (Impulse) für eine gerichtete Umsetzung der Energiewende mit Bezug auf Resilienz in Wolfhagen gesammelt und nach den Einflussfaktoren des sog. Schildkrötenmodells strukturiert: Regulativer Push, Anreiz Pull, Zivilgesellschaftlicher Push, Technologischer Push, Market Pull und Vision Pull. Zudem wird eine zeitliche Differenzierung mit Bezug auf die Novellierungen des EEG 2012 und 2014 vorgenommen.

6.3.12.1 Technologischer Push

Die Energiewende in Wolfhagen profitierte von den technologischen Entwicklungen im Bereich der erneuerbaren Stromerzeugung und deren Kostendegression. Weiterhin stellen auch hier insb. Technologien zur Umwandlung von Solar- und Windenergie sowie zur Nutzung von Biomasse die wichtigsten technologischen Treiber der regionalen Energiewende dar. Der bisherige Schwerpunkt der Energiewende in Wolfhagen lag auf der Umstellung der Stromerzeugung, basierend auf der Nutzung von Photovoltaikanlagen, Windkraftanlagen und Biogasanlagen sowie BHKW. Diese Maßnahmen vergrößerten die lokale Ressourcenbreite und -diversität des Systems. Neben der Stromerzeugung spielte vor allem die Entwicklung der Kraft-Wärme-Kopplung in BHKWs, der Ausbau von Nahwärmenetzen und deren gesonderte Förderung durch das Land Hessen, sowie die Installation von Solarthermie eine Rolle. Mittels dieser Technologien konnte ein kleiner Anteil der Wolfhagener Wärmeversorgung auf nicht-fossile Energieträger umgestellt werden. Dieser Bereich soll in Zukunft noch stärker forciert werden.

„Also im Moment, wie gesagt, ich würde gerne den Fokus stärker auf den Wärmebereich legen. Im Moment ist es ja so: Wir haben deutlich über 50 % Ölheizungen in Wolfhagen.“ (I-WHG4: 69)

Aufgrund der geänderten Rahmenbedingungen (EEG 2012, 2014) und mit dem Erreichen der bilanziellen elektrischen Energieautarkie sollen neue Geschäftsfelder und Technologien erschlossen werden. Alternative Konzepte für den Solarbereich, wie der direkte Verbrauch von produziertem Strom in Kombination mit Speichertechnologien, werden verstärkt diskutiert. Des Weiteren soll in Zukunft durch den stärkeren Einbezug von Speichertechnologien eine höhere Versorgungssicherheit für Strom und Wärme garantiert werden.

„Wenn wir den Strom den wir jetzt zu viel haben, jetzt scheint gerade die Sonne und es weht möglicherweise ein bisschen Wind draußen, wenn wir den speichern könnten, das wäre natürlich ein riesengroßer Schritt, aber so weit sind wir noch nicht. Deswegen ist das Thema Demand-

Side-Management mit der Lastverschiebung als eine Zwischenantwort. Aber ganz sicher wird die Speichertechnologie noch ein ganz entscheidendes Kriterium sein für die Zukunft“ (I-WHG5: 46).

Im Gespräch sind die mögliche Installation von Batteriespeichern (z.B. Lithium-Ionen-Speicher), Power-to-Gas-, Power-to-Liquid-Anlagen und von Warmwasserspeichern. Die Entwicklungen in diesem Bereich werden letztendlich von den zukünftigen Kostenfaktoren und der Praktikabilität der Produkte abhängen. Auch die Installation eines flexiblen Gaskraftwerkes zum Ausgleich von Fluktuationen wird in Erwägung gezogen (vgl. I-WHG5: 70). Die Installation solcher Speichereinheiten und Flexibilisierungsmaßnahmen wird die Resilienz des dezentralen Systems erhöhen.

Neben dem Ausbau von Speicher- und Wärmetechnologien soll auch der Mobilitätssektor ausgebaut und Energieeffizienzmaßnahmen vorangetrieben werden. Der kostengünstige Erwerb von LED-Leuchten und die Entwicklung von hocheffizienten Wärmepumpen konnten bereits zu einer Effizienzsteigerung in Wolfhagen beitragen. Solche Effizienzmaßnahmen wurden bisher vor allem in Gewerbebetrieben und im öffentlichen Sektor getätigt (vgl. I-WHG2: 246), jedoch sollen eine verstärkte Aufklärung und Förderprogramme diesen Fortschritt auch in privaten Haushalten vorantreiben.

„Und das erste Projekt war jetzt, dass man zum Beispiel die Pumpen austauschen kann. Die Hocheffizienzpumpen brauchen ja nur noch einen Bruchteil vom Strom einer alten Pumpe. Das ist so ein Thema, was wir jetzt gemacht haben. Und jetzt sollen noch verschiedene Häuser, verschiedene Projekte ausgewählt werden, wo Leute modular ihr Gebäude nach und nach auch energetisch auf einen guten Stand bringen“ (I-WHG5: 64).

Durch die verstärkten Energieeffizienzmaßnahmen wird der Strom- und Wärmebedarf und damit die Netzbelastung gesenkt und auf diese Weise auch die Resilienz des Systems erhöht. In Bezug auf den Mobilitätsektor soll die Elektromobilität verstärkt werden. Durch die Installation von zwei Elektrotankstellen wurde bereits begonnen, die nötige Infrastruktur zu errichten.

6.3.12.2 Market Pull

Die Rahmenbedingungen (EEG) waren förderlich für Investitionen in Erneuerbare, sodass die Installation von Solaranlagen und die Beteiligung an Bürgerwindanlagen eine langfristige und lukrative Anlagemöglichkeit darstellte. Dieser Umstand führte ebenfalls zu einem verstärkten Ausbau von EE-Anlagen in Wolfhagen.

„Auch unter dem Aspekt Geld irgendwo anzulegen. Nicht auf der Sparkasse verschimmeln zu lassen.“ (I-WHG2: 8)

Im landwirtschaftlichen Sektor führte ein zunehmender Preisverfall für landwirtschaftliche Güter zu der Suche nach neuen Geschäftsmöglichkeiten im Energiebereich. Somit beförderte diese Entwicklung den Bau einer Biogasanlage in Wolfhagen.

„… auf diesem Weg haben sich Landwirte zusammengetan und haben gesagt: Mensch, wir bekommen für einen Doppelzentner Weizen nur noch 10, 12 Euro. Da müssen wir etwas tun. Und haben gesagt, wir haben eigentlich so viel Kapazität hier, wir könnten auch Mais anbauen.“ (I-WHG2: 70)

Festzuhalten ist, dass die Höhe der Nachfrage insbesondere von regulativen Faktoren (z.B. EEG und damit verbundene Einspeisevergütungen) sowie Anreizen (z.B. günstige Darlehen und finanzielle Förderungen im Falle eines energieeffizienten und auf EE basierenden Sanierens und Bauens) abhängt. Bspw. hat die Reaktorkatastrophe von Fukushima dazu geführt, dass in Wolfhagen vermehrt Ökostrom-Verträge abgeschlossen wurden. Durch verminderte Richtungsimpulse auf Grund der EEG-Novellierungen (2012, 2014) kann in den Bereichen Biomasse und Solarenergie beim Anreiz Pull und beim Regulativen Push ein verminderter Impuls auf Marktseite beobachtet werden. Somit wurde mit dem Projekt „Rödeser Berg“ maßgeblich der Ausbau der Windenergie weiter vorangetrieben. Es wurde bereits erwähnt, dass das Marktverhalten privater Investoren, welche auf eher kurzfristige Gewinne abzielen, ein Problem für mögliche Investitionen in Resilienzprojekte darstellt. Die Genossenschaft fördert bereits Energieeffizienzmaßnahmen welche die Resilienz des Systems steigern können, ist jedoch ehrenamtlich organisiert und verfügt nur über sehr begrenztes Kapital.

6.3.12.3 Regulativer Push

Die Liberalisierung des Strommarktes in der EU und in Deutschland kann als maßgeblicher Treiber für die Entwicklungen in Wolfhagen bezeichnet werden. Damit verbundene Regularien wie Einspeisevorränge für EE-Strom und eine gesicherte Vergütung, können auch in Wolfhagen als wichtige Treiber und Richtungsimpulse identifiziert werden. Eine entsprechende Gesetzesgrundlage ermöglichte den Rückkauf der Netze auch gegen den Widerstand des damaligen Betreibers. Dieser Erfolg wird in Wolfhagen als Basis für die darauffolgende regionale Energiewende angesehen. Der anschließende intensive Ausbau der Wind- und Solarenergie kann zunächst auf die günstigen Voraussetzungen durch das EEG zurückgeführt werden.

„Am Anfang war es das EEG mit entsprechenden Fördermöglichkeiten. Sowohl für das Solar als auch für die Windkraft.“ (I-WHG2: 280).

Der Parlamentsbeschluss von 2008 lieferte eine entsprechende Zielsetzung für die Energiewende in Wolfhagen und festigte das Engagement relevanter politischer Akteure einschließlich der Stadtwerke als städtischem Unternehmen. Gesetzgebungen und Verordnungen, welche die Verwendung von Resilienz steigernden Technologien und Maßnahmen regulieren und bis auf das Jahr 2009 zurückgehen, (siehe Kapitel 6.3.4*)* beförderten die Anschaffung moderner und effizienter Technologien. Auch wurde in Wolfhagen durch die Nutzung von Abwärme aus Biogasanlagen gemäß des KWKG ein Beitrag zur Entlastung des Stromnetzes geleistet. Aufgrund der

unsicheren Rahmenbedingungen und sinkenden Vergütungen für Solarstrom stagnierte in Wolfhagen der Ausbau der Energiewende. Zudem wird kritisiert, dass mit der EEG-Reform 2016/2017 die Umsetzung von Bürgerenergieprojekten durch die Genossenschaft erheblich erschwert wird. Die Eigennutzung von erzeugtem Strom mittels Photovoltaikanlagen und Investitionen in Speichertechnologien könnte jedoch an Attraktivität gewinnen (siehe Kapitel 6.3.9), was wiederum resiliente Strukturen begünstigen würde. Zum Zeitpunkt der Interviews wären solche Projekte solche Projekte nur schwer umsetzbar gewesen.

„Gerade zum Beispiel Stromvermarktung, wirkliche Eigennutzung, da hängt man eigentlich auch noch in einem so großen Geflecht an Regularien drin, das wäre schön, wenn wir das anders machen könnten“ (I-WHG6: 236).

„Die gesetzlichen Rahmenbedingung müssten erst mal geschaffen werden, dass dieses Gas speichern überhaupt erst mal wieder lukrativ gemacht wird. Und wieder im Sinne der Versorgungssicherheit betrieben werden und nicht, wie gerade der Preis an der Börse ist“ (I-WHG7: 73).

6.3.12.4 Anreiz Pull

Ein fundamentaler Treiber für die Energiewende in Wolfhagen stellt die geographische Lage des Ortes dar, welche ein großes Potential zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen bietet.

„Da wir in den Regionen, das ist bundesweit ja eigentlich so, sehr große Potentiale haben, die natürlich [...] landschaftsbedingt, topographiebedingt sehr unterschiedlich sind, aber wir haben riesige Potentiale die wir nutzen können“ (I-WHG6: 56).

Wirtschaftliche Anreize in Form von garantierten Einspeisevergütungen im Rahmen des Stromeinspeisegesetzes sowie des späteren EEGs fungierten zunächst auch in Wolfhagen als wichtige Treiber und Richtungsimpulse, indem sie den Umstieg auf eine EE-Erzeugung langfristig wirtschaftlich machten und damit neue Geschäftsmodelle eröffneten. Die Liberalisierung des Strommarktes, sowie die damalige Gesetzeslage ermöglichten zudem Geschäftsmodelle, durch welche die Bürger aktiv an der Stromerzeugung beteiligt werden konnten. Die Verunsicherung durch die Finanzkrise trug laut WHG6 erheblich zu einem Anstieg von Investitionen in EE-Anlagen bei.

„Da sehe ich die Finanzkrise ganz klar. Dadurch, dass für viele Leute die klassischen Geldanlagen zu unsicher oder unattraktiv geworden sind und die dann in erneuerbare Energien gegangen sind. Also die entweder ihre eigenen Anlagen gebaut haben, oder haben sich an entsprechenden Projekten beteiligt“ (I-WHG6: 220)

Bürgernähe und Anlagemöglichkeiten stellen wesentliche Treiber in der Energiewende Wolfhagen dar. Im Rahmen der Finanzierung ermöglichten zudem ein günstiges Zinsniveau, sowie Fördermöglichkeiten durch Bund, Länder und KfW den Bau der EE-Anlagen (I-WHG5: 25).

Weitere wesentliche Treiber und Richtungsgeber stellen Förder- und Forschungsprogramme dar. Wie bereits in Kapitel 6.3.4 beschrieben, konnte durch die Kooperation mit mehreren Forschungspartnern wie dem Fraunhofer Institut für Bauphysik und der Universität Kassel die Energiewende maßgeblich vorangetrieben werden.

Mit den geänderten gesetzlichen Rahmenbedingung fielen auch im Falle von Wolfhagen wesentliche wirtschaftliche Anreize für den Ausbau in den Bereichen Solarenergie und der energetischen Nutzung von Biomasse weg. Zwar wurde die bestehende Biogasanlage in den Jahren 2013/14 erweitert, ein zusätzlicher Neubau ist jedoch unwahrscheinlich. Für den Solarbereich werden aufgrund der unrentablen Netzeinspeisung Alternativen im Bereich Eigenverbrauch diskutiert.

6.3.12.5 Skandalisierungs Push

Auch in Wolfhagen führte die mediale Berichterstattung über Klimakatastrophen und die Reaktorkatastrophe von Fukushima 2011 zu einer erhöhten Akzeptanz von EE-Projekten. Dieser hohe Grad der Akzeptanz spiegelt sich auch deutlich in der vermehrten Bürgerbeteiligung wieder. Zudem stieß der geplante Netzausbau im Rahmen des Projektes, „Südlink“ in Wolfhagen auf große Ablehnung und sensibilisierte die Bürger noch einmal verstärkt für das Thema EE-Projekte. Ein zentral gesteuerter Ansatz der Energiewende auf Bundesebene wurde in der Region noch kritischer gesehen, wohingegen der regionale Ansatz verstärkten Zuspruch fand.

„Wir brauchen nur einen lokalen, nur in Anführungszeichen, einen lokalen gesellschaftlichen Prozess. Wenn eine Regierung jetzt nicht die Bürger gegen sich aufbringen will, oder das möglichst harmonisch, akzeptanzorientiert durchsetzen will, oder umsetzen will, die Energiewende, glaube ich, dass eine zentrale Energiewende deutlich schwieriger umzusetzen ist und viel mehr Engagement bedeutet im Sinne von Aufklärungsarbeit, in Klammern, wenn es denn wirklich unumgänglich wäre die Trasse zu bauen.“ (I-WHG3: 106-107).

Dennoch gab es in letzten Jahren auch eine Gegenbewegung gegen den EE-Ausbau in Form von Windkraftanlagen am Rödeser Berg. Die im Jahre 2008 gegründete Bürgerinitiative „Keine Windkraft in unseren Wäldern“ kritisierte hauptsächlich den Windparkstandort Rödeser Berg, weniger die Windkraft als Energiequelle an sich. Ihre Hauptargumente beziehen sich auf naturschutzfachliche Gründe und die Landschaftsgestaltung. Dazu wurden u.a. Kartierungen durchgeführt sowie Daten zu bedrohten Tierarten gesammelt. Die Bürgerinitiative erhob während des Planungsprozesses zudem den Vorwurf der Intransparenz. Maßnahmen zur Öffentlichkeitsbeteiligung wurden als Mittel der Akzeptanzbeschaffung gesehen, wie die Zukunftskonferenz im Jahre 2012, die als „Beruhigungspille für die Bevölkerung“ bezeichnet wurde[83]. Durch ihre Beteiligung am Planungsprozess hat die BI jedoch eine Genehmigungsauflage erwirkt, die Abschaltzeiten für

[83] Abschlussbericht – Unterstützung der Öffentlichkeitsarbeit und Durchführung der Zukunftskonferenz „Energiewende in Wolfhagen“, Stadt Wolfhagen, Mai 2012, S. 54

die Windräder zum Schutz von Fledermäusen vorschreibt. Von politischer Seite wurde diese Gegenbewegung von dem Bündnis 90/Die Grünen und der neu gegründeten Wählergemeinschaft „Bündnis Wolfhager Bürger“ BWB unterstützt.

Auch zu Problematiken, welche durch verstärkte Gefährdungen der Versorgungssicherheit (Resilienz) im Rahmen der anstehenden Transformationsprozesse akut werden können, muss eine verstärkte Aufklärungsarbeit geleistet werden. Momentan befassen sich hauptsächlich Medien mit möglichen Szenarien und eine fundierte Auseinandersetzung mit der Thematik unter Einbezug der Bevölkerung fehlt bisher.

6.3.12.6 Vision Pull

Die Initiativen, Ziele und Maßnahmen in der Stadt Schönau bekamen Vorbildfunktion für Wolfhagen. Der erfolgreiche Energiewendeprozess, der Rückkauf der Netze, die aktive Bürgerbeteiligung durch das Genossenschaftsmodell und die damit einhergehende Steigerung der regionalen Wertschöpfung stellten wichtige richtungsgebende Faktoren dar. Die folgenden fünf Leitorientierungen spielten bei der Richtungsgebung des Energiewendeprozesses in Wolfhagen eine maßgebliche Rolle:

1. **Unabhängigkeit von Energieimporten**

„Ich finde es wichtig, dass wir uns ein Stück weit unabhängig machen sollten von den Importen“ (I-WHG5:3)

2. **Vermehrter Wohlstand**

„…eben auch wirtschaftlich durchaus eine Chance bietet. Und die brauchen wir als Kommune einfach, weil die kommunalen Handlungsfelder gerade was die Einnahmesituation betrifft ein besonderes Problem darstellt.“ (I-WHG5: 3)

3. **Aktive Bürgerbeteiligung**

„Also wenn sie es rein wirtschaftlich sehen, würde es sinnvoll sein 100 % über Darlehen, ein bisschen Eigenkapital vielleicht noch und keine Beteiligung, aber das wollten wir eben nicht. Wir haben von Anfang an gesagt, wir wollen eine breite Bürgerbeteiligung“ (I-WHG5: 26).

4. **Wertschöpfung vor Ort**

„Und das ist ja ein Ziel auch gewesen der hiesigen dezentralen Energiewende, dass auch eine erhöhte Wertschöpfung stattfindet“ (I-WHG2: 416)

5. **Umweltschutz und Nachhaltigkeit**

„Hier können wir einmal wirklich sichtbar etwas demonstrieren, wir gehen in Richtung erneuerbare Energien, Klimaschutz, Ressourcenschonung. Natürlich ist auch ein Punkt gewesen,

noch vor der gesamten Diskussion zum Klimawandel, Endlichkeit der Ressourcen.“ (I-WHG6: 52)

6.3.12.7 Metafaktoren

Auch in Wolfhagen waren und sind die Reaktorkatastrophe von Fukushima und die Krise in der Ukraine wichtige Treiber für den Umbau des Energiesystems. Das Bewusstsein zur Notwendigkeit einer nachhaltigen und klimaverträglichen Energieerzeugung bildete die Basis um die Bürger aktiv in den Prozess einzubinden. Zusätzlich ließ sich mit Blick auf die Gefahr möglicher Terroranschläge und eines Black Outs sich auch eine vermehrte Bereitschaft zu Investitionen in die erweiterte Versorgungssicherheit bzw. Resilienz beobachten.

6.3.12.8 Das Schildkrötenmodell Wolfhagen

Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen richtungsgebenden Einflussfaktoren werden mit Hilfe der des Schildkrötenmodells strukturiert und visualisiert (vgl. Abbildung 6.55 und Abbildung 6.56).

Dabei wird eine Unterscheidung vorgenommen nach den bereits vorhandenen Resilienz steigernden Faktoren sowie den zukünftig notwendigen Impulsen.

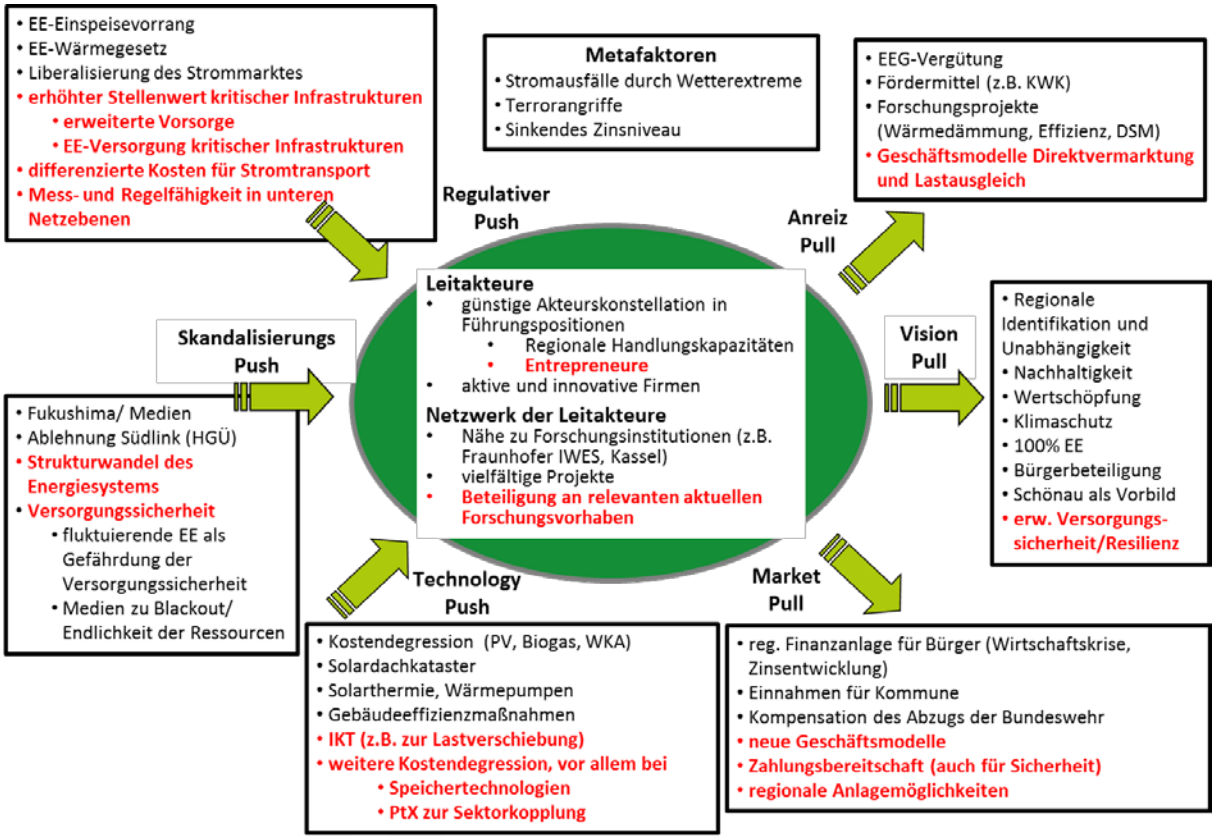


Abbildung 6.55. Schildkrötenmodell mit Impulsen in Richtung auf ein resilienteres Energiesystem der Stadt Wolfhagen für die Zeit nach dem EEG 2012; Richtungsimpulse schwarz: bereits vorhanden, rot: zukünftig notwendig (aufbauend auf (Brand 2016))

Neben ihrem Bezug zu den Fähigkeiten eines resilienten Systems können die identifizierten Maßnahmen auch mit den im Schildkrötenmodell des regionalen Innovationssystems (vgl. Kapitel zur regionalen Energieversorgung 6.3.11) enthaltenen Wirkfaktoren in Beziehung gesetzt werden.

Die Gestaltungsvorschläge für Wolfhagen lassen sich dabei den Faktoren ‚Technology Push' und ‚Market Pull' zuordnen. Damit auch die geeigneten Rahmenbedingungen für ihre Realisierung geschaffen werden können, sollten vor allem die rot markierten Maßnahmen der Faktoren ‚Regulativer Push' und ‚Anreiz Pull' beachtet bzw. umgesetzt werden. Sie sind allein von Wolfhagen aus nicht realisierbar, würden jedoch zur Resilienzerhöhung der Energieversorgung in der Region beitragen.

Die rot markierten Elemente der Bereiche Skandalisierungs-Push und Vision Pull geben die für eine Orientierung in Richtung Resilienz vor Ort noch zu gering ausgeprägten Wahrnehmungen und Zielvorstellungen wider.

Entrepreneure und die Beteiligung an aktuellen Forschungsvorhaben sind ebenfalls für eine Transformation des Energiesystems in Richtung höherer Resilienz notwendig und deshalb unter den inneren Systemfaktoren rot hervorgehoben.

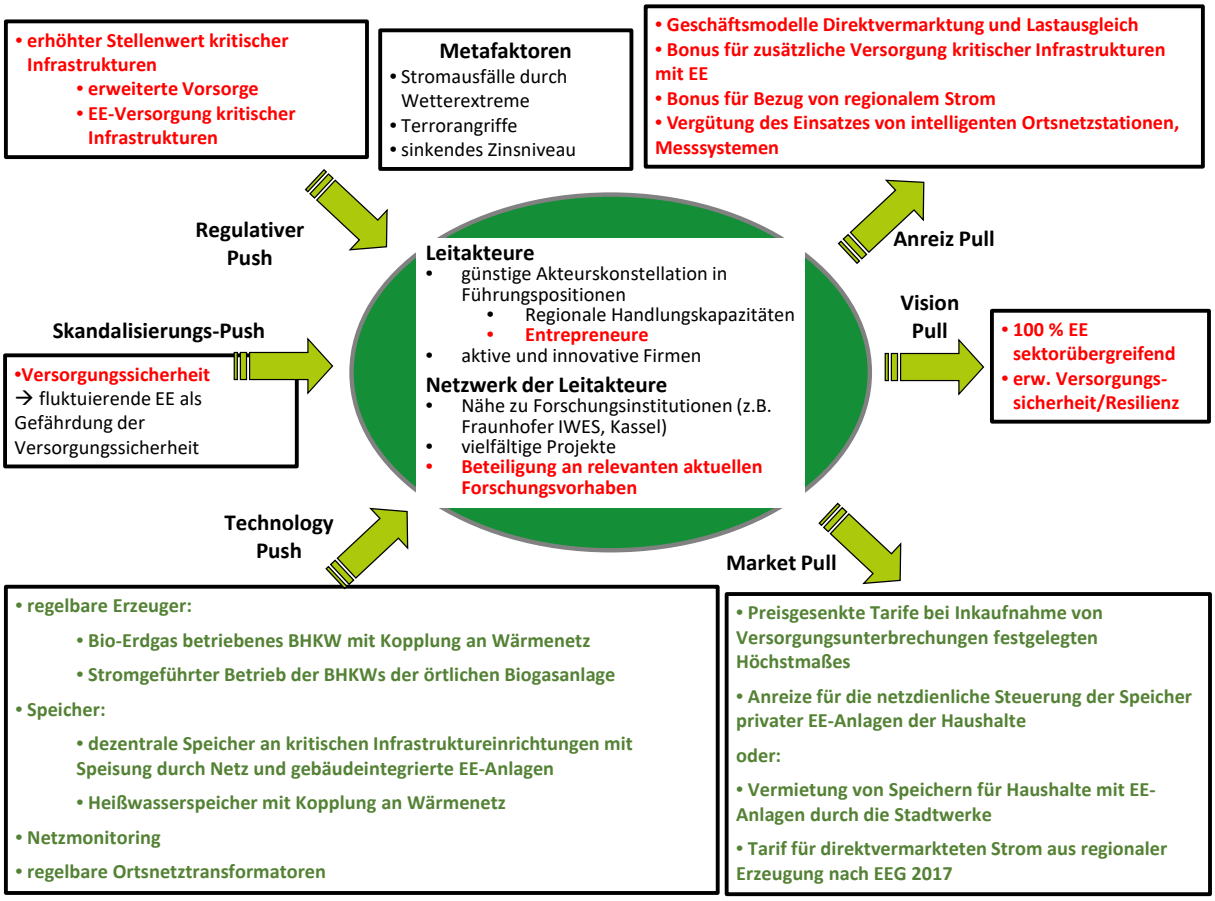


Abbildung 6.56: Schildkrötenmodell des regionalen Innovationssystems Wolfhagen (nach EEG 2012) mit den im Gestaltungsleitbild formulierten Vorschlägen zur Erhöhung der Resilienz der Energieversorgung (grün) sowie notwendigen unterstützenden Änderungen und Maßnahmen im Bereich der richtungsgebenden Einflussfaktoren sowie im System selbst (rot) (aufbauend auf (Brand 2016)).

6.3.13 Zusammenfassung und Fazit der Fallstudie Wolfhagen

Die Stadt Wolfhagen liegt im Norden Hessens rund 25 km westlich von Kassel. Mit ihren ca.13.000 Einwohnern[84] und einer Gesamtfläche von 112 km² ist das Gebiet der Kommune nur in geringem Maße urbanisiert. Wolfhagen ist eine Auspendlerkommune, für die insbesondere nach der Schließung eines großen Bundeswehrstandortes im Jahre 2008 die Ansiedlung und Entwicklung von Gewerbe- und Handelsbetrieben große Bedeutung besitzt, um die wirtschaftliche Situation der Stadt zu verbessern. Die Stadtwerke Wolfhagen als einziger lokaler Netzbetreiber und Energieversorger trugen zur wirtschaftlichem Stabilisierung und Weiterentwicklung der Kommune durch eine sehr vorausschauende und innovative Unternehmenspolitik in erheblichem Maße bei.

Die vorherrschenden Leitorientierungen sind in Wolfhagen eher ökonomisch geprägt. Die Steigerung der regionalen Wertschöpfung, die regionale Unabhängigkeit und die Wirtschaftlichkeit der Energieversorgung spielen eine wichtige Rolle. Daneben sind in Wolfhagen nach wie vor auch die ursprünglichen Leitorientierungen des Klima- und Umweltschutzes sowie der Nachhaltigkeit präsent.

Durch eine breite Zustimmung zur regionalen Umsetzung der Energiewende, eine günstige Akteurskonstellation in Führungspositionen und den Kontakt zu Forschungsinstitutionen konnten die regionalen Handlungskapazitäten Wolfhagens sehr weit ausgeschöpft werden und die Energiewende beginnend mit dem Rückkauf des regionalen Elektrizitätsnetzes im Jahre 2006 bis zur bilanziellen Selbstversorgung mit Strom aus erneuerbaren Quellen im Jahre 2015 vergleichsweise schnell durchgeführt werden. Maßgeblicher Treiber der Energiewende in Wolfhagen war die Liberalisierung des Strommarktes und die damit verbundenen neuen Regulierungen wie der Einspeisevorrang für EE-Strom und die gesicherte Vergütung.

Die bilanzielle Selbstversorgung bei einem zeitgleichen Eigenversorgungsgrad von ca. 70%, welche im Jahr 2015 erreicht wurde, konnte durch Investitionen der Stadtwerke und der mit ihr verbundenen Bürgerenergiegenossenschaft in eine große PV-Freiflächenanlage und einen Windpark ermöglicht werden. Zudem trugen schon vor den Aktivitäten der Stadtwerke ein starkes privates Engagement und die Initiative der lokal ansässigen Energieagentur des Landkreises Kassel dazu bei, dass große EE-Anlagen wie ein Windpark und zwei Freiflächen PV-Anlagen sowie zahlreiche PV-Dachanlagen errichtet wurden.

Über die bilanzielle Selbstversorgung hinaus wird die Energiewende in Wolfhagen weiter vorangetrieben: Nach der bilanziellen Selbstversorgung mit Strom soll auch der zeitgleiche jährliche Eigenversorgungsgrad bis 2025 auf ca. 90% angehoben werden.

[84] Hessisches Statistisches Landesamt, Bevölkerungsstand am 31.12.2015 (Landkreise und kreisfreie Städte sowie Gemeinden, Einwohnerzahlen auf Grundlage des Zensus 2011)

Eine Sektorkopplung ist in Wolfhagen mit den von Biogas-BHKWs gespeisten Nahwärmenetzen realisiert worden. Von ihnen wird aber bisher lediglich ein kleiner Teil der Wolfhagener Haushalte bzw. öffentlichen Einrichtungen versorgt. Im Rahmen von (Forschungs-)Projekten wurden u.a. Effizienzmaßnahmen umgesetzt und ein Pilotversuch zum Demand-Side-Management (DSM) begonnen. Technisch betrachtet gibt es in Wolfhagen bereits einen weit überdurchschnittlichen Anteil an Elektroenergiegewinnung aus erneuerbaren Quellen, die Steuerung des Elektrizitätsnetzes ist aber noch vollständig von Regelgrößen des vorgelagerten Netzes abhängig. Darüber hinaus gibt es aufgrund der stark fluktuierenden Charakteristik der PV- und Windenergieanlagen große Schwankungen der Residuallast, mit denen neben den unteren Netzebenen (Mittel- und Niederspannungsnetz, MS- und NS-Netz) die einzige vorhandene Kopplungsstelle zur vorgelagerten Hochspannungsnetzebene (HS-Netz) belastet wird. Das lokale Energiesystem ist neben den Transformationsstellen vor allem an der HS/MS-Kopplungsstelle vulnerabel. Der lokale Ausgleichsbedarf in der Elektroenergieversorgung ist hoch, der Anteil von Elektroenergieerzeugungsanlagen, die ohne Ertragsverluste hinzunehmen regelbar sind, ist jedoch gering. Dadurch sind die Handlungsmöglichkeiten zur Verringerung der Residuallastschwankungen stark einengt.

Klimatisch sind mittelfristig in Hessen vermutlich nur geringe Veränderungen zu erwarten mit leicht erhöhter Bedeckung im Winter und Frühjahr sowie erhöhten mittleren Windgeschwindigkeiten im Winter. Für Wolfhagen kann mittelfristig mit einem leichten Anstieg der Einwohnerzahl gerechnet werden, der aufgrund steigender Effizienzmaßnahmen vernachlässigt werden kann. Die lokale Energieerzeugung ist unter diesen Rahmenbedingungen voraussichtlich eher mit Problemen konfrontiert, die sich aus den Veränderungen bei der Transformation des Energiesystems im Rahmen der Energiewende selbst ergeben.

Die Modellierung im Rahmen der Fallstudie Wolfhagen ergab im Zukunftsszenario für das Jahr 2030 nur geringe Veränderungen des zeitgleichen Eigenversorgungsgrades, weil die PV-Anlagen, die den größten Leistungsanteil des Anlagenzubaus ausmachen, an den typischen Tagesgang der PV-Energiegewinnung gebunden sind (schwenkbare Anlagen wurden in der Modellierung nicht berücksichtigt). Bis zum Jahr 2030 werden die Netzlasten in Wolfhagen durch den erwartbaren Zubau vor allem an PV-Anlagen und ein Repowering vorhandener Windenergieanlagen (WKA) steigen, d.h. auch stärkere Lastwechsel sind zu befürchten. Bisher sind keine Möglichkeiten vorhanden, MS/NS-Kopplungsstellen an die Lastwechsel anzupassen oder die Residuallast durch Speicher oder Erzeuger auszugleichen.

Wie in der Modellierung gezeigt werden konnte, könnten regelbare Erzeuger, wie z.B. ein BHKW, zum Ausgleich der Residuallast und der Erhöhung des zeitgleichen Eigenversorgungsgrades am effektivsten beitragen. In Kombination mit dem bereits vorhandenen Biomasse-BHKW ergab sich in der Modellierung eine Erhöhung des zeitgleichen Eigenversorgungsgrades auf fast 90%. Dabei würde jedoch der Betrieb eines zusätzlichen BHKW auf Erdgasbasis die Umstellung auf 100%

erneuerbare Energien verhindern, es sei denn, dieses BHKW wird mit Bio-Erdgas betrieben. Auch andere Maßnahmen wie Demand-Side-Management (DSM) oder allein schon der netzdienliche Betrieb der örtlichen Biogas-BHKWs könnten in reduziertem Ausmaß zur Verringerung der Netzlasten beitragen.

Die ebenfalls durchgeführte Analyse der lokalen Wertschöpfung zeigte, dass vor allem der Betrieb von EE-Anlagen zur lokalen Wertschöpfung beiträgt. Dabei sind die Betreibergewinne von großer Bedeutung, die in Wolfhagen hauptsächlich im PV-Bereich anfallen. Die regionale Wertschöpfung könnte erheblich gesteigert werden, wenn die Betreiber und auch die Eigenkapitalgeber vollständig in Wolfhagen ansässig wären. Die regionale Wertschöpfung steigt mittelfristig (2030) vor allem durch das voraussichtliche Repowering vorhandener WKA, für PV ist trotz wachsender Anlagenzahlen wegen der niedrigen Renditeerwartungen durch den Rückgang der Förderung mit einer Verringerung der regionalen Wertschöpfungseffekte zu rechnen. Der größte Anteil der regionalen Wertschöpfung entfällt trotzdem auch 2030 auf PV-Anlagen. Für ein potenzielles BHKW, wie es für den Ausgleich der Residuallastschwankungen eingesetzt werden kann, ist zu beachten, dass die zusätzliche regionale Wertschöpfung durch den Betrieb dieser Erzeugungsanlage vermutlich geringer ausfallen wird, als es eine Kalkulation auf Basis der vermiedenen Zahlungen an den Übertragungsnetzbetreiber für die ansonsten benötigte Vorhalteleistung erwarten lässt.

In Wolfhagen zeigte sich, dass Resilienz als erweiterte Versorgungssicherheit unter den Akteuren eine hohe Anschlussfähigkeit besitzt. Darüber hinaus ist die regionale Energieversorgung mit Problemen konfrontiert, zu deren Lösung das Leitkonzept Resilienz beitragen würde. Umsetzbar sind Maßnahmen im Sinne des Leitkonzepts aus Sicht der Akteure aber nur, wenn auch die Wirtschaftlichkeit der notwendigen Anpassungen des Energiesystems durch geeignete Rahmenbedingungen gewährleistet ist. Die Handlungsebene „Region“ erwies sich als zu weit untergeordnet, um die notwendigen Veränderungen der Rahmenbedingungen zu steuern.

Unterstützt von technologischen Entwicklungen und Fördermaßnahmen konnten bereits eine Reihe von Resilienz steigernden Maßnahmen, wie z.B. bei der Effizienzsteigerung oder der Sektorkopplung durch Nahwärmenetze in Wolfhagen umgesetzt werden. Mit den durch die jüngsten EEG-Reformen veränderten Rahmenbedingungen stagnierte jedoch der Ausbau der Energiewende in Wolfhagen. Für die lokale, mit den Stadtwerken verbundene Energiegenossenschaft, erschwerte sich die Umsetzung von Bürgerenergieprojekten. Bei Privathaushalten hingegen verbesserten sich die Möglichkeiten zur Eigennutzung des erzeugten Stroms und zur Verwendung von Speichertechnologien, die einen Beitrag zur Resilienzerhöhung leisten könnten.

6.3.13.1 Fazit

Wolfhagen hat bereits erste Schritte im Sinne einer Resilienz steigernden Ausgestaltung seiner Energieversorgung, die bereits auf einem vergleichsweise hohen Anteil erneuerbarer Energien

beruht, unternommen. Der Begriff der Resilienz hat sich als durchaus anschlussfähig unter den maßgeblichen Akteuren erwiesen. Allerdings wird der Wirtschaftlichkeit eine höhere Bedeutung zugemessen, als dem Handlungsbedarf im Sinne von Versorgungssicherheit.

Um den Weg in Richtung eines resilienteren Energiesystems im Einklang mit den regionalen wirtschaftlichen Möglichkeiten weiterzugehen, müssten die Rahmenbedingungen geeignete Geschäftsmodelle, bei denen die Versorgungssicherheit im Vordergrund steht, zulassen. Darüber hinaus würden vor allem eine weitere Kostendegression bei relevanten Technologien (z.B. Speichern), ein erhöhter Stellenwert der erweiterten Vorsorge und der Versorgung kritischer Infrastrukturen sowie auch Verpflichtungen zur Mess- und Regelfähigkeit in den unteren Netzebenen zur regionalen Umsetzung von Resilienz steigernden Maßnahmen beitragen.

6.4 Vergleich der Ergebnisse der regionalen Fallstudien Landkreis Osterholz und Wolfhagen

Im Rahmen des Projektes Resystra wurden zwei regionale Fallstudien untersucht mit dem Ziel die Resonanzfähigkeit Leitkonzepts Resiliente Energiesysteme zu untersuchen. Darüber hinaus galt es, einen Beitrag zu leisten zu einer resilienteren Gestaltung der beiden regionalen Energiesysteme. Zu diesem Zweck wurden Systembeschreibungen und Systemanalysen durchgeführt, inklusive eines Modells des Energiesystems, einer Akteursanalyse, Wertschöpfungsanalyse, Leitorientierungsanalyse sowie einer Vulnerabilitätsanalyse. Die identifizierten Richtungsimpulse wurden mit Hilfe des Schildkrötenmodells strukturiert. Auch wurden auf Basis des Modells Szenarien einer möglichen zukünftigen Entwicklung des regionalen Energiesystems erstellt bis zu den Jahren 2030 und 2040. All diese Ergebnisse flossen in die Erarbeitung eines Gestaltungsleitbildes ‚Resilientes Regionales Energiesystem für den Landkreis Osterholz' bzw. die Stadt Wolfhagen ein.

Für die Untersuchung wurden zwei Regionen ausgewählt, die sich schon seit längerer Zeit durch ein vorbildliches Engagement in der Energiewende mit Fokus auf eine energetische Selbstversorgung auszeichnen. Sie unterscheiden sich allerdings geographisch (Norden vs. Mitte Deutschlands mit je unterschiedlichem Angebot an Solarstrahlung und Windenergie) und strukturell (Stadt vs. Landkreis, Bevölkerungszahl, Gebietsgröße). Es handelt sich zudem nur um Fallstudien mit einer extrem limitierten Verallgemeinerungsfähigkeit der Ergebnisse. Wir konnten aber feststellen, dass bei der Betrachtung der strukturellen Vulnerabilitäten, der Wertschöpfungsunterschiede, der erarbeiteten Gestaltungsleitbilder und ausgefüllten Schildkrötenmodelle sich sehr wohl Aspekte ergeben, die sich auch auf andere Regionen übertragen lassen.

Die Annahme, dass es sich bei einem Gebiet um eine städtische Struktur handele und beim anderen um ein ländliches Gebiet ist nicht richtig. Der Landkreis Osterholz hat eine um einen Faktor 6 größere Fläche und eine um Faktor 9 höhere Bevölkerungszahl. Dies wirkt sich auch auf die

elektrische Infrastruktur aus. Während es in Wolfhagen nur ein Umspannwerk hat, gibt es im Landkreis Osterholz vier Umspannwerke.

Die Regionen unterscheiden sich auch in Bezug auf die vorhandenen Akteure. Im Landkreis Osterholz dominiert das Engagement von innovativen Unternehmen und Privatpersonen. Mehrere Gemeinden sind an den noch jungen Osterholzer Stadtwerken beteiligt, jedoch konnten sich diese bei Veröffentlichung des Raumordnungsprogrammes keine Windflächen sichern und besitzen nur eine marginale Anzahl an Erzeugungsanlagen. Betrachtet man die Organisationsform der Akteure der Energiewende, lässt sich festhalten, dass zwar mehrere Forschungs- und Entwicklungsprojekte im Landkreis durchgeführt worden sind, wie z.B. das durch das EU-Förderprogramm LEADER finanzierte Projekt „Green Tech OHZ“ (2011), das durch EFRE geförderte regionale Wachstumsprojekt „Energiekompetenz Osterholz“ (2011 bis 2014) oder das Netzwerk „Energiewende Osterholz 2030“, aber erst Ende des Jahres 2015 eine Regionalmanagerin angestellt wurde. Das Hauptanliegen der Regionalmanagerin ist es die Energiewende im Landkreis voranzutreiben und zu institutionalisieren. Die fehlende Institutionalisierung bzw. professionelle Organisation des Prozesses im Landkreis können als eine Ursache ausgemacht werden, weshalb der Ausbau langsamer und mit geringeren Wertschöpfungseffekten stattfinden, was sich auch auf die Besitzverhältnisse und damit auch auf die Wertschöpfung in der Region auswirkt. Photovoltaik-Dachanlagen sind hauptsächlich in Privatbesitz. Kenngrößen sind hier 0,015 Anlagen/Einwohner was 0,3 kWp/Einwohner entspricht. Windkraftanlagen, die aufgrund von Regularien, Genehmigungsprozessen und heutzutage auch den benötigten finanziellen Investitionssummen, kaum mehr von Privatpersonen betrieben werden können, sind hingegen in Hand von landkreisfremden Investoren und Betriebsgesellschaften. Der Abfluss der Erträge zeigt sich deutlich beim Vergleich der regionalen Wertschöpfung.

In der Stadt Wolfhagen hingegen hat sich eine enge Zusammenarbeit aller Akteure etabliert, auf fast institutioneller Ebene. Aktive Akteure sind neben innovativen Firmen und den Stadtwerken, die Energie-Agentur und die vor Ort ansässige und tätige Energiegenossenschaft. Die Anlagen liegen entweder direkt in der Hand privater Bürger oder sind über eine Beteiligung der Stadt in der Hand der Stadtwerke, an denen auch die Energiegenossenschaft beteiligt ist. Die Stadtwerke betreiben den leistungsstärksten Windpark sowie größere Photovoltaikfreiflächenanlagen auf dem Gemeindeflächen. Die Anlagendichte der Photovoltaikdachflächenanlagen ist mit 0,04 Anlagen/Einwohner bzw. 2,5 kWp/Einwohner deutlich höher als im Landkreis Osterholz. Dies verdeutlicht noch einmal wie sehr kleine Photovoltaikanlagen zu einer gleichmäßigen Verteilung im Raum und der Besitzverhältnisse führen. Hinzu kommt in Wolfhagen dazu, dass die Anlagen zu einem Zeitpunkt gebaut wurden, als die Förderung und auch durch Solaranlagen erzielten Renditen höher waren. Nachfolgend sind die Besitzstrukturen der Anlagen in den Regionen zusammenfassend skizziert:

Auf dem Gebiet des **Landkreises Osterholz:**

- Bürgerenergiegenossenschaften in den Gemeinden Grasberg, Ritterhude und Schwanewede, die gemeinschaftlich Solaranlagen betreiben
- PV-Dachanlagen 1773 Stück. mit 30.325 kW (hauptsächlich in Privathand)
- 4x PV-Freiflächenanlagen mit 19258 kW, 75% der Betreibergesellschaften regional ansässig 1x 1.950 kW (Privatinvestor), 1x 4.126 kW (Privatinvestor Athos Solar Verwaltungs UG), 1x 9.830 kW (Privatinvestoren Reon und Sybac), 1x 3.350 kW (Privatinvestor Sonnenwende Worpswede GmbH & Co. KG, Tom Becker (Reon))
- 61 WKA mit 51 MW, 21% der Betreibergesellschaften regional ansässig (bezogen auf Gesamtleistung)
- 14 Biogasanlagen (5,7 MW) in Hand von Landwirten (regional).

Auf dem Gebiet der **Stadt Wolfhagen:**

- PV Dachanlagen 549 Stück. mit 7.429 kW (hauptsächlich in Privathand)
- 1x PV Freiflächenanlage mit 5 MW von Stadtwerken und Bürgerenergiegenossenschaft
- 1x PV Freiflächenanlage mit 5 MW teilweise in Hand regionaler Teilhaber
- 1x PV Freiflächenanlage mit 2 MW teilweise in Hand regionaler Teilhaber
- 15 WKA mit 20 MW, 72% der Betreibergesellschaften regional ansässig (bezogen auf Gesamtleistung) (7x800 kW Windpark (Betreiber extern); 4x600 kW Windpark mit Teilhabern (regional); 4x3 MW Windpark von Stadtwerken und Bürgerenergiegenossenschaft
- 1 x Biogasanlage (1.060 kW) mit 36 Teilhabern

Auch bezüglich der Besitzstruktur der Netze unterscheiden sich die Regionen. Im Landkreis Osterholz betreiben die Osterholzer Stadtwerke in drei von 11 Gemeinden das Strom- und Gasnetz (in zwei der drei Gemeinden auch nur in bestimmten Ortsteilen). Die übrigen Gemeinden werden von der überregional tätigen EWE betrieben, die aber auch mehrheitlich in Hand von Kommunen ist, jedoch eine andere Unternehmens Ausrichtung hat als kleine ortsansässige Stadtwerke. In Wolfhagen hingegen sind die Netze über die Stadtwerke vollständig in kommunalem Besitz.

In den Regionen wurden in den letzten Jahren unterschiedliche Programme und Effizienzmaßnahmen angestoßen, welche die Transformation zu einem Resilienten Regionalen Energiesystem fördern:

- **Landkreis Osterholz:**
  - Erprobung eines Energieberatungskonzeptes
  - Energiekindergarten in der Gemeinde Worpswede, d.h. energetische Gebäudeoptimierung, pädagogische Energielernziele

- o Grüner Campus: Energieversorgung des Campus Barkhof (Allwetterbad, Medizinzentrum und Schulzentrum) mittels Biogas und BHKW
- o Energetische Sanierung des örtlichen Kreiskrankenhauses (u.a. solarbetriebene Erdwärmepumpen) und des Hallenbades Worpswede (u.a. erdgasbetriebenes BHKW)
- o Gründung eines ehrenamtlichen Energieberater-Netzwerks in Ritterhude
- o Betrieb von Solaranlagen in den Gemeinden Graßberg, Ritterhude und Schwanewede durch Solar-Genossenschaften

- **Stadt Wolfhagen:**
  - o Umrüstung der Straßenbeleuchtung auf LED-Technik (abgeschlossen)
  - o Nahwärmenetz auf Gelände der ehemaligen Pommernkaserne (in Betrieb)
  - o Nahwärmenetz Altenheim (in Betrieb)
  - o Nahwärmenetz Schule/Schwimmbad (in Betrieb)
  - o BMBF-gefördertes Modellprojekt der Stadtwerke Wolfhagen zum Einsatz energiesparender Geräte in 35 Testhaushalten (Feldversuch zur aktiven, Verbrauchssteuerung energieintensiver elektrischer Verbraucher in Haushalten – lokale Harmonisierung von Stromangebot aus erneuerbaren Energien und Stromnachfrage durch Demand-Side-Management) (in der Umsetzung)
  - o Einbau von Wärmepumpen in Privathäusern sowie öfftl. Gebäuden (Feuerwehrhaus Bründersen) (abgeschlossen)
  - o Teilnahme an der BMBF-Förderinitiative ‚Wettbewerb Energieeffiziente Stadt' als eine von fünf deutschen Städten (ca. 1 Mio. Euro Fördermittel pro Jahr) unter dem Projekttitel „Energie Offensive Wolfhagen", Laufzeit 5 Jahre, Start: November 2012, Projektpartner: Kompetenznetzwerk Dezentrale Energietechnologien (deENet), Fraunhofer Institut für Bauphysik in Kassel (IBP) - Abteilung Energiesysteme, Zentrum für Umweltbewusstes Bauen (ZUB) im Fachgebiet Bauphysik der Universität Kassel, Stadt Wolfhagen, Stadtwerke Wolfhagen, Energieagentur des Landkreises Kassel „Energie 2000"
  - o „Wolfhagen 100% EE" als BMBF-gefördertes Projekt zur Entwicklung eines Konzeptes für die nachhaltige Energieversorgung der Stadt, gemeinsam mit den SWW, deENet u.a. entwickelt Fraunhofer IBP ein zu 100% auf erneuerbarer Energie basierendes Energieversorgungskonzept, Projektpartner: Kompetenznetzwerk Dezentrale Energietechnologien (deENet), Fraunhofer Institut für Bauphysik in Kassel (IBP) - Abteilung Energiesysteme, Zentrum für Umweltbewusstes Bauen (ZUB) im Fachgebiet Bauphysik der Universität Kassel, Stadt Wolfhagen, Stadtwerke Wolfhagen, Energieagentur des Landkreises Kassel „Energie 2000", Kommunikationsbüro eyedexe GmbH

Betrachtet man die Leitorientierungen in den Regionen, so findet man kaum Unterschiede. Die vorherrschenden Leitorientierungen haben im Rahmen der Energiewende (100% Erneuerbare) einen eher ökonomischen und auf Selbstbestimmung bezogenen Fokus. Die Steigerung der *regionalen Wertschöpfung*, *regionale Unabhängigkeit* sowie die *Wirtschaftlichkeit der Energieversorgung* spielen eine wichtige Rolle. Daneben sind in den Regionen nach wie vor auch die ursprünglichen Leitorientierungen des *Klima- und Umweltschutzes* sowie der *Nachhaltigkeit* präsent. Während aber in der Stadt Wolfhagen das Leitkonzept **Resilientes Energiesystem** auf eine gewisse Resonanz stieß, war dies im den Landkreis Osterholz deutlich weniger der Fall. Dies mag an verschiedenen Faktoren gelegen haben. Der vermutlich entscheidendste Aspekt wird an der Verbindlichkeit der Zusammenarbeit gelegen haben. Es macht ein Unterschied ob die Zusammenarbeit zur Chef-Sache gemacht wird und mit der Geschäftsführerebene diskutiert wird oder ob von Beginn an klar ist, dass das Projekt zwar unterstützt wird, aber keine Wichtigkeit hat. Die Ursachen hierfür mögen auch wirtschaftlicher Natur sein. Der Betrieb von eigenen Erzeugungsanlagen, die zu bestimmten Zeiten Überschüsse erzielen und deren Förderende absehbar ist, scheint förderlich für eine positive Grundstimmung gegenüber dem zellularen System gewesen zu sein.

In Wolfhagen wurde dem Konzept eines Resilienten Regionalen Energiesystem mit dem Konzept des Zellularen Systems als Argument für den weiteren Ausbau der Erneuerbaren Energien, deren Systemintegration und der Einführung von Regel und Steuerinfrastruktur als Chance die Versorgungssicherheit im Gebiet zu erhöhen. Anders verhielt es sich im Landkreis Osterholz, wo zum Teilen das Konzept der Resilienz mit seinen Aspekten der Versorgungssicherheit als Angriff auf das bestehende System verstanden wurde und die fehlenden Geschäftsmodelle und zugehörige Regulierung als Totschlagargument eingebracht wurden.

Im Weiteren konnten durch einen Wechsel der Zuständigkeiten im Forschungsteam sowie Funktions- und Entscheidungsträgern, gewonnene Kontakte nicht im Erwünschten Maße gepflegt werden.

Sowohl für den Landkreis Osterholz als auch für die Stadt Wolfhagen wurden Zukunftsszenarien für das Jahr 2030 erstellt. Diese sollten eine möglichst realistische Zukunft beschreiben und dienten für Wertschöpfungsanalyse und Modellierungen, die im Rahmen der Systemanalyse für die Vulnerabilitätsanalyse verwendet wurden. Damit war es möglich Auswirkungen prospektiv zu ermitteln. Der in den Szenarien angenommene Windausbau orientierte sich dabei am Raumordnungsplan und der Einschätzung der Akteure vor Ort. Für Annahmen zum Photovoltaikausbau wurde zum einen die BMU Leitstudie von 2010 verwendet (Nitsch, Pregger, Naegler, Heide, Tena, Trieb, Scholz, Nienhaus, Gerhardt, Sterner et al. 2012) zum anderen auf Einschätzung der regionalen Projektierer und Dienstleister im Photovoltaiksegment zurückgegriffen.

Für die Fallstudie Osterholz wurde zudem eine Konfiguration für den Landkreis entworfen, der einer regionalen Zelle entspricht und so als Grundlage für das Gestaltungsleitbild dienen konnte. Bei den Szenarien handelte es sich also einerseits um eine möglichst realisierbare Zukunft, für deren Erarbeitung Einschätzungen von regionalen Akteuren eingeholt wurden und andererseits beim Szenario 2040 für den Landkreis Osterholz, um ein Szenario welches eine wünschenswerte und resilientere Zukunft skizziert, nämlich das der regionalen Zelle.

6.4.1 Vergleich der Wertschöpfung

Status quo

Die Ergebnisse der Analysen zu Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekten durch erneuerbare Energien in den beiden Fallstudien-Regionen im Jahr 2013 unterscheiden sich sowohl in absoluten Zahlen als auch im Hinblick auf ihre Zusammensetzung. In Summe wurde für die Stadt Wolfhagen eine regionale Wertschöpfung von 1,6 Mio. Euro und eine Zahl von knapp 5 Vollzeitarbeitsplätzen ermittelt. Im Landkreis Osterholz summiert sich die für 2013 berechnete regionale Wertschöpfung auf 3,0 Mio. Euro und die Zahl der Vollzeitäquivalente auf 20 VZÄ. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Daten zur installierten Leistung der EE-Anlagen sowie der Zahlen zur regionalen Wertschöpfung und Beschäftigung werden die Ergebnisse im Folgenden bezogen auf die Zahl der Einwohner in den Regionen gegenübergestellt. Tabelle 6.7 zeigt die installierte Leistung bzw. Trassenmeterlänge der unterschiedlichen EE-Technologien bezogen auf die Einwohnerzahl der Gebietskörperschaften im Vergleich. Es wird deutlich, dass der EE-Ausbaugrad pro Einwohner in der Stadt Wolfhagen deutlich höher liegt als im Landkreis Osterholz. Die Unterschiede zeigen sich insbesondere bei dem Ausbaugrad der Photovoltaik, der Solarthermie und den EE-Nahwärmenetzen. Mit der Inbetriebnahme des Windparks „Rödeser Berg“ im Jahr 2014 ergibt sich zudem bei der Windenergie ein noch höherer Bestand pro Einwohner in Wolfhagen.

Der höhere Ausbaugrad pro Einwohner in Wolfhagen und die in Teilen höhere regionale Ansässigkeit der beteiligten Unternehmen und Investor/innen resultieren in einer deutlich höheren einwohnerspezifischen regionalen Wertschöpfung und Zahl an Vollzeitbeschäftigten, wie Tabelle 6.71: Regionale Wertschöpfung zeigt. Sowohl absolut als auch bezogen auf die Einwohnerzahl ist die Photovoltaik in beiden Fallstudien-Regionen die wichtigste EE-Technologie mit Blick auf die generierten Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte. Wind- und Bioenergie stehen an zweiter bzw. dritter Stelle.

Welche Bedeutung den regionalökonomischen Effekten durch erneuerbare Energien mit Blick auf die Wirtschaftsleistung in den beiden Regionen insgesamt zukommt, zeigt ein Vergleich der ermittelten Effekte mit der gesamten Wertschöpfung bzw. Beschäftigung im Jahr 2013 sowie ausgewählter Wirtschaftszweige. Um die Vergleichbarkeit zu den in der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung (VGR) ermittelten Wertschöpfungsdaten zu gewährleisten, muss diesen die Wertschöpfung durch erneuerbare Energien inklusive der Steuern und sonstigen Abgaben an den

Bund und das Land gegenübergestellt werden. Für den Landkreis Osterholz beträgt die Wertschöpfung durch erneuerbare Energien, inkl. Steuern und sonstigen Abgaben an Bund und Land, rund 4,1 Mio. Euro, für die Stadt Wolfhagen rund 2,1 Mio. Euro. Da die statistischen Daten der VGR der Länder nur auf Landkreisebene, nicht jedoch auf Ebene der Gemeinde verfügbar sind, kann der Vergleich der Wertschöpfungsdaten nur für den Landkreis Osterholz vorgenommen werden; für Wolfhagen ist diese Einordnung nicht möglich. Im Landkreis Osterholz machte 2013 die gesamte Wertschöpfung durch erneuerbare Energien rund 0,3% der gesamten Wertschöpfung (nach Abschreibungen) des Landkreises aus. Gemessen an der Wertschöpfung im Wirtschaftszweig Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, welcher in ländlichen Gebieten traditionell von hoher Bedeutung ist, machte die Wertschöpfung durch erneuerbare Energien einen Anteil von 15% aus. Der Anteil der Vollzeitbeschäftigten in EE-Unternehmen an der gesamten Zahl der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten (am Arbeitsort) im Landkreis lag bei 0,09%. In Wolfhagen lag der Anteil der EE-Beschäftigten (VZÄ) an der Zahl der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten (am Arbeitsort) bei 0,14%.

Tabelle 6.70: Anlagenbestand und -zubau je Einwohner im Jahr 2013 nach EE-Technologien in Wolfhagen und dem Landkreis Osterholz (Quelle: Eigene Berechnungen).

EE-Technologie	Stadt Wolfhagen		Landkreis Osterholz	
	Bestand 2013	**Zubau 2013**	**Bestand 2013**	**Zubau 2013**
	[kW/EW]	[kW/EW]	[kW/EW]	[kW/EW]
Wind Onshore	0,629	0,000	0,463	0,000
Photovoltaik	1,508	0,035	0,380	0,134
davon PV Dachanlagen	0,567	0,035	0,266	0,015
davon PV Freiflächenanlagen	0,941	0,000	0,114	0,119
Biogas	0,062	0,042	0,051	0,001
Holzvergaser	0,024	0,000	0,000	0,000
	[m^2/EW]	[m^2/EW]	[m^2/EW]	[m^2/EW]
Solarthermie	0,279	0,010	0,099	0,002
Wärmepumpen	0,002	0,000	k.A.	k.A.
Zentralheizungsanlagen holzbefeuert	k.A.	k.A.	0,148	0,010
Holzheizwerke	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	[Trm/EW]	[Trm/EW]	[Trm/EW]	[Trm/EW]
EE-Wärmenetz	0,161	0,000	0,036	0,000
Mikrogasleitungen	0,094	0,000	0,000	0,000

Welche Wertschöpfung und Beschäftigung bei gegebenem Anlagenbestand und Zubau im Betrachtungsjahr 2013 generiert werden könnte, wenn die Betreibergesellschaften und Eigenkapitalgeber/innen bzw. alle beteiligten Akteure entlang der Wertschöpfungsketten zu 100% in den Regionen ansässig wären, haben die Berechnungen für Szenario 1 und Szenario 2 aufgezeigt. Die größte Differenz zwischen dem Status quo und den Szenarien zeigt sich hier bei dem Landkreis Osterholz. Dies bedeutet, dass ein nicht unerheblicher Anteil der Wertschöpfung durch erneuerbare Energien aus dem Landkreis abfließt. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass ein

wesentliches Ziel der im Jahr 2008 gestarteten Initiative „Energiewende Osterholz 2030“ die Steigerung der regionalen Wertschöpfung ist, sind diese Ergebnisse sicherlich unbefriedigend für die Akteure vor Ort. Sie machen aber deutlich, dass die Zusammenhänge und Einflussfaktoren für eine Maximierung der regionalökonomischen Effekte durch erneuerbare Energien vielen Akteuren im kommunalen Kontext noch nicht ausreichend bekannt bzw. die Steuerungsmöglichkeiten, wie z.B. bei der Windenergie, begrenzt sind. Bei einem weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien muss deswegen frühzeitig ausgelotet werden, welche Wertschöpfungsschritte sinnvollerweise durch Unternehmen in der Region abgedeckt werden können. Auch muss darauf geachtet werden, dass die Betreibergesellschaften ihren Sitz in der Region haben und somit dort auch steuerpflichtig sind, sowie dass eine möglichst hohe Beteiligung der vor Ort ansässigen Bürger/innen bei der Finanzierung der EE-Anlagen angestrebt wird.

Tabelle 6.71: Regionale Wertschöpfung und Beschäftigung durch erneuerbare Energien je Einwohner im Jahr 2013 nach Technologiebereichen (Quelle: Eigene Berechnungen).

	Stadt Wolfhagen		**Landkreis Osterholz**	
Technologiebereich	**WS kommunale Ebene**	**Vollzeitbeschäftigte**	**WS kommunale Ebene**	**Vollzeitbeschäftigte**
	[Euro/EW]	[VZÄ/1000 EW]	[Euro/EW]	[VZÄ/1000 EW]
Photovoltaik	110,2	0,299	16,7	0,135
Windenergie	7,7	0,024	4,8	0,011
Bioenergie (Strom)	7,0	0,034	4,7	0,017
Summe Strom	**124,8**	**0,358**	**26,2**	**0,162**
Bioenergie (Wärme)	-	-	0,6	0,014
Solarthermie	0,5	0,009	0,2	0,005
Wärmepumpen	0,02	0,0003	-	-
Nahwärmenetze	2,0	0,003	0,4	0,000
Summe Wärme	**2,5**	**0,012**	**1,2**	**0,020**
Summe	**127,3**	**0,369**	**27,4**	**0,182**

6.4.2 Vergleich der strukturellen Vulnerabilität der Energieversorgung in den Fallstudien-Regionen

Im Rahmen des Projektes Resystra wurde die Vulnerabilität anhand von vier Hauptsträngen ermittelt: Systemanalyse und Modellierung des lokalen Elektrizitätssystems, Checkliste zur Analyse potenzieller Ausfälle in sozio-technischen Systemen, potenzielle Auswirkungen von Klimaveränderungen sowie Experteneinschätzungen zu Verwundbarkeiten des regionalen Energiesystems anhand von Interviews. Aufgrund einer beschränkten Verfügbarkeit an Daten und Informationen, welche die regionalen Energiesysteme exakt beschreiben, verbleiben die Ergebnisse der Vulnerabilitätsanalyse (VA) über weite Strecken im Allgemeinen. Dankenswerterweise wurden uns etliche Datensätze zur Verfügung gestellt, weitere standen aus Sicherheitsbedenken aufgrund des damit verbundenen Aufwands nicht zur Verfügung. Mit den Zeitreihen der viertelstündlichen Erzeugung mit Erneuerbaren Energien und des Verbrauchs in den Regionen aus dem Jahr 2013 wurden, die erarbeiteten Modelle der regionalen Elektroenergiesysteme für den Status quo 2013, validiert. Diese Modelle dienten, dann als Basis für die Berechnungen der Szenarien bis zu den Jahren 2030 und 2040 (nur bei OHZ), welche für prospektive Analysen der Vulnerabilitäten genutzt werden. Aufgrund unterschiedlicher Zugänge unterscheiden sich die Betrachtungen in den beiden Fallstudien in einigen Punkten, was jeweils kenntlich gemacht wurde.

Die Systemanalyse ergab für beide Regionen einen der Struktur nach ähnlichen Aufbau der Elektroenergiesysteme. Unterschiede entstehen durch die verschiedenen Größen und die Anzahl der Netzbetreiber. Die Leitungen sind hauptsächlich unterirdisch verlegt. Sie sind im Mittelspannungsbereich ringförmig und im Niederspannungsbereich maschennetzartig und strahlenförmig.

Hinsichtlich der nach Molyneaux et al. berechneten Diversität der Energieerzeugung ist zu erkennen, dass die Diversitätswerte beider Regionen im Bezugsjahr 2013 übereinstimmen. Durch die Inbetriebnahme des Windparks Rödeser Berg in Wolfhagen im Jahre 2014 erhöht sich die Diversität für Wolfhagen auf ca. 0,68. Sie liegt damit um rund 20% höher als in Osterholz. In den Zukunftsszenarien nivelliert sich dieser Unterschied, in beiden Gebieten dominieren 2030 die zwei Erzeugungsarten (Wind und PV) und erzeugen etwa 100% des Strombedarfes. Es werden Diversitätswerte von ca. 0,7 erreicht. Diese sind damit deutlich positiver, wenn berücksichtigt wird, dass der Wert 1 die maximale Diversifizierung angibt, siehe Tabelle 6.72.

Tabelle 6.72: Diversität der Anteile der Energieerzeugung am Gesamtelektrizitätsbedarf für den Landkreis Osterholz und die Stadt Wolfhagen im Jahr 2013 sowie für die Szenarien 2030 a und b.

Jahr / Szenario	2013	2030 a / Minimalszenario	2030 b / Maximalszenario
Diversität der Erzeugung in Osterholz	0,59	0,64	0,68
Diversität der Erzeugung in Wolfhagen	0,59	0,67	0,69

Der Selbstversorgungsgrad ist in Wolfhagen im Jahr 2013 nur um 7% höher als im Landkreis Osterholz. In dem vergleichsweise kleinen Gebiet mit seiner geringen Anzahl an Abnehmerhaushalten, konnte die Eigenerzeugung (bilanzielle Selbstversorgung) durch die 2015 zugebauten vier Windräder auf über 100% gesteigert werden (vgl. Abbildung 6.57).

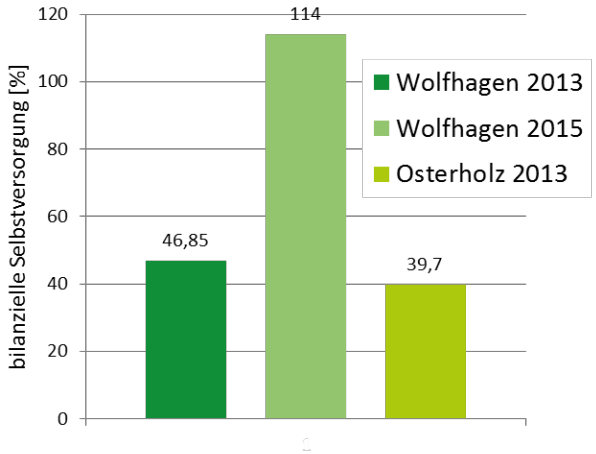


Abbildung 6.57: Darstellung des bilanziellen Eigenversorgungsgrads in % für den Landkreis Osterholz im Jahr 2013 und die Stadt Wolfhagen in den Jahren 2013 und 2015 (Fertiggestellung Windpark).

Die Anteile regelbarer Erzeuger, ohne dass Erzeugungsverluste in Kauf genommen werden, liegen in beiden Regionen dicht beieinander, mit einem Anteil von 5,3% an der Gesamterzeugungsleistung für den Landkreis Osterholz und von 4,1% für Wolfhagen.

Die Modelle, die in beiden Fallstudien mit dem Framework OEMOF erstellt wurden, unterscheiden sich in einigen Punkten, da für die Stadt Wolfhagen im Unterschied zum Landkreis Osterholz eine Kopplung des Stromsektors mit der Wärme und Mobilität und auch die Effekte von Energieeinsparung in den Lastkurven nicht berücksichtigt werden konnten.

Die ermittelten Residuallastkurven zeigen für 2013 unterschiedliche Verläufe, siehe Abbildung 6.58 und Abbildung 6.59. Die Kurve für den Landkreis Osterholz fällt flacher ab. Dies könnte ein Artefakt sein, der darauf zurück zu führen ist, dass die Lastkurven für den Landkreis Osterholz auf der Basis von Zeitreihen nur eines Netzbetreibers, auf das ganze Netz hochskaliert werden mussten. Für die Stadt Wolfhagen konnten hingegen Originaldaten für das gesamte Netz verwendet werden. In beiden Fällen ändert sich durch den Zubau der aus dem Netz bezogene Leistungs-Wert nicht. Dementsprechend ist trotz des hohen Eigenversorgungsanteils die Infrastruktur für die Anbindung an das vorgelagerte Netz in derselben Größenordnung erforderlich, und es lassen sich keine Kosten (Netzentgelte) sparen.

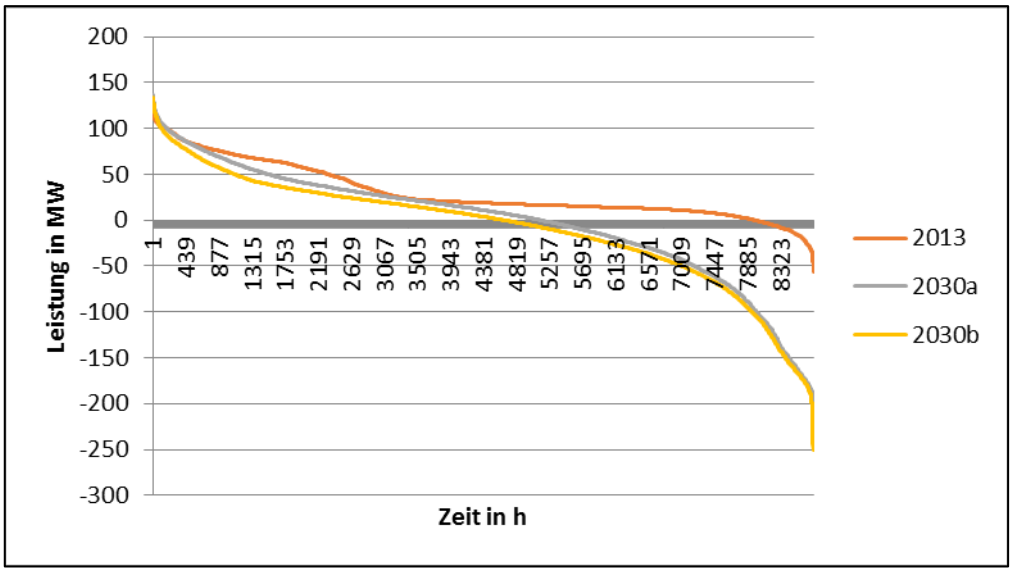


Abbildung 6.58: Geordnete Residuallastkurve für die elektrische Energieversorgung des Landkreises Osterholz in den Jahren 2013 einschließlich der Szenarien 2030 a und 2030 b (verstärkter PV Ausbau) mit Berücksichtigung der Wärmeversorgung und Mobilität, die mit dem Elektrizitätsnetz gekoppelt wurden (Eigene Darstellung).

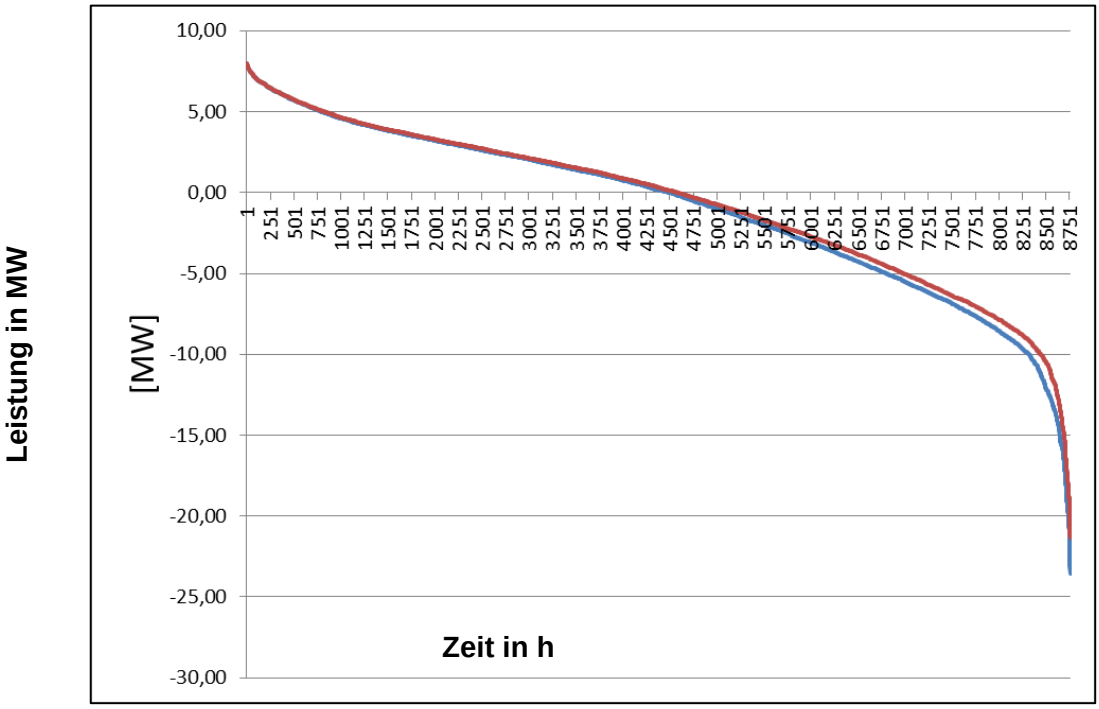


Abbildung 6.59:Geordnete Residuallastkurve für die elektrische Energieversorgung der Stadt Wolfhagen im Jahre 2013 (rot) einschließlich des Maximalszenario 2030 (blau) (Eigene Darstellung).

Auch die Betrachtung der potenziellen Störungen und Ausfälle im regionalen Energieversorgungssystem brachten ähnliche Ergebnisse. Die Vulnerabilität der Regionen rührt hauptsächlich daher, dass vor Ort keine Steuer- und Regelmechanismen vorhanden sind und damit eine komplette Abhängigkeit von den Netzführungsgrößen (Frequenz) und der Energie aus dem vorgelagerten Netz besteht. Wie erwartetet steigen die Netzlasten mit dem regionalen Ausbau der Erneuerbarer Energien aufgrund von installierten Erzeugungsleistungen, die ein Vielfaches über

der benötigten Verbrauchsleistung liegen. Bemerkenswert ist, dass ohne besondere Vorkehrungen (Flexibilisierung (DSM), Langzeitspeicher (P2X), Stromerzeugung mit gespeicherter Energie (Spitzen-BHWK)), in den Szenarien 2030 und 2040 zu bestimmten Zeitpunkten (Dunkelflautezeiten) ein Leistungsbezug aus dem vorgelagerten Netz benötigt wird, der in etwa der Bezugsleistung aus dem Jahr 2013 entspricht. Diese Elemente werden dementsprechend im Gestaltungsleitbild für die Regionen auftauchen.

Die Umspannstationen und Transformatoren, als Infrastrukturkomponente die am nächsten an „Regelung“ drankommt, konnten als besondere Schwachstellen identifiziert werden. Beide Regionen haben Erfahrungen durch Skandalisierung des weiteren Ausbaus von EE, über die Bildung von Bürgerinitiativen. Sie haben in Wolfhagen dazu geführt, dass auf absehbare Zeit keine Windräder mehr auf dem Gebiet der Stadt gebaut werden sollen.

Die Auswertung von Klimamodellen hinsichtlich des Ertrags Erneuerbarer Energien für beide Regionen zeigte, dass mittelfristig nur mit geringen Veränderungen zu rechnen ist. Der PV-Ertrag wird aufgrund einer erwartbaren höheren Wolken-Bedeckung im Frühjahr und Sommer, sowie einer Erhöhung der Temperaturen zu leichten Ertragseinbußen führen. In den Wintermonaten kann mit höheren mittleren Windgeschwindigkeiten gerechnet werden. Da die Veränderungen und möglichen Auswirkungen, die Erzeugung kaum beeinflussen, ergibt sich zumindest mit Blick auf das Dargebot an erneuerbarer Energie eine geringe Vulnerabilität. Mit Blick auf Störungen durch Extremwetterereignisse, die Erzeugungsanlagen schädigen können kann das anders aussehen.

Eine Herausforderung für die Netzbetreiber stellen Verhaltensänderungen der Bevölkerung die durch Innovationen ausgelöst werden dar, z.B. das Laden von Elektromobilien an 20 kW Heimladepunkten oder die Wandlung zum Prosumer. Im Falle von Heimladepunkten mit hoher Leistung haben die Netzbetreiber derzeit keine Möglichkeit über Genehmigungen oder Regulierungen in die Installation einzugreifen, da die Anschlussleistung von Einfamilienhäusern 30 kW beträgt und diese nicht überschritten werden. Problematisch ist aber, dass die Netze derzeit nur auf Gleichzeitigkeiten von 2-3 kW ausgelegt sind. Das Laden von allein 10 Elektromobilen an einem Trafostrang führt derzeit zu einer Überlastung und Ausfall der Stromversorgung hinter dem Trafo.

6.4.3 Vergleich der Gestaltungsleitbilder ‚resilientes regionales Energiesystem‘ in den Fallstudien

Die Gestaltungsleitbilder ‚Resilientes Regionales Energiesystem‘ für die Regionen auf der Basis von Erneuerbaren Energien skizzieren die Ergebnis einer Spezifizierung und Operationalisierung des Leitkonzeptes ‚Resilientes Energiesystem‘ bezogen auf die jeweilige Region. Damit werden die Aspekte des sowohl Erwünschten als auch Umsetzbaren vereint und Maßnahmen und Handlungsempfehlungen formuliert, die das Ziel verfolgen den Akteuren Orientierung im Transformationsprozess zu geben.

Die Gestaltungsleitbilder bauen, neben dem Leitkonzept, im Weiteren auf sozio-technischen Untersuchungen des regionalen Energiesystems auf und berücksichtigt dabei die Ergebnisse der Analyse der bestehenden Energieversorgungsinfrastruktur (vgl. Kapitel 6.2.1 und 6.3.6), der Akteursanalyse mit den vorhandenen Leitorientierungen sowie die Ergebnisse der Vulnerabilitätsanalyse des Energiesystems im Landkreis Osterholz (vgl. Kapitel 6.2.6). Das Gestaltungsleitbild stellt also eine Synthese dar, zwischen dem Leitkonzept und den regionalen Gegebenheiten mit ihren Notwendigkeiten, Möglichkeiten und Grenzen. Für die Entwicklung und erfolgreiche Formulierung ist zudem entscheidend wer der Adressat des Gestaltungsleitbildes sein soll. Das Gestaltungsleitbild muss anschlussfähig an die Leitorientierungen der vor Ort befindlichen Akteure sein und mit ihnen in Resonanz treten.

Durch dieses Vorgehen wurden zu den Top-Down vorgeschlagenen Gestaltungsprinzipien und --elementen aus dem Leitkonzept Resilientes Energiesystem, auch Bottom-up Gestaltungsleitbildelemente für die jeweiligen Regionen identifiziert. Dies erfolgte durch Auswertung der durchgeführten Analysen und Interviews und im Zuge eines Kreativprozesses vor Ort zur Gestaltung des regionalen Energiesystems. Die Zusammenfassung der Ergebnisse sind in Abbildung 6.60 (Landkreis Osterholz) und Abbildung 6.61 (Stadt Wolfhagen) nachfolgend dargestellt.

Abbildung 6.60: Gestaltungsleitbildelemente für ein ‚Resilientes Regionales Energiesystem Osterholz' (grün) zugeordnet zu den Fähigkeiten (blau) eines Resilienten Energiesystems (Eigene Darstellung)

Abbildung 6.61: Gestaltungsleitbildelemente für ein ‚Resilientes Regionales Energiesystem Wolfhagen' (grün) zugeordnet zu den Fähigkeiten (blau) eines Resilienten Energiesystems (Eigene Darstellung)

Eine Gemeinsamkeit der Ansätze in den Regionen ist, dass Schritte, Maßnahmen und Gestaltungselemente hin zu einer zellularen Strukturierung des Energiesystems vorgeschlagen werden. Im Zuge der Untersuchungen erreichte Wolfhagen die bilanzielle Selbstversorgung. Dies war sogar mit Anlagen in Händen lokaler Akteure, die eine Beteiligungsmöglichkeit für die Bevölkerung vorsahen möglich. Eng damit ist das starke Interesse an weiteren, sich anschließenden Schritten, welche zur Selbstversorgung in der Region beitragen. Im Landkreis Osterholz lagen dagegen zum Zeitpunkt der Untersuchung, Pläne vor, hauptsächlich Anlagen in landkreisfremden Händen vorsahen, die bis 2017 fertiggestellt werden sollten. Der Vergleich der Regionen in ihren unterschiedlichen Phasen ist Gegenstand dieser Ausführungen. Aufgrund der Tatsache, dass ein Gestaltungsleitbild machbar und umsetzbar sein soll, unterscheiden sich die Regionen spezifischen Maßnahmen, was auch an dem unterschiedlichen Zugang der Regionen zum Leitkonzept Resilienz lag.

Im Landkreis Osterholz geht es also hauptsächlich erstmal darum den Boden für potentielle Veränderungen zu bereiten und den angestoßenen Leitorientierungsprozess zu verfestigen. Die jeweils vorgeschlagenen Maßnahmen sollen leicht umsetzbar sein und so gestaltet, dass die Akteure sich nicht gegenseitig behindern können. In Wolfhagen ging es im Unterschied dazu konkrete Empfehlungen zu geben sowie die vorhandenen Ideen und Vorschläge einzuordnen und zu bewerten.

Ein Ergebnis der Wertschöpfungsanalyse war, dass der Abfluss aus dem Landkreis Osterholz verringert werden könnte, wenn die Betreiber und Investoren von EE-Anlagen im Landkreis ansässig wären. Eine Maßnahme die förderlich sein könnte, dies zu ändern ist auf verschiedene Arten den Organisationsgrad der Akteure über Netzwerke, Genossenschaften und regionalen Investitionsprodukten zu verbessern. Dies könnte dazu beitragen, dass sich die Besitzverhältnisse an den Anlagen ändern, die Akzeptanz der Anlagen bei den Bürgern dadurch zunimmt und dass zukünftig mehr Anlagen zugebaut werden. In diesem Zuge sollte auch die Bevölkerung durch Öffentlichkeitsarbeit und Aufklärungskampagnen über Risiken und Ausfallszenarien informiert werden.

Die Vulnerabilitätsanalyse hat mehrere Schwächen aufgezeigt, wobei die wohl gravierendste, nämlich die völlige Abhängigkeit der netzbildenden Funktionen der vorgelagerten Netze auch am schwierigsten anzugehen ist, da diese Bereiche der Regulierung unterworfen sind. Eine einzelne Region kann damit nicht einfach ausscheren und Inselnetzfähig werden. Auf technischer Ebene sollte die Ermöglichung von Regel und Steuerkonzepten angegangen werden, mit der die Inselnetzfähigkeit der Regionen ermöglicht wird. Hierfür sind auch regulative Maßnahmen und neue Vergütungsformen, z.B. zur Vergütung von netzdienlichem Verhalten, notwendig.

Im Landkreis Osterholz konzentrieren sich im Weiteren die technologischen Empfehlungen auf die Belieferung von kritischer Infrastruktur mit Erneuerbaren Energien, den Aufbau von Gasspeichern um die Nutzung und Speicherung von Biogas voranzutreiben und die Einrichtung von Messpunkten und Netzmonitoringsystemen, um Informationen über den Netzzustand zu erhalten.

Der Stadt Wolfhagen wird empfohlen Heißwasserspeicher in Verbindung mit einem Kurzläufer-BHKW, um Leistungsspitzen im Netzgebiet erzeugen zu können sowie Power-to-Heat Maßnahmen, nahe an den Wärmenetzen der Kaserne um Stadtzentrum zu installieren. Power-to-Gas Anlagen scheinen mittelfristig über den Stadtwerkeverbund SUN realisierbar und würden über die Wandlung nicht nur zur Diversität sondern auch in Bezug auf Reserven und Redundanzen zur Versorgungssicherheit beitragen. Die Umstellung auf eine netzdienliche Fahrweise der BHKWs dient zur Flexibilisierung und trägt, wie die Modellierungen gezeigt haben, maßgeblich und am kosteneffizientesten dazu bei Netzlasten zu Verschieben und damit den zeitgleichen Eigenversorgungsgrad zu erhöhen. Das selbst gesteckte Ziel bis 2025 zu einem zeitgleichen Eigenversorgungsgrad von 90% zu kommen, sollte mit diesen Maßnahmen zu erreichen sein.

Zusammen tragen die Gestaltungsleitbildelemente und Maßnahmen dazu bei die regionalen Energiesysteme sowohl widerstands- und anpassungsfähig als auch innovations- und improvisationsfähig zu machen.

6.4.4 Vergleich der Innovationssysteme

Aus den im Rahmen von Resystra ebenfalls durchgeführten regionalen Fallstudien konnte zudem herausgearbeitet werden, dass bestimmte Konstellationen, sowohl der Akteure als auch der Technologien, für die Gestaltung eines Resilienten Energiesystems fördernd oder auch hinderlich sein können. Ohne an dieser Stelle die fördernden bzw. hemmenden Faktoren vollständig benennen zu wollen, ist doch aus den regionalen Fallstudien deutlich geworden, dass beispielsweise die Akteure auf der regionalen Ebene insbesondere dann gestaltenden Einfluss auf die regionale Energiewende nehmen können, wenn die regionale Aktionsfähigkeit gegeben ist, dadurch das regionale Vorstellungen über die Entwicklungsrichtungen synchronisiert werden können, und eine gemeinsam geteilte Leitorientierung mehr oder weniger explizit existiert. In den beiden regionalen Fallstudien wurde deutlich, dass in den Regionen handlungsfähige Akteure existierten, die den Energiewendeprozess regional vorantreiben wollen, und die zugleich in der Lage waren, die Vorstellung eines Resilienten Energiesystems in ihre konkreten Handlungskontexte zu übertragen und somit im Grundsatz handlungsorientierend zu machen. Einschränkend muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass die lokalen oder regionalen Möglichkeiten zur Entwicklung eines Resilienten Energiesystems begrenzt sind, es kommt mithin entscheidend auf die Gestaltung der Rahmenbedingungen an, inwieweit sich entsprechende Konzepte in Wert setzen lassen. Gleichwohl konnte aufgezeigt werden, dass auch innerhalb der bestehenden Rahmenbedingungen Handlungsspielräume bestehen, in denen die Idee der Resilienz bzw. des Resilienten Energiesystems anschlussfähig für die regionalen Akteure werden kann und damit zu mindestens Impulse für die Entwicklung eines Resilienten Energiesystems setzt.

In der Summe ist letztlich entscheidend, inwieweit regionale Akteure unternehmerisch handlungsfähig sind, um die regionalen Möglichkeiten der Energiewende (Stichwort: Wertschöpfung in der Region halten) tatsächlich zu erschließen zu können. In Wolfhagen ist dies weitgehend gelungen, in Osterholz hingegen nicht. Dies, obgleich sich die Leitbilder für eine Energiewende in beiden Regionen durchaus ähnlich waren. Im Vergleich zu Wolfhagen fehlten in Osterholz die frühzeitig handlungsfähigen, regionalen und unternehmerischen Akteure. Die Erschließung der Potenziale der Energiewende gelang auch in Osterholz, allerdings überwiegend durch regionsexterne Akteuren. Mit Blick auf die regionale Ebene, aber auch den technologischen Ebenen bspw. „alternativer“ Energien ist festzustellen, dass diese Leitorientierungen „alternativ“ zu den bislang verfolgten Pfaden des fossil-atomaren Komplexes entwickelt wurden und dessen Leitorientierungen delegitimiert haben. Die Ereignisse von Fukushima stellten vor dem Hintergrund ein Gelegenheitsfenster dar, ein relativ stabiles sozio-technisches System zu destabilisieren und damit neue Entwicklungspfade zu ermöglichen. Anzumerken bleibt allerdings, dass die Möglichkeit dieses „shifts“ einen langen zeitlichen und diskursiven Vorlauf hatte.

In den Regionalstudien wurde das Leitkonzept Resilientes Energiesystem zur besseren Anschlussfähigkeit herunter gebrochen auf das Leitkonzept eines „Zellulären Energiesystem. Dabei

wurde deutlich, dass das Leitkonzept „Zelluläres Energiesystem“ in den regionalen Kontexten durchaus anschlussfähig ist, dass aber die grundlegenden Voraussetzungen für seine Umsetzung mit Blick auf die Kompetenzen in den Regionen letztlich nicht oder nur partiell gegeben sind. So ist zwar die Idee des Zellulären Energiesystems an das in den untersuchten Regionen bisher vorherrschende Leitkonzept der regionalen Selbstversorgung durchaus anschlussfähig, allerdings wäre es zu seiner Umsetzung erforderlich die Strukturen des Stromsystems weitgehend umzubauen, wobei Zellularität (insbesondere die Ausdehnung der Zellen) keineswegs mit den untersuchten Regionen oder Verwaltungseinheiten in Übereinstimmung stehen müssen.

Geht man von der Multi-Level-Perspektive aus, dann wird deutlich, dass die Gestaltung der Rahmenbedingungen essentiell für den Erfolg der Energiewende in der Breite war und ist. Es entwickeln sich Nischen unter spezifischen Konstellationen zu „Vorreitern“. Insofern kommt es auf die dynamische Interaktion von Vorreitern bzw. Nischenakteuren (auf der regionalen oder auch der technologischen Ebene) mit den gesellschaftlichen Resonanzräumen und den regulativen Rahmensetzern an, die entsprechende Entwicklungen ermöglichen können. Erst in dieser Kombination können offenbar hinreichende Impulse zum Wandel des oder der sozio-technischen Regime erzeugt werden, dies gilt vor allem für hochregulierte Bereiche wie das Energiesystem.

Ein Vergleich der zwei regionalen „Energiewenden“ macht deutlich, dass sie nur partiell als regionales Ereignis beschrieben werden können. Etliche der Faktoren, welche zum Wandel des Energiesystems führten, sind identisch. Daher muss im folgenden Vergleich zwischen allgemeine Einflussfaktoren, welche die dezentrale Energiewende begünstigten und individuellen Faktoren, welche zu der unterschiedlichen Ausprägung des lokalen Systems geführt haben, differenziert werden.

Festzuhalten bleibt zunächst, dass zu Beginn ein Transformationsprozess, welcher die 100% bilanzielle Selbstversorgung anstrebt, nicht oder nur schwer umsetzbar gewesen wäre ohne die günstigen regulativen Rahmenbedingungen. Die Liberalisierung des Strommarktes und der Einspeisevorrang für Erneuerbare Energien ermöglichten die Implementation dezentraler Energiesysteme, welche auf der Produktion und Distribution von Strom auf Basis Erneuerbarer Energien aufbauen. In beiden untersuchten Fällen wurde berichtet, dass dieser regulative Push-Faktor eine Grundvoraussetzung für die Energiewende darstellte. Zudem konnten vergleichbare externe zivilgesellschaftliche und wirtschaftliche Anreize in beiden Fällen beobachtet werden. Seit der Reaktorkatastrophe von Fukushima und im Zuge breit öffentlich angelegter Debatten über den drohenden Klimawandel und sich verschärfende Umweltprobleme, ist die Akzeptanz für die Implementation von EE-Anlagen stark gestiegen. Diese Metafaktoren führten in beiden Fällen zu einem starken Zivilgesellschaftlichen-Push und Zivilgesellschaftlichen-Pull. Im Zuge des Ausbaus der Windenergie in den Regionen regte sich allerdings auch Widerstand. Die weitere Transformation des Energiesystems lässt sich nur schwer gegen die fehlende Akzeptanz der lokalen Bevölkerung

durchsetzen. Dies wurde insbesondere an den Windkraftprojekten in Osterholz und am Rödeser Berg deutlich. Nur durch Kompromissfindungen mit protestierenden Einwohnern konnten die Großprojekte in den Gemeinden umgesetzt werden. Weiterhin wurde mit der EEG-Vergütung auf Bundesebene ein wirtschaftlicher Anreiz geschaffen, welcher bei gleichzeitig sinkenden Anlagenpreisen die Investition in EE-Anlagen zu einer lukrativen Kapitalanlage machte. Zusätzlich zur festen Einspeisevergütung boten weitere Förderprogramme, z.B. für die Nutzung der Kraft-Wärme-Kopplung durch die KfW oder Zuschüsse der Länder für Nahwärmenetze, weitere wirtschaftliche Anreize, die in beiden Regionen genutzt wurden. Bemerkenswerterweise Weise übernahm für beide Gemeinden eine andere Stadt eine Vorbildfunktion. Der LK OHZ orientierte sich an der Stadt Güssing und Wolfhagen an der Stadt Schönau. Diese Vorbildfunktion führte wiederum zu ähnlichen Zielsetzungen und Leitorientierungen in beiden Gemeinden. Es ging um die Unabhängigkeit von Energieimporten, um vermehrten Wohlstand, eine erhöhte Wertschöpfung vor Ort und einen Beitrag zum Umwelt- und Klimaschutz bzw. zur Nachhaltigkeit.

Die Rolle der externen Einflussfaktoren für den Verlauf des Prozesses der regionalen Energiewende ist ebenfalls deutlich erkennbar. In beiden Fällen beschränkten sich die Projekte zunächst zum größten Teil auf die Stromerzeugung aus regenerativen Energien. Durch die Förderung der Kraft-Wärme-Kopplung und die Installation von Solarthermie konnte zwar auch der Anteil der grünen Wärmeversorgung erhöht werden, doch dieser Bereich, sowie Energieeffizienzmaßnahmen und vor allem der Mobilitätssektor traten zunächst in den Hintergrund. Verstärkte Maßnahmen in diesen Bereichen wurden mehrfach als Herausforderungen für die zukünftige Entwicklung der Innovationssysteme erwähnt. Grund für diese Priorisierung dürfte der Ausstieg aus der Kernenergie gewesen sein sowie die zu Beginn sehr günstigen regulativen und wirtschaftlichen Voraussetzungen für Wind-, Solar- und Biogasanlagen. Gleichzeitig war zu beobachten, dass in beiden Fällen zunächst stark in Photovoltaikanlagen und später vermehrt in Windkraftanlagen investiert wurde, was sich wiederum auf die geänderten Rahmenbedingungen durch die EEG-Novellen und der Veränderung der Einspeisevergütungen zurückführen lässt. Die Möglichkeiten zum Anstoß des Prozesses, sowie dessen Verlauf waren somit in beiden Gemeinden stark geprägt von den regulativen Rahmenbedingungen und wirtschaftlichen Anreizen.

Bevor die Differenzen zwischen den beiden Innovationssystemen hervorgehoben werden, muss zunächst erwähnt werden, dass sich die Gemeinden in ihrer Größenordnung stark unterscheiden. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich die Koordination eines solchen Prozesses auf Landkreisebene komplexer gestaltet, da eine breitere Anzahl an Akteuren involviert ist.

Vor allem auf institutioneller Ebene lassen sich signifikante Unterschiede erkennen. In Wolfhagen lag eine besonders günstige Akteurskonstellation vor, welche durch sehr aktive Beteiligte geprägt ist. Unter der Leitung des Konsortiums der vorgestellten Akteure konnten Strukturen geschaffen werden, welche die sowohl die Umsetzung einer auf EE-basierenden Stromproduktion als auch

eine breite Bürgerbeteiligung ermöglichten. Der wohl zentrale Unterschied liegt in der Betreiberkonstellation aus Stadtwerk und Bürgergenossenschaft (*siehe Kapitel 3.5*). Durch diese Verflechtung bestand eine große Interdependenz zwischen den drei Hauptakteure der Wolfhagener Energiewende (Stadtverwaltung, BEG und Stadtwerken), was die Erarbeitung gemeinsamer Ziele und enge Absprachen erleichterte. Durch die Einbindung einer Genossenschaft in die Akteurskonstellation wurde die aktive Partizipation und monetäre Teilhabe zumindest der in dieser Genossenschaft integrierten Bürger an dem Prozess ermöglicht. Durch entsprechende Renditen und die Vergabe von Aufträgen an regionale Handwerksbetriebe konnte zudem die Wertschöpfung vor Ost maßgeblich erhöht werden. Die aktive Bürgerbeteiligung trug darüber hinaus zur regionalen Bewusstseinsbildung für die Verfolgung dieses kollektiven Ziels unter den Einwohnern bei.

Im LK Osterholz hingegen agierten zwar auch ausgesprochen engagierte Akteure. Sie hatten aber zum Teil weniger institutionellen Einfluss und waren untereinander auch weniger koordiniert. Sie konnten keine vergleichbar aktivierenden und strukturierenden Effekte entfalten. Eine von Konsens getragene, koordinierte regionale Strategie kam nur in Ansätzen zustande. Zwar wurde durch die Bemühungen der Lenkungsgruppe die Umsetzung mehrerer Projekte ermöglicht, doch gab es keinen konkreten Plan, wie Projekte gemeinsam unter Einbezug aktiver Bürgerbeteiligung umgesetzt werden können. Als Resultat wurden zahlreiche Projekte einzelner Investoren verwirklicht, welche vornehmlich durch monetäre Anreize angetrieben waren. Dies auch mit der Konsequenz, dass externe Projektierer sich den Betrieb der Windkraftanlagen sichern konnten und damit die Wertschöpfung quasi extern geerntet wird. Diese Form der Nutzung lokaler Flächen, Potentiale und Ressourcen durch externe Unternehmen und Investitionen kann sich wiederum negativ auf die Identifikation der Bürger mit dem Prozess auswirken und dessen Ablehnung begünstigen. Ebenfalls sollte die Rolle der regionalen Stadtwerke in diesem Vergleich gesondert hervorgehoben werden. In Wolfhagen befinden sich die Stadtwerke in der Hand der Gemeinde und der Energiegenossenschaft. Mit WHG3 als Geschäftsführer stelle diese Institution zudem einen Akteur, welcher von allen Interviewpartner als elementarer Treiber in der lokalen Energiewende angesehen wurde. Da die Stadtwerke mit dem Bürgerwindpark und dem Bürgersolarpark, welcher in Kooperation mit der ortsansässigen BLG Project GmbH errichtet wurde, selbst als Betreiber fungieren, konnten Einnahmen als Gewerbesteuern vollständig in der Region gehalten werden und gleichzeitig Renditen an Bürger und Gemeinde ausgeschüttet werden. Die Stadtwerke in Osterholz gehören teilweise der EWE und der SWB und sind an der Trianel AG beteiligt, weshalb sie nicht vergleichbar im Landkreis verankert sind.Sie agierten aus eine passiveren Position heraus und gaben selbst zum Zeitpunkt des Interviews an, sich noch in der Rollenfindung zu befinden. Zudem wurde von anderen Akteuren kritisiert, dass sie Projekte blockieren würden, welche nicht ihrem eigenen wirtschaftlichen Interesse dienen.

In beiden Fallbeispielen war die erfolgreiche Akquise von Fördergeldern – oft in Kooperation mit wissenschaftlichen Partnern – von großer Bedeutung. Trotzdem kann die Nähe zu und enge Kooperation mit Forschungsinstituten im Falle Wolfhagen als entscheidender Faktor hervorgehoben werde, welche von den Interviewpartnern ebenfalls als treibende Kraft beschrieben wurden. Mit der Unterstützung der Universität Kassel und den Fraunhofer Instituten für Bauphysik und IWES konnte Wolfhagen gleich mehrere größere Forschungsinstitute für das lokale Energiewendeprojekt gewinnen. Zusammen mit der Agentur Energie 2000 konnten so auch vermehrt Fortschritte im Bereich der Effizienzsteigerung, vor allem in öffentlichen Einrichtungen erzielt werden. Bezogen auf das das Leitkonzept Resiliente Energiesysteme innerhalb der Innovationssysteme lässt sich ein ähnliches Bild beobachten. In beiden Projekten werden ähnliche Maßnahmen in Betracht gezogen (Mikrogrids, Hocheffizienzpumpen, Netzausbau, Flexibilisierung, Demand-Side-Management). Auch sind sich alle Akteure einig, dass zukünftig Speichertechnologien und Eigenverbrauchsmodelle eine größere Rolle in den Gemeinden spielen werden. Grundsätzlich wird von den Energieversorgern auch die Idee von Insellösungen und steuerbaren regionalen Netzen in Erwägung gezogen. Doch während in Wolfhagen die Positionen der Akteure nah beieinander lagen, wurden im LK OHZ oft sehr konträre Positionen vertreten. So wurde von Seiten der Energieversorger vertreten, dass die Versorgungssicherheit durch das regionale System (seine Resilienz) hinreichend sei und von daher Investitionen in Speicherlösungen als begrenzt sinnvoll angesehen werden. Während andere Akteure auf die Handlungsmöglichkeiten verweisen, die die Dezentralität stärken könnten u.a. durch die dezentrale Analyse und Verfolgung des Prosuming Ansatzes.

6.4.5 Perspektiven für die zukünftige Entwicklung

Maßgeblich für die Weiterentwicklung der beiden regionalen Innovationssysteme werden die Entwicklung der regulativen Rahmenbedingungen und damit ausgehend wirtschaftliche Anreize sein sowie der technologische Fortschritt. In beiden Fallbeispielen läßt sich beobachten, dass die fortwährende Veränderung der regulativen Rahmenbedingungen (z.B. EEG 2009, EEG 2012, EEG 2014) zu einer zunehmenden Verunsicherung beitrug und die langfristige Planung von Projekten erschwerte.

„Bis zu Umsetzungszeit muss man dann noch antizipieren, wie ändert sich das EEG dann? Und was man ganz klar sieht ist, dass Photovoltaik und Biogasanlagen im Grunde nicht mehr so gefördert werden, dass wir einen wesentlichen Ausbau in dem Bereich erwarten.“ (I-OHZ2: 56).

Die fehlende Planungssicherheit und sinkende Förderung hemmt die Umsetzung neuer Projekte in den Gemeinden und stellt vor allem in Osterholz ein Problem dar, wo Großprojekte maßgeblich von privaten Investoren vorangetrieben wurden.

Mit steigender Unsicherheit und zunehmendem wirtschaftlichem Risiko gestaltet sich dementsprechend auch die Finanzierung von EE-Anlagen schwieriger, da in der Regel hohe Kapitalbeträge vor Projektbeginn zur Verfügung gestellt werden müssen.

„Für die Banken muss man sagen, ist generell nicht nur hier im Landkreis, sondern generell das Thema Photovoltaik in Deutschland nicht mehr so interessant, […] vorher hatte ich eine garantierte Einspeisevergütung und jetzt ist es der Eigenverbrauch, was spar ich ein, also das Risiko steigt für die Banken, deswegen ist die Thematik auch nicht mehr so interessant. Von daher warum noch großartig Energie hinein stecken." (I-OHZ5: 158).

Die durch die Novellierungen des EEG reduzierten Anreize den Akteuren zu Folge werden in beiden Regionen den weiteren Ausbau der dezentralen Stromerzeugung erschweren. Branchenverbände wie der Bundesverband Erneuerbare Energie übten heftige Kritik. Die darin enthaltenen Maßnahmen würden den Ausbau der Erneuerbaren Energien stark behindern und Arbeitsplätze in diesem Sektor gefährden. Die Weiterentwicklung von Innovation, Flexibilität und Dynamik der neuen Branchen im Zusammenspiel von grüner Stromerzeugung, bürgernaher Lieferung und cleveren Speicher- und Systemlösungen sei durch die neue Gesetzeslage gefährdet.[85] Zentraler Aspekt des neuen Gesetzes ist die Umstellung von einer festgelegten Förderung für Erneuerbare-Energien-Anlagen durch den Gesetzgeber zu einer wettbewerbsorientierten Ausschreibung. Gemäß § 22 sind jegliche Anlagen ab einer installierten Leistung von 750 kW Windenergie an Land und Solarenergie bzw. 150 kW bei Biomasseanlage dazu verpflichtet an den Ausschreibungen teilzunehmen. Anlagen, die nur über eine geringere Leistung verfügen, haben, abhängig von Technologie und Größe der Anlage, weiterhin einen festgelegten Förderanspruch für den Strom, den sie in das regionale Netz einspeisen (vgl. Busse et al. 2016). Zuständig für das Ausschreibungsverfahren ist die Bundesnetzagentur. Der Termin zur Abgabe der Gebote, sowie die Höhe des Ausschreibungsvolumens und der max. erzielbare Höchstwert werden von der Agentur bekanntgegeben. Wie viele Ausschreibungsverfahren durchgeführt werden ist abhängig von der jeweiligen Technologie. Somit soll der Ausbau erneuerbarer Energien erstmals kontrolliert gesteigert und die Stromerzeugung aus EE-Anlagen auf maximal 45% bis 2025 gedeckelt werden (vgl. Busse et al. 2016). Seit der Novellierung des EEG 2014 wurde dieses Verfahren bereits für PV-Freiflächenanlagen angewandt. In jeder Vergaberunde überstieg die Anzahl der Verlierer die Anzahl der Gewinner deutlich (siehe Abbildung 6.62:). Die Ausbauziele der Bundesregierung wurden darauf zwei Jahre in Folge deutlich verfehlt, obgleich die Solartechnik inzwischen preiswerter geworden ist.

[85] EEG-Reform 2016 schneidet hart ins Herz der Energiewende. (2016). Zugriff am 23, 2016, von http://www.bee-ev.de/home/presse/mitteilungen/detailansicht/eeg-reform-2016-schneidet-hart-ins-herz-der-energiewende/

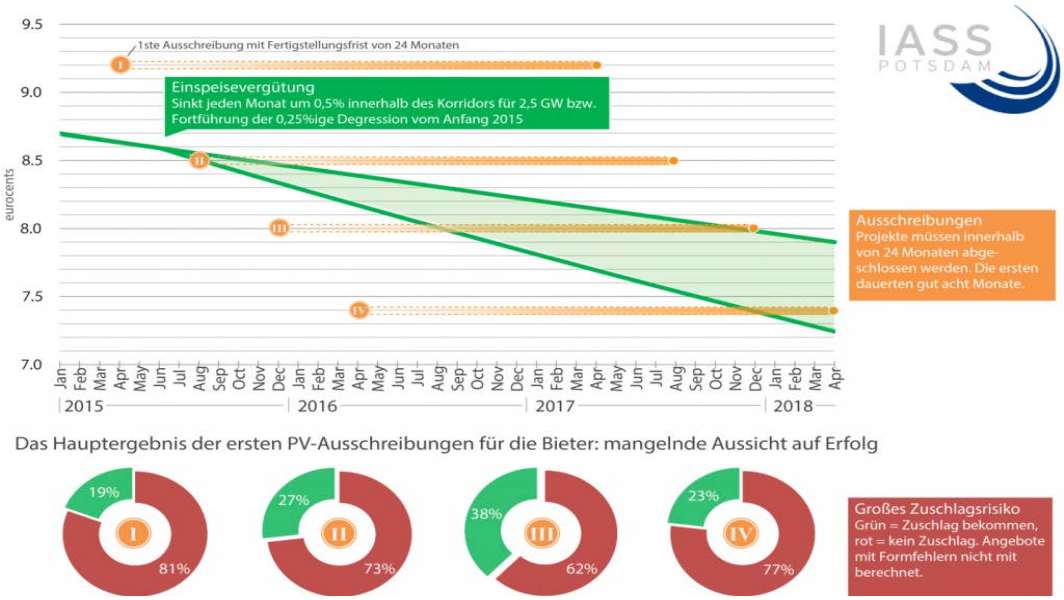


Abbildung 6.62: PV-Ausschreibungen (Quelle*:* Morris, C. (2016, June 16). EEG: Umstieg von Einspeisevergütung auf Ausschreibungen verdrängt Bürgerenergie - IASS Potsdam Blog.)

Für kleinere Investoren und Bürgerenergieprojekte erzeugt dieser Systemwechsel ein erhöhtes finanzielles Risiko. Bei ähnlich geringem Vergabevolumen und dem Zuschlagskriterium des Erzeugungspreises besteht ein hohes Risiko finanzielle Ressourcen und Zeit in dann doch abgelehnte Projekte zu investieren. Großinvestoren können die Verluste auf mehrere Projekte aufteilen und somit das Risiko minimieren (vgl. Morris 2016). Das Bündnis Bürgerenergie kritisierte das gewählte Ausschreibungsdesign und betonte zudem die begünstigte Position großer Stromkonzerne in diesem Verfahren.[86] Die Umsetzung von Bürgerenergieprojekten wie dem des „Windparks Rödeser Berg“ durch die BEG in Wolfhagen könnte somit in Zukunft wesentlich schwieriger werden. Dabei stellen genau diese Formen der Bürgerbeteiligung und der lokalen Energieproduktion für viele Bürger und Unternehmen eine zentrale Motivation und einen wichtigen Akzeptanzfaktor für die Energiewende und ein zentrales Mittel zur Steigerung der lokalen Wertschöpfung dar.[87] Diese Veränderung der rechtlichen Rahmenbedingungen kann den Ausbau der Stromerzeugung und der Nahwärmeversorgung durch weitere Biogasanlagen auf Basis der bisherigen Treiber unmöglich machen. Alternative Geschäftsmodelle müssen daher stärker in den Fokus der Gemeinden rücken. In beiden Fällen wurde von Akteuren angemerkt, dass dies über einen größeren Anteil an Eigenverbrauchsanlagen geschehen könnte.

„deswegen müssen wir auch insgesamt da umdenken, äh wird man äh den Eigenverbrauch immer weiter forcieren.“

Ob Osterholz unter den neuen gesetzlichen Bedingungen das Ziel der bilanziellen elektrischen Energieautarkie erreichen kann, bleibt fraglich. Für beide Gemeinden liegt der Schluss nahe,

[86] EEG-Reform 2016 schneidet hart ins Herz der Energiewende. (o.J.). Zugriff am 23, 2016, von http://www.bee-ev.de/home/presse/mitteilungen/detailansicht/eeg-reform-2016-schneidet-hart-ins-herz-der-energiewende/

dass der Ausbau der grünen Stromversorgung eher stagnieren wird. Eine hohe intrinsische Motivation seitens der Bürger kann zu Neuanschaffungen in Privathaushalten führen, wird jedoch nicht ausreichen, den Wegfall staatlicher Anreize ausgleichen zu können. Bereits zum Zeitpunkt der Interviews rückten die Bereiche Mobilität und Energieeffizienz stärker in den Fokus. Diese Bereiche werden wahrscheinlich auch in Zukunft unter der Berücksichtigung zur Verfügung stehender Fördermittel und Forschungsgelder, sowie der technischen Entwicklung, weiter ausgebaut werden.

6.4.6 Ausblick und Fazit zu den regionalen Fallstudien

Die Auswertung der Interviews in den Regionen macht deutlich, dass Leitorientierungen in beiden Regionen eine große Rolle gespielt haben und in beiden Regionen Vorreiterregionen (wie Güssing oder Schönau) einen wesentlichen Impuls gegeben haben. Anzumerken ist dabei, dass der Fokus der Interviews ganz überwiegend auf die Frage der Stromwende lag, dies nicht zuletzt deshalb, weil die anderen Elemente der Energiewende (u.a. Verkehr und Wärme) bislang nur einen begrenzten Schub erfahren haben.

Die Energiewende ist in starkem Maße von politischen Regulierungen abhängig, wobei die Mobilisierung privaten Kapitals für die Energiewende durch langfristige Garantien (u.a. Einspeisevergütung) sichergestellt werden konnte. Die Nutzung der Investitionspotenziale fand in beiden Regionen statt, der zentrale Unterschied zwischen den beiden Regionen bestand darin, dass es in Wolfhagen durch die Gründung der Bürgerenergiegenossenschaft gelungen ist, wesentliche Element der Wertschöpfung in der Region zu halten, während in Osterholz zwar ebenfalls in die Energiewende investiert wurde, dies aber insbes. durch „externe“ Investoren.

Konflikte um den Ausbau der EE haben in beiden Regionen stattgefunden und konnten jeweils in Aushandlungsprozessen gelöst werden. Bei diesen Konflikten ging es in beiden Fällen aber nicht um eine Grundsatzauseinandersetzung um EE, sondern um sehr konkrete Probleme, die mit dem EE Ausbau an bestimmten Orten zusammenhängen.

Die Energiewendeaktivitäten in beiden Regionen hängen bislang noch entscheidend von den Rahmenbedingungen ab, die überwiegend auf Bundesebene gestaltet werden. Trotzdem zeigt sich, dass von den Regionen unter diesen Rahmenbedingungen doch recht unterschiediche Handlungsspielräume erschlossen werden können.

Zugleich ist aber auch deutlich geworden, dass die Vorbilder durch Vorreiterregionen höchst relevant sind und diese in der Folge nicht allein Wirkungen auf andere Regionen, sondern zugleich auf Bundesebene haben. Zwar scheint aktuell das Pendel gegen regionale Akteure, also insbes. die Genossenschaften, auszuschlagen, es ist jedoch nicht ausgemacht inwieweit dies auf Dauer so sein wird, da die Umsetzung der Energiewende durch regionale Akteure möglicherweise friktionsloser verlaufen kann.

Die Rolle der Resilienz wurde erst durch das Projekt in den beiden Regionen diskutiert. Dabei konnte in Wolfhagen festgestellt werden, dass entsprechende Ansätze stärker diskutiert wurden, gerade auch vor dem Hintergrund des geplanten Südlink, der die Region tangieren soll und mit welchem der Windstrom aus der Küstenregion übertragen werden sollte. Implizit wurde in der Region die Idee generiert, dass eine Art zelluläres System in der Region aufgebaut werden sollte. Ziel war es dabei allerdings zuvörderst weitere Wertschöpfungselemente in der Region zu halten. Hinzuweisen ist dabei allerdings, dass in diesem Falle der Regionsbegriff weit größer gefasst wird, als allein das Stadtgebiet Wolfhagen. Was auch daran liegt, dass der damalige Geschäftsführer der Stadtwerke ebenfalls Geschäftsführer der Stadtwerke-Union Nordhessen (SUN) war.

Es zeigt sich allerdings auch in diesem Fall, dass die Umsetzung entsprechender Konzepte ganz wesentlich auch von den Rahmenbedingungen abhängt, sowohl der Förderung als auch der Netzregulierungen.

Mit der von der Bundesregierung geplanten weitgehenden Umstellung der Ökostrom-Förderung auf Ausschreibungssysteme steht nach Einschätzung des BEE auch die notwendige hohe Akzeptanz der Energiewende in der Bevölkerung auf dem Spiel. Bürgerengagement und Mittelstand seien bisher die wichtigsten Treiber der Energiewende gewesen. In Ausschreibungen kämen sie nicht mehr zum Zuge, sondern nur wenige große Projektierer und Energiekonzerne. Eine von der Bundesregierung geplante Sonderregelung zur Bürgerenergie könne nur unter der Rubrik „Symbol-Politik“ verbucht werden, so der BEE.

6.5 Synthetische, strombasierte Kraftstoffe – Power-to-Fuel

Regenerative Stromerzeugung, Solar- und Geothermie sowie Anbaubiomasse stellen derzeit die einzigen Optionen für eine klimaneutrale Energieversorgung dar. Anbaubiomasse weist aufgrund von Flächennutzungskonflikten jedoch nur ein stark begrenztes Nachhaltigkeitspotential auf. In der beginnenden zweiten (Systemintegration) sowie insbesondere in der dritten Phase der Energiewende (synthetische Kraftstoffe) wird es deshalb darauf ankommen, erneuerbaren Strom in alle Energiesektoren auszukoppeln und somit eine vollständig regenerative Brenn-, Roh- und Kraftstoffversorgung zu gewährleisten. Ausgehend von der Kernthese

> *Auch die postfossile Energie- und Rohstoffversorgung wird nicht gänzlich ohne kohlenstoffhaltige Energieträger auskommen. Ohne die Systemleistungen von Power-to-Fuel kann eine ganzheitliche Transformation hin zu 100% erneuerbaren Energien nicht gelingen. Dies gilt insbesondere im Transportsektor sowie für die Rohstoffversorgung der (organischen) chemischen Industrie*

sollte im Projekt Resystra zunächst die Transformationsoption „EE-Methan-System“ untersucht werden. Im Zuge der Forschungsarbeiten wurde aber schnell deutlich, dass der Fokus auf ein erneuerbares Methansystem in Deutschland für eine ganzheitliche Transformation des Energiesystems zu kurz gedacht ist. Deshalb wurde dieser Forschungsschwerpunkt auf die Betrachtung synthetischer Flüssigkraftstoffe erweitert. Diese können technisch sämtliche Anwendungen versorgen, in denen heute fossiles Erdöl zum Einsatz kommt.

Etwa 80 Prozent der in der Bundesrepublik Deutschland emittierten Treibhausgasemissionen stammen aus der Energieversorgung (UBA 2015). Zur Einhaltung des internationalen Klimaschutzziels, die oberflächennahe Erderwärmung auf deutlich unter 2 Grad Celsius im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter zu begrenzen, hat sich die Bundesregierung im Rahmen der Energiewende ehrgeizige Ziele gesetzt. Die energiebedingten Treibhausgasemissionen sollen bis 2050 um mindestens 80 Prozent gegenüber 1990 reduziert werden (Renn 2015).

In Deutschland betrug der Anteil erneuerbarer Energien in der Stromproduktion im Jahr 2015 im Durchschnitt etwa 30 Prozent (AGEE-Stat 2016). Davon entfielen bereits gut zwei Drittel auf die volatile Stromproduktion durch Wind- und Solarenergie. Die Nutzung dieser beiden Quellen wird auch in Zukunft am stärksten ansteigen. Deutlich schwieriger als im Stromsektor wird die Transformation hin zu einer nachhaltigen Energieversorgung in der Mobilität, im Wärmesektor und bei der Versorgung der Industrie mit chemischen Grundstoffen. Hier verharren die Anteile erneuerbarer Energien seit langem auf sehr niedrigem Niveau. Zudem erscheint eine direkte und vollständige Elektrifizierung dieser Sektoren selbst langfristig als eher unwahrscheinlich. Gründe dafür liegen darin, dass für den Luft- und Schwerlastverkehr bisher keine realistische Option der Elektrifizierung vorliegt, dass Batteriespeicher gegenüber konventionellen Brenn- und Kraftstoffen bezogen auf Gewicht und Volumen eine sehr geringe Energiedichte aufweisen, und dass in

vielen industriellen Prozessen bisher nicht auf kohlenstoffhaltige Rohstoffe und Energieträger verzichtet werden kann. Auch Biokraftstoffe bieten aufgrund der Flächenkonflikte nur begrenzte Perspektiven. Sie können nicht in ausreichendem Umfang nachhaltig produziert werden, so dass sie fossile Energieträger in Zukunft nur zu einem kleinen Teil ersetzen könnten.

Um die Klimaziele zu erreichen bedarf es jedoch einer vollständigen Transformation des Energiesystems hin zu (nahezu) 100% erneuerbaren Energien (für eine Limitierung der Erderwärmung auf 1,5°C erfordert es gar „negative Emissionen“) und dies ohne Einschränkungen in der Versorgungssicherheit (Höhne et al. 2016). Einen vielversprechenden Beitrag zur Erfüllung dieser Ansprüche ermöglichen synthetische, strombasierte Kraftstoffe. Als Power-to-Gas und Power-to-Liquid bereits bekannt – hier zusammengefasst als Power-to-Fuel (P2F) betrachtet – kann erneuerbarer Strom mithilfe dieser Systeminnovation chemisch gespeichert und ohne weitere Pfadabhängigkeiten in allen Energiesektoren genutzt werden. Neben der Fähigkeit, die Überversorgung mit volatil erzeugtem erneuerbarem Strom zu dämpfen bzw. auszugleichen, könnte P2F bei entsprechendem EE-Zubau die Möglichkeit bieten, weitgehende Unabhängigkeit von den globalen Märkten für Gas und Öl zu erlangen und gleichzeitig durch die Kopplung der Stromversorgung mit der Kraft- und Brennstoffversorgung einen Beitrag zur Steigerung der Resilienz des gesamten Energiesystems zu leisten. Synthetische, strombasierte Kraftstoffe können somit entscheidend zum Erreichen der strategischen, energiepolitischen Ziele beitragen (vgl. Abbildung 6.63).

Wir verzichten deshalb bewusst auf den im Zusammenhang mit Energiewende häufig verwendeten Begriff der „Dekarbonisierung“. Wir beziehen uns stattdessen auf die eingangs erläuterte These, dass auch langfristig für einige Anwendungen kohlenstoffhaltige Energieträger benötigt werden. Eine weitgehende direkte Elektrifizierung der Energiesektoren sowie der Einsatz von regenerativ erzeugtem Wasserstoff sind aus energieeffizienter Sicht zwar zu bevorzugen. Sie erscheinen aber in einigen Bereichen aus heutiger Sicht als kaum umsetzbar (insb. Schwerlast, Schiffs- und Flugverkehr). Auch der erhebliche Mehraufwand für die Etablierung neuer Infrastrukturen und der Verzicht auf einen über hundertjährigen Optimierungsprozess der Technik von Verbrennungsmotoren und Turbinen sind zu berücksichtigen. Für eine ganzheitliche Transformation wird es deshalb nicht auf eine vollständige Dekarbonisierung, sondern vielmehr auf ein Kohlenstoffrecycling aus nachhaltigen Quellen ankommen. Wichtige Eigenschaften von resilienten Energiesystemen (vgl. Kapitel 2.4) sind eine hohe Versorgungssicherheit und Umwelt- bzw. Klimaverträglichkeit (Abbildung 6.63). Nach derzeitigem Kenntnisstand ist die gleichzeitige Erbringung dieser Eigenschaften ohne P2F nicht möglich.

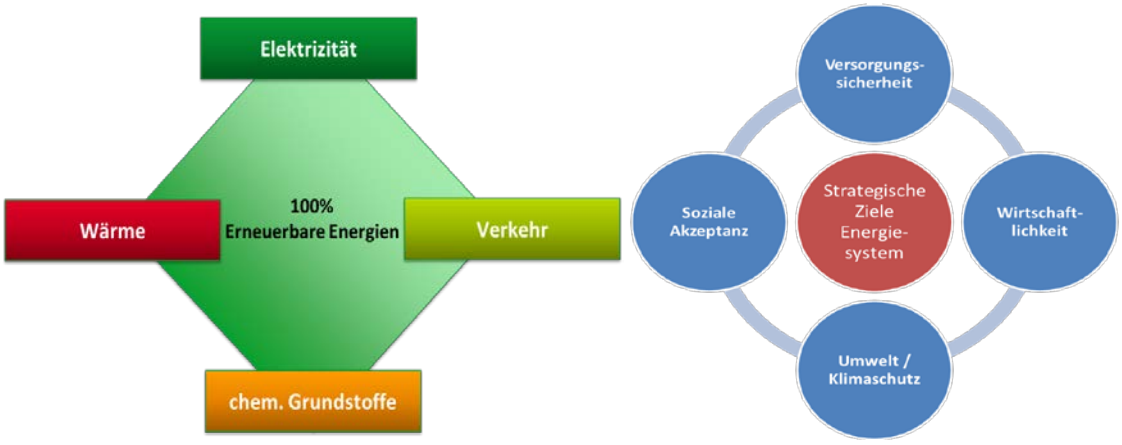


Abbildung 6.63: Schematisches Zielviereck einer 100 % EE-Versorgung (links) und Ansprüche bzw. strategische Ziele für ein resilientes Energiesystem (rechts).

Zentrale technische Elemente von P2F sind Elektrolyseure und Reaktoren für die Methanisierung und Flüssigkraftstoffherstellung. Technisch befindet sich das System derzeit in der Phase der Aufskalierung. Wirtschaftlich können die Anlagen bisher allerdings nur in Nischenmärkten betrieben werden, denn die erneuerbaren Substitute können preislich noch nicht mit fossilen Gas- und Flüssigkraftstoffen konkurrieren. Auf diesem Kenntnisstand aufbauend konzentrieren wir uns im Projekt Resystra bezüglich der Transformationsoption P2F vorranging auf folgende zwei Fragen:

1. Welche sozialen, technischen und ökonomischen Faktoren bestimmen Erfolg und Umfang der Integration von P2F in das Energiesystem?
2. Wie können die Chancen einer verstärkten Kopplung des Stromsektors mit der Brenn-, Roh- und Kraftstoffversorgung genutzt werden, um nicht nur bekannte Risiken im Zuge der Transformation zu minimieren, sondern auch die Resilienz des gesamten Energiesystems zu erhöhen?

Eine Systemanalyse soll zunächst die Grundlagen zur Beantwortung der Fragen zusammenstellen. Neben einer umfangreichen Literaturrecherche wurden Workshops und Interviews mit Experten aus der Branche durchgeführt. In einem qualitativen Forschungsansatz der Innovationsforschung wurden die Erkenntnisse über relevante Akteure und deren Handlungs- und Einflussmöglichkeiten in das Schildkrötenmodell der richtungsgebenden Einflussfaktoren (vgl. Kapitel 6.5.2) integriert. Anhand von Szenarien wurden dann die identifizierten Einflussfaktoren für spätere Phasen der Transformation dynamisiert. Aufbauend auf diesem Systemverständnis konnte in Kooperation mit der Technischen Universität Delft und der Universität Groningen für eine quantitative Systemanalyse ein agentenbasiertes Modell erarbeitet werden (vgl. Kapitel 5.7 und Kapitel 6.5.3). Die Interaktionen der identifizierten relevanten Akteure und die Entwicklung technischer Parameter können in diesem Modell über einen Zeitraum bis zu 20 Jahren simuliert werden, mit dem Ziel, diejenigen Bedingungen heraus zu filtern, unter denen sich P2F-Anlagen rentabel im Markt betreiben lassen.

Ergänzend wurde eine strukturelle Vulnerabilitätsanalyse eines zukünftigen Energiesystems mit P2F durchgeführt. Neben der technischen Untersuchung zur Flexibilität und Störanfälligkeit von P2F-Anlagen wurde hier analog zur in Kapitel 5.6.2 beschriebenen Methodik vorrangig herausgearbeitet, inwieweit P2F, als Option zur Substitution fossiler Energieträger, die Resilienz der Energieversorgung in Deutschland verbessern könnte. Zudem wurde der potentielle Beitrag der Systeminnovation P2F zur Resilienz anhand der Gestaltungselemente für resiliente Energiesysteme bestimmt. Die Ergebnisse mündeten Handlungsempfehlungen für Politik, Wirtschaft und zivilgesellschaftliche Akteure zur Bewältigung des Transformationsprozesses hin zu einem resilienten Energiesystem mit P2F.

Kernbotschaften aus den Kapiteln zur Transformationsoption P2F:

- ***Ohne P2F ist eine (nahezu) treibhausgasneutrale Energieversorgung Deutschlands nicht möglich:*** *Die Ausbauziele im Energiekonzept der Bundesregierung müssen aufgrund des zusätzlichen Strombedarfs im Wärme- und Mobilitätssektor angepasst werden, so dass die Klimaschutzziele sicher erreicht werden können. Bisher wird mit dem Begriff der Energiewende oft nur die Versorgung mit erneuerbarem Strom verbunden. Eine ganzheitliche Transformation, wie sie zur Einhaltung der Klimaschutzziele benötigt wird, umfasst jedoch mehr als die Stromwende. Nicht nur durch eine direkte, sondern vor allem auch durch eine indirekte Elektrifizierung (in Form von synthetischen, strombasierten Kraftstoffen) kann die ganzheitliche Transformation gelingen, so dass Strom in Zukunft zum primären bzw. Ausgangsenergieträger aller Sektoren wird. 100% erneuerbare Energien erfordern also wesentlich mehr, als 100% erneuerbare Energien im Stromsektor, und sie erfordern einen gewaltigen Zuwachs an Kapazitäten zur Erzeugung von erneuerbarem Strom.*
- ***P2F erhöht die Resilienz des Energiesystems während und nach der Transformation:*** *Nur durch P2F kann die Diversität in der Energieversorgung aufrechterhalten werden, indem auch langfristig nachhaltige, kohlenstoffhaltige Energieträger zur Verfügung stehen. Zudem bietet P2F durch die chemische Konversion eine Möglichkeit zur Langzeitspeicherung erneuerbaren Stroms in der vorhandenen Gas- und Kraftstoffinfrastruktur, wodurch eine flexible Nachfrage (entgegen des Demand Side Managements) weiterhin ermöglicht wird. Mit Elektrolyseuren als (begrenzt) regelbaren Verbrauchern könnte P2F bei entsprechender Steuerung auch zur Stabilität der Stromnetze beitragen und Lastgradienten dämpfen.*
- ***P2F wird vermutlich kaum als Langzeitspeicher / Rückverstromungsoption zum Einsatz kommen:*** *Die von uns ursprünglich mit einer großskaligen Anwendung von Power-to-Gas verfolgte Motivation, Stromüberschüsse im Erdgasnetz zu speichern und in Zeiten geringerer EE-Stromproduktion zurück zu verstromen ist zwar nachvollziehbar. Die Rückverstromung dürfte aber aufgrund des Gesamtwirkungsgrades eher die Ausnahme bleiben.*

Dies gilt in noch viel stärkerem Maße für Power-to-Liquid. Wir sehen diese Optionen inzwischen deutlich skeptischer. Die Rückverstromung verharrt zu sehr auf der Fixierung auf den Stromsektor und vernachlässigt die kaum elektrifizierbaren Bedarfe in den Bereichen Mobilität und chemische Grundstoffe. Die kurz- und erst Recht die langkettigen synthetischen Kohlenwasserstoffe sind viel zu wertvoll. Sie sollten nur im äußersten Notfall als Lückenbüßer in der Rückverstromung eingesetzt werden. Zudem dürften bis zu einem Anteil von mindestens 70-80% erneuerbaren Energien kaum Langzeitspeicher für eine stetige Stromversorgung benötigt werden. Kleinskaligere Speicheroptionen wie Batterien sowie Lastmanagement und der Ausbau internationaler Übertragungsnetzkapazitäten sind hier zunächst die Mittel der Wahl, um Engpässe in der Stromversorgung auszugleichen, da diese Optionen als kostengünstiger angesehen werden und wesentlich effizienter sind.

- ***P2F stellt eine Alternative zur Biomasse für die Erfüllung der THG-Quote bis 2020 und darüber hinaus dar:*** *Anstelle der Langzeitspeicherung von Strom ergeben sich kurz- und mittelfristig andere Märkte für strombasierte Brenn-, Roh- und Kraftstoffe. Im Verkehrssektor tragen bislang maßgeblich Biokraftstoffe den Anteil erneuerbarer Energien. Deren Potential ist begrenzt und gesellschaftlich umstritten. Ein Hektar Anbaufläche bietet ein Potential von ~20 MWh Biodiesel pro Jahr. Auf der gleichen Fläche ließen sich nach Sterner ~570MWh Windstrom erzeugen, mit dem je nach Wirkungsgrad mindestens 285MWh (bei einem Wirkungsgrad von η = 50%) synthetische Kraftstoffe pro Jahr erzeugt werden könnten (Sterner 2014). P2F bietet deshalb eine ertragreiche Alternative, um höhere THG-Minderungsquoten im Mobilitätsbereich auch zukünftig einzuhalten.*

  > *„Jeder Mitgliedstaat gewährleistet, dass sein Anteil von Energie aus erneuerbaren Quellen bei allen Verkehrsträgern im Jahr 2020 mindestens 10% seines Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor entspricht."* Erneuerbare-Energien-Richtlinie der EU (2009/28/EG) Artikel 3 Absatz 4.

10% erneuerbare Energien in der Mobilität reichen bei Weitem nicht als langfristiges Ziel und Elektromobilität alleine wird nicht die Lösung sein. Nicht zu elektrifizierende Teile des Verkehrs und der chemischen Industrie könnten sich daher zu einer Art Leitmarkt für P2F entwickeln. Auf diesem Weg können Anwendungen mit Anforderungen an eine besonders hohe Energiedichte (z.B. Luftverkehr), aber auch kohlenstoffbasierte Grundstoffe erneuerbar ausgestaltet werden. Entscheidender Vorteil für eine Auskopplung der P2F-Produkte sind höher erzielbare Erlöse als im Stromsektor und damit eine früher erreichbare Wirtschaftlichkeit. Für das Erreichen der Wirtschaftlichkeit in diesen Märkten kommt es neben anfänglichen Subventionen vor allem auf die Festlegung klarer Klimaschutzziele mit angemessenen Strafzahlungsmechanismen an, wenn die Ziele verfehlt werden.

- ***P2F bietet eine Perspektive für eine nachhaltige chemische Industrie:*** *Auch im post-fossilen Zeitalter erscheint es derzeit nicht als realistisch, dass Industriezweige gänzlich ohne kohlenstoffhaltige Energieträger / Grundstoffe auskommen werden (insb. chemische Industrie und Metallurgie). Für eine klimaneutrale und nachhaltige Industrie bedarf es daher erneuerbarer Rohstoffe auf Kohlenwasserstoffbasis. Über P2F produzierte Basischemikalien eröffnen die Perspektive für einen nachhaltigen C-Kreislauf und stellen somit neben nachwachsenden Rohstoffen eine Alternative zu fossilen Basisprodukten dar. Gleichzeitig wirkt die Substitution der fossilen Kohlenwasserstoffe Resilienz erhöhend, nicht zuletzt aufgrund verminderter (Import-)Abhängigkeiten. Märkte im industriellen Sektor werden sich durch Ressourcenknappheit (derzeit sind Signale für eine echte Verknappung von Rohöl allerdings nicht absehbar) und Klimaschutzvorgaben (z.B. CO_2-Steuer, Zertifikate etc.) ergeben. Durch die internationale Verständigung auf einen äußerst ehrgeizigen Klimaschutz bei der COP 21 ist kurz- bis mittelfristig mit strengeren Vorgaben für Emissionsreduktionen bei Treibhausgasen zu rechnen.*

- ***P2F hat vorerst keine Akzeptanzprobleme:*** *Bisher wurden Akteure und Betreiber der bestehenden Pilotanlagen im Unterschied zu Biokraftstoffen und Elektromobilität nicht mit Akzeptanzproblemen konfrontiert. Aufgrund der einfachen Integration in bisherige (Infra-)strukturen sind diesbezüglich möglicherweise auch mittel- bis langfristig kaum Probleme zu erwarten. Durch P2F wird sich allerdings der Strombedarf langfristig deutlich erhöhen, wodurch der bereits heute zum Teil kritisch gesehene Ausbau erneuerbarer Energien (insbesondere Windenergie) bei inländischer Produktion deutlich höher ausfallen wird. Es muss, je nach realisierten Einsparpotenzialen, von einer Verzehn- bis Verfünfzehnfachung der derzeit installierten Leistung ausgegangen werden. Intensivierte Flächenkonflikte und größere Widerstände gegen Windenergieprojekte und Stromtrassen dürften die Folge sein. In der vierten Phase der Energiewende könnten die erneuerbaren Substitute (sowohl Strom als auch Treibstoffe) aus wenig besiedelten sonnen- und windenergiereichen Regionen importiert werden.*

- ***P2F kann systemdienlich gesteuert werden und so das Stromsystem entlasten:*** *Neue Märkte für P2F und die partielle Elektrifizierung von Anwendungen außerhalb des Stromsektors führen zu einem Anstieg des Strombedarfs insgesamt. Als (begrenzt) steuerbare Verbraucher und aufgrund der guten Speichermöglichkeit können P2F-Anlagen zu einer höheren verfügbaren Flexibilität im Stromerzeugungssystem beitragen. Diese Möglichkeit ist allerdings mit Einschränkungen verbunden. Die bisher noch teuren PEM-Elektrolyseure können vergleichsweise rasch auf Schwankungen im Stromangebot reagieren, die alkalischen Elektrolyseure sind aber aufgrund der Empfindlichkeit ihrer Katalysatoren aus heutiger Sicht nicht für einen flexiblen Betrieb geeignet. Noch kritischer ist nach aktuellem Stand der Technik ein flexibler Betrieb von Fischer-Tropsch Anlagen. Sie können aufgrund*

einer kritischen Prozessführung nur durch entsprechende Pufferspeicher dynamisiert werden. Sie werden bisher ausschließlich im stationären Betrieb gefahren. Hier käme ggf. eine Zwischenspeicherung des Wasserstoffs als Puffer in Frage. Bezüglich des Themas Systemdienlichkeit ist zudem zu beachten, dass Netzengpässe beispielsweise häufig in entlegenen Gebieten ohne Gasnetzzugang auftreten und nur mit hohem Aufwand durch P2F entlastet werden können.

- ***P2F-Anlagen sind derzeit noch nicht effizient und nicht flexibel genug und synthetische Treibstoffe sind im Vergleich zu fossiler Energie noch viel zu teuer:*** *Intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeit muss sich auf die Steigerung der Effizienz und die Dynamisierung des Betriebs der P2F-Anlagen konzentrieren. Mit steigender installierter Leistung wird P2F durch Skaleneffekte voraussichtlich deutlich günstiger werden. Eine frühzeitige Kommerzialisierung der Technologien ist wichtig, damit diese langfristig für eine resiliente und THG-neutrale Energieversorgung zur Verfügung stehen. Eine hohe Förderung von P2F-Projekten in der Entwicklungsphase führt zu einer frühzeitigen Degression der Investitionskosten.*
- ***Die Integration von P2F in das deutsche Energiesystem erfordert deutliche regulatorische Signale:*** *Mithilfe von Simulationen konnte im Projekt gezeigt werden, dass sich selbst bei steigenden Marktpreisen von fossilem Erdgas und Erdöl kaum Geschäftsmodelle für den Betrieb von P2F-Anlagen ergeben. Nur mit einer ganzen Reihe von regulatorischen Eingriffen in die Märkte kann ein wirtschaftlicher Betrieb ermöglicht werden. Vor allem Industrieunternehmen müssen Anreize gegeben werden, von fossiler Energie abzuweichen. Dies kann beispielsweise über die Einführung von Treibhausgasminderungsquoten branchenübergreifend erreicht werden, verbunden mit empfindlichen Strafzahlungen, sollten diese Quoten nicht erfüllt werden. Weitere Anreize könnten sich aus einer CO_2-Steuer oder aus einem reformierten europäischen Emissionshandelssystem mit deutlich höheren CO_2-Zertifikatspreisen ergeben, die indirekt zu einer Verteuerung fossiler Energieträger beitragen. Das derzeitige Emissionshandelssystem kann praktisch keinerlei Wirkung entfalten. Eine zügige Investitionskostendegression kann nur über eine umfangreiche Markteinführung mit entsprechenden Skaleneffekten gelingen. Dafür bedarf es einer deutlich höheren Förderung für die Errichtung neuer P2F-Anlagen, bis sich eigenständige Märkte entwickelt haben.*

6.5.1 Systembeschreibung Power-to-Fuel

6.5.1.1 Einleitung

Akteure der Energiebranche sind sich einig: ohne innovative Lösungen zur Speicherung und Flexibilisierung erneuerbaren Stroms können die Klimaschutzziele nicht erreicht werden und

Deutschlands Vorzeigeprojekt „Energiewende“ wäre zugleich gescheitert. Bereits heute müssen EE-Stromanlagen in Zeiten besonders hoher Erzeugung wegen der zu geringen Kapazität von Leitungen abgeschaltet werden. Nicht genutzter Strom, der von den Endverbrauchern trotzdem über Netzentgelte gezahlt werden muss, lässt die Kritik an der Energiewende immer wieder neu aufkommen (Guratzsch 2014; Matthes 2014). Der Netzausbau kommt viel zu langsam voran, seine Kosten werden über die Stromrechnung von den Bürgern getragen. Die Stimmen von Kritikern werden daher zunehmend lauter – häufig wird argumentiert, der Zubau erneuerbarer Energien sei zu rasant und zu teuer und müsse fortan gebremst werden (Abdi-Herrle 2016). So kann auch die jüngste Zonenaufteilung im EEG verstanden werden, durch die insbesondere in ertragreichen Gebieten der Ausbau von Windkraftanlagen gebremst wird (Alternative Energien 2016). Dem wiederum stehen die Klimaschutzziele gegenüber, die mit einem langsameren Ausbau nicht erreicht werden können. Vielmehr kommen einige Studien zu dem Schluss, dass der Zubau Erneuerbarer noch viel schneller umgesetzt werden müsste, um die Klimaerwärmung auf bis zu 1,5 C – zumindest aber bis auf 2°C – zu beschränken (Nitsch 2016a);(Quaschning 2016a).

Vielversprechende Lösungsansätze bietet die Systeminnovation P2F für den Transformationsprozess, mit denen gleich mehrere Probleme auf dem Weg zur 100% erneuerbaren Energieversorgung gelöst werden könnten. Als Grundlage für alle weiteren im Projekt Resystra durchgeführten Analysen beinhaltet dieses Kapitel

- eine Einführung in das grundsätzliche Konzept der Systeminnovation[88] P2F
- Grundlagen zu den Prozessen
- Informationen zum bestehenden Akteursnetzwerk
- einen Überblick über die technischen Komponenten
- einen Überblick zur Wirtschaftlichkeit und Kosten der Technologien und
- einen Einblick in aktuelle regulatorische Rahmenbedingungen.

Aufgrund des bereits zahlreich erschienenen und umfangreichen Literaturangebots zum P2F-Konzept wird in den einzelnen Unterkapiteln jeweils ein zusammenfassender Einblick in die Thematik gegeben, um ein Grundverständnis für die Folgekapitel zu erlangen. Für ausführlichere Zusammenhänge wird an entsprechender Stelle auf weiterführende Literatur verwiesen.

6.5.1.2 Das Konzept der Systeminnovation P2F

Das grundlegende Konzept zur Erzeugung strombasierter, synthetischer Kraftstoffe nach dem in Abbildung 6.64 dargestellten Schema ist weitgehend bekannt und erprobt (vgl. (Breyer et al. 2015; Graves et al. 2011; König et al. 2015)). Erneuerbarer Strom wird über eine Prozesskette in chemische Energie umgewandelt und kann so als Brenn-, Roh- und Kraftstoff verwendet (oder

ggf. auch rückverstromt) werden. In einem ersten Prozessschritt wird mittels Elektrolyse Wasserstoff erzeugt. Dieser kann unter dem Aspekt der energetischen Effizienz bereits direkt verwendet und als solcher auch partiell in das Erdgasnetz eingespeist werden. Aufgrund einer nur eingeschränkten Kompatibilität mit vorhandenen Infrastrukturen und einer volumetrisch vergleichsweise geringen Energiedichte ist Wasserstoff allerdings für den Einsatz in vielen Anwendungen nicht besonders geeignet (Sterner und Stadler 2014). Durch weitere Verfahrensschritte kann der Elektrolysewasserstoff unter Einbezug einer Kohlendioxidquelle in synthetisches Methan oder auch in Flüssigkraftstoffe umgesetzt werden. Das Methan kann bei entsprechender Prozessführung eine Reinheit von nahezu 100% erreichen und direkt für sämtliche Anwendungen von Erdgas eingesetzt werden, von der uneingeschränkten Einspeisung in das Erdgasnetz bis zur Nutzung als Kraftstoff im Verkehr. Beim Flüssigkraftstoff handelt es sich um ein Fischer-Tropsch-Syntheseprodukt, welches direkt eingesetzt oder auch als Rohölsubstitut in standardisierten Raffinerieprozessen entsprechend weiter aufbereitet werden kann. Das Fehlen von Verunreinigungen wie Schwefel und Stickstoff und ein geringerer Anteil an zyklischen Kohlenwasserstoffen (Aromaten) führt bei der Verbrennung im Vergleich zu fossilen Treibstoffen zu einer besseren Emissionsbilanz (Klerk 2011). Ausgehend von erneuerbarem Strom können so auch Bereiche des Energiesystems nachhaltig mit Energie versorgt werden, für die es bisher keine oder nur partielle Lösungen gab.

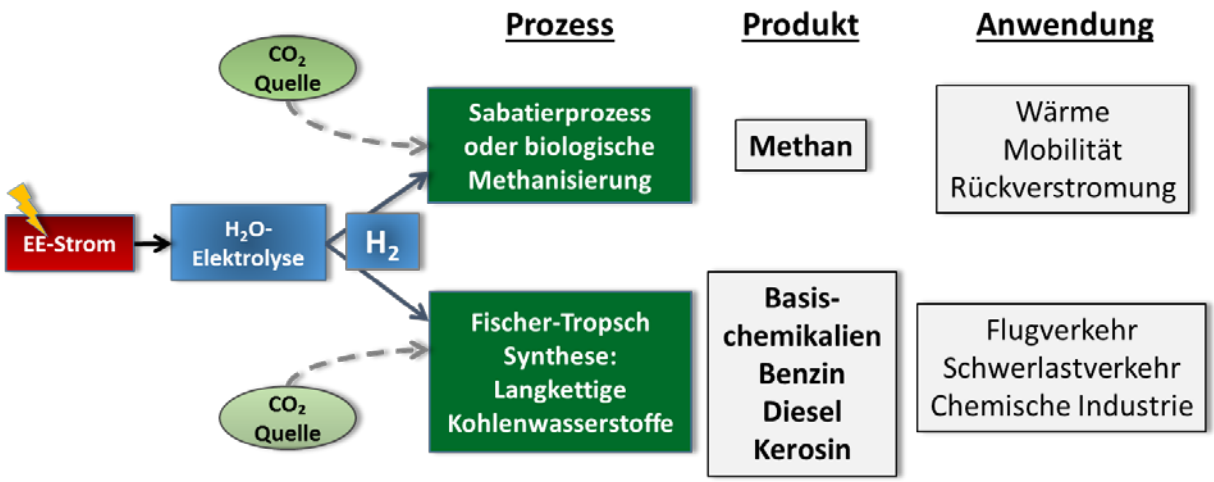


Abbildung 6.64: Prozessschema des P2F-Konzepts. Synthetische, strombasierte Kraftstoffe können Erdgas und -öl subsituieren und somit einen entscheidenden Beitrag zur Sektor übergreifenden Energiewende leisten (eigene Darstellung).

Im Vergleich zur Erzeugung von Biokraftstoffen ergeben sich für P2F deutlich geringere direkte Flächennutzungskonflikte. Abgesehen von der Kontroverse, dass mit dem Anbau von Energiepflanzen Anbaufläche für Nahrungsmittel verloren geht, können Biokraftstoffe auch technisch bei Weitem nicht in ausreichendem Ausmaß nachhaltig angebaut werden. Sie wurden deshalb in einigen Studien sogar vollständig aus Szenarien zur zukünftigen Energieversorgung verbannt (Fürstenwerth et al. 2014; Werner 2013). Aufgrund des vergleichsweise geringen Photosynthese-Wirkungsgrades zwischen 0,1 - 8% ist der Flächenertrag von Windenergieanlagen beispielsweise

um ein Vielfaches höher (FAO 1997; Govindjee 2000). Photovoltaik-Anlagen erreichen Wirkungsgrade von über 15%. Das Umweltbundesamt hat in einer Studie ein maximales Flächenpotential von 4,9 Mio. Hektar für die Erzeugung von Onshore Windstrom in Deutschland errechnet und ist von einer maximalen Leistung von 1.190 GW mit einem maximalen Ertrag von 2.900 TWh ausgegangen, womit sich der heutige Sektor übergreifende Endenergiebedarf komplett decken ließe (Lütkehus et al. 2013). Für Anbaubiomasse wird ein maximales Flächenpotential von 4,2 Mio. Hektar mit einem maximalen Ertrag von 513 TWh angegeben (Agentur für Erneuerbare Energien 2014). Im direkten Vergleich ließe sich somit ungefähr die fünffache Energiemenge durch Windkraft auf gleicher Fläche erzeugen.

In einer vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) in Auftrag gegebenen Studie wurde für Deutschland ein Stromerzeugungspotential aus erneuerbaren Energien unter der Berücksichtigung ökologischer Aspekte, wie z.B. dem Ausschluss von Naturschutzflächen, von 462 - 3.939 $TWha^{-1}$ ermittelt. Der großen Bandbreite liegt die Auswertung verschiedener Studien zugrunde, welche jeweils unterschiedliche Annahmen zu verfügbaren Flächen, bspw. unter der Berücksichtigung von Akzeptanzaspekten, getroffen haben. Die in den untersuchten Studien ermittelten Potentiale sind in Abbildung 6.65 abgebildet und nach Energiequellen unterteilt. Biomasse wurde dabei nicht berücksichtigt. Die Autoren haben zudem jeweils eigene Annahmen zum jeweiligen Potential der Energiequellen getroffen und sich auf ein technisches Gesamtpotential von 1.000 $TWha^{-1}$ festgelegt (Kreyenberg et al. 2015).

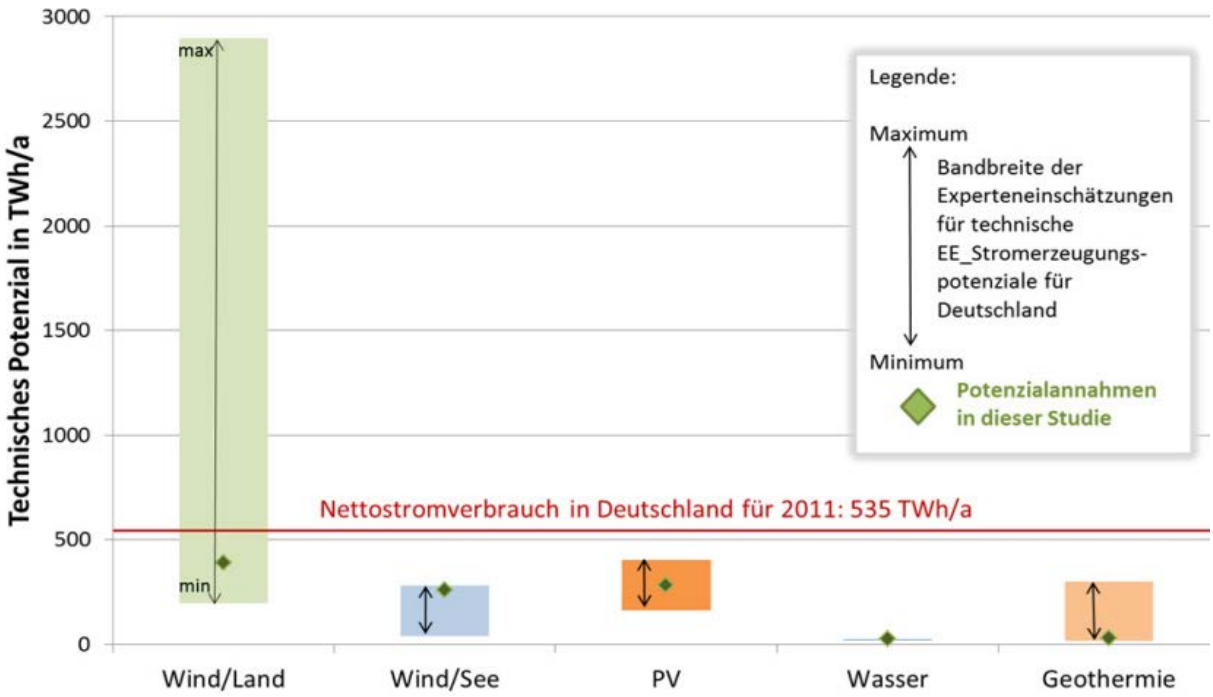


Abbildung 6.65: Gegenüberstellung der Potentiale zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen (Kreyenberg et al. 2015).

Das Potential zur Erzeugung erneuerbaren Stromes ist also entsprechend groß. Folgt man den Angaben in Abbildung 6.66, ließe sich mit Hilfe von P2F die für eine vollständige Transformation

des Energiesystems nötige Sektorkopplung und somit auch ein wichtiger Beitrag zur Resilienz von Energiesystemen realisieren.[89] Für die Energiewende könnten sich auf diese Weise entscheidende Vorteile ergeben:

- Vollständige Substitution fossiler Energieträger
- Bereitstellung energiedichter Treibstoffe für Langstrecken-, Schiffs-, Schwerlast- und Flugverkehr
- Bereitstellung von Basischemikalien für die chemische Industrie
- Höhere nationale Eigenversorgung bis hin zur Energieautarkie
- Möglichkeit der Langzeitspeicherung von elektrischer Energie
- Partielle Substitution des Netzausbaus durch Nutzung „vor Ort“ / Entlastung der Stromnetze durch steuerbaren Verbrauch
- Geringerer Druck auf das Demand Side Management

Die Langzeitspeicherung stand zunächst im Fokus der stromzentrierten Energiewendedebatte. Inzwischen wird vermehrt diskutiert, ob Langzeitspeicher zur Rückverstromung überhaupt benötigt werden. Doch selbst ohne die vergleichsweise ineffiziente Rückverstromung ergeben sich interessante Speicheroptionen. Eine großskalige Etablierung des P2F-Konzeptes würde es ermöglichen, die großen Speicherkapazitäten der Gas- und Flüssigkraftstoffinfrastruktur von mehreren hundert Terrawattstunden nachhaltig zu nutzen (Jentsch et al. 2011; Zuberbühler 2015).

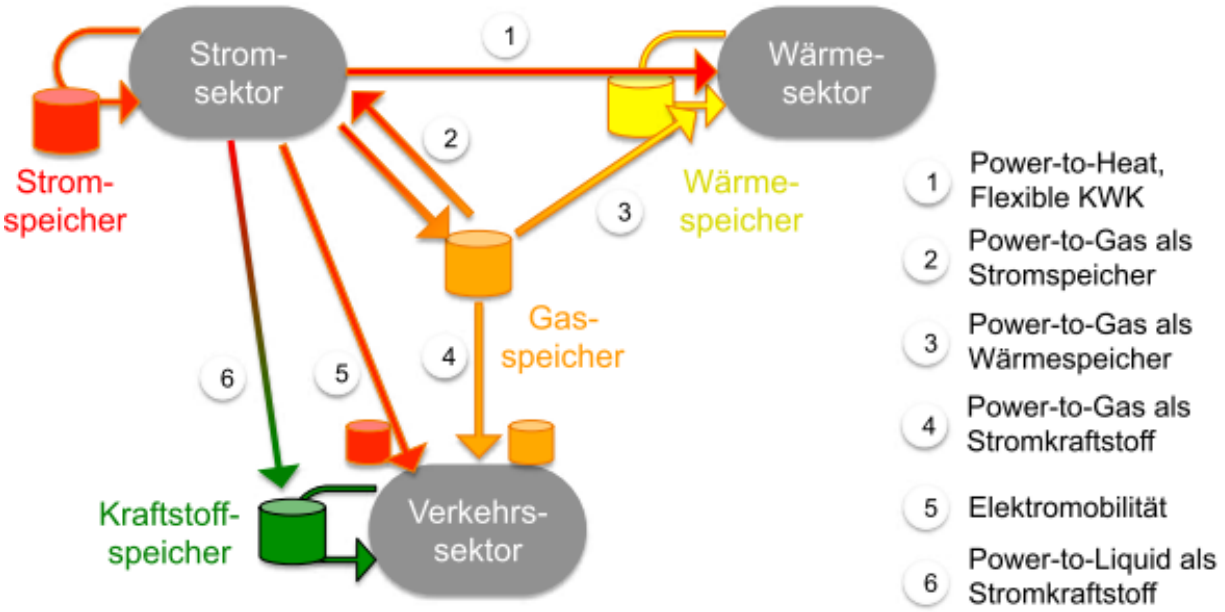


Abbildung 6.66: Schematische Darstellung von Varianten der Sektorkopplung (Sterner 2014).

Die Thematik erfährt auch auf politischer Ebene zunehmend Aufmerksamkeit. Mit dem Ziel, Power-to-Gas bis 2025 großtechnisch zu realisieren, hatte die SPD bereits 2013 im Wahlkampf für ein Speicherfördergesetz geworben (Steinbrück und Machnig 2013). Die Grünen und die SPD

[89] Vgl. Kapitel 0 zum Beitrag von P2F zur Resilienz

in Schleswig-Holstein forderten, abgeregelte Strommengen aus Windenergie von Abgaben zu befreien und Unternehmen einen regulatorischen Zugang für die Speicherung bzw. Wandlung zu verschaffen (Interview mit Dr. Robert Habeck, 2016). Die Strategieplattform Power-to-Gas der Deutschen Energieagentur (dena) fordert eine starke Förderung der Systeminnovation für eine frühzeitige Integration von P2F und fokussiert auf eine installierte Anlagenkapazität von 1 GW bis zum Jahr 2022 (Deutsche Energie-Agentur 2013).

Im Projekt Resystra ist das Power-to-Fuel Konzept aufgrund seines hohen technischen Potentials für einen Beitrag zur Resilienz von Energiesystemen ein zentraler Forschungsschwerpunkt. Zur Erfassung des aktuellen Standes der Technik sowie zur Auslotung aktueller Problemstellungen und möglicher Lösungen wurde ein erster Workshop mit Akteuren aus Wirtschaft, Recht und Forschung durchgeführt, bei dem folgende Institutionen und Unternehmen anwesend waren:

- Bremer Landesbank
- Delft University of Technology
- DNV GL Energy
- EnviTec Biogas AG
- European Biogas Association
- Friedrich Wilhelm Bessel Institut Forschungsgesellschaft m.b.H.
- IRO GmbH
- Planet GbR
- RWTH Aachen
- Stadtverwaltung Wilhelmshaven
- Stiftung Umweltenergierecht
- Umweltbundesamt
- Umweltforschung GmbH (ARSU)
- Universität Groningen
- Verband der Deutschen Kraftstoffindustrie

Aus den verschiedenen Blickwinkeln der anwesenden Akteure wurden der aktuelle Stand und Perspektiven von Power-to-Fuel Technologien diskutiert. Eine zentrale Erkenntnis des Workshops war, dass der bis dahin im Projekt verfolgte Fokus auf synthetisches Methan ebenso zu kurz greift wie die Idee der Rückverstromung. Die Bereitstellung von erneuerbaren Flüssigkraftstoffen wurde für eine erfolgreiche Energiewende als viel entscheidender eingeschätzt. Für die Kooperation mit der TU Delft und der Universität Groningen konnte auf dem Workshop zudem ein erster Grundstein für die Erarbeitung des agentenbasierten Modells gelegt werden.

6.5.1.3 Grundlagen zu den Prozessen

An dieser Stelle werden die Verfahren zur Wasserstoffherstellung mittels Elektrolyse, die Methanisierung über den Sabatier-Prozess und Methanogenese sowie die Fischer-Tropsch-Synthese zur Erzeugung von langkettigen Kohlenwasserstoffen beschrieben.

Elektrolyse

Bei der Elektrolyse wird eine Energiezufuhr durch externe Quellen in Form von elektrischer Energie benötigt, um eine nicht spontan ablaufende Redoxreaktion durchführen zu können. In der allgemeinen Chemie werden Redoxreaktionen als eine Reaktion verstanden, bei der Elektronen eines Stoffes abgegeben und durch einen anderen aufgenommen werden (vgl. (Brown et al. 2007)). Bei der Elektrolyse werden chemische Veränderungen an einer elektrisch leitfähigen Lösung (Elektrolyt) durch eine in den Elektrolyten eingetauchte externe Stromquelle (Elektroden) ausgelöst. Bei der Wasserelektrolyse werden die Gase Wasserstoff und Sauerstoff durch die Redoxreaktion des Elektrolyten Wasser erzeugt. Dieser Vorgang ist vereinfacht durch die Reaktionsgleichung (1)

$$2\,H_2O \rightarrow 2\,H_2 + O_2 \tag{1}$$

dargestellt (vgl. (Steinmüller et al. 2014)).

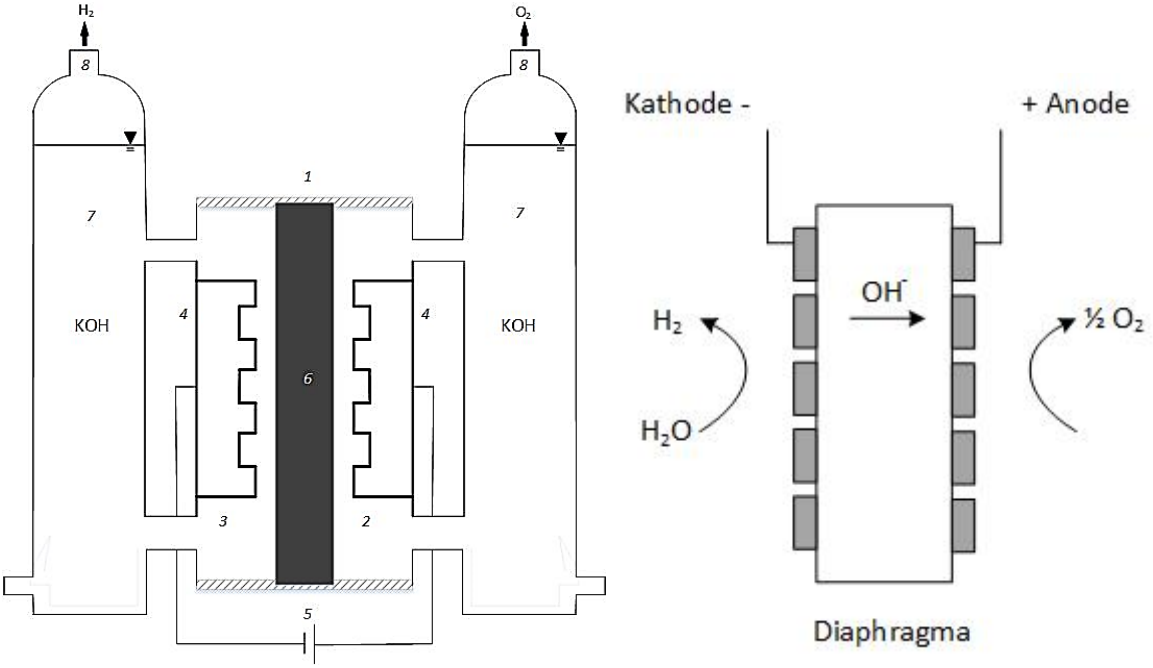


Abbildung 6.67: Schematischer Aufbau einer alklaischen Elektrolysezelle und Darstellung der Reaktion (nach (Smolinka et al. 2011; Stolten und Emonts 2016)

Für das P2F-Konzept werden bisher drei relevante Elektrolyseverfahren angewendet: (1) die alkalische Elektrolyse (AEL) mit einem flüssigen basischen Elektrolyten, (2) die saure bzw. Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse (kurz PEM-Elektrolyse) mit einem polymeren Festelektrolyt und (3) die Hochtemperatur-Wasserdampfelektrolyse mit einem Festoxid als Elektrolyt (vgl. (Grimm et al. 2013)). Nach der Zuführung des Eduktes Wasser im flüssigen Aggregatzustand

werden die alkalische Elektrolyse und die PEM-Elektrolyse als Niedrigtemperatur-Elektrolyse (NT) von der Hochtemperatur-Wasserdampfelektrolyse (HT) unterschieden, bei der Wasser in der Dampfphase zugeführt wird. Des Weiteren weichen bei den verschiedenen Technologien die Reaktionen an der Kathode und Anode voneinander ab (vgl. (Smolinka et al. 2011; Steinmüller et al. 2014)).

Der allgemeine schematische Aufbau einer alkalischen Elektrolysezelle sowie die stattfindende Reaktion sind in Abbildung 6.67 dargestellt. In dem Zellentrog (1) befinden sich die Anode (2) und Kathode (3), die über ihre jeweiligen Endplatten (4) mit der Stromquelle (5) verbunden sind. Diese Elektroden sind aus perforierten Blechen mit einer porösen Oberfläche und nahe einem Diaphragma (6) positioniert. Das Diaphragma ist eine stromdurchlässige (mit einem niedrigen Widerstand) aber möglichst gasundurchlässige (um eine Vermischung der Produkte zu verhindern) Trennwand zum Beispiel aus Yttrium-dotiertem Zirkoniumdioxid oder sulfoniertem Polyetheretherketon (sPEEK). So entstehen zwei Halbzellen, die mit einem flüssigen basischen Elektrolyten, wie einer wässrigen Kaliumhydroxid-Lauge (KOH) mit einer typischen Konzentration von 20 – 40 %, befüllt sind. Diese Elektrolyten werden in separaten Tanks gelagert (7), welche auch als Gas-Flüssig-Separator dienen. Über Öffnungen (8) dieser Tanks werden die produzierten Gase Wasserstoff und Sauerstoff abgeschöpft (vgl. (Otero et al. 2014; Smolinka et al. 2011; Steinmüller et al. 2014)).
Bei der Reaktion in einer Wasserelektrolysezelle wird die Kathodenreaktion von der Anodenreaktion unterschieden. Meistens wird Wasser bei der alkalischen Elektrolyse an der Kathodenseite zugeführt, hier entstehen durch folgende chemische Reaktionsgleichung (2)

$$2\,H_2O + 2\,e^- \rightarrow\ H_2 +\ 2\,OH^- \tag{2}$$

Wasserstoff und der Ladungsträger Hydroxidion (OH^-). Diese OH^--Ionen durchqueren das mikroporöse und Anionen-leitende Diaphragma und wandeln sich an der Anode zu Sauerstoff und Wasser um, wie Reaktionsgleichung (3)

$$2\,OH^- \ \rightarrow\ \tfrac{1}{2}O_2 +\ H_2O + 2\,e^- \tag{3}$$

illustriert (vgl. (Ausfelder et al. 2015)).

Für eine Gesamtanlage ist neben dem Elektrolyse-Stack selbst zusätzlich eine Vielzahl an peripheren verfahrenstechnischen Einrichtungen notwendig. Für eine bei atmosphärischem Druck ablaufende Wasserelektrolyse sind die zusätzlich benötigten Anlagenkomponenten in Abbildung 6.68 schematisiert. Dem Elektrolyse-Stack vorgeschaltet sind Leistungselektronik für die Bereitstellung von Gleichstrom aus dem Mittel- oder Niederspannungsnetz, ein Wärmemanagementsystem sowie Anlagen zur Wasseraufbereitung, um Verunreinigungen zu vermeiden, welche den Elektrolyseur schädigen könnten. Um gewünschte Produktionsraten zu erzielen werden einzelne Elektrolyseure häufig mit weiteren verschaltet. Zudem ist für den Betrieb die Einhaltung einer

optimalen Konzentration des KOH-Elektrolyten zu beachten, welche bei ca. 28-30 Gew. % Elektrolyt in Wasser liegt (Noack et al. 2015). Nachgeschaltet ist eine Gasanalytik zur Ermittlung von Verunreinigungen des Produktgases, welche insbesondere im Teillastbetrieb entstehen und temperaturabhängig sind. Nach der Gaswäsche erfolgt häufig eine Zwischenspeicherung und anschließende Kompression des Wasserstoffgases, gefolgt von einer finalen Reinigung, bevor das Produkt zur Anwendung eingespeist oder gespeichert wird.

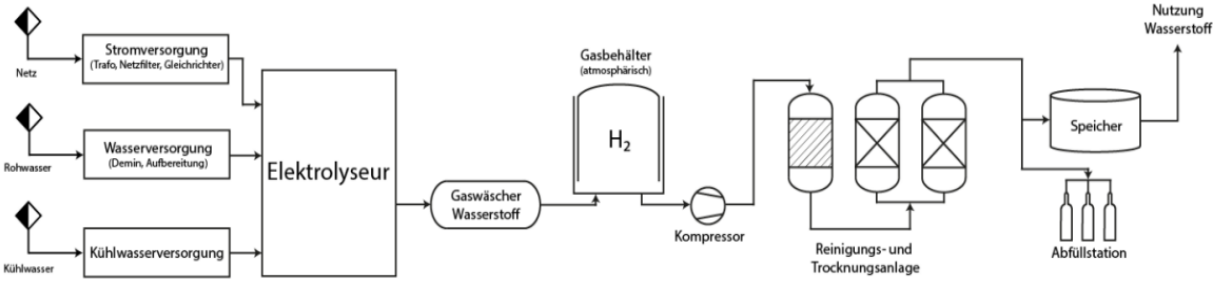


Abbildung 6.68: Allgemeine schematische Darstellung einer atmosphärischen alkalischen Elektrolyseanlage (Sterner, Thema, Eckert, Lenck, Götz 2015b).

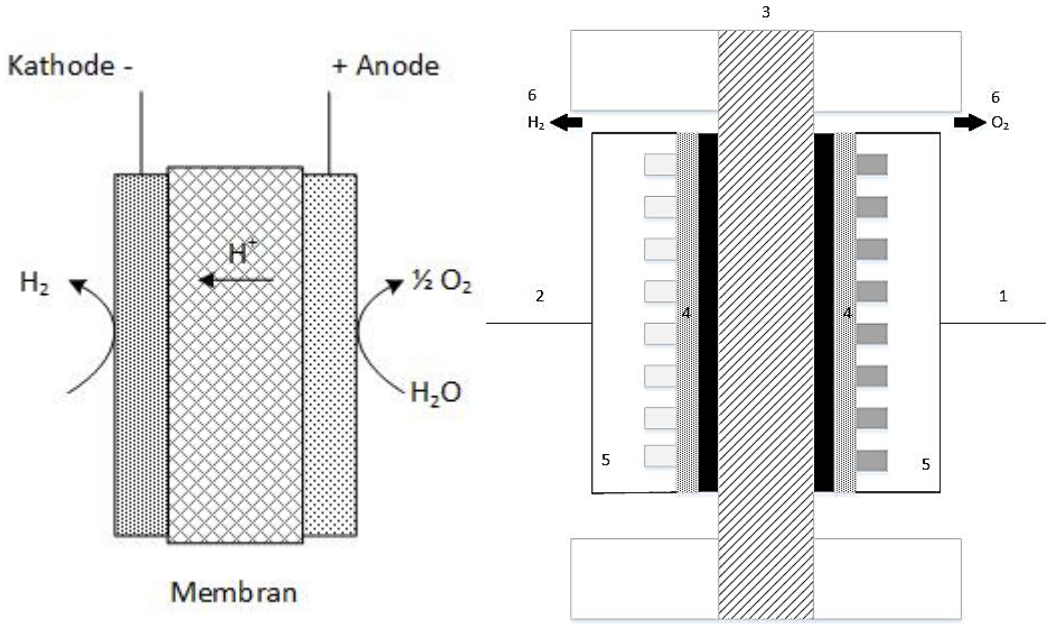


Abbildung 6.69: Schematische Darstellung des Aufbaus und der Reaktion in einer PEM-Elektrolysezelle (nach (Smolinka et al. 2011; Stolten und Emonts 2016))

Der konventionelle Aufbau eines PEM-Elektrolyseurs ist in

Abbildung **6.69** veranschaulicht. Die Zelle besteht aus der Anode (1) und Kathode (2), welche zumeist direkt durch eine feste saure Protonenaustauschmembran (3) getrennt sind. Die Feststoffmembran stellt den Elektrolyt dieser Zelle dar und wird zum Beispiel aus Nafion hergestellt. Dieser Aufbau wird MEA (membrane electrode assembly) genannt und charakterisiert diesen Elektrolysezellentypen im Vergleich zur alkalischen Zelle (keine direkte Verbindung, vgl. alkalische Elektrolyse). Auf beiden Seiten der MEA befinden sich poröse Stromleiter (4), die zum einen den Stromfluss der Elektroden zulassen und zum anderen für das Edukt Wasser und die Produkte Wasserstoff und Sauerstoff durchlässig sind. Eingerahmt sind die beiden Halbleiterzellen durch

bipolare Platten (5). Mit diesen werden der Transport des Wassers zur Zelle und das Entweichen der Produktgase durch die Öffnungen (6) ermöglicht (vgl. (Leichtfried 2007; Mališ et al. 2016; Smolinka et al. 2011; Steinmüller et al. 2014)).

Auch bei der PEM-Elektrolysezelle wird zwischen den Reaktionen auf der Anoden- und der Kathodenseite unterschieden. Im Gegensatz zur alkalischen Elektrolysezelle wird Wasser an der Anodenseite hinzugegeben und gemäß Reaktionsgleichung (4) in Wasserstoffionen und Sauerstoff gespalten.

$$H_2O \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \tag{4}$$

So entstehen aus einem Wassermolekül zwei Elektronen, zwei Protonen sowie ein halbes Sauerstoffmolekül, das auf der Anodenseite abgeführt wird. Die Protonen gelangen durch die protonenleitende Membran auf die Kathodenseiten und reduzieren dort unter der Aufnahme von Elektronen zu Wasserstoff, wie aus Gleichung (5)

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2 \tag{5}$$

ersichtlich wird (vgl. (Ausfelder et al. 2015)).

Der Arbeitsbereich einer PEM-Elektrolysezelle befindet sich mit einer Stromdichte von etwa 1.000 bis 2.000 mAcm^{-2} bei einer Spannung von 1,8 V bis 2,1 V im Temperaturfeld zwischen 20°C bis 100°C (vgl. (Ayers et al. 2010; Smolinka et al. 2011)).

Neben den Niedrigtemperatur-Elektrolyseverfahren erfährt auch die Hochtemperatur-Elektrolyse, auch SOEL (Solid Oxide Elektrolysis) genannt, mit einem Festoxid als Elektrolyt zunehmend Aufmerksamkeit für die Umsetzung von P2F-Konzepten (vgl. (Grimm et al. 2013; Steinmüller et al. 2014)). Der prinzipielle Aufbau einer SOEL-Elektrolysezelle wird in Abbildung 6.70 dargestellt.

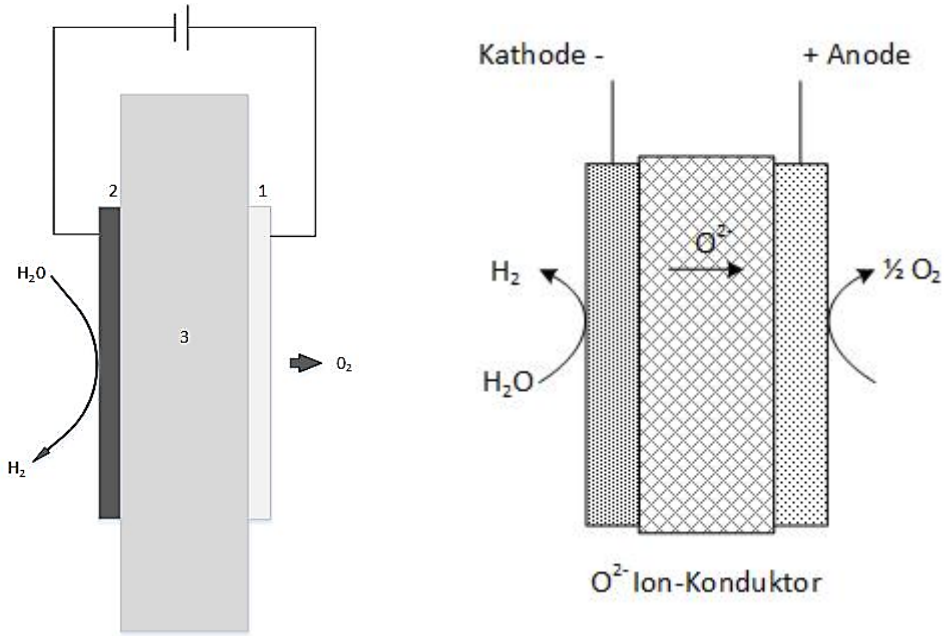


Abbildung 6.70: Schematischer Aufbau und Reaktion in einer H-T-Elektrolysezelle (nach (Ishihahra et al. 2009; Stolten und Emonts 2016)).

Dargestellt sind: die Anode (1), Kathode (2) und Membran (3). Bei der Membran handelt es sich beispielsweise um einen Festelektrolyten aus einer Sauerstoff-Ionen-leitenden Yttrium-dotierten Zirkoniumdioxid-Keramik. Die Elektroden sind wie bei der PEM-Elektrolyse direkt mit der Membran verbunden (vgl. (Millet und Grigoriev 2013)).

Bei der H-T-Elektrolyse wird Wasser in der Dampfphase kathodenseitig hinzugeführt und dort nach Reaktion (6)

$$H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + O^{2-} \tag{6}$$

zu Wasserstoff und Sauerstoffionen (O^{2-}) reduziert.

Die reaktiven O_2^--Ionen wandern gemäß Reaktionsgleichung (7) durch die leitfähige Membran zur Anodenseite und oxidieren zu Sauerstoff (vgl. (Millet und Grigoriev 2013; Steinmüller et al. 2014)).

$$O^{2-} \rightarrow \tfrac{1}{2}O_2 + 2e^- \tag{7}$$

Der wesentliche Unterschied zu den anderen beiden Elektrolyseverfahren ist der Temperaturbereich von 700°C bis 1.000°C mit einer Stromdichte von 0,2 Acm^{-2} bis 0,4 Acm^{-2} und einer Zellspannung von 1,05 V bis 1,2 V (vgl. (Smolinka et al. 2011)).

Die H-T-Elektrolyse befindet sich noch im Pilotstadium, kommerzielle Anlagen existieren bisher noch nicht. Die Firma sunfire GmbH möchte eine Anlage mit einem Wirkungsgrad von bis zu 90% auf den Markt bringen. Diese soll bei einer Betriebstemperatur von etwa 850 C und einem maximalen Betriebsdruck von 30 bar arbeiten (vgl. (Verdegaal et al. 2015)).

Methanisierung

Für die Herstellung von synthetischem Methan (synthetic natural gas, SNG) werden nachfolgend das chemische Verfahren mittels Sabatier-Prozess und ein biologischer Stoffwechselprozess beschrieben. Beim Sabatier-Prozess reagieren Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid exotherm. In einer ersten Reaktion entstehen Kohlenstoffmonoxid und Wasser. Die Reaktion, die auch als Wassergas-Shift-Reaktion bekannt ist, wird durch (8)

$$H_2 + CO_2 \rightarrow CO + H_2O \tag{8}$$

illustriert. Die zweite chemische Reaktion des Sabatier-Prozesses ist in (9)

$$3\,H_2 + CO \rightarrow CH_4 + H_2O \tag{9}$$

dargestellt und zeigt die exotherme Umwandlung von H_2 und CO zu Methan (CH_4) und Wasser. Der exotherme Gesamtprozess ist in (10)

$$4\,H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2\,H_2O \tag{10}$$

aufgezeigt. Dabei unterstützen Temperaturen von 250°C bis 475°C die Reaktion. Um die Aktivierungsenergie dieser exothermen Reaktion zu senken, werden die Katalysatoren Nickel (Ni) oder Ruthenium (Ru) verwendet. Hier stellt Nickel aufgrund der höheren Verfügbarkeit und niedrigeren

Kosten den derzeit geeigneteren Katalysator dar (vgl. (Gahleitner 2013; Kasten et al. 2013; Saint Jean et al. 2015)). Als weitere Katalysatoren können Rhodium, Platin, Eisen und Kobalt eingesetzt werden (P. Schmidt et al. 2016).

Für die Herstellung von Methan bzw. eines Methanmoleküls werden gemäß Gleichung (10) ein Kohlenstoffdioxid- und vier Wasserstoffmoleküle benötigt. Unter Berücksichtigung der Molekulargewichte ergibt sich für eine Tonne Methan bei der vereinfachten Annahme einer vollen Umsetzung des Kohlenstoffdioxids ein CO_2-Bedarf von 2,8 t. Mit Bezug auf den Heizwert von Methan von 50,013 $MJkg^{-1}$ ergibt sich somit ein Bedarf von 0, t CO_2 für eine Megawattstunde Methan.

Für die Sabatier-Reaktion werden die beiden Verfahrensarten 2-Phasensystem und 3-Phasensystem unterschieden. Kernproblematik aller Reaktortypen ist die Einstellung der optimalen Reaktionswärmeabfuhr. Auf der einen Seite sollen durch die Abfuhr Umsatzeinbußen und auf der anderen Seite Katalysatorbeschädigungen vermieden werden. Bei den 2-Phasensystemen handelt es sich um Festbettreaktoren, Wirbelschichtreaktoren oder beschichtete Wabenreaktoren. Während Wabenreaktoren den großtechnischen Einsatz noch nicht nachgewiesen haben und sich noch in der Forschungsphase befinden, sind Festbettreaktoren, die millimetergroße Katalysatorpellets als Festbett benutzen und Wirbelschichtreaktoren, die kleinere fluidisierte Katalysatorpartikel verwenden, kommerziell erhältlich. Diese Reaktortypen benötigen mindestens einen minimalen Gasstrom, da sie andernfalls schnell auskühlen und für eine Wiederaufnahme der Reaktion viel thermische Energie benötigen. Des Weiteren eignen sich die 2-Phasensysteme eher für konstante Ströme (vgl. (Bajohr et al. 2011; Götz 2014; Kopyscinski et al. 2010; Müller-Syring et al. 2013)).

Bezüglich des Wirkungsgrades unterscheiden sich die beiden Reaktortypen Festbett und Wirbelschicht geringfügig, da in beiden die gleiche chemische Reaktion abläuft. So werden Wirkungsgrade von 75 bis 80% angegeben und langfristig eine Steigerung auf 80 bis 85% angestrebt. Höhere Wirkungsgrade sind nur schwer zu ermöglichen, da bei der exothermen Reaktion der Differenzanteil der Energie in Form von Wärme verloren geht. Durch eine Nutzung der Abwärme ließe sich jedoch zumindest indirekt eine höhere Effizienz erzielen (vgl. (Götz 2014; Schiebahn et al. 2015; Wietschel und Ullrich 2015)).

Das sich noch in der Entwicklung befindende „3-Phasensystem-Verfahren“ findet in Blasensäulenreaktoren statt. Dieser Reaktortyp besitzt neben dem festen Katalysator und dem gasförmigen Edukt ein flüssiges Wärmeträgerfluid wie Öl, das durch aufsteigende Gasblasen fluidisiert wird. Durch die zusätzliche flüssige Phase des Fluides und die daraus resultierende bessere Temperaturregelung für unregelmäßige Gasströme besitzt dieser Reaktortyp Vorteile gegenüber den 2-Phasensystemen. Ein Problem in der Umsetzung entsteht bisher aufgrund einer unzureichenden Temperaturstabilität der verwendeten Öle. Die aktuelle Forschung untersucht ionische Fluide als Wärmeträgerfluid (vgl. (Bajohr et al. 2011; Müller-Syring et al. 2013)).

Methanisierungsanlagen sind generell gut skalierbar und ein flexibler Betrieb bis zu einer Teillast von 50% der Nennlast ist möglich. Die Methanproduktion kann durch Pufferspeicher von den Inputströmen ein Stück weit entkoppelt werden. Durch die Zwischenspeicherung von Wasserstoff kann so unabhängig vom aktuellen Stromdargebot Methan produziert werden (Hermann et al. 2014).

Neben dem chemischen Verfahren mit Katalysatoren gibt es auch die Möglichkeit einer mikrobiellen Methanisierung in Bioreaktoren. Dabei werden die Edukte Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff durch biologische Prozesse von anaeroben Archaeen gemäß Reaktionsgleichung (10) zu Methan und Wasser verstoffwechselt. Die Prozesse laufen in mesophilen (20-45°C) oder thermophilen (45-80°C) Temperaturbereichen ab. Diese Methanisierungsform wird derzeit in Pilotprojekten erforscht und wird zum Beispiel bei einer Anlage des BioCatProjects im dänischen Hvidovre betrieben. Diese setzt bis zu 220 Nm^3h^{-1} Wasserstoff zu 50 Nm^3h^{-1} Methan um. Die Leistungsaufnahme der Gesamtanlage beträgt 1 MW (vgl. (BioCat Project; Grond et al. 2013)). In Deutschland wird eine entsprechende Anlage von MicrobEnergy betrieben. Vorteile dieses Methanisierungsverfahrens sind eine hohe Gasreinheit mit einem CH_4-Anteil von über 98% bei einer geringen Reaktorbelastung, niedrigere Prozesstemperaturen von ca. 20-80°C gegenüber 250-475 C, geringere Reinheitsansprüche an die Eduktgase und schnelle sowie flexible Lastwechsel.

Fischer-Tropsch-Synthese

Aus Wasserstoff und einer Kohlenstoffquelle können mittels der Fischer-Tropsch-Synthese Kohlenwasserstoffe unterschiedlicher Kettenlänge wie beispielsweise Benzin (C5-C10) oder Diesel (C11-C18) in einer exothermen Reaktion erzeugt werden. Dabei ergibt sich durch unterschiedliche Druck- sowie Temperaturniveaus und abhängig von der Katalysatorwahl ein spezifisches C-/H-Verhältnis mit verschiedenen Kettenlängen. Abbildung 6.71 zeigt ein Prozessschema für die Herstellung von synthetischem Flüssigkraftstoff als Rohölsubstitut.

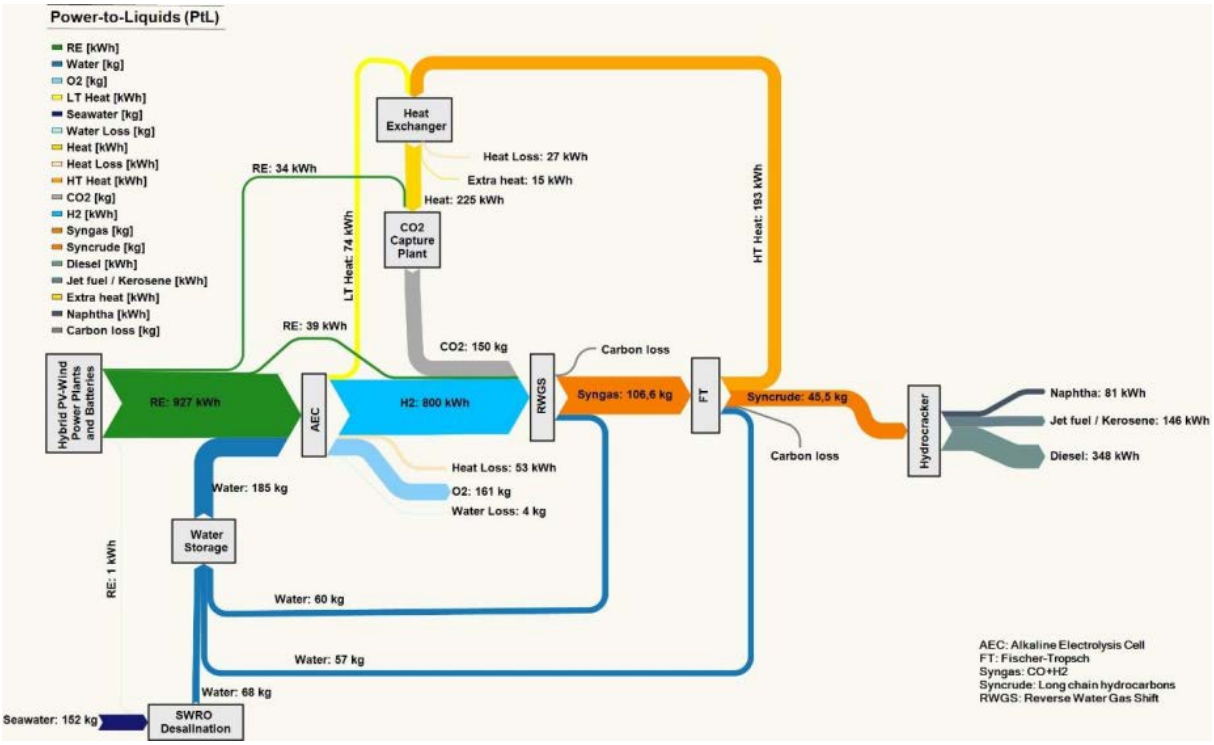


Abbildung 6.71: Darstellung eines P2F-Konzepts zur Herstellung von Flüssigkraftstoffen über die Fischer-Tropsch Synthese (Fasihi et al. 2016b).

So erzeugen niedrige Temperaturen und hohe Drücke langkettige Verbindungen und umgekehrt. Diese können nach weiterer Aufbereitung beispielsweise als Kraftstoffe im Verkehrssektor eingesetzt werden. Des Weiteren entstehen bei diesem Verfahren je nach Prozesseinstellung auch die in der Chemieindustrie nachgefragten Fraktionen Naphtha und Wachse, die bisher aus Rohöl gewonnen werden. Auch diese Nebenprodukte könnten bei einer Rückführung in den Prozess unter zusätzlichem Energieaufwand durch Cracken und Raffinierung teilweise in Kraftstoffe umgewandelt werden (vgl. (Ausfelder et al. 2015; Kasten et al. 2013; Sterner und Stadler 2014)). Nach Verdegaal et al. besitzen die synthetischen Treibstoffe ein Treibhausgasminderungspotential von bis zu >85% gegenüber fossilem Kraftstoff (Verdegaal et al. 2015). Aus Rapsöl hergestelltes Biodiesel weist im Vergleich dazu lediglich ein Potential von 30-50% zur Minderung der Treibhausgasemissionen auf (Zah et al. 2007).

Eine vereinfachte Reaktionsgleichung des Fischer-Tropsch-Verfahrens ist in (11)

$$2H_2 + CO \leftrightarrow [-CH_2-] + H_2O \tag{11}$$

dargestellt. Durch sie lässt sich erkennen, dass die unter (10) dargestellte chemische Methanisierung ein Spezialfall der Fischer-Tropsch-Synthese ist, in der die Kettenwachstumswahrscheinlichkeit gegen null geht. Die F-T-Synthese durchläuft die Phasen Adsorption der Edukte am Katalysator, Bildung von Zwischenprodukten, Kettenpolymerisation und anderen Transformationen der Zwischenprodukte sowie Desorption der Produkte. Die Kettenpolymerisation ist die chemische Reaktion, bei der sich gleiche oder unterschiedliche Monomere zu einer Polymerkette zusammenschließen und stellt den wichtigsten Schritt der Synthese dar. Als Katalysatoren sind die

Übergangsmetalle Eisen (Fe), Cobalt (Co), Nickel (Ni) und Ruthenium (Ru) geeignet, wobei Eisen und Cobalt am wirtschaftlichsten sind (vgl. (Sterner und Stadler 2014)).

Für die Produktion von Flüssigkraftstoffen mittels Fischer-Tropsch-Synthese ergibt sich ein höherer CO_2-Bedarf als für die Methanherstellung. Dies lässt sich einerseits durch den höheren Kohlenstoffgehalt begründen, andererseits durch die prozessbedingte partielle Umsetzung des Kohlenstoffdioxids. Je nach Zusammensetzung der Fraktionen im Fischer-Tropsch Produkt kann gemäß Fasihi et al. und König et al. mit einem CO_2-Bedarf von 0,27-0,34t pro MWh des Rohölsubstituts gerechnet werden (Fasihi et al. 2016b; König et al. 2015).

Wie bei der chemischen Methanisierung kommen bei der bei F-T-Synthese die 2-Phasensysteme, Festbettreaktoren und Wirbelschichtreaktoren mit Wirkungsgraden von 75 bis 80% zum Einsatz. Standardmäßig werden bei der Synthese Festbettreaktoren verwendet (vgl. (Lange 2008; Sterner und Stadler 2014).

CO_2-Abscheidung

Für die Methanisierung und Fischer-Tropsch-Synthese wird Kohlenstoffdioxid benötigt. Dieses gilt als Abfallprodukt vieler Verbrennungs- und Industrieprozesse und besitzt dementsprechend (bisher) keinen Marktwert. Aufgrund der im Projekt Resystra verfolgten resilienten (und damit langfristig auch nachhaltigen) Energieversorgung, werden an dieser Stelle nur nachhaltige Quellen für eine CO_2-Abscheidung diskutiert. Als potentielle Quellen kommen somit v. a. Biogasanlagen und die Abscheidung aus der Atmosphäre in Betracht. CO_2 aus industriellen Prozessen bleibt an dieser Stelle hingegen unberücksichtigt.

Abgasströme aus Biosgasanlagen stellen durch die Verwendung von Biomasse oder biologischen Abfällen eine nachhaltige CO_2-Quelle dar. In diesen wird Biogas, das je nach Verweildauer und Fermentervariante bis zu 45% aus CO_2 bestehen kann, gewonnen und dieses anschließend durch Abtrennung des Kohlenstoffdioxids auf Erdgasniveau gebracht. Das Kohlenstoffdioxid kann so entweder in die Atmosphäre abgegeben oder in Power-to-Fuel Konzepten genutzt werden. Die Abtrennung erfolgt durch Adsorption, chemische Absorption, Membranabtrennung oder Kühlung (Kasten et al. 2013; Sterner und Stadler 2014). In einer Studie aus dem Jahr 2014 hat das Öko-Institut für Deutschland im Jahr 2030 ein maximales Potential für CO_2 als Nebenprodukt aus der energetischen Verwertung von Biomasse von 14,2 Tonnen ermittelt und beruft sich bei den Annahmen auf die Ausbauziele von Biogasanlagen in der Gasnetzzugangsverordnung (Hermann et al. 2014). Mit 13,2 Tonnen entstammt dabei der größte Teil aus Biogasanlagen, eine Tonne aus der Produktion von Bioethanol. Diese Mengen dürften bei einer großskaligen Umsetzung des P2F-Konzeptes nicht ausreichen, so dass langfristig auf Alternativen zurückgegriffen werden muss. Ähnliche Zahlen werden von Bünger et al. angegeben mit bis zu 17t CO2 aus biogenen Quellen (Bünger et al. 2014).

Die Abscheidung aus der Atmosphäre stellt eine nahezu unbegrenzte nachhaltige CO_2-Quelle dar. Diese Kohlenstoffdioxidnutzung kann als klimaneutral angesehen werden, wenn der für den energiereichen Prozess benötigte Strom aus erneuerbaren Energiequellen stammt. Die geringe CO_2-Konzentration in der Umgebungsluft gilt als entscheidender Nachteil gegenüber der Abscheidung aus Abgasströmen. Als Verfahren eignen sich die Adsorption, Absorption, Kondensation und Membranabtrennung. Die Adsorptions- und Absorptionsverfahren weisen dabei den geringsten Energieverbrauch auf. Bei der Absorption wird CO_2 durch eine Lauge (z.B. Natronlauge) absorbiert und das entstehende Carbonat darauffolgend mit einer Säure wieder gelöst. Beim Adsorptionsverfahren wird das CO_2 an Zellstoff-Granulat angelagert und mit niederkalorischer Wärme anschließend wieder freigesetzt (Kasten et al. 2013; Sterner und Stadler 2014). Für die Abscheidung von einer Tonne CO_2 aus der Umgebungsluft rechnet Sterner mit einem Energiebedarf von 2,28 MWh, wodurch sich der Gesamtwirkungsgrad des P2F-Konzeptes um durchschnittlich 15% reduziert (Fox 2011b; Sterner 2009a).

6.5.1.4 Akteursnetzwerk

International existieren Power-to-Gas und Power-to-Liquid Forschungs- und Pilotanlagen auf den fünf Kontinenten Asien, Australien, Europa, Nord- und Südamerika (vgl. (Gahleitner 2013)). Das Spektrum der elektrischen Eingangsleistung reicht von 3,6 kW bis 6 MW. In Deutschland gibt es zurzeit 26 Power-to-Gas/Liquid-Projekte, in denen die Verfahren weiter optimiert und die technische Realisierbarkeit getestet werden. In diesen Anlagen sollen die technische Realisierung, Standardisierung, Normierung und die Wirtschaftlichkeit erprobt werden. Von den Vorhaben befinden sich – Stand 2016 - 23 im Betrieb, eine in der Bau- und zwei in der Planungsphase. Das elektrische Eingangsleistungsspektrum erstreckt sich von 100 kW bis 6 MW (vgl. (Deutsche Energie-Agentur 2015b)).

In Abbildung 6.72 sind die Pilotprojekte und deren Lage in Deutschland sowie deren aktueller Entwicklungsstatus (Planung, Bau & in Betrieb) dargestellt. In gut einem Drittel der bereits bestehenden Anlagen wird synthetisches Methan produziert, knapp zwei Drittel produzieren.

Abbildung 6.72: Übersicht Power-to-Fuel Pilotprojekte in Deutschland und deren Status. Darstellung der Deutschen Energieagentur (aus (Deutsche Energie-Agentur 2015b)).

Wasserstoff. Flüssigkraftstoff wird bisher in nur einem Projekt mit einer 150 kW Anlage hergestellt.

Die Projektbetreiber stammen aus diversen Wirtschaftsbranchen wie der Energie-, Anlagenbau-, Mineralöl- und Automobilbranche sowie aus der Projektierung und Forschung und werden durch verschiedene Ministerien des Bundes und der Länder gefördert (Graf et al. 2014a). Zudem ist eine Vielzahl weiterer Branchen anteilig an den Projekten beteiligt. Generell kann sich für sehr viele Industriezweige ein Interesse am P2F-Konzept ergeben. Unter dem Aspekt der Entwicklung einer großtechnischen Speicheroption für erneuerbaren Strom haben die Elektrizitätsversorger als erste das Thema der Power-to-Gas Nutzung zur Energiespeicherung aufgebracht (Bünger et al. 2014). Auch aufgrund der mangelnden Akzeptanz für den Stromnetzausbau wurde P2F von Energieversorgern als Option zur Reduktion von Netzengpässen angesehen. Ausgehend von

dieser Motivation haben sich Überlegungen für neue Anwendungen in allen Segmenten des Energiesystems ergeben.

Auch zukünftig werden neue Pilotanlagen durch Fördergelder realisiert werden, beispielsweise im Rahmen der Förderinitiative „Kopernikus-Projekte für die Energiewende“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, wodurch insbesondere die technologische Umsetzung im industriellen Maßstab erprobt werden soll. Die dena hat zudem vier sogenannte Clusterregionen ausgemacht, in denen zukünftig die Anwendung von Power-to-Gas voraussichtlich eine zunehmende Entwicklung erfahren wird:

- Cluster Rhein/ Main/ Ruhr
- Cluster Mitteldeutschland/ Berlin/ Brandenburg
- Cluster Unterelbe/ Weser/ Ems
- Cluster Neckar

Vor allem die Anwendung von Elektrolyse-Wasserstoff in öffentlichen Verkehrsmitteln, an Industriestandorten zur Erzeugung chemischer Grundstoffe und zur Nutzung in Raffinerien sowie die Ausdehnung eines Wasserstofftankstellennetzes wird demnach von großer Bedeutung sein. So unterstützen die Landesregierungen von Nordrhein-Westfalen und Hessen beispielsweise das Wasserstoffprojekt „NRW Hydrogen HyWay“, im Cluster Mitteldeutschland/ Berlin/ Brandenburg werden die Aktivitäten vor allem durch das Projekt „HYPOS – Hydrogen Power Storage & Solutions East Germany“ vorangetrieben. Im Cluster Unterelbe/ Weser/ Ems gibt es bspw. im Rahmen der ChemCoast-Initiative Bestrebungen für die Etablierung von Power-to-Gas Konzepten sowie das BetHy-Projekt, in dem Wasserstoffantriebe für den Schienenverkehr erprobt werden sollen. Die Landesregierung von Baden-Württemberg unterstützt schon seit geraumer Zeit die Umsetzung einer Wasserstoffinfrastruktur in dem Bundesland für die Speicherung erneuerbaren Stroms und den Aufbau eines Tankstellennetzes für Brennstoffzellen-PKW (Schenuit et al. 2016).

Für die mitwirkenden Akteure ergibt sich je nach Endprodukt eine Vielzahl potentieller Geschäftsmodelle aus der Errichtung neuer P2F-Anlagen. So könnten Stromnetzbetreiber in Power-to-Gas Anlagen investieren um beispielsweise den Stromnetzausbau für Übertragungsnetze zu substituieren und das Lastmanagement regional zu lösen. Für Gasnetzbetreiber könnte die Installation von Power-to-Gas Anlagen zu einer höheren Auslastung der Gasnetze beitragen. Für Wind- und PV-Anlagenbetreiber könnte sich in Zukunft, insbesondere nach Ablauf der EEG-Vergütung und zu Zeiten geringer Strombörsenpreise, die Produktion von synthetischen Kraftstoffen lohnen. In Kombination mit einem Wasserstoffspeicher und einer Brennstoffzelle könnten Windparks zudem in Zeiten hoher Produktion Wasserstoff produzieren und speichern, der in Zeiten geringer Auslastung zurück verstromt werden kann und den Windpark somit zu einem regelbaren Kraftwerk macht. Für Gashändler ergäbe sich mit der Installation von Power-to-Gas Anlagen die Möglichkeit, ein neues und aufgrund der grünen Eigenschaft hochwertigeres Produkt auf den Markt zu

bringen. Das gleiche Geschäftsmodell könnte sich für Kraftstoffproduzenten und -händler sowie für Tankstellenbetreiber ergeben. Für Industriebetriebe ergäbe sich durch die Implementierung von P2F-Anlagen die Möglichkeit, erneuerbare chemische Produkte zu vermarkten. Zudem ergibt sich aber vor allem die Chance, die eigenen Treibhausgasemissionen zu reduzieren und somit einerseits das eigene Image zu verbessern und andererseits möglichen Strafzahlungen in der Folge von zukünftigen Klimaschutzregulierungen zu entgehen. Das gleiche Szenario ergibt sich für die Automobilindustrie um die Flottenemissionen zu reduzieren sowie insbesondere für die Schiff- und Luftfahrt um potentiellen zukünftigen Pflichten zur Treibhausgasemissionsreduktion nachkommen zu können. Nicht zuletzt ist das P2F-Konzept eine Option für Regionen, Unternehmen und Haushalte, die einen hohen Grad an energetischer Selbstversorgung anstreben (vgl. (Tichler et al. 2014)).

6.5.1.5 Technische Parameter von P2F-Technologien

Für die Beurteilung von Geschäftsmodellen und Wirtschaftlichkeitsberechnungen ist die Berücksichtigung technologischer und betriebswirtschaftlicher Kennzahlen wichtig. Im Folgenden werden die unter 6.5.1.3 diskutierten Verfahren und Komponenten daher in Bezug auf ihre Effizienz, Flexibilität und Lebensdauer erläutert, unter 6.5.1.6 wird auf die Wirtschaftlichkeitsperspektiven der Anlagen eingegangen.

Vergleich der Elektrolyse-Technologien zur Wasserstoffherstellung

Dem Elektrolyseur wird Energie in Form von Elektrizität zugeführt, Wärme aus der Umgebungstemperatur kann hingegen vernachlässigt werden. Wichtig für die Beurteilung des Wirkungsgrades von Elektrolyseuren ist, ob der Energiegehalt des Wasserstoffs auf den Brennwert (entspricht 3,54 kWh Nm^{-3}) oder auf den Heizwert (entspricht 3,0 kWh Nm^{-3}) bezogen wird. Mit dem auf den Brennwert bezogenen Wirkungsgrad kann die Effizienz des Elektrolyseurs als technische Anlage bestimmt werden. Bei der energetischen Verwertung des produzierten Wasserstoffs wird allerdings nur sein Heizwert genutzt. Für die Ermittlung des Gesamtwirkungsgrades der Wandlungskette sollte deshalb auch der Wirkungsgrad des Elektrolyseurs auf den Heizwert bezogen werden. In der Literatur gibt es deutliche Abweichungen bezüglich der Angaben von Wirkungsgraden der Elektrolyseure, was unter anderem vermutlich auf den zumeist nicht angegebenen Bezug zum Brenn- oder Heizwert zurückzuführen ist. Alternativ kann auch der Energieverbrauch pro erzeugtem Nm^3 Wasserstoff angegeben werden, wodurch die Wahl zwischen dem Brenn- und Heizwert entfallen würde (Noack et al. 2015).

In Tabelle 6.73: sind die in verschiedenen Studien bezifferten Wirkungsgrade dargestellt, welche nach aktuellem Stand und der geschätzten Langzeitentwicklung unterteilt sind. Einige Studien unterscheiden zudem aufgrund der unübersichtlichen Datenlage nicht zwischen den einzelnen Elektrolysetechnologien, sondern allenfalls nach NT- und HT-Elektrolyse. Ergänzend sind zudem

Daten bezüglich der Lebensdauer, der Flexibilität (Teillastbereich) und des Elektrodenmaterials aufgeführt.

Tabelle 6.73:: Vergleich der Daten von Elektrolyseverfahren (Daten aus: Smolinka et al. 2011; Graf et al. 2014a; Kasten et al. 2013; Noack et al. 2015; Vanhoudt et al. 2016; P. Schmidt et al. 2016; Müller-Syring et al. 2013; Gandia et al. 2013) 5311

Elektrolyseverfahren				
elektr. Wirkungsgrad in %		Alkalisch	PEM	SOEC
	Heute	50,8-68	57,7-69	~88[90]
	Langfristig	67-87	82-93	>90[4]
unt. Teillastbereich in %		20-40	<10	<50[91]
Spitzenlast in %		100	200 (30 min)	-
Lebensdauer in Jahren		20-30	10-20	5-25
Elektrodenmaterial		Ni	Pt,C,IrO_2,Ru	Ni, Keramik
Bemerkungen		Erprobte Technologie, günstige Anschaffung, Ni-Katalysatoren nicht stabil im dynamischen Betrieb	Einfacher Aufbau, Überspannungen und schnelle Laständerungen möglich, teure Materialien	Wärmezufuhr benötigt, Technologie noch im Forschungsstadium, geeignet zur Erzeugung von C-Kraftstoffen

Die alkalische Elektrolyse ist schon lange im kommerziellen Betrieb erprobt und daher auch deutlich günstiger in der Investition. Als nachteilig erweist sich eine aufwändige Laugenreinigung und die durch den Nickel-Katalysator nur eingeschränkte Flexibilität. Obwohl ein unterer Teillastbereich von 20% grundsätzlich möglich ist und innerhalb einer Minute erreicht werden kann, schränken solche Lastwechsel die Lebensdauer des Elektrolyseurs aufgrund der Degradation des Katalysators stark ein (Vanhoudt et al. 2016). Ein Kaltstart ist mit dieser Technologie innerhalb einer Minute möglich. PEM-Elektrolyseure werden inzwischen in Pilotprojekten eingesetzt. Dennoch befinden sie sich im Vergleich zur AEL noch am Anfang ihrer Entwicklung, so dass insbesondere hinsichtlich der Produktionskosten und der technischen Optimierung mit deutlichen Fortschritten gerechnet wird. Deutliche Vorteile im Systemdesign ergeben sich durch einen einfacheren Aufbau, da kein Elektrolytkreislauf benötigt wird. Überspannungen bis 30 Minuten und ein dynamischer Betrieb bis unter 10% der Nennleistung innerhalb weniger Sekunden werden durch die Edelmetall-Katalysatoren ermöglicht (Sterner und Stadler 2014). Der hohe Anspruch an eingesetzte Katalysatormaterialien erweist sich allerdings aufgrund eingeschränkter Ressourcenverfügbarkeit als nachteilig. Gegenstand der Forschung sind deshalb auch Ersatzmaterialen für Pla-

[90] Ohne Berücksichtigung des Energiebedarfs für die Wasserdampferzeugung. Bezogen auf Heizwert.

[91] Laständerung langsamer als bei AEL und PEM.

tin. Die HT-Elektrolyse ist die jüngste Technologie und entsprechend noch am teuersten. Insbesondere die Kombination mit Methanisierung oder Fischer-Tropsch-Synthese erweist sich als vielversprechend, da die entstandene Abwärme zur Erzeugung des benötigten Wasserdampfes in den Kreislauf rückgeführt werden kann und so den Systemwirkungsgrad deutlich erhöht (Verdegaal et al. 2015). Nachteilig ist die externe Wärmezufuhr zur Dampferzeugung auf einem Temperaturniveau von 700-1000°C, für die ebenfalls Elektrizität benötigt wird und welche oftmals in die Berechnung des Wirkungsgrades des Elektrolyseurs nicht einbezogen wird. Ein dynamischer Betrieb scheint im Minutenbereich bis zu einer Teillast von mindestens 50% möglich. Häufige Kaltstarts wirken sich durch die wechselnde thermische Belastung der Anlagenkomponenten auf die Lebensdauer negativ aus und sind daher zu vermeiden (Hermann et al. 2014).

Methanisierung und Fischer-Tropsch-Synthese

Die exotherme Methanisierungsreaktion besitzt eine hohe Konversionsrate des zugeführten Kohlenstoffes, so dass der Methangehalt im Produktgas über 95 vol.-% erreicht. Der auf den Heizwert des Wasserstoffes bezogene Wirkungsgrad liegt damit bei ~83%, der Rest geht als Abwärme durch den Prozess verloren (P. Schmidt et al. 2016). Je nach zulässigem Anteil an Fremdgas kann der Wirkungsgrad auch noch höher ausfallen (Müller-Syring et al. 2013).

Für die Fischer-Tropsch-Synthese rechnet das Öko-Institut mit einem Wirkungsgrad von heute 60% bis langfristig maximal 70% (Hermann et al. 2014). Für die Herstellung von synthetischem Rohöl geben Verdegaal et al. einen theoretischen Gesamtwirkungsgrad von 80% in Kombination mit der Hochtemperatur-Elektrolyse an, bei Verwendung einer der Niedrigtemperaturvarianten beläuft sich der maximale theoretische Wirkungsgrad auf 68% (vgl. Verdegaal et al. 2015). Unter der Berücksichtigung des Energiebedarfs für die CO_2-Aufbereitung rechnen Kreyenberg et al. mit einem Gesamtwirkungsgrad von 35% bei CO_2-Abscheidung aus der Luft und 45% bei einem CO_2-Bezug von Biogasanlagen (Kreyenberg et al. 2015). Die Ludwig-Bölkow Systemtechnik rechnet mit einer Effizienz von 44-47% bei einer CO_2-Abscheidung von Umgebungsluft (P. Schmidt et al. 2016).

Tabelle 6.74: Die Spannweiten der Wirkungsgrade für die Verfahren der Methanisierung und Fischer-Tropsch-Synthese sowie die kumulierten Wirkungsgrade für die Herstellung der finalen Produkte (Sterner und Stadler 2014; Graf et al. 2014a; P. Schmidt et al. 2016; Sterner 2009a; Müller-Syring et al. 2013).

	Methanisierung	F-T-Synthese
Wirkungsgrad in %	75-85	60-80
Gesamtwirkungsgrad in %	49-79	35-70

6.5.1.6 Wirtschaftlicher Hintergrund

Der Betrieb von P2F-Anlagen ist heute noch unwirtschaftlich, bis auf wenige Ausnahmen in Nischenmärkten. Dies ist einer ganzen Reihe an Umständen geschuldet. Anlagenkomponenten

werden bisher für Pilotanlagen maßangefertigt und nicht in Serie produziert, wodurch sich entsprechend hohe Investitionskosten ergeben. Die Effizienz der Prozesse ist zudem, wie bereits erläutert, relativ gering. Auch die erwartete Auslastung von P2F-Anlagen spiegelt sich in der Wirtschaftlichkeit wieder. Neben den regulatorischen Bedingungen für die Partizipation in den Energiemärkten spielen insbesondere der Bezugsstrom und dessen Kosten eine entscheidende Rolle für Geschäftsmodelle. In vielen Studien wird argumentiert, dass für den P2F-Prozess langfristig kostenloser Überschussstrom zur Verfügung stehe. Eine solche Kalkulation erscheint jedoch äußerst unrealistisch (vgl. Brunner 2014). Selbst wenn es tatsächlich günstigen oder gar kostenlosen Strom in Zeiten hoher Produktion geben mag, wird die Stundenanzahl niedriger Strompreise mit fortschreitendem Netzausbau und flexiblerer Nachfrage eher überschaubar bleiben. Mit einer geringen Auslastung der Anlagen könnten aber wiederum die Investitionskosten kaum kompensiert werden. Basieren Geschäftsmodelle zudem darauf, erneuerbaren Strom durch den Wandlungsprozess in andere Sektoren zu transferieren, so fehlt dieser Strom zur Einhaltung der Ausbauziele im Stromsektor (vgl. Brunner und Michaelis 2016). Es müssten also wesentlich mehr neue Stromerzeugungsanlagen für die Energieversorgung anderer Sektoren zusätzlich zugebaut werden, was wiederum zur Folge hat, dass dieser Strom preislich im Rahmen der Gestehungskosten durch den entsprechenden Erzeuger liegt.

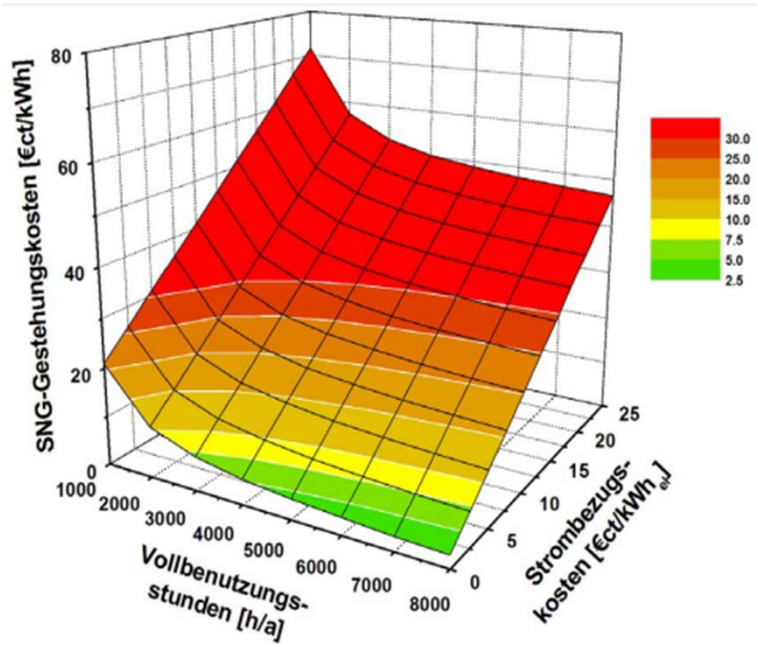


Abbildung 6.73: Gestehungskosten für synthetisches Methan unter der Berücksichtigung von Volllaststunden und Strombezugspreisen (aus Zuberbühler 2015).

Abbildung 6.73 setzt die Gestehungskosten für synthetisches Methan mit der Vollauslastung von P2F-Anlagen und Strombezugskosten in Beziehung. Entsprechend der voran geführten Argumentation, dass der stromseitig motivierte Einsatz zu Zeiten geringer Strompreise mit wenigen Volllaststunden verbunden ist, ergeben sich, wie abgebildet, besonders hohe Gestehungskosten.

Geschäftsmodelle, welche vorrangig auf die Verwertung von günstigem Überschussstrom abzielen, haben also folglich nur geringe Chancen sich an den Energiemärkten konkurrenzfähig zu etablieren.

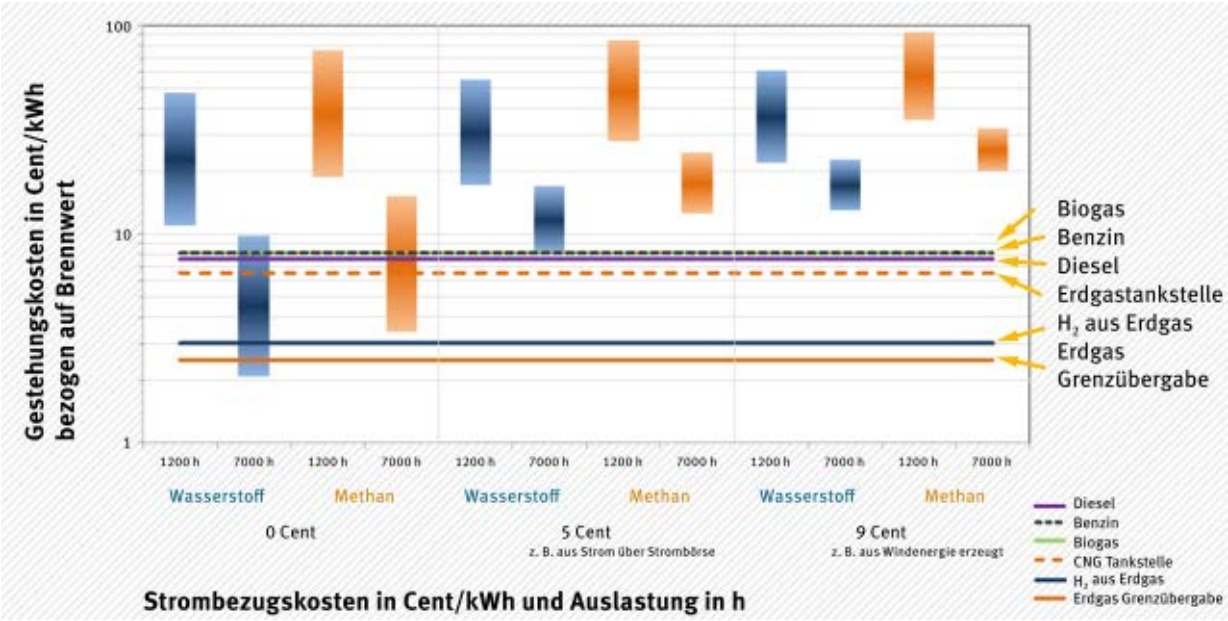


Abbildung 6.74: Gegenüberstellung der Gestehungskosten für erneuerbaren Wasserstoff und Methan unter Berücksichtigung verschiedener Strombezugspreise und unterschiedlicher Vollauslastung (Purr, Osiek et al. 2016).

In einer Studie für das Umweltbundesamt wird, wie in Abbildung 6.74 zu sehen ist, selbst bei kostenlosem Strombezug mit Gestehungskosten bis zu knapp 50 cent kWh^{-1} für Wasserstoff gerechnet, bei geringer Vollauslastung mit 1.200 Stunden. Für Methan ergeben sich bei gleichen Bedingungen nahezu 80 cent kWh^{-1}. Bei einer hohen Auslastung mit 7.000 Volllaststunden ergeben sich bei einer realistischeren Annahme für den Bezugsstrom von 5 cent kWh^{-1} Gestehungskosten zwischen 8-20 cent kWh^{-1} für Wasserstoff und 10-25 cent kWh^{-1} für Methan. Nicht berücksichtigt im Strompreis sind die zusätzlich zu zahlenden Abgaben.[92] In Abbildung 6.74 sind auch die Preise für fossile Brenn- und Kraftstoffe sowie Biogas angegeben, mit denen unter derzeitigen Bedingungen keinesfalls konkurriert werden kann.

Wichtig für eine verbesserte Wirtschaftlichkeit ist neben einer möglichst starken Auslastung und hohen Wirkungsgraden eine Reduktion der Investitionskosten für P2F-Anlagen. Hier darf nach Herstellerangaben mit deutlichen Fortschritten gerechnet werden. Ähnlich wie bei der Angabe von Wirkungsgraden gehen die Angaben in der Literatur zu den momentanen Kosten für die jeweiligen Technologien sowie die Prognosen über deren Entwicklung deutlich auseinander. Der DVGW geht für alkalische Elektrolyseure in Abhängigkeit der Anlagengröße von spezifischen Investitionskosten zwischen 800-1.200 €kW^{-1} plus Kosten für weitere Anlagenkomponenten aus (Müller-Syring et al. 2013). Für PEM-Elektrolyseure werden Kosten zwischen 2.000-6.000 € kW^{-}

[92] Vgl. Kapitel 6.5.1.7 Regulatorische Rahmenbedingungen

[1] veranschlagt, welche sich nach erfolgreichem Fortschritt laut Bajohr et al. auf 1.000 € kW^{-1} reduzieren könnten (Bajohr et al. 2011). Sterner und Stadler geben für alkalische Elektrolyseure Investitionskosten zwischen 800-1500 €kW^{-1} an, für PEM ebenfalls 2.000-6.000 € kW^{-1} (Sterner und Stadler 2014). Für Wartung und Betrieb werden 4% der Investitionskosten pro Jahr veranschlagt. Das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) rechnet mit Betriebskosten von 2%a^{-1} (Zuberbühler 2015). Die Kosten für HT-Elektrolyse liegen derzeit noch weit höher aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums und beziffern sich auf über 10.000 €kW^{-1} (P. Schmidt et al. 2016). Doch auch hier darf mit einer deutlichen Kostendegression gerechnet werden. So wird langfristig mit einem Modulpreis von 200 €kW^{-1} gerechnet, wenn eine Produktionsrate von 500 MWa^{-1} erreicht wird und ein Gesamtanlagenpreis von maximal 600 €kW^{-1} erwartet (Biedermann et al. 2006; O'Brien et al. 2009; Sterner 2009a). Experten gehen für Elektrolyseure technologieunabhängig von einer Kostendegression um 13-20% je verdoppelter weltweit installierter Leistung aus (Fürstenwerth et al. 2014; Vanhoudt et al. 2016).

Für die Methanisierung geben Breyer et al. Investitionskosten von 400 €kW^{-1} in Bezug auf die elektrische Leistung des Elektrolyseurs an sowie Betriebskosten von 2% der Investitionskosten pro Jahr. Für die CO_2-Abscheidung aus der Luft werden 500 €kW^{-1} angegeben (Breyer et al. 2011).

Technologieübergreifend rechnen Fürstenwerth et al. mit einer Kostenspanne von derzeit mindestens 1.000 bis maximal 4.000 € kW^{-1} und einer Kostendegression von 13% je verdoppelter installierter Leistung (vgl. Abbildung 6.75).

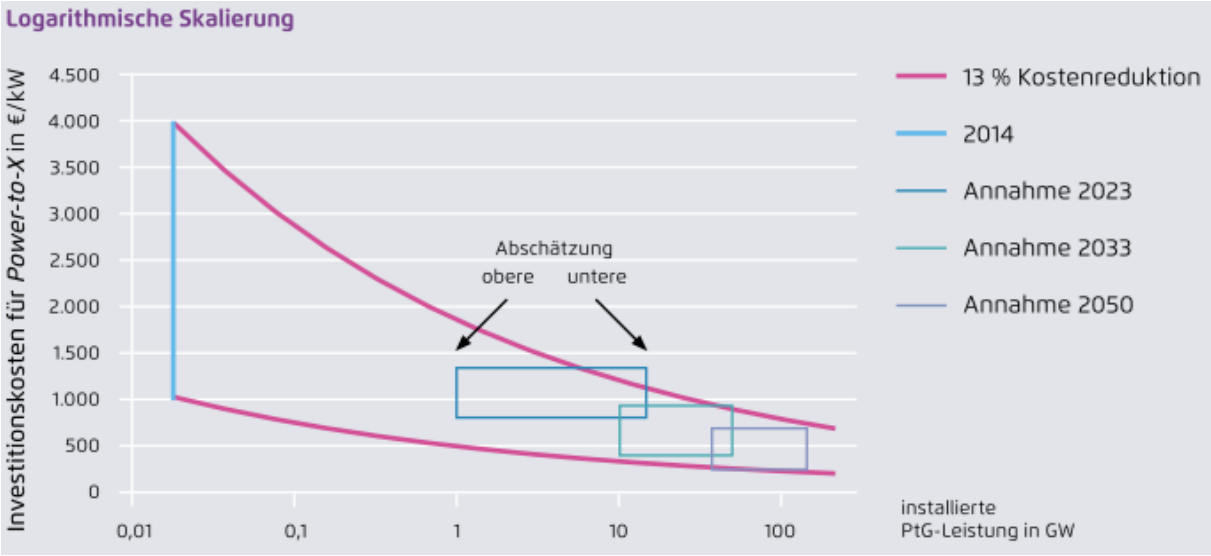


Abbildung 6.75: Annahme zur Reduktion der Investitionskosten für Power-to-X Technologien in Bezug auf die installierte Kapazität und Annahmen für die Jahre 2023, 2033 und 2050 (Fürstenwerth et al. 2014).

6.5.1.7 Regulatorische Rahmenbedingungen

Aufgrund der zahlreichen potentiellen Beiträge zum Klimaschutz und zur Energiesystemtransformation wird P2F durch viele regulatorische Maßnahmen unterstützt. Der Übersicht halber seien

im Folgenden zunächst die nationalen Klimaschutzziele und -maßnahmen aufgelistet bevor auf die spezifischen Regulierungen für P2F-Konzepte und Anwendungen eingegangen wird.

Im Jahr 2010 hat die Bundesregierung das Energiekonzept 2050 vorgelegt (Bundesregierung 2010). Sektor übergreifend sollen die nationalen Treibhausgasemissionen bis 2020 um 40% gegenüber der atmosphärischen Konzentration im Jahr 1990 reduziert werden. Dieser Trend soll sich bis 2050 fortsetzen mit einer Reduktion der Emissionen um bis zu 95%, mindestens jedoch 80%. Um das Ziel zu erreichen ist bis zum Jahr 2030 eine Reduktion um 55% und bis 2040 eine Reduktion um 70% vorgesehen. Dazu soll der Primärenergiebedarf gegenüber 2008 bis 2020 um 20% gesenkt werden, bis 2050 um 50%. Im Wärmesektor soll ein EE-Anteil von 14% bis 2020 erreicht werden. Im EEG 2012 wurde der Anteil von erneuerbaren Energien im Stromsektor auf 80% bis 2050 festgelegt, bis 2020 soll der Anteil 35% betragen. In der Erneuerbaren Energien Richtlinie (RED, Renewable Energy Directive) der EU ist für Deutschland ein Sektor übergreifender EE-Anteil von 18% gesetzt. Zudem müssen im Verkehr 10% der verbrauchten Energie aus Erneuerbaren stammen.

Auf EU-Ebene ist zudem die Reduktion von Treibhausgasen im Verkehr über die Kraftstoffqualitätsrichtlinie (FQD, Fuel Quality Directive) geregelt (Ziel: -6% bis 2020). Prinzipiell können die Ziele mit allen emissionsmindernden Technologien erreicht werden. Betrachtet werden dabei die Lebenszyklus-Treibhausgasemissionen der eingesetzten Kraftstoffe, von der Bereitstellung bis zur Verbrennung im Motor. Insbesondere durch die Reduktion von Emissionen bei der Kraftstoffherstellung ist eine Verringerung möglich, die durch die Verbrennung entstehenden Emissionen lassen sich hingegen nicht verändern. Für Benzin (73,4 $gCO_{2Äq.}$ MJ^{-1}) und Diesel (73,2 $gCO_{2Äq.}$ MJ^{-1}) sind die bei vollständiger Verbrennung entstehenden Emissionen festgelegt (Edwards et al. 2011). Für Wasserstoff aus Dampfreformierung ist die THG-Intensität auf 41,7 $gCO_{2Äq.}$ MJ^{-1} festgelegt (FQD ANNEX I (2015/652/EU)).

Innerhalb Deutschlands sind die Klimaschutzziele für den Verkehr im Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG 2009 § 37a) geregelt. Die Emissionen sollen hier bis 2020 um jährlich 0,5% bis mindestens -6% gegenüber den Emissionen im Jahr 2010 reduziert werden. Die vorherige Biokraftstoffquote, durch die Mindestanteile an Biokraftstoffen für in den Verkehr gebrachte Energieträger festgelegt wurden, ist dadurch für eine Anpassung an die FQD von der Treibhausgasminderungsquote ersetzt worden. Sie kann durch die Beimischung von Biokraftstoffen zu regulärem Benzin und Diesel eingehalten werden, wobei die tatsächliche Emissionsreduktion vom Treibhausgasminderungspotential der eingesetzten Biokraftstoffe abhängt, welches in die Berechnungen mit einbezogen wird. Zudem steigt das für eine Anrechnung von Biokraftstoffen erforderte Treibhausgasminderungspotential der eingesetzten Biokraftstoffe von bisher 35% auf bis zu 60% ab 2018 an. Biokraftstoffe, die dieses Minderungspotential in ihrer Bereitstellung nicht aufweisen, werden zur Erfüllung der Quote nicht berücksichtigt und als fossile Kraftstoffe gewertet. Für die

Anrechnung von synthetischen Kraftstoffen aus dem P2F-Konzept ist bisher kein Verfahren genormt. Die Bundesregierung verweist dennoch darauf, dass synthetische, strombasierte Kraftstoffe mittel- bis langfristig einen Beitrag zum Klimaschutz bei Kraftstoffen leisten können und dass auf Vorschriften der EU-Kommission zur Anrechnung dieser Kraftstoffe gewartet wird, ehe es zu einer nationalen Regulierung käme (Deutscher Bundestag 2014). Bei Verfehlung der THG-Minderungsquote werden nach BImSchG § 37c Strafzahlungen von 470 Euro pro Tonne $CO_{2Äq.}$ für jene Akteure fällig, welche die Kraftstoffe in Verkehr bringen.

P2F im nationalen Recht

Es ist derzeit kein Gesetz speziell für Speichertechnologien in Deutschland verfasst worden. Dies ist ein wesentliches Hindernis für den Aufbau von Stromspeicheranlagen in Deutschland. Der rechtliche Rahmen heutiger Stromspeicher wird u.a. über das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) und Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) vorgegeben. Allerdings ist nicht eindeutig geklärt, wie die verschiedenen Stromspeichersysteme einzuordnen sind, u.a. weil im EEG und EnWG unterschiedliche Begrifflichkeiten verwendet werden. Speziell die Einordung von P2F-Konzepten ist aufgrund der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten der Erzeugnisse zum Teil schwierig.

Nach dem EnWG ist sowohl der in einem Elektrolyseur erzeugte Wasserstoff als auch synthetisch erzeugtes Methan gleichgestellt mit dem in einer Biogasanlage erzeugten Biogas, wenn der Anteil der eingesetzten Energie und Stoffe zu mindestens 80% aus erneuerbaren Energiequellen stammt (§ 3 Nr. 10c EnWG). Demnach hat auch Speichergas aus Power-to-Gas-Anlagen laut Gasnetzverordnung (GasNV) Vorrang beim Netzzugang, und es ergeben sich nur begrenzte Netzanschlusskosten für die Betreiber solcher Anlagen (Grimm et al. 2013). Auch sind neue Stromspeicheranlagen für einen Zeitraum von 20 Jahren vom Netzentgelt befreit (§ 118 Abs. 6 Satz 1 EnWG) mit der Einschränkung, dass die entnommene elektrische Energie zu einem anderen Zeitpunkt wieder in dasselbe Netz eingespeist werden muss (§ 118 Abs. 6 Satz 3 EnWG). Bei Power-to-Gas-Anlagen entfällt allerdings das Erfordernis der Rückverstromung. Diese Anschubfinanzierungsmaßnahme gilt für Anlagen, die im Zeitraum von August 2011 bis August 2026 in Betrieb genommen wurden bzw. werden. Des Weiteren sind Power-to-Gas-Anlagen, die über Wasserelektrolyse Wasserstoff erzeugen oder diesen Wasserstoff für die Umwandlung in Biogas nutzen, von den Einspeiseentgelten in das Gasnetz befreit (§ 118 Abs. 6 Satz 6 und 7 EnWG).

Nach dem EEG entfällt für P2F-Betreiber unter bestimmten Voraussetzungen, gekoppelt an die Speichergas-Definition, die Zahlung der EEG-Umlage (§ 60 Abs. 3 EEG). Als Speichergas ist unter § 5 Nr. 29 EEG 2014 „Jedes Gas, das keine erneuerbare Energie ist, aber zum Zweck der Zwischenspeicherung von Strom aus erneuerbaren Energien ausschließlich unter Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt wird.“ definiert. Es gelten dafür strengere Anforderungen an den Bezugsstrom, der im Gegensatz zur Definition im EnWG zu 100% aus erneuerbaren Energien stammen muss. Wobei sich nach § 61 EEG dennoch eine reduzierte Umlagepflicht von

40% ergibt, wenn die Stromerzeugungsanlage und/oder die P2F-Anlage an das öffentliche Stromnetz gekoppelt sind.

Im EnWG sind P2F-Anlagen als Letztverbraucher definiert, solange der dem Netz entnommene Strom für die Zwischenspeicherung des Produkts über Rückverstromung nicht in dasselbe Netz zurückgespeist wird. Mit dem Status des Letztverbrauchers ist die Zahlung sämtlicher Umlagen, Steuern und Entgelte auf den Bezugsstrom verbunden, sofern deren Befreiung nicht explizit für einzelne Anwendungsfälle definiert ist. Insbesondere die teure EEG-Umlage ist deshalb in jedem Fall zu zahlen, wenn P2F nicht zu Rückverstromung eingesetzt wird.

In Bezug auf die Netzentgeltbefreiung nach § 118 Abs. 6 EnWG ist laut von Bredow und Balzer die Rechtslage bezüglich einer Befreiung von netzentgeltgewälzten Abgaben, Umlagen und Kosten nicht eindeutig geklärt. Hierzu gehören die Konzessionsabgaben, die KWK-Umlage, die § 19 Abs. 2 StromNEV-Umlage und die Offshore-Haftungsumlage (Bredow und Balzer 2015). Nach dem Stromsteuergesetz (StromStG § 9a Nr. 1) sind Elektrolyseure allerdings von der Stromsteuer befreit.

6.5.2 Richtungsgebende Einflussfaktoren „Schildkröte“ und Transformationspfade „Szenarien“

Angesicht nicht mehr abwendbarer, sondern allenfalls zu begrenzender Klimawandelfolgen und der in Paris vereinbarten Klimaschutzziele ist eine Transformation des Energiesystems unausweichlich, die auch weitreichende Lösungen sowohl für den Wärme- als auch vor allem für den Verkehrssektor beinhaltet. Zunehmend gewinnt deshalb die Frage an Bedeutung, wie der notwendige Transformationsprozess in eine erwünschte Richtung gelenkt werden kann, so dass die gesteckten Ziele – hier insbesondere eine erweiterte Versorgungssicherheit mit einer nachhaltigen Energieversorgung unter Einhaltung der Klimaschutzziele – am Ende tatsächlich erreicht werden können. Leitorientierungsprozesse könnten einen Ansatz darstellen, mit dem die erwünschte Richtung anhand von Leitkonzepten lösungsorientiert aufgegriffen und in realisierbare, innovationsspezifische Gestaltungsleitbilder konkretisiert wird, was dazu dient, Orientierung in den komplexen Transformationsprozessen zu geben. Der in der Innovationsforschung formulierten Multi-Impuls-Hypothese zu Folge können Leitorientierungen allerdings nicht allein richtungsgebend sein, sondern erst im Zusammenspiel mit weiteren richtungsgebenden Einflussfaktoren, die auf bzw. in sozio-technischen Systemen ihre Wirkung entfalten (u.a. Dierkes et al. 1992; Lehr und Löbbe 1999). Man denke hier als Beispiel an ein Extremereignis wie in Fukushima, das Leitkonzepte wie Nachhaltigkeit und 100% erneuerbare Energien noch einmal enorm beflügelt hat. Als Grundlage zur Identifizierung von richtungsgebenden Einflussfaktoren dient das an soziotechnische Systeme angepasste Schildkrötenmodell der richtungsgebenden Einflussfaktoren (u.a. Ahrens und Gleich 2002; Brand 2013, 2016; Fichter 2006; Hemmelskamp 1999; Stührmann et al. 2012; Wachsmuth 2015). Neben dem Einfluss von Leitorientierungsprozessen (*Vision Pull*) wird

in diesem Modell, wie in Abbildung 6.76 dargestellt von fünf weiteren externen sowie drei internen Einflussfaktoren (Abbildung 6.76) ausgegangen, die auf das soziotechnische System bzw. den Innovationsprozess – hier P2F – richtungsgebend wirken und untereinander auch wechselwirken.

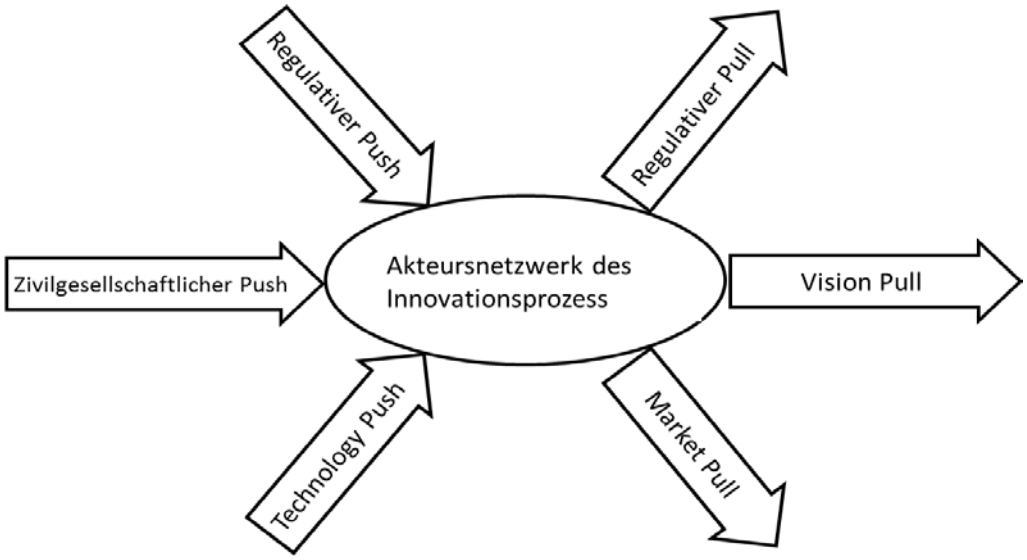


Abbildung 6.76: Schildkrötenmodell der richtungsgebenden Einflussfaktoren: Sechs externe Einflussfaktoren, unterteilt in destabilisierende Push- und selektierende Pull-Faktoren, wirken richtungsgebend auf Innovationsprozesse in sozio-technischen Systemen.

Die sechs externen Einflussfaktoren sind zudem unterteilt in Push- und Pull-Faktoren. Push-Faktoren besitzen die Fähigkeit, das bestehende Regime zu destabilisieren, indem sie neue Optionen für Innovationen bereitstellen und vorhandene oder angestrebte Systemelemente beschränken oder gar delegitimieren. Pull-Faktoren zeichnen bestimmte Innovationen als besonders wünschenswert aus und wirken insbesondere in frühen Entwicklungsphasen selektierend.

Schließlich werden systeminterne Einflussfaktoren durch das Akteursnetzwerk des Innovationsprozesses abgebildet. Im Innovationssystem P2F besteht dieses Akteursnetzwerk maßgeblich aus den Betreibern der Pilotanlagen, den Anlagenherstellern und -zulieferern und Innovationsnetzwerken, die sich unternehmensübergreifend bilden um die Ziele des Innovationsvorhabens zu vertreten und umzusetzen (vgl. Abbildung 6.76). Als Beispiele seien hier Unternehmen wie die Audi AG, sunfire GmbH, Viessmann Group/ MicrobEnergy GmbH und die dena GmbH mit ihrer Strategieplattform P2G genannt, die alle auch auf einem vom Projekt zum Thema P2F ausgerichteten Stakeholder-Workshop im Rahmen von Resystra vertreten waren.[93] Gegenwärtig ergeben sich allerdings kaum Geschäftsmodelle für die beteiligten Akteure. Sie setzen deshalb in ihrer strategischen Ausrichtung darauf, gemeinschaftlich Ziele zu verfolgen und Forderungen nach geeigneteren regulatorischen Rahmenbedingungen, die Geschäftsmodelle erst ermöglichen können, auf eine einheitliche Linie zu bringen.

[93] Vgl. Anhang, Kapitel 10.3 Dokumentation zum Resystra P2F Stakeholder-Workshop am 10.09.2015

Als externer Einflussfaktor wirkt der *Technology Push* als zentraler Treiber für die Innovation P2F und löst im Innovationswettbewerb einen technologischen Veränderungsschub aus. P2F kann zumindest bisher weitgehend als eine Technology-Push-Innovation angesehen werden. Durch die Fortentwicklung der Technologien können sich überhaupt erst Märkte für P2F entwickeln. Gemeint sind hier bspw. effizientere Prozesse und insbesondere günstigere Materialien, die in den Anlagen zum Einsatz kommen können. Für eine Reduktion der Investitionskosten bedarf es zudem vor allem einer Serienproduktion der Anlagenkomponenten. Für einen systemdienlichen Betrieb muss es außerdem möglich sein, die Umwandlungsprozesse einem fluktuierenden Stromdargebot anpassen zu können. Insbesondere bei der Fischer-Tropsch-Synthese liegen hierzu bisher kaum Erfahrungen vor. Lösungsansätze könnten Zwischenspeicher für Strom und Wasserstoff darstellen, um eine konstante Flüssigkraftstoffproduktion zu ermöglichen.

Mit dem *Market Pull* werden Nachfrageveränderungen dargestellt, die zu Innovationsbemühungen führen. Dazu zählen beispielsweise die Nachfrage nach alternativen, klimafreundlichen Kraftstoffen im Mobilitätssektor (v.a. Schwerlast- und Luftverkehr) im Sinne der Einhaltung der Klimaschutzziele oder neuer umweltbezogener Kundenanforderungen sowie die Versorgung der chemischen Industrie mit regenerativen Rohstoffen. Im Falle von P2F kann die Nachfrage nach den neuen Produkten vor allem nach preis- und quoteninduzierter Nachfrage differenziert werden.[94] Die private Nachfrage nach klimafreundlicher Energie resultiert aus einem persönlichen Interesse, welches der grünen Eigenschaft des Produkts einen Mehrwert verschafft. Es ist nicht zu erwarten, dass synthetische, strombasierte Kraftstoffe mittelfristig das Preisniveau fossiler Kraft- und Brennstoffe erreichen können. Dennoch existiert eine vereinzelte Nachfrage für die neuen Produkte bis zu einer individuell abhängigen Preisdifferenz. Die kommerzielle Nachfrage ergibt sich hingegen aus einer strategischen Ausrichtung von Unternehmen. Unter der Annahme, dass Treibhausgasemissionen zukünftig mit deutlich höheren Kosten rechnen müssen (sei es durch Zertifikate, eine CO_2-Steuer oder durch Strafzahlungen), ergeben sich strategische Investments in neue Technologien, auch wenn diese zunächst nicht rentabel sind.

In der Rubrik *regulativer Push* können sämtliche staatliche Regulierungen dargestellt werden, die einen Veränderungsdruck auf die in der Wertschöpfungskette beteiligten Akteure ausüben. Starke Impulse werden vor allem durch die Ankündigung und Verabschiedung neuer Gesetze und Verordnungen entsendet, beispielsweise durch die Einführung der Treibhausgasminderungsquote im Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) oder der EU-Verordnung (EG) 443/2009 zur Verminderung der CO_2-Emissionen von PKWs. Bezüglich der Integration von Systeminnovationen wie P2F dürfte dem regulativen Push ein besonders starker Einfluss zukommen. Ohne deutliche regulatorische Signale wird sich diese klimafreundliche Innovation an den Märkten kaum durchsetzen. Diese These konnte im Fall von P2F auch mit Simulationen auf Basis des

[94] Vgl. Kapitel 6.5.3

erarbeiteten agentenbasierten Modells quantitativ bestätigt werden (vgl. Kapitel 6.5.3). Letztlich ist das Gelingen der gesamten Energiewende sogar maßgeblich von der Regulierung abhängig, da die nötigen Umsetzungsmaßnahmen zwar aller Wahrscheinlichkeit nach langfristig volkswirtschaftlich von Vorteil, kurz- bis mittelfristig aus betriebswirtschaftlicher Sicht jedoch unattraktiv sind, und sich teurere, klimafreundlichere Investitionen einzelner Akteure somit nicht für sie auszahlen. Dieser Umstand verstärkt sich zudem noch dramatisch bei einer Trägheit in der Anpassung der Gesetzgebung. Der Einsatz regenerativ erzeugter Kraftstoffe ließ sich beispielsweise bisher nicht auf die Treibhausgasminderungsquote anrechnen.

Als *Anreiz Pull* fungieren staatliche Anreize für Marktakteure, die zur Entwicklung und Anwendung neuer Technologien führen. Dazu gehören Forschungs- und Förderprogramme, durch die viele der bisher entstandenen Power-to-Gas Pilotprojekte gefördert wurden. Ohne die entsprechenden Fördergelder würden solche Systeminnovationen gar nicht erst entwickelt. Besonders in frühen Entwicklungsphasen sind allerdings auch weitere Fördermechanismen wie beispielsweise Steuervorteile ein verbreitetes Instrument für die Unterstützung der Marktintegration. Nach dem 31.12.2008 errichtete P2F-Anlagen sind beispielsweise nach § 118 Abs. 6 Satz 7 EnWG von Netzentgelten für den Bezugsstrom befreit, auch wenn der hergestellte Kraftstoff nicht für die Rückverstromung verwendet wird. Zudem ist nach § 9a Nr. 1 StromStG eine Entlastung von der Stromsteuer gegeben. Von den Akteuren im Innovationssystem gehen zudem weitere Forderungen aus, die sich deutlich dem regulativen Pull zuordnen lassen. Die Pflicht zur Zahlung der EEG-Umlage auf den Bezugsstrom für den P2F-Prozess, sofern das hergestellte Produkt nicht zurück verstromt wird, ist beispielsweise ein intensiv diskutiertes Thema.

Zivilgesellschaftlicher Push: Akteure wie Verbraucherschutz- und Umweltschutz-organisationen können gemeinsam mit den Medien durch die öffentliche Skandalisierung bestimmte Technologien oder Energieträger angreifen und damit einen enormen Einfluss auf das Innovationsgeschehen nehmen. Sie weisen daher ein erhebliches Potential auf, um sowohl bisherige Pfade als auch zukünftig mögliche Entwicklungen im Sinne des Vision Pull zu priorisieren oder auch durch Skandalisierung zu delegitimieren. Sie haben somit einen hohen Einfluss auf die weitere Ausgestaltung der Energiewende. P2F-Projekte sind bisher nach Stakeholder-Aussagen kaum mit Skandalisierung konfrontiert. Dennoch dürfte auch P2F zumindest indirekt Skandalisierungsprozessen ausgesetzt werden. Bei einer energetischen Vollversorgung durch erneuerbare Energien in Deutschland ist ein erheblich stärkerer Ausbau insbesondere von Windkraftanlagen nötig, wenn nicht nur die klassischen Stromanwendungen versorgt werden sollen, sondern darüber hinaus auch die übrigen Sektoren. Bereits heute erfahren neue Windkraftprojekte allerdings teilweise schon erheblichen Widerstand. Für eine umfangreiche Integration von P2F wird jedoch je nach gleichzeitig realisierbaren Einsparpotenzialen ein Zehn- bis Fünfzehnfaches der bisher erzeugten EE-Strommengen nötig. Gleichzeitig könnte gerade P2F zu einer höheren Akzeptanz des Ausbaus von Onshore Windkraftanlagen beitragen, da durch die flexible Nutzung des Stroms einer

Abregelung von EE-Erzeugungsanlagen bei Überproduktion entgegengewirkt werden könnte, welche zur Skandalisierung des Ausbaus von Windparks maßgeblich beiträgt.

Die bereits angesprochenen Leitorientierungsprozesse werden unter dem *Vision Pull* zusammengefasst und regten auch schon in der Vergangenheit durch Gestaltungsleitbilder wie „100% erneuerbare Energien“ zu Innovationen an. Diese beeinflussen maßgeblich die Ausrichtung des Innovationsgeschehens. Vor allem aber regen sie in bestimmten Fällen überhaupt erst Bestrebungen nach Systeminnovationen an. Die Systeminnovation P2F ist getrieben vom Wunsch nach einer nachhaltigen Energieversorgung aller Energiesektoren. Mit nachhaltigen Kraftstoffen würde die Diversität der Energieträger erhalten bleiben. Statt ausschließlich auf Elektromobilität zu setzen würden sich im Verkehr auch die bis heute verwendeten und über Jahrzehnte optimierten Verbrennungsmotoren und Turbinen nutzen lassen. Nicht zuletzt würde der Grad an energetischer Selbstversorgung je nach Umfang der Produktion von synthetischen, strombasierten Kraftstoffen in Deutschland deutlich gegenüber dem heutigen Stand erhöht und damit mehr Unabhängigkeit gegenüber Erdgas- und Erdölimporten erlangt sowie die nationale Wertschöpfung gesteigert.

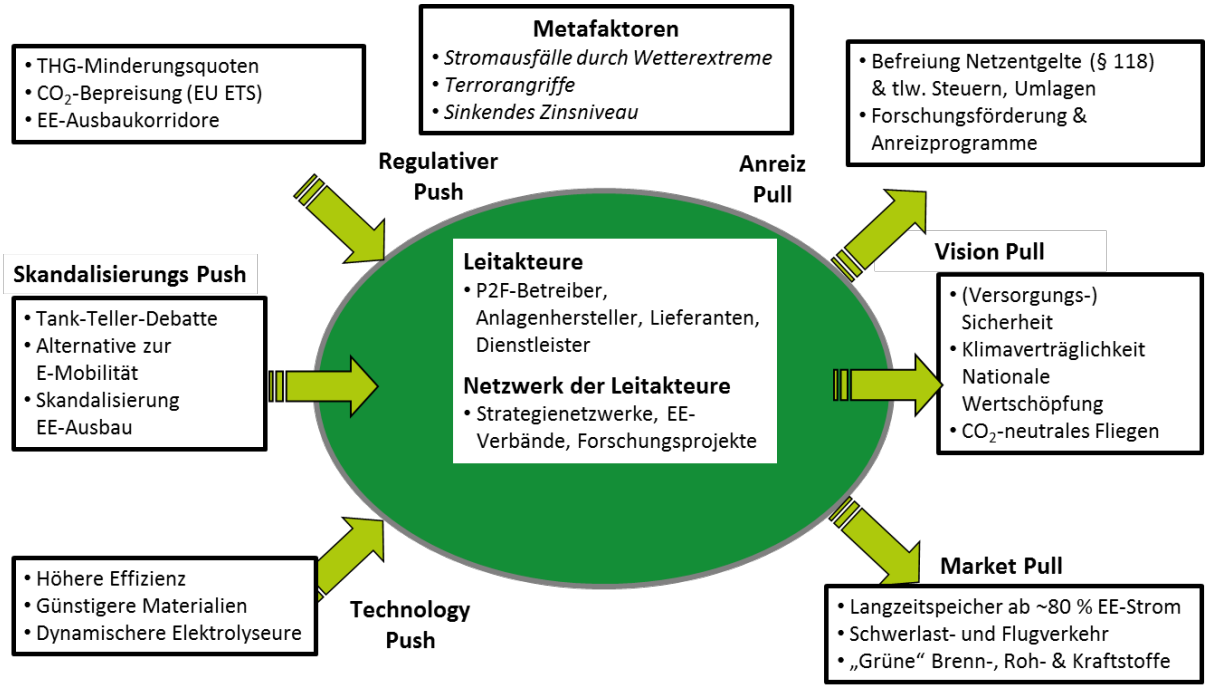


Abbildung 6.77: Richtungsgebende Einflussfaktoren zur Etablierung von P2F-Anlagen. Die erfolgreiche Integration dieser Systeminnovation hängt maßgeblich von Einflussfaktoren ab, welche im ‚Schildkrötenmodell der richtungsgebenden Einflussfaktoren‘ in Form von Push- (Hinterbeine und Schwanz) und Pull-Faktoren (Vorderbeine und Kopf) dargestellt sind.

Mit dem Schildkrötenmodell sowie der Identifizierung und Beschreibung von Push- und Pull-Faktoren können die Triebkräfte des Wandels anschaulich dargestellt und eingeordnet werden. Für die hier durchgeführte Fallstudie ist jedoch anzumerken, dass mit dem Schildkrötenmodell in Abbildung 6.77 nur das Teilsystem Systeminnovation P2F abgebildet wird. Für dieses Teilsystem

wurden die derzeitigen Einflussfaktoren identifiziert, in einer zeitlichen Dynamik und im Zuge der Fortentwicklung (der Integration) der Systeminnovation dürften sich diese noch ändern[95].

Gegenwärtig befindet sich P2F an der Schwelle zwischen einem reinen Forschungsstadium und seiner Integration in das funktionierende Energiesystem, in dem es dann Systemleistungen erfüllen und zur Reduktion der energiebedingten Treibhausgasemissionen betragen wird. Die Frage, wie genau P2F diese Systemleistungen erfüllen kann bzw. soll, und wie genau diese Integration in das Energiesystem designed werden kann, ist derzeit noch weitgehend offen. Unklar ist insbesondere, wieviel erneuerbarer Strom zukünftig für P2F-Prozesse zur Verfügung gestellt werden muss bzw. kann, damit die Klimaschutzziele erreicht werden. Die bisher ausformulierten Ziele der Bundesregierung zum zukünftigen Anteil erneuerbarer Energien reichen zur Erfüllung der Pariser Klimaschutzziele auf jeden Fall nicht aus. Dass erneuerbarer Strom für deren Einhaltung zukünftig zum primären Energieträger aller energieintensiven Sektoren werden muss, ist in den ausgewiesenen Zielen bisher nicht berücksichtigt:

> *„Im Koalitionsvertrag vom Dezember 2013 hat die Bundesregierung die Ausbauziele für erneuerbare Energien präzisiert. Künftig ist der jährliche Zubau gesetzlich geregelt. Insgesamt sollen die erneuerbaren Energien 40 bis 45 Prozent der Stromerzeugung im Jahr 2025 übernehmen, und 55 bis 60 Prozent im Jahr 2035. Die Reform des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes 2014 setzt diese Ziele um. Überdies werden sie jährlich in einem Monitoring überprüft. Eine besondere Rolle spielen Kosteneffizienz, Wirtschaftlichkeit, Netzausbau und Sicherung von Reservekapazitäten.“* (Bundesregierung 2016a)

> *„Das 2010 verabschiedete Energiekonzept der Bundesregierung legt als Ziele für die Jahre nach 2020 folgende Anteile erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch fest: 30% bis 2030, 45% bis 2040, 60% bis 2050.“* (Schäfer-Stradowski und Boldt 2015)

> *„Ziele sind der zügige Einstieg ins Zeitalter der erneuerbaren Energien und der Ausstieg aus der Kernenergie bis Ende 2022. Der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung soll von heute 20 Prozent des Stromverbrauchs auf mindestens 35 Prozent im Jahr 2020 steigen. Bis 2030 strebt die Bundesregierung einen Anteil von 50 Prozent an, 2040 sollen es 60 Prozent und 2050 dann 80 Prozent sein.“* (Bundesregierung 2016b)

Immerhin haben sich einige Studien bereits mit der Rolle von P2F im zukünftigen Energiesystem beschäftigt und Annahmen über den benötigten Umfang der Integration zur Erreichung der Klimaschutzziele getroffen und in diesem Zusammenhang den zusätzlichen Strombedarf ermittelt. Die Erstellung solcher Szenarien erweist sich aufgrund großer Unsicherheiten bezüglich mögli-

[95] Für eine zeitliche Perspektive bietet sich die in Kapitel 4 beschriebene Verknüpfung des Schildkrötenmodells mit dem Multi-Level-Ansatz an, wodurch der Zeitverlauf der Energiewende und verschiedene Phasen der Transformation aufgezeigt werden können.

cher Transformationspfade als äußerst komplex. Je nach Auffassung darüber, wie hoch die erzielbaren Einsparpotenziale sein werden wie tiefgehend die Energieversorgung in Zukunft direkt elektrifiziert werden kann und je nach unterschiedlicher Zielsetzung über die Höhe des Anteils erneuerbarer Energien bzw. der Reduktion der THG-Emissionen, driften die Abschätzungen zum nötigen Umfang der P2F-Integration deutlich auseinander. Im Folgenden werden daher relevante Inhalte aus ausgewählten Studien zunächst verglichen und ausgewertet, ehe Einflussfaktoren für ein Erreichen dieser Integrationstiefen abgeleitet werden. Es wurden bewusst solche Studien ausgewählt, in deren Szenarien von einer ambitionierten Energiewende ausgegangen wird, da eine P2F-Integration ohnehin nur mit einer konsequenten Transformation des Energiesystems sinnvoll und möglich sein wird.

6.5.2.1 Vergleich von Szenarien aus ausgewählten Studien

Für die Bearbeitung dieses Unterkapitels wurden folgende Studien berücksichtigt:

- Benndorf, Bernicke, Bertram, Butz, Dettling et al. 2013: Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050
- Blanck et al. 2013: Treibhausgasneutraler Verkehr 2050
- Fürstenwerth et al. 2014:Stromspeicher in der Energiewende
- Henning et al. 2015: Was kostet die Energiewende?
- Sterner, Thema, Eckert, Lenck, Götz 2015a: Bedeutung und Notwendigkeit von Windgas für die Energiewende in Deutschland
- Quaschning 2016d: Sektorkopplung durch die Energiewende.

Den Studien liegen unterschiedliche Energieszenarien mit Annahmen zum Bedarf an erneuerbarem Strom, zur Flexibilität im (zukünftigen) Energiesystem sowie zur Nutzung von Strom in den Sektoren Wärme, Verkehr und chemische Industrie zugrunde. Von besonderem Interesse für die Identifizierung von zukünftigen Rahmenbedingungen für P2F sind vor allem Annahmen bezüglich

- des zukünftigen Strombedarfs,
- erwartbarer Stromüberschüsse,
- installierter Leistung von Stromerzeugungsanlagen,
- installierter P2F-Kapazität,
- P2F-Erzeugungsmengen und
- Produktionsvolumen der P2F-Endprodukte Wasserstoff, Methan und FT-Kraftstoffe.

Die hier untersuchten Szenarien richten sich nach unterschiedlichen Zielwerten zur Reduktion der energiebedingten Treibhausgase gegenüber dem Jahr 1990 bzw. dem Anteil erneuerbarer Energien in den einzelnen Sektoren im Jahr 2050. Neben den deutlich unterschiedlichen Voraussetzungen für ein Erreichen der jeweiligen Zielwerte erschwert sich ein Vergleich der

Szenarien besonders aufgrund der vielfältigen Flexibilitätsoptionen, deren Einsatz in den einzelnen Studien deutlich variiert:

- Stromimporte und Exporte zum Ausgleich der Residuallast
- Erhöhung der Übertragungskapazitäten des Stromnetzes durch Netzausbau in Deutschland und Europa
- Flexible Stromverbraucher durch Demand-Side-Management wie bspw. Elektrofahrzeuge, Power-to-Heat, Industrieprozesse und Haushaltsgeräte
- Einsatz flexibler Kraftwerke
- Einsatz von Energiespeichern und -wandlern
- Abregelung von Produktionsspitzen erneuerbarer Energien.

Von erheblicher Relevanz für die Ergebnisse sind außerdem die getroffenen Annahmen, durch welche Technologien und in welchem Verhältnis der EE-Strom in die übrigen Sektoren zur Substitution von fossilen Brenn-, Roh- und Kraftstoffen integriert wird.

Studie 1: Benndorf et al. (2013): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050

In der Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) wird vorausgesetzt, dass der jährliche Pro-Kopf-Ausstoß an $CO_{2äq.}$ im Jahr 2050 eine Tonne beträgt. Dies entspricht einer THG-Minderung um 95% gegenüber 1990. Der in dieser Studie dargestellte Pfad soll keine Prognose der zukünftigen Entwicklung des Energiesystems darstellen, sondern ein vom Ziel einer treibhausgasneutralen Energieversorgung her definiertes Szenario. In der Studie wird ferner angenommen, dass sich die derzeitigen Konsum- und Verhaltensmuster kaum ändern, die Bevölkerung jedoch um 12,5% auf 72,3 Millionen Einwohner abnimmt. Deutschland wird weiterhin eine exportierende Industrienation sein und bis 2050 ein durchschnittliches Wirtschaftswachstum von 0,7% des Bruttoinlandsproduktes aufweisen. Für das Erreichen einer THG-Minderung um 95% wird die komplette Energieversorgung einschließlich Wärme, Verkehr, Industrie sowie Emissionen aus Abfallwirtschaft, Land- und Forstwirtschaft und Landnutzungsänderungen berücksichtigt. Für die Energiesektoren werden ausschließlich erneuerbarer Strom und synthetische strombasierte Kraftstoffe als Primärenergieträger angenommen. Biokraftstoffe, Carbon Capture and Storage (CCS) und Atomstrom werden ausdrücklich nicht zur Reduktion von THG-Emissionen berücksichtigt.

Der im THGND 2050 Szenario (THGND=Treibhausgasneutrales Deutschland) ermittelte Gesamtendenergieverbrauch wird mit 1.605,4 TWh veranschlagt. Davon entfallen 465,8 TWh auf die direkte Nutzung erneuerbaren Stroms. Zusätzlich werden 587,7 TWh synthetisches Methan (davon 282 TWh stofflich für die Industrie) und 551,9 TWh synthetische Flüssigkraftstoffe benötigt. Die Daten zum Energiebedarf in den Sektoren sind in Tabelle 6.75 weiter aufgeschlüsselt.

Tabelle 6.75: Übersicht zum Endenergieverbrauch im Jahr 2050 im UBA THGND 2050 Szenario, aufgelistet nach Sektoren (nach Benndorf, Bernicke, Bertram, Butz, Dettling et al. 2013).

	Strom in TWh	Synthetisches. Methan in TWh	FT-Kraftstoffe in TWh
Private Haushalte	104,7	44,5	0
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	90,3	62,4	18,6
Industrie energetisch	179,7	198,8	0
Verkehr	91,1	0	533,3
Summe energetisch	**465,8**	**305,7**	**551,9**
1.323,4			
Industrie stofflich		282	
Summe stofflich und energetisch	**1.605,4**		

Die Emissionen der Energiesektoren sinken auf nahezu Null. Wasserstoff wird in dieser Studie trotz effizienterer Bereitstellung nicht als Kraftsoff berücksichtigt. Gleichwohl wird aber darauf hingewiesen, dass das Potential von Wasserstoff in weiteren Studien ermittelt werden sollte, wobei auch die bessere energetische Effizienz der Wasserstofferzeugung gegen die Notwendigkeit einer neuen Infrastruktur abzuwägen sei.

Die Autoren der Studie rechnen mit einer EE-Stromerzeugung in Deutschland, die den direkten Strombedarf von 466 $TWha^{-1}$ decken kann. Zwar ist das technische Potential vorhanden, den gesamten Strombedarf zur Herstellung von synthetischen Brenn-, Roh- und Kraftstoffen (entspricht einem Primärenergiebedarf von ca. 3.000 $TWha^{-1}$) national zu erzeugen, aus ökologischen, ökonomischen und auch akzeptanzrelevanten Gründen wird jedoch davon ausgegangen, dass große Strommengen aus dem Ausland importiert werden müssen.

Die Analysen für den Verkehrssektor stammen vom Ökoinstitut, das eine entsprechende Analyse im Auftrag des Umweltbundesamtes durchgeführt hat (Blanck et al. 2013). Insbesondere im Verkehr wird ein zusätzlicher Strombedarf entstehen, einerseits direkt für Fahrstrom, andererseits für die Bereitstellung synthetischer, strombasierter Kraftstoffe. Um den Verkehrssektor zu 100% erneuerbar gestalten zu können, muss es gelingen, den Endenergiebedarf deutlich gegenüber heute zu senken. Dieses Ziel erscheint vor allem aufgrund des prognostizierten Verkehrsanstiegs (insbesondere des Flugverkehrs) äußerst anspruchsvoll. Nur durch konsequente Verkehrsvermeidungskonzepte (ÖPNV, Car-Sharing) und eine Verlagerung des Güterverkehrs auf die

Schiene und Wasserstraßen sowie technische Innovationen für eine erhöhte Effizienz der Verkehrsträger kann ein verminderter Endenergiebedarf ermöglicht werden. In dem Szenario wird bewusst auf die Option gesetzt, Großteile des Verkehrs mit synthetischen, strombasierten Kraftstoffen zu decken, um einerseits den künftigen Strombedarf bei einer solchen Transformation aufzuzeigen. Andererseits sehen die Autoren es nicht als realistisch an, dass bis 2050 neue Antriebe insbesondere im Flugverkehr Stand der Technik sind, so dass auf Kerosin und Flugbenzin verzichtet werden könnte. Es wird mit einem Endenergiebedarf von 624 TWh im Bereich der Mobilität im Jahr 2050 gerechnet inklusive Seeschifffahrt. Zum Vergleich: Im Jahr 2010 betrug der Energiebedarf im Verkehr knapp 850 TWh, ein Maximum wird für das Jahr 2020 mit rund 875 TWh prognostiziert. Die veranschlagten Einsparpotenziale sind also durchaus anspruchsvoll.

80% des Energiebedarfs im Bereich Mobilität werden über synthetische Flüssigkraftstoffe bereitgestellt, die übrigen 20% über Elektromobilität. Biokraftstoffe und synthetisches Methan kommen in diesem Szenario im Verkehr nicht zum Einsatz. 57% der PKW-Fahrleistung werden elektrisch umgesetzt. Aufgrund der Umwandlungsverluste bei der Herstellung von stromgenerierten Kraftstoffen ist der tatsächliche Strombedarf des Verkehrssektors wesentlich höher. Ausgehend von einem Gesamtwirkungsgrad für die Bereitstellung von FT-Kraftstoffen von 36% im Jahr 2020 und einer linearen Lernkurve bis 64% im Jahr 2050, werden für die Bereitstellung von ~500 TWh Flüssigkraftstoff ca. 781 TWh EE-Strom benötigt und damit mehr, als für den gesamten Stromsektor nach heutigem Stand.

Im Industriesektor wird mit einer heute ähnlichen Struktur gerechnet. Für das Jahr 2050 werden noch Emissionen um 14 Millionen Tonnen $CO_{2äq.}$ kalkuliert, in 2010 waren es noch ca. 80Mio. t $CO2_{äq}$. Gleichzeitig sinkt der Endenergiebedarf mit 373 $TWha^{-1}$ um 50% bei steigender Produktion. Diesen Zahlen liegt die Annahme einer konsequenten Umstellung von Herstellungsprozessen zugrunde. Hauptenergieträger wird mit 50% synthetisches Methan sein, 45% der Energie ist direkt verwendeter erneuerbarer Strom. Zusätzlich werden 282 TWh synthetisches Methan als Kohlenstoffquelle in der chemischen Industrie einkalkuliert, bspw. zur Vermeidung von THG-Emissionen in der Ammoniakherstellung. Wie im Verkehr wird der mögliche Einsatz von Wasserstoff in dieser Studie nicht berücksichtigt.

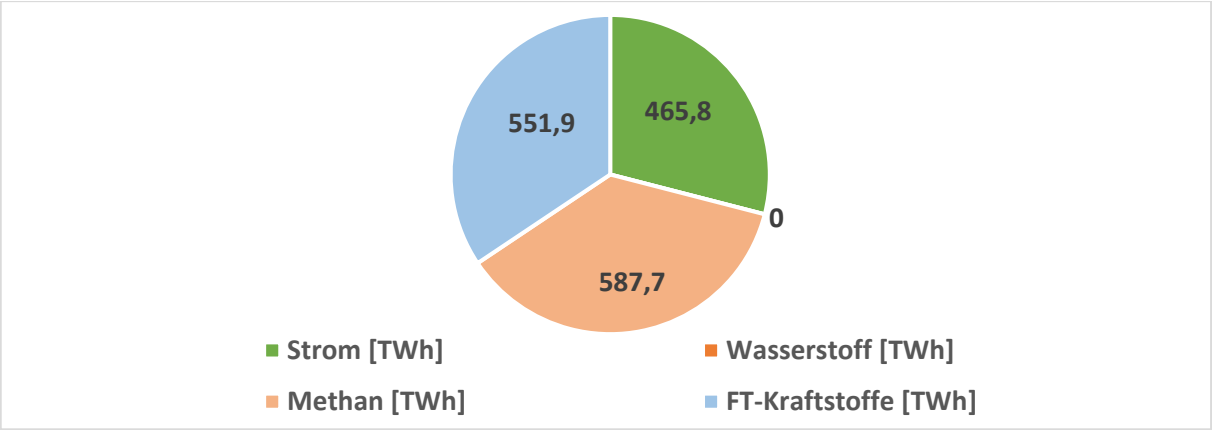


Abbildung 6.78: Verhältnis der Endenergieträger Strom, Methan und Flüssigkraftstoff. Wasserstoff wird in diesem Szenario nicht als Endenergieträger angenommen.

Aufgrund der Überlegung, dass große Mengen des EE-Stroms importiert werden sollen, schlagen die Autoren der Studie vor, einen Großteil der strombasierten Kraftstoffe direkt zu importieren. Unter der Annahme, die Versorgung des Stromsektors erfolge national, würden Importe von Primärenergie für die übrigen Sektoren in der gleichen Größenordnung wie heute nötig.[96] Kosten für eine hier vorgestellte Energieversorgung sind in der Studie nicht berücksichtigt. Auch Rahmenbedingungen, die für die Einführung der benötigten Technologien benötigt würden, sind hier nicht Gegenstand der Untersuchung.[97] Diesbezüglich wird jedoch ausdrücklich der bisher fehlende Anreiz für Unternehmen angesprochen, von fossilen auf regenerative Kraftstoffe umzusteigen.

Studie 2: Fürstenwerth et al. (2014): Stromspeicher in der Energiewende.

In der 2014 veröffentlichten Studie von Agora Energiewende wird die Energiewende bis zu einem Zielwert von 90% erneuerbaren Energien in der Stromversorgung untersucht. Trotz der Beschränkung des hohen EE-Anteils auf den Stromsektor nutzen die Autoren das THGND Szenario des UBA für ein treibhausgasneutrales Deutschland als Basis für die Berechnung von Marktpotentialen für P2F. Vor allem aufgrund der stufenweisen Analyse des Energiesystems in den Jahren 2023 (43% EE-Strom), 2033 (60% EE-Strom) und dem zeitlich nicht definierten Zielzustand von 90% EE-Strom sowie einer sektoralen Betrachtung von P2F in den Jahren 2023, 2033 und 2050 sind die Erkenntnisse dieser Studie für Resystra relevant.

Wichtige Märkte für P2F werden im Verkehr und der chemischen Industrie gesehen, da dort kaum nachhaltige Alternativen vorhanden sind und höhere Erlöse als etwa am Strommarkt erwirtschaftet werden können. Ein Einsatz dieser Technologien wird allerdings nur bei Auftreten einer Ressourcenknappheit für Erdöl und Erdgas und/oder strikten Vorgaben für Treibhausgasemissionen

[96] In Bezug auf den *Vision Pull* im Schildkrötenmodell der richtungsgebenden Einflussfaktoren würde dies bedeuten, dass die nationale Wertschöpfung durch das P2F-Konzept kaum ansteigen und auch ein hoher Grad an energetischer Selbstversorgung verfehlt würde.

[97] Rahmenbedingungen wurden mit dem agentenbasierten Modell in Kapitel 6.5.3 identifiziert.

in den entsprechenden Sektoren gesehen. Ab Mitte der 2020er-Jahre wird Anlagen zur Erzeugung synthetischer, strombasierter Kraftstoffe ein wirtschaftlicher Betrieb zugetraut, sofern die Anlagen über 4.000 bis 5.000 Stunden pro Jahr unter Volllast laufen, bei einem Bezugsstrompreis von 3-5 ctkWh^{-1} (inkl. Umlagen, Steuern, Entgelten) und deutlich gesunkenen Investitionskosten. Die getroffenen Annahmen sind also sehr optimistisch.

Aufbauend auf der UBA Studie wurden eigene Szenarien abgeleitet. Für das Jahr 2023 gehen die Autoren davon aus, dass 3-50% (entspricht 2-30 TWh und 0,8-11,8 GW Anlagenleistung) der Biokraftstoffe durch P2F ersetzt werden. Für die Jahre 2033 und 2050 wurden Bandbreiten für P2F im Verkehr von 15-100% (29-205 TWh bei 8,1-57,4 GW) bzw. 30-100% (108-360TWh bei 22,4-74,6 GW) der Annahmen des UBA angesetzt. Es wurden bewusst sehr breite Entwicklungsspannen gewählt, da die tatsächliche Entwicklung von P2F aufgrund vieler Faktoren äußerst ungewiss ist, eine Entwicklung innerhalb dieser Bandbreiten jedoch als realistisch gesehen wird. Damit P2F-Anlagen ihren Beitrag zum Klimaschutz erfüllen, sollten sie nur mit EE-Strom betrieben werden. Exemplarisch wird für 2023 mit 4.000 Volllaststunden, für 2033 mit 5.000 Volllaststunden und für 2050 mit einer Auslastung von 6.000 Stunden gerechnet. Die Betriebsstunden erhöhen sich einerseits aufgrund steigender EE-Überschüsse, andererseits durch den Zubau von EE-Anlagen, die ausschließlich der Produktion von Stromkraftstoffen dienen. Anders als in der UBA Studie wird sich nicht darauf festgelegt, ob im Verkehr ausschließlich synthetische Flüssigkraftstoffe oder auch Wasserstoff und Methan eingesetzt werden. Da die Prognose des Mengenverhältnisses der verschiedenen Energieträger kaum möglich ist, werden sie nicht weiter differenziert. Vereinfacht wird stattdessen technologieunabhängig von mittleren Wirkungsgraden und Investitionskosten für die Herstellung von Wasserstoff, Methan und Flüssigkraftstoffen ausgegangen.

In der chemischen Industrie herrscht heute ein Bedarf von ~237 TWh an chemischen Energieträgern. Gemäß der UBA-Studie steigt dieser Bedarf bis 2050. Er kann jedoch durch Effizienzsteigerungen in der Produktion auf einen Wert von ~293 TWh begrenzt werden. Daraus abgeleitet wurden realisierbare Bandbreiten für die Marktentwicklung von P2F in der chemischen Industrie festgelegt. Im Jahr 2023 werden 0,5-5% (entspricht 2,5-12,6 TWh bei 1-4,9 GW Anlagenleistung) der Rohstoffe durch P2F bereitgestellt, in 2033 5-30% (13,4-80,1 TWh durch 3,7-22,4 GW) und in 2050 30-96% (88-282 TWh durch 18,2-58,5 GW).

Für den Stromsektor rechnen die Autoren mit keinem Potential für Langzeitspeicher durch Power-to-Gas bis zum Jahr 2050, da die Anlagen hier nur bei sehr hoher Auslastung konkurrenzfähig werden können. Aus gesamtwirtschaftlicher Sicht wären andere Flexibilitätsoptionen wie DSM und die Netzanbindung an Nachbarstaaten deutlich zu bevorzugen. Für den Wärmesektor wird P2F ebenfalls nicht in Betracht gezogen.

Für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen wurde eine gemittelte Lernrate von 13% je Doppelung der installierten Leistung für die Investitionskosten von P2F Anlagen angenommen. Die Investitionskosten wurden Stand heute mit einer Bandbreite von 1000-4000 € kW^{-1} angesetzt und sinken entsprechend der Lernrate bis 2050 auf maximal 250-700 € kW^{-1}. Für die Effizienz von P2F-Anlagen wurde mit einem technischen Fortschritt gerechnet, der mittlere Wirkungsgrad verbessert sich demnach auf 63,7% im Jahr 2023, 71,4% im Jahr 2033 und 80,4% im Jahr 2050.

Basierend auf den Ergebnissen zur Bandbreite der möglichen P2F-Integration im Energiesystem ergeben sich Kapazitäten zwischen 2-80 GW im Jahr 2033 und 40-130 GW im Jahr 2050. Als Langzeitspeicher für den Stromsektor wird P2F auch im Jahr 2050, wenn überhaupt, nur eine kleine Rolle zugemessen. Die Autoren gehen von einer installierten Kapazität zwischen 0-2 GW aus. Dennoch spielt P2F für den Stromsektor als regelbarer Verbraucher im Lastmanagement eine wichtige Rolle. Neben der Funktion als Schlüsseltechnologie für einen klimaneutralen Verkehr und eine nachhaltige Chemieindustrie wird P2F somit auch für den Stromsektor ein wichtiger Stellenwert zugeschrieben.

Studie 3: Henning und Palzer (2015): Was kostet die Energiewende?

In der Studie des Fraunhofer ISE wurden drei Szenarien zur Reduktion der Treibhausgasemissionen in Deutschland erstellt, in denen 80%, 85% und 90% niedrigere Werte als 1990 erreicht werden. Insbesondere das 90%-Szenario für eine ambitionierte Energiewende ist hier von Interesse. In den Szenarien wurde ein Ausstieg aus der Kernenergie bis 2022 angenommen. Es wurde zudem vorausgesetzt, dass keine großflächige Nutzung von CCS erfolgt.

Im Jahr 2014 lag der Bedarf an Primärenergie in Deutschland bei 3.841 TWh, wovon 262 TWh insbesondere in der chemischen Industrie, also stofflich, verwendet wurden. Für Energieanwendungen lag der Bedarf bei 3.579 TWh, wovon 12% aus erneuerbaren Quellen gedeckt wurden. Abzüglich des Eigenverbrauchs im Energiesektor und Umwandlungsverlusten wurden 2.575 TWh als Endenergie in die Sektoren Industrie, Verkehr, Haushalte und Gewerbe/Handel/Dienstleistungen geführt, davon 20% in Form von Strom.

Für das Jahr 2050 wurde im 90% Szenario eine benötigte Leistung von 536 GW an Wind- (On- und Offshore) und Photovoltaikanlagen berechnet. Diesem Ergebnis liegt die Annahme zugrunde, dass eine ambitionierte Gebäudesanierung stattgefunden hat und im Verkehr neben klassischen Verbrennungsmotoren auch Elektromobilität und mit synthetischem Methan betriebene Fahrzeuge eine wichtige Rolle spielen. Zusätzlich werden für die Sicherstellung der Versorgung mit elektrischer Energie in Zeiten geringer Stromproduktion aus fluktuierenden erneuerbaren Energien komplementäre Stromerzeuger mit einer Kapazität von ~130 GW benötigt, bestehend aus GuD-Kraftwerken, Kraftwärmekopplungsanlagen und Gasturbinen. Diese werden je nach Verfügbarkeit mit einem Mix erneuerbarer und fossiler Brennstoffe betrieben.

In der Studie wird zur Speicherung und Verwendung erneuerbarer Energien außerhalb des Stromsektors auch P2F berücksichtigt und dessen Anteile getrennt nach Wasserstoff, Methan und Flüssigkraftstoffen untersucht. Es wird eine Elektrolyseleistung von ~65 GW für die direkte Nutzung von Wasserstoff angegeben. Hinzu kommt eine Leistung von ~110 GW für die Bereitstellung von synthetischem Methan und ~18 GW für Flüssigkraftstoffe.

Studie 4: Sterner et al. (2015): Bedeutung und Notwendigkeit von Windgas für die Energiewende in Deutschland

In dieser Studie für Greenpeace Energy wird der Bedarf an Elektrolyse-Wasserstoff, definiert als „Windgas“, als Langzeitstromspeicher angegeben. Anders als beispielsweise in der bereits betrachteten Studie von Agora Energiewende wird hier ausdrücklich auf die Notwendigkeit von „Windgas“ als Stromspeicher hingewiesen, um bei hohen Anteilen erneuerbarer Energien Dunkelflauten zu überbrücken. Bei einem planmäßigen Netzausbau wird laut der Studie ab einem Anteil von 85% EE-Strom „Windgas“ benötigt. Vor allem aber wird argumentiert, dass das Stromsystem bereits bei einem Anteil von 70% erneuerbarer Energien durch die Einbeziehung von „Windgas“ kostengünstiger betrieben werden kann.

Im Szenario-Rahmen wird von einer zu 100% erneuerbaren Stromversorgung ausgegangen. Für Wind Onshore werden 131 GW mit 2.000 Volllaststunden angesetzt, Wind Offshore 30 GW bei 4.000 Volllaststunden und Photovoltaik 135 GW mit 1.000 Volllaststunden. Zusammen mit einem vergleichsweise geringen Einsatz von Wasserkraft, Biomasse und Geothermie beläuft sich der Kraftwerkspark auf 312,7 GW und eine Erzeugung von 606 TWh.

Den Berechnungen der Studie zufolge fallen im Jahr 2050 154 $TWha^{-1}$ an Stromüberschüssen an mit Leistungsspitzen bis zu 134 GW. Die Überschussmengen betragen im Jahr 2025 erst 4 $TWha^{-1}$, 2035 sind es schon 35 $TWha^{-1}$ und 2045 110 $TWha^{-1}$. Sie folgen damit einem exponentiellen Trend. Für die Aufnahme der Überschüsse wird eine Elektrolyseleistung von 134 GW als oberer Grenzwert für eine vollständige Aufnahme der Überschussmengen angegeben.

Für die Berücksichtigung der Sektoren Verkehr und Industrie berufen sich die Autoren auf die Annahmen des Umweltbundesamtes im THGND Szenario mit einem Bedarf an 127-139 GW Anlagenleistung zusätzlich.

Studie 5: Volker Quaschning (2016): Sektorkopplung durch die Energiewende

Die Studie berücksichtigt das auf der Pariser Klimakonferenz jüngst beschlossene Ziel, die globale Erderwärmung auf 1,5 °C zu beschränken, wofür die energiebedingten THG-Emissionen in Deutschland nach Angaben des Autors bereits bis 2040 auf null gesenkt werden müssen. Ohne die Umsetzung von Effizienzmaßnahmen werden analog zum THGND-Szenario des UBA 3.000 TWh Strombedarf prognostiziert. Durch eine konsequente Umsetzung von Effizienzmaßnahmen könnte der Strombedarf bei gleichbleibendem Verhaltens- und Konsummuster auf 1.320 TWh

begrenzt werden – eine anspruchsvolle Annahme. Die ermittelte EE-Leistung zur Bereitstellung dieser Strommengen beläuft sich auf 717 GW. Für die Umsetzung der Effizienzmaßnahmen müsste beispielsweise der Individualverkehr nahezu vollständig durch Elektromobilität ersetzt werden. Egal welche Pfade für ein Erreichen der Ziele gewählt werden, das derzeitige Erneuerbare-Energien-Gesetz unterstützt eine derart konsequente Transformation nicht. Nach Nitsch beläuft sich die installierte Leistung erneuerbarer Energien bei Einhaltung der Zielkorridore des EEG 2014 im Jahr 2050 auf 199 GW, womit 68,4% des Bruttostromverbrauchs (entspricht 460 $TWha^{-1}$) erzeugt werden (Nitsch 2016c). Für die Energiepolitik werden deshalb einschneidende Korrekturen gefordert.

Der EE-Anteil lag Ende 2015 im Stromsektor bei 32,5%, im Wärmebereich bei 9,3% und im Verkehr bei 4,5%. Bei der Wärmewende werden markante Einsparpotentiale gesehen. Der derzeitige Energiebedarf für Raumwärme und Warmwasser ließe sich von derzeit 773,4 TWh durch eine vollständige Elektrifizierung mit Wärmepumpen und eine Halbierung des Wärmebedarfs durch Sanierungsmaßnahmen auf bis zu 23 TWh reduzieren. Da eine derartig konsequente Umsetzung als nicht realistisch angesehen wird, wurde mit einem zusätzlichen Strombedarf von 150 TWh gerechnet.

Der derzeitige Energiebedarf für Prozesswärme und GuD beträgt 477,2 TWh. Durch Effizienzmaßnahmen wie Wärmerückgewinnung und Nutzung von Elektrowärme lässt sich der Energiebedarf bis 2040 auf 250 TWh begrenzen. Würde ohne Effizienzmaßnahmen Power-to-Gas eingesetzt, wäre ein Strombedarf von 530 TWh gegeben.

Im Verkehr beträgt der derzeitige Energiebedarf 730 TWh, wovon 684,2 TWh fossil gedeckt werden. Der größte Energiebedarf besteht im Individualverkehr mit 410 TWh, gefolgt vom Straßengüterverkehr mit 191,7 TWh und 100,6 TWh für den Luftverkehr. Ohne Effizienzmaßnahmen beläuft sich der Strombedarf auf 1.002 TWh, unter der Annahme, dass 10% des Individualverkehrs elektrifiziert (13 TWh) werden und der restliche Energiebedarf des Verkehrssektors durch synthetische Flüssigkraftstoffe gedeckt wird. Nicht berücksichtigt wurde der voraussichtlich stark anwachsende Bedarf an Flugkraftstoffen. Die internationale Luftverkehrs-Vereinigung IATA schätzt bspw., dass sich die Anzahl der Flugpassagiere international bis 2034 gegenüber 2015 verdoppelt.

Durch eine weitgehende direkte Elektrifizierung des Individualverkehrs sowie des Straßengüter- und Fernverkehrs (z.B. durch Oberleitungen) ließe sich der Strombedarf des Verkehrs gegenüber einem weitgehenden Beibehalten von Verbrennungsmotoren auf 337 TWh reduzieren. Dafür wird empfohlen, ab 2025 nur noch rein elektrische Fahrzeuge zuzulassen.

In der Studie wird zudem offenbart, dass nach den EE-Ausbauzielen des EEG 2014 bis zum Jahr 2040 lediglich eine regenerative Stromerzeugung von rund 460 TWh zu erwarten sei, womit nicht

einmal der heutige Strombedarf regenerativ gedeckt werden könnte. Deshalb werden dringend Anpassungen in der Energiepolitik gefordert.

6.5.2.2 Auswertung und Vergleich der Studienergebnisse

Der Vergleich aller Studien bestätigt, dass für eine vollständige Transformation des Energiesystems und eine konsequente Verfolgung der Klimaschutzziele der Ausbau von erneuerbaren Energien deutlich schneller und umfangreicher umgesetzt werden muss, als dies bisher in den festgeschriebenen Zielen der Fall ist. Da eine resiliente Energieversorgung zwangsläufig in der Langzeitperspektive auch nachhaltig sein muss, wurden für diesen Studienvergleich bewusst Szenarien einer (nahezu) vollständigen Transformation des Energiesystems ausgewählt. Innerhalb dieser Studien sind sich die Autoren einig, dass die Einhaltung der Klimaschutzziele ohne P2F unmöglich ist, wegen den, zumindest nach heutigem Kenntnisstand, nicht elektrifizierbaren Anwendungen im den Bereichen Schwerlast-, Schiffs- und Flugverkehr. Differenzen bestehen darüber, ob P2F als Langzeitstromspeicher benötigt wird, oder ob Dunkelflauten auch kostengünstiger über andere Flexibilitätsoptionen überbrückt werden können. Mit Biokraftstoffen wird in den hier betrachteten Szenarien zukünftig nicht gerechnet, ebenso nicht mit CCS. Eine weitgehende Elektrifizierung des PKW-Verkehrs wird aufgrund deutlicher Effizienzvorteile hingegen einstimmig empfohlen.

In Abbildung 6.79 sind die Energiebedarfe von 2010 und von 2050 im THGND Szenario des UBA gegenübergestellt. Während im Jahr 2010 (links) im Verkehr und für Wärme hauptsächlich Erdöl und Erdgas eingesetzt werden, wird bis zum Jahr 2050 (rechts) erneuerbarer Strom zum primären Energieträger aller Sektoren. Massive Einsparpotentiale werden insbesondere im Wärmesektor gesehen.

Abbildung 6.79: Vergleich der Energiebedarfe in 2010 und 2050 im THGND Szenario.

Abbildung 6.80 stellt die Ergebnisse einzelner Studien zur P2F-Erzeugung im Verkehrssektor gegenüber. Im Verkehr wird einstimmig das größte Anwendungspotential für synthetische Kraftstoffe gesehen.

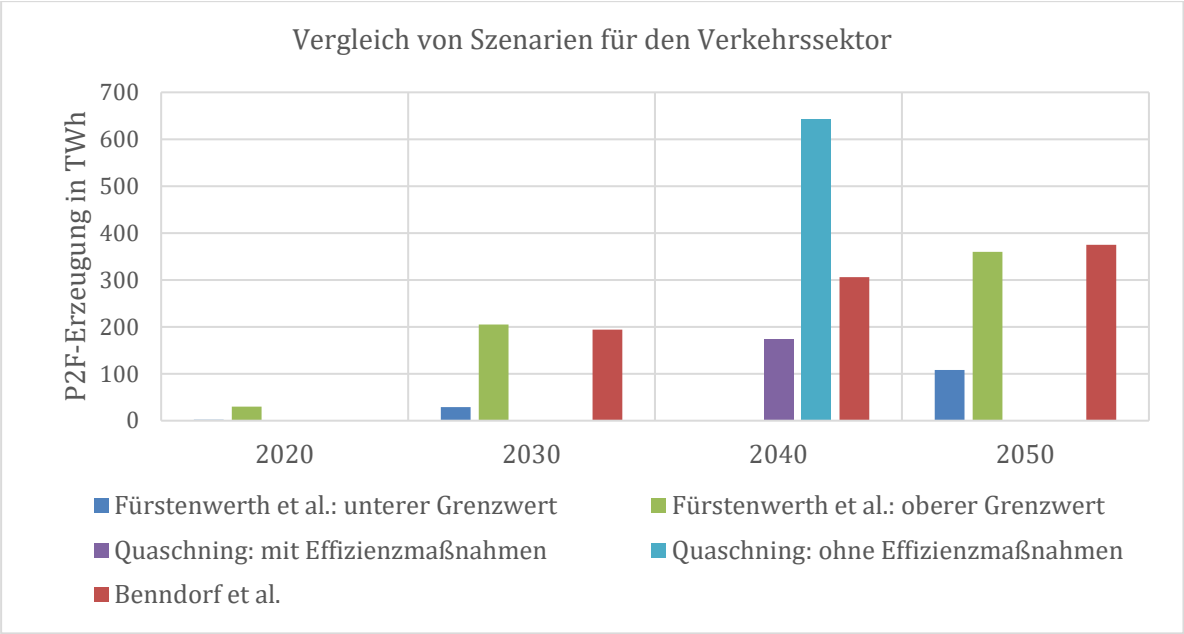


Abbildung 6.80: Vergleich der Studienergebnisse zu den P2F-Erzeugungsmengen im Verkehr.

Abbildung 6.81 zeigt die Ergebnisse zur EE-Kapazität, EE-Erzeugung und zu den resultierenden Überschüssen aus der Studie von Sterner et al. Es ist zu beachten, dass der EE-Ausbau lediglich für eine 100% erneuerbare Stromversorgung erfolgt und nicht für alle Energiesektoren. Da jedoch auch andere Studien empfehlen, national nicht über eine 100% EE-Stromversorgung hinauszugehen und den übrigen Energiebedarf weiterhin zu importieren, haben die Ergebnisse dennoch Relevanz bezüglich verfügbarer Strommengen für P2F. Es wird deutlich, dass mit bis zu 154 $TWha^{-1}$ zwar hohe Mengen an Stromüberschüssen auftreten, diese aber nicht ansatzweise ausreichen, um den Bedarf an synthetischen Kraftstoffen in der Industrie und im Verkehr zu decken und neben P2F auch ein riesiger Strombedarf zur Wärmeerzeugung durch Power-to-Heat Konzepte besteht. Zu beobachten ist in Abbildung 6.81 allerdings, dass mit einem linearen Anstieg der EE-Erzeugungsleistung die Stromüberüberschüsse exponentiell ansteigen. Bei einem deutlich stärkeren Ausbau erneuerbarer Energien wie ihn z.B. Quaschning beziffert, stünde ausreichend EE-Strom für P2F-Anlagen zur Verfügung.

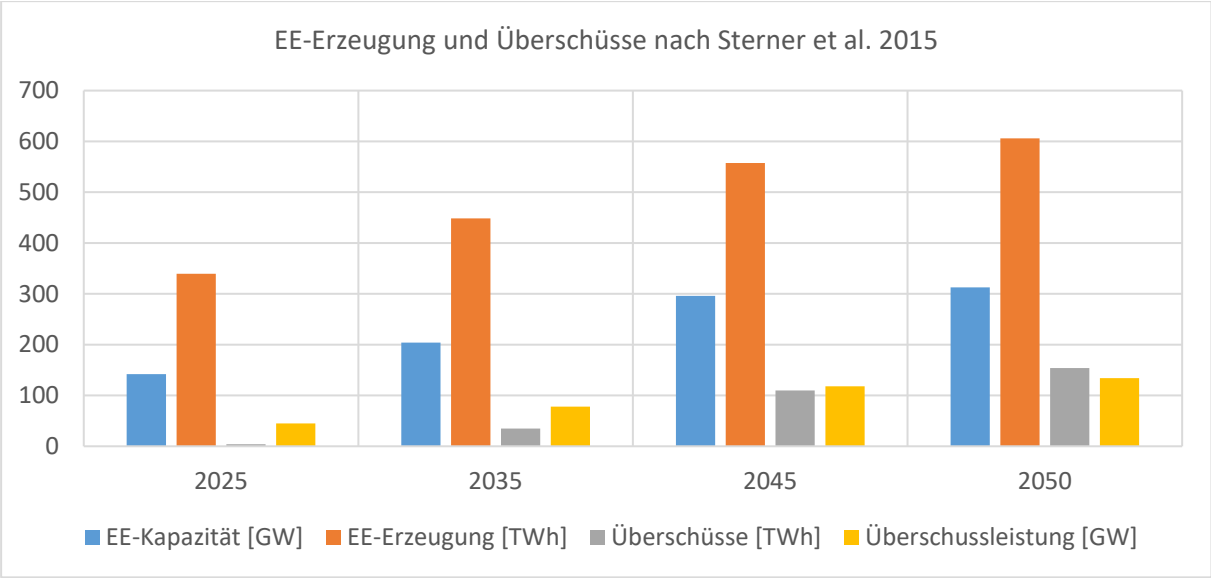


Abbildung 6.81: Darstellung der Entwicklung erneuerbarer Energien bis 2050 für 100% EE-Strom und aus dem Zubau resultierende Überschüsse.

Um den Bedarf an synthetischen Brenn-, Roh- und Kraftstoffen zu decken, werden von Henning und Palzer, Sterner et al. und Agora Energiewende Werte bis zu 193 GW für eine insgesamt benötigte P2F-Kapazität angegeben (Abbildung 6.82). Bei einer Annahme von einer vergleichsweise geringen Auslastung mit durchschnittlich 3.000 Volllaststunden läge der Strombedarf demnach bei bis zu 579 $TWha^{-1}$.

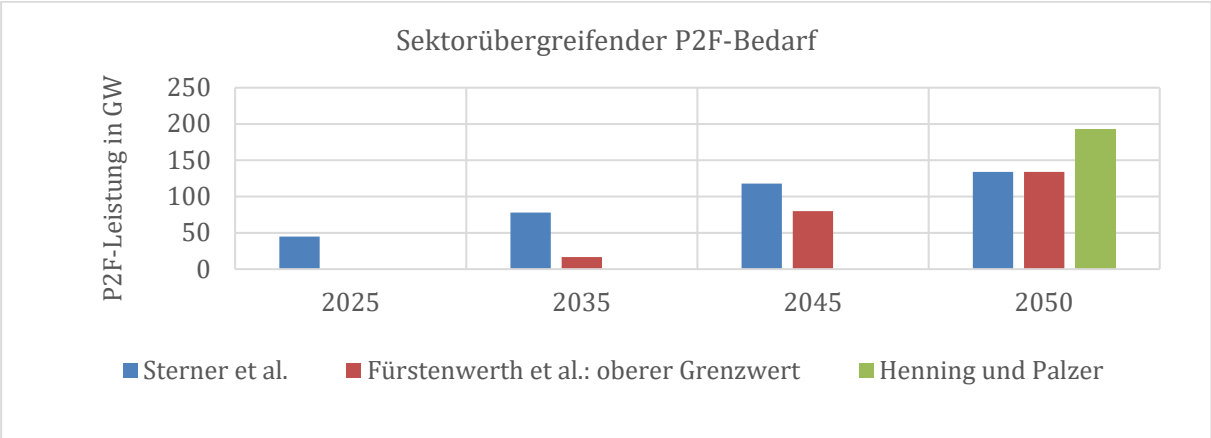


Abbildung 6.82: Studienvergleich zur benötigten P2F-Kapazität für eine nahezu treibhausgasneutrale Energieversorgung in Deutschland

6.5.2.3 Szenarien des agentenbasierten Modells

Mit dem innerhalb von Resystra entwickelten agentenbasierten Modell wurde Akteursverhalten von potentiellen P2F-Betreibern und Kunden unter sich ändernden Rahmenbedingungen simuliert. Die Simulationen dienten der Identifizierung ökonomischer Pfade, auf denen P2F der Schritt aus der Nische in die Märkte gelingen kann. Aufgrund ihrer Relevanz für die Dynamisierung des Schildkrötenmodells der richtungsgebenden Einflussfaktoren sollen Erkenntnisse aus den Szenarien an dieser Stelle kurz erläutert werden, von einer ausführlichen Beschreibung wird jedoch abgesehen und auf das Kapitel 6.5.3 verwiesen.

In einem ‚Referenzszenario' wurde die Entwicklung des P2F-Marktes unter gegebenen und sich nicht verändernden Rahmenbedingungen berechnet. Unter der Voraussetzung, dass Pilotprojekte weiterhin gefördert werden, wird es auch langfristig einen nur langsamen P2F-Zubau geben, die einen Pilotanlagen-Maßstab nicht überschreiten

In einem ‚Business As Usual' Szenario ist im Vergleich zum Referenzszenario von ansteigenden Preisen für fossile Energieträger ausgegangen worden, regulatorische Maßnahmen wurden hingegen nicht implementiert. Es stellte sich heraus, dass P2F Produkte auch bei stark ansteigenden Preisen an den Energiemärkten (4%a^{-1}) aufgrund zu hoher Produktionskosten nicht konkurrenzfähig sind.

In einem dritten Szenario ‚Energiewende Ambitioniert' ist schließlich der Einfluss eines Abbaus regulatorischer Hürden untersucht worden. Es konnte gezeigt werden, dass sich nur durch umfangreiche Maßnahmen in der Klimaschutzpolitik ein Markt für P2F entwickeln kann. Gegenstand der Untersuchung waren der Einfluss einer stärkeren Förderung, der Abbau regulatorischer Hemmnisse, die Einführung von Quoten zur Minderung der Treibhausgasemissionen von Industrieunternehmen und die Auswirkung eines hohen Zertifikatpreises im europäischen Emissionshandelssystem. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass Einzelmaßnahmen für eine Abkehr von fossilem Erdöl und Erdgas nicht ausreichen. Folglich sind es insbesondere die regulatorischen Push- und Pull-Faktoren, die über Erfolg und Misserfolg einer Etablierung von P2F entscheiden.

6.5.2.4 P2F in der Phasendiskussion des Transformationsprozesses

Über die Ziele der Transformation des Energiesystems besteht zumindest in Deutschland weitestgehend Konsens: Perspektivisch soll die Energieversorgung vollständig auf Basis erneuerbarer Energien erfolgen, getrieben durch die Vision eines resilienten (und somit auch nachhaltigen) Energiesystems.[98] Der Transformation liegt grundsätzlich die Verdrängung fossiler Kraftwerke (und Atomkraftwerke) durch erneuerbare Energien zugrunde, und dies vornehmlich durch Windkraft- und PV-Anlagen. Infolge des Ausbaus dieser fluktuierenden Erzeugungsanlagen und gleichzeitig verfolgter Effizienzmaßnahmen stehen kurz- bis mittelfristig erneuerbare Strommengen für eine Nutzung außerhalb des Stromsektors zur Verfügung und können dort direkt und indirekt (über P2F) fossile Brenn- und Kraftstoffe ersetzen. Die Vorreiterrolle des Stromsektors im Transformationsprozess wird somit zunehmend auch zur Transformation der Brenn-, Roh- und Kraftstoffversorgung führen. Durch die Etablierung neuer Technologien bspw. im Verkehr durch Elektroautos oder Wärmepumpen im Wärmesektor wird zwangsläufig auch Sektor übergreifend die Nachfrage nach dem Endenergieträger Strom steigen. Die resultierende Kopplung bringt bei entsprechender Auslegung (steuerbare Verbraucher) den Vorteil der flexibilisierten Nutzung des fluktuierenden Stromangebots.

[98] Vgl. Vision Pull

Aufgrund des zeitlichen Handlungsdrucks – für eine Einhaltung des 1,5 °C Ziels kommen einige Studien zu der Erkenntnis, dass die Transformation zu einer vollständig erneuerbaren Energieversorgung bereits bis 2040 abgeschlossen sein muss – rückt zunehmend die Frage nach konkret zu ergreifenden Maßnahmen durch Politik und Gesellschaft in den Vordergrund. Aus heutiger Sicht lässt sich der Transformationsprozess nach Fischedick et al. und Henning et al. in verschiedene Phasen unterteilen, die sich je nach Ziel der Transformation (z.B. 100% EE, Reduktion der THG-Emissionen um 90%) auf einer Zeitachse abbilden lassen (Fischedick et al. 2014b; Henning et al. 2014). Auf eine zeitliche Dimensionierung der Phasen wird an dieser Stelle jedoch bewusst verzichtet, da im Projekt Resystra vor allem die Frage nach der Resilienz im Transformationsprozess sowie am Ende der Transformation und nicht die Verfolgung eines Klimaschutzzieles zu einen bestimmten Zeitpunkt im Vordergrund steht (gleichwohl die regenerative und damit klimaneutrale Energieversorgung zu den Grundvoraussetzungen eines zukünftigen resilienten Energiesystems gehört).

In allen Phasen wird ein zunehmender Ausbau erneuerbarer Energien zugrunde gelegt. Die erste derzeit zu Ende gehende Phase war geprägt von signifikanten Fortschritten in der Technologieentwicklung und Reduktion der Kosten für die Erzeugungsanlagen. Rund 32,5% der Stromerzeugung sind inzwischen regenerativ. Von der zunehmenden Wahrnehmung der Notwendigkeit eines Wandels in der Energieversorgung hat sich zum Ende der ersten Phase das Bewusstsein für eine ganzheitliche Transformation über den Stromsektor hinaus entwickelt. Aus dieser Erkenntnis heraus werden Sektor übergreifende Konzepte erarbeitet. Neben dem Erkenntnisgewinn, dass insbesondere Effizienz eine wichtige Säule der Energiewende ist, sind Flexibilitätsoptionen zum Ausgleich des fluktuierenden Stromangebotes erneuerbarer Energien neu entwickelt worden. So wurden auch erste Pilotprojekte der Systeminnovation P2F gefördert und umgesetzt.

Durch den weiteren EE-Ausbau wird es in der zweiten Phase der systemischen Integration zunehmend auf eine Flexibilisierung des Stromverbrauchs ankommen sowie auf eine Flexibilisierung komplementärer (fossiler) Kraftwerke. Insbesondere eine stärkere Kopplung des Strom- und Wärmesektors über Power-to-Heat sowie der Einsatz von Kurzzeitspeichern werden in Phase zwei die Diskussion bestimmen. Auch wenn ein großflächiger Einsatz von P2F-Anlagen in dieser Phase aufgrund des noch zu geringen EE-Strom Angebotes zunächst nicht umgesetzt wird, sollten dennoch bereits P2F-Anlagen im industriellen Maßstab gefördert und regulatorische Hürden für eine Integration der Technologien abgebaut werden.

Die dritte Phase des Transformationsprozesses beginnt nach Henning et al. mit einem Anteil von 60-70% regenerativer Stromerzeugung. In dieser Phase werden Lösungen zum Ausgleich von Dunkelflauten benötigt. Synthetisches Methan stellt eine der Optionen für den Ausgleich langfristiger Engpässe in der Stromerzeugung dar. Vor allem aber wird die Integration von P2F-Produkten in den Verkehr und in die chemische Industrie in dieser Phase gesehen.

In der vierten und letzten Phase erfolgt schließlich die Verdrängung letzter fossiler Brenn-, Roh- und Kraftstoffe im Energiesystem. Ob der benötigte Strom und die synthetischen Kraftstoffe im Sinne der Resilienz zu 100% national hergestellt werden können oder sollen, ist bis heute noch nicht absehbar. Das technische Potential für eine rein nationale Erzeugung ist auch ohne deutliche Effizienzsteigerungen und Energieeinsparungen in den Sektoren vorhanden. Die Erschließung ökonomisch ungünstiger Gebiete zur Erzeugung erneuerbaren Stroms wird jedoch gegen Strom- und Kraftstoffimporte aus dem Ausland in Diskussionen abgewogen werden. Von hoher Relevanz wird sicherlich die gesellschaftliche Akzeptanz gegenüber einem enormen Ausbau erneuerbarer Energien sein, der die bereits heute installierte Kapazität von 92 GW durchaus um ein bis zu Fünfzehnfaches übertreffen könnte.

6.5.2.5 Herleitung von zukünftigen Einflussfaktoren und Integration in den Multi-Level-Ansatz

Auf Basis der besprochenen Ergebnisse können die relevanten Einflussfaktoren aus (Abbildung 6.77) weiterentwickelt werden. Von der Systeminnovation P2F wird im Projekt Resystra erwartet, dass sie durch die Erfüllung einer ganzen Reihe an Bauprinzipien einen Beitrag zur Resilienz des Energiesystems leisten kann. Insbesondere der Diversifizierung der Energieträger sowie der Verringerung der Vulnerabilität durch eine Verringerung der Importabhängigkeit kommt hier ein hoher Stellenwert zu. Darüber hinaus ist aber kaum zu beurteilen, inwieweit das Energiesystem insgesamt durch die Integration von P2F resilienter wird, wobei hier dem erhöhten Konfliktpotenzial durch den enormen Ausbau der Erzeugungskapazitäten der Erneuerbaren und durch einen möglicherweise nötigen Ausbau der Stromtrassen eine hohe Bedeutung zukommt.

Die untersuchten Studien legen aus technischer Sicht dar, in welchem Umfang P2F für die Einhaltung der energiepolitischen Ziele benötigt wird. Gleichzeitig wurde deutlich, dass, je nach Umsetzung von Effizienzmaßnahmen in allen Sektoren, eine acht- bis zwanzigfache Erzeugungsleistung durch erneuerbare Energien gegenüber heute bereitgestellt werden muss. Die im EEG 2014 festgelegten Ausbaukorridore für EE-Anlagen müssen also deutlich nach oben korrigiert werden (*Regulativer Push*). Die derzeit schon wachsende Skandalisierung könnte durch einen solchen Zubau völlig neue Dimensionen erreichen. Die Studien zeigen außerdem, dass mit weiterem technischen Fortschritt bezüglich der Effizienz von P2F-Prozessen gerechnet werden kann und dieser angesichts der ohnehin großen Umwandlungsverluste auch zwingend benötigt wird. Eine Kostendegression wird durch Skaleneffekte ermöglicht, also die Großserienproduktion von P2F-Anlagen. Auf möglicherweise limitierte Aufnahmepotentiale von fluktuierenden Strommengen wird nicht eingegangen.

Eine Erkenntnis der später vorzustellenden strukturellen Vulnerabilitätsanalyse in Kapitel 6.5.4 ist es, dass insbesondere eine flexible und dezentrale Ausrichtung von P2F-Anlagen zur Erzeugung

von Flüssigkraftstoffen technisch aufgrund kritischer Prozesse eine große Herausforderung darstellt. Verbunden mit einer aufwendigen Prozessführung können nach derzeitigem Stand der Erkenntnisse Fischer-Tropsch-Anlagen nur mit entsprechenden Pufferspeichern, durch die eine konstante Wasserstoffzufuhr gewährleistet wird, realisiert werden. Eine entsprechende Anpassung des Anlagendesigns kann dem *Technology Push* zugeordnet werden.

Erst die Ergebnisse der agentenbasierten Modellierung sind in der Lage aufzuzeigen, welche Maßnahmen bereits heute, aber auch zukünftig, für eine in den Studien als notwendig bezifferte Marktdurchdringung umgesetzt werden müssen. Diese lassen sich ebenfalls im Schildkrötenmodell als Einflussfaktoren abbilden. Der *Vision Pull* verändert sich auf abstrakter Ebene nur wenig in den späteren Phasen der Transformation. Ihm liegen bei Erweiterung des Blicks auf alle Sektoren und deren Kopplung weiterhin die Bestrebungen nach einer erfolgreichen, ganzheitlichen Energiewende zugrunde. Für eine Markteinführung kommt es insbesondere auf Änderungen im regulativen Push und Anreiz Pull an. Letzterem lassen sich vorrangig zwei Maßnahmen zuordnen: Die Simulationen mit dem ABM haben ergeben, dass eine starke Anschubförderung von Pilotprojekten zu einer schnellen Degression der Investitionskosten führt, wodurch unternehmerische Investitionen aufgrund der verbesserten Wirtschaftlichkeit deutlich steigen. Gleichzeitig bedarf es jedoch einer Befreiung von Abgaben auf den Bezugsstrom für die P2F-Prozesse. Nur so ist der wichtige Zugang zu günstigen Strompreisen von wenigen Cent pro Kilowattstunde für die P2F-Betreiber möglich. Da die Auswertung der externen Studien allerdings ohnehin ergeben hat, dass allein Stromüberschüsse für die ausreichende Herstellung von synthetischen Kraftstoffen bei weitem nicht ausreichen, wird es zukünftig auf die Installation von EE-Anlagen ankommen, die ausschließlich der Produktion von Kraftstoffen dienen und deshalb nicht nur mit sogenanntem Überschussstrom betrieben werden. Entkoppelt vom eigentlichen Stromsystem könnte die Befreiung von Abgaben begründet werden, wenn das öffentliche Stromnetz nicht beansprucht wird.

Auf Seiten des *regulativen Push* bedarf es einer indirekten Förderung von P2F. Die Etablierung von weitrechenden Klimaschutzmaßnahmen in Form von durch Unternehmen einzuhaltenden THG-Minderungsquoten hat sich im agentenbasierten Modell als essentiell erwiesen. Nur so scheint es möglich Industriezweige zu einer Abkehr von fossiler Energie zu motivieren. Mit einer daraus resultierenden erhöhten Zahlungsbereitschaft, die auch durch teure CO_2-Emissionszertifikte von mindestens 100 Euro pro Zertifikat hervorgerufen wird, entsteht erst eine tatsächliche Nachfrage nach synthetischen Brenn-, Roh- und Kraftstoffen. Dies ist eine im höchsten Maße bedeutsame Änderung im P2F-System. Sie lässt sich einem über Regulation vermittelten *Market Pull* zuordnen, denn nach heutigem Stand existiert praktisch keine reale Nachfrage nach diesen Produkten. Sie entsteht bisher nur durch die staatlichen Subventionen und allenfalls in Nischen durch besonders zahlungsbereite Kundengruppen. Nicht zuletzt kann eine ethisch motivierte erhöhte Zahlungsbereitschaft, die dem *Market Pull* zugeordnet wird, den Markteintritt beschleuni-

gen. Eine öffentliche Skandalisierung von klimaschädlichen Geschäftsfeldern könnte als zivilgesellschaftlicher Push zudem die Umsetzung der durch den Staat durchzuführenden Klimaschutzmaßnahmen begünstigen. In der Abbildung 6.83 wurden die für die erfolgreiche Transformation nötigen zusätzlichen Einflussfaktoren in roter Farbe ergänzt,

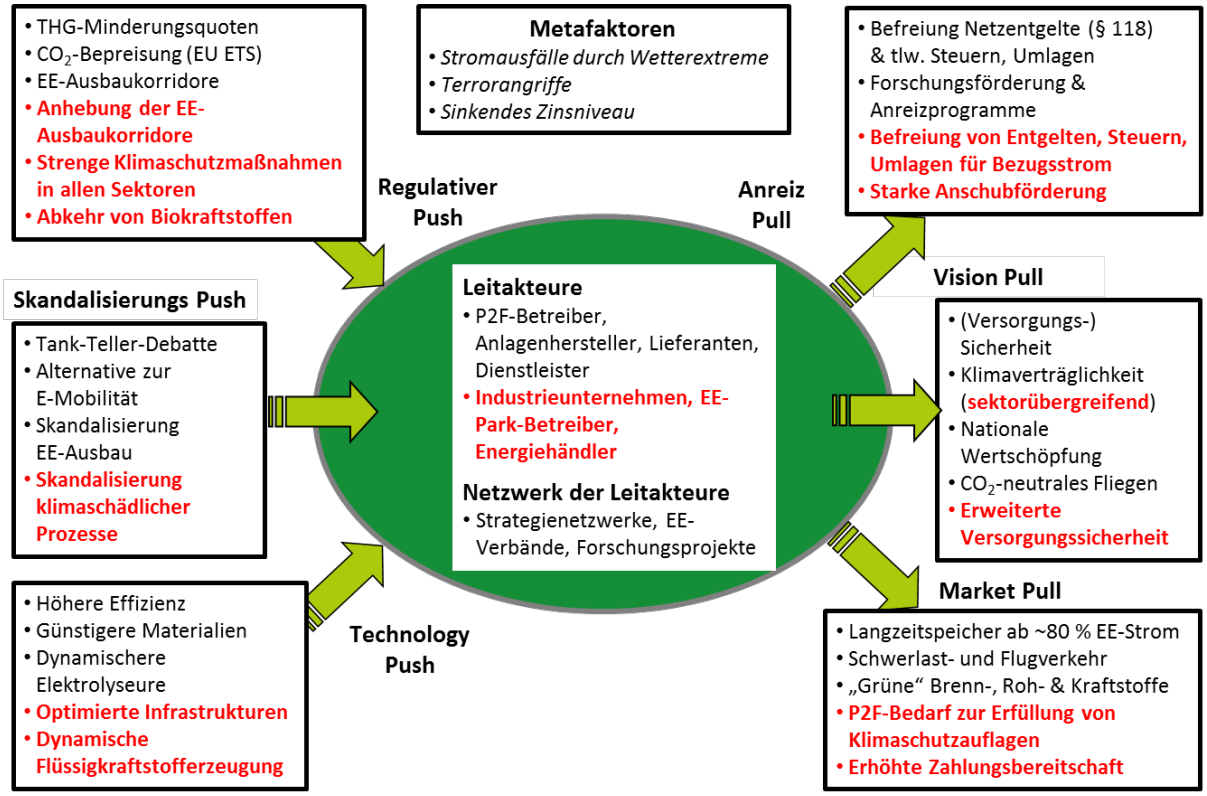


Abbildung 6.83: Weiterentwickelte Einflussfaktoren für einen Markteintritt von P2F.

Die beiden entwickelten Schildkrötenmodelle lassen sich schließlich mit dem Multi-Level-Ansatz gemäß Kapitel 4.3 vereinen und können damit den zeitlich undefinierten Phasen des Transformationsprozesses zugeordnet werden. An der Schwelle zwischen Phase 1 und Phase 2 befindet sich das gegenwärtige P2F-System, beschrieben durch die Schildkröte in Abbildung 6.76 (1. Schildkröte). Die zweite Schildkröte mit zukünftig benötigten Einflussfaktoren bewegt sich aus Phase 2 langsam in die dritte Phase der Energiesystemtransformation und „läuft“ in Richtung eines resilienten Energiesystems. Sollten die oben beschriebenen Maßnahmen nicht umgesetzt werden, ist es wahrscheinlich, dass P2F in seiner gegenwärtigen Nischenposition verbleibt und somit keinen Beitrag zur Klimaneutralität des Mobilitätsbereichs und zur Resilienz des gesamten Energiesystems liefern kann. Der in Abbildung 6.84 indizierte Weg der Schildkröte aus der Nische in den Markt kehrt sich somit um.

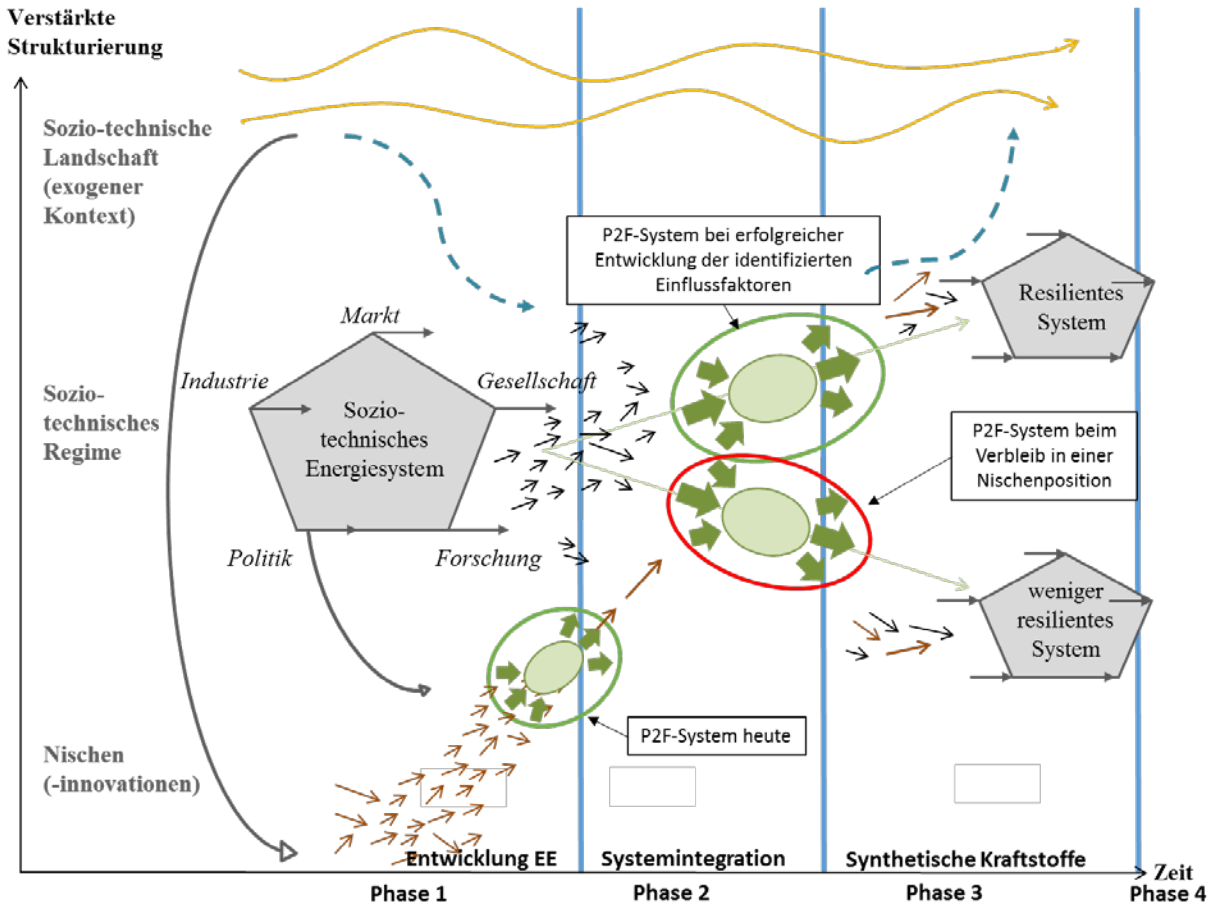


Abbildung 6.84: Zeitliche Perspektive der P2F-Schildkröten. Mithilfe der ermittelten Einflussfaktoren kann P2F voraussichtlich der Schritt aus der Nische gelingen und somit zu einem resilienteren und nahezu klimaneutralen Energiesystem beitragen.

6.5.2.6 Zusammenfassung

Neben technischen und ökonomischen Kennzahlen ist für ein fundiertes Systemverständnis eine ausführliche Akteursanalyse von Nöten. In diesem Kapitel wurden relevante Einflussfaktoren, die sich auf die Systeminnovation P2F auswirken (könnten), zunächst identifiziert und mit dem Schildkrötenmodell der richtungsgebenden Einflussfaktoren miteinander in Beziehung gesetzt. Eine wichtige Erkenntnis dieses Kapitels ist, dass die (Weiter-)Entwicklung von P2F durch den Vision Pull, allen voran durch die Vision einer rundum klimaneutralen Energieversorgung, getrieben wird und wirtschaftliche Aspekte zumindest zunächst im Hintergrund stehen. Denn P2F ist derzeit alles andere als wirtschaftlich lukrativ. Die Nachfrage nach P2F entsteht zunächst durch den Staat, der die Energiewende steuert und P2F durch regulatorische Eingriffe (*Regulativer Push* und *Anreiz Pull*) fördert, bis sich ein eigenständiger Markt entwickeln kann. Die Entscheidungen des Staates und somit auch seine „Nachfrage“ werden durch die Weiterentwicklung der Technologie, den Druck zivilgesellschaftlicher Akteure, die Notwendigkeit der Erhaltung der Versorgungssicherheit im Zusammenhang mit der Energiewende sowie durch Wirtschaftsinteressen beeinflusst. Eine Analyse externer Studien hat gezeigt, dass für die Einhaltung der Klimaschutzziele viel ambitioniertere energiepolitische Ziele abgesteckt werden müssen, als dies derzeit der Fall ist. P2F wird im zukünftigen Energiesystem eine entscheidende Rolle spielen und spätestens

Mitte der 2020er Jahre im größeren Maßstab integriert werden müssen. Um dies zu erreichen bedarf es einerseits einer höheren Förderung, andererseits regulatorischer Signale für Industrieunternehmen zur Senkung ihrer THG-Emissionen. Nicht zuletzt müssen die festgelegten Ausbaukorridore für EE-Anlagen korrigiert und deutlich angehoben werden. In einem zweiten Ansatz wurden zukünftig nötige Einflussfaktoren mit dem Schildkrötenmodell dargestellt. Die zwei Schildkrötenmodelle wurden schließlich mit dem Multi-Level-Ansatz auf einer durch Phasen gekennzeichneten Zeitskala positioniert.

6.5.3 Entwicklung, Aufbau und Ergebnisse des agentenbasierten Modells zur Identifizierung ökonomischer Pfade für Power-to-Fuel

6.5.3.1 Verlauf der Modellentwicklung

In Kooperation mit der Technischen Universität Delft und der Universität Groningen wurde im Projekt Resystra ein agentenbasiertes Modell entwickelt. Zunächst wurde ein Workshop unter Beteiligung der Projektmitarbeiter, der Unterauftragnehmer sowie Professoren und Wissenschaftlichen Mitarbeitern der Fachbereiche Produktionstechnik/ Verfahrenstechnik und Biologie/ Chemie der Universität Bremen aus dem Bereich der Katalysatoren-Forschung ausgerichtet. Zur Präzisierung der zentralen Fragestellung des zu entwickelnden Modells wurden die Teilnehmer in interaktiven Sessions befragt,

(1) welches ihrer Meinung nach die derzeit dringlichsten Themen bezüglich der Systeminnovation Power-to-Fuel sind, die mit dem Simulationsmodell adressiert werden sollten.

(2) Wie ihrer Meinung nach ein resilientes und nachhaltiges Energiesystem aussehen sollte.

(3) Warum der Weg zu diesem Zielsystem ihrer Meinung besonders schwierig sei.

(4) Welchen Akteuren, Technologien und Rahmenbedingungen eine besondere Rolle zukommen wird, wenn das Zielsystem erreicht werden soll.

Die Ergebnisse wurden in einer Mindmap festgehalten (siehe Anhang Mindmap). Neben der Frage inwiefern P2F einen Beitrag zur Resilienzsteigerung des Energiesystems leisten kann, wurden vor allem Fragen nach Möglichkeiten für eine Integration von synthetischen, strombasierten Kraftstoffen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten gestellt. Aus der Vielzahl an Fragestellungen wurde nach einer Evaluierung der Erkenntnisse aus dem Workshop die Ausrichtung des Modells auf die Frage

„Wie kann Power-to-Fuel aus der Nische in die Energiemärkte geführt werden?“

festgelegt.

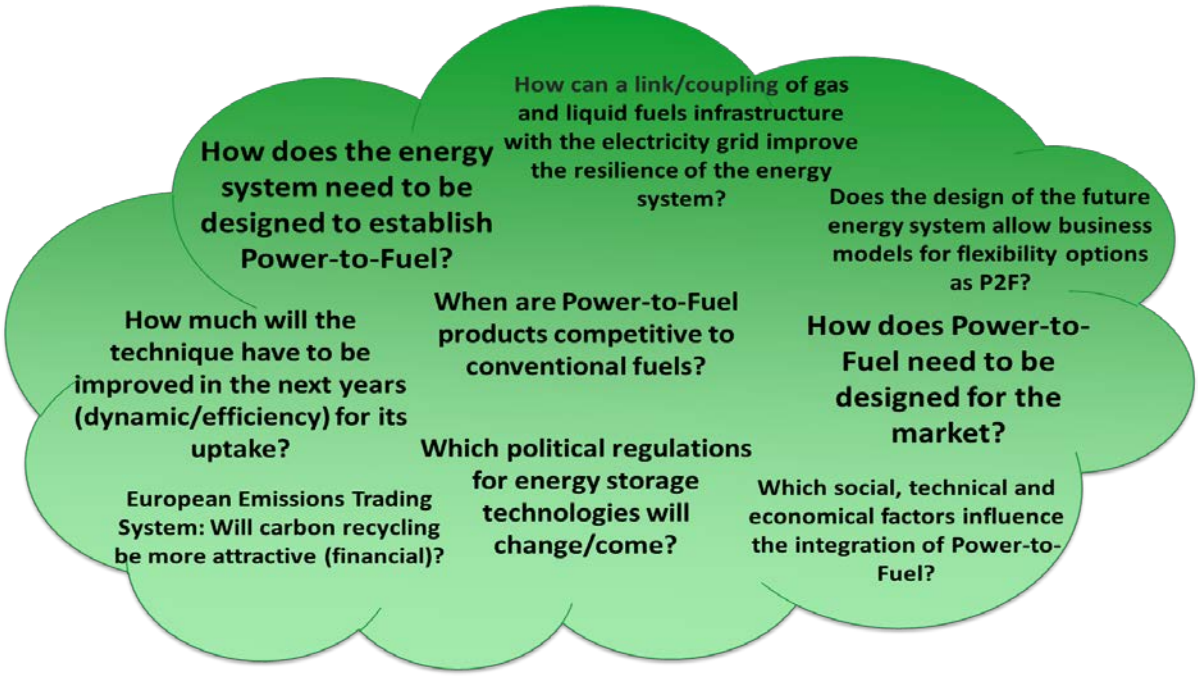


Abbildung 6.85: Fragestellungen, die auf dem ersten Workshop entwickelt und diskutiert wurden.

Die Frage nach einem Beitrag von P2F zur Resilienz lässt sich nicht entsprechend formalisieren und ist deshalb für Simulationen wenig geeignet. Sie wird in späteren Arbeitspaketen (Kapitel 6.5.5) adressiert. Es wurde deshalb zunächst als Grundvoraussetzung für das Modell angenommen, dass P2F zu einer nachhaltigen und resilienten Energieversorgung beiträgt und eine Integration dieser Systeminnovation aus diesem Grunde aus energiepolitischer Sicht gewünscht wird. Es ging deshalb ausschließlich um die Identifizierung von Rahmenbedingungen, die eine Marktintegration ermöglichen. Weitere Erkenntnisse aus den Simulationen mit Hilfe d des Modells betreffen die Tiefe der Integration von P2F in Form von installierter Kapazität unter den im Modell spezifizierten Rahmenbedingungen. Diese Ergebnisse lassen auch eine Analyse des möglichen Beitrags zur Resilienz des Energiesystems während des Transformationsprozesses zu.

Bei der ersten Skizze des Modellkonzeptes wurde zunächst ein Fokus auf den Beitrag zur Stabilität des Stromnetzes als Kernsystemleistung von P2F gelegt und neben P2F-Betreibern auch Netzbetreiber als Agenten erachtet, denen Geschäftsmodelle zugewiesen werden sollten. Als konkurrierende Technologien wurden deshalb Batteriespeicher für den Ausgleich von Erzeugung und Bedarf in das Konzept implementiert. Entlang eines Optimierungsprozesses der Modellkonzeptionierung wurden später grundlegende Änderungen vorgenommen, da der Beitrag von P2F zur Netzstabilität in den Hintergrund rückte. Für die Netzstabilität erschienen andere Flexibilitätsoptionen als geeigneter. Zudem haben Netzbetreiber wenig direkten Einfluss auf die Entwicklung von P2F-Konzepten. Ein neuer Fokus wurde auf den Bedarf an P2F-Produkten durch verschiedene Kundengruppen gelegt, die nun als Agenten implementiert wurden. Als mögliche Produkte wurden Wasserstoff, Methan und Flüssigkraftstoffe hinzugefügt, die vereinfacht nicht weiter in Fraktionen wie Benzin, Diesel und Kerosin unterteilt wurden. Von einer räumlichen Verteilung,

durch die bspw. vor- und nachteilige Standorte der Agenten differenziert betrachtet werden könnten, wurde aufgrund der schwierigen Datenlage abgesehen. Zudem könnte eine räumliche Aufteilung mit unterschiedlichen Standortbedingungen die aus veränderten politischen Rahmenbedingungen resultierenden Ergebnisse eventuell verzerren. Insbesondere für die Modellfrage, wie P2F in die Märkte integriert werden kann, spielen Standorteigenschaften, die sich auf die Konkurrenzfähigkeit eines P2F-Betreibers gegenüber eines anderen P2F-Betreibers auswirken, keine besondere Rolle. Es kann vielmehr davon ausgegangen werden, dass vor allem in der frühen Integrationsphase strategisch sinnvolle Standorte von den Betreibern selbst gewählt werden.

Aufbauend auf diesem Entwicklungsstand wurde ein zweiter Workshop ausgerichtet, diesmal mit relevanten Stakeholdern aus dem P2F-Umfeld (siehe Protokoll Stakeholder-Workshop, Kapitel 10.3 im Anhang). Ziel des Workshops war es, einerseits Feedback zur gegenwärtigen Ausrichtung des Modells durch die Akteure und andererseits Informationen zum Akteursverhalten, insbesondere von P2F-Betreibern, zu erlangen. Neben Entwicklern und Betreibern von Anlagen waren zudem Firmen anwesend, die als potentielle Kunden von P2F-Produkten angesehen werden. Die Teilnehmerrunde wurde außerdem durch einen bewusst interdisziplinären Kreis an Wissenschaftlern abgerundet. Anwesend waren Experten folgender Firmen und Institutionen:

- Audi AG
- Bertrand AG
- dena GmbH
- Entwicklungsagentur Region Heide AöR
- EnviTec Biogas AG
- Fraunhofer IFAM
- Fraunhofer IWES
- Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität – Recht, Ökonomie und Politik e.V.
- Institut für ökologische Wirtschaftsforschung GmbH
- MicrobEnergy GmbH/ Viessmann Group
- Projektträger DLR
- Projektträger Jülich
- Reederei AG EMS
- RWTH Aachen
- SGS Germany GmbH
- Sparkasse Bremen AG
- sunfire GmbH
- Technische Universität Delft
- Technische Universität Eindhoven

- Universität Bremen
- Universität Groningen
- wpd Onshore GmbH & Co. KG
- Wuppertal Institut GmbH

Gegenstand der Diskussion waren zum einen die Erfahrungen der Stakeholder mit ihren in Betrieb genommenen Pilotanlagen bezüglich der eingesetzten Technologien und der Prozessführung. Es konnte festgehalten werden, dass P2F von der technischen Seite her für einen Markteintritt bereit ist. Es wurden Optionen für eine Bereitstellung von Brenn-, Roh- und Kraftstoffen sowie für eine systemdienliche Betriebsführung als Stabilitätsoption für Stromnetze diskutiert. Bezüglich Produktqualität, Prozessdynamik und -sicherheit konnten alle Akteure technologieunabhängig von äußerst positiven Erfahrungen berichten. Zum anderen wurde über wirtschaftliche Themen und aktuelle Hürden bei der Umsetzung von P2F-Projekten diskutiert, denen hauptsächlich ungünstige gesetzliche Rahmenbedingungen zugrunde liegen, wodurch eine Entwicklung von Geschäftsmodellen derzeit nahezu unmöglich sei.

Die Ergebnisse des Workshops waren ausgesprochen hilfreich für die Fortentwicklung des agentenbasierten Modells. Insbesondere Auskünfte bezüglich der Motivation für die getroffenen Investitionsentscheidungen durch die Betreiber waren wichtig und konnten für eine Differenzierung der Betreiber-Agenten im Modell genutzt werden. Eine weitere relevante Information betraf den Umstand, dass P2F-Anlagen derzeit zwar mit hohen Investitionskosten verbunden sind, letztere sich durch eine erfolgreiche Marktintegration voraussichtlich aber deutlich reduzieren lassen. Die derzeit realisierten Pilotprojekte sind bisher stark von Fördergeldern abhängig, diesbezüglich sei in den kommenden Jahren nicht mit einer Änderung zu rechnen. Ein wichtiger Punkt, der einhellig von den anwesenden Akteuren beanstandet wurde, war die Gesetzgebung für P2F-Betreiber, die einen wirtschaftlichen Betrieb in noch weitere Ferne rücken ließ. Nicht zuletzt wurden Informationen über mögliche Kundengruppen gesammelt, für die sich jeweils spezifische Dynamiken, Auflagen und Voraussetzungen im Rahmen der Energiewende ergeben, ebenfalls vor allem stark abhängig von der energie- und klimapolitischen Gesetzgebung. Auf Basis dieser wichtigen Erkenntnisse aus dem direkten Dialog mit den betroffenen Akteuren wurde die Skizzierung des Modellaufbaus gemäß Abbildung 6.86 final angepasst, mit einem Fokus auf Akteursverhalten mit Blick auf die Entwicklung der P2F-Kapazität unter spezifischen Rahmenbedingungen und eine Variation der Fördersummen in der frühen Entwicklungsphase.

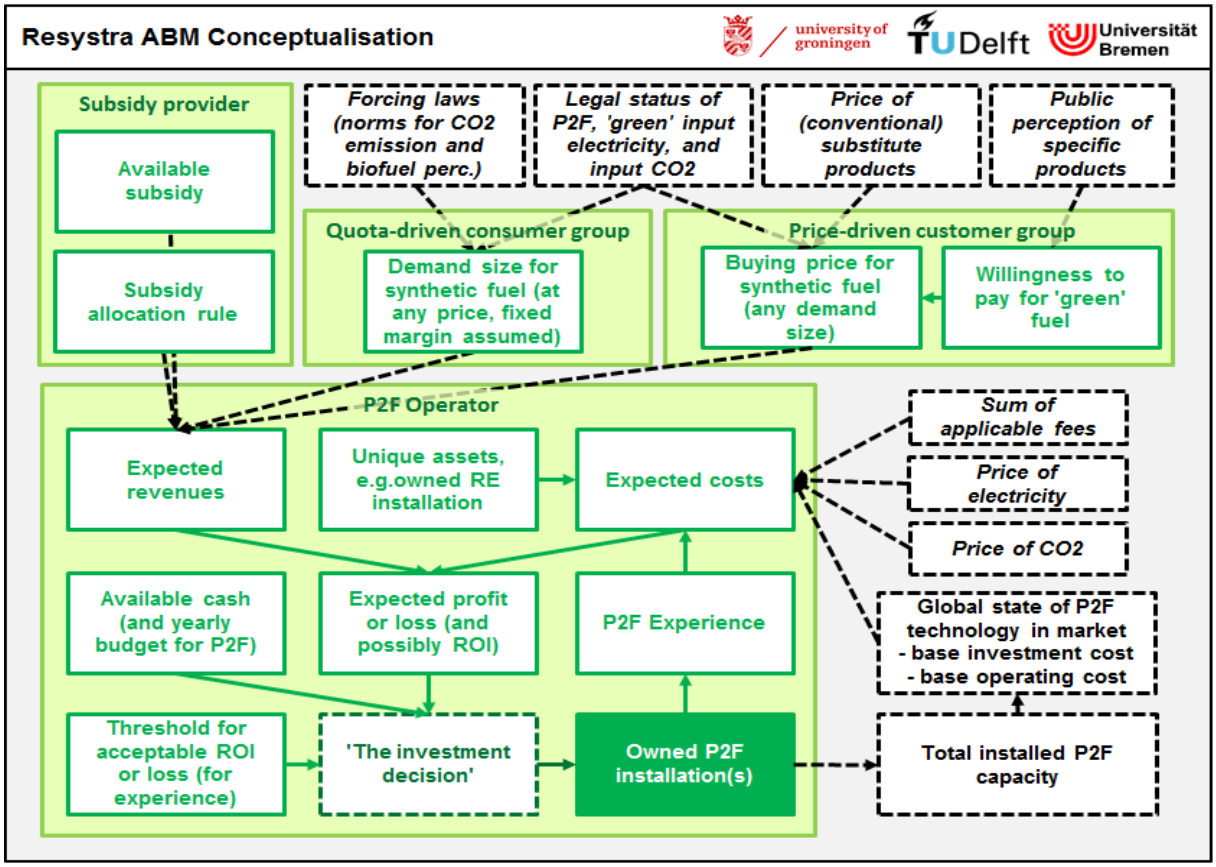


Abbildung 6.86: Konzeptuelles Diagramm zum finalen Modellentwurf.

6.5.3.2 Modellbeschreibung

Aufbauend auf dem Verständnis des sozio-technischen Systems, welches in den vorherigen Kapiteln 6.5.1 Systembeschreibung Power-to-Fuel und 6.5.2 Richtungsgebende Einflussfaktoren „Schildkröte“ und Transformationspfade „Szenarien“ erlangt wurde, sowie dem Entwicklungsverlauf der Modellausrichtung aus dem vorherigen Abschnitt 6.5.2.3 konnte gemäß der in Kapitel 5.7 dargestellten Methodik ein agentenbasiertes Modell erarbeitet werden.

Auf dem Kenntnisstand basierend, dass das P2F-Konzept bisher nur im größeren Forschungsmaßstab realisiert werden kann, wurde das agentenbasierte Modell gemäß Abbildung 6.87 schematisiert und nachfolgender Fragestellung ausgerichtet:

Welche sozialen, technischen und ökonomischen Faktoren bestimmen Erfolg und Umfang der Integration von P2F in das Energiesystem?

Mit dem Modell wird explizit geprüft, welche Rahmenbedingungen für einen rentablen Betrieb von P2F-Anlagen nötig sind und welche Rolle Subventions- und Investitionsvolumina spielen. Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Modellparameter befindet sich im Anhang in der ODD-Beschreibung (Overview, Design concepts and Details).

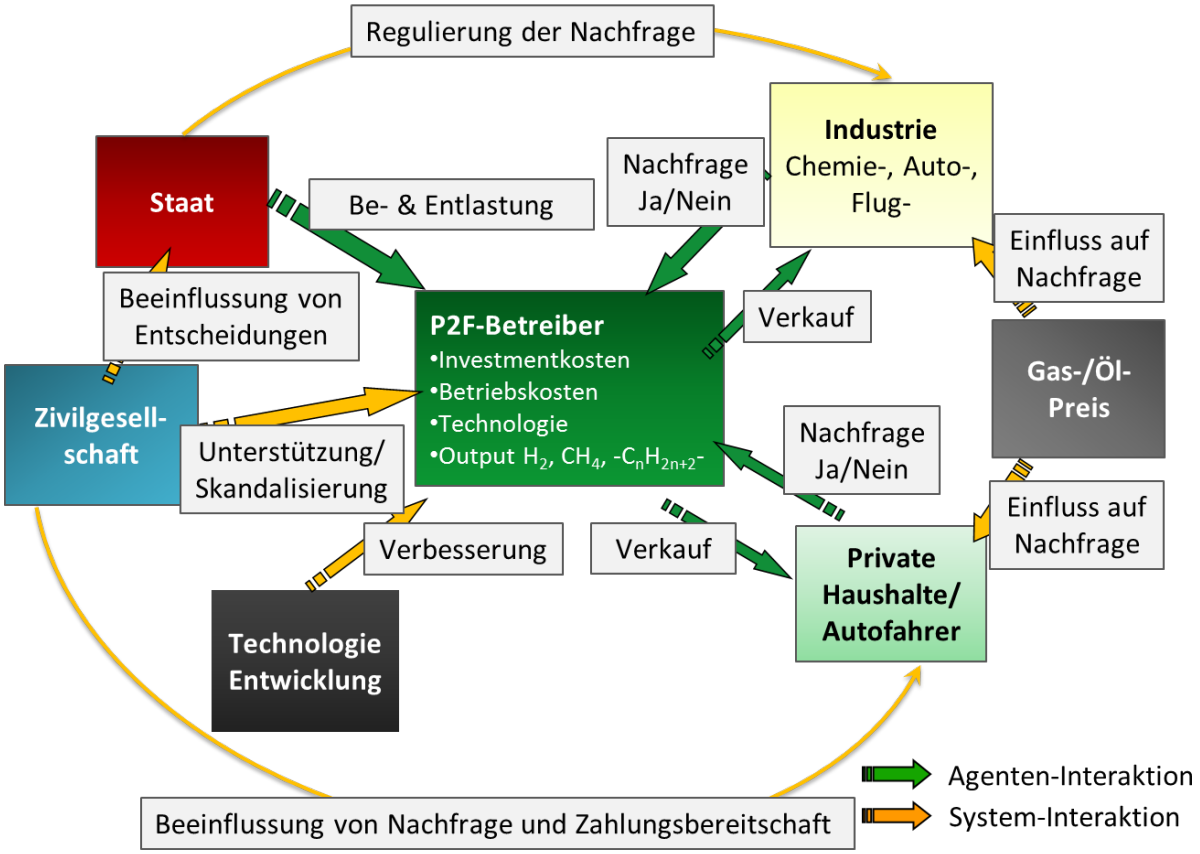


Abbildung 6.87: Schematischer Aufbau des agentenbasierten Modells, angelehnt an die Systemstruktur des Schildkrötenmodells der richtungsgebenden Einflussfaktoren. Grüne Pfeile indizieren Interaktionen zwischen Agenten, orange Pfeile auf Systemebene gesteuerte Einflüsse.

Basierend auf dem Modell-Schema ist ein deterministisches Modell entwickelt worden, mit dem Wege identifiziert werden können, auf denen P2F aus kleinen Nischenanwendungen heraus hin zu einer ökonomischen Integration in den Markt geführt werden kann. Kraftstoffmärkte, variable Marktbedingungen, zivilgesellschaftliche Einflüsse, Subventionsmechanismen und weitere derzeit diskutierte politische Handlungselemente sind dabei wesentliche Bestandteile der Modellumgebung. Als aktive Agenten sind P2F-Betreiber, deren Kunden und staatliche und unternehmerische Förderer abgebildet (vgl. Abbildung 6.86). Jeder Agent repräsentiert dabei eine Gruppe von Akteuren, denen gleiche Handlungsinteressen zugeordnet werden, und welche somit als Individuen agieren. Als passive „Objekte“ beinhaltet sind die drei verschiedenen Technologie-Klassen

- Power-to-Hydrogen ($P2H_2$)
- Power-to-Methane (P2M) und
- Power-to-Liquid (P2L)

sowie deren fortschrittsbedingte technische Eigenschaften, mögliche Geschäftsmodelle für die entsprechenden Märkte, Akzeptanzaspekte und P2F-Anlagen (vgl. Abbildung 6.88).

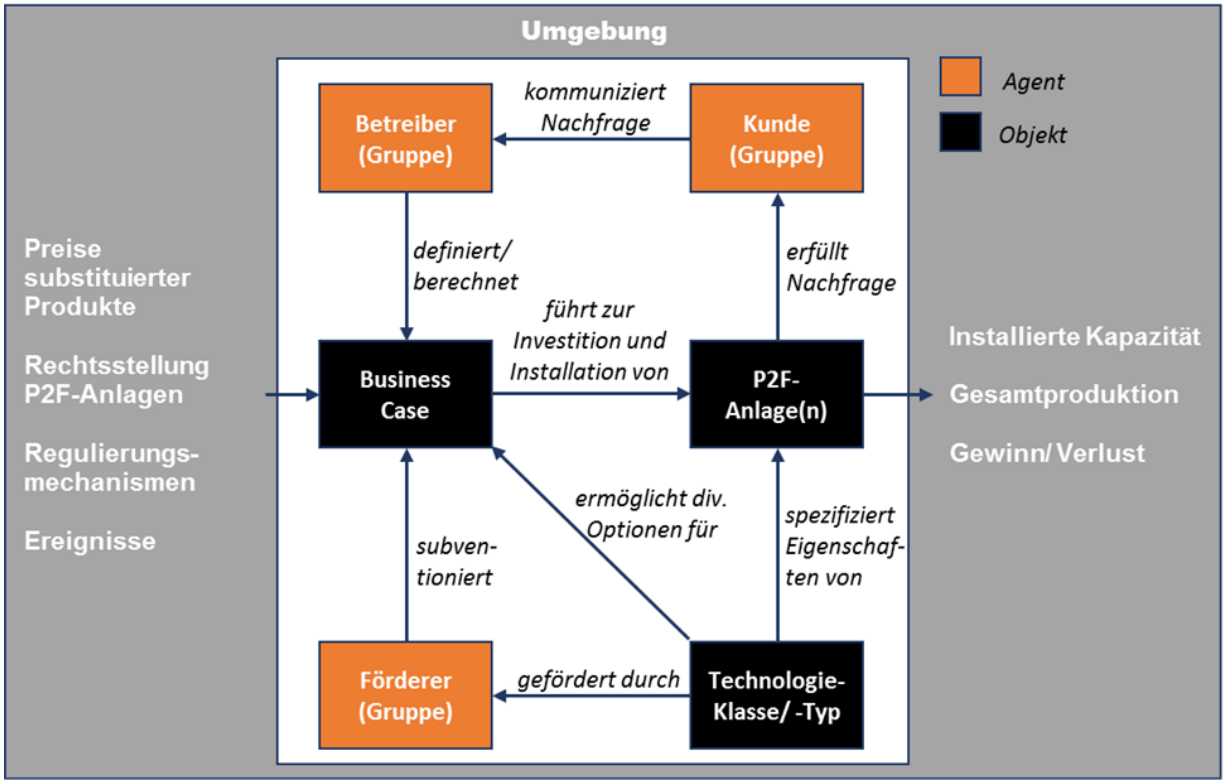


Abbildung 6.88: Übersicht über die im Modell abgebildeten aktiven Akteursgruppen (Agenten) und passiven Systemelemente (Objekte).

Alle drei Agenten agieren derart, dass sie ihre implizierten Ziele erreichen können. Kunden versuchen in Bezug zur erweiterten *Rational Choice Theory*[99], ihre Nachfrage nach Kraft- und Brennstoffen so günstig wie möglich zu decken, können aber auch eine erhöhte Zahlungsbereitschaft aufweisen, wenn sich durch den Erwerb von P2F-Produkten ein Vorteil für sie ergibt (z.B. explizite Nachfrage nach grünen Produkten oder Erfüllung von CO_2-Minderungsquoten). P2F-Anlagenbetreiber haben das Ziel, neue Anlagen zu installieren und diese rentabel zu betreiben oder zumindest eine gewisse Verlustschwelle nicht zu überschreiten. Ihre Handlungen sind wie auch bei den Kunden nicht immer zwangsläufig rational. Förderer haben das Ziel, mit den ihnen zur Verfügung stehenden Mitteln für die jeweils geförderte Technologie-Klasse die installierte Kapazität an P2F-Anlagen zu maximieren.

Das Modell wurde für 20 Jahre Simulationslaufzeit ausgelegt, in der das System in jährlichen Schritten entlang einer Zeitschiene observiert werden kann. Prinzipiell folgt die Laufzeit des Modells allerdings vor allem der Logik, dass auf den Zeitraum fokussiert wird, an dem P2F der Schritt aus der Nische in den Markt gelingt. Innerhalb dieser „Entwicklungsphase“ spielen hoch komplexe Marktdynamiken wie beispielsweise Preisbildungsmechanismen und Anbieterwechsel von Kunden eine nur untergeordnete Rolle. Sobald P2F am Markt jedoch soweit etabliert ist, dass die grünen Kraftstoffe preislich auch ohne CO_2-Minderungsquoten und Förderung mit den fossilen Energieträgern konkurrieren können, muss diesen Dynamiken eine höhere Bedeutung als in der

[99] Vgl. Kapitel 4 zum Verhalten von Akteuren

gegenwärtigen Modellversion zukommen. Das Ziel des Modells, aufzuzeigen unter welchen Bedingungen P2F der Schritt in die Energiemärkte gelingen kann, ist an dieser Stelle bereits erreicht.

Für eine Beschreibung der Zusammenhänge im Modell werden im Folgenden zunächst die implementierten Agenten und Objekte klassifiziert:

Wer sind die Betreiber, und welche Interessen und Aktionen werden ihnen zugeschrieben?

In jährlichen Schritten (= 1 Tick) scannen potentielle Betreiber von P2F-Anlagen den Markt nach verfügbaren Technologien und entscheiden sich je nach ihrer zugewiesenen Kundenzielgruppe vorab für eines der Endprodukte $P2H_2$, P2M oder P2L. An dieser Stelle muss zunächst differenziert werden, ob die Betreiber in der Herstellung zwischen den Endprodukten frei wählen können. Dies hängt vom Ziel der Investition ab. Eine Raffinerie könnte beispielsweise Interesse haben, in einen Elektrolyseur zur Herstellung von grünem Wasserstoff zu investieren, wohl aber kaum in eine Methanisierungseinheit. Ein potentieller Betreiber von chemischen Stromspeichern hätte wiederum kein Interesse an der Herstellung von Flüssigkraftstoffen, da Wasserstoff und Methan von der Produktion bis zur Rückverstromung für diesen Zweck deutlich effizienter und ökonomischer sind. Als mögliche P2F-Anlagenbetreiber wurden folgende Gruppierungen mit jeweils eigenen Interessen und spezifiziertem Investitionsverhalten im Modell implementiert:

- Progressive und konservative Fahrzeughersteller (Eigenbedarf)
- Progressive und konservative Industrieunternehmen (Eigenbedarf)
- Strategische P2F Investoren
- Windpark-Besitzer
- Strom- und Gasanbieter
- Raffinerien (Eigenbedarf)
- Flugzeughersteller und Airlines (Eigenbedarf)

Diese Agenten werden mit einem Startkapital ausgestattet und haben unterschiedliche Investitionsansprüche gemäß der erweiterten *Rational Choice Theory*. Differenziert wird hier, ob die Betreiber sich beispielsweise für eine rein spekulative / strategische Investition entscheiden und – in gewissem Maße – bereit sind, Verlustgeschäfte in Kauf zu nehmen (nicht rein ökonomisch rationales Verhalten). Hinter einer solchen Bereitschaft für Verlustgeschäfte steht mitunter die Strategie, sich durch das früh erworbene Know-How auf lange Sicht einen Marktvorteil zu erarbeiten (early adopters). Andererseits mag die P2F-Anlage an sich zwar nicht rentabel zu betreiben, die Kostenersparnis durch nicht emittierte THG-Emissionen aber größer sein, als gegebenenfalls zu zahlende Strafzahlungen für die emittierten THG-Mengen. Darüber hinaus gibt es natürlich auch jene Betreiber und Investoren, die ihr eingesetztes Kapital nach einem festgesetzten Zeitraum zurück erwirtschaften möchten (Return on Investment) und dementsprechend ein viel konservativeres Investitionsverhalten aufweisen.

Die Modellwelt ist transparent gestaltet, so dass alle Agenten, egal ob Betreiber, Kunde oder Förderer, für den aktuellen Zustand des Systems über alle Informationen zu den verfügbaren Technologien sowie den Preisen für konventionelle Produkte und die Substitute durch P2F verfügen. Wie in der Realität können sie jedoch nicht informativ in die Zukunft blicken, d.h. ihre Handlungen und Erwartungen über die Entwicklung der Märkte basieren immer auf dem Wissensstand des aktuell simulierten Jahres.

Prinzipiell investiert ein Betreiber im Modell, wenn

1. die Investitionskosten gedeckt sind, d.h. das Startkapital und erworbene Subventionen größer als die Investitionskosten sind.
2. die Betriebskosten (auch Verlustgeschäfte) eine definierte jährliche Summe nicht überschreiten, d.h. dass der jährliche Gewinn und das zur Verfügung stehende Budget für den Betrieb der Anlage größer sein müssen als die Betriebskosten pro Jahr.
3. bei Investitionsanspruch ‚Return on Investment' das Kapital innerhalb der vorgegebenen Laufzeit zurück erwirtschaftet wird, d.h. der Gesamtgewinn und die erworbenen Zuschüsse größer als die Investitions- und Betriebskosten in diesem Zeitraum sind.

Die Betriebskosten werden im Modell in fixe und variable Betriebskosten unterteilt. Zu den fixen Betriebskosten werden sämtliche Kosten gerechnet, die, abgesehen vom Strom- und CO_2-Bezug, für den Betrieb der Anlagen anfallen. Dazu gehören beispielsweise Personalkosten, Wartungskosten für die Anlagen, Abschreibungen etc. Sie werden gemäß Experteneinschätzungen in der Höhe zwischen 2-4%a^{-1} der Investitionskosten gerechnet (vgl. Systembeschreibung unter 6.5.1.6; Sterner, Thema, Eckert, Lenck, Götz, P.(2015): Bedeutung und Notwendigkeit von Windgas für die Energiewende in Deutschland, Forschungsstelle Energienetze und Energiespeicher (FENES) OTH Regensburg, Energy Brainpool, Studie im Auftrag von Greenpeace Energy, Regensburg/Hamburg/Berlin 2015; Fasihi et al. 2016a). P2F-Betreibern wird im Modell eine Lernkurve zugeordnet. Durch den Betrieb der bereits installierten Anlagen lernt der Betreiber hinzu und kann seine fixen Betriebskosten für neu installierte Anlagen durch das erworbene Know-How reduzieren.

Die variablen Betriebskosten setzen sich aus den Ausgaben für die Betriebsmittel Strom und Kohlenstoff (nur bei P2M und P2L) zusammen, deren Preise innerhalb der Modelllaufzeit variieren können. Insbesondere die Strombezugskosten stellen eine der wichtigsten Einflussgrößen auf die Rentabilität von P2F-Anlagen dar. Die Entwicklung des Börsenstrompreises ist für die nächsten Jahre oder gar Jahrzehnte nicht prognostizierbar. Er wird maßgeblich von der Entwicklung der Weltmärkte für Kohle, Gas und Öl sowie regulatorischen Eingriffen in diese Märkte, vom Ausbau der erneuerbaren Energien und nicht zuletzt von der Entwicklung des zukünftigen Strommarktdesigns beeinflusst werden. Im Modell werden deshalb Szenarien mit durchschnittlichen Strompreisen zuzüglich Abgaben durchgespielt, welche an eine Betriebsrate der P2F-Anlagen

gekoppelt sind. So können beispielsweise Annahmen getroffen werden, dass eine P2F-Anlage 3.000 Stunden im Jahr mit einem durchschnittlichen Strompreis von *x* €MWh^{-1} betrieben werden kann.

Vor dem Hintergrund, dass in der Modelllogik große Mengen an Kraft-, Brenn- und Rohstoffen hergestellt werden sollen, wird davon ausgegangen, dass die P2F-Anlagen mit dem Stromnetz verbunden sind und den erneuerbaren Strom bilanziell beziehen. Grundsätzlich ist es jedoch auch innerhalb des Modells möglich, die Anlagen direkt mit EE-Stromerzeugern zu koppeln, wodurch sich jedoch nur geringe Betriebsstunden ergeben (vgl. Diskussion in Kapitel 6.5.4.4.1). Vorausgesetzt, dass sowohl die Erzeugungsanlage als auch die P2F-Anlage vollständig vom öffentlichen Stromnetz entkoppelt sind, entfallen auf diesen Strom keine zu zahlenden Abgaben. Unter dieser Voraussetzung müsste allerdings eine geeignete Dimensionierung der P2F-Anlage gefunden werden, damit die Anlage einerseits auf mehr als für Onshore-Windkraftanlagen typische 2.000 Volllaststunden kommen kann und andererseits die Windkraftanlage nur selten abgeregelt werden muss.

Zusammengefasst verfolgen Betreiber-Agenten das Ziel so viele P2F-Anlagen wie möglich zu installieren und zu betreiben, ohne dabei inakzeptable Verlustgeschäfte zu machen. Für den Bau und den Betrieb der Anlagen stehen ihnen ein zugewiesenes Kapital und gegebenenfalls erworbene Fördergelder zur Verfügung. Zusätzlich sind sie auf den Bedarf ihrer Kunden angewiesen. Betreiber, deren Geschäftsmodell nur in kleinen Nischenmärkten funktioniert, könnten gegebenenfalls bereits mit einer einzelnen P2F-Anlage den kompletten Bedarf ihrer Kunden decken, so dass trotz vorhandenen Kapitals keine weiteren Anlagen mehr gebaut würden.

Wer sind die Kunden und was machen sie?

Kunden-Agenten werden im Modell nach einer preisbedingten und quotenbedingten Nachfrage unterschieden. Alle Kunden haben eine generelle, jedoch abhängig vom jeweiligen Markt preislich differenzierte Nachfrage nach Erdgas, Flüssigkraftstoffen und/ oder Wasserstoff und werden dementsprechend in Gruppen geclustert. Diesen Kundengruppen werden gemäß Tabelle 6.76 ein Nachfragevolumen und ein Preisniveau basierend auf aktuellen Daten für den jeweiligen Markt, an dem sie teilnehmen, zugeordnet.

Tabelle 6.76: Nachfragevolumen und Preise für fossile Energieträger und Biokraftstoffe im Basisjahr 2015 (BMWi 2015; DWV 2015; BNA 2016; MWV 2015; UFOP 2015).

Energieträger	Bedarf in TWha^{-1}	Energieträger	Preis in € kWh^{-1}
Gas Haushalte	289	Gas	
Gas Industrie	225	*Private Haushalte*	0.072
Gas Verkehr	2.47	*Industrie*	0.036
Wasserstoff Industrie	60		
Wasserstoff Verkehr	0.025[100]	Öl	0.073
Öl Industrie	36		
Öl Verkehr	681	Biokraftstoffe	
Öl Haushalte	157	*Gas*	0.08
		Diesel	0.078
		Benzin	0.07
		Wasserstoff	
		Industrie	0.06[101]
		Mobilität	0.28[102]

Ähnlich wie im Strommarkt gibt es auch für P2F Kunden, die bereit sind für die grüne Eigenschaft des Produktes eine Prämie zu zahlen. Dies sind allen voran private Haushalte, die ein Interesse an einer „grünen“ Gasversorgung oder „grünem“ Kraftstoff haben und deren Verhalten auf einer nicht allein ökonomisch motivierten Preissensitivität beruht. Das Nachfragevolumen dieser Kundengruppen ist jedoch stark limitiert und bildet derzeit nur eine Nische.

Auf Seite der kommerziellen Nachfrage durch Industrieunternehmen hängt die Nachfrage stark von den regulatorischen Bedingungen ab. Unternehmen wirtschaften gewinnorientiert und fragen in der Regel die für sie günstigsten Produkte nach. Im Falle neuer Geschäftsmodelle, die sich durch die „grüne“ Qualität von P2F-Produkten ergeben, mag es auch hier eine erhöhte Zahlungsbereitschaft geben, dies jedoch ebenfalls lediglich in Nischen. Durch regulatorische Eingriffe in den Markt kann hingegen eine großflächige Nachfrage entstehen. Dies wären beispielsweise sehr hohe Preise für CO_2-Zertifikate oder Treibhausgasminderungsvorgaben für einzelne Branchen, wie sie im Verkehrssektor bereits durch die Treibhausgasminderungsquote und die EU-Verordnung zur Verringerung der durchschnittlichen PKW-Neuwagenflottenemissionen eingeführt wurden (vgl. EU Richtlinie 2009/28/EG; BMUB 2009).

Folgende Kundengruppen wurden im Modell implementiert:

- „Grüne Haushalte“

[100] Eigene Annahme basierend auf aktuellem Stand zugelassener Brennstoffzellen-Fahrzeuge. Angenommener Verbrauch auf 100 km ist 1 kg Wasserstoff. Bei 15.000 km Jahr^{-1} Laufleistung ergibt sich ein Gesamtbedarf von etwa 25 GWh a^{-1}.

[101] Eigene Berechnung der Kosten für Wasserstoffherstellung über Dampfreformierung bei einem Erdgaspreis von 3 ctkWh^{-1}

[102] Aktuelle Preisangabe vom Clean Energy Partnership (CEP)

- „Grüne Autofahrer“
- Wasserstoff-Mobilität
- „Grüne Unternehmen“
- Raffinerien
- Autoindustrie
- Industrieunternehmen
- Flugzeughersteller und Airlines

Zusammen mit den bereits genannten Betreibern ergibt sich für das Modell eine Betreiber- und Kundenmatrix, in der aufgestellt wird, wer für wen P2F-Produkte herstellen kann (vgl. Tabelle 6.77: Wesentliche Modellannahmen und Zuordnung der miteinander handelnden Betreiber- und Kundengruppen. Quantitative Angaben beziehen sich auf das Basisjahr 2015.). Im Falle der Autohersteller, Industrieunternehmen und Raffinerien wird davon ausgegangen, dass diese für ihren Eigenbedarf produzieren und das Ziel verfolgen, THG-Minderungsvorgaben zu erfüllen.

Generell gilt im Modell: P2F-Substitute werden von den Akteuren aufgrund ihrer „grünen Eigenschaft“ als hochwertiger eingeschätzt als die fossilen Produkte. Bei gleichen Marktpreisen würde sich ein Kunde also immer für das P2F-Substitut und gegen das fossile Produkt entscheiden. Derzeit sind die P2F-Produkte allerdings um ein Vielfaches teurer und stellen daher keine ernstzunehmende Konkurrenz gegenüber fossilen Energieträgern dar. Entsprechende Preisbildungsmechanismen und Marktdynamiken durch die Verdrängung von fossilen Kraftstoffen am Markt spielen daher, wie bereits oben beschrieben, in der Modelllaufzeit eine untergeordnete Rolle. Eine große Schwierigkeit in der Modellentwicklung bestand vielmehr darin, überhaupt eine Nachfrage nach P2F im Modell zu integrieren, denn diese ist bisher im Energiesystem praktisch nicht vorhanden. Durch die Zuordnung einer erhöhten Zahlungsbereitschaft von „grünen“ Haushalten, Autofahrern und Unternehmen sind zwar erste potentielle Nischenmärkte im Modell integriert, für eine weitreichende Marktdurchdringung sind diese Märkte jedoch viel zu klein. Für alle Kundengruppen, die keine erhöhte Zahlungsbereitschaft aufweisen, ergibt sich somit ausschließlich eine Nachfrage, wenn das P2F-Substitut entweder das Preisniveau fossiler Produkte erreicht, eine höhere technische Qualität oder Reinheit aufweist oder sich durch rechtliche Vorgaben neue Anreize ergeben.

Tabelle 6.77: Wesentliche Modellannahmen und Zuordnung der miteinander handelnden Betreiber- und Kundengruppen. Quantitative Angaben beziehen sich auf das Basisjahr 2015. enthält wesentliche Annahmen bezüglich der implementierten Agenten, Objekte und Umgebungsvariablen. Für die Akteursgruppen wurde festgelegt, in welche Technologien sie investieren, bzw. welche Produkte sie kaufen können. Das Kapital der Betreiber wurde in die Klassen „Klein“ (≤3 Mio. Euro), „Mittel“ (≤15 Mio. Euro) und „Groß“ (>15 Mio Euro) und die Investitionskriterien in „Strategisch“ (Bereitschaft zu Verlusten) und „Profitorientiert“ (Return on Investment) unterteilt. Der po-

tentielle Bedarf der Kundengruppen wurde in die Kategorien „Sehr Klein“ (≤2% der Gesamtnachfrage der Verbrauchergruppe), „Klein“ (≤6%), „Mittel“ (≤15%) und „Groß“ (>15%) unterteilt und nach Kaufanreiz unterschieden.

Tabelle 6.77: Wesentliche Modellannahmen und Zuordnung der miteinander handelnden Betreiber- und Kundengruppen. Quantitative Angaben beziehen sich auf das Basisjahr 2015.

Betreiber

Betreibergruppe	Kundenbasis	Technologie	Kapital	Investitions-kriterium
Progressive Fahrzeughersteller	Mobilität	Alle	Mittel	Strategisch
Konservative Fahrzeughersteller	Mobilität	Alle	Groß	Profitorientiert
Progressive Industrieunternehmen	Industrie	Alle	Mittel	Strategisch
Konservative Industrieunternehmen	Industrie	Alle	Groß	Profitorientiert
Unabhängige strategische Investoren	Alle	Alle	Mittel	Strategisch
Windparkbetreiber (groß)	Alle	Alle	Mittel	Profitorientiert
Windparkbetreiber (klein)	Alle	Alle	Klein	Profitorientiert
Raffinerien - Wasserstoff Investitionen	Raffinerien	$P2H_2$	Groß	Strategisch
Raffinerien - FT-Kraftstoff Investitionen	Raffinerien	P2L	Mittel	Strategisch
Progressive Gasanbieter	Haushalte	$P2H_2$/P2M	Mittel	Strategisch
Konservative Gasanbieter	Haushalte	$P2H_2$/P2M	Groß	Profitorientiert

Kunden

Kundengruppe	Substitut	Produkt	Potentieller Bedarf	Anreiz
"Grüne" Haushalte	Wasserstoff, Methan	Gas	Mittel	"Grüne Eigenschaft"
"Grüne" Haushalte Plus	Wasserstoff, Methan	Gas	Sehr Klein	"Grüne Eigenschaft"
"Grüne" Autofahrer	Methan, Flüssigkraftstoff	Flüssigkraftstoff	Klein	"Grüne Eigenschaft"
Wasserstoff Mobilität	Wasserstoff	"fossiler" Wasserstoff	Klein	"Grüne Eigenschaft"
"Grüne" Industrie Wasserstoff	Wasserstoff	"fossiler" Wasserstoff	Klein	"Grüne Eigenschaft"
"Grüne" Industrie Erdgas	Wasserstoff, Methan	Gas	Klein	"Grüne Eigenschaft"
"Grüne" Industrie Flüssigkraftstoff	Flüssigkraftstoff	Öl	Klein	"Grüne Eigenschaft"
Raffinerien - Wasserstoffbedarf	Wasserstoff	Biokraftstoff	Groß	Treibhausgasminderung
Raffinerien - Flüssigkraftstoffbedarf	Flüssigkraftstoff	Biokraftstoff	Groß	Treibhausgasminderung
Fahrzeugindustrie Gas	Methan	Biokraftstoff	Mittel	Treibhausgasminderung
Fahrzeugindustrie Flüssigkraftstoff	Flüssigkraftstoff	Biokraftstoff	Mittel	Treibhausgasminderung

Förderer

Förderergruppe	Produkt	Subventionen pro Jahr
Power-to-Hydrogen Förderer	Wasserstoff	3 Millionen Euro
Power-to-Methane Förderer	Methan	3 Millionen Euro
Power-to-Liquid Förderer	Flüssigkraftstoff	2 Millionen Euro

Technologie-Klassen

Technologie-Klasse	Investitionskosten	Wirkungsgrad	Vorab installierte Kapazität
Power-to-Hydrogen	1500 € kW^{-1}	65 %	12 MW
Power-to-Methane	3000 € kW^{-1}	55 %	8 MW
Power-to-Liquid	3500 € kW^{-1}	50 %	1 MW

Umgebung

Umgebungsvariable	Status	Wert
Fixe Betriebskosten in Prozent der Investition		4 %
Abgaben in Bezug auf Betreiberstatus	Endverbraucher:	0.1306 € kWh^{-1}
	Stromintensive Industrie:	0.0765 € kWh^{-1}
	Speicher:	0.0665 € kWh^{-1}
	Lokal produzierter Strom:	0.0254 € kWh^{-1}
Rechtliche Einstufung von Betreibern	Letztverbraucher	
EU ETS Zertifikatspreis		6.5 €/$t_{CO2Äq}$
Betriebsrate von erneuerbaren Stromerzeugungsanlagen		22%
Quote für Raffinerien		6%
Strompreis		0.02 € kWh^{-1}

Was macht der Staat?

Gemäß dem Schildkrötenmodell der richtungsgebenden Einflussfaktoren agiert der Staat im agentenbasierten Modell mit der Durchsetzung regulatorischer Maßnahmen (auf Systemebene gesteuert) und durch die Initiierung von Fördermechanismen (Agentenhandlung).

Staatliche Subventionen werden im Modell wie folgt verteilt:

In der Höhe variable Fördersummen werden jährlich jeweils für die Erzeugung der drei Endprodukte $P2H_2$, P2M und P2L zur Verfügung gestellt. Die Betreiber führen Business Case Kalkulationen durch und ermitteln für den Investitionszeitraum ihre insgesamt anfallenden Investitions-

und Betriebskosten sowie die erzielbaren Gewinne (und zum Teil die maximale Höhe an Verlusten, die sie bereit sind in Kauf zu nehmen). Aus dieser Berechnung ergibt sich die Höhe der von ihnen benötigten Subventionen. In jedem Modellzeitschritt wird zudem basierend auf den Modelldaten eine Nachfragekurve in Abhängigkeit vom Preis des jeweiligen P2F-Produktes für die drei Endprodukte erstellt. Für jeden möglichen Preis und das zugehörige Nachfragevolumen wird dann die benötigte Fördersumme berechnet, mit der der jeweilige Business Case erfüllt werden kann. Alle Business Cases werden schließlich nach dem Verhältnis der installierten Inputkapazität zu den benötigten Subventionen sortiert. Mit dem Ziel, die installierte Leistung der jeweiligen Technologieklasse zu maximieren, kann nun bestimmt werden, welche Betreiber mit dem vorhandenen Gesamtförderbudget strategisch optimal subventioniert werden. Dieser Motivation liegt zugrunde, dass die P2F-Technologie zur Erhöhung der EE-Anteile in allen Sektoren zwangsläufig benötigt wird und deren erfolgreiche Integration in das Energiesystem letztlich über Erfolg bzw. Misserfolg des Transformationsprozesses entscheidet (vgl. Fischedick et al. 2014a). Damit die Technologie bei höheren EE-Anteilen ausgereift zur Verfügung steht, soll sie schon heute durch Förderung in die Märkte integriert werden (vgl. Deutsche Energie-Agentur 2015a).

Neben der direkten Subventionierung werden vom Staat auch weitere Anreize gemäß des *Regulativen Pushs* und *Anreiz Pulls* geschaffen, die in der Modellausrichtung von zentraler Bedeutung sind (vgl. Kapitel 6.5.2):

<u>Status der Betreiber im Energiewirtschaftsgesetz (EnWG)</u>: P2F-Betreiber können im EnWG anstelle des derzeitigen Status als „Letztverbraucher“, verbunden mit der Zahlung der vollen EEG-Umlage, entweder als „stromintensives Unternehmen“ (verminderte EEG-Umlage) oder als „Speicher“ (keine EEG-Umlage) eingestuft werden (vgl. Tabelle 6.77 und Kapitel 6.5.1.7).

<u>Reformierung des EU-Emissionshandelssystem/ CO_2-Besteuerung</u>: Der derzeitige geringe Preis für CO_2-Zertifikate zeigt praktisch keinerlei Wirkung in Bezug auf Einsparungen von THG-Emissionen. Schon lange wird daher von verschiedenen Seiten empfohlen, den Preis für Emissionszertifikate wieder mindestens auf sein anfängliches Niveau von 25 € anzuheben. Langfristig, so sind sich Experten einig, sind wesentlich höhere Zahlungen für entsprechende Zertifikate nötig, damit im Sinne der eine Einhaltung der Klimaschutzziele starke Anreize für eine drastische Reduzierung der THG-Emissionen entstehen (Wronski et al. 2014; Sargl et al. 2011). Auch CO_2-Steuern werden in Betracht gezogen. Im Modell sind die Auswirkungen höherer Preise für CO_2-Emissionen durch fossile Energieträger allerdings nur durch die Integration des Emissionshandelssystems implementiert.

<u>Regulierung des Anteils erneuerbarer Kraftstoffe im Verkehr</u>: Mit der Einführung der THG-Minderungsquote als Ablösung der Biokraftstoffquote im Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) werden die Anteile erneuerbarer Kraftstoffe im Verkehr nicht mehr nach ihrem Energiegehalt gemessen, sondern nach deren THG-Minderungspotential. Durch diese Regelung könnten günstige

Biokraftstoffe mit vergleichsweise hohen THG-Emissionen aus dem Markt gedrängt werden. Als Alternative zu Biokraftstoffen könnten Raffinerien den Anteil erneuerbarer Energien auch durch die Nutzung von Elektrolyse-Wasserstoff im Cracking-Prozess oder über strombasierte Flüssigkraftstoffe erhöhen. Noch unklar ist, wie das THG-Minderungspotential von P2F-Kraftstoffen im BImSchG eingestuft wird. Die Regulierung der Höhe der THG-Minderungsquote und des Minderungspotentials von P2F sind Bestanteil des Modells.

Regulierung der PKW-Flotten-Emissionsreduktion: Fahrzeughersteller müssen die durchschnittlichen CO_2-Emissionen für Neuwagen reduzieren. Gemessen am Durchschnittsgewicht der Flotte dürfen ab 2020 nicht mehr als 95 gCO_2/km emittiert werden. Bei einer Verfehlung des Grenzwertes sind empfindliche Strafen von 95 €/g_{CO2} für Neuzulassungen fällig. Neben P2F besitzen die Fahrzeughersteller vielfältige Möglichkeiten, wie z.B. die Umsetzung von Effizienzmaßnahmen oder das in Verkehr bringen von Elektro- und Hybridfahrzeugen zur Reduzierung ihrer Flottenemissionen. Die Implementierung sämtlicher zur Verfügung stehender Optionen würde den realisierbaren Umfang dieses Modells bei weitem überschreiten. Die Regulierungsmaßnahme ist im Modell daher vereinfacht mit einer erhöhten Zahlungsbereitschaft durch Fahrzeughersteller abgebildet.

Einfluss der Zivilgesellschaft:

Die Akzeptanz sowohl von einzelnen Technologien als auch der Energiewende insgesamt spielt eine wichtige Rolle, auch für die Implementierung von P2F. Über den Umfang des Ausbaus erneuerbarer Energien wird sich entscheiden, wie viel grüner Strom für P2F überhaupt zur Verfügung steht. Die Datenlage zur Akzeptanz der Energiewende ist derzeit unübersichtlich. Einerseits nimmt der Widerstand vor allem gegenüber neuen Onshore-Windparks zu, andererseits belegen Umfragen, dass die Energiewende keine Akzeptanzeinbußen erleidet (vgl. Agentur für Erneuerbare Energien 2016). Es hat sich außerdem gezeigt, dass die Haltung Biokraftstoffen gegenüber eher skeptisch ist, belegt beispielsweise durch den geringen Absatz der Kraftstoffsorte Super E10 (BdBe 2012). Extremereignisse könnten die Akzeptanz der Energiewende sowohl im positiven als auch im negativen Sinne beeinflussen, bspw. durch die Zunahme von klimawandelbedingten Umweltkatastrophen oder aber auch durch Engpässe in der Versorgungssicherheit, ausgelöst durch einen hohen EE-Anteil. Generell wird der Einfluss der Öffentlichkeit in den verschiedenen Szenarien berücksichtigt und drückt sich in der Höhe der Zahlungsbereitschaft für P2F-Produkte aus.

Technologieentwicklung:

Im Modell werden die derzeit gängigen und diskutierten Technologien für Elektrolyse, Methanisierung (Sabatier-Prozess) und Fischer-Tropsch Synthese in den drei Technologieklassen $P2H_2$, P2M, P2L zusammengefasst. Für die Herstellung von Elektrolyse-Wasserstoff wird im Modell mit einem derzeitig realisierbaren Gesamtwirkungsgrad von 65% gerechnet und von einer linearen

Lernkurve bis 75% in der Modelllaufzeit ausgegangen. Für die Methanisierung wird mit einem Gesamtwirkungsgrad von derzeit 55% gerechnet (Elektrolyse + Methanisierung) und für die Herstellung von Flüssigkraftstoffen wird eine Effizienz von 50% veranschlagt. Für beide Technologien wird in der Modelllaufzeit von einer linearen Lernkurve bis 65% Effizienz ausgegangen (vgl. Kapitel 6.5.1.5; Tremel et al. 2015).

Die Investitionskosten zur Herstellung von Elektrolyse-Wasserstoff werden inklusive aller Systemkomponenten auf 1.500 €/kW im Basisjahr des Modells beziffert. Je Doppelung der in der Modellwelt global installierten Leistung sinken die Investitionskosten für neue Anlagen um 20% bis auf ein Minimum von 520 €kW^{-1} gemäß

$$I_{P(n)} = I_{P(0)} * \left(\frac{P(n)}{P(0)}\right)^{\frac{\ln(0,8)}{\ln(2)}}$$

mit $I_{P(n)}$ als Investition im Jahr *n*, $I_{P(0)}$ als Investition im Basisjahr, *P(n)* als Kapazität im Jahr *n* und *P(0)* als Kapazität im Basisjahr (vgl. P. R. Schmidt et al. 2016; Haarlemmer et al. 2014). Analog dazu sinken die Investitionskosten für P2M-Anlagen von 3.000 €kW^{-1} auf bis zu 1.000 €kW^{-1} mit einem Lerneffekt von 13% je Doppelung der installierten Leistung. Für die Herstellung von Flüssigkraftstoffen werden Investitionskosten von 3.500 €kW^{-1} bis 1.000 €kW^{-1} angesetzt. Die Kostendegression wird hier mit 20% je verdoppelter Leistung angesetzt.

6.5.3.3 Simulationsergebnisse des agentenbasierten Modells

In Deutschland ist derzeit eine P2F-Kapazität von ~21MW installiert, bestehend aus 20 Anlagen für die Herstellung von Wasserstoff, Methan und Flüssigkraftstoffen (Deutsche Energie-Agentur 2016a). Eine Vielzahl der Pilotanlagen unterschreitet dabei eine Elektrolyse-Kapazität von 500 kW. Alle umgesetzten Projekte werden durch Forschung begleitet und wurden zu einem Großteil durch Fördergelder realisiert. Sie wurden insbesondere zur Erforschung verschiedener technologischer Konzepte und teilweise zur Erprobung möglicher Geschäftsmodelle umgesetzt.

Referenzszenario

Für eine Kalibrierung und Validierung der Parameter und Beziehungen im Modell wurde in einem ersten Schritt ein Referenzszenario entwickelt. Der tatsächliche Zubau von P2F-Anlagen sollte hierfür vom Start des ersten Projekts im Jahr 2009 bis zum derzeitigen Stand in 2016 unter den gegebenen Rahmenbedingungen simuliert werden (siehe Abbildung 6.89).

Basierend auf den verfügbaren technischen Daten für P2F-Anlagen, Aussagen zur Zahlungsbereitschaft in den relevanten Märkten[103], aus Stakeholder-Dialogen und Literaturangaben (vgl.

[103] Die Informationen wurden den Gesprächen mit Betreibern einiger Pilotanlagen entnommen. Dabei wurde deutlich, dass eine erhöhte Zahlungsbereitschaft bis zu 25% gegenüber fossilen Produkten vorliegt. Dieser Kundenkreis besitzt jedoch insgesamt ein nur geringes Nachfragevolumen. Es wurde hier ein Nachfragevolumen von 1% der Gesamtnachfrage der Haushalte und Autofahrer nach Gas und Kraftstoff angenommen.

Graf et al. 2014b; Deutsche Energie-Agentur 2016b), abgeleiteten Investitionserwartungen von Betreibern und schließlich vergebenen Fördersummen für den Bau von P2F-Anlagen wurde der Zubau bis zum Jahr 2016 modelliert. Die Ergebnisse zeigen, dass die bisherige Entwicklung der P2F-Kapazität durch das Modell in sehr guter Annäherung abgebildet werden kann (Abbildung 6.89). Subventionen von 32 Millionen Euro führen zusammen mit einem Investitionsvolumen von 46 Millionen Euro in der Modellumgebung zu einer Gesamtkapazität von 22 MW. Davon entfallen 12 MW auf die Herstellung von Wasserstoff, 9 MW für die Methanisierung und 1 MW für FT-Produkte. Auch das Verhältnis der verschiedenen Anlagentypen ist nahezu identisch mit der tatsächlichen Verteilung. Die größte Abweichung betrifft die Herstellung von FT-Kraftstoffen mit einer tatsächlichen Kapazität von 150 kW, was sich durch die in der Modellwelt vereinfacht vorgegebene Mindestanlagengröße von 1 MW erklären lässt. Für die Berechnungen wurde ein Strompreis von 2 ct kWh^{-1} zuzüglich Abgaben und eine Vollauslastung der Anlagen von 3.000 Stunden angenommen.

In einem nächsten Schritt wurde der Zubau der P2F-Kapazität bis zum Jahr 2029 simuliert. Sämtliche Rahmenbedingungen wurden dabei konstant belassen, so dass weder regulatorische Änderungen noch sich ändernde Marktpreise der Substitute implementiert wurden. Zudem wurde von einer jährlich konstanten Fördersumme für neue Anlagen ausgegangen. Unter diesen Bedingungen beläuft sich die Gesamtkapazität auf 42 MW am Ende der Simulationszeit (Jahr 2029). Die staatlichen Subventionen zur Realisierung der Projekte betragen knapp 72 Mio. Euro und lösen private Investitionen von 73 Mio. Euro aus. Aufgrund des sehr langsamen Zubaus können sich Skalierungseffekte nicht entfalten, die Investitionskosten für neue Anlagen sinken infolge dessen nur gering gegenüber dem Start der Simulation. Grund dafür ist das unter den gegebenen Rahmenbedingungen nur sehr kleine Volumen der Märkte, in denen eine ausreichende Zahlungsbereitschaft von potentiellen Kunden gegeben ist. Für Unternehmen ergeben sich keinerlei Anreize zur Verbesserung ihrer CO_2-Bilanz. Neben strategischen Investoren, die für ihren Eigenbedarf und zu Forschungszwecken produzieren, fragt eine geringe Anzahl privater Haushalte die teuren, jedoch „grünen“ Produkte nach. Ihnen wurde eine erhöhte Zahlungsbereitschaft von bis zu 25% gegenüber dem Substitut unterstellt, doch macht ihr Nachfragevolumen von 88 GWh im Jahr 2029 nur einen Bruchteil der Gesamtnachfrage aus (vgl. Tabelle 6.76). Aufgrund der gering steigenden Lernkurve ist eine Reduktion der Produktionskosten kaum gegeben. Sie betragen im Simulationsjahr 2016 durchschnittlich 24 ct kWh^{-1} für die Herstellung von Wasserstoff, 32 ct kWh^{-1} für Methan und 38 ct kWh^{-1} für Flüssigkraftstoffe. Im Jahr 2029 sinken die Produktionskosten für Wasserstoff auf 21 ct kWh^{-1} und für Methan auf 29 ct kWh^{-1}. Bei Flüssigkraftstoffen bleibt das Preisniveau von 38 ct kWh^{-1} bestehen. Die Preise für konventionelle Energieträger und Biokraftstoffe betragen hingegen je nach Produkt und Markt 1-8 ct/kWh, womit sie um ein Vielfaches günstiger zu erwerben sind (vgl. Purr, Osjek et al. 2016). Eine Ursache für die hohen Gestehungskosten sind die relativ hohen Umwandlungsverluste, die bei Wasserstoff allerdings wesentlich

geringer als bei Methan und Flüssigkraftstoffen ausfallen, sowie die noch sehr hohen Investitions- und Betriebskosten, die sich aufgrund des schwachen Zubaus kaum verändern. Nicht zuletzt sind die geltenden regulatorischen Rahmenbedingungen als weitere Ursache zu nennen, unter denen sehr hohe Steuern und Umlagen auf den Bezugsstrom anfallen.

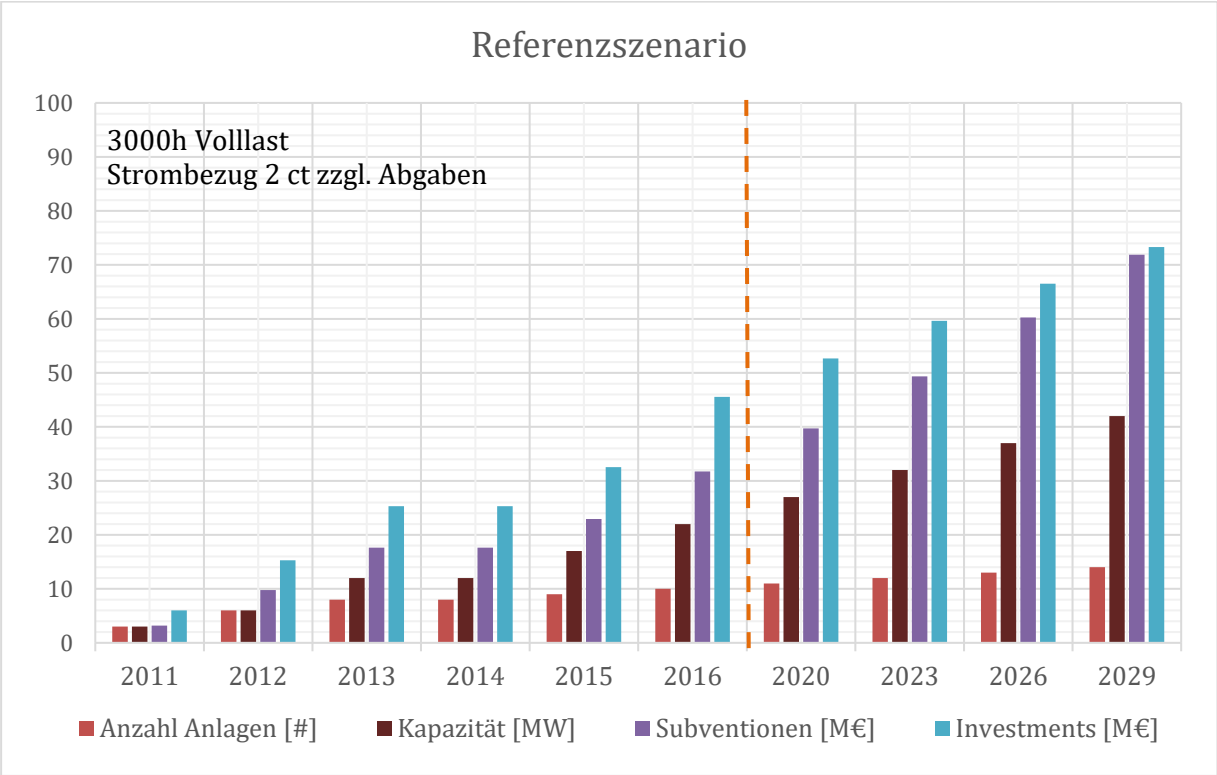


Abbildung 6.89: Simulationsergebnisse des Referenzszenarios (Werte kumuliert dargestellt). Für eine Kalibrierung des Modells wurde unter gegebenen Marktbedingungen der Zubau von P2F-Anlagen von 2009 bis 2016 simuliert. Unter konstanten Bedingungen wurde zudem die weitere Entwicklung der P2F-Kapazität bis zum Jahr 2029 berechnet.

Basisszenario (Business-as-usual)

Die Berechnungen für das Basisszenario starten im Modelljahr 2015 und simulieren den Zubau bis 2035. Die bis 2015 bereits installierte Kapazität wurde als vorab installierte Kapazität integriert (einschließlich der zugehörigen Subventionen und der bereits getätigten Investments). Für das Basisszenario wurden zunächst pauschale Annahmen zu Preisänderungen für fossiles Gas und Öl getroffen und diese mit einer differenzierten Anzahl an Volllaststunden in Relation gesetzt:

- Linearer Preisanstieg für konventionelle Energieträger von 2% pro Jahr
- Linearer Preisanstieg für konventionelle Energieträger von 4% pro Jahr
- 3.000 Volllaststunden bezogen auf Elektrolyse-Kapazität
- 6.000 Vollaststunden bezogen auf Elektrolyse-Kapazität

Die Ergebnisse in Abbildung 6.90: Entwicklung des Zubaus bis 2035 bei einem Preisanstieg fossiler Energieträger von 2% bzw. 4% und einer Vollauslastung von 3000 bzw. 6000 Stunden pro Jahr. zeigen, dass selbst ein kontinuierlicher Preisanstieg der fossilen Energieträger von zwei oder vier Prozent

nur zu einer geringen Steigerung der Wirtschaftlichkeit von P2F-Anlagen beiträgt, wenn alle übrigen Faktoren außen vorgelassen werden. Die Spannweite der Volllaststunden wurde bewusst auf bis zu 6.000 Stunden erweitert, um den Effekt auf die Entstehung von Geschäftsmodellen aufzuzeigen.

Die Projekte lassen sich bis zum Ende der Simulationszeit nur durch Subventionen und die Einwilligung der Betreiber in Verlustgeschäfte realisieren. Aus diesem Grund ergibt sich für die 2% Preisanstiegsberechnung sogar eine geringere Gesamtkapazität bei 6.000 Volllaststunden als bei 3.000 h. Da die Anlagen im Betrieb fast ausschließlich Verluste einfahren, steht eine Anlage, die nur wenige Stunden in Betrieb ist, besser da, als eine Anlage mit einer hohen Zahl an Betriebsstunden.

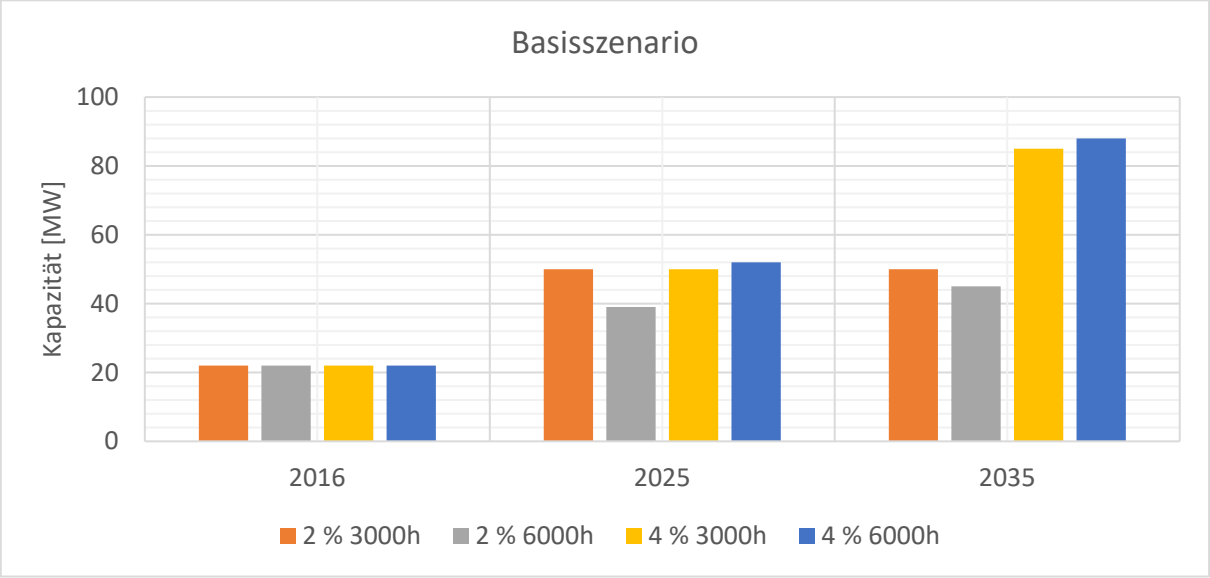


Abbildung 6.90: Entwicklung des Zubaus bis 2035 bei einem Preisanstieg fossiler Energieträger von 2% bzw. 4% und einer Vollauslastung von 3000 bzw. 6000 Stunden pro Jahr.

Aufgrund der im vorherigen Unterkapitel genannten großen Diskrepanz zwischen den Gestehungskosten der P2F-Produkte und den Preisen für fossile Energie überraschen die Ergebnisse nicht. Sie zeigen vielmehr, dass für eine zeitnahe Integration der für die Energiewende wichtigen P2F-Technologien ins Energiesystem deutliche regulatorische Signale essentiell sind. Für Industrieunternehmen ergeben sich bei einem derzeit sehr geringen Preis für EU-Emissionszertifikate und nur wenigen bisher umgesetzten Quoten zur Minderung von Treibhausgasemissionen für Sektoren praktisch keine wirtschaftlichen Anreize, um von fossiler Energie wegzukommen. Anlagen über ein Forschungsstadium hinaus werden unter diesen Bedingungen nicht entstehen, so dass auch eine Skalierung hin zu größeren Anlagen und die mit größeren Produktionsserien einhergehenden sinkenden Investitionskosten ausbleiben.

Optimierungsszenarien für eine ambitionierte Energiewende

In einem nächsten Schritt wurde das Basisszenario um zunächst zwei Änderungen in den regulatorischen Rahmenbedingungen erweitert. Ein von Stakeholdern vielfach geforderter Punkt ist

eine Änderung des Letztverbraucher-Status im EnWG und eine damit einhergehende Befreiung von der EEG-Umlage für den Strombezug von P2F-Anlagen, selbst wenn das P2F-Produkt nicht zur Rückverstromung, sondern als Brenn-, Kraft- oder Rohstoff in anderen Sektoren verwendet wird. Die Forderung wird damit begründet, dass P2F-Anlagen den Bezugsstrom nicht verbrauchen, sondern in andere Energieträger wandeln. In einer Erweiterung des Basisszenarios wurde deshalb eine Befreiung der EEG-Umlage ab dem Jahr 2017 implementiert, so dass die zu leistenden Abgaben auf den Bezugsstrom sich von 13,06 ct kWh^{-1} auf nunmehr 6,65 ct kWh^{-1} reduzieren (vgl. Tabelle 6.77).

Eine weitere Forderung von Stakeholdern ist die Anerkennung von P2F-Produkten als erneuerbarer Kraftstoff. Im europäischen Parlament sind die EU-Richtlinien zur Qualität von Otto- und Dieselkraftstoffen (Fuel Quality Directive, FQD) und zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Renewable Energy Directive, RED) bereits im April 2015 angepasst worden. In dieser Änderung wurde die Liste der anerkannten Biokraftstoffe um „flüssige und gasförmige erneuerbare Kraftstoffe nicht biologischer Herkunft“ erweitert. Stakeholder fordern die Bundesregierung auf, die Änderungen nun auch in nationales Recht umzusetzen und P2F-Produkte als Biokraftstoff im Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) anzuerkennen. Eine zeitnahe Umsetzung wird als wahrscheinlich eingeschätzt.

Zusätzlich zur Befreiung von der EEG-Umlage wurde die Anerkennung als Biokraftstoff mit einem Treibhausgasminderungspotential von 100% in die Erweiterung des Basisszenarios ab dem Jahr 2017 implementiert. Als dritte regulatorische Änderung wurde eine Reform des Europäischen Emissionshandelssystems für das Jahr 2020 implementiert und eine Verknappung der gehandelten Emissionszertifikate angenommen. Der Preis für Zertifikate wurde in der Folge auf 25 €/$tCO_{2Äq}$ ab 2020 gesetzt.

In Abbildung 6.91 ist der Zubau differenziert nach 3.000 und 6.000 Volllaststunden für das Basisszenario dargestellt, unter der Annahme, dass P2F-Anlagen von der EEG-Umlage ab 2017 befreit sind. Es wurde zudem ein Preisanstieg für fossiles Gas und Öl von jährlich zwei Prozent angenommen, welcher auf Basis des „Current Policy Scenario“ der International Energy Agency als realistisch erachtet wurde (vgl. International Energy Agency 2010). Die teureren Emissionszertifikate sind ab 2020 enthalten. Der nun wesentlich günstigere Bezugsstrom wirkt sich positiv auf die Betreibermodelle aus, so dass der Zubau im Jahr 2035 321 MW beträgt, wenn von 3.000 Volllaststunden ausgegangen wird. Dennoch sind die Endprodukte aufgrund der verbleibenden Abgaben und der Umwandlungsverluste noch immer wesentlich teurer als fossiles Gas und Öl. Ohne Subventionierung lassen sich die Anlagen deshalb auch trotz einer Änderung des Betreiberstatus im EnWG außerhalb von kleinen Nischen nicht wirtschaftlich betreiben. Dies wird insbesondere dadurch belegt, dass der Zubau bei einer angenommenen Betriebszeit von 6.000h deutlich geringer ausfällt.

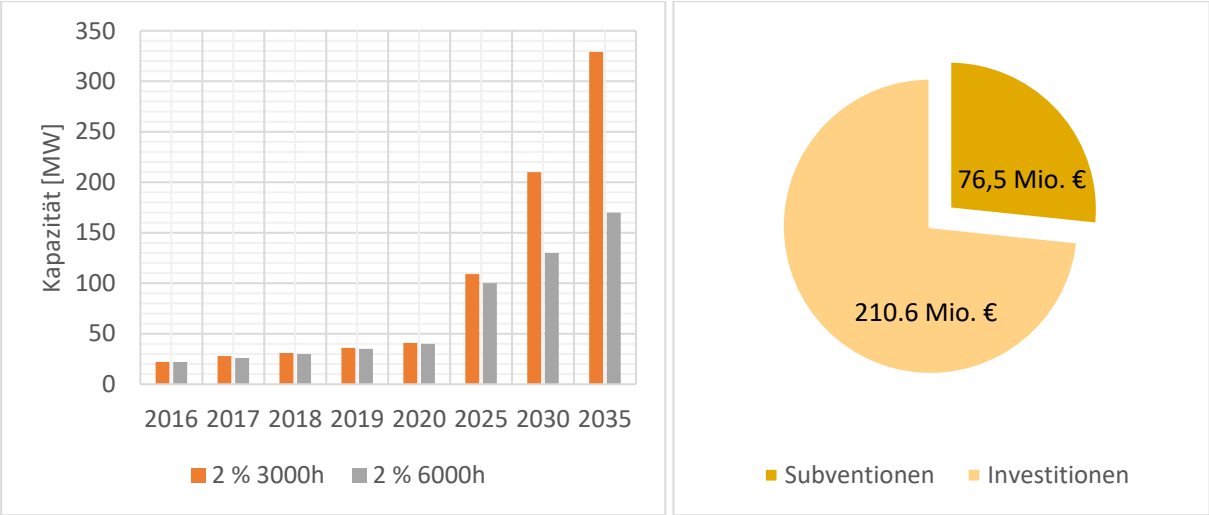


Abbildung 6.91: Zubau im Basisszenario mit einem Preisanstieg von jährlich 2% für fossile Energieträger und einer Befreiung von der EEG-Umlage durch Änderung des Letztverbraucher-Status im Energiewirtschaftsgesetz sowie einem Emissionszertifikatspreis von 25 €/$t_{CO2Äq}$ ab 2020 (links). Verhältnis der Investitionen und Subventionen im Jahr 2035 (rechts).

Durch die günstigeren Rahmenbedingungen ändert sich das Verhältnis von Subventionen zu Investitionen deutlich. Die Gesamtfördersumme von knapp 77 Millionen Euro löst fast die dreifache Summe an privaten Investitionen bis zum Jahr 2035 aus. Im Referenzszenario war das Verhältnis noch ca. 1:1. Die Investitionen finden dennoch in den Nischenmärkten statt. Die P2F-Produkte gehen an private Haushalte und Autofahrer mit erhöhter Zahlungsbereitschaft. Für eine deutliche Steigerung der Gesamtkapazität ist deshalb insbesondere die Anrechnung von P2F-Kraftstoffen zur Erfüllung von Quoten zur Verminderung der Treibhausgasemissionen für Unternehmen nötig, und es empfehlen sich empfindliche Strafen, wenn diese Quoten nicht eingehalten werden.

In Abbildung 6.92 ist die Entwicklung des Zubaus bei einer Anerkennung von P2F als Biokraftstoff dargestellt. Insbesondere für Raffinerien ergibt sich unter dieser Voraussetzung ein interessantes Geschäftsfeld. Für den Prozess der Entschwefelung von Benzin, Diesel und Kerosin sowie für den Cracking-Prozess von Kohlenwasserstoffen werden erhebliche Mengen an Wasserstoff benötigt (~2,5 TWh, Harks 2015), der zumeist fossil durch Erdgasreformierung gewonnen wird. Die bislang zur Einhaltung der Treibhausgasminderungsquote beigemischten Biokraftstoffe erfahren jedoch erhebliche Akzeptanzprobleme und werden daher nur selten getankt, obwohl diese Kraftstoffe an der Zapfsäule sogar günstiger zu erwerben sind. Dies erschwert für die Raffinerien zunehmend die Einhaltung ihrer THG-Minderungsquote. Bei Verfehlung der Quote ist eine Strafe von 470 €/$t_{CO2Äq}$ fällig. Eine weitere Herausforderung ergibt sich aus der Vorgabe des mindestens zu erfüllenden THG-Minderungspotentials von Biokraftstoffen. Der vielfach eingesetzte Rapsmethylester (RME) weist mit 38% ein vergleichsweise geringes Minderungspotential auf. Ab 2018 sollen Biokraftstoffe ein Minderungspotential von mindestens 60% aufweisen, wodurch sich die Einhaltung der Quote zusätzlich erschwert. Bei entsprechenden Rahmenbedingungen kann sich der Einsatz des teureren „grünen“ Wasserstoffs deshalb wirtschaftlich rentieren. Dennoch sind

aufgrund der hohen Investitionskosten für die Integration großer Elektrolyseure in der Raffinerie zunächst Fördergelder nötig.

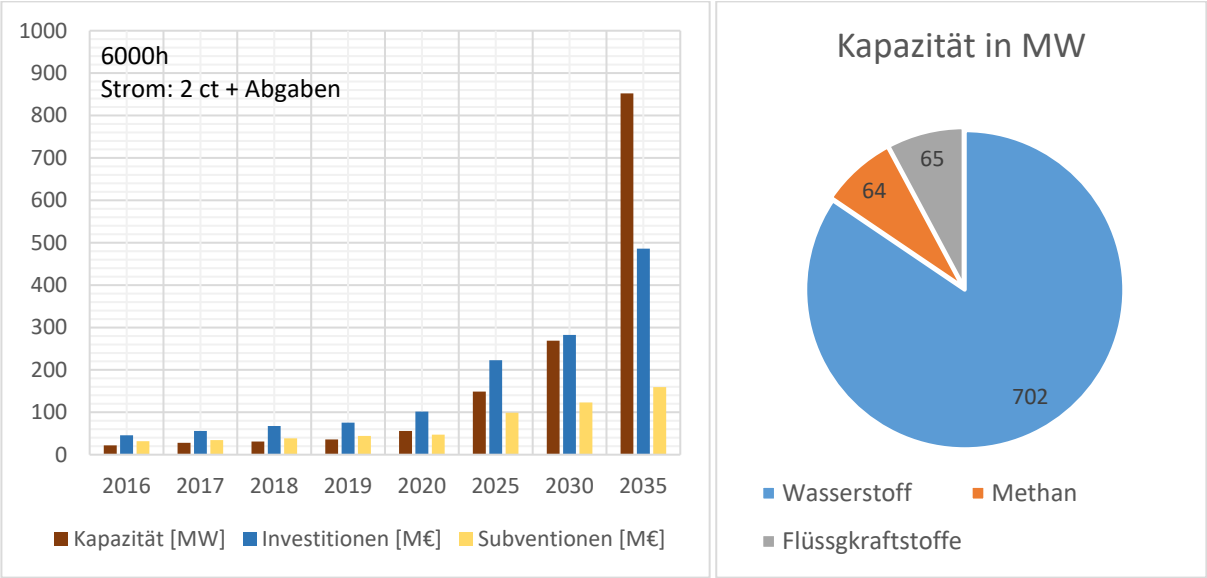


Abbildung 6.92: Zubau nach Anerkennung als Biokraftstoff (links). Insbesondere der Zubau von Elektrolyse-Wasserstoff für Raffinerien steigt stark an. Zusammensetzung der Gesamtkapazität zur Erzeugung der Endprodukte im Jahr 2035 (rechts).

Wie Abbildung 6.92 entnommen werden kann, wurde in dieser Simulation eine hohe Auslastung der Elektrolyseure mit 6.000 Volllaststunden angenommen, da insbesondere an Raffineriestandorten eine hohe Auslastung als sinnvoll erscheint. Um die hohen Energiemengen mit erneuerbarem Strom decken zu können, bedarf es daher entsprechender zusätzlicher EE-Erzeugungsleistung, die die Elektrolyseure mit Strom beliefern (vgl. Kapitel 6.5.2).

Weitere Aspekte für eine umfangreiche P2F-Integration

Ein wichtiges Merkmal dieses Modells ist die Einbindung von Akzeptanzaspekten in der Bevölkerung. Die Experimente umfassen deshalb auch Berechnungen mit einer besonders hohen Akzeptanz von Stromkraftstoffen, die beispielsweise durch Extremereignisse oder neue Erkenntnisse bezüglich der Folgen des Klimawandels auftreten kann. Für ein Szenario mit hoher Akzeptanz wurde angenommen, dass 10% der privaten Haushalte bis zu 15% mehr für synthetisches Gas und Öl ausgeben als für fossile Produkte bei ihrem konventionellen Anbieter. 5% der Haushalte zahlen in diesem Szenario bis zu 25% mehr.[104] Im Sinne einer möglichst hohen Netzdienlichkeit wurde eine geringere Auslastung von 3.000 Stunden gewählt.

[104] Die Annahmen zur Höhe der Zahlungsbereitschaft beruhen auf Auswertungen von Preisen eines Anbieters von synthetischem Erdgas.

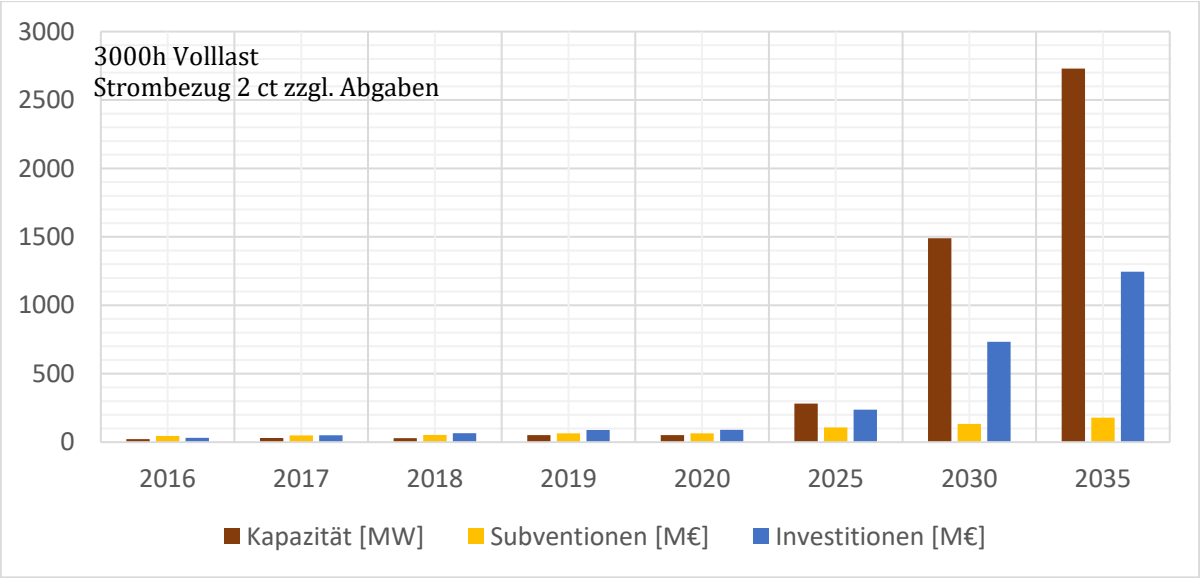


Abbildung 6.93: Erhöhte Akzeptanz mit höherer Zahlungsbereitschaft führt zu einem deutlichen Wachstum der P2F-Kapazität.

Mit dem Szenario kann berücksichtigt werden, dass die Akzeptanz bzw. die mit ihr verbundene Höhe der Zahlungsbereitschaft eine wichtige Rolle in der Entwicklung von Systeminnovationen spielt. Die Annahmen sind hier bewusst sehr optimistisch gewählt worden, um den Effekt deutlich aufzuzeigen. Tatsächlich erscheint es als ziemlich unwahrscheinlich, dass eine derart erhöhte Zahlungsbereitschaft in der Bevölkerung entstehen wird.

In einem weiteren Optimierungs-Szenario wurde deshalb von einer geringeren Zahlungsbereitschaft ausgegangen, wie sie auch in den übrigen Szenarien verwendet wurde. In allen Ergebnissen wurde bisher deutlich, dass die umgesetzten P2F-Projekte von Fördermitteln abhängig sind. Zur Simulation einer vollständigen Integration ohne Förderungsbedarf nach einer gewissen Einführungsphase wurde deshalb ein Szenario entwickelt, in dem von einer starken Anfangssubventionierung bis 2025 von 60 Millionen Euro pro Jahr ausgegangen wurde. Der Preis für EU Emissionszertifikate wurde zudem auf 100 €/$t_{CO2Äq}$ angehoben. Im Sinne einer ambitionierten Klimaschutzpolitik sind darüber hinaus strenge Quoten zur Minderung von Treibhausgasemissionen für Industrieunternehmen implementiert worden, die eine höhere Zahlungsbereitschaft von bis zu 20% gegenüber fossiler Energie für Unternehmen hervorrufen.

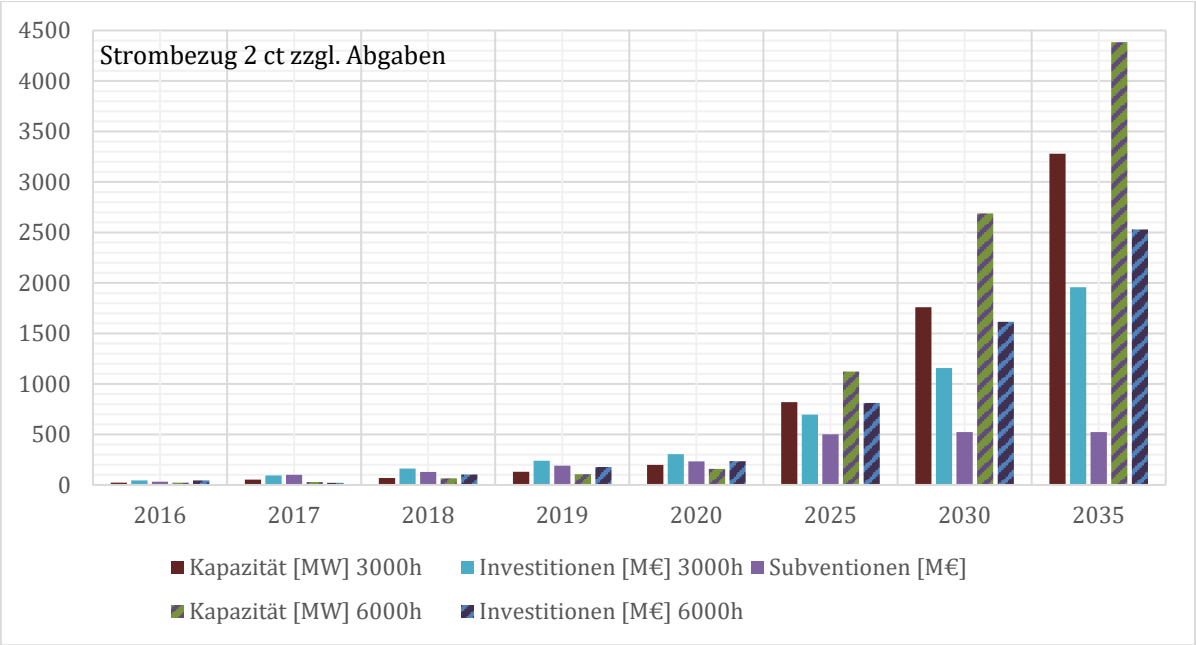


Abbildung 6.94: Implementierung einer starken Förderung in der früheren Entwicklungsphase und von strengeren Klimaschutzvorgaben für Industrieunternehmen.

Aus Abbildung 6.94 wird deutlich, dass die Schwelle zur Wirtschaftlichkeit von P2F durch strenge Klimaschutzmaßnahmen erreicht werden kann, sowohl bei einer hohen Vollauslastung von 6.000 Stunden als auch bei geringerer Auslastung von 3.000 Stunden. In den meisten der im Modell abgebildeten Märkte können die erneuerbaren Substitute verkauft werden. Eine interessante Erkenntnis ist, dass neben einer hohen Anlagenkapazität von 2 GW zur Wasserstoffherstellung eine mit 1 GW ebenfalls hohe Kapazität zur Erzeugung von synthetischem Flüssigkraftstoff installiert wurde. Dadurch wird deutlich, dass sich insbesondere im Verkehr und in der chemischen Industrie Märkte entwickeln, während erneuerbares Methan mit einer vergleichsweise geringen Kapazität von 260 MW geringe Marktanteile einnimmt. Durch die starke Förderung und den damit einhergehenden massiven Zubau sinken die Investitionskosten deutlich. Eine Förderung ist unter diesen Voraussetzungen ab dem Jahr 2025 nicht mehr nötig. Möglich ist dieser Trend allerdings nur aufgrund der Implementierung des hohen CO_2-Zertifikatpreises und der hohen Zahlungsbereitschaft von Industrieunternehmen aufgrund der umgesetzten Klimaschutzauflagen. Die Gegenüberstellung der Produktionskosten in Tabelle 6.78 zeigt, dass die Gestehungspreise trotz der angenommenen Kostendegression und günstigen Rahmenbedingungen deutlich über dem heutigen Preisniveau liegen werden.

Tabelle 6.78: Entwicklung der Investitions- und Produktionskosten in der Modellumgebung im Optimierungsszenario.

	2015		2035	
	Investitionskosten [€ kW^{-1}]	Produktionskosten [ct kWh^{-1}]	Investitionskosten [€ kW^{-1}]	Produktionskosten [ct kWh^{-1}]
P2 H_2	1.500	25,7	520	12,8
P2 M	3.000	34,0	1.000	15,4
P2I	3.500	38,7	1.000	15,4

6.5.3.4 Schlussfolgerungen

Mit dem agentenbasierten Modell konnte gezeigt werden, dass auch auf längere Sicht unter derzeit gegebenen Rahmenbedingungen eine Integration des P2F-Konzepts aus ökonomischer Perspektive nicht möglich ist. Gefordert ist die Umsetzung einer wesentlich ambitionierteren Klimaschutzpolitik, wie sie in Paris beschlossen wurde, um die Energiewende auch außerhalb des Stromsektors richtig in Gang zu bringen. Insbesondere in der Industrie, aber auch im Mobilitätssektor, gibt es bisher allerdings kaum Anzeichen für eine wirkliche Abkehr von fossiler Energie. Ohne regulatorische Maßnahmen, die hier als *regulatorischer Push* und *Anreiz Pull* beschrieben wurden, wird sich eine Umstellung auf nachhaltige Energie für Firmen aus betriebswirtschaftlicher Sicht außer in kleinen Nischen nicht rentieren. Technischer Fortschritt und insbesondere eine Degression der Investitionskosten müssen zwar ebenfalls einen Beitrag für das Erreichen eines wirtschaftlichen Betriebs leisten, im Wesentlichen sind es aber allen voran die regulatorischen Bedingungen, die geändert werden müssen.

Im Modell wurde der Fokus bewusst auf die Wirtschaftlichkeit von P2F-Anlagen gelegt und somit nur eingeschränkt deren Systemdienlichkeit für Stromnetze berücksichtigt. Da die Erlöse je gelieferter kWh im Stromsektor wesentlich geringer als in den übrigen Sektoren ausfallen, sind Geschäftsmodelle für eine Rückverstromung der P2F-Produkte im Modell nicht berücksichtigt. Die Simulation eines zukünftigen Strommarktdesigns mit möglichen Vergütungsstrukturen für netzdienliches Verhalten erschien aufgrund der völlig ungewissen Entwicklung des Strommarktes als nicht aussagekräftig genug und wurde deshalb nicht modelliert. Ein Vergleich mit den unter Kapitel 6.5.2 berücksichtigten Studien bestätigt zudem die hier gewählte Fokussierung auf Märkte in der Industrie, im Verkehr und, für allererste kleine Nischenmärkte, die grüne Gasversorgung von Haushalten jenseits von Biogasanlagen.

Zu diskutieren ist durchaus die zeitliche Entwicklung von P2F-Kapazitäten. Im Modell wurde angenommen, dass für den Betrieb von P2F-Anlagen ausreichend erneuerbarer Strom zur Verfügung gestellt wird. Dies wird nicht vor allem auf der Basis von sogenanntem Überschussstrom möglich sein. Trotzdem fallen bereits bei einem EE-Anteil von derzeit gut 30% in der Stromversorgung 1,58 TWh Strom an, die aufgrund von Netzengpässen abgeregelt werden und für das P2F-Konzept zur Verfügung gestellt werden könnten (BNA 2016). Laut einer Studie von Sterner

et al. entstehen bei einer 100% erneuerbaren Stromversorgung Überschüsse bis zu 154 TWh/a (Sterner, Thema, Eckert, Lenck, Götz, P.(2015): Bedeutung und Notwendigkeit von Windgas für die Energiewende in Deutschland, Forschungsstelle Energienetze und Energiespeicher (FENES) OTH Regensburg, Energy Brainpool, Studie im Auftrag von Greenpeace Energy, Regensburg/Hamburg/Berlin 2015). Diese würden bei 6.000 Volllaststunden für eine Kapazität von knapp 26 GW ausreichen. Das UBA empfiehlt ferner, in den kommenden Jahren eine installierte P2F-Kapazität von 500 MW nicht zu überschreiten, da ansonsten faktisch Graustrom für die Herstellung der strombasierten Kraftstoffe genutzt würde oder zumindest eine erhöhte fossile Stromproduktion die Folge sein könnte (Purr, Osjek et al. 2016). Nicht berücksichtigt in diesem Modell ist deshalb, ob die Strommengen aus EE-Überschüssen überhaupt für P2F-Anlagen zur Verfügung stehen, beispielsweise weil eine Überlastung des Stromnetzes den Transport bis zur P2F-Anlage eventuell gar nicht ermöglicht. Die Datenlage hat eine entsprechende Berücksichtigung von Standortfaktoren nicht zugelassen. Die Perspektiven eines geeigneten P2F-Systemdesigns für eine 100% erneuerbare Energieversorgung werden separat in Kapitel 6.5.3 adressiert.

Der Fokus des Modells liegt ausschließlich auf der wirtschaftlichen Machbarkeit von P2F-Konzepten. Je nach Geschwindigkeit und Umfang des Ausbaus von Photovoltaik- und Windkraftanlagen könnte eine umfangreiche Integration von P2F in Deutschland auch erst zu einem viel späteren Zeitpunkt empfehlenswert sein, als die Simulationsergebnisse hier aufzeigen. Eine solche Entwicklung wäre im Sinne der Einhaltung der Klimaschutzziele zwar unter keinen Umständen zu priorisieren, könnte nach den derzeit festgelegten zu geringen Ausbaukorridoren jedoch eintreten.

6.5.3.5 Zusammenfassung

Um die auf der Pariser Klimaschutzkonferenz beschlossenen Klimaschutzziele zu erreichen, bedarf es einer grundlegenden Transformation des Energiesystems ohne Einschränkungen in der Versorgungssicherheit. Ohne die Integration von synthetischen, strombasierten Kraftstoffen (regenerativ erzeugtem Wasserstoff, Methan und Flüssigkraftstoff) kann eine vollständige Transformation nach derzeitigem Wissen nicht gelingen. Aufgrund von Umwandlungsverlusten, hohen Investitionskosten und ungünstigen rechtlichen Rahmenbedingungen sind die erneuerbaren Kraftstoffe um ein Vielfaches teurer als fossile Energieträger. Power-to-Fuel Projekte lassen sich deshalb im größeren Forschungsmaßstab bisher nur mithilfe von Fördermitteln realisieren. Ziel dieser Fallstudie war es, Wege aufzuzeigen, wie die synthetischen strombasierten Kraftstoffe in die Wirtschaftlichkeit geführt werden können. Mithilfe eines agentenbasierten Modells wurde der Zubau von P2F-Anlagen für eine Modelllaufzeit von 20 Jahren simuliert. Basierend auf Erkenntnissen zu relevanten Akteuren im sozio-technischen Energiesystem wurden relevante, individuell spezifizierte Akteursgruppen im Modell abgebildet, die miteinander interagieren. Auf diese Weise

konnte gezeigt werden, unter welchen Rahmenbedingungen synthetischen, strombasierten Kraftstoffen der Sprung aus kleinen Nischenmärkten in die großen Energiemärkte gelingen kann. Das neu entwickelte Modell bietet dabei vielfältige Möglichkeiten für die Untersuchung möglicher Effekte neuer (regulatorischer) Rahmenbedingungen auf die Marktfähigkeit des P2F-Konzeptes. Dennoch wurde aufgrund der oftmals äußerst ungewissen Annahmen versucht, das Modell so „einfach“ wie möglich auszugestalten. So beruht beispielsweise die zentrale Fragestellung des Modells auf der Entwicklung eines Marktes, in dem es bisher praktisch noch keine echte Nachfrage gibt. In den entwickelten Szenarien wurde deutlich, dass sich ohne starke regulatorische Eingriffe in die Märkte nur kleine Nischenmärkte mit einer erhöhten Zahlungsbereitschaft privater Haushalte für die grünen Produkte eröffnen. Ein moderater Preisanstieg fossiler Energieträger würde auch langfristig nicht ausreichen, um diese durch erneuerbare Kraftstoffe ökonomisch substituieren zu können. Mit der Umsetzung der von den Akteuren im Innovationssystem vielfach geforderten Änderungen in den regulatorischen Rahmenbedingungen können P2F-Projekte zwar wirtschaftlicher umgesetzt werden, für einen Sprung aus der Nische reichen die Maßnahmen jedoch ebenfalls noch nicht aus. Für eine umfangreiche Marktintegration von synthetischen Kraftstoffen bedarf es einer strengeren Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen, die sowohl eine stärkere Förderung neuer Technologien umfassen, als auch deutliche wirtschaftliche Signale zur Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen durch Unternehmen bedingen.

6.5.4 Strukturelle Vulnerabilitätsanalyse für die Transformationsoption P2F

6.5.4.1 Einleitung

Synthetischen, strombasierten Kraftstoffen wird im Projekt Resystra nicht zuletzt vor dem Hintergrund des Phasenmodells der Energiewende (Henning et al. 2014) eine besonders hohe Bedeutung in der dritten Phase in der Transformation des deutschen Energiesystems zugeordnet. In etlichen Studien wird für das deutsche Energiesystem spätestens um das Jahr 2050 eine hohe P2F-Kapazität zur Versorgung großer Teile der (chemischen) Industrie, des Verkehrs und partiell auch der Sektoren Strom (als Langzeitspeicher) und Wärme für nötig erachtet (Benndorf, Bernicke, Bertram, Butz, Dettling 2013); (Fürstenwerth et al. 2014). Ausgehend von der im Kapitel 6.5 vorgestellten These

> *„Auch die postfossile Energie- und Rohstoffversorgung wird nicht gänzlich ohne kohlenstoffhaltige Energieträger auskommen. Ohne die Systemleistungen von Power-to-Fuel kann eine ganzheitliche Transformation hin zu 100% erneuerbaren Energien nicht gelingen. Dies gilt insbesondere im Transportsektor sowie für die Rohstoffversorgung der (organischen) chemischen Industrie“*

ist es das Ziel der hier durchgeführten strukturellen prospektiven Vulnerabilitätsanalyse (SVA) herauszufinden, ob das P2F-Konzept den an die Technologie gestellten Anforderungen gerecht werden kann. Insofern unterscheidet sie sich von den Vulnerabilitätsanalysen für die regionalen

Fallstudien (vgl. Kapitel 6.2 und 6.3), in denen die Auswirkungen von Störungen auf die Aufrechterhaltung von Systemleistungen untersucht werden.

Als Systemleistungen, die P2F in einem Energiesystem mit sehr hohen Anteilen erneuerbarer Energien erbringen soll, sind folgende definiert:

1. Kraftstoffe – Bereitstellung von Kraftstoffen für absehbar nicht elektrifizierbare Verkehrsanwendungen
2. Resilienzgewinne durch hohe Diversität der Energieträger und durch intelligente Kopplung der Energiesektoren
3. Rohstoffe – Bereitstellung von Basischemikalien für die chemische Industrie
4. Entlastung von Stromübertragungsnetzen durch dezentrale Verbraucher und regelbaren/ dynamischen Betrieb
5. Brennstoffe – Bereitstellung chemischer Langzeitspeicher durch Wandlung von erneuerbarem Strom

Alle Punkte sind vor dem Hintergrund der in Paris vereinbarten Klimaschutzziele zu sehen. Nicht nur die Stromproduktion, sondern auch die Bereitstellung von Brenn-, Roh- und Kraftstoffen muss vollständig regenerativ erfolgen, damit die Systemleistungen nachhaltig erbracht werden können. Das Ziel der Entlastung der Stromübertragungsnetze kann durch ein strategisches Konzept für den Ausbau des zukünftigen P2F-Kraftwerkspark erreicht werden. Dafür müssten P2F-Anlagen in Netzengpassgebieten errichtet werden, so genannten *EinsMan* (Einspeisemanagement-) Gebieten, in denen sonst durch das EEG-Einspeisemanagement eine temporäre Reduzierung der Einspeiseleistung von Anlagen zur Erzeugung erneuerbaren Stroms vorgenommen würde (vgl. § 14 EEG). Für ein solches Konzept müssten P2F-Anlagen auf einen flexiblen Betrieb bei vergleichsweise geringer Vollauslastung ausgerichtet werden. Neben der Frage, ob solche dynamischen Anlagen zur Erfüllung der Systemleistung technisch umzusetzen sind, gilt es insbesondere auch den Mehrwert für das Energiesystem eines solchen P2F-Anlagendesigns zu ermitteln – denn der Brenn-, Roh- und Kraftstoffbedarf kann – wie oben dargelegt – keineswegs allein durch eine Vielzahl dezentraler P2F-Anlagen gedeckt werden, die auf die Überschussstromverwertung ausgelegt sind. Zudem ist das Wirtschaftlichkeitspotential dieser Anlagen zu hinterfragen. Wahrscheinlich kann die Netzentlastung und –stabilisierung in Zukunft kostengünstiger auf anderem Wege erfolgen. Für die Bereitstellung von Energieträgern für alle Sektoren bedarf es also zumindest eines Mischsystems, in dem neben dezentralen dynamisch betriebenen P2F-Anlagen vor allem große Anlagen zum Beispiel in der Nähe von Windparks oder Photovoltaikanlagen-Clustern errichtet werden. Da insbesondere die Fischer-Tropsch-Synthese nach derzeitigem Wissen und Stand der Technik nur unter großem Aufwand dynamisch betrieben werden kann, wären auch

ein dynamischer Betrieb der großen Elektrolyseure und eine Zwischenspeicherung des Wasserstoffs vor Ort für eine kontinuierliche Versorgung der großen Fischer-Tropsch-Anlagen denkbar. Und dennoch wird es auch dezentrale P2F-Lösungen benötigen, um einem übermäßigen Netzausbau zum Abtransport lokaler Erzeugungsspitzen entgegen zu wirken und vor Ort Optionen für die Nutzung des Stroms bereitzustellen. Entsprechende Untersuchungen sind Teil dieser SVA.

Den definierten Systemleistungen liegen Qualitätskriterien zugrunde, die es zu erfüllen gilt:

- Unmittelbare Verfügbarkeit der Kraftstoffe in den Sektoren inkl. Kraftstoffreserven
- Qualität der Kraftstoffe/ Erfüllung von Normen
- Effizientes Anlagendesign: Bspw. Nutzung von Abwärme für eine effiziente Nutzung des EE-Stroms
- Nutzung von Strom aus erneuerbaren Quellen
- CO_2 Verfügbarkeit: Kohlenstoff aus biogenen Quellen oder aus der Atmosphäre
- Wirtschaftlichkeit
- Gesellschaftliche Akzeptanz
- Sicherheit der Anlagen/ Prozesse

Kurz gefasst identifiziert diese SVA mögliche Schwachpunkte eines Systems (hier: des P2F-Konzepts), die sich auf die Erbringung der Systemleistungen nach Qualität und Quantität negativ auswirken könnten. Gemäß der SVA-Methodik (vgl. (Gößling-Reisemann, Wachsmuth et al. 2013) und Kapitel 5.6) soll zunächst die Sensitivität des P2F-Konzepts, bzw. bestimmter Anlagentypen (hier: kleine flexible Anlagen (dezentral) und große Anlagen (zentral) mit den Prozessen: Fischer-Tropsch, Sabatier, Elektrolyse) gegenüber potenziellen Störungen ermittelt werden. Kombiniert mit der Ermittlung der Anpassungskapazität des Energiesystems (Kompensierung potenzieller Störungen) kann schließlich die Vulnerabilität des Systems ermittelt werden.

Dabei sollen sowohl technologiespezifische potenzielle Störungen, als auch Störeinflüsse auf den Transformationspfad, also die Ausbreitung der spezifischen Technologien und ihre Skalierbarkeit, ermittelt werden.

Diese prospektive SVA dient somit zunächst dem Ziel, herauszufinden, in welchem Maße das P2F-System gegenüber internen Störimpulsen und Ausfällen empfindlich ist (Sensitivitätsanalyse), um dann zu prüfen, inwieweit die Anpassungskapazitäten des Systems diese potenziellen Wirkungen zu kompensieren vermag.

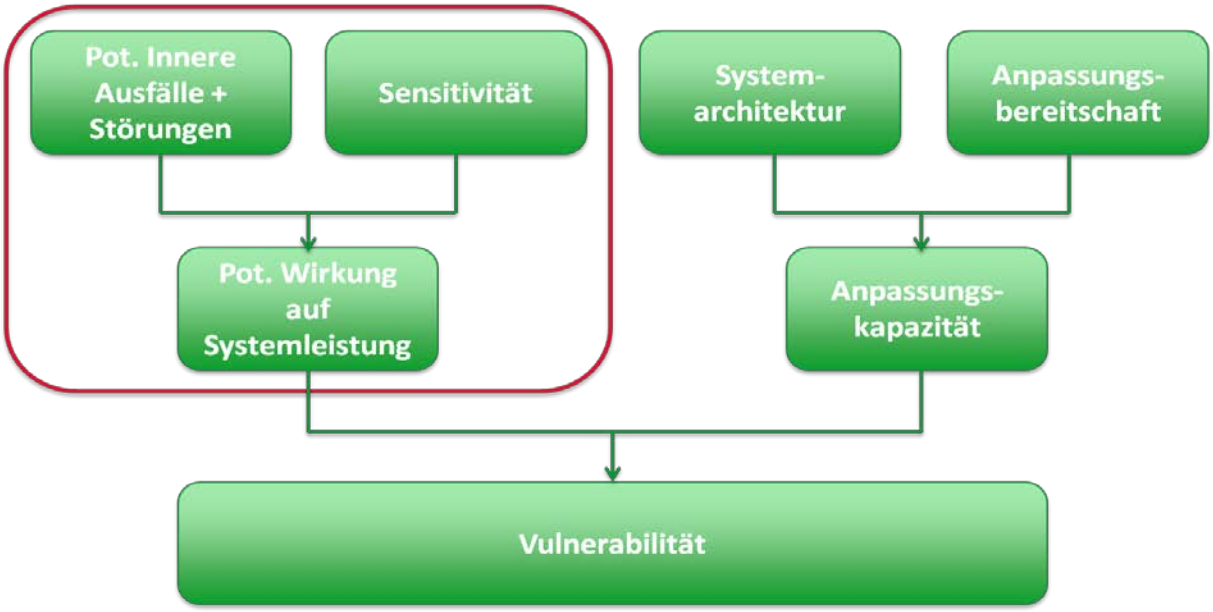


Abbildung 6.95: Schematische Darstellung zur Vorgehensweise bei einer strukturellen Vulnerabilitätsanalyse (eigene Darstellung).

Ein resilientes Design zielt zwar auf mehr als nur die Vorbereitung auf erwartbare Störungen und Ausfälle und die Überwindung analysierbarer Vulnerabilitäten. Nichtsdestotrotz liefern die Ergebnisse der SVA wichtige Beiträge für ein resilientes Design der Errichtung und Einbindung von P2F-Anlagen in das deutsche Energiesystem der Zukunft.

Die Bearbeitung technologischer Fragestellungen erfolgte durch das Steinbeis-Forschungszentrum Bremen. Für die sozioökonomische Betrachtung wurde auf die Erkenntnisse aus den Kapiteln 6.5.1, 6.5.2 und 6.5.3 zurückgegriffen und diese um empirische Daten ergänzt.

6.5.4.2 Anforderungen an die Systeminnovation P2F zur Erbringung der Systemleistungen

Der wichtigste Beitrag der P2F-Systeme zur Resilienz des zukünftigen Energiesystems wird sich höchstwahrscheinlich daraus ergeben, dass wichtige Anteile des Mobilitätsbereichs, insbesondere der Rohstoff-, Werkstoff- und Warenlogistik (Schwerlast-, Schiffs- und Flugverkehr), auch bei einem weitreichenden und langanhaltenden Stromausfall aufrechterhalten werden können. Kraftstoffreserven können darüber hinaus in fast beliebig skalierbarer Größe angelegt und über lange Zeit vorgehalten werden.

Mit einem resilienten Design des Ausbaus und der Integration von P2F in das Energiesystem wird sich zudem ein Beitrag zur Stabilisierung der Stromnetze und zur Minderung der Netzbelastung erbringen lassen. Der Einsatz von P2F-Anlagen wird aufgrund der steuerbaren Elektrolyseure in der derzeitigen Diskussion mit dem Flexibilitätsbedarf im Stromsystem motiviert – befeuert auch durch die Tatsache, dass bereits heute vor allem in den nördlichen Bundesländern Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern und Niedersachsen große Mengen an Windstrom aufgrund von Netzengpässen abgeregelt werden (BNA 2016). Diese Strommengen werden zumeist als

Überschussstrom bezeichnet. Faktisch handelt es sich allerdings nicht um tatsächlich zu viel erzeugten EE-Strom, denn bisher sind in Deutschland nie über 100% des Strombedarfs durch erneuerbare Energien gedeckt worden. Das Problem liegt vielmehr darin, den erzeugten Strom an die Verbraucher weiterzureichen. Mit dem zwingend erforderlichen weiteren Zubau Erneuerbarer werden sich solche Netzengpasssituationen noch deutlich verschärfen – mit der Folge der gerade erfolgten regulatorischen Drosselung der Errichtung neuer EE-Stromerzeugungsanlagen durch das EEG (Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. 2016). Ein wichtiges Kriterium bei der Entwicklung eines Konzepts für die Integration von P2F-Anlagen ist demnach auch die strategische Standortwahl.

Neben einer dezentralen erzeugernahen Verortung von P2F-Anlagen ist auch ein zentraler ausgerichtetes P2F-Konzept z.B. an Raffineriestandorten denkbar. Für diese stehen weniger ein netzdienlicher Betrieb, sondern eher ein hoher Wirkungsgrad (nicht zuletzt mit Blick auf die erreichbaren Vollaststunden) und hohe Produktionsraten im Vordergrund. Für die Integration des P2F-Konzeptes in das Energiesystem kommt es also auf ein ausgewogenes Verhältnis von zentralen und dezentralen Ansätzen an, damit alle Systemleistungen erfüllt werden können. Einen wichtigen Bestandteil der Vulnerabilitätsanalyse stellen deshalb die Prüfung der technischen Realisierbarkeit von zentralen und dezentralen Konzepten sowie die Prüfung ihrer sozio-ökonomischen Potenziale dar.

6.5.4.3 Technologische Fragestellungen

In enger Kooperation mit dem Steinbeis-Forschungszentrum Bremen wurden technologiebezogene Schwachstellen des P2F-Konzepts geprüft. Für die gängigen Technologien und Verfahrensschritte wurden aufbauend auf dem Stand der Technik die Skalierbarkeit, ggf. auftretende Skalierungsgrenzen und deren Ursachen analysiert:

1. Niedertemperatur (NT) und Hochtemperatur (HT) Elektrolyseverfahren
2. Methanisierung
3. Fischer-Tropsch-Synthese

Für die einzelnen Technologien wurden zwei weitere Themenkomplexe untersucht:

1. *Flexibler Betrieb/ Netzdienlichkeit*: Mit der Forderung nach einem flexiblen dynamischen Betrieb von P2F-Anlagen erhöhen sich die Ansprüche an das zu entwickelnde Anlagendesign. Sowohl thermische als auch mechanische Belastungen einzelner Anlagenkomponenten werden in der Regel durch Lastgradienten verstärkt, welche aus einem dynamischen Betrieb resultieren. Dadurch können beispielsweise die eingesetzten Katalysatoren Schaden nehmen. Die Flexibilität wird außerdem durch die Komplexität der in den Anlagen ablaufenden chemischen Reaktionen eingeschränkt. Insbesondere bei der Fischer-Tropsch-Synthese, aber auch bei der Elektrolyse und beim Sabatier-Prozess kann die

Qualität der Produktgase bzw. Flüssigkraftstoffe bei dynamischer Betriebsweise beeinträchtigt werden. Durch Zwischenspeicherung von Strom, Wasserstoff und CO_2 könnte die Flexibilität des Prozesses allerdings zumindest im ersten Schritt, also der Elektrolyse und vor dem Sabatier- oder Fischer-Tropsch-Prozess unterstützt werden. Die für einen dynamischen Betrieb erforderlichen Randbedingungen und mögliche Einschränkungen werden in der Analyse betrachtet.

2. *Kritikalität der Materialien*. Die typischerweise zum Einsatz kommenden Katalysatoren werden evaluiert und der Mengenbedarf, bezogen auf die Produktionsleistung, untersucht. Insbesondere für die Elektrolyse werden teilweise in der langfristigen Versorgung als ‚kritisch' eingestufte Elemente eingesetzt. Für den Bau der Methanisierungsreaktoren und FT-Anlagen werden vorrangig große Mengen Stahl benötigt.

Gemäß der SVA-Methodik wird dabei für ermittelte Schwachpunkte die Sensitivität und Anpassungskapazität der Systemkomponenten gegenüber ihrem potentiellen Ausfall bzw. einer Störung untersucht.

1. Elektrolyse-Verfahren

Für alle P2F-Prozesse ist die Wasserstoffherstellung der erste Schritt. Für eine Treibhausgasemissionsreduktion um mindestens 85% gegenüber 1990 bis 2050 (vgl. Klimaschutzziel der Bundesregierung) rechnen Henning und Palzer mit einer Elektrolyseleistung von 5 GW bis zum Jahr 2025, alleine für die Erzeugung von Wasserstoff als Endprodukt. Bis 2033 wird mit 15 GW eine immer noch vergleichsweise geringe Kapazität veranschlagt, welche bis 2050 allerdings auf eine benötigte Leistung von 70 GW ansteigt. Hinzu kommt eine weitere Elektrolyseleistung von 20 GW zur Herstellung von Methan und 5 GW für die Flüssigkraftstoffproduktion. Wird das Reduktionsziel auf 90% erweitert, steigt der Elektrolysebedarf auf fast 200 GW an (Henning und Palzer 2015).

Die Anlagentechnologie für die alkalische Elektrolyse (AEL) ist bereits lange im Multi-MW-Bereich erfolgreich erprobt, auch wenn bisher lediglich 4% des weltweiten Wasserstoffbedarfs über Elektrolyse produziert werden. Mit einer Anlagenkapazität von 33.000 Nm^3-H_2h^{-1} wurde die größte Elektrolyseanlage der Welt bereits 1970 in Ägypten in Betrieb genommen (Carmo et al. 2013). Unter der Annahme eines Stromverbrauchs von 5 kWh/m^3 entspräche dies einer elektrischen Anlagenleistung von 165 MW. Auf dieser Basis kann angenommen werden, dass, ohne Berücksichtigung etwaiger Fluktuationen, die Energie eines großen Windparks, bspw. bestehend aus 80 Windturbinen, erfolgreich chemisch umgewandelt werden könnte.

Bisher gibt es praktisch kaum Erfahrungen mit dem Betrieb und der Sensitivität der Elektrolyse gegenüber schwankenden Stromflüssen. Nickelbasierte Katalysatoren werden bisher standardmäßig in Anoden für die alkalische Elektrolyse eingesetzt. Unter konstanten Betriebsbedingungen sind diese Katalysatoren zwar äußerst stabil, bei Lastschwankungen korrodieren sie jedoch

schnell, wodurch sich ein höherer Energiebedarf ergibt und die Lebensdauer des Elektrolyseurs stark eingeschränkt wird (Ichikawa et al. 2014). Ein dynamischer Betrieb erzeugt außerdem eine hohe thermo-mechanische Belastung der Katalysatorschichten, wodurch der Katalysator beschädigt oder sogar ganz zerstört werden kann (Hüppmeier et al. 2010). Unter diesem Aspekt eignet sich die alkalische Elektrolyse also weniger für einen flexiblen Einsatz, sondern eher für einen konstanten Betrieb. Die Erbringung der ersten Systemleistung, nämlich die Entlastung von Stromübertragungsnetzen an dezentralen Standorten, kann also durch alkalische Elektrolyseure nicht geleistet werden.

Das Problem der Degradation von Katalysatoren taucht bei der Polymer-Exchange-Membrane Elektrolyse (PEMEL) kaum auf. Die PEMEL zeichnet sich durch eine hohe Reinheit der Produktgase aus und wird deshalb auch als besonders sichere Technologie angesehen. Ein weit verbreiteter Einsatz kann allerdings aufgrund der eingesetzten Materialien kritisch sein. Zudem gibt es bisher kaum Erfahrung im großskaligen industriellen Maßstab. Im Energiepark Mainz ist immerhin eine 3,9 MW große Anlage zur Nutzung von Strom aus nahegelegenen Windkraftanlagen erfolgreich in Betrieb (Energiepark Mainz 2016). Standardmäßig kommt Platin auf Seite der Kathoden zum Einsatz und damit eine teure und begrenzte Ressource. Unter der Annahme eines Platinbedarfs von 0,5 mg cm^{-2} in einer Kathode (Grigoriev et al. 2011) und einer Leistungsdichte von 5 Wcm^{-2} ergibt sich für 10 GW installierter PEM-Elektrolyseleistung ein Platinbedarf von 1000 kg (Carmo et al. 2013). Dies entspricht etwa 0,5% der weltweiten Platinnachfrage des Jahres 2014 mit 218 t (USGS National Minerals Information Center 2016). Alonso et al. rechnen mit einem Bedarf an Platin zwischen 400 und 1.200 Tonnen im Jahr 2050. In dieser Rechnung ist eine Nutzung von Platin für Elektrolyseure jedoch nicht enthalten, so dass der tatsächliche Bedarf bei einer weltweiten Anwendung von PEM-Elektrolyseuren deutlich höher liegen könnte. Die Erschließung neuer Abbaugebiete könnte neben ihrer ökologischen Bedenklichkeit auch zu höheren Preisen des Rohstoffes führen. Loferski gibt eine Verfügbarkeit globaler Reserven (Anteil der Ressourcen, welche das Potential aufweisen, ökonomisch erschlossen zu werden) von 66.000 t an Platinmetallen an (USGS National Minerals Information Center 2016). Unter diesen Aspekten könnten PEM-Elektrolyseure für dezentrale Konzepte geeignet sein, während für einen zentralen Ansatz mit geringerem Flexibilitätsbedarf auf die AEL zurückgegriffen werden könnte und sich damit der Gesamtbedarf an Platin reduzieren ließe. Unter dem Aspekt der Prozesssicherheit könnte die PEMEL-Technologie zudem auch in Wohngebieten eingesetzt werden und so, gekoppelt mit einer Brennstoffzelle, innerhalb regionaler Energiesysteme die Fluktuation der erneuerbaren Stromerzeugung kompensieren.

In der Forschung gibt es eine anhaltende Debatte zum Risiko und Nutzen des Betriebs von PEM-Elektrolyseuren unter hohem Druck. Mit dem hohen Druckniveau ergeben sich Vorteile durch den möglichen Verzicht auf einen nachgeschalteten Kompressor, wodurch der Energieverbrauch der Gesamtanlage gesenkt werden kann. Als nachteilig erweisen sich eine geringere Lebensdauer

von Anlagenkomponenten durch Wasserstoffkorrosion und Sicherheitsprobleme aufgrund möglicher explosiver Produktgasvermischungen. Für beide Niedrigtemperatursysteme können Wirkungsgrade von 70-80% erzielt werden.

Mit dem neueren Hochtemperaturkonzept (Solid Oxide Electrolysis Cell, SOEC), bei dem ein Teil der Reaktionsenthalpie durch Wärme eingebracht wird, kann der Wirkungsgrad um über 20 % erhöht werden (Wang et al. 2014). Die Hochtemperaturelektrolyse erfordert allerdings eine entsprechende Wärmequelle und Anlagenisolierung. Zur Sensitivität von SOEC-Elektrolyseuren gegenüber einem intermittierenden Betrieb aufgrund eines fluktuierenden EE-Stromangebots gibt es bisher kaum Erkenntnisse. Insbesondere die Langzeitstabilität von Bauteilen könnte aufgrund der wechselnden thermischen Belastung ein Problem darstellen. Für konstante Anwendungen und großskalige Produktion ist die Hochtemperatur-Elektrolyse nach derzeitigem Kenntnisstand aufgrund der hohen Effizienz und der Möglichkeit der Einbindung von Abwärme aus externen Prozessen an Industriestandorten oder aus nachgeschalteten Prozessschritten gut geeignet zu sein. Derzeit ist diese Technologie allerdings noch am teuersten. Durch Skaleneffekte aufgrund von Serienproduktion (vgl. Kapitel 6.5.3) ist mit deutlich sinkenden Kosten zu rechnen, so dass in Kombination mit dem hohen Wirkungsgrad ein höheres Wirtschaftlichkeitspotential gegenüber den Niedrigtemperaturvarianten entsteht.

2. Sabatier-Prozess

Laut Henning et al. werden bis 2030 3 GW Leistung für die synthetische Methanherstellung benötigt, was 500 Anlagen vom Typ der bisher größten Pilotanlage in Werlte entspräche. Bisher werden die relativ kleinen Pilotanlagen zur Methanisierung mit großen Pufferspeichern ausgestattet. Deren Volumen könnte deutlich reduziert werden, wenn eine dynamische Produktion möglich wäre. Eine inkonstante Gasproduktion würde allerdings die Katalysatoren-Lebensdauer durch thermische Belastung reduzieren, insbesondere durch die Bildung von so genannten Hotspots. Hier bedarf es eines verbesserten Wärmetransports, um solche Hotspots zu vermeiden.

Bisher werden meist Nickel-Katalysatoren in Methanisierungsreaktoren eingesetzt. Ein noch aktiveres Material und somit für den Einsatz interessant wäre Ruthenium. Für Festbett-Reaktoren mit einer Umsetzungsrate von 1,7 kg/(m²s) wird eine Ruthenium-Beladung von 3,5 g pro m^2 benötigt (Kiewidt und Thöming 2015). Für eine benötigte Gesamtkapazität von 20 GW, wie sie von Henning et al. beziffert wird, würden demnach 5,8 Tonnen Ruthenium eingesetzt. Dies entspräche etwa 0,1% der weltweiten Reserven an Platingruppenmetallen (USGS National Minerals Information Center 2016). Beim Einsatz von Nickel würden aufgrund der geringeren Katalysatoraktivität höhere Temperaturen für die gleiche Umsetzungsrate benötigt. Höhere Temperaturen wirken sich jedoch negativ auf das thermodynamische Gleichgewicht aus und bewirken eine geringere Ausbeute (Biegger et al. 2016). Eine höhere katalytische Aktivität als Nickel besitzt auch

Kobalt. Bei geeigneter Partikelgröße reichen Temperaturen von 300 °C aus, um eine höhere Umsetzungsrate als mit Nickel-Katalysatoren zu erreichen (Schubert et al. 2016). Kobalt besitzt eine ähnlich gute Verfügbarkeit wie Nickel und weist damit einen Vorteil gegenüber Ruthenium auf. Ein Einsatz ist bisher allerdings nur im kleinen Maßstab erforscht und müsste für eine großskalige Anwendung geprüft werden.

Unter der Annahme, dass die Aktivität von Nickel 10% der Aktivität von Ruthenium entspricht, würden für 20 GW Anlagenleistung etwa 60 Tonnen benötigt. Dies entspricht etwa 0,03% der jährlichen Nickelproduktion Australiens (Bureau f Resources & Energy Economics (BREE), Australian Government 2016). Es ist deshalb nicht zu erwarten, dass ein großskaliger Einsatz von Methanisierungsanlagen mit Nickelkatalysatoren durch Materialengpässe eingeschränkt wird. In dezentral und gekoppelt an ein fluktuierendes Stromangebot betriebenen Methanisierungsanlagen könnten, wie bei der Elektrolyse, ggf. stabilere aber auch ressourcenkritischere Katalysatoren eingesetzt werden. Auf diese Weise könnten Anlagenerweiterungen wie Pufferspeicher eingespart werden. Für großskalige, zentrale Anwendungen empfiehlt sich hingegen der Einsatz von günstigeren Materialien mit hoher Verfügbarkeit.

Der theoretische Wirkungsgrad der Methanisierung beträgt 82,98% (Jentsch 2015). Die verbleibenden Verluste sind der Exothermie der Reaktion geschuldet und werden in Form von Wärme freigesetzt. Zudem wird eine totale Umsetzung des Wasserstoffs in der Praxis nicht erreicht. Daraus folgt, dass das eingesetzte CO_2 und Wasserstoff anteilig im Produktgas verbleiben. Für die meisten Anwendungen muss das Methan deshalb noch energie- und kostenaufwendig gereinigt werden. In der weiteren Prozessoptimierung kommt es deshalb vor allem darauf an, mit möglichst günstigen Katalysatoren eine hohe Umsetzungsrate zu erzielen. Dabei gilt: Je höher die Aktivität des eingesetzten Materials, desto kürzer ist die benötigte Reaktorlänge, um eine entsprechende Umsetzungsrate zu realisieren. Mit einer kürzeren Reaktorlänge würden die Investitionskosten aufgrund der geringeren Menge an benötigtem Stahl sinken.

3. Fischer-Tropsch-Synthese

Die Fischer-Tropsch Synthese ist ein weit entwickeltes, großtechnisches Verfahren und wurde bereits über Jahrzehnte zur Kohleverflüssigung mit Produktionsraten von etwa 1 Millionen Tonnen Diesel pro Jahr eingesetzt. Sie basiert auf einem wesentlich komplizierteren Reaktionsmechanismus im Vergleich zum Sabatier-Prozess. Kohlenstoffmonoxid (CO) und Wasserstoff werden in vielfältige gasförmige und flüssige Kohlenwasserstoffe unterschiedlicher Kettenlänge umgewandelt. Aufgrund der Komplexität des Verfahrens gibt es bisher ausschließlich stationäre und großskalige Anwendungen. Erste Versuche eines „down-scalings“ haben sich als große Herausforderung erwiesen. Dennoch gibt es vielversprechende Ansätze mit Mikroreaktoren, mit denen eine CO-Umsetzung von 75% erreicht werden kann (LeViness et al. 2014).

Die Fischer-Tropsch-Synthese ist stark exotherm und erfordert ständige Kühlung, um Hotspots oder gar so genanntes thermisches Durchgehen zu verhindern. Letzteres bedeutet, dass bei mangelnder Kühlung ein sich selbst verstärkender Prozess ausgelöst wird, der schließlich zur Explosion der Anlage führen kann. Auch in Bezug auf die Produktqualität ist ein optimales Wärmemanagement zwingend erforderlich. In Abhängigkeit von der Temperatur entsteht bei der Fischer-Tropsch-Synthese ein Produktmix aus Alkanen, Alkenen, Alkoholen und weiteren sauerstoffhaltigen Kohlenwasserstoffen. Wie bei Rohöl, müssen die FTS-Produkte deshalb für eine Anwendung als Kraftstoff raffiniert werden. Änderungen in der Produktzusammensetzung erhöhen den Aufwand der anschließenden Produktaufbereitung in der Raffinerie, wodurch die Umsetzung eines dynamischen Betriebs zusätzlich erschwert wird. Ein dezentraler und dynamischer Einsatz von FT-Reaktoren erscheint deshalb aus heutiger Perspektive als unwahrscheinlich.

Nach Henning et al. wird bis zum Jahr 2030 eine Anlagenkapazität von 5 GW zur Herstellung synthetischer Flüssigkraftstoffe benötigt. Eine großtechnische Anlage zur Umwandlung von Synthesegas in Flüssigkraftstoff existiert in Pearl, Katar, mit einer Produktionsleistung von 140.000 BPD (barrel per day, entspricht einer Anlagenleistung von etwa 170 MW). Eine großtechnische Umsetzung ist also durchaus möglich. Für eine Kapazität von 5 GW müssten allerdings mehr als 20 solcher Anlagen in Deutschland errichtet werden. Dennoch erscheint es aus technischer Sicht durchaus machbar, große Mengen an synthetischen Kraft- und Rohstoffen für die Versorgung des Verkehrs und der Industrie herzustellen.

Als relevante Katalysatoren für zukünftige Anwendungen werden Eisen, Kobalt und Ruthenium gesehen. Während letztere während des Prozesses in einem metallischen Zustand verbleiben, entstehen in Eisen-Katalysatoren verschiedene Oxide und Karbide, die die katalytische Aktivität einschränken können. Ein Vorteil von Eisen ist dagegen seine hohe Verfügbarkeit (4. häufigstes Element der Erdkruste). Für 5 GW Leistung würden etwa 200 Tonnen an Katalysatormaterial benötigt, eine Menge, die mit Blick auf die Gesamteisenproduktion vernachlässigbar ist. Auch Kobalt ist mit einer jährlichen Produktion von 67.000 Tonnen pro Jahr aus heutiger Sicht unkritisch (USGS National Minerals Information Center 2016). Ruthenium ist hingegen viel zu teuer für eine Anwendung als Hauptkatalysatormaterial in diesem Maßstab. Doch auch als Nebenkomponente mit einem Anteil von 1 Gew.-% würden etwa 2,5t benötigt werden, was im Vergleich zum globalen Verbrauch im Jahr 2014 mit 27t immer noch viel ist.

Wie auch bei der Methanisierung sind die Katalysatoren (zumindest im Falle von Eisen, Kobalt und Nickel) bezüglich der Investitionskosten für Fischer-Tropsch-Anlagen unkritisch. Die Kosten der Anlagen werden maßgeblich durch den benötigen Stahl für Rohrleitungen, Reaktoren und Kessel bestimmt.

6.5.4.4 Sozio-ökonomische Fragestellungen und CO_2-Verfügbarkeit

Im vorherigen Unterkapitel wurde deutlich, dass die technische Umsetzbarkeit sowohl von zentralen, großen und konstant gefahrenen als auch von kleinen dezentralen und dynamisch gefahrenen P2F-Konzepten grundsätzlich gegeben ist. Im Fokus des folgenden Teilabschnittes liegen zunächst Fragen zur wirtschaftlichen Tragfähigkeit dezentraler P2F Konzepte. Im Anschluss bilden die Abschätzung von Grenzen der gesellschaftlichen Akzeptanz gegenüber P2F-Konzepten sowie die Ermittlung von Verfügbarkeitspotentialen der für die Prozesse benötigten Ressource CO_2 einen zweiten thematischen Schwerpunkt.

6.5.4.4.1 Ökonomische Untersuchung von dezentralen P2F-Konzepten

Kapitel 6.5.3 hat sich im Rahmen der agentenbasierten Modellierung bereits ausführlich mit Wirtschaftlichkeitspotentialen beschäftigt. Dabei wurde deutlich, dass erfolgreiche Geschäftsmodelle selbst bei hohen Betriebsraten mit bis zu 6.000 Volllaststunden lediglich durch konsequente Förderung, bei deutlich ansteigenden Preisen für fossile Energieträger sowie vor allem durch die Einführung konsequenter Klimaschutzmaßnahmen realisiert werden können. Es ist daher naheliegend, dass für dezentrale Konzepte zur lokalen Nutzung von Stromerzeugungsspitzen ein wirtschaftlicher Betrieb noch schwieriger zu erreichen ist. Die Wirtschaftlichkeit von P2F-Konzepten hängt unmittelbar von der Höhe der Investitionskosten, den Preisen für den Bezugsstrom, der Abgabenlast, der Höhe der Auslastung und schließlich den erzielbaren Erlösen ab. Für eine Bewertung der Wirtschaftlichkeitspotenziale von dezentralen dynamischen P2F-Konzepten bietet sich daher die Aufstellung von zwei nach der Zielperspektive ausgerichteten Fallbeispielen an:

a. Eine P2F-Anlage ist direkt mit einer EE-Stromerzeugungseinheit verbunden und wird so ausgelegt, dass nicht in das Stromnetz integrierbare Überschüsse zur Produktion synthetischer Kraftstoffe verwertet werden.
b. Eine P2F-Anlage ist direkt mit einer EE-Stromerzeugungseinheit verbunden, welche vorrangig zum Zweck der Produktion synthetischer Kraftstoffe errichtet wurde und nur überschüssigen Strom, der von der P2F-Anlage nicht aufgenommen werden kann, in das Netz einspeist.

Die Motivation für das Fallbeispiel a. ist eine Verminderung des Netzausbaus, indem die nicht ableitbaren Strommengen direkt genutzt werden. Aufgrund der Tatsache, dass der Netzausbau bundesweit dem Ausbau erneuerbarer Energien hinterherhinkt (unter anderem aufgrund von Akzeptanzproblemen, Bundesnetzagentur 2012), wäre ein solches Anwendungsszenario von P2F attraktiv und entspräche der ursprünglichen Motivation zur Integration des P2F-Konzeptes in das Energiesystem: Stromüberschüsse in Zeiten hoher Produktion chemisch zu speichern und diese dann in anderen Sektoren zu nutzen oder in Zeiten geringer Stromproduktion zurück zu verstromen. Angesichts der Kritik an der Abregelung von EE-Stromerzeugern aufgrund von Netzengpässen könnte eine solche Ausrichtung von P2F-Anlagen gesellschaftliche Akzeptanzprobleme

und damit auch die Vulnerabilität der Energiewende mindern. Die Deutsche Energie-Agentur rechnet in einer Studie mit einer Begrenzung der Einspeisung von Onshore Wind- und Photovoltaikstrom auf 80% bzw. 70% der jeweiligen maximalen Erzeugungsleistung (Deutsche Energie-Agentur 2012), da die Kosten für den Netzausbau für die vollständige Integration erneuerbaren Stroms antiproportional zum zusätzlichen Energiegewinn steigen. Brunner et al. haben basierend auf Lastprofilen und unter der Annahme von 4.000 Stromerzeugungsstunden für Photovoltaik und 7.000 Stromerzeugungsstunden für Onshore Windkraft sowie unter Einbezug der Einspeisedrosselung auf 70% bzw. 80% der theoretischen Anlagenspitzenleistung die durchschnittliche Abregelungsdauer berechnet. Photovoltaikstrom würde demnach jährlich für 83 Stunden abgeregelt, Onshore Windstrom für 46 Stunden pro Jahr (Brunner et al. 2015). Aus dieser Berechnung wird deutlich, dass sich unabhängig von der Skalierung einer dezentralen P2F-Anlage nur eine äußerst geringe Auslastung von weit unter 100 Volllaststunden ergeben würde. Daraus lässt sich schließen, dass selbst bei kostenlosem Strom- und CO_2-Bezug unter der Berücksichtigung der hohen Investitionskosten nicht annähernd ein rentabler Betrieb erreicht werden kann. Auch durch eine deutliche Degression der Investitionskosten, wie sie unter 6.5.3 angenommen wurde, lassen sich keine entscheidenden Kostenersparnisse erzielen. Anstelle einer Kostendegression ergäben sich jedoch ohnehin durch den im vorherigen Unterkapitel 6.5.4.3 diskutierten Mehraufwand für den erforderlichen flexiblen Betriebsmodus voraussichtlich weit höhere Investitionskosten. Ohne Berücksichtigung eines solchen Mehraufwandes rechnen Brunner et al. mit Produktionskosten zwischen 6,11-1,76 € kWh^{-1} für die Produktion von Wasserstoff. Die Produktion von Methan wäre aufgrund einer geringeren Effizienz und höheren Investitionskosten nochmals wesentlich teurer. Das Verfahren zur Flüssigkraftstoffproduktion scheint aufgrund der schwierigen Prozessführung unter einer solch geringen Auslastung auch technisch kaum realisierbar. Die Wirtschaftlichkeit eines dezentralen (kleinskaligen) dynamischen P2F-Konzeptes stellt also eindeutig einen Schwachpunkt mit hoher Sensitivität dar.

Im Fallbeispiel b. wird der direkte Strombezug von erneuerbaren Erzeugern angenommen, welche extra für die Produktion synthetischer Kraftstoffe zugebaut wurden. Folglich muss unter dieser Annahme mit Strombezugskosten gerechnet werden, mit denen die Investitionskosten der EE-Erzeugungsanlage über ihre Lebensdauer amortisiert werden können. Mit der direkten Kopplung von Anlagen zur Erzeugung und Wandlung erneuerbaren Stroms ergeben sich Vorteile, da das öffentliche Stromnetz nicht belastet wird und entsprechende Umlagen, Steuern und Entgelte für die Nutzung des Netzes entfallen. Aus Sicht der Resilienz ist diese Art der Umsetzung zudem vorteilhaft, da die Brenn-, Roh- und Kraftstoffversorgung zumindest zum Teil auch bei massiven Ausfällen innerhalb des Stromnetzes aufrechterhalten werden könnte. Für eine hohe Auslastung und geringe Produktionskosten ist eine optimale Dimensionierung der Eingangsleistung der P2F-Anlage im Verhältnis zur Ausgangsleistung des EE-Erzeugers nötig. Die P2F-Anlage sollte zur

Optimierung der Produktionskosten wesentlich kleiner ausgelegt werden, was allerdings zur Folge hat, dass nicht die gesamte Produktionsleistung des EE-Erzeugers genutzt werden könnte.

Nach Kost et al. liegen die Stromgestehungskosten aus Onshore Windkraft und Photovoltaik derzeit je nach Auslastung bzw. Standort zwischen 4,5-10,9 ct kWh^{-1} bzw. 8-14 ct kWh^{-1} und erreichen ein Preisniveau zwischen 4,2-10,2 ct kWh^{-1} bzw. 5,5-9,5 ct kWh^{-1} (Kost et al. 2013). Unter der Annahme eines optimistischen Szenarios, in dem die untere Preisgrenze der Stromgestehungskosten erreicht wird, bei gleichzeitig relativ hoher Auslastung mit mehreren tausend Volllaststunden und deutlich ansteigenden Preisen für fossile Kraftstoffe (bspw. durch Klimaschutzmaßnahmen, vgl. Kapitel 6.5.3), könnten sich wirtschaftliche Geschäftsmodelle ergeben. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass zumindest die Elektrolyse angepasst an das Erzeugungsprofil der EE-Anlage und somit dynamisch betrieben werden muss. Inklusive entsprechender Pufferspeicher oder dynamischer Methan- bzw. Flüssigkraftstoffproduktion ist mit deutlich höheren Investitionskosten als in einem zentralen Konzept zu rechnen. In Bezug auf die Systemleistung der Entlastung von Stromübertragungsnetzen kann daher festgehalten werden, dass die mangelnde Wirtschaftlichkeit einen signifikanten Schwachpunkt darstellt.

6.5.4.4.2 CO_2-Verfügbarkeit

Neben erneuerbarem Strom ist insbesondere CO_2 eine essentielle Ressource für das P2F-Konzept. Reines CO_2 fällt insbesondere bei der energetischen Umsetzung von Biomasse an, etwa in Anlagen zur Bioethanolproduktion. Laut Öko-Institut fiel bereits 2008 in Deutschland aus der Bioethanolproduktion eine Tonne CO_2 an mit deutlich steigender Tendenz aufgrund der Verpflichtung zu höheren Biokraftstoffanteilen an den in Verkehr gebrachten Kraftstoffen gemäß Biokraftstoffquote bzw. Treibhausgasminderungsquote (Hermann et al. 2012). Ein deutlich größeres Potential liegt in der Abtrennung von CO_2 aus Rohbiogas vor, bei dem der CO_2-Anteil bei rund 40% liegt (Fischedick et al. 2015). Laut Paragraph 31 der Gasnetzzugangsverordnung soll die Biogaseinspeisung im Jahr 2030 10 Mrd. Kubikmeter betragen, so dass bis zu 13 Mio. Tonnen Kohlenstoffdioxid anfallen könnten. Berücksichtigt man jedoch zunehmende Flächennutzungskonflikte ist es jedoch zweifelhaft, ob zukünftig biogenes CO_2 aus Biogasanlagen in diesen Mengen produziert werden kann. Darüber hinaus rechnen zahlreiche Studien damit, dass Biokraftstoffe und der Anbau von Energiepflanzen allgemein in Zukunft keine große Rolle spielen werden.

Neben der Option der Abtrennung von biogenem CO_2 besteht auch die Möglichkeit des CO_2-Bezugs aus fossilen Industrieabgasen. Durch Verwendung von CO_2 aus diesen Quellen würden allerdings keine Treibhausgasemissionen eingespart. Das CO_2 würde lediglich einmal recycled werden und bei der Verbrennung des synthetischen Kraftstoffes letztlich doch in die Atmosphäre gelangen. Die Nutzung von fossilem CO_2 wird aus diesem Grunde an dieser Stelle nicht weiter verfolgt.

Eine nahezu unerschöpfliche CO_2-Quelle bietet die Atmosphäre. Die Nutzung von CO_2 aus der Atmosphäre würde einen echten Kreislauf eröffnen. Hierbei ist allerdings die geringe vorfindbare Konzentration und somit der hohe Aufwand für die CO_2-Gewinnung von Nachteil. Unabhängig davon welche Technologie zur Abscheidung genutzt wird, ergibt sich für die Gewinnung einer Tonne CO_2 aufgrund der geringen Konzentration in der Atmosphäre ein Durchlauf von 3 Millionen Kubikmetern Luft (Zeman 2007). So rechnet Sterner mit einem Energiebedarf von 2,28 MWh für die Abscheidung von einer Tonne CO_2 aus der Umgebungsluft (Sterner 2009b). Neben dem hohen Energieaufwand, der nach Trost et al. den Wirkungsgrad eines Power-to-Fuel Prozesses durchschnittlich um 15% reduziert, sind die zusätzlichen Kosten für Technologie zur Abscheidung von Nachteil (Trost et al. 2012). Nach einer breiten Marktdurchdringung könnten die Kosten pro Tonne CO_2 zukünftig bei 22 Euro liegen (Fox 2011a).

Basierend auf der Annahme, dass für eine Megawattstunde Methan 0,2 t CO_2 benötigt werden, lässt sich der absolute CO_2-Bedarf für verschiedene Szenarien berechnen[105]. So rechnet bspw. das Umweltbundesamt für Deutschland mit einem mittleren Methan-Bedarf von jährlich 55 TWh zum Zwecke der Rückverstromung, was einem CO_2-Bedarf von ca. 11 Mio. t CO_2 entspricht (Klaus et al. 2010). Im Verkehr soll der Endenergiebedarf laut Ziel der Bundesregierung bis 2050 auf etwa 417 TWh pro Jahr sinken (Hauke Hermann, Lukas Emele, Charlotte Loreck 2014). Unter der Annahme, dass 50% dieses Energiebedarfs durch synthetisches Methan gedeckt würden, ergäbe sich ein CO_2-Bedarf von 41,7 Mio. t. In der Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland“ im Auftrag des Umweltbundesamts wird ferner mit einem Bedarf an synthetischen Flüssigkraftstoffen von 552 TWh gerechnet. Der CO_2-Bedarf für die Herstellung von Flüssigkraftstoff mittels Fischer-Tropsch-Synthese lässt sich aufgrund der unterschiedlichen Kettenlängen der Kohlenwasserstoffe und der Water-Gas-Shift Reaktion schwieriger herleiten. Unter der Annahme eines CO_2-Bedarfs von 027-0,34 t pro MWh Rohölsubstitut ergäbe sich ein Kohlenstoffdioxidbedarf von 149-187,7 t.[106] Hinzu käme in diesem Extremszenario eine zusätzliche Menge von 118 Mio. t CO_2 zur Herstellung des Sektor übergreifenden Methanbedarfs, so dass insgesamt 267-305,7 Mio. t CO_2 benötigt würden.

In Kontrast dazu ergäbe sich nach Quaschning bei einer Energiesystemtransformation, mit der das internationale Ziel der Reduzierung der durchschnittlichen Erderwärmung auf 1,5 °C erreicht werden könnte, ein CO_2-Bedarf von 48,6-61,2 Mio. t pro Jahr für Deutschland bei einer konsequenten Umsetzung von Effizienzmaßnahmen (Quaschning 2016b).[107] Quaschning geht zudem davon aus, dass ein großer Anteil der synthetischen Flüssigkraftstoffe importiert wird, so dass

[105] Vgl. Systembeschreibung 6.5.1.3
[106] Vgl. Systembeschreibung 6.5.1.3
[107] Eigene Berechnung unter der Annahme, dass ein Bedarf an 180 TWh Flüssigkraftstoff besteht. Vgl. Studienauswertung in Kapitel 6.5.2.1

sich der nationale CO_2-Bedarf noch weiter reduzieren würde. Den Berechnungen liegt die Annahme zugrunde, dass P2F im Wärmesektor gar nicht benötigt wird und im Verkehr ein Großteil des Individualverkehrs direkt elektrifiziert wird.

Angesichts der ermittelten Potentiale wird deutlich, dass die effektivste und günstigste CO_2-Quelle aus Biomasse nur begrenzt zur Verfügung steht und für eine weitreichende Deckung des nationalen Kraftstoffbedarfs bei weitem nicht ausreicht. Unter Inkaufnahme von Effizienzeinbußen und höheren Investitionskosten zur CO_2-Abscheidung aus der Atmosphäre steht jedoch eine nachhaltige Quelle zur Verfügung.

6.5.4.4.3 Grenzen gesellschaftlicher Akzeptanz

Bei der bisherigen Umsetzung von P2F-Projekten sind keine Akzeptanzprobleme festgestellt worden. Auch Sicherheitsbedenken vor allem gegenüber der Nutzung von Wasserstoff sind bisher kaum gegeben (vgl. Zimmer 2013). Nach Stakeholder-Aussagen gibt es vielmehr eine vereinzelt auftretende erhöhte Zahlungsbereitschaft in den Bereichen der Gasversorgung und im Verkehr. Als Motivation wird die Förderung dieser jungen Innovation angegeben. Es lässt sich daraus ableiten, dass in dem P2F-Konzept vor allem ein wichtiges Element gesehen wird, das die Energiewende auch außerhalb des Stromsektors voranbringt. Insbesondere dezentrale P2F-Konzepte zur Nutzung nicht einspeisefähiger Erzeugungsspitzen dürften also auch langfristig keine Probleme bezüglich der Akzeptanz erfahren. In Regionen mit dem Ziel der energetischen Selbstversorgung wird P2F ebenfalls bereits als ein wichtiger Bestandteil der zukünftigen regionalen Energiesysteme gesehen. So wurde auf im Landkreis Osterholz und in der Stadt Wolfhagen vom Projekt Resystra durchgeführten Workshops deutlich, dass die lokalen Akteure in Hinblick auf das Ziel der regionalen Selbstversorgung P2F-Konzepte langfristig mit einplanen.

In der Fachliteratur wird Energiespeichern (und Wandlern) eine höhere Akzeptanz als dem Netzausbau beigemessen, denn Energiespeicher sind - mit Ausnahme der Pumpspeicher - im Unterschied zu Hochspannungsleitungen weitgehend akzeptiert. Dies kann in Zukunft von Bedeutung sein, wenn wirtschaftlichere Maßnahmen zum Vorantreiben der Energiewende, wie z. B. der Ausbau von Stromtrassen, aufgrund des Widerstandes aus der Bevölkerung nicht umgesetzt werden können (Sterner und Stadler 2014). Laut Bünger et al. werden Power-to-Gas Anlagen von den Energieversorgern mittelfristig als Möglichkeit angesehen, um die Auswirkungen von Netzengpässen abzumildern. Allerdings sind die Power-to-Gas Anlagen nur als Ergänzung zum Netzausbau zu sehen, um die Ausbaumaßnahmen reduzieren zu können (Bünger et al. 2014).

Schwieriger einzuschätzen ist die Situation bezüglich eines zentral ausgerichteten P2F-Konzepts zur großskaligen Deckung des nationalen Brenn-, Roh- und Kraftstoffbedarfs, da hierfür ein deutlicher Zubau an erneuerbaren Energien benötigt wird. Gegenwärtig können diesbezüglich kaum Aussagen getroffen werden. Bisher argumentieren Kritiker des Ausbaus von erneuerbaren Energien hauptsächlich damit, dass durch Windparks Landschaften verschandelt, Vögel getötet und

Anwohner belästigt werden. Dies wird vor allem auch unter dem Aspekt kritisiert, dass die Erneuerbaren in der Sektor übergreifenden Energieversorgung gerade einmal einen Anteil von 2,4% aufweisen und dennoch bereits weitläufig sichtbar sind (vgl. Etscheit 2016).

Trotzdem ist nach aktuellen Umfragen ein Großteil der Bevölkerung für einen weiteren Ausbau erneuerbarer Energien. Für 93% der deutschen Bevölkerung ist der Ausbau der erneuerbaren Energien wichtig bis außerordentlich wichtig. 62% der Befragten gaben an, dass sie es gut bzw. sehr gut finden, EE-Erzeugungsanlagen in der Umgebung ihres Wohnortes zu haben. Das ist im Vergleich zum Vorjahr zwar ein Rückgang um 6%, allerdings immer noch eine hohe Zustimmung. Die ‚Not In My Back Yard-Haltung' hält sich noch in Grenzen. Im Gegenteil: Es gibt eine höhere Zustimmung bei den Befragten, die bereits eine EE-Anlage in ihrer Umgebung haben (Agentur für Erneuerbare Energien 2016); (Hübner und Pohl 2015).

Nach dem Zentrum für Interdisziplinäre Risiko- und Innovationsforschung der Universität Stuttgart haben die folgenden Einflussgrößen eine relevante Auswirkung auf die Akzeptanz der Energieerzeugungstechnologie: Vertrauen in Akteure, allgemeine Einstellung zur Energiewende, wahrgenommene Fairness der Energiewende, wahrgenommener Nutzen der Energieerzeugungstechnologie und wahrgenommene Risiken bzw. Nachteile der Energieerzeugungstechnologien. Als Ergebnis der Untersuchungen ließen sich vier zentrale empirische Dimensionen für die Wahrnehmung der Energiewende ermitteln:

1. Vertrauen
2. Nutzen-Risiko-Kalkulation
3. Akzeptanz von Technologien
4. Fairness

Demnach sind Bürger nur gewillt den Umbau des Energiesystemsystems zu unterstützen, wenn sie von der Sinnhaftigkeit dieses Umbaus überzeugt sind. Dann sind sie auch bereit einen gewissen freiwilligen Beitrag zu leisten. Je besser die vier zentralen Dimensionen positiv erfüllt sind, desto höher ist auch ihre Zahlungsbereitschaft für die Transformation (Sonnberger et al. 2016).

In Bezug auf P2F kann keine abschließende Bewertung zur Akzeptanz gegeben werden. Es lässt sich jedoch grundsätzlich festhalten, dass durch eine Sektor übergreifende und nahezu vollständige Nutzung des produzierten EE-Stroms die Akzeptanz höher sein sollte, als wenn Anlagen abgeschaltet werden. Somit könnte P2F auch unter dem Gesichtspunkt der Akzeptanz einen Beitrag zur Energiewende leisten. Eine Vollversorgung aller Sektoren mit erneuerbaren Energien, mit einem erwartbar hohen Anteil an Onshore Windenergie erscheint allerdings als eher unwahr-

scheinlich, auch wenn entsprechende Flächenpotenziale zur Erzeugung der benötigten Energiemengen vorhanden wären.[108] Das Umweltbundesamt empfiehlt daher, große Teile des nationalen Brenn-, Roh- und Kraftstoffbedarfs über ausländische P2F-Produktion zu importieren (Purr, Osjek et al. 2016). Auch Offshore-Anlagen mit einem Fokus auf eine sich direkt Offshore anschließende Elektrolyse und einem küsten- und raffinerienahen Wasserstoff-Zwischenspeicher vor der Fischer-Tropsch-Synthese könnte auf geringeren Widerstand stoßen.

6.5.4.5 Durchführung und Ergebnisse der strukturellen Vulnerabilitätsanalyse

Nach der Untersuchung potentieller Restriktionen bzw. Störungen in der technischen und sozioökonomischen Realisierbarkeit von P2F-Konzepten können nun gemäß der SVA-Methodik die potentiellen Auswirkungen auf die Erbringung der definierten Systemleistungen bestimmt werden. Folgende potentielle Störungen werden für die strukturelle Vulnerabilitätsanalyse betrachtet, aufbauend auf den in den vorherigen Unterkapiteln durchgeführten Analysen:

- Materialengpässe (insbesondere Katalysatoren)
- Betriebsabhängige Degradationseffekte
- Dynamisierung - Prozessabhängigkeit von schwankender Ressourcenverfügbarkeit (Strom, Wasserstoff, CO_2)
- Grenzen der Skalierung von P2F-Anlagen
- Einschränkung von Konzepten durch mangelnde Wirtschaftlichkeit
- Einschränkung des Zubaus von P2F-Anlagen durch mangelnde Akzeptanz.

Wie in Tabelle 6.79 dargestellt, werden sowohl Einschränkungen in den Qualitätskriterien als auch der Erbringung der Systemleistungen als Folge von Schwachpunkten bewertet und nach den Kategorien „gering“, „mittel“ und „hoch“ klassifiziert.

Tabelle 6.79: Beurteilungsschema der Auswirkungen von potentiellen Störungen auf die Erbringung von den Systemleistungen.

	Erbringung der Systemleistung	
Qualitätskriterien	nicht beeinträchtigt	beeinträchtigt
nicht beeinträchtigt	geringe Auswirkungen	hohe Auswirkungen
Beeinträchtigt	mittlere Auswirkungen	hohe Auswirkungen

Es wird zudem jeweils die Anpassungskapazität des Energiesystems gegenüber den Störungen diskutiert. Nach dem Schema in Tabelle 6.80 kann abschließend die Vulnerabilität der Erbringung der Systemleistungen und der Erfüllung der Qualitätskriterien ermittelt werden.

[108] Vergleich Systembeschreibung zu Flächenpotentialen für die Erzeugung erneuerbaren Stroms.

Tabelle 6.80: Schema für die Bestimmung der Vulnerabilität anhand der Beurteilung von potentiellen Auswirkungen von Störungen und der Anpassungskapazität des Energiesystems.

Potenzielle Auswirkungen	Anpassungskapazität	Vulnerabilität
Gering	Gering	Mittel
	Mittel	Gering
	Hoch	Gering
Mittel	Gering	Hoch
	Mittel	Mittel
	Hoch	Gering
Hoch	Gering	Hoch
	Mittel	Hoch
	Hoch	Mittel

Potentielle Störungen in der Materialversorgung können auf Basis der oben ausgeführten Begutachtung letztlich als unkritisch eingestuft werden. Aufgrund der Vielfalt an einsetzbaren Katalysatoren für alle Prozesse ist die Sensitivität gegenüber Materialengpässen gering, so dass es nicht zu Einschränkungen in den Qualitätskriterien und in der Erbringung der Systemleistungen kommt.

→ geringe Auswirkung.

Die Anpassungskapazität gegenüber den Auswirkungen von Materialengpässen wird als mittel eingestuft, da aufgrund der Vielfalt einsetzbarer Katalysatoren Alternativen bereitgestellt werden können. Dennoch ist durch diese Alternativen gegebenenfalls mit Einschränkungen im vorgesehenen Betriebskonzept zu rechnen.

→ Anpassungskapazität mittel.

Vulnerabilität: Gering

P2F-Anlagen können technisch so ausgerichtet werden, dass eine verstärkte Degradation aufgrund unterschiedlicher Betriebsmodi (dynamisch, statisch, Teillast, Überspannung) vermieden werden kann. Dies kann entweder durch den Einsatz entsprechender Katalysatoren oder durch erweiterte Anlagenkonfigurationen mit Strom- und Wasserstoffspeichern erreicht werden. Aus rein technischer Perspektive ist die Erbringung der Systemleistungen deshalb ohne Einschränkungen in den Qualitätskriterien möglich.

→ geringe Auswirkung.

Durch Degradation geschädigte Anlagen könnten durch Redundanzen kompensiert werden (n-1 Kriterium). Die Anpassungskapazität des Energiesystems wird deshalb als hoch bewertet.

→ Anpassungskapazität hoch.

Vulnerabilität: Gering

Die Prozessabhängigkeit von einem schwankenden Ressourcenangebot lässt sich nur schwer eingrenzen. Insbesondere ergibt sich eine starke Abhängigkeit von der fluktuierenden Stromerzeugung. Durch entsprechende Zwischenspeicher kann die Prozessabhängigkeit allerdings vermindert werden. Bei einem entsprechenden Anlagendesign ist die Sensitivität also gegenüber solcher Schwankungen im Ressourcenangebot gering.

→ geringe Auswirkung.

Die Anpassungskapazität gegenüber Einschränkungen in der Ressourcenverfügbarkeit ist technisch ebenfalls durch Redundanzen und Diversität der Stromerzeugungsquellen hoch.

→ Anpassungskapazität hoch.

Vulnerabilität: Gering

Obergrenzen der Skalierung sind aus technischer Sicht nicht zu erwarten. Für alkalische Elektrolysesysteme sowie für Fischer-Tropsch-Anlagen sind industrielle Maßstäbe bereits lange erprobt. Bei der Methanisierung sind ebenfalls keine Einschränkungen für die Installation großskaliger Anlagen absehbar. Schwierigkeiten ergeben sich eher durch ein „Down-Scaling“ von Fischer-Tropsch-Anlagen aufgrund der komplexen Prozessführung. Eine kleinskalige, dynamisch betriebene Flüssigkraftstofferzeugung scheint deshalb technisch derzeit kaum realisierbar zu sein. Für die Erbringung der Systemleistungen und die Erfüllung der Qualitätskriterien ergibt sich technologieübergreifend dennoch keine Einschränkung.

→ geringe Auswirkung.

Gegenüber technischen Limitationen wie eingeschränkten Skalierungsoptionen ist die Anpassungskapazität des Energiesystems gering.

→ Anpassungskapazität gering.

Vulnerabilität: Mittel

Die Wirtschaftlichkeit von P2F-Konzepten stellt die schwierigste Herausforderung für deren Etablierung in das Energiesystem dar. Unter den derzeitig gegebenen Bedingungen ist ein wirtschaftlicher Betrieb sowohl von dezentralen als auch zentralen Ansätzen nicht absehbar. Die Erbringung aller Systemleistungen könnte aufgrund mangelnder Wirtschaftlichkeit langfristig massiv gefährdet sein. Durch regulatorische Maßnahmen könnten die Voraussetzungen geschaffen werden, unter denen für zentrale Konzepte erfolgreiche Geschäftsmodelle möglich werden. Eine dezentrale Ausrichtung von P2F-Anlagen ist hingegen auch langfristig nicht als wirtschaftlich anzusehen.

→ hohe Auswirkung.

Mangelnder Wirtschaftlichkeit kann durch diverse Maßnahmen auf der Systemebene Abhilfe geleistet werden. Dennoch sind Grenzen in der Anpassungskapazität gegeben. Eine zu starke Förderung beispielsweise von dezentralen P2F-Konzepten könnte zu sehr hohen Energiepreisen insgesamt führen. Doch auch zentrale Konzepte können gemäß Kapitel 6.5.3 nur zu hohen Preisen synthetische Kraftstoffe produzieren.

→ Anpassungskapazität mittel.

Vulnerabilität: Hoch

Durch mangelnde Akzeptanz für einen massiven Ausbau von erneuerbaren Energien wäre die Umsetzung von P2F-Konzepten nur eingeschränkt möglich. Die Versorgung aller Sektoren mit synthetischen Kraftstoffen wäre dadurch quantitativ limitiert, wenn die Menge an verfügbarem erneuerbarem Strom nicht ausreicht. Die Auswirkung auf die Erbringung der Systemleistungen wäre daher hoch.

→ hohe Auswirkung.

Mangelnder Akzeptanz gegenüber eines massiven EE-Ausbaus kann hingegen kaum durch entsprechende Maßnahmen entgegengewirkt werden. Die Anpassungskapazität auf nationaler Ebene ist deshalb als gering zu bewerten. Gleichwohl könnten Akzeptanzprobleme durch Importe umgangen werden.

→ Anpassungskapazität gering.

Vulnerabilität: Hoch

Insgesamt ergibt sich aus der prospektiven strukturellen Vulnerabilitätsanalyse, dass das P2F-Konzept technisch eine geringe bis mittlere Vulnerabilität aufweist. Unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit ergibt sich hingegen auch dauerhaft eine hohe Vulnerabilität. Ohne die Möglichkeit von Geschäftsmodellen kann das P2F-Konzept nur schwer in das Energiesystem integriert werden. Hohe Energiepreise könnten einen Akzeptanzverlust dieser Technologie hervorrufen. Bei mangelnder Akzeptanz gegenüber der Energiewende im Allgemeinen ergibt sich ebenfalls ein Problem in der Integration von P2F-Konzepten. Verlässt man die nationale Ebene in dieser Betrachtung, könnte das Problem der Akzeptanz allerdings durch Importe von P2F-Prdukten aus ertragreichen und abgelegenen Regionen gelöst werden. Abschließend kann festgehalten werden, dass P2F-Konzepte mit hohem monetärem Aufwand technisch umsetzbar sind. Dennoch

wurde deutlich, dass insbesondere für den Ausgleich von lokalen Netzengpässen andere Alternativen geeigneter sein könnten. Die Annahme, dass der Netzausbau durch P2F eingeschränkt werden kann, trifft daher nur begrenzt zu und sollte durch weitere Studien untersucht werden.

6.5.5 Beiträge von P2F zur resilienten Energiesystemgestaltung

Im Projekt Resystra, aber auch in der allgemeinen Fachliteratur, wird P2F als wichtiges Element der Energiewende und für die Gestaltung eines resilienten Energiesystems gesehen. Insbesondere das Thema Sektorkopplung wird in zukünftigen Phasen der Energiewende zunehmend an Bedeutung gewinnen[109] und das P2F-Konzept wird dabei voraussichtlich eine wichtige, wenn nicht gar zentrale Rolle spielen. In diesem Kapitel werden die Möglichkeiten von P2F zur Resilienzsteigerung des Energiesystems untersucht, indem seine möglichen Beiträge entlang der im Kapitel 2.5 vorgestellten Gestaltungselemente resilienter Energiesysteme diskutiert werden.

Das P2F-Konzept wird nicht für alle dieser Gestaltungselemente Beiträge leisten können. Im Unterschied zu den Fallbeispielen zur regionalen Selbstversorgung wird beim P2F-Konzept kein regionales Energiesystem untersucht, sondern ein technologisches Konzept. Dabei stehen vier Aspekte als Resilienz steigernd im Zentrum. Zum Ersten die Beibehaltung bzw. Erhöhung der Diversität der Energieträger, wenn neben Strom noch Flüssigtreibstoffe zur Verfügung stehen. Wenn der Strom längerfristig ausfällt, könnten zumindest noch zentrale (waren) logistische Funktionen aufrechterhalten und Notstromaggregate betrieben werden. Zum Zweiten die gute Speicherbarkeit der (im Notfall auch rückverstrombare) P2F-Produkte, was die Möglichkeit der Vorhaltung von nationalen Reserven für Gas und Treibstoffe eröffnet, zum Dritten – v.a. im Falle von Power-to-Gas - ein Notvorrat für die Wärmeversorgung und zum Vierten die nachhaltige Versorgung nicht nur der Chemischen Industrie, sondern auch der Metallurgie mit kohlenstoffhaltigen Rohstoffen. Alle diese Möglichkeiten können auch unter dem Oberthema einer intelligenten Kopplung der verschiedenen Energiesektoren diskutiert werden.

In Bezug auf das Gestaltungselement *Diversität* sollte deshalb zunächst nochmals auf eine der größten Einschränkungen in der Energiewende hingewiesen werden: Erneuerbarer Strom ist die derzeit einzige bekannte regenerative Energiequelle, welche ein voraussichtlich ausreichendes Nachhaltigkeitspotential zur Deckung des weltweiten Energiebedarfs aufweist. Auch für den P2F-Prozess ist (erneuerbarer) Strom als Energiequelle essentiell, so dass keine absolute, sondern nur eine zeitweise Unabhängigkeit vom Stromsystem geleistet werden kann und somit nur eine eingeschränkte *Ressourcendiversität* vorliegt. Indirekt kann die Stromabhängigkeit mit P2F jedoch trotzdem deutlich reduziert werden. Einerseits sind die hergestellten synthetischen Gase und Flüssigkraftstoffe gut und lange in den vorhandenen Infrastrukturen zu speichern, das heißt Energie könnte auch in Zeiten mangelnder Stromproduktion durch Wind und Photovoltaik aus

[109] Vgl. Kapitel 6.5.2.4

den eingespeicherten synthetischen Kraftstoffen bereitgestellt werden, so dass die durch P2F generierte Diversität zur Stabilität des Energiesystems beiträgt. Andererseits könnten P2F-Anlagen auch vom Stromnetz entkoppelt betrieben und der Strom direkt von der Erzeugungsanlage bezogen werden, so dass auch im Falle eines Ausfalls der Stromnetze eine Notfallproduktion von Brenn-, Roh- und Kraftstoffen gesichert würde, die wiederum zur Notversorgung kritischer Infrastrukturen eingesetzt werden könnten.

Die heute vorhandene Sektor übergreifende Diversität der Energieträger kann letztlich durch die Vielfalt der P2F-Endprodukte als „neue Ressourcen“ in einem vollständig erneuerbaren Energiesystem erhalten werden, indem fossile Energie durch nachhaltige Äquivalente substituiert wird (funktionelle Diversität). Bei einer Betrachtung des Stromsektors komplementiert das P2F-Konzept den transformationsbedingten Ersatz von Atom- und Kohlekraftwerken durch volatile PV- und Windstromerzeugung indem es die Option eröffnet, regelbare GuD-Kraftwerke erneuerbar zu betreiben. Mit erneuerbaren, regelbaren Kraftwerken stünde somit auch langfristig eine Ergänzung zum Demand-Side-Management zur Verfügung. Im Verkehr kann die aus heutiger Sicht nötige Diversität (nicht elektrifizierbare Anwendungen) der Energieversorgung praktisch ausschließlich durch P2F erhalten bleiben. Darüber hinaus wird zudem eine nachhaltige Wasserstoffversorgung ermöglicht. Auch im Bereich Wärme können synthetische Kraftstoffe zur Diversität und somit zur Resilienz beitragen, indem die rein strombasierten Wärmeversorgung ergänzt wird, bspw. durch bivalente Wärmepumpen.

In Betracht gezogen werden müssen allerdings auch die Vulnerabilitäten des P2F-Konzept, z.B. mit Blick auf die *Ressourcendiversität*, da sauberes Trinkwasser und CO_2 bzw. CO benötigt werden und sich beide Ressourcen nicht ersetzen lassen. Insbesondere eine ausreichende Verfügbarkeit von (nachhaltigem) CO_2 wird bereits heute intensiv diskutiert, wobei zumindest atmosphärisches CO_2 in ausreichendem Maße, allerdings nur mit hohem energetischem Aufwand, verfügbar ist.[110] Insbesondere unter dem Aspekt, dass große Teile der Energieversorgung aufgrund höherer Effizienz möglichst direkt elektrisch oder durch Wasserstoff erfolgen sollen und synthetische, kohlenstoffhaltige Brenn-, Roh- und Kraftstoffe hauptsächlich nur dort einzusetzen sind, wo es anders kaum möglich ist, kann eine Gefährdung der Bereitstellung von CO_2 nur durch den zusätzlichen Energiebedarf für dessen Gewinnung begründet werden.

Das Gestaltungselement *geographische Dispersion* ist eingeschränkt zur Bewertung möglicher Resilienzbeiträge von P2F geeignet, da es sich auf ein zu definierendes Energiesystem bezieht. Immerhin kann die geografische Dispersion in begrenztem Umfang bei der Integration von P2F in das nationale Energiesystem berücksichtigt werden. Grundsätzlich muss ein Zugang zu den

[110] Vgl. Diskussion in Kapitel 6.5.4.4.2

Ressourcen Elektrizität, Wasser und zu (ggf. biogenem) CO_2 vorhanden sein. Zudem wird ein Speichermedium (Gasnetzzugang, Trailer, Tank) für die Produkte benötigt.

Redundanz ist wie auch die *geografische Verteilung* ein Gegenstand der Systemauslegung und sollte bei der Integration von P2F-Konzepten berücksichtigt werden. Können lokale P2F-Anlagen aufgrund eines Defekts oder eines Ressourcenmangels nicht betrieben werden, sollten diese Kapazitäten nach dem n-1 Prinzip ausgeglichen werden können oder sind zumindest durch andere Ressourcen oder Steuerungselemente zu ersetzen. Andersherum gedacht, kann mit den Produkten der P2F-Anlagen selbst der Ausfall von Kraftwerken kompensiert werden.

Bezüglich *flexibler/ optionaler Kopplung* empfiehlt es sich, dass P2F-Anlagen nur bei einem ausreichenden Ressourcenangebot, vornehmlich Strom, betrieben werden. Mit regelbaren Elektrolyseuren als Stromverbrauchern wäre eine solche dynamische Steuerung möglich. Danach müssten allerdings Wasserstoffspeicher eingesetzt werden, da für den nächsten Schritt das Produktionsverfahren nur unter konstanten Prozessbedingungen stabil gehalten werden kann.[111]

Für das Gestaltungselement *Puffer und Speicher* kann P2F in einem erneuerbaren Energiesystem eine entscheidende Rolle zukommen. Diese dürfte allerdings nur zu einem geringen Teil auf den Möglichkeiten einer Rückverstromung beruhen. Trotzdem ermöglicht die chemische Speicherung von erneuerbarem Strom einen Langzeitausgleich von Dunkelflauten und den indirekten Transfer von Strom in die übrigen Sektoren. In der Debatte um die Energiewende spielt das Thema Speicher bisher vor allem als Stromspeicher und mit Abstrichen als Wärmespeicher eine zentrale Rolle. Dabei ist gerade die Speicherung von Strom und Wärme von allen Energiearten mit den größten Schwierigkeiten verbunden. Bisher wurden Speicher für elektrische Energie aufgrund des eingeschränkten Bedarfs durch wenige Pumpspeicherkraftwerke realisiert. Eine Perspektive für andere Langzeitspeicher gab es lange nicht, kann aber durch P2F eröffnet werden. Tabelle 6.81 zeigt, dass die aktuelle Kapazität für Stromspeicher mit 0,04 TWh äußerst gering ausfällt und den aktuellen Strombedarf lediglich für ca. 30 Minuten decken könnte. Sie wird sich durch die Installation stationärer Batteriespeicher zwar voraussichtlich erhöhen, im Vergleich zu den Speicherkapazitäten für Gas- und Flüssigkraftstoffe aber dennoch auf einem niedrigen Niveau verbleiben. Mit P2F können diese Kapazitäten auch langfristig ausgeschöpft werden und zu einer stabilen Energieversorgung in allen Sektoren beitragen.

[111] Vgl. Diskussion in Kapitel 6.5.4.3

Tabelle 6.81: Gegenüberstellung des Bedarfs an unterschiedlichen Energieträgern und deren Speicherkapazitäten.

Daten von 2014		Strom	Gas	Flüssigkraftstoffe
Verbrauch	[TWh a^{-1}]	610	909	711
Durchschnittliche Leistung	[GW]	70	100	80
Speicherkapazität	[TWh]	0,04	217	250
Anteil erneuerbarer Energien	%	25,8	1,5	6

Mit den durch ein P2F-Konzept erbrachten Systemleistungen können also wichtige Beiträge zur Resilienzsteigerung erbracht werden. Insbesondere unter dem Aspekt, dass es nach heutigem Kenntnisstand für eine nachhaltige Energieversorgung kaum Alternativen zur regenerativen Stromerzeugung gibt, bieten P2F- oder auch allgemein Power-to-X Konzepte (inklusive Power-to-Heat) systemoffene Möglichkeiten, diese Energiequelle vielfältig zu verwerten. Letztlich sind so gut wie alle fossilen Energie- und auch einige fossile materielle Ressourcen auf diesem Wege substituierbar. Somit trägt P2F auch zur Systemoffenheit für neuartige Wandlungstechnologien und damit zur *Innovationsfähigkeit* von Energiesystemen bei. Durch die diskutierten Ansätze zur Redundanz und geografischen Dispersion kann bei entsprechender Ausgestaltung die *Widerstandsfähigkeit* eines Energiesystems gesteigert/ gewährleistet werden. Ebenfalls können durch eine strategische Installation von P2F-Anlagen Beiträge zur *Anpassungsfähigkeit* geleistet und somit beispielsweise Stromnetzausfälle kompensiert werden. Die *Improvisationsfähigkeit* wird durch die funktionelle und Ressourcen-Diversität gewährleistet. So könnte beispielsweise ein Ausfall des Strom- und Gasnetzes durch die hohe Speicherkapazität für Flüssigkraftstoffe zumindest zum Teil kompensiert werden.

6.6 Handlungsempfehlungen für Transformationsoptionen

6.6.1 Schritte in Richtung eines resilienteren Energiesystems im Landkreis Osterholz

- Nicht zuletzt angesichts der in Paris beschlossenen Klimaschutzziele müssen die Energiewendeaktivitäten im Landkreis Osterholz erweitert werden. Es sollte nicht mehr nur eine bilanzielle Energieautarkie im Strombereich angestrebt, sondern auch der Wärme- und Verkehrsbereich auf Erneuerbare Energiequellen umgestellt werden. Zudem könnten intelligente Formen der Kopplungen zwischen diesen Bereichen die Resilienz des regionalen Energiesystems erhöhen. Der Sektor Wärme hat erhebliches Potenzial im Bereich Energieeinsparung und Nutzung von Rest- und Abfallwärmequellen. Dies könnte die Netze insgesamt entlasten. Der Verkehrssektor wird noch fast ausschließlich über fossile Rohstoffe bedient mit immer noch steigendem Gesamtverbrauch. Hier wäre ein zunehmender Anteil von Elektromobilität und mittelfristig auch von synthetischen Treibstoffen

auf der Basis von Power-to-Fuel-Technologien möglich. Letztere sind ein gutes Beispiel für die Sektorkopplung und tragen ebenfalls zur Netzstabilisierung und Netzentlastung bei.

- Mit Blick auf zukünftig erwartete bzw. sich ändernde Gesetzgebungen, die sich an der beschlossenen Forcierung des Klimaschutzes orientieren, z.B. durch die Erhebung von hohen CO_2-Steuern oder eine deutlichen Verteuerung von CO_2-Zertifikaten, ist es für den Landkreis Osterholz sinnvoll, vorbereitet zu sein. Derartige drastische Verteuerungen des Verbrauchs von fossilem Kohlenstoff können die Wirtschaftlichkeit von Energiewendeaktivitäten und Resilienz steigernden Maßnahmen schlagartig verändern. Dies dürfte weitreichende Auswirkungen haben auf die Möglichkeiten zum Ausbau von Strom- und Wärmespeichern und auf die Power-to-Fuel-Technologien, die beide auch die Resilienz des Systems erhöhen. Zwar weisen diese Technologien gegenwärtig noch hohe Investitions- und Betriebskosten auf, doch langfristig gesehen können ihre Betriebskosten fallen (insbesondere vor dem Hintergrund der o.g. Gesetzgebungen) und mit höherer Nachfrage im Zuge von Lernkurven und Skaleneffekten auch ihre Investitionskosten sinken. Energieversorger und Regionen, die sich jetzt schon darauf vorbereiten, können mit ihrem Einsatz Wettbewerbsvorteile erzielen, indem Ausfälle minimiert und damit wirtschaftliche Schäden reduziert und das Image der Unternehmen verbessert werden. Darüber hinaus eröffnen sich für EVUs mit Einsatz von Resilienz steigernden Maßnahmen neue Geschäftsmodelle in einem möglichen Premiumsegment, z.B. durch das Anbieten von Versorgungssicherheitstarifen (Tarife, die auch in Störfallen oder Krisensituationen bestimmten Kunden eine besonders sichere Versorgung mit Strom/Wärme garantieren) oder das Anbieten von Regionalstrom. Prosumerhaushalten eröffnet sich die Möglichkeit mit dem Einsatz von Speichern und/oder BHKWs (bei Nutzung von stärker lieferunabhängigen erneuerbaren Energien) autonomer agieren zu können (z.B. Versorgung trotz übergeordneter Stromausfälle) und damit ihre lokale Resilienz zu erhöhen.

- Zur Umsetzung von Resilienz steigernden Maßnahmen im Landkreis Osterholz können unterschiedliche Finanzierungsmöglichkeiten herangezogen werden:
    - Über Programme der KfW oder BAFA können Privathaushalte und KMU Maßnahmen wie KWK-Anlagen, energieeffiziente Kältetechniken, Geothermieanlagen oder Wärme-/Kältenetze/ bzw. -speicher gefördert bekommen. Aufgrund der teils unübersichtlichen Förderlinien wäre eine zentrale, institutionell verortete Beratungsstelle über Fördermöglichkeiten im LK OHZ hilfreich. Teils werden Energieberatungen schon angeboten, diese sollten aber auch tiefergehende Informatio-

nen über Förderungen umfassen und noch stärker über unterschiedliche Kommunikationskanäle (Internet, Informationsbroschüren, Tagespresse etc.) publik gemacht werden.

- Größere investitionsintensive Resilienz steigernde Maßnahmen sollten über Bürgerenergiegenossenschaften finanziert werden. Dies würde insbesondere auch der Verbesserung der regionalen Wertschöpfung dienen und sollte auf jeden Fall schon beim Auslaufen der Pachtverträge und dem anstehenden Repowering der regionalen Windkraftanlagen zum Einsatz kommen.
- In Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen könnte der LK Osterholz Resilienz steigernde Leuchtturmprojekte (z.B. Speicher, intelligente Ortsnetzstationen, Power-to-Fuel-Anlagen) initiieren, die für eine regionale und überregionale Vorbildwirkung sorgen. Zur finanziellen Unterstützung solcher transdisziplinärer Projekte sollten Förderprogramme der Bundesregierung z.B. mit Fokus auf Versorgungssicherheit oder Resilienz in Anspruch genommen werden, in denen auch Praxispartner aus Wirtschaft, Politik/Verwaltung und Zivilgesellschaft gefördert werden (Beispiel: BMBF-Projekt nordwest2050 in der Förderlinie KLIMZUG – Klimawandel zukunftsfähig gestalten).

- Um Bürger, Verbände und Unternehmen zur Umsetzung von Resilienz steigernden Maßnahmen zu aktivieren, ist eine stärkere Sensibilisierung für die anstehenden Herausforderungen notwendig. Dies kann in Form von Informationsveranstaltungen und -kampagnen erfolgen, so wie es bereits im Bereich Energieeinsparung im Wärmebereich praktiziert wurde. Auch in Richtung Resilienzsteigerung sollte der Landkreis Osterholz (bspw. die Landkreisverwaltung) solche Informationsmöglichkeiten anbieten und dabei eine möglichst breite Adressatengruppe ansprechen. Das regionale Netzwerk von engagierten Akteuren, mit Unternehmen, Handwerkern und Installateuren und noch stärker ergänzt durch Verbände und Bürgerinitiativen, gilt es zu pflegen. Es ist ausgesprochen wertvoll für die Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit der Region und damit auch für ihre Resilienz.

  Die Sensibilisierung der Akteure ist erfolgsversprechend, wenn grundlegende Werte, Wünsche, Motive, Ziele bzw. Leitorientierungen der Adressaten Berücksichtigung finden. Dies können tiefverankerte Wertvorstellungen wie *Sicherheit* oder *Unabhängigkeit*/*Autonomie* sein aber auch spezifischere Leitkonzepte oder Ziele wie *regionale Wertschöpfung* oder (*langfristige) Wettbewerbsfähigkeit*. Sie alle sind im Landkreis Osterholz vorzufinden und weisen wichtige Bezüge zur Resilienz auf. Es könnte eine zentrale Informationsstelle, bspw. in Kombination mit der Energieberatung, eingerichtet werden, die möglichst institutionell verankert ist und dauerhaft besteht. Mit dem Regionalmanager und dem Klimaschutzmanager hat die Landesverwaltung Osterholz bereits wichtige Akteure etabliert, die

solche Partizipationsaufgaben übernehmen können. Auch die lokalen EVUs haben schon bewiesen, dass sie als Leitakteure für regionale Innovations- und Transformationsprozesse agieren können. Initiativen in Richtung auf neue Geschäftsmodelle wie Regionalstrom oder Versorgungssicherheitstarife könnten Resilienz steigernde Innovationsprozesse unterstützen.

6.6.2 Handlungsempfehlungen für Wolfhagen

- Der Schwerpunkt der Resilienz erhöhenden Maßnahmen für Wolfhagen liegt auf dem Ausgleich der stark fluktuierenden Erzeugungskapazitäten. Maßnahmen in diesem Sinne sind anschlussfähig an die vorfindbaren Leitorientierungen ‚Dezentralität' und ‚regionale Unabhängigkeit', denn mit der eigenen Ausgleichskapazität wird die regionale Selbstversorgung verbessert und dabei auch die regionale Wertschöpfung erhöht.
- Ein zusätzliches BHKW auf der Basis von Bioerdgas könnte in höherem Maße als Batteriespeicher zur Verringerung der Residuallast beitragen und den zeitgleichen Eigenversorgungsgrad steigern. Eine spürbare Verringerung der Unter- und Überschüsse kann erst mit Batteriespeichern großer Kapazität erreicht werden.
- Da der Brennstoff für ein zusätzliches BHKW aufgrund der beschränkten Kapazitäten der örtlichen Biogasanlage von außerhalb Wolfhagens zugekauft werden muss, wird im Sinne einer Erweiterung der regionalen Wertschöpfungstiefe empfohlen, zu prüfen, ob durch Maßnahmen zur Lastverschiebung die Grundlast für eine Power-to-Gas Anlage für die Erzeugung von synthetischem Gas aus eigenen Stromüberschüssen zur Verfügung gestellt werden kann. Gemeinsame Investitions- und Nutzungsvereinbarungen innerhalb der Stadtwerkeunion Nordhessen könnten zur Finanzierung einer solchen Anlage beitragen. Das erzeugte Gas würde entweder lokal in Zeiten hohen Bedarfs rückverstromt oder ins Erdgasnetz eingespeist.
- Es wird empfohlen, die Installation dezentraler Speicher in Privathaushalten und öffentlichen Einrichtungen (kritische Infrastruktur) zu fördern und diese Speicher netzdienlich zu nutzen. Ob die Vermietung von Speichern an private Haushalte durch die Stadtwerke eine wirtschaftlich vertretbare Option darstellt, sollte geprüft werden. Gebäude der kommunalen Verwaltung, die Stadtwerke, die Feuerwehr und das Krankenhaus könnten durch Stromspeicher, die zusätzlich mit PV-Anlagen gekoppelt sind, (zusätzlich) gegen Stromausfälle abgesichert werden und andererseits durch die externe Steuerung im Sinne des Residuallastausgleichs im lokalen Netz zur Deckung des Eigenbedarfs durch lokal erzeugten Strom beitragen.
- Im Sinne der Sektorkopplung wird die Installation einer Power-to-Heat-Anlage in Verbindung mit einem Heißwasserspeicher empfohlen, auf diesem Wege können temporäre Überschüsse zur Wärmegewinnung verwendet werden.

- Um den Nutzen eines Demand-Side-Managements zu prüfen, wird empfohlen, den notwendigen Aufwand an Information- und Kommunikationstechnologie für die flächendeckende Einführung dieser Methode der Lastverschiebung zu bestimmen. Zusätzlich sollte untersucht werden, welche Kundengruppen bereit sind, für einen ermäßigten Tarif Versorgungsunterbrechungen in einem jeweils festzulegenden zeitlichen Rahmen zu tolerieren (Versorgungssicherheitstarife). Über diese zeitliche Einschränkung der Belieferung mit Strom könnte ebenfalls eine regionale Lastverschiebung unterstützt werden. Letztendlich sollten die Verbraucher für die Bedeutung der Versorgungssicherheit und die auf regionaler Ebene in diesem Sine möglichen Maßnahmen sensibilisiert werden.
- Es wird empfohlen, einen regionalen Ausgleich der Residuallast innerhalb der Stadtwerkeunion Nordhessen anzustreben.
- Neben den Investitionen in den örtlichen Lastausgleich wird empfohlen, die Netzebenen des lokalen Elektrizitätsnetzes mit Messeinrichtungen auszustatten (Netzmonitoring), um die örtliche Auslastung zu erfassen und ggf. durch entsprechend dimensionierte Betriebsmittel zu verbessern. Daneben könnte ihre Regelfähigkeit durch die Installation regelbarer Ortsnetztransformatoren ermöglicht werden.
- Um die regionale Vermarktung des in Wolfhagen erzeugten Stromes zu verbessern, sollte geprüft werden, ob die Belieferung von Endverbrauchern mit regional gekennzeichnetem Strom im Sinne von § 79a des EEG 2017 wirtschaftlich ist.

6.6.3 Handlungsempfehlungen für die Integration der Systeminnovation P2F in das deutsche Energiesystem

- Synthetische Brenn-, Roh- und Kraftstoffe besitzen ein hohes Substitutionspotential gegenüber fossilen Energieträgern und sollten deshalb mittelfristig in den Energiewendeprozess integriert werden. Bisher ist dies über die Errichtung kleinerer Pilotanlagen zur generellen Erprobung der technischen Machbarkeit umgesetzt worden.
- Damit die (inter-)nationalen Klimaschutzziele erreicht werden können, sollten P2F-Technologien frühzeitig weiter erprobt und optimiert werden. Dabei gilt es sowohl die zugrundeliegenden Wandlungsverfahren zu optimieren als auch die Integration in industrielle Prozesse zu erproben. Um eine solche Integration frühzeitig zu ermöglichen sollten auch Pilotprojekte im industriellen Maßstab gefördert werden.
- Aufgrund des noch relativ geringen Anteils erneuerbarer Energien sollten P2F-Konzepte zunächst in einem gemäßigten Umfang ausgebaut werden, da es ansonsten zu einer höheren Auslastung fossiler Kraftwerke kommen könnte. Dennoch sollten kurz- bis mittelfristig P2F-Kapazitäten im dreistelligen MW-Bereich installiert werden, um einerseits umfangreiche Betriebserfahrungen zu sammeln und andererseits durch erste Serienanfertigungen die Investitionskosten neuer Anlagen zu reduzieren. Die Kosten von P2F-Anlagen lassen sich weniger über F&E als durch Skaleneffekte reduzieren.

- Die Ergebnisse der agentenbasierten Modellierung haben gezeigt, dass eine stärkere Förderung in der frühen Entwicklungsphase zur Entwicklung von Geschäftsmodellen beitragen kann, wenn gleichzeitig ambitionierte und Sektor übergreifende Klimaschutzmaßnahmen umgesetzt werden.
- Die Einführung deutlicher regulatorischer Signale zur Reduktion der energiebedingten Treibhausgasemissionen ist für das Erreichen der Klimaschutzziele genauso wichtig wie ein schnellerer Ausbau der erneuerbaren Energien. Nur so kann mithilfe des P2F-Konzepts auch der EE-Anteil in anderen Sektoren erhöht werden.
- Die bisherigen nationalen Klimaschutzziele reichen bei weitem nicht aus um das internationale Klimaschutzziel, die oberflächennahe Klimaerwärmung auf deutlich unter 2°C zu begrenzen, zu erreichen. Vielmehr widersprechen sich nationale Beschlüsse in der Klimapolitik: Bis 2050 wird ein Ausbau von 80% erneuerbarer Energien im Stromsektor angestrebt. Gleichzeitig sollen die energiebedingten Treibhausgasemissionen um 80-90% sinken. Um diese Ziele zu vereinen müssten drastische Einsparungen in den übrigen Sektoren erfolgen, damit sich die dort anfallenden Treibhausgasemissionen entsprechend reduzieren. Ein solches Szenario ist jedoch äußerst unwahrscheinlich, so dass ein deutlich schnellerer und in der Summe höherer Ausbau von Windkraft und Photovoltaik umgesetzt werden sollte. Es bedarf also deutlicher Anpassungen in der nationalen Klima- und Energiepolitik.
- Wichtige Vorteile von synthetischen Kraftstoffen gegenüber der direkten Stromnutzung sind die sehr gute Speicherfähigkeit und Transportfähigkeit. Gerade in Hinblick auf den angestrebten Zielzustand des Energiesystems mit sehr hohen Anteilen fluktuierender erneuerbarer Energien wird es auf zuverlässige Speicher- und Wandlungstechnologien ankommen. Eine rein elektrizitätsfokussierte Energiewende ist deshalb zu kurz gedacht.
- Dennoch sollten synthetische Kraftstoffe vor dem Hintergrund hoher Wirkungsgradverluste nur eingesetzt werden, wenn eine direkte Elektrifizierung nicht möglich bzw. nicht sinnvoll anzuwenden ist. Dies bedeutet, dass insbesondere im Individualstraßenverkehr verstärkt auf eine direkte Elektrifizierung sowie auf Wasserstoffmobilität gesetzt werden sollte, während im Schwerlast-, Schiffs- und Flugverkehr sowie der kohlenwasserstoffbasierten Rohstoffversorgung synthetische Kraftstoffe zum Einsatz kommen werden.
- Durch die Umsetzung sektoraler und branchenbezogener Klimaschutzziele könnte die Nachfrage nach alternativen Kraftstoffen gesteigert werden. Die Auswertung von Studien hat diesbezüglich ein nur geringes Potential für die Nutzung von nachhaltiger Anbaubiomasse ergeben. Synthetische Kraftstoffe könnten die Nachfrage nach erneuerbaren Kraftstoffen bei entsprechendem Ausbau decken. Die Flächenpotentiale zur erneuerbaren Stromerzeugung und damit auch zur synthetischen Kraftstoffproduktion liegen demnach

sowohl national als auch international um ein Vielfaches höher. Dennoch ist beispielsweise in der Luftfahrt zu beobachten, dass zur kurz- bis mittelfristigen Limitierung des Treibhausgasausstoßes auf Biokraftstoffe gesetzt werden soll. Es sollten daher dringend Maßnahmen getroffen werden, die eine vermehrte Biokraftstoffnutzung vermeiden.

- In Ergänzung zu Sektor übergreifenden Klimaschutzvorgaben sollten fossile Energieträger über bereits bestehende Instrumente wie das Europäische Emissionshandelssystem verteuert werden. Für einen wirksamen Emissionszertifikate-Handel müssen die ausgegeben Zertifikate deutlich reduziert und somit ein deutlich höheres Preisniveau erreicht werden. Alternativ könnten andere Mechanismen wie eine CO_2- bzw. Treibhausgassteuer eingeführt werden.
- P2F-Anlagen sind derzeit mit hohen Abgaben auf den Bezugsstrom in Form von Steuern, Entgelten und Umlagen belastet und die Produkte werden nur bedingt zur Treibhausgasminderung anerkannt. Im Sinne einer erfolgreichen Sektorkopplung sollten die regulatorischen Rahmenbedingungen dringend angepasst werden.
- Im Rahmen der Vulnerabilitätsanalyse wurde deutlich, dass noch erhebliches Optimierungspotential in den P2F-Prozessen vorliegt, beispielsweise durch aktivere und auch robuste Katalysatoren, welche einerseits den Materialaufwand reduzieren und andererseits einen flexiblen Betrieb ermöglichen. Es besteht daher noch weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf.
- Um eine umfangreiche Markteinführung, wie sie für eine erweiterte Versorgungssicherheit benötigt wird, zu erreichen, bedarf ist folgender Voraussetzungen:
    - Deutliche Reduzierung der Investitionskosten durch eine frühe Integration im Multi-MW-Bereich durch starke Anschubförderung.
    - Deutliche Effizienzsteigerungen, beispielsweise auch über sinnvoll gekoppelte Anlagen, so dass Prozesswärme effektiv genutzt werden kann. Weitere Förderung F&E.
    - Ausreichende Verfügbarkeit erneuerbarer Energie. Die Kosten für den Strombezug sollten dabei die tatsächlichen Stromgestehungskosten keinesfalls überschreiten.
    - Ein höherer Marktwert der synthetischen Produkte gegenüber fossilen Kraftstoffen ist durch Klimaschutzvorgaben und Verteuerung fossiler Energieträger herzustellen.

6.7 Literatur Kapitel 6

Abdi-Herrle, Sasan (2016): Der Bundesregierung geht die Energiewende zu schnell 2016, 12.05.2016. Online verfügbar unter http://www.zeit.de/politik/deutschland/2016-05/eeg-novelle-2016-angela-merkel-sigmar-gabriel-ministerpraesidenten, zuletzt geprüft am 19.09.2016.

AGEE-Stat (2016): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik.

Agentur für Erneuerbare Energien (2014): Metaanalyse. Potenziale der Bioenergie. Unter Mitarbeit von Alexander Knebel, Claudia Kunz, Nicole Schönleber und Jürgen Zeddies. Agentur für Erneuerbare Energien. Online verfügbar unter http://www.forschungsradar.de/metaanalysen/einzelansicht/news/potenziale-der-bioenergie.html.

Agentur für Erneuerbare Energien (2016): Akzeptanz-Umfrage 2016. Online verfügbar unter https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/akzeptanz-umfrage-2016, zuletzt geprüft am 01.12.2016.

Agora Energiewende (2014): Stromspeicher in der Energiewende. Berlin (050/10-S-2014/DE). Online verfügbar unter https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/downloads/publikationen/Studien/Speicher_in_der_Energiewende/Agora_Speicherstudie_Web.pdf, zuletzt geprüft am 11.10.2016.

Ahrens, Andreas; Gleich, Arnim von (2002): Leitbilder in der Chemikalienentwicklung und Stoffpolitik. Hamburg (Bericht vom SubChem-Workshop). Online verfügbar unter http://www.tecdesign.uni-bremen.de/subchem/pdf/Reader_Herbst_WS_aktuell_4_03.pdf, zuletzt geprüft am Januar 2012.

Alternative Energien (2016): Das EEG teilt Deutschland in zwei Zonen. Alternative Energien - Infoportal zum Thema Regenerative Energie. Online verfügbar unter http://www.regiozeiger.de/2016/06/07/das-eeg-teilt-deutschland-in-zwei-zonen/, zuletzt geprüft am 10.12.2016.

Aring, Jürgen; Wöllenstein, Roswitha; Spengler, Ulrich (2010): Mittelzentren in Nordhessen. Stadtbericht Wolfhagen (Schriftenreihe zur Region, 6).

Ausfelder, Florian; Beilmann, Christian; Bertau, Martin; Bräuninger, Sigmar; Heinzel, Angelika; Hoer, Renate et al. (2015): Energiespeicherung als Element einer sicheren Energieversorgung. In: *Chemie Ingenieur Technik* 87 (1-2), S. 17–89. DOI: 10.1002/cite.201400183.

Ayers, Katherine E.; Anderson, Everett B.; Capuano, Christopher; Carter, Blake; Dalton, Luke; Hanlon, Greg et al. (2010): Research Advances towards Low Cost, High Efficiency PEM Electrolysis. In: 218th ECS Meeting. Las Vegas, NV, October 10 - October 15, 2010: ECS (ECS Transactions), S. 3–15.

BAFA (Hg.) (2016a): Klima-/Kälteanlagen. Aktuelles Förderprogramm - Fördergegenstand. Online verfügbar unter http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kaelteanlagen/aktuelles_foerderprogramm/foerdergegenstand/index.html, zuletzt geprüft am 30.03.2016.

BAFA (Hg.) (2016b): Wärme- und Kältenetze. Förderung von Wärme- und Kältenetzen nach dem KWKG. Online verfügbar unter http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft_waerme_kopplung/waerme_und_kaeltenetze/, zuletzt geprüft am 30.03.2016.

Bajohr, S.; Götz, M.; Graf, F.; Ortloff, F. (2011): Speicherung von regenerativ erzeugter elektrischer Energie in der Erdgasinfrastruktur. Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie. Karlsruhe. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Manuel_Goetz/publication/272495834_Speicherung_von_regenerativ_erzeugter_elektrischer_Energie_in_der_Erdgasinfrastruktur_gwf-Gas_April/links/54e6ec2a0cf2bff5a4f7763f.pdf.

Bankoff, Greg (2003): Vulnerability as a Measure of Change in Society. In: *International Journal of Mass Emergencies and Disasters* 21 (2), S. 5–30.

BdBe (2012). Bundesverband der deutschen Bioethanolwirtschaft e.V. Online verfügbar unter https://www.bdbe.de/mediacenter/presseinformationen/super-e10-akzeptanz-und-wahrnehmung-umfrageergebnis-2012.

BDEW (Hg.) (2012): Praxis-Leitfaden für unterstützende Maßnahmen von Stromnetzbetreibern. Kommunikations- und Anwendungs-Leitfaden zur Umsetzung der Systemverantwortung gemäß §§ 13 Abs. 2, 14 Abs. 1 und 14 Abs. 1c EnWG. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bdew.de/internet.nsf/id/20121012-bdew-vku-leitfaden-praxis-leitfaden-fuer-unterstuetzende-massnahmen-von-stromnetzbetreiber/$file/20121012_BDEW-VKU%20Praxis-Leitfaden_fuer_unterstuetzende_Ma%C3%9Fnahmen_von_Stromnetzbetreibern.pdf, zuletzt geprüft am 15.11.2016.

BDEW (2013): Energieeffizienz durch moderne Technologien. Hg. v. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (Materialsammlung Erdgas (07/2013)). Online verfügbar unter https://www.bdew.de/internet.nsf/res/2F4B56AB1AA96CAFC1257BCC004CA02E/$file/BDEW-13-00025_Erdgas_Kapitel_5.pdf.

Beck, Ulrich (1993): Die Erfindung des Politischen. Zu einer Theorie reflexiver Modernisierung. 1. Aufl. Frankfurt am Main: Suhrkamp (Edition Suhrkamp, 1780 = n.F., Bd. 780).

Benndorf, R.; Bernicke, M.; Bertram, A.; Butz, W.; Dettling, F. et al. (2013a): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

Benndorf, Rosemarie; Bernicke, Maja; Bertram, Andreas; Butz, Wolfgang; Dettling, Folke; Drotleff, Johannes et al. (2013b): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Hintergrund//Oktober 2013. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter http://www.uba.de/publikationen/treibhausgasneutrales-deutschland-im-jahr-2050.

Biedermann, Peter; Grube, Thomas; Höhlein, Bernd (Hg.) (2006): Methanol as an Energy Carrier. Jülich: Forschungszentrum Jülich (Schriften des Forschungszentrums Jülich - Reihe Energietechnik, 55).

Biegger, P.; Medved, A. R.; Lehner, M.; Ebner, H. M.; Friedacher, A. (2016): Methanisierung im Umfeld von "Power-to-Gas". Technische Universität Graz. Graz (14. Symposium Energieinnovation).

BioCat Project: FACTS & FIGURES. Electrochaea.dk ApS. Horsens. Online verfügbar unter http://biocat-project.com/about-the-project/facts-figures/, zuletzt geprüft am 07.12.2016.

Blanck, R.; Kasten, P.; Hacker, F.; Mottschall, M. (2013): Treibhausgasneutraler Verkehr 2050. Ein Szenario zur zunehmenden Elektrifizierung und dem Einsatz stromerzeugter Kraftstoffe im Verkehr. Hg. v. Öko-Institut.

BMUB (2009): Die EU-Verordnung zur Verminderung der CO2-Emissionen von Personenkraftwagen. Bundesministerium für Umwelt, Naturshutz, Bau und Reaktorsicherheit. Online verfügbar unter www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Luft/emissionen_pkw_eu_verordnung.pdf.

BMVI - Bundesministerum für Verkehr und digitale Infrastruktur (12.04.2016): Bundesminister Dobrindt stellt Wasserstoffstrategie vor. H2 Mobility Kongress des BMVI in Berlin mit Minister Dobrindt und chinesischem Wissenschaftsminister Wan. 043/2016. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2016/043-dobrindt-h2-mobility-kongress.html.

BMWi (2015): Zahlen und Fakten Energiedaten. Nationale und Internationale Entwicklung. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

BNA (2016): Monitoringbericht 2015. Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen; Bundeskartellamt. Bonn. Online verfügbar unter

https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2015/Monitoringbericht_2015_BA.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 01.12.2016.

BNetzA (2015): EEG-Statistikberichte zu den Jahresendabrechnungen 2007-2011 sowie EEG in Zahlen 2012-2013. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/erneuerbare-energien-in-zahlen-2015-09.pdf?__blob=publicationFile&v=14.

Böhringer, Christoph; Brinker, Werner; Brunekreeft, Gert; Kaminski, Hans; Luther, Joachim; Pfaffenberger, Wolfgang et al. (2010): 10 BULLENSEE-Thesen: Thesen und abgeleitete Handlungsempfehlungen zur zukünftigen Energieversorgung. Hg. v. EWE AG. Oldenburg. Online verfügbar unter https://www.yumpu.com/de/document/view/19610889/10-bullensee-thesen-ewe-ag, zuletzt geprüft am 28.03.2016.

Bonß, Wolfgang (2015): Karriere und sozialwissenschaftliche Potenziale des Resilienzbegriffs. In: Martin Endreß und Andrea Maurer (Hg.): Resilienz im Sozialen. Theoretische und empirische Analysen. Wiesbaden: Springer VS, S. 15–31.

Brand, Urte (2013): Abschlussbericht zum Umsetzungsbaustein 1: "Schaffung von gemeinsamer Identität und Verantwortung der Bewohner durch energie- und kosteneffiziente Sanierungs- und Entwicklungsplanung" – Teilprojekt: Analyse und prozessbegleitende Untersuchung der richtungsgebenden Einflussfaktoren. Projekt ZukunftsWerkStadt Leutkirch. Online verfügbar unter http://www.tecdesign.uni-bremen.de/typo3/fileadmin/user_upload/Ver%C3%B6ffentlichungen/ZukunftsWerkStadt_Leutkich_UniHB_VS2.pdf, zuletzt geprüft am 01.04.2016.

Brand, Urte (2015): Protokoll des Treffens zwischen Vertreter der Osterholzer Stadtwerke und Vetretern des Projektes Resystra von der Universität Bremen am 26.08.2015. Universität Bremen, Bremen.

Brand, Urte (2016): Leitkonzepte Nachhaltigkeit und Resilienz als Richtungsgeber in Transformationsprozessen von Energiesystemen. Dissertation. Universität Bremen, Bremen.

Bredow, Hartwig von; Balzer, Lea (2015): Rechtlicher Rahmen für Power-to-Gas: Eine aktuelle Bestandsaufnahme. In: *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* (4). Online verfügbar unter http://www.vonbredow-valentin-herz.de/wp-content/uploads/2015/05/Rechtlicher-Rahmen-fuer-Power-to-Gas.pdf.

Breyer, Ch; Rieke, S.; Sterner, M.; Schmid, J. (Hg.) (2011): Hybrid PV-Wind-Renewable Methane Power Plants–A Potential Cornerstone of Global Energy Supply (59). Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/261172899_Hybrid_PV-Wind-Renewable_Power_Methane_Plants_-_An_Economic_Outlook, zuletzt geprüft am 08.12.2016.

Breyer, Christian; Tsupari, Eemeli; Tikka, Ville; Vainikka, Pasi (2015): Power-to-Gas as an Emerging Profitable Business Through Creating an Integrated Value Chain. In: *Energy Procedia* 73, S. 182–189. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.668.

Bröer, Guido (2016): Interview mit Robert Habeck: Sektorenkopplung nicht nur für Experimente! Interview mit Dr. Robert Habeck. www.solarthemen.de/index.php/2016/10/27/interview-mit-robert-habeck-sektorenkopplung-nicht-nur-fuer-experimente.

Brown, Theodore L.; LeMay, Harold Eugene; Bursten, Bruce E.; Robl, Christian (2007): Chemie. Die zentrale Wissenschaft. 10., aktual. Aufl., [Nachdr.]. München: Pearson Studium (che - Chemie).

Brunner, Christoph (2014): Changes in electricity spot price formation in Germany caused by a high share of renewable energies. In: *Energy Syst* 5 (1), S. 45–64. DOI: 10.1007/s12667-013-0084-2.

Brunner, Christoph; Michaelis, Julia (2016): Wirtschaftliche Perspektiven für Power-to-Gas im zukünftigen Energiesystem. In: *ET. Energiewirtschaftliche Tagesfragen* (3), S. 52–55. Online

verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/297686591_Wirtschaftliche_Perspektiven_fur_Power-to-Gas_im_zukunftigen_Energiesystem.

Brunner, Christoph; Michaelis, Julia; Möst, Dominik (2015): Competitiveness of Different Operational Concepts for Power-to-Gas in Future Energy Systems. In: *Z Energiewirtsch* 39 (4), S. 275–293. DOI: 10.1007/s12398-015-0165-0.

BSW-Solar (2012): 50,2 Hz. Erläuterun des Problems. Hg. v. BSW-Solar. Online verfügbar unter https://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/BSW_502Hz_Erlaeuterung_der_Problematik_Intersolar2012.pdf.

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2017): Erneuerbare Energien Gesetz 2017. EEG, vom 2017. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/.

Bundesnetzagentur (03.08.2012): Bundesnetzagentur stellt weitere Verzögerung bei EnLAG-Projekten fest. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Presse/Pressemitteilungen/2012/120803_EnLAGMonitoring_pdf.pdf;jsessionid=B878E06B086A64455860B775509DFB93?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 01.12.2016.

Bundesregierung (2010): Das Energiekonzept 2050. Online verfügbar unter http://www.bundesregierung.de/Content/DE/HTML/Breg/Anlagen/infografik-energie-textversion.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 08.12.2016.

Bundesregierung (2016a): Erneuerbare Energien. Ein neues Zeitalter hat begonnen. Online verfügbar unter www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/EnergieErzeugen/ErneuerbareEnergien-Zeitalter/_node.html#doc516106bodyText1, zuletzt geprüft am 01.12.2016.

Bundesregierung (2016b): Fragen und Antowrten zur Energiewende. Online verfügbar unter www.bundesregierung.de/ContentArchiv/DE/Archiv17/Artikel/2011/06/2011-06-06-faq-energie.html.

Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks (Hg.) (2013): Erfassung von Feuerstätten im Bestand und in 2013 im Landkreis Osterholz. Online verfügbar unter Nicht öffentlich zugänglich.

Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks (Hg.) (2014): Erfassung von Feuerstätten im Bestand und in 2014 im Landkreis Osterholz. Online verfügbar unter nicht öffentlich zugänglich.

Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. (2016): BEE-Kurzbewertung EEG 2017. Deutliche Drosselung der Energiewende, leichte Verbesserungen im Detail. Berlin. Online verfügbar unter http://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Positionspapiere_Stellungnahmen/20160819_BEE-Kurzbewertung_EEG_2017_web.pdf, zuletzt geprüft am 01.12.2016.

Bünger, U.; Landinger H.; Pschorr-Schoberer, E.; Schmidt, P.; Weindorf, W.; Jöhrens, J. et al. (2014): Power-to-Gas (PtG) im Verkehr. Aktueller Stand und Entwicklungsperspektiven. Kurzstudie für das BMVI. München, Heidelberg, Leipzig, Berlin.

Bureau f Resources & Energy Economics (BREE), Australian Government (2016): Resources and Energy Quarterly. June quarter 2016. Online verfügbar unter http://www.industry.gov.au/Office-of-the-Chief-Economist/Publications/Documents/req/REQ-June-2016.pdf, zuletzt geprüft am 01.12.2016.

Carmo, Marcelo; Fritz, David L.; Mergel, Jürgen; Stolten, Detlef (2013): A comprehensive review on PEM water electrolysis. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 38 (12), S. 4901–4934. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.01.151.

Clausen, Jens (2014): Innovationspotenzialanalyse und Roadmap Klimaangepasste Kältetechnik. Potenziale und Innovationssystem. Hg. v. artec | Forschungszentrum Nachhaltigkeit. Bremen (nordwest2050-Werkstattberichte, 29).

Dawid, Martin Johannes (2011): Regionales und regeneratives Energiekonzept für den Landkreis Osterholz: Strategie zur Erreichung einer 100-prozentigen Energieversorgung aus erneuerbaren Energien. Masterarbeit. HAWK Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst, Hildesheim Holzminden Göttingen. Ressourcenmanagement.

Deutsche Energie-Agentur (2012): dena-Verteilnetzstudie. Ausbau- und Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030. Endbericht. Berlin. Online verfügbar unter https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/esd/9100_dena-Verteilnetzstudie_Abschlussbericht.pdf, zuletzt geprüft am 01.12.2016.

Deutsche Energie-Agentur (2013): Strategieplattform Power to Gas-Positionspapier. Berlin. Online verfügbar unter http://www.powertogas.info/fileadmin/content/Downloads_PtG_neu/130227_Positionspapier_PowertoGas.pdf.

Deutsche Energie-Agentur (2015a): Power to Gas system solution. Opportunities, challenges and parameters on the way to marketability. Online verfügbar unter www.powertogas.info/fileadmin/content/Downloads/Broschüren/dena_PowertoGas_2015_engl.pdf.

Deutsche Energie-Agentur (2015b): Systemlösung Power to Gas. Chancen, Herausforderungen und Stellschrauben auf dem Weg zur Marktreife. Online verfügbar unter https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Themen_und_Projekte/Energiesysteme/Strategieplattform_Power_to_Gas/9096_Fachbroschuere_Systemloesung_Power_to_Gas.pdf.

Deutsche Energie-Agentur (2016a): Pilotprojekte im Überblick. Berlin. Online verfügbar unter http://www.powertogas.info/power-to-gas/pilotprojekte-im-ueberblick/?no_cache=1.

Deutsche Energie-Agentur (2016b): Potentialatlas Power-to-Gas. Klimaschutz umsetzen, erneuerbare Energien integrieren, regionale Wertschöpfung ermöglichen. Berlin.

Deutscher Bundestag (2014): Treibhausgasquote für Kraftstoffe ab 2015. Hg. v. Deutscher Bundestag, PuK 2 - Parlamentsnachrichten. Online verfügbar unter https://www.bundestag.de/presse/hib/2014_10/-/333364, zuletzt geprüft am 08.12.2016.

DGRV (06.07.2016): DGRV-Jahresumfrage unter Energiegenossenschaften: Gründungszahlen weiter rückläufig. Online verfügbar unter https://www.dgrv.de/webde.nsf/7d5e59ec98e72442c1256e5200432395/798f5ab63f442e45c1257fe8002c07c2/$FILE/2016_07_06_PM_Jahresumfrage%20Energiegenossenschaften.pdf, zuletzt geprüft am 20.11.2016.

DGS e.V. (Hg.): Die Karte der erneuerbaren Energien. Online verfügbar unter http://www.energymap.info/map.html.

Dierkes, Meinolf; Hoffmann, Ute; Marz, Lutz (1992): Leitbild und Technik. Zur Entstehung und Steuerung technischer Innovationen. Berlin: Edition Sigma.

DIHK (2014): Faktenpapier Energieeffizienz 2014. Stand │Trends │Forderungen. Hg. v. Deutscher Industrie- und Handelskammertag. Berlin/Brüssel. Online verfügbar unter http://www.energieeffizienz-ihk.de/wp-content/uploads/2014/08/140806-DIHK-EnEF-Faktenpapier-2014.pdf, zuletzt geprüft am 11.10.2016.

DUH - Deutsche Umwelthilfe (Hg.) (2008): Stromlücke oder Stromlüge? Zu einer interessengeleiteten Debatte über die Zukunft der Stromversorgung in Deutschland. Online verfügbar unter http://www.duh.de/uploads/media/Stromluecke_Hintergrund_070408.pdf, zuletzt geprüft am 23.04.2016.

DWV (2015): Wasserstoffproduktion in Deutschland. Stand 2015. Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband.

eclareon GmbH (2015): Biomasseatlas. Online verfügbar unter http://www.biomasseatlas.de/index.php?id=5&PHPSESSID=3f384dcdb89d84d7da528c4a061308ae.

Edwards, Robert; Mahieu, Vincent; Griesemann, Jean-Claude; Larivé, Jean-François; Rickeard, David J. (2011): Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context. Online verfügbar unter http://www.motiva.fi/files/6514/Well-to-wheels_Analysis_of_Future_Automotive_Fuels_and_Powertrains_in_the_European_Context_WELL-to-WHEELS_Report.pdf, zuletzt geprüft am 08.12.2016.

EEG (Hg.) (2012): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2012). Online verfügbar unter https://www.clearingstelle-eeg.de/files/EEG2012_juris_120817.pdf, zuletzt geprüft am 20.11.2016.

EEG (Hg.) (2014): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2014). Online verfügbar unter http://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/, zuletzt aktualisiert am 21.12.2015, zuletzt geprüft am 30.03.2016.

EEG (Hg.) (2017): Gesetz zur Einführung von Ausschreibungen für Strom aus erneuerbaren Energien und zu weiteren Änderungen des Rechts der erneuerbaren Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz EEG 2017). Online verfügbar unter http://dipbt.bundestag.de/dip21/brd/2016/0355-16.pdf, zuletzt geprüft am 10.10.2016.

EEWärmeG (Hg.) (2015): Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien- Wärmegesetz - EEWärmeG). Online verfügbar unter http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/eew_rmeg/gesamt.pdf, zuletzt geprüft am 30.03.2016.

Energiepark Mainz (2016): Hier weht Innovationsgeist! Erneuerbare Energien mit Wasserstoff speichern. Mainz. Online verfügbar unter http://www.energiepark-mainz.de/uploads/tx_news/EPM_Broschur_A4_5.pdf, zuletzt geprüft am 01.12.2016.

Energiewende Osterholz 2030 (2015): Solardachkataster Landkreis Osterholz. Hg. v. Landkreis Osterholz. Online verfügbar unter https://www.solardachkataster-osterholz.de/.

EnEV (Hg.) (2009): Energieeinsparverordnung für Gebäude. Online verfügbar unter http://www.enev-online.org/enev_2009_volltext/, zuletzt geprüft am 30.03.2016.

Etscheit, Georg (Hg.) (2016): Geopferte Landschaften. Wie die Energiewende unsere Umwelt zerstört. München: Heyne HC.

EWE (Hg.) (2016a): Daten und Fakten. Online verfügbar unter https://www.ewe.com/de/investor-relations/daten-und-fakten, zuletzt geprüft am 28.03.2016.

EWE (Hg.) (2016b): Nachhaltigkeit - Versorgungssicherheit und Netzstabilität. Online verfügbar unter https://www.ewe.com/de/konzern/nachhaltigkeit/versorgungssicherheit, zuletzt geprüft am 28.03.2016.

EWE AG (Hg.) (2012): EWE-Ergebnis durch Sondereffekte belastet. Unternehmen legt vorläufige Geschäftszahlen für 2011 vor. Online verfügbar unter https://www.ewe.com/~/media/ewe_com/pressematerial/pdf/2012/120301_pm_vorlaeufige_zahlen.pdf, zuletzt geprüft am 30.03.2016.

EWE AG (Hg.) (2014): Nachhaltigkeitsbericht 2014. Werte schaffen für unsere Region. Oldenburg. Online verfügbar unter https://www.ewe.com/de/konzern/nachhaltigkeit, zuletzt geprüft am 28.03.2016.

FAO (1997): Renewable biological systems for alternative sustainable energy production. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Online verfügbar unter http://www.fao.org/docrep/w7241e/w7241e05.htm#1.2.1.

Fasihi, Mahdi; Bogdanov, Dmitrii; Breyer, Christian (Hg.) (2016a): Techno-Economic Assessment of Power-to-Liquids (PtL) Fuels Production and Global Trading Based on Hybrid PV-Wind Power Plants.

Fasihi, Mahdi; Bogdanov, Dmitrii; Breyer, Christian (2016b): Techno-Economic Assessment of Power-to-Liquids (PtL) Fuels Production and Global Trading Based on Hybrid PV-Wind Power Plants. In: *Energy Procedia* 99, S. 243–268. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.10.115.

FA Wind (2016): Umfrage zur Akzeptanz der Windenergie an Land – Frühjahr 2016, Fachagentur zur Förderung eines natur- und umweltverträglichen Ausbaus der Windenergie an Land e.V. Berlin

Fekete, Alexander; Grinda, Christiane; Norf, Celia (2016): Resilienz in der Risiko- und Katastrophenforschung: Perspektiven für disziplinübergreifende Arbeitsfelder. In: Rüdiger Wink (Hg.): Multidisziplinäre Perspektiven der Resilienzforschung. Wiesbaden: Springer, S. 215–231.

Fichter, Klaus (2006): Einflussfaktoren: Das gefüllte Schildkrötenmodell als Basiskonzept. Online verfügbar unter https://www.yumpu.com/de/document/view/24208492/einflussfaktoren-das-gefa-1-4-llte-schildkratenmodell-als-borderstep.

Fischedick, M.; Samadi, S.; Hoffmann, C.; Henning, M.; Pregger, T.; Leprich, U.; Schmidt, M. (2014a): Phasen der Energiesystemtransformation. In: *FVEE-Themen: Forschung für die Energiewende – Phasenübergänge aktiv gestalten. Beiträge zur FVEE-Jahrestagung 2014.* 2014.

Fischedick, M.; Samadi, S.; Hoffmann, C.; Henning, M.; Pregger, T.; Leprich, U.; Schmidt, M. (2014b): Phasen der Energiesystemtransformation. FVEE-Themen: Forschung für die Energiewende – Phasenübergänge aktiv gestalten. Beiträge zur FVEE-Jahrestagung 2014. FVEE Themen 2014. Forschungsverbund Erneuerbare Energien.

Fischedick, Manfred; Görner, Klaus; Thomeczek, Margit (Hg.) (2015): CO2: Abtrennung, Speicherung, Nutzung. Ganzheitliche Bewertung im Bereich von Energiewirtschaft und Industrie. Berlin: Springer Vieweg. Online verfügbar unter http://ebooks.ciando.com/book/index.cfm/bok_id/1869657.

Fox, T. (2011a): Caturing CO2 from the air. In: *Carbon Capture Journal*.

Fox, Tim (2011b): Capturing CO2 from the air. Carbon Capture Journal. Online verfügbar unter http://www.carboncapturejournal.com/news/capturing-co2-from-the-air/3011.aspx?Category=all.

Free Software Foundation (2016): oemof. Version 0.07: Open Energy Modelling Framework - A modular open source framework to model energy supply systems. Online verfügbar unter https://github.com/oemof.

Fürstenwerth, D.; Waldmann, L.; Sterner, M.; Thema, M.; Eckert, F.; Moser, A. (2014): Stromspeicher in der Energiewende-Untersuchung zum Bedarf an neuen Stromspeichern in Deutschland für den Erzeugungsausgleich, Systemdienstleistungen und im Verteilnetz. In: *Agora Energiewende, Berlin*.

Gahleitner, Gerda (2013): Hydrogen from renewable electricity. An international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 38 (5), S. 2039–2061. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.12.010.

Gandia, Luis M.; Arzamedi, Gurutze; Dieguez, Pedro M. (2013): Renewable Hydrogen Technologies. Production, Purification, Storage, Applications and Safety. Oxford: Elsevier Science. Online verfügbar unter http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10698613.

Gößling-Reisemann, S.; Stührmann, S.; Wachsmuth, J.; Gleich, A. v.; Blöthe, T. (2015): Klimaanpassung und Resilienz in der Energiewirtschaft. In: A. v. Gleich und B. Siebenhüner (Hg.): Regionale Klimaanpassung im Küstenraum. Marburg: Metropolis-Verlag, S. 182–206.

Gößling-Reisemann, Stefan; Wachsmuth, Jakob; Stührmann, Sönke; Gleich, Arnim von (2013): Climate Change and Structural Vulnerability of a Metropolitan Energy System. In: *Journal of Industrial Ecology* 17 (6), S. 846–858. DOI: 10.1111/jiec.12061.

Götz, Manuel (2014): Methanisierung im Dreiphasen-Reaktor. Dissertation. Universität Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe. Online verfügbar unter https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000044909/3354137.

Govindjee (2000): What is Photosynthesis. Online verfügbar unter http://www.life.illinois.edu/govindjee/whatisit.htm.

Graf, F.; Götz, M.; Henel, M.; Schaaf, T.; Tichler, R. (2014a): Technoökonomische Studie von Power-to-Gas-Konzepten. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. Online verfügbar unter http://www.dvgw-innovation.de/fileadmin/dvgw/angebote/forschung/innovation/pdf/g3_01_12_tp_b_d.pdf, zuletzt geprüft am 08.12.2016.

Graf, F.; Götz, M.; Henel, M.; Schaaf, T.; Tichler, R. (2014b): Technoökonomische Studie von Power-to-Gas-Konzepten Teilprojekte B-D Abschlussbericht. Online verfügbar unter http://www.dvgw-innovation.de/fileadmin/dvgw/angebote/forschung/innovation/pdf/g3_01_12_tp_b_d.pdf, zuletzt geprüft am 08.12.2016.

Graves, Christopher; Ebbesen, Sune D.; Mogensen, Mogens; Lackner, Klaus S. (2011): Sustainable hydrocarbon fuels by recycling CO2 and H2O with renewable or nuclear energy. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (1), S. 1–23. DOI: 10.1016/j.rser.2010.07.014.

Grigoriev, S. A.; Porembskiy, V. I.; Korobtsev, S. V.; Fateev, V. N.; Auprêtre, F.; Millet, P. (2011): High-pressure PEM water electrolysis and corresponding safety issues. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 36 (3), S. 2721–2728. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2010.03.058.

Grimm, Nadia; Hohmeier, Stephan; Uhlig, Jeannette; Weber, Andreas; Zoch, Immo (2013): Power to Gas. Eine innovative Systemlösung auf dem Weg zur Marktreife. Deutsche Energie-Agentur.

Grond, L.; Schulze, P.; Holstein, J. (2013): Systems analyses power to gas: a technology review. DNV KEMA Energy & Sustainability. Groningen.

Guratzsch, Dankwart (2014): Rettet unsere Naturparadiese vor der Verspargelung! In: *Welt* 2014, 02.07.2014. Online verfügbar unter https://www.welt.de/debatte/kommentare/article129534851/Rettet-unsere-Naturparadiese-vor-der-Verspargelung.html, zuletzt geprüft am 28.09.2016.

Haarlemmer, G.; Boissonnet, G.; Peduzzi, E.; Setier, P.-A. (2014): Investment and production costs of synthetic fuels – A literature survey. In: *Energy* (66), S. 667–676.

Harks, E. (2015): power-to-gas-to-refining (…to tank): Stromspeicher und Brücke zum Verkehr. BP Europa SE.

Hauke Hermann, Lukas Emele, Charlotte Loreck (2014): Prüfung der klimapolitischen Konsistenz und der Kosten von Methanisierungsstrategien. Studie. Öko-Institut e.V. Berlin. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/oekodoc/2005/2014-021-de.pdf, zuletzt geprüft am 01.12.2016.

Hemmelskamp, Jens (1999): Umweltpolitik und technischer Fortschritt. Eine theoretische und empirische Untersuchung der Determinanten von Umweltinnovationen : mit 44 Tabellen. Heidelberg: Physica-Verlag.

Henning, H.-M.; Palzer, A.; Pape, C.; Borggrefe, F.; Jachmann, H.; Fischedick, M. (2014): Phasen der Transformation des Energiesystems - Ein ganzheitlicher Blick auf alle Wandlungsketten und Verbrauchssektoren. FVEE Themen 2014. Forschungsverbund Erneuerbare Energien.

Henning, Hans-Martin; Palzer, Andreas (2015): Was kostet die Energiewende? – Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050. Freiburg. Online verfügbar unter https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/studie-was-kostet-die-energiewende.pdf, zuletzt geprüft am 01.12.2016.

Henning, Hans-Martin; Palzer, Andreas; Pape, Carsten; Borggrefe, Frieder; Jachmann, Henning; Fischedick, Manfred (2015): Phasen der Transformation des Energiesystems. In: *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 65 (1/2), S. 10–13. Online verfügbar unter https://epub.wupperinst.org/files/5794/5794_Henning.pdf.

Henseler, Jörg (2006): Das Wechselverhalten von Konsumenten im Strommarkt. Eine empirische Untersuchung direkter und moderierender Effekte. Wiesbaden: Deutscher Universitats-Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden (Wirtschaftswissenschaft).

Hermann, H.; Emele, L.; Lorecck, C. (2014): Prüfung der klimapolitischen Konsistenz und der Kosten von Methanisierungsstrategien. Öko-Institut e.V. Berlin.

Hermann, Hauke; Matthes, Felix Chr.; Athmann we (2012): Potenziale und Chancen der Technologie zur CO2-Abtrennung und -Ablagerung (CCS) für industrielle Prozessemissionen. Kurzstudie für die Umweltstiftung WWF. Öko-Institut; dezentec. Berlin. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/oekodoc/1504/2012-070-de.pdf, zuletzt geprüft am 01.12.2016.

Hilpert, Simon; Günther, Stephan; Kaldemeyer, Cord; Krien, Uwe; Plessmann, Guido; Wiese, Frauke; Wingenbach, Clemens (2017): Addressing Energy System Modelling Challenges. The Contribution of the Open Energy Modelling Framework (oemof). DOI: 10.20944/preprints201702.0055.v1.

Höhne, Niklas; Kuramochi, Takeshi; Sterl, Sebastian; Röschel, Lina (2016): Was bedeutet das Pariser Abkommen für den Klimaschutz in Deutschland. Kurzstudie von NewClimate Institute im Auftrag von Greenpeace. Hg. v. NewClimate.

Hübner, Gundula; Pohl, Johannes (2015): Mehr Abstand - mehr Akzeptanz? Ein umweltpsychologischer Studienvergleich. Online verfügbar unter http://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Akzeptanz/FA-Wind_Abstand-Akzeptanz_Broschuere_2015_web.pdf, zuletzt geprüft am 01.12.2016.

Hüppmeier, Jens; Barg, Suelen; Baune, Michael; Koch, Dietmar; Grathwohl, Georg; Thöming, Jorg (2010): Oxygen feed membranes in autothermal steam-reformers – A robust temperature control. In: *Fuel* 89 (6), S. 1257–1264. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.09.023.

Ichikawa, H.; Matsuzawa, K.; Kohno, Y.; Nagashima, I.; Sunada, Y.; Nishiki, Y. et al. (2014): Durability and Activity of Modified Nickel Anode for Alkaline Water Electrolysis. In: *ECS Transactions* 58 (33), S. 9–15. DOI: 10.1149/05833.0009ecst.

Imbusch, Peter (2015): Urbane Resilienz und endemische Gewalt. In: Martin Endreß und Andrea Maurer (Hg.): Resilienz im Sozialen. Theoretische und empirische Analysen. Wiesbaden: Springer VS, S. 245–264.

Initiative Neue Soziale Marktwirtschaft (Hg.) (2009): Das wissenschaftliche RegionalRanking - Landkreis Osterholz. Online verfügbar unter http://www.insm-regionalranking.de/fs_2009_k_landkreis-osterholz.html, zuletzt geprüft am 18.11.2016.

International Energy Agency (2010): World Energy Outlook. Paris.

Ishihahra, T.; Kannou, T.; Hiura, S.; Yamamoto, N.; Yamada, T. (2009): Steam Electrolysis Cell Stack Using LaGaO3-Based Electrolyte. Präsentation Int. Workshop on High Temperature Electrolysis. Karlsruhe.

Jentsch, Mareike (2015): Potenziale von Power-to-Gas-Energiespeichern. Modellbasierte Analyse des markt- und netzseitigen Einsatzes im zukünftigen Stromversorgungssystem. Zugl.: Kassel, Univ., Diss., 2014. Stuttgart: Fraunhofer-Verl. Online verfügbar unter https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/Forschungsfelder/Energie-Rohstoffe/Potenziale%20von%20Power-to-Gas%20Energiespeichern.pdf, zuletzt geprüft am 01.12.2016.

Jentsch, Mareike; Trost, Tobias; Emele, Lukas; Sterner, Michael (2011): Power-to-Gas als Langzeitspeicher. Energy. Online verfügbar unter http://www.energy20.net/PDF/E20611700.

Kasten, P.; Blanck, R.; Loreck, C.; Hacker, F.; Forin, S. (2013): Strombasierte Kraftstoffe im Vergleich – Stand heute und die Langfristperspektive. Öko-Institut e.V. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/oekodoc/1826/2013-496-de.pdf, zuletzt geprüft am 08.12.2016.

Kaufmann, Stefan (2015): Resilienz als Sicherheitsprogramm. Zum Janusgesicht eines Leitkonzepts. In: Martin Endreß und Andrea Maurer (Hg.): Resilienz im Sozialen. Theoretische und empirische Analysen. Wiesbaden: Springer VS, S. 295–312.

KfW (2016): Energieeffizient Sanieren – Investitionszuschuss 430. Hg. v. KfW. Online verfügbar unter https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Privatpersonen/Bestandsimmobilien/Finanzierungsangebote/Energieeffizient-Sanieren-Zuschuss-%28430%29/, zuletzt geprüft am 30.03.2016.

Kiewidt, Lars; Thöming, Jorg (2015): Predicting optimal temperature profiles in single-stage fixed-bed reactors for CO2-methanation. In: *Chemical Engineering Science* 132, S. 59–71. DOI: 10.1016/j.ces.2015.03.068.

Klaus, Thomas; Vollmer, Carla; Werner, Kathrin; Lehmann, Harry; Müschen, Klaus (2010): Energiezeil 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/energieziel_2050.pdf.

Klerk, Arno de (2011): Fischer-Tropsch refining. Weinheim: Wiley-VCH Verl.

Koch, Reinhard (2006): Energieautarker Bezirk Güssing (Berichte aus Energie- und Umweltforschung, 82/2006). Online verfügbar unter https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/edz_pdf/0682_energieautarker_bezirk_guessing.pdf?m=1469660132, zuletzt geprüft am 10.10.2016.

Komesker, B. (2015): Bau neuer Windarks ist nur noch Formsache. In: *Osterholzer Kreisblatt*, 2015.

König, Daniel H.; Baucks, Nadine; Dietrich, Ralph-Uwe; Wörner, Antje (2015): Simulation and evaluation of a process concept for the generation of synthetic fuel from CO2 and H2. In: *Energy* 91, S. 833–841. DOI: 10.1016/j.energy.2015.08.099.

Koordinierungsstelle GDI-NI beim Landesbetrieb Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (Hg.) (2009): Municipalities in OHZ. Online verfügbar unter https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Municipalities_in_OHZ.svg, zuletzt aktualisiert am 18.11.2016.

Kopyscinski, Jan; Schildhauer, Tilman J.; Biollaz, Serge M.A. (2010): Production of synthetic natural gas (SNG) from coal and dry biomass – A technology review from 1950 to 2009. In: *Fuel* 89 (8), S. 1763–1783. DOI: 10.1016/j.fuel.2010.01.027.

Kost, Christoph; Mayer, Johannes N.; Thomsen, Jessica; Hartmann, Niklas; Senkpiel, Charlotte; Philipps, Simon et al. (2013): Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien. Studie. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Online verfügbar unter https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/studie-stromgestehungskosten-erneuerbare-energien.pdf, zuletzt geprüft am 01.12.2016.

Kreyenberg, D.; Lischke, A.; Bergk, F.; Duennebeil, F.; Heidt, C.; Knörr, W. et al. (2015): Erneuerbare Energien im Verkehr. Potenziale und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträger. Hg. v. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR). Berlin.

Krzikalla, Norbert; Achner, Siggi; Brühl, Stefan (2013): Möglichkeiten zum Ausgleich fluktuierender Einspeisung aus Erneuerbaren Energien. Studie im Auftrag des Bundesverbandes Erneuerbare Energie. Hg. v. Bundesverband Erneuerbare Energie e.V.

Kubina, Konstantin Sebastian (2016): Regionale Energiezellen. Gestaltung und Modellierung eines regionalen Energiesystems als Zelle mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien. Masterarbeit. Universität Bremen, Bremen.

KWKG (Hg.) (2012): Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz). Online verfügbar unter https://www.bhkw-infozentrum.de/download/kwkg2012_20120712_lesefassung.pdf, zuletzt geprüft am 30.03.2016.

KWKG (Hg.) (2016): Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz - KWKG). Online verfügbar unter

http://www.buzer.de/s1.htm?g=Kraft-W%C3%A4rme-Kopplungsgesetz+-+KWKG&f=1, zuletzt geprüft am 30.03.2016.

Land Hessen (Hg.): Umweltatlas Hessen. Ein Angebot des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie. HLNUG. Online verfügbar unter http://atlas.umwelt.hessen.de/servlet/Frame/atlas/einfuehrung/einleitung.htm.

Landesamt für Statistik Niedersachsen (Hg.) (2016): LSN-Online - die kostenfreie Regionaldatenbank für Niedersachsen. Online verfügbar unter http://www1.nls.niedersachsen.de/statistik/default.asp, zuletzt aktualisiert am 18.11.2016.

Landkreis Osterholz: Windenergie. Hg. v. Landkreis Osterholz. Online verfügbar unter https://www.landkreis-osterholz.de/fuer-buerger/was-erledige-ich-wo-/bauen-und-wohnen/bauen/erneuerbare-energien/windenergie/.

Landkreis Osterholz (Hg.) (2011): Regionales Raumordnungsprogramm (RROP) 2011. Online verfügbar unter https://www.landkreis-osterholz.de/unser-landkreis/kreis-im-ueberblick/daten-und-fakten/nutzungsstruktur/regionales-raumordnungsprogramm/, zuletzt geprüft am 18.11.2016.

Landkreis Osterholz (Hg.) (2013a): Energiemonitoring 2010 - 2013.

Landkreis Osterholz (Hg.) (2013b): Übersicht der Windenergieanlagen im Landkreis Osterholz. Online verfügbar unter https://www.landkreis-osterholz.de/medien/dokumente/tabelle_mit_windenergieanlagen_im_landkreis_osterholz.pdf?20141222085552, zuletzt geprüft am 04.02.2015.

Landkreis Osterholz (Hg.) (2014a): Erneuerbare Energien. Online verfügbar unter https://www.landkreis-osterholz.de/fuer-buerger/was-erledige-ich-wo-/bauen-und-wohnen/bauen/erneuerbare-energien/, zuletzt geprüft am 04.02.2015.

Landkreis Osterholz (Hg.) (2014b): Kontrakt 2016 "Zukunft nachhaltig gestalten“. Online verfügbar unter https://www.landkreis-osterholz.de/downloads/datei/OTAxMDAzMzIyOy07L3Vzci9sb2NhbC9odHRwZC92aHRkb2NzL29zdGVyaG9sei9sa29oei9tZWRpZW4vZG9rdW1lbnRlL2tvbnRyYWt0XzIwMTZfX19lbmRmYXNzdW5nLnBkZg%3D%3D/kontrakt_2016___endfassung.pdf, zuletzt geprüft am 27.09.2016.

Landkreis Osterholz (2014c): Monitoringbericht 2014.

Landkreis Osterholz (Hg.) (2014d): Nutzungsstruktur. Online verfügbar unter https://www.landkreis-osterholz.de/unser-landkreis/kreis-im-ueberblick/daten-und-fakten/nutzungsstruktur/, zuletzt geprüft am 18.11.2016.

Landkreis Osterholz (Hg.) (2016a): Kampagne "Clever heizen!" im Landkreis Osterholz. Online verfügbar unter http://www.energiewende-osterholz.de/projekte/kampagne-clever-heizen-/, zuletzt aktualisiert am 16.11.2016.

Landkreis Osterholz (Hg.) (2016b): Klimaschutz-Teilkonzept. Online verfügbar unter https://www.landkreis-osterholz.de/fuer-buerger/was-erledige-ich-wo-/natur-und-umwelt/klimaschutz/klimaschutz-teilkonzept/, zuletzt geprüft am 18.11.2016.

Landkreis Osterholz (Hg.) (2016c): Kreistagsfraktionen. Online verfügbar unter https://www.landkreis-osterholz.de/portal/seiten/kreistagsfraktionen-901000516-21000.html, zuletzt geprüft am 19.11.2016.

Landkreis Osterholz (Hg.) (2016d): Übersicht der Windenergieanlagen im Landkreis Osterholz. Online verfügbar unter https://www.landkreis-osterholz.de/portal/seiten/windenergie-901000656-21000.html, zuletzt aktualisiert am 23.05.2016, zuletzt geprüft am 10.10.2016.

Landkreis Osterholz (Hg.) (2016e): Ziele der Energiewende. Online verfügbar unter http://www.energiewende-osterholz.de/prozess/ziele-der-energiewende/, zuletzt geprüft am 10.10.2016.

Lange, Stephan (2008): Systemanalytische Untersuchung zur Schnellpyrolyse als Prozessschritt bei der Produktion von Synthesekraftstoffen aus Stroh und Waldrestholz. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2007. Karlsruhe, Karlsruhe: Univ.-Verl.; Univ.-Bibl. Online verfügbar unter http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01dd09/582339642.pdf.

Lehr, U.; Löbbe, K. (1999): Umweltinnovationen - Anreize und Hemmnisse. Ein Überblick über die innovativen umweltpolitischen Instrumente. In: *Ökologisches Wirtschaften* 99 (2), S. 13–15.

Leichtfried, Franz E. (2007): Wasserstofferzeugung mittels PEM-Elektrolyse: Unterbrechungsfreie Versorgung mit ultrareinem Wasserstoff aus Wasser und Strom. Biovest GmbH, 2007. Online verfügbar unter http://www.a3ps.at/site/sites/default/files/conferences/2007_12_13_A3PS_H2_BZ_Konferenz/02_PARALLEL_SESSION_1/01_H2_Herstellung_und_Reinigung/04_Biovest_Leichtfried.pdf.

LeViness, Steve; Deshmukh, Soumitra R.; Richard, Laura A.; Robota, Heinz J. (2014): Velocys Fischer–Tropsch Synthesis Technology—New Advances on State-of-the-Art. In: *Top Catal* 57 (6-9), S. 518–525. DOI: 10.1007/s11244-013-0208-x.

Lütkehus, i; Salecker, H; Adlunger, K.; Klaus, T.; Vollmer, C.; Alsleben, C. et al. (2013): Potenzial der Windenergie an Land. Studie zur Ermittlung des bundesweiten Flächen- und Leistungspotenzials der Windenergienutzung an Land. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

Mališ, Jakub; Mazúr, Petr; Paidar, Martin; Bystron, Tomas; Bouzek, Karel (2016): Nafion 117 stability under conditions of PEM water electrolysis at elevated temperature and pressure. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 41 (4), S. 2177–2188. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.11.102.

Matthes, Felix (2014): Energiewende. Eine überhastete Reform. In: *Zeit Online* 2014, 14.04.2014. Online verfügbar unter http://www.zeit.de/wirtschaft/2014-04/energiewende-eeg-Erneuerbare, zuletzt geprüft am 10.10.2016.

Millet, P.; Grigoriev, S. (2013): Water Electrolysis Technologies. University of Paris, National Research Center “Kurchatov Institute”,. Paris/Moskau. Online verfügbar unter https://books.google.de/books?hl=de&lr=&id=6pMuGXwPi7IC&oi=fnd&pg=PA19&dq=Water+Electrolysis+Technologies+millet&ots=YN8ON6wBfS&sig=8cs20cyFxhC74xNt5VFwu92Zc7c#v=onepage&q=Water%20Electrolysis%20Technologies%20millet&f=false.

Molyneaux, Lynette; Brown, Colin; Wagner, Liam; Foster, John (2016): Measuring resilience in energy systems. Insights from a range of disciplines. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59, S. 1068–1079. DOI: 10.1016/j.rser.2016.01.063.

Molyneaux, Lynette; Wagner, Liam; Froome, Craig; Foster, John (2012): Resilience and electricity systems. A comparative analysis. In: *Energy Policy* 47, S. 188–201. DOI: 10.1016/j.enpol.2012.04.057.

Monsees, M. (2015): Wärme und Gasversorgung im Landkreis Osterholz, 16.03.2015. Telefonat an Pablo Thier.

Morris, Craig (2016): EEG: Umstieg von Einspeiseverfütung auf Ausschreibungen verdrängt Bürgerenergie. Hg. v. IASS Potsdam. Online verfügbar unter http://blog.iass-potsdam.de/de/2016/06/eeg-umstieg-von-einspeiseverguetung-auf-ausschreibungen-verdraengt-buergerenergie/, zuletzt geprüft am 27.09.2016.

Müller, Ulrich (2015): Abschlusspräsentation Regionales Wachstumsprojekt Energiekompetenz Osterholz. Europäisches Institut für Innovation. Osterholz-Scharmbeck, 21.05.2015.

Müller-Syring, G.; Henel, M.; Köppel, W.; Mlaker, H.; Sterner, M.; Höcher, T. (2013): Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz. DVGW Forschung. Leipzig.

MWV (2015): Jahresbericht 2015. Mineralöl-Zahlen 2014. Mineralölwirtschaftsverband e.V. Online verfügbar unter http://mwv.de/upload/Publikationen/dateien/MWV-JB_Web_2014_HBr2W53p7xHJWyQ.pdf.

Nitsch, J. (2016a): Die Energiewende nach COP 31 - Aktuelle Szenarien der deutschen Energieversorgung. Kurzstudie für den Bundesverband Erneuerbare Energien e.V. Stuttgart.

Nitsch, Joachim (2016b): Energiewende nach COP 21 – Aktuelle Szenarien der deutschen Energieversorgung. Die Kurzstudie für den Bundesverband Erneuerbare Energien e.V.

Nitsch, Joachim (2016c): Die Energiewende nach COP 21. Aktuelle Szenarien der deutschen Energieversorgung. Kurzstudie für den Bundesverband Erneuerbare Energien e.V. Stuttgart. Online verfügbar unter https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Studien/Joachim_Nitsch_Energiewende_nach_COP21.pdf.

Nitsch, Joachim; Pregger, Thomas; Naegler, Tobias; Heide, Dominik; Tena, Diego Luca de; Trieb, Franz et al. (2012): Langfristsszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Schlussbericht. Hg. v. BMU.

Nitsch, Joachim; Pregger, Thomas; Scholz, Yvonne; Naegler, Tobias; Sterner, Michael; Gerhardt, Norman et al. (2010): Leitstudie 2010. Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Hg. v. BMU.

Noack, Christoph; Burggraf, Fabian; Hosseiny, Seyed Schwan; Lettenmeier, Philipp; Kolb, Svenja; Belz, Stefan et al. (2015): Studie über die Planung einer Demonstrationsanlage zur Wasserstoff-Kraftstoffgewinnung durch Elektrolyse mit Zwischenspeicherung in Salzkavernen unter Druck. Online verfügbar unter http://www.lbst.de/resources/docs2015/BMBF_0325501_PlanDelyKaD-Studie.pdf, zuletzt geprüft am 08.12.2016.

NWZ (2016): EWE-Forschungszentrum kommt in neue Hände. In: *Nordwest Zeitung*, 11.11.2016. Online verfügbar unter http://www.nwzonline.de/wirtschaft/next-energy_a_31,1,3222606774.html, zuletzt geprüft am 16.11.2016.

O'Brien, J. E.; McKellar, M. G.; Stoots, C. M.; Herring, J. S.; Hawkes, G. L. (2009): Parametric study of large-scale production of syngas via high-temperature co-electrolysis. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 34 (9), S. 4216–4226. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2008.12.021.

online-handelsregister (Hg.): Athos Solar Verwaltungs UG (haftungsbeschränkt). Online verfügbar unter https://www.online-handelsregister.de/handelsregisterauszug/bw/Mannheim/A/Athos+Solar+Verwaltungs+UG+%28haftungsbeschr%C3%A4nkt%29/93256.

Osterholzer Stadtwerke (2013): Zeitreihen in viertelstündlicher Auflösung als Excel-Dateien zur Erzeugung aus erneuerbaren Energien und Endkundenverbrauch im Netzgebietes der Osterholzer Stadtwerke für das Jahr 2013. Osterholzer Stadtwerke.

Osterholzer Stadtwerke (Hg.) (2014): Beschreibung des Gasnetzes der Osterholzer Stadtwerke GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter https://www.osterholzer-stadtwerke.de/fileadmin/redakteure/netze/erdgas/netzgebiet/2014_03_28_Detaillierte_Gasnetzbeschreibung_OSW.pdf, zuletzt geprüft am 19.11.2016.

Osterholzer Stadtwerke (2015): Darstellung des Netzgebietes der Osterholzer Stadtwerke. Hg. v. Osterholzer Stadtwerke. Online verfügbar unter https://www.osterholzer-stadtwerke.de/unternehmen/unser-netzgebiet/.

Osterndorf, Christina (2014): Richtungsgebende Einflussfaktoren zur Gestaltung regionaler Energiewendeprozesse. Masterarbeit. Universität Bremen, Bremen.

Otero, Jesus; Sese, Javier; Michaus, Igor; Santa Maria, Maria; Guelbenzu, Eugenio; Irusta, Silvia et al. (2014): Sulphonated polyether ether ketone diaphragms used in commercial scale alkaline water electrolysis. In: *Journal of Power Sources* 247, S. 967–974. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.09.062.

Promberger, Markus; Meier, Lars; Sowa, Frank; Boost, Marie (2015): Chancen des Resilienzbegriffs für eine soziologische Armutsforschung. In: Martin Endreß und Andrea Maurer (Hg.): Resilienz im Sozialen. Theoretische und empirische Analysen. Wiesbaden: Springer VS, S. 265–294.

Purr, K.; Osiek, D.; Lange, M.; Adlunger, K. (2016a): Integration von Power to Gas/Power to Liquid in den laufenden Transformationsprozess. Umweltbundesamt.

Purr, Katja; Osjek, Dirk; Lange, Martin; Adlunger, Kirsten (2016b): Integration von Power to Gas/Power to Liquid in laufenden Transformationsprozess. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roslau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1/publikationen/position_power_to_gas-power_to_liquid_web.pdf, zuletzt geprüft am 01.12.2016.

PwC (Hg.) (2017): Blockchain - Chance für Energieverbraucher. Kurzstudie für die Verbraucherzentrale NRW, Düsseldorf.

Quaschning, Volker (2016a): Sektorkopplung durch die Energiewende. Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zum Erreichen der Pariser Klimaschutz-ziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung. In: *Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin* 2016. Online verfügbar unter http://www.volker-quaschning.de/publis/studien/sektorkopplung/index.php.

Quaschning, Volker (2016b): Sektorkopplung durch die Energiewende. Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zum Erreichen der Pariser Klimaschutzziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung. Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin.

Quaschning, Volker (2016c): Sektorkopplung durch die Energiewende. Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zum Erreichen der Pariser Klimaschutzziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung. Hg. v. Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin. Ingenieurwissenschaften Energie und Information. Online verfügbar unter http://pvspeicher.htw-berlin.de.

Renn, Ortwin (Hg.) (2015): Aspekte der Energiewende aus sozialwissenschaftlicher Perspektive. Deutsche Akademie der Technikwissenschaften; Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina; Union der deutschen Akademien der Wissenschaften e.V. Stand: März 2015. München: acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft). Online verfügbar unter https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2015_11_Analyse_Energiewende.pdf, zuletzt geprüft am 19.05.2016.

REON AG: Volllaststunden von Wind und PV Anlagen berechnet aus Zeitreihen (REON AG (2016) der Erzeugungsanlagen im Landkreis Osterholz.

REON AG (2016): Zeitreihen für die Erzeugung durch Anlagen im Gebiet des Landkreises Osterholz im Jahr 2015: Eine Windkraftanlage (2350 kW; 108 m Nabenhöhe, 150 m Gesamthöhe) und eine Photovoltaikanlage (normiert auf ein kW, 15 ° Neigung, Ausrichtung SSW), REON AG. Lilienthal. www.reon-ag.de

Rühl, Martin (2015): 100%ige Versorgung aus erneuerbaren Energien erreichen - Ist das möglich? Ein Erfahrungsbericht der Stadtwerke Wolfhagen. Kassel.

Saint Jean, Myriam de; Baurens, Pierre; Bouallou, Chakib; Couturier, Karine (2015): Economic assessment of a power-to-substitute-natural-gas process including high-temperature steam electrolysis. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 40 (20), S. 6487–6500. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.03.066.

Sargl, M.; Wolfsteiner, A.; Wittmann, G.; Sargl, Manfred; Wolfsteiner, Andreas; Wittmann, Günter (2011): Neue Weltklimaordnung: Emissionshandel zwischen Staaten mit schrittweiser Klimagerechtigkeit // Neue Weltklimaordnung. Emissionshandel zwischen Staaten mit schrittweiser Klimagerechtigkeit (10).

Schäfer-Stradowski, S.; Boldt, B. (2015): „Power-to-Gas“ – gesetzlich konturierte Verwertungspfade für den Weg in die energiepolitische Gegenwart. ZUR.

Schenuit, C.; Heuke, R.; Paschke, J. (2016): Potentialatlas Power-to-Gas. Klimaschutz umsetzen, erneuerbare Energien integrieren, regionale Wertschöpfung ermöglichen. Deutsche Energie-Agentur GmbH. Berlin. Online verfügbar unter https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/esd/9144_Studie_Potenzialatlas_Power_to_Gas.pdf, zuletzt geprüft am 08.12.2016.

Schiebahn, Sebastian; Grube, Thomas; Robinius, Martin; Tietze, Vanessa; Kumar, Bhunesh; Stolten, Detlef (2015): Power to gas. Technological overview, systems analysis and economic assessment for a case study in Germany. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 40 (12), S. 4285–4294. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.01.123.

Schirrmeister, Ole (2009): Nachhaltige Energieversorgung im Landkreis Osterholz. Teil 1: Bestandsaufnahme & Potenzialanalyse. Worpswede.

Schlesinger, Michael; Lindenberger, Dietmar; Lutz, Christian (2014): Entwicklung der Energiemärkte. Energiereferenzprognose. Endbericht. Unter Mitarbeit von Peter Hofer, Andreas Kemmler, Almut Kirchner, Sylvie Koziel, Andrea Ley, Alexander Piegsa et al. Hg. v. Prognos, Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln und Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung. Basel, Köln, Osnabrück. Online verfügbar unter http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/entwicklung-der-energiemaerkte-energiereferenzprognose-endbericht,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf, zuletzt geprüft am 26.05.2016.

Schmidt, P. R.; Zittel, W.; Weindorf, W.; Raksha, T. (2016a): Renewables In Transport 2050. Empowering A Sustainable Mobility Future With Zero Emission Fuels From Renewable Electricity -Europe And Germany-. 1086. Aufl. Frankfurt am Main.

Schmidt, Patrick; Zittel, W.; Weindorf, W.; Rakasha, T.; Goericke, D. (2016b): Renewables in transport 2050 – Empowering a sustainable mobility future with zero emission fuels. In: Michael Bargende, Hans-Christian Reuss und Jochen Wiedemann (Hg.): 16. Internationales Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik. Wiesbaden: Springer Vieweg (Proceedings), S. 185–199.

Schön, M. (2014): Im Kreishaus gibt's Energie zum Nulltarif. In: *Osterholzer Kreisblatt*, 2014.

Schubert, Miriam; Schubert, Lennart; Thome, Andreas; Kiewidt, Lars; Rosebrock, Christopher; Thoming, Jorg et al. (2016): Coatings of active and heat-resistant cobalt-aluminium xerogel catalysts. In: *Journal of colloid and interface science* 477, S. 64–73. DOI: 10.1016/j.jcis.2016.05.006.

Schuchardt, Bastian; Wittig, Stefan; Spiekermann, Jan (2010a): Klimaszenarien für NordWest 2050. Teil 2: Randbedingungen und Beschreibung. Bioconsult. Bremen.

Schuchardt, Bastian; Wittig, Stefan; Spiekermann, Jan (2010b): Klimaszenarien für NordWest2050. Teil 1: Grundlagen. Bioconsult. Bremen.

Smolinka, T.; Günther, M.; Garche J. (2011): „Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien“. Kurzfassung des Abschlussberichts. NOW-Studie. Online verfügbar unter http://www.hs-ansbach.de/uploads/tx_nxlinks/NOW-Studie-Wasserelektrolyse-2011.pdf.

Sonnberger, Marco; Ruddat, Michael; Wedderhoff, Oliver; Salup Antje (2016): Die gesellschaftliche Wahrnehmung der Energiewende. Ergebnisse einer deutschlandweiten Repräsentativbefragung. Stuttgart. Online verfügbar unter http://www.energiewende-akzeptanz.de/wp-content/uploads/2016/10/Sonnberger-Ruddat-2016-Die-gesellschaftliche-Wahrnehmung-der-Energiewende.pdf, zuletzt geprüft am 01.12.2016.

Sprengard, Christoph; Treml, Sebastian; Holm, Andreas H. (2013): Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe. Metastudie Wärmedämmstoffe – Produkte – Anwendungen – Innovationen. FIW München. München (Bericht FO-12/12). Online verfügbar unter Technologien und Techniken zur Verbesserung.

Stadtwerke Osterholz (Hg.) (2016): Festlegung der Grundversorger. Online verfügbar unter https://www.osterholzer-stadtwerke.de/netze/strom/grundversorger/, zuletzt geprüft am 19.11.2016.

Steinbrück, Peer; Machnig, Matthias (2013): Neue Energie - sicher, bezahlbar, umweltverträglich - 10 Maßnahmen für eine erfolgreiche Energiewende. Online verfügbar unter http://www.spd-thueringen.de/dl/10_Aufgaben_Energiewende_final.pdf.

Steinmüller, H.; Reiter, G.; Tichler, R.; Friedl, C.; Furtlehner, M.; Lindorfer, J. et al. (2014): Power to Gas – eine Systemanalyse. Markt- und Technologiescouting und -analyse. Endbericht. Online verfügbar unter http://www.ea.tuwien.ac.at/fileadmin/t/ea/projekte/PtG/Endbericht_-_Power_to_Gas_-_eine_Systemanalyse_-_2014.pdf.

Sterner, M.; Thema, M.; Eckert, F.; Lenck, T.; Götz, P. (2015a): Bedeutung und Notwendigkeit von Windgas für die Energiewende in Deutschland. Forschungsstelle Energienetze und Energiespeicher (FENES) OTH Regensburg, Energy Brainpool, Studie im Auftrag von Greenpeace Energy. Regensburg, Hamburg, Berlin.

Sterner, M.; Thema, M.; Eckert, F.; Lenck, T.; Götz, P. (2015b): Bedeutung und Notwendigkeit von Windgas für die Energiewende in Deutschland, Forschungsstelle Energienetze und Energiespeicher (FENES). Energy Brainpool, Studie im Auftrag von Greenpeace Energy. OTH Regensburg. Regensburg/Hamburg/Berlin. Online verfügbar unter http://www.speicher-initiative.at/assets/Uploads/04-2015-FENES-EBP-GPE-Windgas-Studie.pdf.

Sterner, M.; Thema, M.; Eckert, F.; Lenck, T.; Götz, P.(2015): Bedeutung und Notwendigkeit von Windgas für die Energiewende in Deutschland, Forschungsstelle Energienetze und Energiespeicher (FENES) OTH Regensburg, Energy Brainpool, Studie im Auftrag von Greenpeace Energy, Regensburg/Hamburg/Berlin (Hg.) (2015c): Bedeutung und Notwendigkeit von Windgas für die Energiewende in Deutschland. Greenpeace Windgas-Studie. Hamburg.

Sterner, Michael (2009a): Bioenergy and renewable power methane in integrated 100% renewable energy systems. Limiting global warming by transforming energy systems. Zugl.: Kassel, Univ., Diss., 2009. Kassel: Kassel Univ. Press. Online verfügbar unter http://www.upress.uni-kassel.de/katalog/abstract.php?978-3-89958-798-2.

Sterner, Michael (2009b): Bioenergy and renewable power methane in integrated 100% renewable energy systems. Limiting global warming by transforming energy systems. Kassel [Germany]: Kassel University Press (Erneuerbare Energien und Energieeffizienz Renewable energies and energy efficiency, v. 14).

Sterner, Michael (2014): Power-to-Gas. AG 2: Beitrag der Speichertechnologien. Forschungsstelle Energienetze und Energiespeicher. OTH Regensburg, 2014. Online verfügbar unter https://www.energie-innovativ.de/fileadmin/user_upload/energie_innovativ/Energiedialog/Dokumente/2014-12-05-Power-to-Gas-Sterner.pdf.

Sterner, Michael; Stadler, Ingo (2014): Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-37380-0.

Stolten, Detlef; Emonts, Bernd (2016): Hydrogen science and engineering. Materials, processes, systems and technology.

Stührmann, Sönke; Gleich, Arnim von; Brand, Urte; Gößling-Reisemann, Stefan (2012): Mit dem Leitkonzept Resilienz auf dem Weg zu resilienteren Energieinfrastrukturen. In: Michael

Decker, Armin Grunwald und Martin Knapp (Hg.): Der Systemblick auf Innovation - Technikfolgenabschätzung in der Technikgestaltung. NTA4 - Tagung des Netzwerks TA. Berlin. Berlin: Edition Sigma (Gesellschaft – Technik – Umwelt, 16), S. 181–192.

Taleb, Nassim Nicholas (2008): Der Schwarze Schwan. Die Macht höchst unwahrscheinlicher Ereignisse. 1. Aufl. München: Hanser.

TenneT TSO GmbH (Hg.) (2014): EEG-Einspeisung nach § 77 EEG 2014 Regelzone gesamt 2014. Online verfügbar unter https://eeg-kwkg.tennet.eu/EEG_Auskunft/eeg-einspeisung.do, zuletzt geprüft am 19.11.2016.

Tichler, R.; Steinmüller, H.; Reiter, G.; Furtlehner, M.; Goers, S.; Lindorfer, J. et al. (2014): Bericht G 3-01-12 Technoökonomische Studie von Power-to-Gas Konzepten. Teilprojekt D „Wirtschaftlichkeit und Systemanalysse von Power-to-Gas-Konzepten“. Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. Online verfügbar unter http://www.dvgw-innovation.de/fileadmin/dvgw/angebote/forschung/innovation/pdf/g3_01_12_tp_b_d.pdf, zuletzt geprüft am 08.12.2016.

Tremel, A.; Wasserscheid, P.; Baldauf, M.; Hammer (2015): Techno-economic analysis for the synthesis of liquid and gaseous fuels based on hydrogen production via electrolysis. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 2015 (40), S. 11457–11464.

Trost, Tobias; Horn, Sönke; Jentsch, Mareike; Sterner, Michael (2012): Erneuerbares Methan. Analyse der CO2-Potenziale für Power-to-Gas Anlagen in Deutschland. In: *Z Energiewirtsch* 36 (3), S. 173–190. DOI: 10.1007/s12398-012-0080-6.

UBA (2015): Strommix in Deutschland. Nettostromerzeugung im Jahr 2014 in Deutschland. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/bilder/dateien/strommix_in_deutschland_2014.pdf, zuletzt geprüft am 23.03.2016.

UBA (2016): Energieverbrauch privater Haushalte. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/energieverbrauch-privater-haushalte, zuletzt aktualisiert am 26.08.2016, zuletzt geprüft am 11.10.2016.

UFOP (2015): UFOP- Marktinformationen Ölsaaten und Biokraftstoffe. Union zur Förderung von Öl- und Proteinpflanzen e.V. Berlin. Online verfügbar unter http://www.ufop.de/files/4014/2020/5592/RZ_MI_0115.pdf.

Umweltatlas Hessen (2016), Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie http://atlas.umwelt.hessen.de/servlet/Frame/atlas/klima/inhalt-klima.htm [Zugriff am 10.08.2016]

Umweltbundesamt (Hg.) (2014): Energieverbrauch nach Energieträgern, Sektoren und Anwendungen 2014. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/3_abb_eev-sektoren-et_2016-04-15.pdf, zuletzt aktualisiert am 27.06.2016, zuletzt geprüft am 10.10.2016.

Universität Bremen (Hg.) (2014): RESYSTRA – Auf dem Weg zu resilienten Energiesystemen! Online verfügbar unter http://www.resystra.de/, zuletzt geprüft am 10.10.2016.

Universität Bremen (2015): Workshop Resystra am 4.12.2015 im Landkreis Osterholz. Hg. v. Universität Bremen. Bremen.

USGS National Minerals Information Center (2016): Mineral Commodity Summaries 2016. Hg. v. U.S. Department of the Interior: Reston. Washington. Online verfügbar unter http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/platinum/mcs-2016-plati.pdf, zuletzt geprüft am 01.12.2016.

Vanhoudt, Wouter; Barth, Frederic; Lanoix, Jean-Christophe; Neave, Joel; Schmidt, Patrick R; Weindorf, Werner et al. (2016): Power-to-gas: Short term and long term opportunities to leverage synergies between the electricity and transport sectors through power-to-hydrogen. Online verfügbar unter http://www.lbst.de/download/2016/Hinicio-LBST_2016_PtH2-study_Fondation-Tuck.pdf, zuletzt geprüft am 08.12.2016.

Verdegaal, Wolfgang Michael; Becker, Sebastian; Olshausen, Christian von (2015): Power-to-Liquids: Synthetisches Rohöl aus CO2, Wasser und Sonne. In: *Chemie Ingenieur Technik* 87 (4), S. 340–346. Online verfügbar unter http://online-library.wiley.com/doi/10.1002/cite.201400098/full.

Wachsmuth, J.; Blohm, A.; Gößling-Reisemann, S.; Eickemeier, T.; Ruth, M.; Gasper, R.; Stührmann, S. (2013): How will renewable power generation be affected by climate change? The case of a Metropolitan Region in Northwest Germany. In: *Energy* 58, S. 192–201. DOI: 10.1016/j.energy.2013.06.035.

Wachsmuth, Jakob (2015): Resilienz als Leitorientierung bei der Gestaltung des lei-tungsgebundenen Energiesystems. In: Jakob Wachsmuth, Ulrich Petschow, Urte Brand, Ulrike Fettke, E. Pissarskoi, G. Fuchs et al. (Hg.): Richtungsgebende Einflussfaktoren im Spannungsfeld von zentralen vs. dezentralen Orientierungen bei der Energiewende und Ansatzpunkte für ein Leitkonzept Resilienz. RESYSTRA-Diskussionspapier 1. Bremen/Berlin, S. 75–80.

Wang, Mingyong; Wang, Zhi; Gong, Xuzhong; Guo, Zhancheng (2014): The intensification technologies to water electrolysis for hydrogen production – A review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29, S. 573–588. DOI: 10.1016/j.rser.2013.08.090.

Werner, Kathrin (Hg.) (2013): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Unter Mitarbeit von Rosemarie Benndorf. Deutschland. Stand: Oktober 2013. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt (Für Mensch & Umwelt).

Wietschel, Martin; Ullrich, Sandra (Hg.) (2015): Energietechnologien der Zukunft. Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze. Wiesbaden: Springer Vieweg (Lehrbuch).

Wronski, R.; Küchler, S.; Lückge, H.; Schlegelmilch, K.; Duchene, K. (2014): Umsetzung eines CO2-Mindestpreises in Deutschland. Internationale Vorbilder und Möglichkeiten für die Ergänzung des Emissionshandels. European Climate Foundation.

Zah, R.; Böni, H.; Gauch, M.; Hischier, R.; Lehmann, M.; Wäger, P. (2007): Ökobilanz von Energieprodukten–Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen. Studie des EMPA im Auftrag der Bundesämter für Umwelt, Landwirtschaft und Energie der Schweiz, EMPA Materials Science & Technology, Zurich/St. Gallen/Dübendorf. In: *EMPA Materials Science & Technology, Zurich/St. Gallen/Dübendorf*. Online verfügbar unter http://www.news-service.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/8514.pdf.

Zeman, Frank (2007): Energy and Material Balance of CO 2 Capture from Ambient Air. In: *Environ. Sci. Technol.* 41 (21), S. 7558–7563. DOI: 10.1021/es070874m.

Zimmer, René (2013): 10 Kernthesen zur Akzeptanz der Wasserstoffmobilität in der Bevölkerung Deutschlands. Bericht aus den Projekt HyTrust. Online verfügbar unter https://www.now-gmbh.de/content/5-service/4-publikationen/4-nip-wasserstoff-und-brennstoffzellentechnologie/hytrust_10thesen_1306_v4.pdf, zuletzt geprüft am 01.12.2016.

Zuberbühler, U. (2015): Fahrplanbetrieb einer 250 kW Power-to-Gas-Anlage in Szenarien mit steigenden EE-Anteilen und Entwicklung einer Smart-Gaseinspeisung. Statusseminar der Förderinitiative Energiespeicher. Berlin, 2015.

7 Erfahrungen mit ausgewählten methodischen Ansätzen

7.1 Leitkonzept Resilienz: Wirksamkeit von Leitkonzepten und Wirksamkeitsfaktoren

In beiden untersuchten Fallstudien im Landkreis Osterholz und der Stadt Wolfhagen haben vorhandene Leitorientierungen eine bedeutende Rolle gespielt. Was allerdings auch nicht weiter verwunderlich ist, denn wir haben diese beiden Regionen u. a. wegen ihres Engagement für eine regionale energetische Selbstversorgung auf Basis Erneuerbarer Energien ausgewählt. Es konnten bei den für die Energiewende engagierten Akteuren verbreitete Leitorientierungen wie *Regionale Wertschöpfung, Regionale Unabhängigkeit/Autonomie* und *Dezentralisierung sowie Nachhaltigkeit (mit Fokus auf Umwelt- und Naturschutz, Klimaschutz)* identifiziert werden, die für die Energiewende eine wichtige richtungsgebende Wirkung in den Regionen hatten. Dies bestätigt einmal mehr, dass Leitorientierungen als richtungsgebender Einflussfaktor in systemischen Innovationen (Transformationen) eine wichtige Rolle spielen. Im Rahmen des Projektes RESYSTRA stellte sich darüber hinaus die Frage, ob und wie Leitorientierungen bewusst zur Richtungsgebung mittels Leitorientierungsprozessen eingesetzt werden können, was mit dem Leitkonzept Resilienz und spezifizierenden Gestaltungsleitbildern im Rahmen der Fallstudien, sozusagen in Form eines wissenschaftlichen begleiteten Realexperiments praktisch erprobt werden sollte. Da im Rahmen von RESYSTRA das Leitkonzept und die Gestaltungsleitbilder im Sinne der ersten und zweiten Phase des Leitorientierungsprozesses (1. Aufgreifen von Weltbildern; 2. Spezifizierung in Gestaltungsleitbilder) entwickelt wurde, jedoch die nachfolgenden Phasen (3. Verbreitung; 4. Umsetzung) erst nach Projektende durchlaufen werden können, konnte die langfristige Wirksamkeit als Handlungsleitung noch nicht abgeschätzt werden. Eine kurzfristige Wirksamkeit in der Form, ob und wie die entwickelten Gestaltungsleitbilder auf Resonanz bei den regionalen Akteuren treffen konnten, die an den Spezifizierungsprozessen teilnahmen, ließ sich aber durchaus untersuchen.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass das propagierte Leitkonzept *Resilienz* bzw. *Resiliente Energiesysteme* (zum Großteil verstanden im verengten Verständnis als Versorgungssicherheit) auf Resonanz bei den regionalen Akteuren traf, es aber im Laufe eines solchen Leitorientierungsprozesses bestimmte Wirksamkeitsfaktoren besonders zu beachten gilt (vgl. Kapitel 4.2). Die bereits zu Beginn in Kapitel 4 formulierten Wirksamkeitsfaktoren konnten grundsätzlich mit den Untersuchungen in den Fallstudien bestätigt werden, es haben sich aber gewisse Faktoren als besonders bedeutend herausgestellt. Diese sollen nachfolgend in abstrahierter Form und geordnet nach inhalts-, system-, prozess- und akteursbezogenen Wirksamkeitsfaktoren dargestellt wer-

den. Diese Ausführungen sind aufgrund ihres Bezugs zu diesen beiden Fallbeispielen nur begrenzt verallgemeinerungsfähig, können aber wohl trotzdem als Handlungsempfehlungen für nachfolgende Leitorientierungsprozesse herangezogen werden.

Inhaltsbezogene Wirksamkeitsfaktoren von Leitkonzepten:

- Leitkonzepte sollten spezifizierbar sein, d.h. in machbarere Gestaltungsleitbilder übersetzbar sein, um plausibler und einleuchtender für die Adressaten zu werden. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass solche Spezifizierungen auch das ganzheitliche Verständnis des spezifizierten Leitkonzeptes transportieren.
- Leitkonzepte sollten genügend Interpretationsspielraum bieten, um Diskussionen anregen und Verständigungs- und Aushandlungsprozesse in Gang setzen zu können.

Systembezogene Wirksamkeitsfaktoren von Leitkonzepten:

- Leitkonzepte sollten Bezüge zu bereits vorhandenen Leitorientierungen aufweisen. Sollten aber auch deutlich mehr transportieren als die Summe oder den kleinsten gemeinsamen Nenner aller schon vorfindbaren Leitorientierungen.
- Leitkonzepte sollten existierende oder zukünftig relevante Problemstellungen aufgreifen (z.B. greift Resilienz die noch unzureichende Vorbereitung auf bisher noch unbekannte Störereignisse und Krisen auf).
- Leitkonzepte sollten zeitgemäß sein in dem Sinne, dass sie Anknüpfungsmöglichkeiten an aktuelle Problemlagen und Lösungsmöglichkeiten eröffnen.
- Insbesondere die systembezogenen Wirksamkeitsfaktoren „Zeitgemäßheit“ und „Problemlösungsorientierung“ haben sich als stark interpretationsfähig und abhängig vom jeweiligen Adressaten bzw. Adressanten erwiesen.
- Propagierte Leitkonzepte sollten möglichst komplementär und kompatibel zu weiteren Richtungsimpulsen sein.

Prozess- und akteursbezogene Wirksamkeitsfaktoren

Phase 1: Anstoß des Prozesses und Aufgreifen von Weltbildern (erwünschte Richtung) mit Leitkonzept:

- Es sollten Prozessträger vorhanden sein, welche gemäß der erwünschten Richtung (vorhandener Weltbilder) ein adäquates Leitkonzept identifizieren bzw. ausarbeiten können. Sie sollten es in einem zweiten Schritt mit ihrem Wissen bezogen auf den jeweiligen Anwendungsbereich in Form eines Gestaltungsleitbildes näher spezifizieren können (insb. Fachpromotoren) sowie die Überzeugungskraft und den Durchsetzungswillen haben (insb. Beziehungspromotoren), es in die nächsten Phasen des Leitorientierungsprozesses zu überführen.
- Die Gruppe der Prozessträger sollte nur eine geringe Fluktuation aufweisen, damit ein vertieftes gemeinsames Verständnis von und eine geteilte Überzeugung mit Blick auf das Leitkonzept erarbeitet werden kann.

Phase 2: Spezifizierung des Leitkonzeptes in Gestaltungsleitbilder:

- Es sollten Fachpromotoren unter den Prozessträgern vorhanden sein, die mit ihrem Wissen die Spezifizierung des Leitkonzeptes Resilienz unterstützen können.
- Es sollten ausgewählte, möglichst vom Leitkonzept betroffene Adressaten involviert werden. Diese können wichtiges (lebensweltliches) Wissen und Erfahrungen sowie Wünsche und realistische Einschätzungen in die Spezifizierung der Gestaltungsleitbilder einbringen. Es sollte darauf geachtet werden, dass alle relevanten Adressatengruppen im Prozess der Spezifizierung vertreten sind.
- Unter den Prozessträgern sollten Akteure mit Netzwerkkompetenzen vorhanden sein, welche in der Lage sind die Kooperationspartner zu begleiten und einzubinden.
- Es sollten Entscheidungs- und Funktionsträger beteiligt werden, die Akzeptanz für den Prozess schaffen und ihn langfristig verstetigen können. Hierbei sollte darauf geachtet werden, dass solche Akteure längerfristig am Prozess teilnehmen können.
- Es sollten mögliche Leitakteure und Diffusionsintermediäre identifiziert werden, die bei der Verbreitung und/oder Umsetzung des entwickelten Gestaltungsleitbildes unterstützen können. Diese sollten durch Netzwerk- und Kommunikationsarbeit über die gesamten Prozessphasen integriert werden.
- Das Aufzeigen von Praxisbeispielen stellt ein wichtiges Kommunikationsinstrument insb. für komplexe Leitkonzepte wie Resilienz dar und sollte Berücksichtigung finden.
- Die entwickelten Gestaltungsleitbilder sollten schriftlich dokumentiert werden, was ihre Verbindlichkeit und Verbreitung erhöht.

7.2 Schildkrötenmodell der richtungsgebenden Einflussfaktoren

- Das „Schildkrötenmodell der richtungsgebenden Einflussfaktoren“ stellte sich in gleich vier Funktionen als ausgesprochen hilfreich heraus, zunächst als Suchraster (Analyseinstrument), dann zur Darstellung der Erkenntnisse (kondensierte Strukturierung und Veranschaulichung) und als Ausgangspunkt für die agentenbasierte Modellierung (Strukturierung von Modellelementen und Beziehungen zwischen ihnen). Schließlich enthält das Schildkrötenmodell mit seiner Strukturierung der Richtungsimpulse schon den Kern der Maßnahmenoptionen zur Realisierung von Resilienten Energiesystemen auf den beiden betrachteten räumlichen Ebenen (national und regional).
- Mit Hilfe des Modells konnte sehr gut aufgezeigt werden, dass Richtungsimpulse nur in ihrem Zusammenspiel eine Wirkung auf Systeminnovationen haben können, dass sie möglichst komplementär und kompatibel zueinander wirken müssen.
- Bisher lag beim Schildkrötenmodell der Fokus auf dem Aufzeigen der relevanten richtungsgebenden Impulse. Dies war eine Konsequenz daraus, dass wir uns auf die Rich-

tungsgebung in gesellschaftlich und politisch gewünschten Innovationsprozessen konzentrierten. Fragen der Innovationsfähigkeit waren damit hintenangestellt. In einem nächsten Schritt könnte es nun darum gehen auch die hemmenden Faktoren stärker zu berücksichtigen. In das Schildkrötenmodell könnten dazu zunächst vor allem auch inkompatible Richtungsimpulse (z.B. konkurrierende Leitkonzepte) integriert werden.

- In den spezifizierten Schildkröten auf nationaler und regionaler Ebenen müssen bei den richtungsgebenden Einflussfaktoren „Anreiz Pull“ und „Leitakteure“ in Zukunft noch sehr viel mehr Richtungsimpulse berücksichtigt werden als z.B. nur Energiegenossenschaften oder Start-Ups.
- In Zukunft sollte im Schildkrötenmodell auch noch stärker zum Ausdruck kommen, von welchem Akteur mit welchen Machtverhältnissen die jeweiligen Richtungsimpulse kommen, diese ist Teil einer ebenfalls noch anstehenden Aufgabe, nämlich die Beantwortung der Frage, welche Wirkungsstärke in den jeweils untersuchten Fällen bestimmte Richtungsimpulse haben können.

7.3 Agentenbasierte Modellierung

- Das agentenbasierte Modell wurde für die Quantifizierung des über das Schildkrötenmodell hergeleiteten Systemverständnisses eingesetzt. Es stellte sich dabei als hilfreiches Werkzeug für die dynamische Analyse von Innovationsprozessen heraus. Durch die quantitative Implementierung von Einflussfaktoren und Akteuren konnten potentielle Entwicklungspfade der untersuchten Systeminnovation Power-to-Fuel bestimmt werden.

- Es stellte sich heraus, dass mit den durchgeführten Simulationen die „Macht“ bzw. die tatsächliche „Wirkung“ der im Schildkrötenmodell qualitativ dargestellten Einflussfaktoren dargestellt werden kann. Die Ergebnisse bestätigten die These, dass die identifizierten Einflussfaktoren nur im Zusammenspiel eine entscheidende Wirkung auf den Innovationsprozess ausüben können.

- Mit der innerhalb des Projektes entwickelten ersten Version wurde ein Grundstein für die Simulation von Innovationsprozessen gelegt. Die Komplexität der Modellzusammenhänge könnte dabei sukzessive erweitert werden, um so immer realistischere Zusammenhänge abzubilden. So könnten die in der Modellumgebung stattfindenden Aktivitäten von Agenten und Objekten unter anderem geografisch lokalisiert werden. Auf diese Weise würden benötigte Infrastrukturen und Transportwege zwischen Produzenten und Konsumenten abgebildet und dadurch eine komplexere Logik für einen monetären, energetischen und kommunikativen Austausch zwischen den Einheiten ermöglicht werden.

- Mit der bisherigen Modelllogik ist es möglich, die ökonomische Entwicklung einer Systeminnovation zu simulieren, bis sie die angestrebte Marktreife erlangt hat. Für die Simulation der Systementwicklung über diesen Zeitraum hinaus müssten erweiterte Preisbildungsmechanismen und Anbieterwettbewerb implementiert werden.
- Technische und physikalische Zusammenhänge des Energiesystems können mit der gegenwärtigen Modellversion nicht abgebildet werden. Das bedeutet, dass aus den Simulationsergebnissen bisher nicht abgeleitet werden kann, dass für das Energiesystem bzw. dessen Stabilität oder auch für den Energiewendeprozess aus technischer Sicht ein Mehrwert entstanden ist. Technologische Einheiten wurden vielmehr als Blackboxes implementiert, denen zwar einzelne techno-ökonomische Eigenschaften zugewiesen wurden. Doch können beispielsweise aus der Ausbreitung von P2F-Anlagen keine direkten Schlüsse in Bezug auf die Stabilität des Stromnetzes gezogen werden. Über entsprechende Erweiterungen ließen sich solche physikalischen Zusammenhänge abbilden und damit auch potentielle Störungen ermitteln.

8 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Insbesondere zwei Entwicklungen in der jüngeren Vergangenheit erfordern eine Neuausrichtung der Energiewende und der sie begleitenden und unterstützenden Forschung. Zum einen sind wir in eine neue Phase in der Energiewende eingetreten. Der Umstieg auf Erneuerbare Energiequellen wird insbesondere im Elektrizitätsbereich nicht mehr infrage gestellt, auch nicht die Vorstellung, dass er im Wesentlichen auf Windenergie, Photovoltaik und – deutlich begrenzter – auf Biogasanlagen basiert. In der jetzigen Phase schwenkt der Fokus vom Technologischen der Stromerzeugung zum Systemischen des gesamten Energiesystems mit Strom, Wärme und Mobilität. Und damit kommen verstärkt die Versorgungssicherheit und damit die Notwendigkeit des Umbaus in Richtung Resilienter Energiesysteme auf die Tagesordnung. Neben Erzeugung (regenerativ) und Verbrauch (effizient) rücken Wandlung, Verteilung, Regelung, Speicherung und neue Geschäftsmodelle in den Vordergrund. Intelligente Formen der Kopplung der Sektoren Elektrizität, Wärme und Mobilität müssen entwickelt werden. Contracting und regionale Vermarktung – auch von Strom - wird an Bedeutung gewinnen. Und nach unserer Überzeugung werden synthetische Treibstoffe in denjenigen Mobilitätsbereichen eine wichtige Rolle spielen, die nicht so ohne weiteres elektrifiziert werden können.

Zum zweiten geht ein neuer starker Veränderungsimpuls vom Pariser Klimaabkommen aus. Wärme und Verkehr als bisher in der Energiewende eher stagnierende Bereiche müssen eine ähnliche Veränderungsdynamik erfahren, wie dies im Stromsektor durch das Erneuerbare Energiengesetz gelungen ist. Durch welche Maßnahmen dies erreicht werden kann, ist derzeit noch unklar. Ein wichtiger Hebel liegt in der Verteuerung der Emissionen von fossilem CO_2 durch Anhebung der Zertifikatspreise oder durch eine CO_2-Steuer.

8.1 Gestaltung eines Resilienten Energiesystems als Vorbereitung aufkommender Turbulenzen

100 % Erneuerbare nicht nur im Strombereich, sondern auch in der Wärmeversorgung, in Industrieprozessen, der Grundstoffindustrie und im Bereich Mobilität sind eine echte Herausforderung. Sie wird, je nach realisierbarer Umsetzung von Einsparpotenzialen, einen Ausbau auf das bis zu Zwanzigfache der bis Ende 2015 installierten EE-Kapazitäten erfordern (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer ISI 2015; Peter 2013). Ein Akzeptanzverlust und die Skandalisierung des Ausbaus der Anlagen und Netze können massiv zunehmen und die Energiewende insgesamt gefährden. Wenn das 1,5 °C Klimaschutzziel eingehalten werden soll, müssen die im EEG 2014 festgelegten Ausbaukorridore deutlich angehoben werden. Die energiebedingten Treibhausgasemissionen sollten bereits bis 2040 auf nahezu null sinken (Quaschning 2016d).

Für den Schwerlast-, Schiffs- und vor allem Flugverkehr ist zum bisherigen Zeitpunkt keine Form der Elektrifizierung absehbar. Mit hoher Wahrscheinlichkeit muss auf synthetische Kraftstoffe

(und damit weiterhin auf Verbrennungsprozesse) gesetzt werden, nicht zuletzt vor dem Hintergrund bestehender Flotten, langer Laufzeiten für die Zertifizierung von neuen Technologien und der prognostizierten Verdopplung der Fluggastzahlen (IATA 2015). Mit synthetischen Kraftstoffen eröffnet sich eine (auch im Vergleich zu Wasserstoff) schnell umsetzbare Option, nicht nur zur Bereitstellung von Energieträgern für diese Bereiche, sondern auch als handhabbare Speicheroption (Rückverstromung allerdings nur im Notfall).

Die derzeit noch weitgehend garantierte Versorgungssicherheit mit Energie wird in dieser Form in Zukunft nicht mehr so ohne weiteres zu gewährleisten sein. Neben der grundsätzlichen Herausforderung, dass alle drei Bereiche – Strom, Wärme und Mobilität – in die Energiewende einbezogen werden, liegen mit Blick auf die Versorgungssicherheit die Probleme in der zukünftigen Struktur dieser Bereiche, v.a. in der ‚Form der Kopplung' zwischen den (leitungsgebundenen) Sektoren. In der offenen und ungewissen Zukunft nehmen die Unsicherheiten[112] zu, muss mit extrem unwahrscheinlichen Ereignissen[113] und mit völligen Überraschungen[114] gerechnet werden. Die Unsicherheiten spielen sich zwischen den räumlichen Skalen des Energiesystems ab (lokal, regional, national, international) und nicht zuletzt im Prozess der Transformation des komplexen und dynamischen sozio-technischen Energiesystems selbst (mögliche Kipppunkte). Solche Kipppunkte bzw. Instabilitäten sind ja nicht nur problematisch, sie sind auch wichtige Elemente in weitreichenden Transformationsprozessen.

Eine mögliche Vorbereitung auf solche Herausforderungen (known unknowns und unknown unknowns) ist die Gestaltung eines *Resilientes Systems.* Wobei wir Resilientes System als biomimetisches Leitkonzept verstehen. Orientiert an dem Erfolg von Evolutionsprozessen und Ökosystemen, hoffen wir, von deren über Jahrmillionen in unzähligen Trial-and-Error-Prozessen erprobten und optimierten Strukturen und Prinzipien profitieren zu können. Wie in allen biomimetischen Abstraktionsprozessen geht es dabei nicht darum die Natur zu kopieren, sondern aus verstandenen Erkenntnissen der Technischen Biologie zu eigenständigen Gestaltungskonzepten zu gelangen. Deshalb wird der *Resilienz* von uns auch keine Maßeinheit zugeteilt. Diese analytische Aufgabe bleibt dem Konzept der Vulnerabilität bzw. der Vulnerabilitätsanalyse vorbehalten. Es geht

[112] Volatile Einspeisung, volatile Preise (Rohstoffpreise, Verbraucherpreise), veränderte Prioritäten in Politik / Regulation / Förderung, Sinkende Akzeptanz, Skandalisierung (Anlagen, Netze), ungewisse Verbräuche, ungewisse Ausbaugeschwindigkeiten (Anlagen, Netze), Flächenkonflikte, Verfügbarkeit und Reichweiten von Ressourcen (auch für die Hardware der Erneuerbaren), Transformations-Hemmnisse etc. Kennzeichen: Folgen von Ereignissen sind abschätzbar, aber nicht deren Eintrittswahrscheinlichkeit. Eine Risikoabschätzung ist nicht möglich, sondern nur die Betrachtung von Gefährdungspotenzialen und Verwundbarkeiten.

[113] Ereignisse mit extrem kleiner Eintrittswahrscheinlichkeit: Technologische Durchbrüche, politische und weltwirtschaftliche Verwerfungen (z. B. Fracking, Putins Gaslieferungen), technische und Umweltkatastrophen, (Cyber-)Kriminalität und Terrorismus, Extremwetterlagen, Klimawandel etc. Kennzeichen: Extrem geringe Eintrittswahrscheinlichkeit, oft auch keine klare Vorstellung möglicher Folgen. Wenn sich immer mehr Ereignismöglichkeiten mit extrem geringer Eintrittswahrscheinlichkeit aufhäufen, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass einige davon tatsächlich eintreten.

[114] Echte schwarze Schwäne: Kippeffekte im Klimawandel, Kippeffekte im komplexen und dynamischen sozio-technischen Energiesystem. Beispiele aus der Vergangenheit für echte Schwarze Schwäne: Ozonloch, hormonähnliche Wirkungen von Industriechemikalien etc. Kennzeichen: Ereignisse sind unbekannt oder nicht vorstellbar (völlige Ahnungslosigkeit). Eine ereignisbezogene Vorbereitung ist nicht möglich.

vielmehr um die Annäherung an ein Leitkonzept bzw. in den konkreten Fallbeispielen an ein Gestaltungsleitbild. Die Resilienz zielt dabei auch nicht mehr auf die Erhaltung des Systems (wie noch zu Beginn bei Holling 1973), sondern auf die Erhaltung der Dienstleistungen für seine Nutzer (wie z. B. bei Folke 2006 in seinen Arbeiten zu sozial-ökologischen Systemen). Dementsprechend kann sich das System zum Zweck der Leitungserbringung durchaus auch radikal wandeln.

Resilienz fokussiert auf die *„Fähigkeit eines Systems, seine qualitativ und quantitativ definierten Dienstleistungen auch unter Stress und in turbulenten Umgebungen (trotz massiver äußerer Störungen und interner Ausfälle) aufrecht zu erhalten“* (Gleich, Gößling-Reisemann, Stührmann, Lutz-Kunisch et al. 2010, S. 25). Resiliente Systeme sollen nicht nur auf bereits bekannte Herausforderungen „reagieren“ können („Was-wäre-wenn-Ansatz“), sondern im Sinne der evolutionären Fitness bzw. des (Fast-)Egal-Was-Kommt-Ansatzes auch gegenüber extrem unwahrscheinlichen, oder auch völlig unerwarteten Störereignissen gewappnet sein (Gleich, Brand, Stührmann, Gößling-Reisemann, Lutz-Kunisch 2010a; Gleich und Gößling-Reisemann 2015; Gößling-Reisemann, Wachsmuth et al. 2013).

Die Gestaltung *Resilienter Systeme* ist unseres Wissens bisher die einzige Möglichkeit, sich auf völlige Überraschungen vorzubereiten. Dafür benötigen *Resiliente Systeme* Fähigkeiten wie Widerstandsfähigkeit, Anpassungsfähigkeit, Improvisationsfähigkeit und Innovationsfähigkeit, die durchaus in einem Spannungsverhältnis zueinanderstehen können (z.B. Widerstandsfähigkeit vs. Improvisationsfähigkeit). Und sie benötigen dafür auch räumliche, zeitliche, stoffliche, energetische, monetäre, rohstoffliche, institutionelle, intellektuelle und kreative Ressourcen, wodurch sich ein Spannungsverhältnis zwischen Resilienz und Effizienz eröffnet.

Wesentliche Elemente eines Resilienten Energiesystems sind (Gleich, Brand, Stührmann, Gößling-Reisemann, Lutz-Kunisch 2010a; Gleich und Gößling-Reisemann 2015; Gößling-Reisemann, Wachsmuth et al. 2013):

- Varietät bzw. Diversität (funktional, strukturell, räumlich), z.B. unterschiedliche Typen von Erzeugungsanlagen und eine vielfältige Ressourcenbasis, intermodale Mobilität, bivalente Wärmepumpen
- Geographische Verteilung (Dispersion), z.B. Verteilung der Erzeugungsanlagen im Raum
- Redundanz (numerisch, aber vor allem auch funktional), z.B. n-1-Kriterium, bivalente Systeme, Reservekraftwerke, Wärme über Fernwärme, Power-to-X
- Effizienz, effizienter Ressourceneinsatz, standardisierte Module und Schnittstellen, Einfachheit (Komplexitätsreduktion)
- Homöostase, Balance von Feedbackmechanismen (+/-), z.B. Ausgleich von verstärkenden und begrenzenden Mechanismen (z.B. bei Förderung neuer Technologien), Monitoringsysteme, regelbare Ortsnetz-Transformatoren

- Selbstorganisation und Selbstheilung, lokale Kapazitäten, vor-Ort-Kenntnisse, Bürgerbeteiligung, Genossenschaften, Entrepreneure, regionale Finanzanlagen, unabhängige Kommunikation, Monitoring, neue Geschäftsmodelle (z.B. für Speicher und Direktvermarktung) und Produkte (z.B. Regionalstrom mit differenziertem Netzentgeld, Tarife für erhöhte Versorgungssicherheit)
- Zellularität, Lose Kopplung (Sektoren/Zellen), z.B. vermaschte Netzstruktur, optionale Kopplung verschiedener Zellen und Systemteile (bspw. zwischen Strom- und Wärmenetz), kann durch zusätzliche Schaltmöglichkeiten, durch Puffer und bivalente Speisung erreicht werden, Absicherung kritischer Infrastrukturen durch regionale EE-Anlagen
- Dämpfer, Puffer und Speicher, als Möglichkeit zur tendenziellen Entkopplung von Verbrauch und Erzeugung, elektrische Speicher, Wärme- und Gasspeicher; Power-to-X
- Subsidiarität, polyzentrische Governance, Probleme werden auf einer niedrigen Organisationsebene/Skala gelöst, bevor sie auf höheren Ebenen eskalieren können (Vorteile: Komplexitätsreduktion, Angemessenheit durch Vor-Ort-Kenntnisse) mehrschichtiger Schutz, Direktvermarktung, dezentraler Lastausgleich, Messsysteme und Monitoring
- Modularität z.B. Nutzung von standardisierten und austauschbaren Elementen, um größere Einheiten zu bauen; Vermeidung monolithischer Strukturen
- Unverplante Ressourcen / Ressourcenverfügbarkeit / Ressourcendiversität, z.B. kalte Reservekraftwerke, zeitliche, finanzielle u. organisatorische Puffer („slack“), Notfallreserven
- Handlungsfähige und überzeugte Akteure, Task Forces, Akteursnetzwerke und Institutionen, z.B. Strategienetzwerke, Verbände, netzdienliches Verhalten, Notfallübungen.

Sie sind in Abbildung 8.1 zusammengefasst:

Abbildung 8.1: Fähigkeiten und Gestaltungsprinzipien Resilienter Energiesysteme (Eigene Darstellung)

8.2 Umsetzung des Leitkonzepts *Resilientes Energiesystem* in Gestaltungsleitbilder in den Fallbeispielen

Die Transformation des Energiesystems ist vielfältig instrumentiert (u.a. Liberalisierung der Energiemärkte) und erfordert einen weitgehenden technologischen (und gesellschaftlichen) Wandlungsprozess. Sie muss als langfristige Orientierung vielfältige technologische Dynamiken und gesellschaftlichen Veränderungsprozessen bewältigen. Sie kann deshalb nicht als „ein“ Transformationsschritt interpretiert werden, sondern erfolgt in verschiedenen Handlungssträngen und Phasen. „Das“ Energiesystem befindet sich in einem andauernden Übergangsprozess. Resilienz ist deshalb auch nicht als finaler Zielzustand zu verstehen, sondern muss auch zu jedem Zeitpunkt der Transformation sichergestellt sein. Diese Sicherstellung von Resilienz im Prozess der weitreichenden dynamischen Transformation des Energiesystems dürfte zu den größten Herausforderungen gehören.

Im Zentrum des Projekts RESYSTRA stand sowohl die Erarbeitung von Transformationsoptionen in Richtung auf Resiliente Energiesysteme als auch die Herausarbeitung von Ansatzpunkten und Faktoren der Richtungsgebung zur erfolgreichen Umsetzung dieser Transformationen. Bei den Ansatzpunkten und Faktoren der Richtungsgebung betonen wir die Rolle von zivilgesellschaftlichen Akteuren und in diesem Zusammenhang die wichtige Funktion von Leitbildern und Zukunftsvorstellungen. Wir unterscheiden Leitkonzepte wie ‚Resilientes System‘ und ‚Resilientes Energiesystem‘, die auf einer mittleren Abstraktionsebene die angestrebte Richtung verdeutlichen sowie Gestaltungsleitbilder, in denen diese Konzepte auf einen bestimmten Gegenstands- und Handlungsbereich hin spezifiziert und operationalisiert wurden. Im Rahmen des Projekts wurden die Leitkonzepte ‚Resilientes Energiesystem‘ (auf nationaler Ebene) sowie die Gestaltungsleitbilder ‚Resilientes Regionales Energiesystem für den Landkreis Osterholz‘ und ‚Resilientes Regionales Energiesystem für die Stadt Wolfhagen‘ ausgearbeitet. Die beiden regionalen Gestaltungsleitbilder fokussierten auf den Elektrizitätsbereich. Für den bisher viel zu wenig diskutierten Mobilitätssektor wurde zudem das Gestaltungsleitbild Power-to-Fuel (P2F) aufgegriffen.

Die Gestaltungsleitbilder wurden partizipative mit den jeweiligen Akteuren in den Regionen und im Handlungsfeld P2F spezifiziert und operationalisiert. Dabei musste das für viele Akteure neue Leitkonzept ‚Resilientes Energiesystem‘ seine Anschlussfähigkeit an die bei den Akteuren vorfindbaren Leitkonzepte wie „Regionale Selbstversorgung und Wertschöpfung“, „100% Erneuerbare Energie“ oder „Methan und synthetische Treibstoffe als Speicheroption“ beweisen.

Anschlussfähigkeit war auch ein wesentlicher Grund, warum wir uns den Ansatz einer zellulären Struktur[115] zu Eigen gemacht haben. Dieses aktuell in der Diskussion befindliche Leitkonzept kommt dem Gestaltungsleitbild eines Resilienten Regionalen Energiesystems zumindest im Stromsektor schon recht nahe. Das Leitkonzept ‚Zelluläre Struktur des Energiesystem' ist dazu geeignet, die bei den Akteuren in den Regionen vorfindbaren Leitkonzepte wie ‚100% Selbstversorgung mit erneuerbarer Energie', und ‚Erhöhung der regionalen Wertschöpfung' mit dem Gestaltungsleitbild ‚Resilientes Regionales Energiesystem' zu verbinden. Als Problem bleibt dabei bestehen, dass die engagierten Akteure in den Regionen ihre Leitkonzepte ‚100% Erneuerbare' und ‚Erhöhung der Wertschöpfung in der Region' bisher fast ausschließlich auf den Bereich der Elektrizität bezogen haben. Mobilität wurde - bis auf einige mit Gas oder Strom betriebene PKW - ganz ausgeschlossen. Der Bereich Wärme wurde zwar thematisiert, aber entsprechende praktische Erfolge bleiben gering.

Eine zelluläre Struktur mit subsidiärer Steuerung[116] erhöht die Resilienz des Elektrizitätssystems im Vergleich zur derzeitigen Struktur, da zusätzliche Monitoring- und Steuerungsstrukturen und mit diesen auch Speicher, also Diversität und Redundanzen, eingerichtet werden. Die Regionen/Gebiete/Zellen hängen damit nicht länger völlig von den Systemdienstleistungen des Übertragungsnetzes ab. Erzeugung und Verbrauch sollen zuvorderst vor Ort ausgeglichen werden (Prosumer). Die Vermarktung von Regionalstrom könnte durch die Aufsplittung der Netzentgelte in eine lokale Komponente und eine Transportkomponente möglich werden. Letztere müsste bei regionaler Erzeugung und zeitgleichem Bezug der Energie nicht bezahlt werden. Voraussetzung ist die Installation von entsprechender Informations- und Kommunikationstechnik.

Die modellgestützten (prospektiven) Vulnerabilitätsanalysen in den regionalen Fallstudien, aus denen wichtige Hinweise für die regionalen Gestaltungsleitbilder abgeleitet werden konnten, kamen auf technischer Ebene zu ähnlichen Ergebnissen. Die derzeitige starre Kopplung der regionalen Elektrizitätssysteme an die Übertragungsnetze und damit verbunden die Abhängigkeit von den Systemdienstleistungen und ihrer netzerhaltenden Funktion mit der Frequenz als Steuergröße, haben zur Folge, dass sich Störungen im Verbundsystem direkt auf die Region auswirken, ohne dass die Region die Chance hat Erhaltungsmaßnahmen einzuleiten. Genauso ist dies der Fall beim Ausfall von Kopplungskomponenten wie dem Umspannwerk. Da es bisher an regionalen Vermarktungsmöglichkeiten fehlt, wirken sich Energiepreisänderungen und eine Verknappung von Energie direkt auf die Regionen aus, selbst dann, wenn sie vor Ort genügend Strom selbst produzieren können. Zugleich ist die fragile Akzeptanz für den Transformationsprozess in

[115] Eine zelluläre Struktur wird durch die Anordnung von lose untereinander gekoppelten, Sektor übergreifenden Energiesystemeinheiten charakterisiert, die sich zum Teil selbst versorgen und regeln können. Die Strukturierung findet skalenübergreifend statt: Gebäude, Quartier, Region, Land, Kontinent. Kleinere Zellen organisieren sich dabei zu Einheiten, die von außen wieder wie eine Zelle reagieren.

[116] Das, was auf der untersten Ebenen gelöst werden kann, sollte dort gelöst werden, und erst, wenn dies nicht möglich ist, sollten höhere Ebenen in Anspruch genommen werden.

den Regionen schon spürbar. In beiden Regionen sind Bürgerinitiativen gegen Windenergieanlagen, in Wolfhagen auch gegen den Trassenausbau aktiv.

Auf technischer Seite soll die Umsetzung des Gestaltungsleitbilds der ‚Regionalen Zelle mit subsidiärer Steuerung' die starre Kopplung zwischen Regionen und Übertragungsnetzen und Energiemärkten ablösen. Es werden allerdings auch keine autarken Strukturen geschaffen, weil diese nicht nur unbezahlbar würden, sondern weil auch ihre Resilienz geringer ist, als die eines Verbundsystems. Da es hauptsächlich um die Stärkung der Regel- und Steuerbarkeit in der Region geht, kommt insbesondere dem Monitoring und der Erfassung des Netzzustandes auf den unteren Netzebenen eine hohe Bedeutung zu. Die Zelle benötigt die Einrichtung von Speichern, die Regelbarkeit und Abschaltbarkeit von Verbrauchern sowie Umwandlungsoptionen für ein effizientes Auffangen von Spitzen. Regionale Vermarktungsstrukturen würden die regionale Wertschöpfung und Identifikation mit der Region erhöhen. Damit der Prozess in Richtung eines zellulären Systems eine institutionelle Basis und Organisationsform erhält, und die Bürger darin eingebunden sind, bietet sich z.B. die Gründung einer Energiegenossenschaft an, die auch am Netzbetrieb und an regionalen Energieversorgungsunternehmen beteiligt ist. Damit kann die Akzeptanz für den Prozess erhöht werden. Zudem sind visionäre, überzeugte, in führenden Positionen eingebundene Akteure (Leitakteure) wichtig für den Erfolg der Transformation. Um die Innovationsfähigkeit zu unterstützen, hat sich in beiden Regionen eine enge Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen bewährt. Die Gestaltungsleitbilder für Osterholz und Wolfhagen sind in den Abbildung 8.2 und Abbildung 8.3 dargestellt.

Abbildung 8.2: Gestaltungsleitbild Resilientes Regionales Energiesystem für den Landkreis Osterholz (Eigene Darstellung)

Abbildung 8.3: Gestaltungsleitbild Resilientes Regionales Energiesystem für die Stadt Wolfhagen (Eigene Darstellung)

Regionen haben bereits in der Vergangenheit eine wichtige Rolle für Wandelprozesse im Energiebereich gespielt. Von besonderer Relevanz war dabei die Vorbildfunktion von Vorreiterregionen (z. B. 100%-EE-Regionen), welche die Machbarkeit des Übergangs von fossilen zu regenerativen Energieträgern aufzeigen konnten. Regionen können in diesem Sinne auch als Teilsysteme betrachtet werden mit prägenden Wirkungen auf das gesamte Energiesystem (Nischen als Entwicklungsraum und Einflussfaktor). Der Fokus der Energiewenden auf regionaler Ebene liegt noch überwiegend auf der (bilanziellen) Selbstversorgung im Strombereich. Strukturelle Fragestellungen, wie sie bspw. mit der Frage der Resilienz verbunden sind, spielen gegenwärtig noch kaum eine Rolle. Regionen, welche praktische Umsetzungsmöglichkeiten vorbildhaft aufzeigen, können in Zukunft jedoch auch diesbezüglich eine bedeutende Rolle spielen. Voraussetzung hierfür sind jedoch generelle Anreizmechanismen. Einige davon werden in den ‚gefüllten Schildkrötenmodellen' im nächsten Kapitel vorgestellt.

Ein Resilientes Energiesystem kann weder allein auf regionaler, noch alleine auf nationaler Ebene realisiert werden. Die betrachteten Fallstudien haben gezeigt, dass die Handlungsfähigkeit von Regionen sowohl für die Erschließung der regional-wirtschaftlichen Potenziale als auch für die Umsetzung von Resilienzstrategien maßgeblich von bundespolitischen Regulierungen (Gesetzgebungen, Anreize) abhängt. Eine räumliche Kongruenz von politischen und energietechnischen Verwaltungsbereichen dürfte zudem förderlich sein für die Umsetzung von Resilienz steigernder Maßnahmen. Letztendlich muss sich die Größe von Zellen jedoch nicht nach räumlichen,

sondern nach funktionellen Gesichtspunkten richten. Die Ausdehnung des Funktionsraums bestimmt somit die Größe der jeweils zu betrachtenden Zelle. Notwendig für die Umsetzung eines zellulären Systems sind sowohl auf der technischen, als auch auf der Steuerungsebene deutliche Schritte in Richtung auf Dezentralisierung. Im Bereich der Steuerung ist der Ansatz der (auch technisch gestützten) Subsidiarität als wichtiger Schritt zu werten. Das Subsidiaritätsprinzip fördert Selbstbestimmung und Eigenverantwortung und ist hilfreich beim Aufbau leistungsfähiger, flexibler Organisationsstrukturen (Maubach 2015, Waschkuhn 1995). Folgende Merkmale der Subsidiarität befördern insbesondere auch die Resilienz eines Systems:

a) Komplexitätsreduktion durch Verschiebung der Systemgrenzen und Zerlegung der zu lösenden Aufgabe in kleinere Einheiten,
b) Problem- und Kontextangemessenheit aufgrund genauer Kenntnis der Vor-Ort-Bedingungen,
c) Lösung von Problemen auf der Ebene, auf der sie entstehen und dadurch reduzierter Kommunikationsbedarf,
d) Zusammenbringen von sozio-technischen (Netzengpässe, Netzdienlichkeit) und sozioökonomischen Gegebenheiten (Markt, Preise), was zu einem effektiven Anreiz für Flexibilitäten führen würde.

8.2.1 Zum Gelingen des Transformationsprozesses

Das Energiesystem muss als extrem ‚verdrahtetes', komplexes, dynamisches sozio-technisches System verstanden werden. Angesichts solcher enormen Pfadabhängigkeiten sieht sich seine Transformation vor enorme Herausforderungen gestellt, um dieses System überhaupt zu ‚mobilisieren'. Angesichts seiner komplexen und dynamischen Struktur ist es darüber hinaus extrem schwierig das Energiesystem in eine gewünschte Richtung zu transformieren (Richtungsgebung). Vor dem Hintergrund der stark gewachsenen Bedeutung von zivilgesellschaftlichen Akteuren und der medialen Öffentlichkeit fokussierten wir im Projekt RESYSTRA auf die in der Innovations- und Transformationsforschung bisher eher vernachlässigten zivilgesellschaftlichen Akteure und die Faktoren *Skandalisierungs Push* (bekanntestes Beispiel aus der jüngeren Vergangenheit die Tank vs. Teller Debatte bei Biokraftstoffen) und auf die Zugkraft von Leitorientierungen (in jüngerer Zeit vermehrt als *Vision Pull* diskutiert), welche zur Richtungsgebung beitragen.

Unterstützt durch Urte Brands Arbeit an ihrer Dissertation konnten Möglichkeiten und Grenzen der Richtungsgebung von Systeminnovationen mit einem Schwerpunkt auf die leitorientierungsgestützte Systemgestaltung zunächst ganz allgemein und dann auch auf Energiesysteme bezogen enorm präzisiert und ausdifferenziert werden. Erarbeitet bzw. weiterentwickelt wurden vier Modelle: Ein allgemeines Modell der wichtigsten Einflussfaktoren für gerichtete Systeminnovationen (Schildkrötenmodell der richtungsgebenden Einflussfaktoren), in das u.a. die zwei fokus-

sierten Faktoren Skandalisierungs Push und Vision Pull eingebettet sind. Mit Fokus auf Leitorientierungen als möglichem Richtungsgeber wurden zudem ein Drei-Ebenen-Modell und ein Prozessmodell zur Richtungsgebung mittels Leitorientierungen entworfen. Letzteres unterscheidet zwischen Leitorientierungsideen und echten (gelebten) Leitorientierungen und zeigt unterschiedliche Stadien entlang des Entwicklungsprozesses auf. Im Drei-Ebenen-Modell werden verschiedene Typen von Leitorientierungen, nämlich Werte/Weltbilder, Leitkonzepte sowie Gestaltungsleitbilder, differenziert und (inhaltsbezogene) Kriterien zur Bewertung ihrer Wirksamkeit zur Richtungsgebung von Innovations- bzw. Transformationsprozessen aufzeigt. Zum vierten wurde ein Phasenmodell entwickelt, welches einen idealtypischen Systemgestaltungsprozess unter Berücksichtigung von prozessbezogenen Wirksamkeitsfaktoren aufzeigt und auch einen detaillierten Maßnahmenkatalog für eine leitorientierungsgestützte Systemtransformation enthält.

8.2.2 Schildkrötenmodell der richtungsgebenden Einflussfaktoren

Das Schildkrötenmodell umfasst neun übergeordnete Faktoren, sechs Push- und Pull-Faktoren, zwei Einflussfaktoren auf Akteursebene sowie übergeordnete, begrenzt beeinflussbare Metafaktoren, welche die Richtungsgebung von Systeminnovationen beeinflussen können (vgl. Abbildung 8.4). Unter Push-Faktoren sind Einflussfaktoren zu verstehen, welche den Möglichkeitsraum für den Zustand eines Systems erweitern oder beschränken. Indem sie bspw. neue Voraussetzungen (Optionen) für Pfade schaffen oder herkömmliche Pfade delegitimieren oder beschränken, destabilisieren sie das bestehende System (Brand, Gleich et al. 2015; Brand 2016). Einflussfaktoren, die bestimmte Pfade durch Nachfrage, Zukunftsvorstellungen oder Anreize als besonders erwünscht auszeichnen, werden als Pull-Faktoren bezeichnet (Brand, Gleich et al. 2015; Brand 2016). Unter den Einflussfaktoren subsumieren sich unterschiedlichste Richtungsimpulse (Anreiz Pull: z.B. Richtungsimpulse wie Förderprogramme, Beteiligungsmöglichkeiten, Wettbewerbe), welche die Richtung einer Systeminnovation beeinflussen, jedoch jeweils für sich alleine keine Richtungssicherheit erzeugen können.

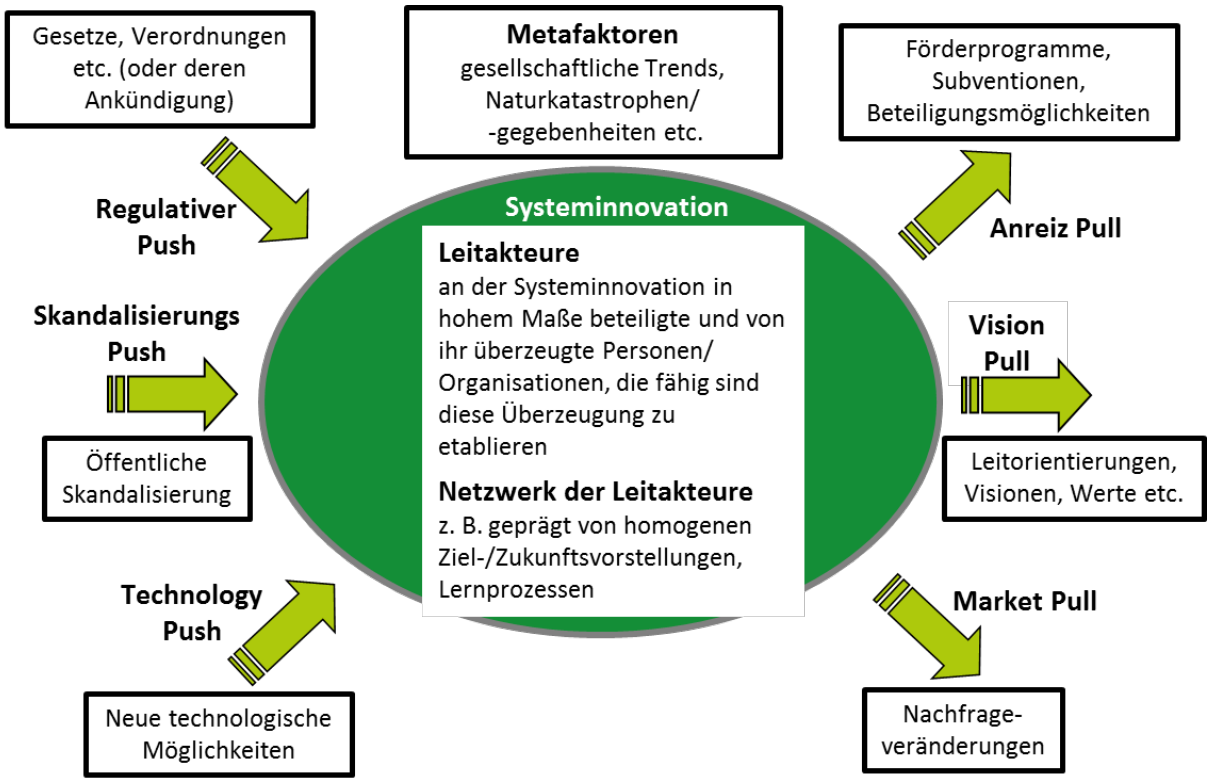


Abbildung 8.4: Schildkrötenmodell der richtungsgebenden Einflussfaktoren (Brand 2016 in Anlehnung an Ahrens et al. 2004; Ahrens et al. 2006; Brand 2013; Brand und Gleich 2015; Fichter 2005; Stührmann et al. 2012)

1.) **Technology Push:** Das Angebot an neuen „Möglichkeiten" (Angebotsseite des Marktes), darunter auch neue technische Optionen, kann die Entwicklung von Systeminnovationen befördern und neue Anwendungsmöglichkeiten eröffnen (*z.B. Entwicklung von marktreifen Aufdach-Solaranlagen, welche eine Eigenversorgung mit Strom oder Wärme ermöglichen).*

2.) **Market Pull:** Nachfrageveränderungen in Form von veränderten Kundenwünschen und -bedürfnissen können zu spezifischen Innovationsbemühungen führen, um diese Nachfragen zu befriedigen *(z.B. steigende Umweltanforderungen seitens der Kunden führen zur erhöhten Nachfrage nach Erdwärmepumpen).*

3.) **Regulativer Push:** Hierunter fallen sämtliche (supra-)staatlichen bzw. politischen Regulierungen (Gesetze, Verordnungen etc.) oder auch lediglich deren politische Diskussion oder Ankündigung, die einen Veränderungsdruck auf die am Innovationsprozess beteiligten Akteure ausüben (*z.B. restriktive Regelungen im novellierten Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG) führen zu einer reduzierten Installation von Aufdach-Solaranlagen).*

4.) **Anreiz Pull:** Anreize wie Förder- und Forschungsprogramme des Staates, aber auch Beteiligungsmöglichkeiten oder Wettbewerbe von Seiten zivilgesellschaftlicher bzw. wirtschaftlicher Akteure können die Entstehung von technologischen Innovationen oder die Diffusion (Anwendung) von Systeminnovationen befördern. Verbunden sind mit solchen Anreizen in der Regel thematische Ausrichtungen (z.B. Förderung von Technologieentwicklungen, die

umweltverträglicher sind), so dass sie eine richtungsgebende Funktion erlangen (*z.B. staatliche Förderungen für die Errichtung von Erneuerbare-Energien-Anlagen).*

5.) **Skandalisierungs Push:** Im Zusammenspiel mit der Öffentlichkeit und Medien können zivilgesellschaftliche Akteure wie Umweltschutz-, Menschenrechts- oder Verbraucherschutzorganisationen auf Systeminnovationen oder ihnen zugrundeliegenden technologischen Innovationen einwirken, indem sie solche thematisieren und bewerten und damit auch auf die staatliche Regulation Einfluss nehmen. Dementsprechend haben sie erhebliches Potenzial, bisherige Innovationen und zukünftig mögliche Entwicklungen zu skandalisieren bzw. zu delegitimieren (*z.B. zivilgesellschaftliche Skandalisierung von Kernkraft und indirekt Ausrichtung auf ein EE basiertes Energiesystem).*

6.) **Vision Pull:** Sozial geteilte und gesellschaftlich weit verbreitete Werte oder Zukunftsvorstellungen wie Visionen, Ziele oder Leitbilder bzw. Leitorientierungen können Akteure zur Entwicklung oder Anwendung von Systeminnovationen anregen (*z.B. haben generellere Zukunftsvorstellungen wie „Vorsorge“ oder „intergenerationale Gerechtigkeit“ bzw. spezifischere Vorstellungen wie „Energiewende“ oder „Nachhaltiges Energiesystem“ zur Transformation des Energiesystems angeregt).*

7.) **Leitakteure**: Bei Leitakteuren handelt es sich um zivilgesellschaftliche, (verwaltungs-)politische oder wirtschaftliche Personen oder Organisationen, die als Schlüsselakteure und Promotoren unmittelbar an der Umsetzung oder Anwendung einer Systeminnovation beteiligt bzw. von ihr betroffen sind und einen höheren Einfluss auf die Entstehung oder Diffusion einer Systeminnovation haben (Fichter et al. 2010a). Sie werden dann zu Leitakteuren, wenn sie besonders überzeugt von einer Systeminnovation bzw. den damit verbundenen Wirkungen sind, und wenn sie zudem als Meinungsführer mit ihrer sozialen Ausstrahlung diese Überzeugung etablieren können und damit die Systeminnovation voranbringen (Fichter et al. 2010b) *(z.B. Pioniere, welche zu Beginn der Energiewende die Entwicklung von Windkraftanlagen und deren Diffusion trotz Gegenbewegungen vorangebracht haben).*

8.) **Netzwerk der Leitakteure:** Ein Netzwerk von Leitakteuren meint die gemeinsame Zusammenarbeit von mehreren Leitakteuren, die z.B. geprägt ist von gemeinsamen Zielen, Leitorientierungen oder Lernprozessen *(z.B. können lokale Energiewendeprojekte durch das Zusammenwirken von vorbildhaft energieeffizient agierenden Unternehmen und Energiegenossenschaften vorangebracht werden)* (Brand 2013).

9.) **Metafaktoren:** Es existieren außerdem Metafaktoren, die nur begrenzt durch Akteure beeinflusst werden können. Dazu zählen bspw. gesellschaftliche Trends und Naturkatastrophen oder -gegebenheiten *(z.B. Delegitimierung von nuklearen Energieträgern durch die Nuklearkatastrophe von Fukushima und Ausrichtung hin zur Strom-/Wärmeerzeugung mittels fossilen bzw. regenerativen Energieträgern*).

Zwischen den Einflussfaktoren bzw. Richtungsimpulsen können wechselseitige richtungsverstärkende oder -vermindernde Beziehungen existieren, bspw. können Subventionen (Anreiz Pull) zu einer ambitionierteren Entwicklung von technologischen Innovationen (Technology Push) führen. Im Sinne der Multi-Impuls-Hypothese (Klemmer et al. 1999; Lehr und Löbbe 1999, S. 13) wird davon ausgegangen, dass sich die Innovationsrichtung in der Regel nicht durch einzelne dominante Richtungsimpulse, sondern erst aufgrund eines Zusammenspiels verschiedener Richtungsimpulse ergibt. Demnach können nicht vorhandene, aber für die erwünschte Richtung notwendige Richtungsimpulse zu unerwünschten Richtungen führen. Eine „erwünschte“ Richtung einer Innovation setzt also einen gewissen Grad an Kompatibilität der Richtungsimpulse voraus (Brand, Gleich et al. 2015; Brand 2016; Wachsmuth et al. 2015).

Das Schildkrötenmodell hat sich im Rahmen des Projekts in mehrfacher Hinsicht bewährt. Zum einen vor allem als Möglichkeit zur Strukturierung der empirisch erhobenen Richtungsimpulse in den drei Fallbeispielen, zum anderen aber auch als Ausgangspunkt für die agentenbasierte Modellierung der Transformationsbewegung hin zur Markteinführung von synthetischen Kraftstoffen. Diese Beispiele für den praktischen Umgang mit dem Modell sollen nachfolgend in aller Kürze dargestellt werden.

8.2.3 Impulse für ein Resilientes Energiesystem der Stadt Wolfhagen

Mithilfe des Schildkrötenmodells konnten existierende und notwendige Impulse in Richtung auf ein Resilientes Regionales Energiesystems für die Stadt Wolfhagen identifiziert werden (Abbildung 8.5). Im Sinne der Umsetzung des Gestaltungsleitbildes für Resiliente Systeme wurden in Wolfhagen bereits erste Schritte in Richtung auf einen regionalen Ausgleich von Stromerzeugung und Stromverbrauch vorbereitet. Eine Weiterentwicklung der in diesen Projekten zu erprobenden Strukturen und Anlagen könnte zumindest der Verwirklichung eines zellulären Systems zugutekommen. Wichtige Schritte sind Mess- und Regelfähigkeiten an den Kopplungsstellen der unteren Ebenen des Stromnetzes, ein verstärktes regionales Bewusstsein für die Erfordernisse einer erweiterten Versorgungssicherheit bzw. Resilienz (vor allem auch zum Schutz kritischer Infrastrukturen), die Stärkung von Entrepreneuren sowie neue Geschäftsmodelle für Direktvermarktung und zum Lastausgleich. Zur Realisierung eines solchen Systems sind jedoch eine Reihe weiterer Änderungen erforderlich, die nicht in der Macht der regionalen Akteure liegen, weil sie sich auf die Rahmenbedingungen beziehen (vgl. Abbildung 8.5, rote Eintragungen).

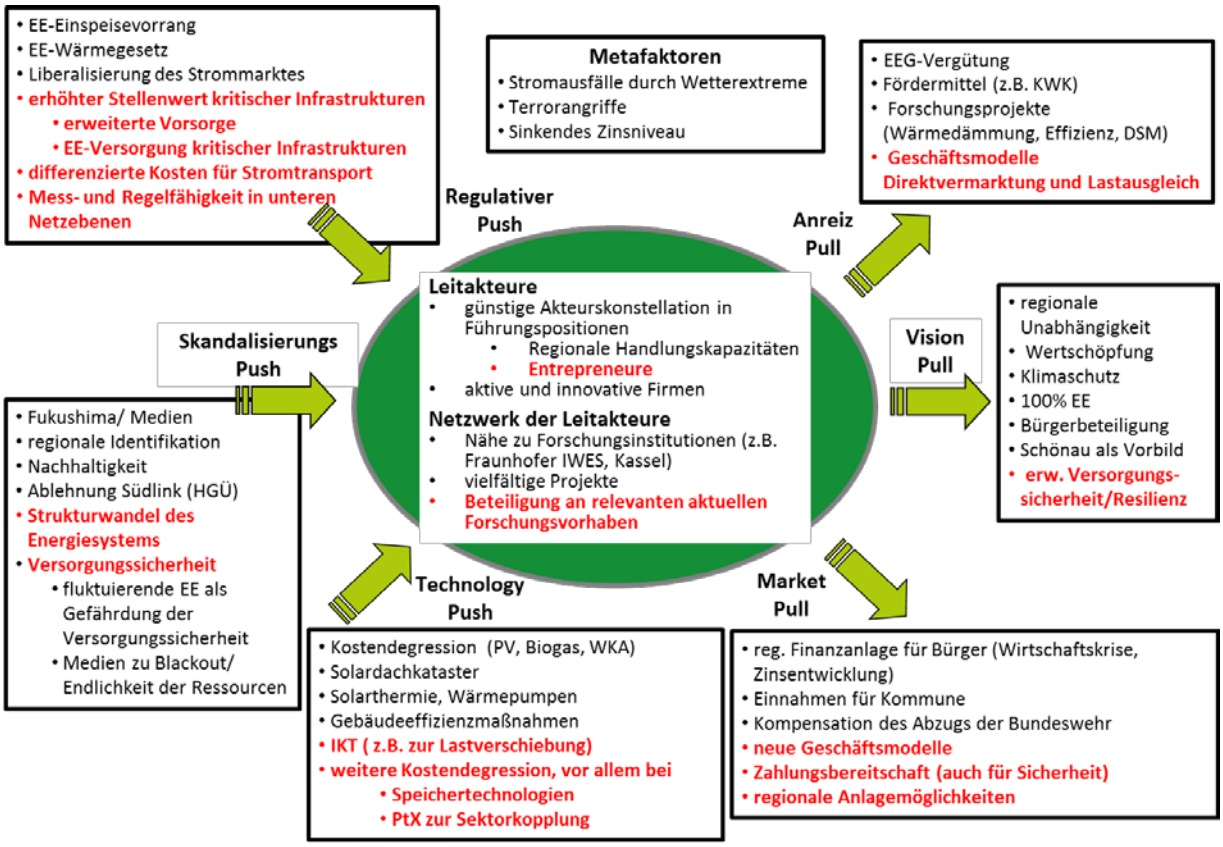


Abbildung 8.5: Schildkrötenmodell mit Impulsen in Richtung eines Resilienten Regionalen Energiesystems der Stadt Wolfhagen; Richtungsimpulse schwarz: bereits vorhanden, rot: zukünftig notwendig

8.2.4 Impulse für ein Resilientes Energiesystem im Landkreis Osterholz

Mithilfe des Schildkrötenmodells konnten auch für den Landkreis Osterholz existierende und notwendige Impulse in Richtung eines Resilienten Regionalen Energiesystems identifiziert werden (vgl. Abbildung 8.6). Wichtige Schritte sind hier eine verstärkte Kooperation der regionalen Energiewendeakteure einschließlich einer Netzwerkkoordination, die Gründung einer Energiegenossenschaft (die in Wolfhagen schon existiert) als Investor beim Ausbau und beim Repowering der Windkraftanlagen sowie der Aufbau einer Notstromversorgung mit Fokus auf kritische Infrastrukturen.

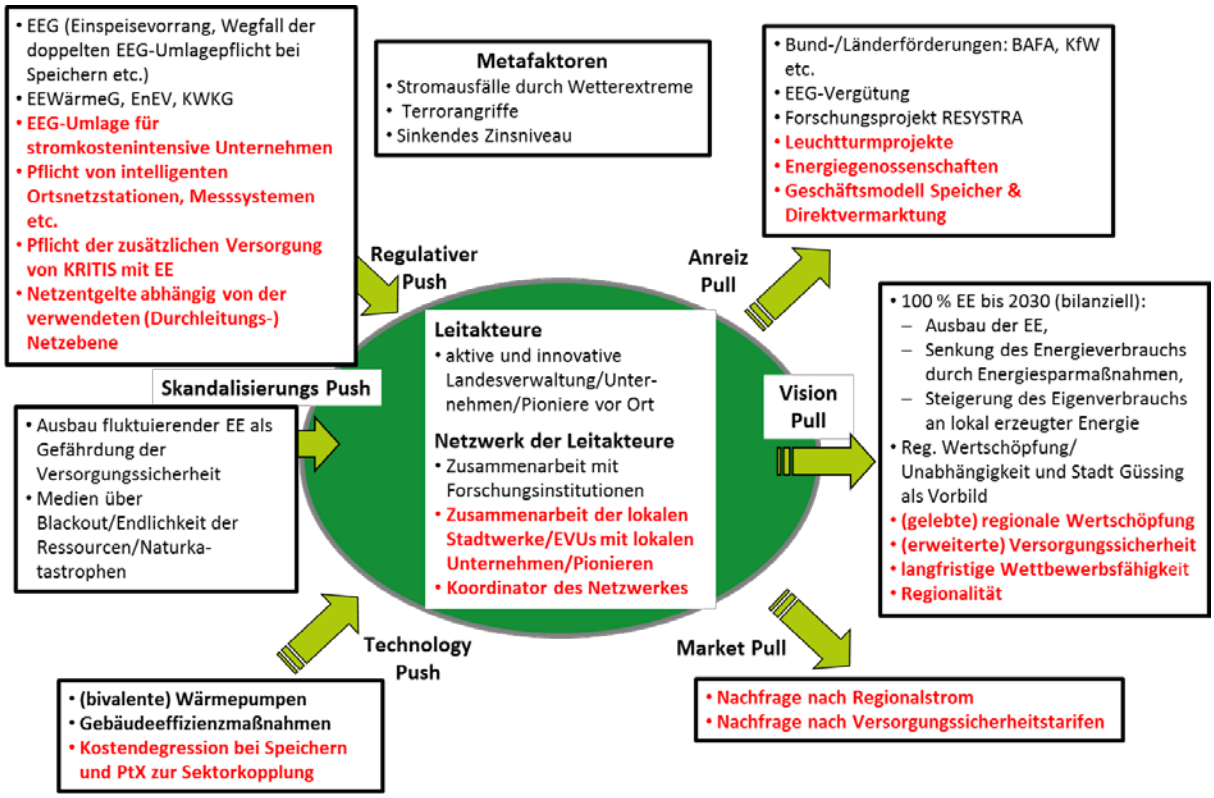


Abbildung 8.6: Schildkrötenmodell mit Impulsen in Richtung eines Resilienten Regionalen Energiesystems des Landkreises Osterholz; Richtungsimpulse schwarz: bereits vorhanden, rot: zukünftig notwendig

8.2.5 Impulse in Richtung auf Power-to-Fuel

Im dritten Fallbeispiel ging es um die Etablierung von synthetischen, strombasierten Kraftstoffen (Power-to-Fuel, P2F) in das deutsche Energiesystem. Letzteres ist wichtig, weil bisher für die aus derzeitiger Sicht nicht elektrifizierbaren Mobilitätsbereiche wie Schwerlast-, Schiffs- und v.a. Flugverkehr eine nachhaltige Lösung auf Basis der Erneuerbaren Energien gefunden werden muss. Die Potenziale für Treibstoffe auf der Basis von Biomasse werden dafür, aufgrund erwartbarer Flächenkonflikte (Teller vs. Tank-Debatte), keineswegs ausreichen. Die Integration von P2F in das Energiesystem eröffnet zudem enorme Potenziale zur Verbesserung der Resilienz des Gesamtsystems. Wenn es technisch gelingt die Elektrolyseure (und ggf. auch die Fischer-Tropsch-Anlagen) ohne große Wirkungsgradverluste dynamisch zu fahren, können sie sehr gut im Lastmanagement (zur Abschöpfung von Überschussstrom) eingesetzt werden. Mit ihnen eröffnen sich zudem hoch interessante Möglichkeiten zur intelligenten Kopplung der Sektoren Strom, Wärme und Mobilität, die sich gegenseitig stabilisieren können. Und schließlich ermöglicht das Konzept sowohl als Power-to-Gas, als auch als Power-to-Fuel interessante großvolumige und langfristige Speichermöglichkeiten auf der Basis schon existierender Infrastrukturen (Gasspeicher, Tanklager). Wobei die Rückverstromung, die zu Beginn der Debatte über Power-to-X noch eine große Rolle spielte, wegen der Wirkungsgradverluste eher die Ausnahme bleiben wird.

Mithilfe des Schildkrötenmodells konnten die Richtungsimpulse der jeweiligen Einflussfaktoren für die Systeminnovation P2F identifiziert und eingeordnet werden (siehe Abbildung 8.7). Gegenwärtig befindet sich P2F an der Schwelle zwischen reinem Forschungsstadium und einer punktuellen Integration in das Energiesystem. Dort wird es zur Erfüllung der Systemleistungen und Sektor übergreifend zur Reduktion der energiebedingten Treibhausgasemissionen beitragen.

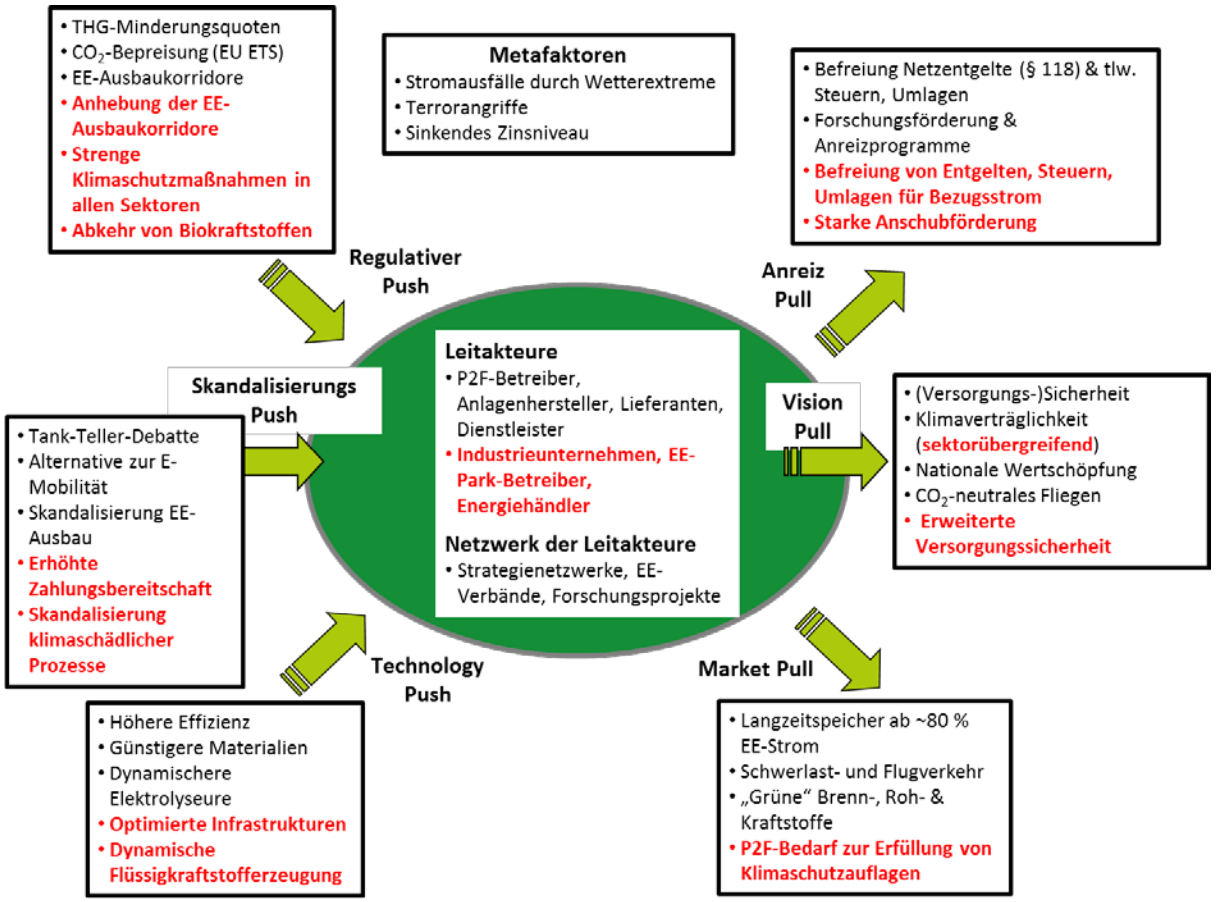


Abbildung 8.7: Schildkrötenmodell mit Impulsen in Richtung Power-to-Fuel; Richtungsimpulse schwarz: bereits vorhanden, rot: zukünftig notwendig

Während sich P2F derzeit technisch gesehen in einer Phase der Aufskalierung befindet, können die Anlagen heute jedoch, wenn überhaupt, nur in Nischenmärkten wirtschaftlich betrieben werden. Die erneuerbaren Substitute können preislich bei weitem noch nicht mit den fossilen Gas- und Flüssigkraftstoffen konkurrieren. Ausgerichtet auf die Frage, auf welchem Wege eine wirtschaftliche Integration von P2F in das Energiesystem möglich wäre, wurde aufbauend auf dem Schildkrötenmodell in Kooperation mit den Akteuren im Feld ein agentenbasiertes Modell gemäß Abbildung 8.8 erarbeitet.

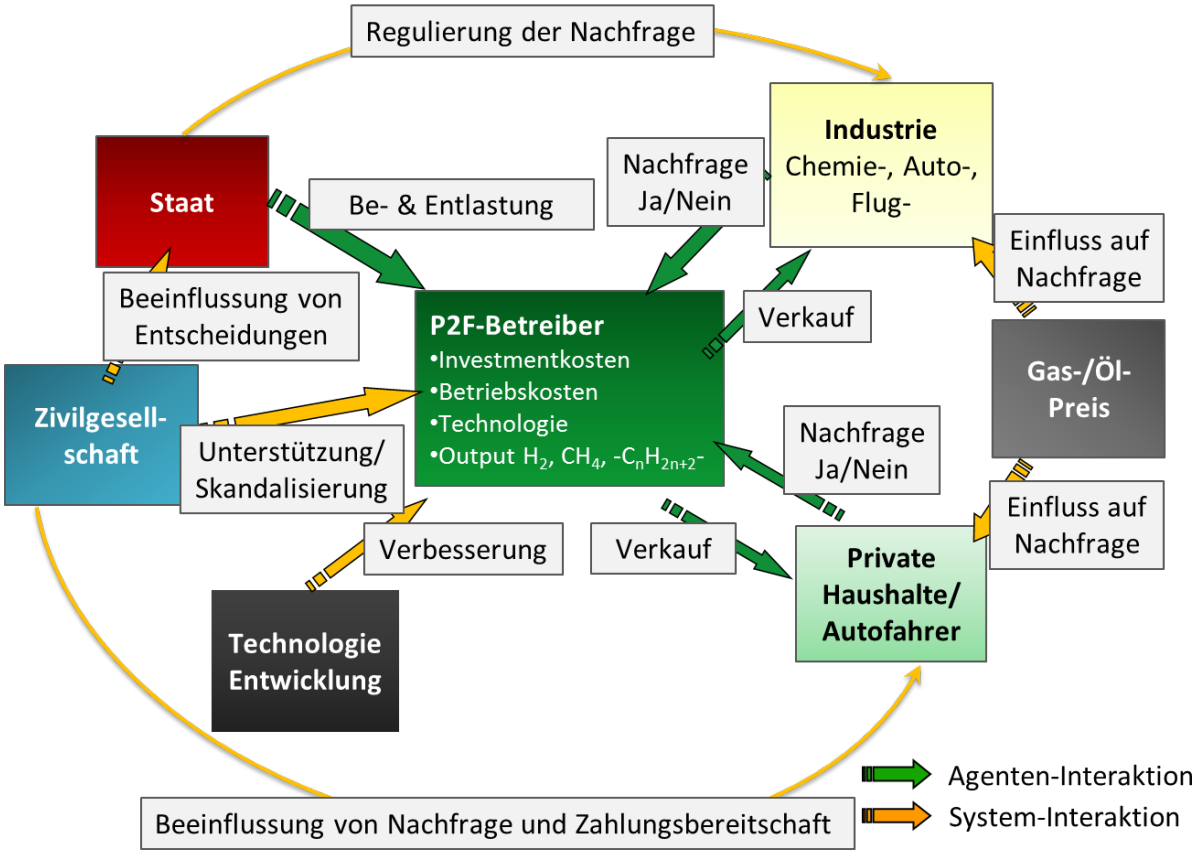


Abbildung 8.8: Schematischer Aufbau des agentenbasierten Modells, angelehnt an die Systemstruktur des Schildkrötenmodells der richtungsgebenden Einflussfaktoren. Grüne Pfeile indizieren Interaktionen zwischen Agenten, orange Pfeile auf Systemebene gesteuerte Zusammenhänge.

Mit diesem Modell konnten die durch das Schildkrötenmodell beschriebenen Akteure quantitativ in Form von Agenten in Beziehung gesetzt und die weiteren Einflussfaktoren als passive Systemkomponenten integriert werden. Unterfüttert durch empirische Daten konnten Simulationen durchgespielt werden. Mit ihnen war es möglich Maßnahmenkonstellationen für eine erfolgversprechende Markteinführung von P2F zu identifizieren (rote Eintragungen in Abbildung 8.7).

8.2.6 Erfahrungen mit Schritten zur Umsetzung der Gestaltungsleitbilder in den Fallstudien

Vor einigen Jahren war das Leitkonzept *Resiliente Systeme* noch wenig bekannt. Es wurde, wie Anfang der 1980er Jahre das Leitkonzept Nachhaltigkeit, als abstrakt, sperrig oder schwammig empfunden (Fekete et al. 2016; vgl. Gross 2015; Imbusch 2015). Das war zu Anfang auch bei den Akteuren in den von uns im Rahmen der Fallbeispiele näher untersuchten Regionen LK Osterholz und Stadt Wolfhagen der Fall. In jüngster Zeit hat das Leitkonzept Resilientes System allerdings eine enorme Dynamik entfaltet. Die zunehmende gesellschaftliche Verunsicherung angesichts von Terrorismus und Naturkatastrophen sowie die Debatten über kritische Infrastrukturen, über Fragilität und völlige Überraschungen (schwarze Schwäne) haben dazu beigetragen, dass sich heute Resilienz zunehmend als viertes Nachhaltigkeitsprinzip im Diskurs verankert, neben Effizienz, Konsistenz und Suffizienz (vgl. Pekny 2013, Plattform Footprint (o.J).

Wichtige Schritte in diese Richtung konnten allerdings auch im parallel zu RESYSTRA laufenden Akademienprojekt „Energiesystem der Zukunft“ gearbeitet werden. Im Rahmen der Arbeitsgruppe ‚Risiko und Resilienz‘ wurden, unter Leitung von Prof. Renn und Beteiligung der Bremer Professoren von Gleich und Gößling-Reisemann, Analysen und Szenarien erarbeitet und Handlungsempfehlungen zur Stärkung der Resilienz des Deutschen Energiesystems vorgelegt (vgl. Renn 2017 sowie Byfield 2017). In der Analyse wurde das Energiesystem mit Hilfe von Bedrohungsszenarien Stresstests unterzogen (Anschläge, Wetterextreme, Erdgasverknappung, Rohstoffverknappung Metalle, Governance Versagen und Akzeptanzentzug) und mögliche Interventionen skizziert, um Stressoren abzubauen, Verwundbarkeiten zu verringern und negative Folgen zu bewältigen. Dabei wurde auch auf Zielkonflikte eingegangen, zuvorderst auf den Zielkonflikt zwischen Resilienz und kurzfristiger Effizienz. Als Resilienz steigernde Maßnahmen wurden vorgeschlagen: funktionale und diverse Redundanzen, großvolumige Langzeitspeicher, Puffer und Reserven, Vielfalt der Anlagentechnologien, Power-to-X, vermaschte Netze, Zellularität, Erdkabel, dezentral gesteuerte Betriebsführung, Subsidiarität, auf kritische Infrastrukturen fokussierte Notstromversorgung, Schwarzstartfähigkeit, Ressourceneffizienz und -flexibilität, Recyclingmethoden und Ersatzmöglichkeiten für Metalle (Kreislaufwirtschaft), systematisches Gefahrenmonitoring, Notfallkapazitäten, Dialogangebote, Lernen, Transparenz und partizipative Verfahren, finanzielle Teilhabe / Energiegenossenschaften, eine faire Nutzen- und Lastenverteilung sowie ein Nationaler Entschädigungsfonds Energiewende (vgl. (Renn 2017, 7f), 32f.; Byfield 2017, 20 ff.). Die Überschneidungen mit unseren Ergebnissen sind immens aber auch die Unterschiede gerade in der Betonung der nicht-technischen Aspekte nicht zu übersehen. RESYSTRA von Anfang an stärker geprägt durch seine biomimetischen Wurzeln und einen ingenieurwissenschaftlichen Ansatz, die Arbeitsgruppe Risiko und Resilienz des Akademienprojekts wertete in stärkerem Maße Erfahrungen aus dem Risikomanagement aus.

In den drei Fallbeispielen (LK Osterholz, Stadt Wolfhagen und Power-to-Fuel) konnten Schritte hin zu einem Resilienten Energiesystem auf regionaler und nationaler Ebene konkretisiert werden, obwohl ein wünschenswertes integriertes skalenübergreifendes Gestaltungsleitbild eines Resilienten Energiesystems für die Bundesrepublik Deutschland nach wie vor nicht existiert. In den beiden Regionen, die ausgewählt wurden, weil sie sich schon seit geraumer Zeit engagiert den Zielen ‚100% Erneuerbare Energien‘ und ‚Stärkung der Regionale Wertschöpfung‘ verschrieben haben, konnte jeweils ein partizipativer Prozess in Gang gesetzt werden, in dem zunächst der bisher auf Elektrizität gerichtete Blick auf die Einbeziehung der Sektoren Wärme und Mobilität ausgeweitet wurde. Angesichts eines derzeit vergleichsweise stabilen Elektrizitätssystems, erwies sich die Debatte über zunehmende Ungewissheiten und mögliche Überraschungen in der Zukunft, insbesondere im Rahmen der anstehenden Transformationsprozesse, allerdings als schwierig. Ein Faktor war dabei offensichtlich auch, dass die Protagonisten der Erneuerbaren Energien dazu neigten den Hinweis auf Unsicherheiten immer noch als Angriff auf den Ausbau

der Erneuerbaren Energien und ihre Volatilität zu interpretieren (schon bei der Debatte über den Verzicht auf Kernkraftwerke hieß es ja schon: „Dann gehen die Lichter aus“). Dabei wird völlig außeracht gelassen, dass die verteilte Stromerzeugung durch Erneuerbare Energien und die Einspeisung auf niedrigen Netzebenen, unter Umständen Regionen eine gewisse Teilautonomie gewährleisten und eher zur Versorgungssicherheit beitragen kann, wenn eine regionale Steuerung möglich wäre. Zudem wurde deutlich, dass im zusätzlichen Ressourcenbedarf eines Resilienten Systems Sprengkraft steckt (Effizienz vs. Resilienz), wobei zunächst die monetären Ressourcen, also die Aspekte der Wirtschaftlichkeit, im Vordergrund standen. In beiden Regionen konnte durch eine Modellierung des Elektrizitätssystems (Wolfhagen) bzw. des gesamten Energiesystems (Osterholz) die technischen Transformationsoptionen und -notwendigkeiten konkretisiert werden. Die Modellierung der regionalen Wertschöpfungseffekte des bisherigen und des zukünftig wünschenswerten, Ausbaus erneuerbarer Energien in den beiden Regionen machte zudem deutlich, dass ein solcher Ausbau nicht automatisch zu einer Steigerung der regionalen Wertschöpfung führt, selbst wenn dies ursprünglich eines der tragenden Motive bei den lokalen Akteuren darstellte. Denn die regionalökonomischen Effekte durch erneuerbare Energien werden zu einem überwiegenden Anteil durch die in den Regionen ansässigen Unternehmen, ihre Beschäftigten und die Investor/innen der EE-Anlagen generiert. Allein der Ausbau erneuerbarer Energien vor Ort ist demnach nicht ausreichend, um eine Steigerung der regionalen Wertschöpfung zu erreichen, wie die Szenarioberechnungen im Rahmen des Vorhabens gezeigt haben. Vielmehr gilt es, möglichst viele regionale Akteure entlang der Wertschöpfungskette – insbesondere die Betreibergesellschaften und die Eigenkapitalgeber/innen aber auch die Unternehmen, welche die EE-Anlagen planen, installieren und warten – bei den EE-Ausbauaktivitäten in den Regionen einzubinden. Im Fallbeispiel Power-to-Fuel konnte, ebenfalls aufbauend auf einem partizipativen Prozess, ein agentenbasiertes Modell erarbeitet werden, mit dessen Hilfe durch Simulationen die optimale Strategie für eine erfolgreiche Markteinführung synthetischer Treibstoffe identifiziert werden konnte. Hier kommt einer frühen Innovationsförderung und einer Verteuerung der Emissionen von fossilem CO_2 eine zentrale Bedeutung zu.

Das Projekt RESYSTRA war thematisch breit aufgestellt. Die beiden Projektteile, einerseits zur Arbeit an der Zielperspektive (Leitkonzept Resilientes Energiesystem und Gestaltungsleitbilder in den Fallstudien) und andererseits zur Arbeit an der Prozessperspektive (richtungsgebende Einflussfaktoren und Maßnahmenoptionen) wären je für sich schon ein anspruchsvolles und arbeitsintensives Projekt gewesen. Insofern muss konstatiert werden, dass wir, sowohl bei der Zielperspektive als auch bei den Prozessen in den beiden Regionen, gerne noch weitergekommen wären. Das lag aber nicht nur an den verfügbaren Arbeitskapazitäten und Ressourcen. Obwohl im Rahmen der Projektlaufzeit das Thema Resilienz eine so nicht erwartbare Karriere auch im Energiewendediskurs erfuhr, stellte sich der Versuch eines durch die Forschergruppe doch mehr oder

minder ‚gelenkten' Leitorientierungsprozesses mit den Akteuren vor Ort letztendlich als schwieriger heraus als ursprünglich erwartet. Mag sein, dass sich das entsprechende Gelegenheitsfenster erst jetzt allmählich öffnet. Auf der anderen Seite konnten im Fallbeispiel Power-to-Fuel durch den partizipativen Prozess, an dem sich fast alle wesentlichen Akteure des Projekts im Deutschsprachigen Raum beteiligten und durch die agentenbasierte Modellierung, bei der wir durch die holländischen Kollegen Dijkema, Nikolic und Kisjes tatkräftig unterstützt wurden, Ergebnisse erzielt werden, die in dieser Qualität ursprünglich so nicht zu erwarten waren. Auch dieses Thema hat im Kontext der Debatten über Sektorkopplung ja erst im Rahmen der Projektlaufzeit seine enorme Dynamik entfaltet.

Die aus den Projektergebnissen ableitbaren wichtigsten Handlungsempfehlungen und die mit ihnen verbundenen weiterführenden Forschungsbedarfe fallen entsprechend breit und vielfältig aus.

8.3 Literatur Kapitel 8

Ahrens, Andreas; Braun, Angelika; Effinger, Andrea; Gleich, Arnim von; Heitmann, Kerstin; Lißner, Lothar (2004): Risikominderung in der Wertschöpfungskette als Innovationsprozess. Rahmenbedingungen und Akteure der Gefahrstoffsubstitution. Unter Mitarbeit von Weiß Matthias und Claudia Wölk. Bremen/Hamburg (BMBF-Projekt SubChem, Endbericht).

Ahrens, Andreas; Braun, Angelika; Gleich, Arnim von; Heitmann, Kerstin; Lißner, Lothar; Effinger, A. et al. (2006): Hazardous chemicals in products and processes. Substitution as an innovative process. Heidelberg, New York: Physica-Verlag (Sustainability and innovation).

Brand, Urte (2016): Leitkonzepte Nachhaltigkeit und Resilienz als Richtungsgeber in Transformationsprozessen von Energiesystemen. Dissertation. Universität Bremen, Bremen.

Brand, Urte (2013): Abschlussbericht zum Umsetzungsbaustein 1: "Schaffung von gemeinsamer Identität und Verantwortung der Bewohner durch energie- und kosteneffiziente Sanierungs- und Entwicklungsplanung" – Teilprojekt: Analyse und prozessbegleitende Untersuchung der richtungsgebenden Einflussfaktoren. Projekt ZukunftsWerkStadt Leutkirch. Online verfügbar unter http://www.tecdesign.uni-bremen.de/typo3/fileadmin/user_upload/Ver%C3%B6ffentlichungen/ZukunftsWerkStadt_Leutkich_UniHB_VS2.pdf, zuletzt geprüft am 01.04.2016.

Brand, Urte; Gleich, Arnim von (2015): Transformation toward a Secure and Precaution-Oriented Energy System with the Guiding Concept of Resilience—Implementation of Low-Exergy Solutions in Northwestern Germany. In: *Energies* 8 (7), S. 6995–7019. DOI: 10.3390/en8076995.

Brand, Urte; Gleich, Arnim von; Wachsmuth, Jakob (2015): Arbeitspapier zum Innovationsmodell Schildkröte 2.0. Bremen (Arbeitspapier Projekt Resystra).

Fekete, Alexander; Grinda, Christiane; Norf, Celia (2016): Resilienz in der Risiko- und Katastrophenforschung: Perspektiven für disziplinübergreifende Arbeitsfelder. In: Rüdiger Wink (Hg.): Multidisziplinäre Perspektiven der Resilienzforschung. Wiesbaden: Springer, S. 215–231.

Fichter, Klaus (2005): Interpreneurship. Nachhaltigkeitsinnovationen in interaktiven Perspektiven eines vernetzenden Unternehmertums. Marburg: Metropolis-Verl. (Theorie der Unternehmung, 33).

Fichter, Klaus; Hintemann, Ralph; Stecher, Tina (2010a): Leitakteure: Richtungsgebende Schlüsselakteure. In: Klaus Fichter, Arnim von Gleich, Reinhard Pfriem und Bernd Siebenhüner (Hg.):

Theoretische Grundlagen für Klimaanpassungsstrategien. Bremen/Oldenburg (nordwest2050-Berichte, 2191-3218), S. 157–165.

Fichter, Klaus; Hintemann, Ralph; Stecher, Tina (2010b): Richtungsgebung als Kontextsteuerung: ein integratives Modell. In: Klaus Fichter, Arnim von Gleich, Reinhard Pfriem und Bernd Siebenhüner (Hg.): Theoretische Grundlagen für Klimaanpassungsstrategien. Bremen/Oldenburg (nordwest2050-Berichte, 2191-3218), S. 163–165.

Folke, Carl (2006): Resilience: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses. In: *Global Environmental Change* 16 (3), S. 253–267. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2006.04.002.

Fraunhofer ISE (2015): Was kostet die Energiewende? Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050. Bearbeitet von Henning, Hans-Martin; Palzer, Andreas. Online verfügbar unter: https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/studie-was-kostet-die-energiewende.pdf

Gleich, Arnim von; Gößling-Reisemann, Stefan (2015): Resilienz als Leitkonzept für regionale Entwicklung und Klimaanpassung. In: Arnim von Gleich und Bernd Siebenhüner (Hg.): Regionale Klimaanpassung im Küstenraum. Marburg: Metropolis-Verlag, S. 20–41.

Gleich, Arnim von; Gößling-Reisemann, Stefan; Stührmann, Sönke; Woizeschke, Peer (2010): Resilienz als Leitkonzept – Vulnerabilität als analytische Kategorie. In: Klaus Fichter, Arnim von Gleich, Reinhard Pfriem und Bernd Siebenhüner (Hg.): Theoretische Grundlagen für Klimaanpassungsstrategien. Bremen/Oldenburg (nordwest2050-Berichte, 2191-3218), S. 13–49.

Gößling-Reisemann, S.; Stührmann, S.; Wachsmuth, J.; Gleich, A. v.; Blöthe, T. (2015): Klimaanpassung und Resilienz in der Energiewirtschaft. In: A. v. Gleich und B. Siebenhüner (Hg.): Regionale Klimaanpassung im Küstenraum. Marburg: Metropolis-Verlag, S. 182–206.

Gößling-Reisemann, Stefan; Stührmann, Sönke; Wachsmuth, Jakob; Gleich, Arnim von (2013): Vulnerabilität und Resilienz von Energiesystemen. In: Jörg Radtke und Bettina Henning (Hg.): Die deutsche "Energiewende" nach Fukushima. Der wissenschaftliche Diskurs zwischen Atomausstieg und Wachstumsdebatte. Weimar (Lahn): Metropolis (Beiträge zur sozialwissenschaftlichen Nachhaltigkeitsforschung, 8), S. 367–396.

Gross, Matthias (2015): Experimentelles Nichtwissen. Umweltinnovationen und die Grenzen sozial-ökologischer Resilienz: transcript (Science Studies).

Holling, Crawford Stanley (1973): Resilience and stability of ecological systems. In: *Annual Review in Ecology and Systematics* 4, S. 1–23.

IATA (2015): Press Release No. 55 - IATA Air Passenger Forecast Shows Dip in LongTerm Demand. Online verfügbar unter: http://www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2015-11-26-01.aspx

Imbusch, Peter (2015): Urbane Resilienz und endemische Gewalt. In: Martin Endreß und Andrea Maurer (Hg.): Resilienz im Sozialen. Theoretische und empirische Analysen. Wiesbaden: Springer VS, S. 245–264.

Klemmer, Paul; Lehr, Ulrike; Löbbe, Klaus (1999): Umweltinnovationen. Anreize und Hemmnisse. 1. Aufl. Berlin: Analytica (Innovative Wirkungen umweltpolitischer Instrumente, 2).

Lehr, U.; Löbbe, K. (1999): Umweltinnovationen - Anreize und Hemmnisse. Ein Überblick über die innovativen umweltpolitischen Instrumente. In: Ökologisches Wirtschaften 99 (2), S. 13–15.

Maubach, Klaus-Dieter (2015): Strom 4.0. Innovationen für die deutsche Stromwende. Springer, Wiesbaden.

Quaschning, Volker (2016): Sektorkopplung durch die Energiewende. Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin. Online verfügbar unter: http://www.volker-quaschning.de/publis/studien/sektorkopplung/index.php

Stührmann, Sönke; Gleich, Arnim von; Brand, Urte; Gößling-Reisemann, Stefan (2012): Mit dem Leitkonzept Resilienz auf dem Weg zu resilienteren Energieinfrastrukturen. In: Michael Decker, Armin Grunwald und Martin Knapp (Hg.): Der Systemblick auf Innovation - Technikfolgenabschätzung in der Technikgestaltung. NTA4 - Tagung des Netzwerks TA. Berlin. Berlin: Edition Sigma (Gesellschaft – Technik – Umwelt, 16), S. 181–192.

Umweltbundesamt (2013): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Online verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/treibhausgasneutrales-deutschland-im-jahr-2050-0

Waschkuhn, Arno (1995): Was ist Subsidiarität? Ein sozialphilosophisches Ordnungsprinzip: Von Thomas von Aquin bis zur „Civil Society“. Springer, Wiesbaden.

9 Handlungsempfehlungen und Forschungsbedarf

Aus den Arbeiten im Rahmen von RESYSTRA lassen sich die folgenden Handlungsempfehlungen mit entsprechendem Forschungsbedarf ableiten:

Zur zukünftigen Struktur eines Resilienten Energiesystems

- Rasche Integration der Konsequenzen der Pariser Beschlüsse zum Klimaschutz in die Strategie der Energiewende. Die derzeit festgelegten Ausbaukorridore für Erneuerbare Energien müssen deutlich angehoben werden Gefordert ist eine Verfünf- bis Verzwanzigfachung der aktuell installierten EE-Leistung (je nach erzielbaren Einsparpotenzialen).

- Transparente Informationen und eine Einbindung der Menschen vor Ort (z. B. über Bürgerdialoge), die ökonomische Beteiligung regionaler Akteure (z. B. mittels Energiegenossenschaften) und ein Nutzen-Lastenausgleich sind zentrale Faktoren dafür, dass der erforderliche EE-Ausbau gelingt und vor Ort auch eine Akzeptanz für die Aktivitäten besteht

- Konzentration auf die systemischen Fragen der Energiewende, auf alle drei Sektoren (Strom, Wärme, Mobilität) und insbesondere auf Formen der Sektorkopplung.

- Erarbeitung eines integrierten Gestaltungsleitbilds ‚Resilientes Energiesystem der Bundesrepublik Deutschland', von dem ausgehend jeweils skalenbezogen und gegenstandsbezogen Schritte der Spezifizierung und Operationalisierung unternommen werden können.

- Schritte in Richtung auf einen zellularen Aufbau und subsidiäre Steuerung insbesondere der leitungsgebundenen Systeme (z. B. Komplexitätsreduktion, Teilautonomie, Kontextangemessenheit). Die primär funktionelle (nicht primär geographische) Abgrenzung von Zellen bedarf der weiteren Präzisierung.

- Ausgewogenes Verhältnis von Dezentralisierung (Subsidiaritätsprinzip) und systemübergreifender Verantwortung auf nationaler und internationaler Ebene (Versorgung der Städte und infrastrukturellen und industriellen Großverbraucher, internationale Systemkonfigurationen z. B. Desertec).

- Ausbau von (Langzeit)Speichern und von Dämpfern (als Alternative zu den bisher dämpfenden rotierenden Massen) im Elektrizitätsnetz Kein vorschneller Abschied von Verbrennungsmotor (zumindest bei Schwerlast- und Schiffsverkehr) und Flugzeugturbine.

- Power-to-Fuel erhöht in dreifacher Funktion die Resilienz des Energiesystems: 1. Treibstoff für nicht elektrifizierbare Mobilitätsbereiche als Beitrag zur Diversität und funktionellen Redundanz 2. Option für intelligente Formen der Sektorkopplung und des Lastmanagements 3. Langzeitspeicher für das gesamte Energiesystem (nicht nur Elektrizität).

- Power-to-Fuel hat nur eine Chance für die volle Integration in den Markt (Auszug aus der Nische, Wettbewerbsfähigkeit mit fossilen Treibstoffen) durch ambitionierte Klimaschutzmaßnahmen (strenge Treibhausgasminderungs-Quoten, CO_2-Zertifikate/CO_2-Steuern). Hilfreich wäre auch eine intensive staatliche Unterstützung in der jetzigen frühen Innovationsphase.
- Behutsame Digitalisierung (smart systems) und Verknüpfung mit Kommunikationsnetzen (Diversifizierung in Hard- und Software, unabhängige Datenkanäle und Stromversorgung).
- Konzentration auf funktionale und strukturelle Diversität und Redundanz in den Netzen. Angesichts der enormen Komplexität ist in etlichen Bereichen mehr als das n-1 Prinzip gefordert.
- Kreislaufwirtschaft und Diversifizierung der Rohstoffquellen (seltene Metalle, Gasversorgung durch Biogas und Power-to-Gas).
- Investition in Vorsorgemaßnahmen und Maßnahmen zur Regeneration nach Zusammenbrüchen (unverplante Ressourcen, Notvorräte, Task-Forces, Notfallübungen, Schwarzstartfähigkeit).
- Vorbereitung auf unterschiedliche Qualitätsniveaus der Systemleistungen, z.B. Bevorzugung kritischer Infrastrukturen bei gefährdeter Stromversorgung oder unterschiedliche Strompreise für Privatabnehmer je nach Versorgungssicherheit und akzeptierter Variationsbreite von Spannung und Frequenz (Sicherheitstarif).
- Regionalisierung bzw. Raumbindung des Strommarkts, Regionalstrom als Produkt, Regionalisierung der Netzentgelte, Entwicklung eines Ansatzes für einen regionalen peer-to-peer Markt z.B. auf der Basis von block-chains (Regionaltarif).
- Nach Möglichkeit Vermeidung neuer großer Pfadabhängigkeiten

Zum Transformationsprozess

- Intensive Weiterführung der öffentlichen Debatte über Versorgungsunsicherheiten und mögliche Überraschungen in der Zukunft, nicht zuletzt auch im Prozess der Transformation des Energiesystems selbst. Vorbereitung darauf, dass diese ‚erweiterte Versorgungssicherheit' und Resilienz keinesfalls zum Nulltarif zu haben sein wird.
- Verankerung von Resilienz als viertem Nachhaltigkeitsprinzip neben Effizienz, Suffizienz und Konsistenz.
- Ausarbeitung eines skalenübergreifenden Leitkonzepts ‚Resilientes Energiesystem' unter Einschluss der nationalen und internationalen Ebene. Zusätzlich: Ausarbeitung von spezifizierten und operationalisierten Gestaltungsleitbildern.

- Bezug zu existierenden (gelebten) Leitorientierungen herstellen und in Gestaltungsleitbilder einbeziehen oder zumindest berücksichtigen.
- Weitere Unterfütterung des Leitkonzepts und der Erarbeitung von Gestaltungsleitbildern durch Szenarien und Modelle des Innovationssystems (Schildkröte), des sozio-technischen Energiesystems (physikalische und dynamische) sowie des Transformationsprozesses (agentenbasierte). Erarbeitung einer Handreichung zur partizipativen Entwicklung von Gestaltungsleitbildern im Wechselspiel zwischen Leitkonzept und Vulnerabilitätsanalyse des jeweiligen Gegenstandsbereichs (Skalenebenen bzw. Zellen des Energiesystems, Technologiebereiche).
- Aufzeigen und Umsetzen von Resilienz steigernden Leuchtturmprojekten, welche als Praxisbeispiele und Vorbilder für (regionale) Akteure dienen können.
- Nutzung von unterschiedlichen, zielgruppenspezifischen und adressatengerechten Kommunikationsmitteln unter Berücksichtigung möglichst aller potenziellen Adressaten zur Verbreitung der Gestaltungsleitbilder.
- Verstetigung von Gestaltungsleitbildern einleiten z.B. in Form von Institutionalisierungen (Institutsgründungen, schriftliche und öffentlich beschlossene Leitlinien, Gesetzgebungen etc.) und Benennung von Verantwortlichkeiten.
- Frühzeitige Identifizierung und Einbindung von potenziellen Leitakteuren und Diffusionsintermediären[117], die bei der Verbreitung und Umsetzung der Gestaltungsleitbilder unterstützen.
- Unterstützung von Genossenschaften, Bürgerbeteiligung (auch zur Spezifizierung der Gestaltungsleitbilder) und Eigenverbrauch.

[117] Solche Akteure, die nicht selbst Adressat, sondern Vermittler des Gestaltungsleitbildes sind.

10 Anhang

10.1 Veranstaltungen, Konferenzen und Publikationen

10.1.1 Durchgeführte Transferveranstaltungen und Maßnahmen

Transferveranstaltungen und Maßnahmen waren von Anfang an im Projekt Resystra eingeplant. Mit diesen soll sichergestellt werden, dass die Forschungsergebnisse praktisch angewendet werden und Orientierung im Transformationsprozess geben. Hierzu wurden Ergebnisse auf Konferenzen und Veranstaltungen Dritter vorgestellt, aber auch eigene Veranstaltungen durchgeführt. Nachfolgende Abschnitte geben in Kürze Art und Inhalt der Veranstaltungen wider.

15.09.2015 – FONA Statuskonferenz

Teilnahme an der FONA-Statuskonferenz in Bonn und Präsentation der Zwischenergebnisse. Diese Ergebnisse wurden hier auch den Teilnehmenden Praxispartnern zur Verfügung gestellt.

15./16.9.2016 - Abschlussworkshop des Projektes Resystra in Bremen

Auf dem Workshop wurden zentrale Inhalte und Ergebnisse des Projekts rekapituliert und zur Diskussion gestellt. Bereits im Vorfeld des Workshops war den Teilnehmenden ein Thesenpapier[118] zur Verfügung gestellt worden, verbunden mit der Bitte in ihren Beiträgen darauf Bezug zu nehmen. Die Teilnahme zahlreicher Experten aus dem Bereich der Energie-, Resilienz-, Transformations- und Innovationsforschung, aber auch von Akteuren aus der Praxis, beispielsweise der BundesNetzAgentur, trug zu einer lebhaften interdisziplinären Diskussion auf der Veranstaltung bei. Mit der Durchführung des Abschluss-Workshops wurden primär folgende Ziele verfolgt:

a) Theorie: Diskussion einer zukünftigen resilienten Struktur des Energiesystems sowie des Stellenwerts einer solchen Leitorientierung für die Transformation auf verschiedenen Ebenen vor dem Hintergrund der Ergebnisse des Projektes RESYSTRA.
b) Kooperation: Identifikation von Themenstellungen, an denen gemeinsam weitergearbeitet werden könnte.

4./5.10.2016 – FONA-Abschlusskonferenz

Das Projekt Resystra stellte seine Ergebnisse auf der Abschlusskonferenz zur umwelt- und gesellschaftsverträglichen Transformation des Energiesystems „Strategien für eine nachhaltige Energiewende“ in Berlin vor. Hierfür wurde die drei Fallstudien mittels Poster den Teilnehmern in den Pausen vorgestellt. Im Weiteren wurde auf dem Transferworkshop „Das zentral-dezentrale

[118] Das Thesenpapier ist auf der Website von RESYSTRA, www.resystra.de, abrufbar.

Mischsystem im Strombereich – technische, ökonomische und regulatorische Perspektiven für lokale Initiativen“ dargestellt wie die Transformation hin zu einem zellularen System die Resilienz des Energiesystems erhöhen kann.

10.1.1.1 Beiträge auf Veranstaltungen u. Konferenzen

Die Projektergebnisse wurden auf zahlreichen Veranstaltungen und Konferenzen vorgestellt.

Im Rahmen der begleitenden wissenschaftlichen Koordination haben Projektteammitglieder an Clusterworkshops, sowie der Syntheseveranstaltung teilgenommen.

13.03.2014 – Workshop: „Kontroversen über die Umsetzbarkeit und Resilienz möglicher Transformationspfade für die Energiesysteme in Deutschland“ in Berlin

Am Workshop in Berlin nahmen 25 Experten und Expertinnen aus dem Bereich der Energieforschung teil. Vornehmliches Ziel war es Feedback zu den Ergebnissen des Diskussionspapier 1 einzuholen.

10.1.1.2 Durchführung eigener Workshops im Rahmen der Fallstudien

<u>Fallstudie Landkreis Osterholz</u>

04.12.2015 – Durchführung eines Stakeholder-Workshops mit 25 Teilnehmern zum Thema “Resiliente Energieversorgung im Landkreis Osterholz“. Präsentation der Ergebnisse der Vulnerabilitätsanalyse, Wertschöpfungsanalyse und erster Ansätze für ein Gestaltungsleitbild. Hierzu wurde die Energiesystemstruktur in den Regionen (Landkreis Osterholz, Stadt Wolfhagen) analysiert und die relevanten Akteure, ihrer Funktionen und Motive (Leitorientierungen) im bisherigen Transformationsprozess in Interviewphasen vor Ort erhoben.

27.10.2016 – Durchführung eines Stakeholder-Workshops mit 9 Teilnehmern mit dem Titel „Perspektiven einer Resilienten Energieversorgung im Landkreis Osterholz“

Vorstellung der Ergebnisse der Modellierung einer regionalen Zelle für den Landkreis Osterholz, eines Gestaltungsleitbildes und der richtungsgebenden Einflussfaktoren zu einem resilienten regionalen Energiesystem. Die Teilnehmer wurden dabei aufgefordert uns eine Rückmeldung zu den vorgeschlagenen Maßnahmen zu geben.

Fallstudie Stadt Wolfhagen

08.12.2015 - Durchführung eines Stakeholder-Workshops zum Thema „Resiliente Energieversorgung in Wolfhagen“ mit 10 Teilnehmern im Rahmen unserer Fall-Studien „Regionale Selbstversorgung“. Präsentation der Ergebnisse der Vulnerabilitätsanalysen, Wertschöpfungsanalyse und erster Ansätze für ein Gestaltungsleitbild präsentiert. Es gab regen Input und wertvolle Diskussionen mit den regionalen Akteuren auf den Workshops, aus denen ersichtlich wurde wie wichtig der Zusammenhalt der Akteure für eine erfolgreiche Umsetzung ist.

01.09.2016 – Durchführung eines Stakeholder-Workshops zum Thema „Resiliente Energieversorgung in Wolfhagen“ mit 10 Teilnehmern. Präsentation der Ergebnisse der Wertschöpfungsanalyse und des Gestaltungsleitbildes für ein resilientes regionales Energiesystem der Stadt Wolfhagen. Diskussion der vorgeschlagenen Handlungsempfehlungen und Maßnahmen mit den regionalen Akteuren.

Fallstudie strombasierte synthetische Kraftstoffe (Power-to-Fuel)

20.04.2015 – Inputworkshop mit 29 Teilnehmer zum Thema technische, wirtschaftliche und juristische Fragestellung von Power-to-Gas.

24.06.2015 - wissenschaftsorientierter Workshop zur Bestimmung der Modellparameter mit 11 Teilnehmern

10.09.2015 – Stakeholderworkshop mit 29 Teilnehmern aus Industrie, Verbänden, Finanzdienstleistern, Forschungsinstituten, Universitäten und Projektträgern auf dem eine erste Skizze des agentenbasierten Modells vorgestellt wurde. Die Zusammenfassung der Vorträge und Inhalte finden sich im zugehörigen Protokoll im Anhang.

10.1.1.3 Teilnahme an Veranstaltungen in den Fallstudien

30.04.2015 – Workshop im Rahmen des Projektes Energiekompetenz Osterholz

Teilnahme mit Vortrag am Workshop „Vor-Ort-Speicherung und –verteilung von PV-Strom über einen Quartierspeicher in einem Gewerbegebiet.

Kontaktaufnahme zu den Akteuren im Landkreis Osterholz

1.06.2015 - Bürgerabend Wolfhagen

Teilnahme am Bürgerabend der Stadt Wolfhagen am 1. Juni 2015, Vortrag von RESYSTRA zum Thema Resilienz.

Januar bis März 2016 – Netzwerkveranstaltungen: Landkreis Osterholz

Teilnahme an Netzwerkveranstaltungen der Wirtschaftsförderung des Landkreises Osterholz.

10.1.1.4 Teilnahme an internationalen Konferenzen

24/25.06.2014 – Energy Systems, London, Großbritannien

Präsentation der Ergebnisse der ersten Interview-Reihe mit zahlreichen Experten des Energiesystems auf der Konferenz Energy Systems im Juni 2014 in London

Vortragstitel: "Designing and testing transformation pathways towards resilient renewable energy systems”

07.11.2015 - Konferenz Anticipacion in Trento, Italien

Teilnahme und Vortrag auf der internationalen Konferenz Anticipacion in Trento, Italien. RESYSTRA Vortrag zur Rolle von Leitbildern im Transformationsprozess und der Wirkung von Gestaltungsleitbildern.

14./15.06.2016 – Energy Systems, London, Großbritannien

Präsentation von Zwischenergebnissen zum Gestaltungsprinzip der regionalen Zelle und der Agenten-Basierten Modellierung für eine wirtschaftliche Integration synthetischer Kraftstoffe.

Vortragstitel:

“From niche to market” – an agent-based modeling approach for the economic integration of synthetic fuels based on renewable energies (power-to-fuel)

“On the way towards resilient energy systems: A cellular approach for regional self-supply”

29./30.06.2016 – (De)zentrale Energiewende – Wirklichkeiten, Widersprüche und Visionen – Jahreskonferenz Leibniz Forschungsverbund Energiewende

Präsentation von Projektzwischenergebnissen zu einer möglichen Ausgestaltung regionaler Märkte in regionalen Zellen und strombasierte Synthetische Kraftstoffe für den Luft- und Schwerlastverkehr.

Vortragstitel:

„Auf dem Weg zu resilienten Energiesystemen: Was können wir vom sozio-technischen Konzept Zellulärer Systeme für regionale Märkte lernen?“

„From niche to market" – Sustainable, synthetic fuels (power-to-fuel) for aviation and heavy transport"

10.1.2 Im Projekt vergebene Unteraufträge

TU Delft / Universität Groningen

„Agent based modeling of the innovation system for synthetic fuels (power-to-fuel)

Konzipierung und Programmierung eines Agenten-basierten Modells zur Ermittlung der Parameter, die die Nischentechnologie strombasierte synthetische Kraftstoffe (Power-to-Fuel) in den Markt führen helfen.

Bearbeiter: Kasper H. Kisjes, Dr. Igor Nikolic, Prof. Dr. Gerald P.J. Dijkema

Universität Stuttgart, Institut für Sozialwissenschaften

Beantwortung von Sozialwissenschaftlichen Fragestellung in Bezug auf die Richtungsgebung von Innovationen.

Bearbeiter: Prof. Dr. Ulrich Dolata, Dr. Ulrike Fettke, Dr. Gerhard Fuchs

Steinbeis Institut Bremen

Erstellung einer Kurzstudie für die Vulnerabilitätsanalyse eines zukünftigen, erneuerbaren Energiesystems im Projekt Resystra. Beantwortung von Fragen zu P2X und P2L-Technologie, den zugehörigen Katalysatoren und Bewertung einer dauerhaft dynamischen Prozessführung.

Bearbeiter: Prof. Dr. Jorg Thöming

10.1.3 Lehre: Ringvorlesung ‚Internet der Energie' im WS 13/14 „

Programm der Ringvorlesung ‚Internet der Energien' im WS 13/14, Universität Bremen

22.01.2014 Probleme, Gestaltungsansätze und Potenziale eines „Internet der Energien"
Thesen der Organisatoren der Ringveranstaltung
(Prof. Dr. Hans Dieter Hellige, Dr. Stefan Gößling-Reisemann, Dipl.-Ing. Sönke Stührmann und Dr. Jakob Wachsmuth, Universität Bremen)

15.01.2014 Verlässlichkeit durch oder trotz Dezentralisierung? Potentiale der Energieinformatik für die Gestaltung sicherer Energiesysteme
(Prof. Dr. Hartmut Schmeck, Karlsruher Institut für Technologie KIT)

08.01.2014 Hybridnetze für die Energiewende zwischen zentralen und dezentralen Systemarchitekturen
(Prof. Dr. Sebastian Lehnhoff, Universität Oldenburg)

11.12.2013 Die Nachhaltige Stadt der EnBW AG: Fortschritt durch Beteiligung
(Dipl.-Geol. Dirk Leyens, EnBW Energie Baden-Würtemberg AG, Biberach)

04.12.2013 Subsidiarität in intelligenten Stromnetzen: Zielkonflikte zwischen Datenschutz, Geschäftsmodellen und Versorgungssicherheit
(Prof. Dr. Jens Strüker, Hochschule Fresenius Idstein)

20.11.2013 Regenerativer Energieverbund Harzregion: Erfahrungen mit einem virtuellen Kraftwerk
(Dipl.-Ing. Florian Schlögl, Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES, Kassel)

13.11.2013 Zwischen technischem und kulturellem Wandel: Elemente einer integrierten Energiewende
(apl. Prof. Dr. Niko Paech, Universität Oldenburg)

30.10.2013 IT-Resilienz und Risiko-Management von Energienetzen
(Prof. Dr. Hermann de Meer, Universität Passau)

23.10.2013 Resilienz kritischer Infrastrukturen gegenüber Extremereignissen am Beispiel der Stromversorgung
(Dr. Jörn Birkmann, LMU München und Claudia Bach, UN-Universität Bonn)

10.1.4 Abschlussarbeiten und Veröffentlichungen

10.1.4.1 Abschlussarbeiten

2014 - Christine Osterndorfer, Universität Bremen

MA „Richtungsgebende Einflussfaktoren zur Gestaltung regionaler Energiewendeprozesse“

2016 - Steffen Tinnemeyer, Universität Bremen

BA – „Power-to-Gas/Power-to-Liquid: Langzeitstromspeicher oder Alternative zur Elektromobilität“

Konstantin Kubina, Universität Bremen

MA „Regionale Energiezellen – Gestaltung und Modellierung eines regionalen Energiesystems als Zelle mit hohen Anteilen Erneuerbarer Energien.“

10.1.4.2 Veröffentlichungen

2014

Wachsmuth, Jakob (2014): Resystra Thesenpapier 1: Vulnerabilität und Resilienz als Konzepte zum Umgang mit irreduziblen Unsicherheiten bei der Energiewende, Bremen

2015

Brand, Urte; Gleich, Arnim von; Wachsmuth, Jakob (2015): Resystra Arbeitspapier 1: Innovationsmodell Schildkröte 2.0 – Schildkrötenmodell und Multi-Level-Ansatz, Bremen

Wachsmuth, J.; Petschow, U.; Brand, U.; Fettke, U.; Pissarskoi, E.; Fuchs, G.; Dickel, S.; Kljajic, M. (2015). Richtungsgebende Einflussfaktoren im Spannungsfeld von Zentralen vs. Dezentralen Orientierungen bei der Energiewende und Ansatzpunkte für ein Leitkonzept Resilienz. RESYSTRA-Diskussionspapier 1; Universität Bremen/IÖW: Bremen/Berlin, http://www.resystra.de/files/publikationen/richtungsgebende-einflussfaktoren.master.pdf (zuletzt abgerufen am 28. Januar 2016)

Brand, U., & von Gleich, A. (2015). Transformation toward a Secure and Precaution-Oriented Energy System with the Guiding Concept of Resilience—Implementation of Low-Exergy Solutions in Northwestern Germany. energies, 8, 4995-7019

2016

Schnuelle, C., von Gleich, A., Gößling-Reisemann, Kisjes, K., Nikolic, I., Stührmann, T., Thier (2016). Optionen für die Integration von Power-to-Fuel in den Energiewendeprozess aus einer sozioökonomischen Perspektive. Vierteljahrshefte zur Wirtschaftsforschung Band 85, Nr. 4: S. 53-74, DIW Berlin (doi: 10.3790/vjh.85.4.53)

2017

Brand, U., Giese, B., von Gleich, A., Heinbach, K., S., Petschow, U., Schnülle, C., Stührmann, S., Stührmann, T., Thier, P., Wachsmuth, J., Wigger, H.; (2017), Auf dem Weg zu Resilienten Energiesystemen! Resiliente Gestaltung des Energiesystems am Beispiel der Transformationsoptionen EE-Methan-System und regionale Selbstversorgung, Projekt-Abschlussbericht RESYSTRA, Universität Bremen

Holtz, G., Schnuelle, C., Yadack, M., Friege, J.,Jensen, T., Viebahn, P., Thier, P., Chappin, E. (2017). Using agent-based modelst o generate transformation knowledge for the German Energiewende – potentials and limitations derived from four case studies. Energy Research and Social Science (eingereicht)

Thier, P., Giese, B., Brand, U., Schnülle, C., Petschow, U., Heinbach, K., Goessling-Reiseman, S., von Gleich, A.(2017). Investigating the opportunities to implement a cellular approach into two regional energy systems in Germany from a socio-technical point of view, Konferenzbeitrag ETG-Congress 2017 Bonn (im Erscheinen)

Weiter ist eine Publikation zum agentenbasierten Modell, sowie zur Vulnerabilität von Power-to-Fuel Anlagen im Energiesystem geplant.

Sämtliche selbst herausgegebene Publikationen sind auf der Projektwebseite: http://www.resystra.de abrufbar.

10.2 Erhebungsmethoden

10.2.1 Landkreis Osterholz – Fragebogen zur Erfassung von Netzdaten und dem Umgang mit Störungen

Allgemeine Fragen zu Störungen im Netz

1. Wie identifizieren Sie Schwachstellen in Ihrem Netz?
2. Welche Störungen sind im Netz der Stadtwerke bisher aufgetreten? Welche Störungsarten berücksichtigen Sie (Bsp.: atmosphärisch: Hochwasser, Hitze, Starkwind,…)?
3. Welche Erfahrung haben Sie mit der Behebung von Störfällen?
4. Können Sie Ihr Netz nach einem Schwarzfall problemlos wiederaufbauen?

Netz und Netzstruktur

1. Welche Stromkreislängen (= Systemlängen) und Netztopographien weisen die verschiedenen von Ihnen betriebenen Spannungsebenen auf?

Spannungs-ebene	Stromkreis-länge	Prozentualer Anteil an jeweiliger Spannungsebene			
		Maschen-netz	Ringnetz	Strahlennetz	Sonstiges
MS (> 1 kV)					
NS (<= 1kV)					

2. Können Sie sich bzw. die Anschlussnehmer in Ihrem Netzbereich ohne den übergeordneten TSO versorgen? (falls teilweise: wieviel % der durchschnittlichen Last bzw. der Höchstlast)
3. Welche EE-Erzeugungsanlagen speisen in Ihr Netz ein? Wie hoch ist die installierte Leistung?
4. Welche Netzpläne (schematisch) können Sie uns zur Verfügung stellen?
5. Wie hoch ist die Anzahl der Transformatoren und der wichtigsten Komponenten?
6. Wie ist das Alter der Komponenten (Transformatoren, Muffen, Koppelstellen)?
7. Wie viele Verbindungen gibt es zu benachbarten VN u. ÜN (Anzahl der Kopplungsstellen)?
8. Überwiegt der Anteil an Freileitungen oder Erdleitungen? Können Sie jeweils die Anzahl der Leitungs-km nennen?
9. Viertelstündliche Einspeisung der gesamten Erzeugung im Netzgebiet des Jahres 2013. Können Sie diese nach Erzeugungsträgern aufteilen?
10. Viertelstündlicher Lastgang des Gesamtverbrauchs im LK. Zurverfügungstellung von Verbrauchdaten der öffentlichen Gebäude. (siehe Open-Data Berlin – Link zuschicken: mit LK sprechen)
11. EEG Anlagen: Wie hoch ist die Eigenverbrauchsquote im LK? Wieviel Strom wird vor Ort direkt verbraucht? Gesamtenergieerzeugung- Abzgl. EEG-Vergüteter Mengen
12. Wie viele Verbraucher haben Sie die 10% der Gesamtenergie verbrauchen?

Steuerung

1. Betreiben Sie eine Leitzentrale? Für welches Gebiet ist diese zuständig?
2. Welche Herausforderungen sähen Sie bei der Steuerung des Netzes, wenn die Region vollständig mit lokal vor Ort erzeugten EE zu versorgen wäre?
3. Was halten Sie von subsidiärer Steuerung im LK OHZ?
4. Ist eine Steuerung und Schaltung der EE-Anlagen in der Art möglich, sodass sich eine Notstromversorgung für die Versorgung der wichtigsten Gebäude aufrechterhalten ließe? Wenn nein: Was wäre notwendig um das zu ermöglichen? Wer könnte Sie da unterstützen?

10.2.2 Fragenkatalog für die ersten Workshops in den Regionen (Landkreis Osterholz (04.12.2015), Stadt Wolfhagen(08.12.2015))

- **Wie beurteilen Sie die angewendeten Kriterien?**
- **Teilen Sie unsere Einstufung der Vulnerabilität?**
- **Was bedeuten die vorgestellten Szenarien für Sie als Netzbetreiber, LK, Projektierer,…? Welche Handlungen werden erforderlich?**
- **Welche Systemdienstleistungen hat das Energiesystem für Sie?**
- **Was halten Sie davon, Vorkehrungen zu treffen, dass Erzeugungsanlagen und Verbraucher sich so schalten/modulieren lassen, dass eine Minimalversorgung für die kritische Infrastruktur aufrecht erhalten bleibt? Welche Maßnahmen wären hierfür notwendig?**

Bitte beantworten Sie die folgenden Fragen für sich und schreiben die Antwort auf Karten:

- Welche weiteren Verletzlichkeiten sehen Sie im Landkreis?
- Welche Maßnahmen präferieren Sie, um das Energiesystem im LK OHZ resilienter zu machen?

Fragen Nachmittag:

- Wo sehen Sie den Schwerpunkt ihrer Vorsorge?
- Welche potenziell gefährdenden Ereignisse werden zukünftig von Bedeutung sein?
- Wie beurteilen Sie Abhängigkeiten von
  - Umweltbedingungen
  - internen oder externen Infrastrukturen?
- Welche Maßnahmen halten Sie im Rahmen des Risikomanagements für notwendig?

Netzwiederaufbau

- Wie oft wird Netzwiederaufbau simuliert/trainiert?
- Wie oft musste das Netz in vergangenen 10 Jahren wiederaufgebaut werden? (Teilnetzgebiete und Gesamtnetz)
- Wurde dabei Verbesserungsbedarf erkannt? Welcher?
- Wie wird nach Überschreiten der Batteriepufferzeiten an Kommunikation/Fernwirktechnik/Umspannwerken/Schaltstationen vorgegangen?
- Kommunikationsmöglichkeiten bei Stromausfall vorhanden?

Abhängigkeiten

- Versorgung von Anschlussnehmern auch ohne ÜNB möglich? Abhängigkeit vom vorgelagerten Netz.
- Rohstoffengpässe
  - für potenzielles BHKW durch Unterbrechung der Gaslieferung
  - für Biogas durch Biomassemangel (zukünftige klimatische Auswirkungen)
- Inselfahrweise möglich/Pläne vorhanden?
- Wasserversorgung ohne leitungsgebundene Energien?
- Sanitär und Lebensmittelversorgung ohne leitungsgebundene Energien?

Gefährdungsermittlung

- Welche Gefährdungen werden bereits berücksichtigt? (z.B. Stromausfall, extreme Wetterereignisse)
- Welche Gefährdungen wurden als nicht relevant eingestuft?
- Sind in den letzten Jahren neue Gefährdungen relevant geworden?
- Welche Gefährdungen werden in Zukunft erwartet?

Mit Teilnehmern Szenarien für EVA diskutieren:

- Ereignisbezogene VA:
- Gibt es bestimmte Ereignisse, die wir bei unseren Untersuchungen berücksichtigen sollten?
- Stimmen Sie mit unserer Definition der Systemdienstleistung überein?

10.2.3 Interview-Leitfäden und Codetabellen für Interviewauswertung

10.2.3.1 Interview-Leitfaden Osterholz

(übernommen aus Christina Osterndorf: Richtungsgebende Einflussfaktoren zur Gestaltung regionaler Energiewendeprozesse, Masterarbeit im Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen M. Sc., Universität Bremen 2014)

Allgemeine Angaben:

Datum des Interviews:

Ort des Interviews:

Name des/der Interviewers/in:

Name der/des Interviewten:

Funktion der/des Interviewten:

Akteurs-Bereich (Politik/Wissenschaft/Wirtschaft/Verwaltung):

Haupttätigkeit der/des Interviewten:

Direkter Netzwerk-Akteur der *Energiewende OHZ 2030* seit:

Einstiegsphase	• Begrüßung: Vielen Dank, dass Sie sich Zeit für das Interview genommen haben • Vorstellung der Interviewerin (persönliche Angaben) • Forschungsvorhaben, MA (Hintergrund/Ziele) MA/RESYSTRA • Ziel des Interviews erläutern • Interviews werden mit Aufnahmegerät aufgenommen, verschriftlicht und ausgewertet, fließen dann in meine MA+ Projektbericht von RESYSTRA • Hinweis: Einwilligungserklärung (vollständige Anonymisierung möglich!/verschiedene Varianten), zunächst aber Interview durchführen, damit Sie die Fragen kennen • Aufbewahrung der Audiodatei/personenbezogenen Daten bis Forschungsziel erfüllt ist • Interviewpartner hat jeder Zeit das Recht vom Interview zurückzutreten • Fragen dazu? • Leitfaden vorbereitet (Themenblöcke), ggf ausführlicheres Nachfragen, obwohl wir schon darüber geredet haben • Hinweise: Es gibt keine richtigen oder falschen Antworten. • Hinweise: Freiwillige Basis, Interview kann jeder Zeit beenden werden + es müssen nicht alle Fragen beantwortet werden • Ich zeichne das Interview zwar auf, mache mir aber trotzdem zwischendurch evtl. Notizen, lassen Sie sich davon nicht irritieren • Hinweis: Bitte so ausführlich wie möglich erzählen

	• Wie viel Zeit haben Sie? • Gibt es noch weitere Fragen im Vorfeld?
Aufwärmphase	• Was war Ihre persönliche Motivation/Ziele sich beruflich mit dem Thema Energie auseinanderzusetzen? (Personenspezifische Fragegestaltung!) • Was heißt Energiewende für Sie? • →Cut einbringen: Fokus umlenken von der allgemeinen Energiewende hin zur Energiewende im LK OHZ • Wie sahen Ihre persönlichen Ziele und Motivationen aus, sich dem Projekt Energiewende OHZ als Partner anzuschließen? • Seit wann sind Sie offizieller Partner? • Inwiefern bringen Sie sich ein?

Hauptphase	**1. Themenbereich: Bisherige Prozessentwicklung der Energiewende OHZ 2030**
	
	• 2007 entstand die Idee eines nachhaltigen, ganzheitlichen Energiekonzepts mit Fokus regionale Wertschöpfung. 2008 startete das Projekt Energiewende OHZ 2030 mit dem Ziel bis 2030 möglichst hohes Niveau an Energieautarkie zu erreichen durch:
	  o verstärkte regionale Eigenversorgung auf Basis EE
	  o Steigerung Energieeffizienz
	  o Energieeinsparmaßnahmen
	• Wie würden Sie den bisherigen Prozess auf dem Weg zu diesen Zielen / den bisherigen Prozess der Energiewende im LK Osterholz beschreiben?
	• Was ist gut/schlecht gelaufen?
	• Was hätte besser laufen können?
	• Welche Ziele wurden erreicht?
	• Welche nicht? Warum?
	• Existiert ein Leitbild, nach welchem Maßnahmen ergriffen bzw. Ziele gesteckt wurden? (bei der Wahl der Leuchtturmprojekte/Definition erklären)
	• Inwiefern ist dieses Leitbild konsistent verfolgt worden?
	• Inwiefern decken sich die Maßnahmen/Ziele mit anfänglich gesetzten Zielen?
	• Inwiefern konnte man sich dem Ziel regionale Wertschöpfung bisher annähern? Warum?
	
	2. Themenbereich: Einflussfaktoren + Richtungsgebung
	
	• Welche Faktoren und Rahmenbedingungen haben Ihrer Meinung nach (am stärksten) zur bisherigen Entwicklung der Energiewende in OHZ beigetragen?
	• Gibt es Faktoren / Entwicklungen, die unerwartet aufgetreten sind / an Relevanz gewonnen /verloren haben?
	• Warum?
	• Welche Faktoren werden die weitere Entwicklung der Energiewende OHZ (mit dem Ziel der nachhaltigen Energieautarkie 2030) maßgeblich beeinflussen?
	• Auf welche Art und Weise?

	• Gab es in der Vergangenheit (oder aktuell) signifikante Richtungsänderungen im regionalen Energiewendeprozess? Welche? • Welche Faktoren waren hierfür verantwortlich und warum? • Welche Faktoren/Entwicklungen sind nötig, damit der Prozess weiter läuft und die Ziele (bis 2030) erreicht werden? **3. Themenbereich: Konstellation des Akteurs-Netzwerks** • Welchen Beitrag werden Sie in Zukunft im Rahmen der Energiewende OHZ als Partner leisten wollen und können? • Bezugnehmend auf Projekt/Leuchtturmprojekt XY: Was ist hier besonders gut gelaufen? Warum? • Wie bewerten Sie die Stabilität und Tragfähigkeit des Akteurs-Netzwerks? • Welche Partner werden bei der weiteren Entwicklung hin zur Energieautarkie im Jahr 2030 von besonderer Bedeutung sein? • <u>Abschlussfrage:</u> o Wie stellen Sie sich den LK OHZ im Jahr 2030 realistisch gesehen vor?
Ausstiegsphase	• Das Interview ist jetzt beendet. • Haben Sie noch weitere Fragen oder Anmerkungen? • Möchten Sie noch etwas anfügen, was für Sie von Bedeutung ist, aber nicht gefragt wurde? • Wären Sie an meiner MA/Projektberichten interessiert? • Einwilligungserklärung unterschreiben, Kopie direkt erstellen/Scan per E-Mail zuschicken • Wäre es möglich Nachfragen an Sie zu richten? • Dank • Verabschiedung

10.2.3.2 Codierung zur Interviewauswertung für Osterholz

(Leitfragen zur Interviewauswertung) (übernommen aus Christina Osterndorf 2014)

Planung der Energiewende [1]

Allgemeine (Wert-)Vorstellungen über Natur und Gesellschaft [15]

z.B.: Bürger müssen in den Prozess eingebunden werden

Anforderungen an das Energiesystem [0]

z.B.: Zieldreieck, Versorgungssicherheit und Sicherstellung dieser

Definition Energiewende OHZ [9]

ökonomisch/ökologisches Energiewende-Verständnis [23]

Maßnahmen [0]

- **Öffentlichkeitsarbeit [4]**
- **Intelligente Ortsnetzstation/Quartiersspeicher [5]**
- **Leuchtturmprojekte [4]**
- **Qualitätslabel [0]**
- **Hambergen Biogasanlage [5]**
- **Bürger [3]**
- **Energieagentur [4]**
- **E-Mobility [3]**
- **Energieeinsparung [4]**
- **Energieberater-Netzwerk [6]**
- **Solarparks [1]**
- **Windkraft [5]**
- **Dachflächenkataster Grasberg [10]**
- **Windworkshop "regionale Wertschöpfung" [1]**
- **Bisher durchgeführte Analysen/ Szenarien [4]**

  z.B. Roadmaps, Wertschöpfungskettenanalyse, Klimaschutzkonzept, Leitbildprozesse o.ä.
- **Roadmaps [1]**
- **PV-Anlagen [1]**

Ziele & Motivationen [0]

- **Ziele [9]**
- **Güssing, KiSOL-Projekt [9]**
- **Dezentralisierung & Eigenversorgung [7]**
- **Förderprogramme [4]**
- **wirtschaftlicher Vorteil [4]**

Prozessentwicklung/ Historie [0]

- **Beginn, Anstoß, Initiatoren der Energiewende [25]**

Zwischenziel: Energieagentur [3]

Ziel: Energieautarkie [2]

Rahmenbedingungen/Entwicklung EE in OHZ [22]

Gegner der Energiewende und deren Gründe [6]

Bei Durchsicht der Interviews hierauf achten!

Gegeninitiativen Wind [12]

Bisher nicht erreichte Ziele in Energiewendeprozess und Gründe [5]

Kritik am Energiewendeprozess [0]

Hätte anders laufen müssen [22]

Nicht gut gelaufen [30]

Energiekompetenz OHZ [3]

Bisher erreichte Ziele im Energiewendeprozess [22]

Energiewende Strom [4]

Energiewende Wärme [2]

Energiewende Transport/Verkehr [9]

Risiken, Herausforderungen, Schwachstellen [0]

Geothermie [2]

Monitoring/Datenrecherche [13]

Finanzierbarkeit/Ressourcenausstattung [32]

Windkraft [22]

Deutsche Flugsicherung [4]

PV [16]

Fehlendes Know-How [11]

Biogas [3]

(Veränderte) Rahmenbedingungen [27]

Öffentlichkeitsarbeit [6]

Steuerung des Prozesses [20]

Dezentralisierung/Zentralisierung [1]

Mentalität [6]

Festhalten an Altem [5]

regionale Wertschöpfung [26]

Einflussfaktoren [0]

Finanzielle Ressourcen [6]

z.B. fehlende Gelder beeinflussen den Prozess

Forschungsrahmenprogramm [2]

Allgemein, nicht zuordenbar [15]

Bei PV [1]

Strombereich [2]

Extern [10]

Konzerne [2]

Biogasanlagen Projekt [5]

Einflussfaktor: Technology Push [1]

Monitoring [2]

Speicher [5]

Photovoltaik [7]

Biogas [1]

Windenergie [5]

Einflussfaktor: Market Pull [4]

Einflussfaktor: Regulativer Push [0]

Zukünftige Einflussfaktoren [0]

nötige Rahmenbedingungen [2]

Bisherige Einflussfaktoren [0]

Windenergie [5]

Entwicklung Regularien [17]

Einflussfaktor: Regulativer Pull [0]

EEG [9]

SEN EEG Wirkung [3]

EU/BMU-Förderprogramme [20]

Einflussfaktor: Zivilgesellschaftlicher Push [1]

Bürger [10]

Photovoltaik [3]

Einflussfaktor: Vision Pull [0]

Leitbilder und Verständnis dieser, Bedeutung in Energiewende [12]

Akteure [1]

EWE [3]

Zusammenarbeit der Akteure/Dynamik [27]

Laudeley [0]

Eigene Aktivitäten im Rahmen der Energiewende [5]

z.B. Informationsbereitstellung, Beteiligungsmöglichkeiten, Investition in EE-Anlagen, bisher und zukünftig, nach beruflich/privat trennen

Position [2]

Grundstimmung gegenüber Energiewende

Eigene fachliche Kompetenzen im Rahmen der Energiewende [2]

z.B: Vertrieb von Balkon-PV-Anlagen

Ziele und Motivationen [13]

(zukünftig) wichtige Akteure [16]

regionale Energieversorger / OHZ Stadtwerke [0]

Eigene Aktivitäten im Rahmen der Energiewende [9]

z.B. Informationsbereitstellung, Beteiligungsmöglichkeiten bieten, Investition in EE-Anlagen, bisher und zukünftig, nach beruflich und privat trennen

Position [5]

Grundstimmung gegenüber Energiewende

Eigene fachliche Kompetenzen im Rahmen der Energiewende [1]

z.B. Vertrieb von Balkon-PV-Anlagen

Ziele und Motivationen [8]

LK & Gemeinden & Politik [0]

Eigene Aktivitäten im Rahmen der Energiewende [11]

z.B. Informationsbereitstellung, Beteiligungsmöglichkeiten bieten, Investition in EE-Anlagen, bisher und zukünftig, nach beruflich und privat trennen

Position [7]

Grundstimmung gegenüber Energiewende

Eigene fachliche Kompetenzen im Rahmen der Energiewende [0]

z.B. Vertrieb von Balkon-PV-Anlagen

Ziele und Motivationen [4]

REON AG als Ingenieurbüro/Becker [0]

Eigene Aktivitäten im Rahmen der Energiewende [4]

z.B. Informationsbereitstellung, Beteiligungsmöglichkeiten bieten, Investition in EE-Anlagen, bisher und zukünftig, beruflich und privat trennen

Position [3]

Grundstimmung gegenüber Energiewende

Eigene fachliche Kompetenzen im Rahmen der Energiewende [4]

z.B. Vertrieb von Balkon-PV-Anlagen

Ziele und Motivationen [4]

SEN/Hr. Osmer [0]

Eigene Aktivitäten im Rahmen der Energiewende [3]

z.B. Informationsbereitstellung, Beteiligungsmöglichkeiten bieten, Investition in EE-Anlagen, bisher und zukünftig,
nach beruflich und privat trennen

Position [2]

Grundstimmung gegenüber Energiewende

Eigene fachliche Kompetenzen im Rahmen der Energiewende [3]

z.B. Vertrieb von Balkon-PV-Anlagen

Ziele und Motivationen [5]

Bürger [0]

Eigene Aktivitäten im Rahmen der Energiewende [6]

z.B. Informationsbereitstellung, Beteiligungsmöglichkeiten bieten, Investition in EE-Anlagen, bisher und zukünftig, nach beruflich und privat trennen

Position [8]

Grundstimmung gegenüber Energiewende

Ziele und Motivationen [10]

EIFI/Hr.Müller [0]

Eigene Aktivitäten im Rahmen der Energiewende [11]

z.B. Informationsbereitstellung, Beteiligungsmöglichkeiten bieten, Investition in EE-Anlagen, bisher und zukünftig, nach beruflich und privat trennen

Position [1]

Grundstimmung gegenüber Energiewende

Eigene fachliche Kompetenzen im Rahmen der Energiewende [3]

z.B. Vertrieb von Balkon-PV-Anlagen

Forschungseinrichtungen [0]

Eigene Aktivitäten im Rahmen der Energiewende [3]

z.B. Informationsbereitstellung, Beteiligungsmöglichkeiten bieten, Investition in EE-Anlagen, bisher und zukünftig, nach beruflich und privat trennen

Position [0]

Grundstimmung gegenüber Energiewende

Eigene fachliche Kompetenzen im Rahmen der Energiewende [0]

z.B. Vertrieb von Balkon-PV-Anlagen

Finanzinstitute [0]

Eigene Aktivitäten im Rahmen der Energiewende [2]

z.B. Informationsbereitstellung, Beteiligungsmöglichkeiten bieten, Investition in EE-Anlagen, bisher und zukünftig, nach beruflich und privat trennen

Position [0]

Grundstimmung gegenüber Energiewende

Eigene fachliche Kompetenzen im Rahmen der Energiewende [0]

z.B. Vertrieb von Balkon-PV-Anlagen

Industrie/Handwerksbetriebe/Unternehmen/Installateur [0]

Eigene Aktivitäten im Rahmen der Energiewende [5]

z.B. Informationsbereitstellung, Beteiligungsmöglichkeiten bieten, Investition in EE-Anlagen, bisher und zukünftig, nach beruflich und privat trennen

Position [1]

Grundstimmung gegenüber Energiewende

Eigene fachliche Kompetenzen im Rahmen der Energiewende [1]

z.B. Vertrieb von Balkon-PV-Anlagen

Ziele und Motivationen [4]

Richtungsänderungen und Gründe dafür im Rahmen der Energiewende [0]

Interesse der Bevölkerung [2]

Hat die Meinung oder das Interesse der Bevölkerung die Richtung geändert?

Solarthermie [5]

laut SEN [14]

Finanzierung & Energieagentur [7]

Photovoltaik [11]

Windkraft [8]

Wind Vorranggebiete [5]

Richtungsänderung: REON AG [1]

Finanzierung der Energiewende [4]

Bedeutung von Wirtschaftlichkeit in Energiewende [18]

z.B. Einsatz von EE-Anlagen muss sich rechnen

Bedeutung von Resilienz/Speicher [20]

hier alles sammeln, was zu Resilienz und verwandten Begriffen (Versorgungssicherheit, Speicher, Redundanzen, Ausfallsicherheit etc.) gesagt wird (Verständnis, Bedeutung, Umsetzungsmaßnahmen) etc.

Bedeutung von Effizienz [5]

z.B.: die Technologien müssen energiesparend/ energieeffizient sein

Bedeutung und Ausmaß von Vorsorge [0]

z.B.: es ist wichtig, regelmäßig die Leitungen auf Beschädigung zu prüfen

Weitere (notwendige) Entwicklung [0]

Notwendige Instrumente und Bausteine zur weiteren Umsetzung [24]

z.B. Förderprogramme etc., Energieeinsparung o.ä.

Einschätzung über realistische Entwicklung des Energiesystems [39]

lokal oder national

Wünschenswerte Entwicklung des Energiesystems [14]

lokal oder national

Energieeffizienz/Einsparung [4]

Strom [4]

SLEP-Projekt [6]

Biogas [2]

Information [4]

wichtige kommende Entwicklungen/Änderungen im LK [7]

Koordinationsstelle [10]

LK OHZ 2030 [37]

Herausforderungen [20]

10.2.3.3 Interview-Leitfaden Wolfhagen

Allgemeine Angaben:

Datum des Interviews:

Ort des Interviews:

Name des/der Interviewers/in:

Name der/des Interviewten:

Funktion der/des Interviewten:

Akteurs-Bereich (Politik/Wissenschaft/Wirtschaft/Verwaltung):

Haupttätigkeit der/des Interviewten:

Zur Person (5 min)	Evtl. notwendige Erläuterungen
1. Wie würden Sie Ihre jetzige Arbeit/ehrenamtliche Tätigkeit beschreiben?	
2. Was ist Ihr beruflicher Hintergrund?	
3. Was motiviert Sie, sich an der Energiewende zu beteiligen und seit wann engagieren Sie sich?	Energiewende: Umstellung auf erneuerbare Energiequellen, nicht nur Atomausstieg!

Soziale/ökonomische Faktoren (25 min)	
4. Was verstehen Sie unter regionaler Selbstversorgung? (generell und bezogen auf das Energiesystem)	- Fokus u.a. bilanziell oder absolut? - Was macht die Region aus, insbes. bezgl. der Energieversorgung und der Steuerungsmöglichkeiten bei der Energie (z.B. Einbindung ins Netz)
5. Welche positiven und negativen Effekte verbinden Sie mit der regionalen Selbstversorgung?	
6. a) Welche Ziele verfolgen Sie mit der regionalen Selbstversorgung? b) Auf welche technischen Ansätze setzen Sie dabei?	- lokale Interessen beachten
7. a) Welchen Stellenwert hat für Sie die regionale Selbstversorgung im Gesamtkontext der gesamten Energiewende? b) Passen beide in der bisherigen Form ihrer Gestaltung zusammen?	- Rahmenbedingungen - Ansatzpunkte für regionales Handeln
8. a) Gibt es ein Leitbild für die lokalen Aktivitäten und welches ist das? b) Wurde es bisher konsequent verfolgt?	z.B. Dezentralität, Energieeffizienz, Zentralisierung, 100% erneuerbare Energien, regionale Selbstversorgung; Versorgungssicherheit
9. Wer gehörte zu den Initiatoren der lokalen E-Wendeaktivitäten?	(mit „lokal“ ist die konkrete Kommune der Fallstudie gemeint)

10. a) Wer sind Ihrer Meinung nach die wichtigen Akteure der lokalen E-Wende? (Allgemein und speziell in Ihrer Kommune?) b) Gab es hier im Laufe der Aktivitäten Veränderungen in der Zusammensetzung der regionalen Akteure (Neueinsteiger/Aussteiger)? c) Falls nicht schon gesagt: Können Sie etwas zur Motivation und jeweiligen Kompetenz dieser regionalen Akteure sagen? → Deren Einstellung bitte auf einer Skala von 1-5, d.h. von sehr ablehnend bis sehr unterstützend einschätzen!	z.B. Kommune, Genossenschaft, Stadtwerke, überregionale Energieversorger, Landwirte, Vereine /Genossenschaften, Verbände /Agenturen, Wissenschaft, Unternehmen, Parteien, Bürger, Firmen?
11. Wie wurde die lokale E-Wende finanziert bzw. wie sollen zukünftige Schritte finanziert werden?	(mit „lokal“ ist die konkrete Kommune der Fallstudie gemeint)
12. Auf welche Hindernisse sind Sie bisher im Rahmen der lokalen Energiewende gestoßen? a) Falls vorhanden: Welche Richtungskorrekturen waren aufgrund der Hindernisse notwendig?	Hindernisse u.a. bei Interessen, technischen Ansätzen, Förderung Ziele geändert?
13. Welche lokalen Akteure sprachen bzw. sprechen sich gegen die lokale E-Wende und die damit verbundenen Aktivitäten und Investitionen aus? a) Aus welchen Gründen sprachen bzw. sprechen Sie sich gegen die E-Wende aus?	
14. Wie Verhalten sich die übergeordneten Behörden gegenüber der regionalen Energiewende und der Absicherung der Energieversorgung aus erneuerbaren Quellen?	z.B. Landrat, Regierungspräsidium

Vulnerabilität (20 min)	
15. Wenn wir das deutsche Energiesystem betrachten, was sollte es Ihrer Meinung nach leisten?	z.B. Versorgungssicherheit → Resilienz, Bezahlbarkeit → Effizienz, Umweltverträglichkeit → Erneuerbar, Akzeptanz → Partizipation
16. Welche Definition von Versorgungssicherheit legen Sie zu Grunde?	ggf. einen Maßstab mitgeben: „wie bisher“ (was ein sehr hohes Niveau darstellt); oder „Umgang wäre kein Problem, wenn….“
17. Worin könnte dabei Ihrer Meinung nach der Beitrag des lokalen Energiesystems bestehen?	
18. In welchem Bereich würden Sie am ehesten Einbußen in Kauf nehmen?: - Versorgungssicherheit, - Bezahlbarkeit, - Umweltverträglichkeit, - Akzeptanz	- Kostensteigerung, - Flächenverbrauch, - Stromausfall
19. Wo sehen Sie Schwachstellen Ihrer lokalen Energieversorgung?	Strom (lokales Verteilnetz), Gas, Wärme

20. Haben Sie einen Eindruck davon, welche Auswirkungen eine Unterbrechung der Energieversorgung für die Region haben würde? (kurz- bis langfristiger Ausfall)	Strom, Gas, Wärme
21. Welche Handlungsoptionen gibt es aus Ihrer Sicht a) überregional und b) regional (lokal), um dem zu begegnen?	
22. Hatten Sie vor unserem Gespräch schon von dem Begriff Resilienz gehört? a) Falls ja, was verstanden Sie bisher darunter?	
23. Wo sehen Sie Schwachstellen Ihres Ansatzes zur regionalen Selbstversorgung?	

Regulative Rahmenbedingungen (10 min)	
24. a) Welche Anreize zu einer Stärkung der regionalen Selbstversorgung gibt die aktuelle Regulierung bzw. geben Förderprogramme? b) Welche Entwicklungen haben sich unabhängig von rechtlichen und damit z.T. auch ökonomischen Rahmenbedingungen (Abgaben) ergeben?	z.B. EEG für Wärme (Energieeffizienz, Anschlußzwang, Marktanreizprogramm, 2009), Ausgleichsregelung (2009), Degression der Vergütung (2009 und 2012), Letztverbraucherregelung (f. Speicher), Ausbaubegrenzungen (EEG2014) z.B. auf Abfall- und Reststoffe bei Biomasse Direktvermarktung (ab 2017), Abgabe auf Eigenverbrauch von Solarstrom Kapitalmarktgesetz (Anforderungen an Bürgerenergieprojekte); Naturschutzgesetzgebung; Bundesimmissionsschutzgesetz; Regelung der Genehmigungsverfahren
25. Welche Behinderungen resultieren aus der aktuellen Regulierung für die regionale Selbstversorgung?	
26. Welche Handlungsfreiheit haben Sie vor Ort, um die Versorgungssicherheit zu stärken?	

Zukünftige Planungen(10 min)	
27. Welche Herausforderungen werden aus Ihrer Sicht in nächster Zeit auf den lokalen E-Wendeprozess zukommen?	- gesellschaftlich - technisch - ökonomisch - planerisch
28. Bei welchen Aufgaben im Rahmen der lokalen Energiewende wird zukünftig der Schwerpunkt liegen und wovon ist das Erreichen dieser Ziele abhängig?	- Bilanzielle Selbstversorgung? - Autarkie? - Harmonisierung von Angebot und Nachfrage? - Versorgungssicherheit? - Resilienz? (falls Verständnis vorhanden)

	technisch z.B. durch Speicher, Verbrauchssteuerung etc.
29. Welche Akteure werden dafür in einer (voraussichtlich) fördernden bzw. hemmenden Rolle zukünftig von besonderer Bedeutung sein?	
30. Welche Entwicklung halten Sie bei Ihrer lokalen Energiewende für realistisch?	- notwendige Akteure - Erwartungen an die Entwicklung der Rahmenbedingungen
31. Wie wünschen Sie sich die zukünftige Entwicklung der lokalen Energiewende?	Notwendige Technologien /Art der EE-Gewinnung, soziale Ziele (z.B. Partizipationsprozesse), Förderprogramme, finanzielle Beteiligung der BürgerInnen

Interview-Abschluss

- Möchten sie etwas, was Sie erwähnt haben, nochmals unterstreichen?
- Möchten sie etwas anfügen, was für Sie von Bedeutung ist, wir aber nicht gefragt haben?
- Haben Sie noch Fragen an uns?
- Wären sie an einem Projektendbericht interessiert?
- Möchten Sie über den Fortgang des Projektes (über E-Mail) informiert werden?
- **Einwilligungserklärung**
- Einverständnis für nochmalige Kontaktierung bei Rückfragen

10.2.3.4 Codetabelle zur Interviewauswertung für Wolfhagen

Code Hauptkategorie	Nebenkategorie
Befragte Person	
1. Beruflicher Hintergrund	
2. Motivation	
Soziale/ökonomische Faktoren	Nebenkategorie
3. Regionale Selbstversorgung	
	Definition
	Effekte
4. Ziele und Motivation	
	Leitbild?
5. Akteure	
	Unterstützer (Motivation u. Kompetenz)
	Gegner (Motivation u. Kompetenz)
	übergeordnete Behörden
6. Finanzierung	
7. Historie	
	Hindernisse
	Richtungsänderungen
Vulnerabilität	Nebenkategorie
8. Stellenwert der Systemdienstleistungen des E-Systems (Versorgungssicherheit, Ökonomie, Umwelt, Akzeptanz)	
9. Definition von Versorgungssicherheit	
	Beitrag des lokalen Energiesystems zur Versorgungssicherheit
	Schwachstellen der lokalen Energieversorgung
10. Handlungsoptionen zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit	
	Lokal
	Überregional
11. Resilienz	
	Definition
	Bedeutung
Regulative Rahmenbedingungen	Nebenkategorie
12. Anreize für reg. SV	
13. Behindernde Rahmenbedg. für reg. SV	
Zukünftige Planungen	Nebenkategorie
14. Zukünftige Herausforderungen	
15. Zukünftige Akteure	
16. Voraussichtliche Entwicklung	
17. wünschbare Entwicklung	

Codetabelle II zur Interviewauswertung nach Push- und Pull-Faktoren sowie ergänzenden richtungsgebenden Faktoren

Code-Kategorie	Beschreibung/Beispiel
Regulativer Push	• Netzentwicklungsplan (HGÜ-Trasse Südlink) • ENEV/EE-Wärmegesetz (Verpflichtung zur Energieeinsparung bzw. EE-Nutzung)
Informations-Push	• Skandalisierung oder positive Darstellung (u.a. in medialer Berichterstattung) • Ablehnung Südlink (HGÜ)
Technologie-Push	• Technologiefortschritt und seine Auswirkungen (z.B. Kostendegression der Anlagen)
Nachfrage-Pull	• Einnahmen für Kommune oder Bürger
Visions-Pull	• Klimaschutz • Unabhängigkeit
Anreiz-Pull	• lukrative Geschäftsmodelle (EEG-Vergütung etc.)
Schlüsselakteure	• an Systeminnovationen beteiligt/betroffen; können Richtungsimpulse geben
Netzwerk der Schlüsselakteure	• Zusammenarbeit der Schlüsselakteure
Metafaktoren	• nur beschränkt beeinflussbar, z.B. Ereignisse (Katastrophen) oder Umgebungseigenschaften (Standortbedingungen für EE-Anlagen)
Sonstige Richtungsimpulse	• können den Obigen nicht zugeordnet werden

10.3 Dokumentation zum RESYSTRA P2F Stakeholder-Workshop am 10.09.2015

Universität Bremen
TU Delft Delft University of Technology
university of groningen
Technik Gestaltung Technologie Entwicklung

RESYSTRA

Auf dem Weg zu resilienten Energiesystemen!

Dokumentation zum RESYSTRA Stakeholder-Workshop vom 10. September 2015

Agentenbasierte Modellierung zur Systemintegration von stromba-sierten Kraftstoffen in Deutschland

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

Impressum

Herausgeber
Universität Bremen
Fachgebiet für Technikgestaltung und Technologieentwicklung
Badgasteiner Str. 1
28359 Bremen

Autoren
Christian Schnülle, Universität Bremen
Telefon: 0421 218-64895, E-Mail: christian.schnuelle@uni-bremen.de
Pablo Thier, Universität Bremen

Die vorliegende Publikation wurde im Rahmen des Forschungsverbundes RESYSTRA – Resiliente Gestaltung des Energiesystems am Beispiel der Transformationsoptionen „EE-Methan-System“ und „Regionale Selbstversorgung“ erstellt. Für den Inhalt sind die genannten Autorinnen und Autoren verantwortlich.

Bremen, 14. November 2015

Überblick

Termin: 9:30 – 17:00 Uhr am Donnerstag, den 10. September 2015

Ort: Rotes Kreuz Krankenhaus (St.-Pauli-Deich 24, 28199 Bremen)

Inhalt: Agentenbasierte Modellierung zur Systemintegration von strombasierten Kraftstoffen in Deutschland

Moderation: Prof. Dr. Arnim von Gleich

Protokoll: Timo Hemmers, Christian Schnülle, Pablo Thier, Kasper Kisjes

Teilnehmer:

Name	**Institution**
Carl Berninghausen	*sunfire GmbH*
Tobias Block	*Audi AG*
Christine Brandstätt	*Fraunhofer IFAM*
Dirk Burmeister	*Entwicklungsagentur Region Heide*
Prof. Dr. Arnim von Gleich	*Universität Bremen*
Prof. Dr. Stefan Gößling-Reisemann	*Universität Bremen*
Jan-Kirsten Gratwohl	*Bertrandt AG*
Timo Hemmers	*Universität Bremen*
Claus Hirsch	*Reederei AG EMS*
Dr.-Ing. Mareike Jentsch	*Fraunhofer IWES*
Kasper Kisjes	*RU Groningen*
Jonas Klückers	*MicrobEnergy GmbH/ Viessmann Group*
Prof. Dr. ir. Igor Nikolic	*TU Delft*
Astrid Lewalter	*Projektträger Jülich*
Ulrich Petschow	*IÖW*
Lina Pockels	*wpd onshore GmbH & Co. KG*
Jonna-Malika Riek	*SGS Germany GmbH*
Simon Schäfer-Stradowsky	*IKEM*
Clemens Schneider	*Wuppertal Institut GmbH*
Christian Schnülle	*Universität Bremen*
Torben Schröder	*Sparkasse Bremen AG*
André Sternberg	*RWTH Aachen*
Sönke Stührmann	*Universität Bremen*
Jürgen Tenbrink	*EnviTec Biogas AG*
Pablo Thier	*Universität Bremen*
Michaela Thorn	*Projektträger DLR*
Jeannette Uhlig	*dena GmbH*
Dr. Peter Viebahn	*Wuppertal Institut GmbH*
Prof. Dr. ir. Edwin Zondervan	*TU Eindhoven*

1. Protokoll und Ziele des Workshops

Mit der Transformation des Energiesystems hin zu einer auf lange Sicht zu 100 % erneuerbaren Energieversorgung der Sektoren Strom, Wärme und Mobilität ergeben sich neue Herausforderungen. Die volatile Stromerzeugung durch Wind- und PV-Anlagen erfordert neue Langzeitspeicher zum Erhalt der Versorgungssicherheit und fossile Energieträger müssen langfristig komplett ersetzt werden. Im Projekt RESYSTRA wird Power-to-Fuel (P2F) als wichtiger Bestandteil für ein resilientes und nachhaltiges Energiesystem gesehen, da strombasierte, synthetische Kraftstoffe sowohl einen wichtigen Beitrag zum Übergang auf erneuerbare Energien im Bereich Mobilität, als auch, durch die Kopplung der leitungsgebundenen Energieträger Strom und Gas, einen Beitrag zur Steigerung der Resilienz des Energiesystem leisten können. Bei der Betrachtung der dafür nötigen Transformationsprozesse gehen wir den Fragen nach, welche Faktoren Erfolg und Umfang der Integration von P2F in das Energiesystem bestimmen und wie die Chancen einer Kopplung der Strom- und Kraftstoffversorgung genutzt sowie Risiken zugleich minimiert werden können. Um die Frage nach den relevanten Akteuren und ihren Einflussmöglichkeiten beantworten zu können, entwickeln wir zusammen mit Forschern der Universität Groningen und der Technischen Universität Delft ein agentenbasiertes Modell, in dem charakteristische Handlungen jener Akteure simuliert werden, die die Etablierung von P2F direkt beeinflussen. Die Ergebnisse sollen in Handlungsempfehlungen für den Transformationsprozess hin zu einem resilienten Energiesystem mit P2F für Politik, Wirtschaft und zivilgesellschaftliche Akteure münden.
Mit der Ausrichtung des Stakeholder-Workshops wurden zwei eng miteinander verbundene Ziele verfolgt. Zum einen erfordert die agentenbasierte Modellierung komplexer Systeme ein tiefgründiges Systemverständnis sowie möglichst guter Kenntnisse möglicher zukünftiger Entscheidungen der Akteure, was allein durch Recherchearbeit nicht in ausreichendem Umfang erlangt werden kann. Hierzu war der direkte Dialog mit den eingeladenen Akteuren notwendig und ausgesprochen hilfreich. Zum anderen wurde ganz gezielt ein breit gefächertes Akteursspektrum eingeladen, um auch Akteure zu involvieren, bei denen P2F bisher keine Rolle spielt und so ein Stimmungsbild bezüglich dieser vergleichsweise jungen Systeminnovation erlangen zu können.

2. Begrüßung und Einführung in das Projekt

Prof. Dr. Arnim von Gleich, Pablo Thier und Christian Schnülle, Universität Bremen

Arnim von Gleich begrüßte die Teilnehmer und gab eine generelle Einführung in die Forschungsansätze und Ziele des Projektes RESYSTRA. Zunächst erläuterte er, dass das Projekt die Transformation der Energiesysteme im Sinne eines gerichteten Wandels als systemische Innovation auffasse und sich ihrer Gestaltbarkeit daher mit Methoden der Innovationsforschung nähere. Neben dem Problem der Verbesserung der Innovationsfähigkeit stelle sich genauso intensiv die Frage nach den Möglichkeiten und Grenzen zur Beeinflussung der Innovationsrichtung. Als ein

wichtiger Einflussfaktor würden dabei Leitbilder angesehen. Im Ergebnis solle das Vorhaben das Gestaltungsleitbild ‚Resilientes Energiesystem' so operationalisieren, dass konkrete Empfehlungen für eine entsprechende Gestaltung der Energiesysteme in Deutschland gegeben werden können.

Pablo Thier erläuterte im Anschluss das methodische Vorgehen im Projekt und ging dabei zunächst auf die aus RESYSTRA-Sicht neuen Anforderungen an das Energiesystem ein. So müsse ein nachhaltiges, zukünftiges Energiesystem klimaverträglich und bezahlbar sein, gleichzeitig von der Gesellschaft in seiner Form akzeptiert werden und eine erweiterte Versorgungssicherheit (Resilienz) bieten. Der Resilienz-Begriff diene dabei als Leitorientierung für die Ausgestaltung des Systems und wurde wie folgt definiert: Resilienz beschreibt die Fähigkeit eines Systems, seine Dienstleistungen auch unter Stress und in turbulenten Umgebungen, d.h. trotz massiver äußerer Störungen und interner Ausfälle, aufrecht zu erhalten. Demnach soll ein resilientes System auf bekannte und unbekannte Herausforderungen sowie auf schleichende und abrupte Veränderungen vorbereitet sein.

Als zentrale Forschungsfragen im Projekt wurden formuliert: Welche Faktoren (Akteure und Instrumente) beeinflussen auf welche Weise die Richtung der Energiewende (mit Fokus auf regionale Selbstversorgung und P2F) und welche Rolle spielen Leitorientierungen, Zukunftsvorstellungen und Akteursstrategien für die Richtungsgebung des Transformationsprozesses? Um diese Fragen zu beantworten, werden Prozesse betrachtet und praktische Ansätze zur Beeinflussung der Richtungsgebung von systemischen Innovationen untersucht. Anhand zweier gezielt sehr verschiedenen Transformationsoptionen, der regionalen Selbstversorgung und Power-to-Fuel, werden diese Fragen vertieft untersucht. Ziel des Projektes ist, neben einem vertieften Verständnis systemischer Innovationsprozesse, die Entwicklung von Handlungsempfehlungen mit Fokus auf den beiden Transformationsoptionen.

Christian Schnülle gab im Anschluss eine Einführung in die Transformationsoption Power-to-Fuel und erläuterte die Gründe, warum genau diese Option für eine zentrale Betrachtung im Rahmen des Projekts RESYSTRA ausgewählt wurde. Demnach sei P2F jene Innovation, die den Anforderungen einer erweiterten Versorgungssicherheit im Rahmen einer zu 100 % auf Erneuerbaren basierenden Energieversorgung gerecht werden könne, wobei der Art und Weise der Kopplung der Energieversorgungsbereiche, Strom, Mobilität und Wärme ein hoher Stellenwert zukommt. Die einzelnen Prozessschritte von der Wasserelektrolyse mit regenerativem Strom über die Herstellung von Kohlenwasserstoffen hin zu Gas- und Flüssigkraftstoffen wurde schematisch vorgestellt. Bei den hergestellten Produkten handele es sich in einem ersten Zugang um chemische Langzeitspeicher, die beispielsweise in Zeiten besonders hoher Stromproduktion „gefüllt" werden könnten, um bei mangelnder Stromerzeugung über Rückverstromung die Versorgung aufrechtzuerhalten. Längerfristig steht allerdings ein zweiter Aspekt im Vordergrund. Für den Schwerlast-, Schiffs- und Flugverkehr steht derzeit noch keine realisierbare Option der Elektrifizierung zur

Verfügung. Es ist zu vermuten, dass in diesen Bereichen weiterhin auf Verbrennungsprozesse (Motoren und Turbinen) gesetzt werden muss. Hierfür kommen synthetische Treibstoffe in Frage. Die mit dem stetigen Ausbau erneuerbarer Energien exponentiell steigenden Stromüberschüsse böten hierfür ein enormes Potential für eine wirtschaftlich sinnvolle Nutzung durch P2F. Gleichzeitig könnten bei Auswahl geeigneter Standorte dadurch die Stromnetze entlastet werden. Es folgten weitere Vorteile, die strombasierte Kraftstoffe gegenüber anderen (erneuerbaren)Energieträgern vorweisen. So haben Biokraftstoffe zwar ebenfalls ein hohes Treibhausgasminderungspotential, der Flächenertrag ist bei P2F jedoch um ein Hundertfaches größer, wodurch Flächennutzungskonflikte minimiert werden.

Im Projekt wird das sozio-technische Energiesystem über die Bereitstellung seiner System Services und die zugehörigen Akteure und Infrastrukturen definiert. Die Transformation sozio-technischer Systeme wird als systemische Innovation aufgefasst, für welche die ‚Architektur' bzw. Ausgestaltung des Innovationssystems eine wesentliche Rolle spielt. In diesem Zusammenhang wird zur Visualisierung innovationsfördernder und richtungsgebender Faktoren das so genannte Multi-Impulsmodell verwendet, welches am Beispiel P2F erläutert wurde. Push- und Pull-Faktoren führten zu einer Destabilisierung und Neuausrichtung des bestehenden Energiesystems, wobei der Entwicklung von Technologien und Lösungsansätzen in sogenannten ‚Nischen' und dem Einfluss sich nur langsam ändernder sozio-ökonomischer Rahmenentwicklungen eine besondere Bedeutung zukommt.

Schließlich soll die agentenbasierte Modellierung (ABM), im Sinne eines ‚Durchspielens' konkurrierender Szenarien, die Grundlage für strategische Entscheidungen bilden und somit als Methode zur Beantwortung der Frage dienen, auf welchen Wegen ein resilienteres Energiesystem realisiert werden kann und welche Rolle dabei jeweils dem P2F-Ansatz zukommt. Eine wichtige Herangehensweise eröffnet dafür der dezentral ausgerichtete Modellentwurf mit Agenten, die mit real zu erwartenden Handlungsmöglichkeiten ausgestattet sind, womit deren mögliche Einflussmöglichkeiten auf die Gestaltung des Gesamtsystems recht gut abgebildet werden können.

3. Agent based Modelling of Socio-Technical Systems and Presentation of first Agent based Model Approach for Power-to-Fuel

Dr. ir. Igor Nikolic und Kasper Kisjes, TU Delft und University of Groningen

Igor Nikolic gab eine generelle Einführung in die agentenbasierte Modellierung, bevor das Wort an Kasper Kisjes (Universität Groningen) übergeben wurde. Zunächst wurde darauf hingewiesen, dass Modelle nicht dazu geeignet seien, Weltgeschehnisse exakt vorherzusehen, sondern vielmehr Tendenzen aufgezeigt werden können, in welche Richtung sich Systeme unter definierten Umständen entwickeln könnten.

Ein Agent werde als Einheit betrachtet, der eine wichtige Rolle im System und vielfältige Handlungsmöglichkeiten zugeteilt werden. Im Zuge der Simulationen würden die miteinander kommunikativ verknüpften Agenten mit weiteren spezifizierten Agenten interagieren und somit deren Verhalten und damit schließlich auch die Entwicklung des Gesamtsystems beeinflussen. Das Systemverhalten werde so im Gegensatz zu anderen Modellansätzen nicht auf der Systemebene gesteuert, sondern ergebe sich unmittelbar aus der Steuerung der Agenten (Bottom-up Ansatz). So könne untersucht werden, wie sich ein System an neuen Rahmenbedingungen anpasst, die durch einzelne Individuen und/oder Gruppierungen hervorgerufen werden. Somit eignet sich diese Methode besonders gut um zu simulieren, in welche Richtung ein System durch das Verhalten einzelner repräsentierter Akteure gelenkt wird und, am Beispiel P2F, welche Handlungen bzw. Umstände gegeben sein müssten, damit P2F wirtschaftlich betrieben werden kann.

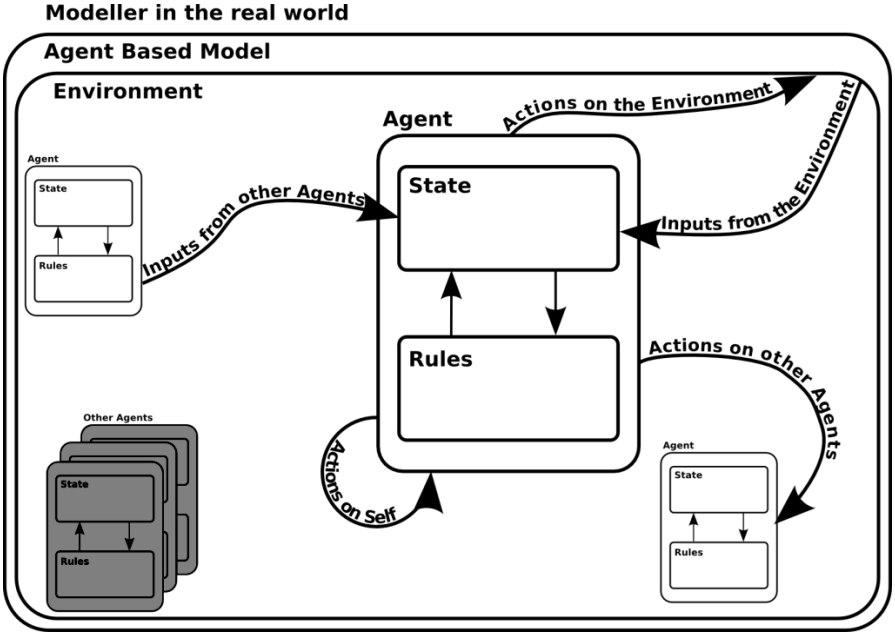


Abbildung 1: Veranschaulichung der Wechselwirkung zwischen Agenten (Nikolic 2015)

Kasper Kisjes stellte im Anschluss die Entwicklung des agentenbasierten Modells für das Projekt RESYSTRA vor. Im Fokus der Modellierungsarbeit stünden Experimente, die ein besseres Verständnis der Dynamiken rund um ein P2F-System ermöglichen, mit dem zentralen Ziel, die Auswirkungen von individuellen Entscheidungen verschiedener Agenten und die Rolle politischer und gesellschaftlicher Handlungen nachzubilden. In diesem Zusammenhang wurde verdeutlicht, dass erst das Expertenwissen und Feedback der Akteure eine hohe Aussagekraft des Modells sicherstelle.

Das agentenbasierte Modell konzentriere sich auf P2F-Betreiber als Agenten, die durch persönliche Eigenschaften charakterisiert werden, beispielsweise ob diese bereits über einen eigenen Kundenstamm oder über eigene EE-Erzeugungsanlagen verfügen, die nicht mehr nach EEG vergütet werden. Für diese Agenten werden in jährlichen Schritten betriebswirtschaftliche Kalkulationen unter der Berücksichtigung von Strompreisen, Investitions- und Betriebskosten, technischer

Fortschritte und Erfahrungswerten in Form von Lernkurven durchgerechnet. Mögliche P2F-Betreiber könnten demnach Betreiber von EE-Erzeugungsanlagen, Industrieunternehmen und neue Unternehmer sein. Für diese würden dann im Zuge der Simulationen Investitionsentscheidungen in die unterschiedlichen verfügbaren Technologien getätigt und persönliche Erwartungen für die Entwicklung ihrer Investitionen zugeteilt.

Assets	Preferences	Expectations
RE production	Acceptable ROI per technology	Positive/neutral/ negative
Access to sources and customers	Minimum market penetration to engage	Price levels
Specific knowledge		Demand

Abbildung 2: Diversifizierung verschiedener P2F-Betreiber durch Zuteilung unterschiedlicher Vermögenskriterien und persönlicher Erwartungen über die Entwicklung ihrer Investitionen. (Kisjes 2015)

Als weitere Agenten würden politische Entscheidungsträger, die Öffentlichkeit und Industrie- und Privatkunden simuliert, denen eigene Charakteristika zugeordnet werden. So implementiere man als entscheidend erachtete politische Handlungen beispielsweise die Vergabe von Förderprogrammen, die Gesetzeslage zur Einstufung von P2F-Betreibern sowie Klima- und Umweltschutzvorgaben. Diese Handlungen würden sowohl das Verhalten der Erzeuger als auch der Verbraucher neu steuern. Die Öffentlichkeit würde als ein Agent im Modell repräsentiert, der Druck auf politische Entscheidungen ausübt und vor allem das Interesse privater Kunden beeinflusst. Den Agenten der Industrie- und Privatkunden würden dagegen spezifische Kaufinteressen zugeteilt. Während Industriekunden zukünftig eine vorwiegend durch zu erfüllende Quoten hervorgerufene Nachfrage entwickeln könnten, würden private Kunden vor allem durch eine preisgetriebene Nachfrage abgebildet. Eine Option sei es, aufgrund der Umweltfreundlichkeit der Produkte, einem bestimmten Anteil privater Haushalte eine höhere Zahlungsbereitschaft gegenüber fossilen Kraftstoffen zuzuteilen.

Als weitere Einflüsse würden eine technische Weiterentwicklung und gegebenenfalls konkurrierende Technologien repräsentiert. Als äußere Faktoren seien außerdem Preise und Preisentwicklungen des Strombezugs, der Substitute Erdöl, Erdgas und Biokraftstoffe sowie die generelle Nachfrage fossiler Energieträger der verschiedenen Sektoren im Modell involviert.

4. Zukünftige Geschäftsmodelle für Power-to-X

Carl Berninghausen, Geschäftsführer, sunfire GmbH

Carl Berninghausen zeigte in seinem Vortrag zunächst einen Überblick zur verwendeten Technik für die Power-to-X Anlage von sunfire. Die Kerntechnologie von sunfire stelle ein keramisches Festoxid dar (SOC – Solid Oxide Cell), welches reversibel, d.h. sowohl im Elektrolyse- als auch

im Brennstoffzellenmodus betrieben werden könne und somit zwei Technologien in einem Gerät vereine.

Als Anwendungsgebiete würden die dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung, die Herstellung erneuerbarer Kraftstoffe sowie bei entsprechender Regelung der Anlagen die Netzstabilisierung gesehen. Damit die Power-to-X Technologien zur Veränderung der Energielandschaft beitragen könnten, wurden zwei Kernherausforderungen formuliert, die es zu meistern gelte. Zum einen sei dies die notwendige Industrialisierung der Technologie und zum anderen die Entwicklung von entsprechenden Geschäftsmodellen.

Als maßgeblicher Faktor für den Erfolg der Technologie wurden die Investitions- und Unterhaltskosten genannt. Ein Betrieb mit Überschussstrom werde zudem nicht als wirtschaftlich umsetzbar angesehen. Wegen der fluktuierenden und somit unvorhersehbaren Betriebsweise und den daraus resultierenden geringen Volllaststunden seien bereits einige Betreibermodelle gescheitert. Zudem könne es nicht das Ziel eines Unternehmens sein, günstigen oder sogar kostenlosen Strom zu beziehen, für den andere Verbraucher in Zeiten höheren Bedarfs maßgeblich mehr zahlen. Das derzeitige Strommarktdesign müsse daher grundlegend geändert werden.

Für einen betriebswirtschaftlichen Erfolg sei ein ganzheitlicher Ansatz wichtig. Die von sunfire betriebene Anlage nutze die bei der exothermen Reaktion im Herstellungsprozess des Synthesegases entstehende Abwärme zum Verdampfen des Wassers für die Hochtemperaturelektrolyse. Durch die Elektrolyse von Wasserdampf würde der elektrische Energiebedarf für diesen Prozessschritt sinken. Mit der sinnvollen, prozessinternen Nutzung der Abwärme habe die Anlage somit einen Gesamtwirkungsgrad bis zu 70 % bei der Herstellung von Flüssigkraftstoffen. Neben dem Prozess sei außerdem das hergestellte Produkt von besonderer Bedeutung. Im Vergleich zu Methan hätten langkettige Kohlenwasserstoffe einen höheren Verkaufswert je kWh und ließen sich deshalb zu höheren Preisen verkaufen. Der Betrieb einer Power-to-Liquid Anlage würde also bei gleicher Effizienz im Vergleich zu einer Power-to-Gas Anlage einen größeren Gewinn pro eingesetzter kWh einbringen.

Herr Berninghausen zählte außerdem wichtige Punkte auf, die sich im Stromsektor ändern müssten. Um den Bedarf an EE-Strom decken zu können, müsse dessen Erzeugung weiterhin steigen. Neben dem Ausbau sollte auch die Effizienz verbessert werden. Damit sei nicht ausschließlich die Erzeugung gemeint, eine Effizienzsteigerung des Energienetzes sei ebenso von Bedeutung. Schließlich sei es im Zuge der Energiewende wichtig, Kapazitäten für Regelenergie zu schaffen und die aus volatiler Erzeugung resultierenden Stromüberschüsse zu vermarkten.

Bezogen auf die Speichermöglichkeiten gebe es für geschlossene, reine Speichersysteme deutliche Nachteile. Vor allem die doppelten Umwandlungsverluste könne man durch die Power-to-X Technologie vermeiden. Durch die Kombination der Energienetze sei es möglich, statt eines Speichers, ein so genanntes Gateway zu erzeugen, wodurch ein asymmetrischer Betrieb ermöglicht

wird. Die Anlagen könnten an das vorhandene Lastprofil angepasst werden und durch eine entsprechende Zu- oder Abschaltung eine bedarfsgerechte Kompensationslast bieten.

Im Zuge der Gatewaytechnologie verwies Herr Berninghausen auf die technischen Parameter der verwendeten reversiblen Festoxidzellen (rSOC – Reversible Solid Oxide Cells). So könnten im Elektrolysebetrieb Wirkungsgrade von über 76 % und bei der Anwendung als Brennstoffzelle ein elektrischer Wirkungsgrad von 50 % erreicht und gleichzeitig ein hohes Maß an Flexibilität ohne Degradationseffekte geboten werden. Die hergestellten Produkte würden darüber hinaus mit ihren Qualitätsmerkmalen bestechen. So enthielten sunfire-Produkte keinen Schwefel oder schädliche Aromaten bei einer gleichzeitig hohen Cetanzahl.

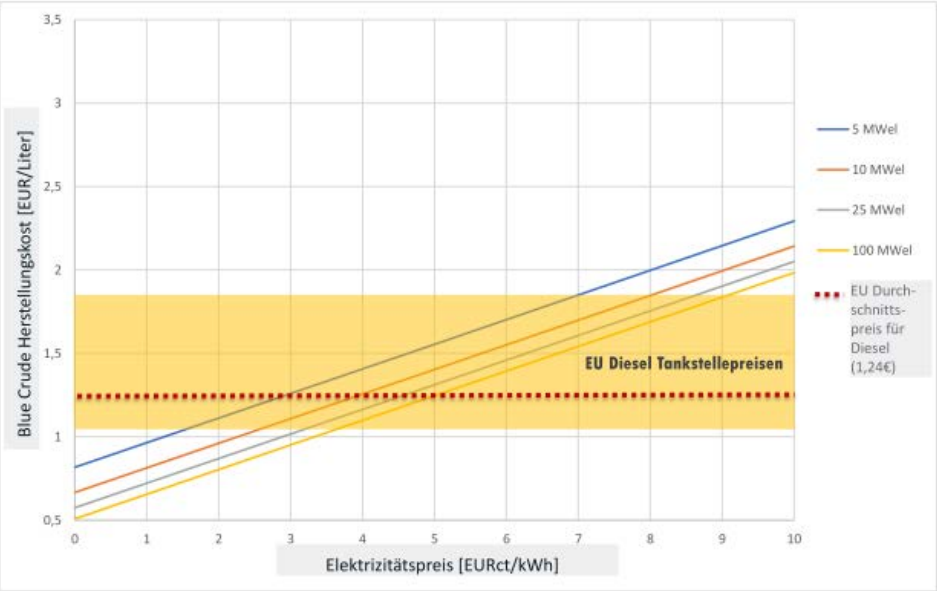


Abbildung 3: Herstellungskosten von synthetischen Diesel (Blue Crude) in Abhängigkeit der Anlagengröße und des Elektrizitätspreises. (Berninghausen 2015, Sunfire)

Die Abhängigkeit der Gestehungskosten für produzierte Kraftstoffe von der Anlagendimension sei nicht so gravierend wie häufig vermutet. Neben großen Anlagen im Bereich von ca. 100 MW sei es gemäß Abbildung 3-1 auch möglich kleinere Anlagen im 5 MW Maßstab bei entsprechenden Rahmenbedingungen wirtschaftlich zu betreiben. Der aktuelle Strompreis an der Leipziger Börse EEX beläuft sich auf ca. 2,8 ct/kWh, womit Blue Crude unterhalb des Tankstellenpreises für Diesel hergestellt werden könnte. Auf den Strompreis müssen allerdings noch Abgaben geleistet werden, die je nach Einstufung des Betreibers im Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) in ihrer Höhe stark variieren.

Für den Durchbruch der Technologie seien daher dringend politische Maßnahmen erforderlich. Ganz entscheidend sei hier eine Einordnung der Power-to-Gas- und Power-to-Liquid-Konzepte als Netzkomponente und nicht wie in der derzeitigen Regelung als Letztverbraucher, wodurch der Zugang zu günstigeren Strombezugskosten, insbesondere durch eine Befreiung von oder zumindest Reduzierung der EEG-Umlage, ermöglicht wird. Ebenso sei eine Anerkennung der

hergestellten Produkte als Biokraftstoff im Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) dringend notwendig.

Im Rahmen der anschließenden Diskussion betonte Herr Berninghausen auf Nachfrage, dass im Zuge der Wirtschaftlichkeitsrechnungen nicht mit negativen CO_2-Preisen gerechnet werde. Der Versuch der CO_2-Abscheidung aus industriellen Emissionen sei in anderen Projekten aufgrund gesetzlicher Hürden gescheitert. Widersprüchlich sei hingegen der Umstand, dass CO_2 aus der Atmosphäre als klimaneutral gewertet wird, aber nicht geregelt sei, wie nah die Absorption des CO_2 an einer Industrieanlage betrieben werden darf. Auf die Nachfrage, welche Kundengruppen man sehe, wurden Stromkonzerne, die Automobilindustrie und die Brennstoffzellenbranche als Beispiele genannt. Zwar gebe es auch weniger preissensitive Kunden, die beispielsweise aus Imagegründen bereit seien, mehr für strombasierte Kraftstoffe zu zahlen, doch hätten auch diese Kunden ihre Schmerzgrenzen. Um P2F wirtschaftlich weiterzuentwickeln, muss es vor allem gelingen, eine zuverlässige Technik anzubieten und Investitionskosten langfristig deutlich zu reduzieren.

5. Power-to-Gas in der Sektor übergreifenden Zubauoptimierung des Fraunhofer IWES

Dr.-Ing. Mareike Jentsch, Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Fraunhofer IWES

Mareike Jentsch berichtete in ihrer Präsentation über die Energiesystemmodellierung beim Fraunhofer IWES. Ziel der Sektor übergreifenden Zubau- und Einsatzoptimierung für Deutschland und Europa sei eine Minimierung der volkswirtschaftlichen Kosten bei der Umsetzung der Klimaschutzziele. Gleichzeitig werde auch an Modellen für die Anlageneinsatzoptimierung im Strommarkt mit dem Ziel der Minimierung variabler Betriebskosten gearbeitet. Inputparameter für die Modellierung seien Technologie- und Brennstoffkosten, die Berücksichtigung von Bestandsanlagen und von Potentialen bzw. Restriktionen sowie Zeitreihen für den Energiebedarf für Strom, Wärme und Verkehr.

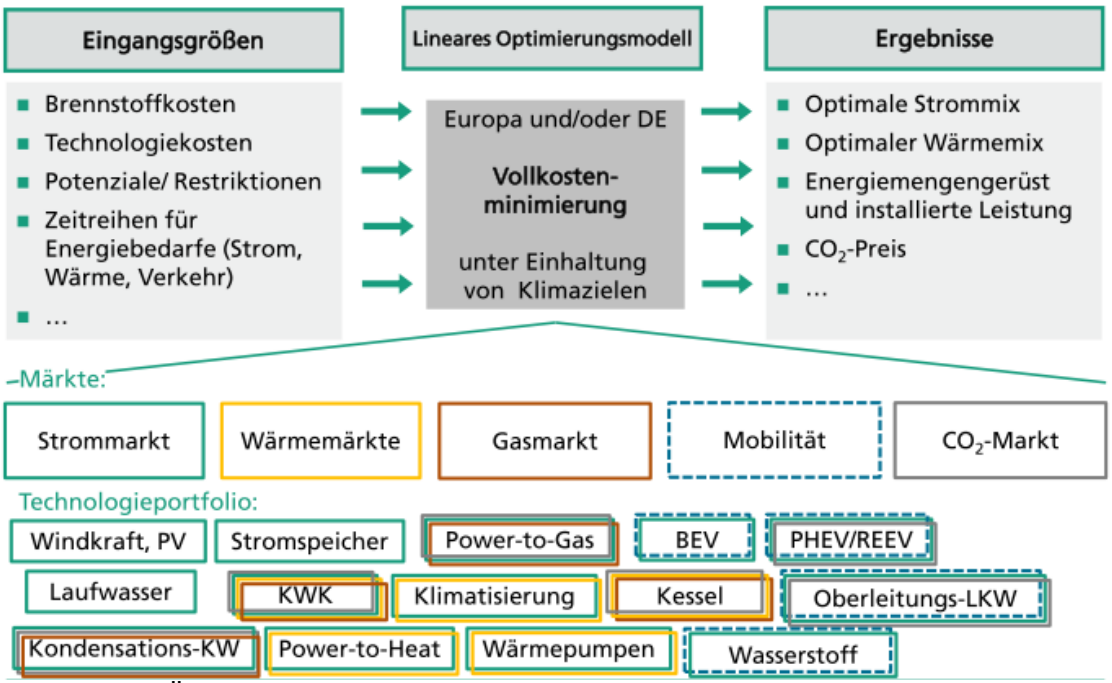


Abbildung 4: Übersicht über die Sektor übergreifende Zubau- und Einsatzoptimierung. (Jentsch, Fhg IWES)

Ergebnisse des Optimierungsmodells seien beispielsweise, unter der Zielvorgabe der Vollkostenminimierung und der Einhaltung von Klimaschutzzielen, ein optimaler Strom- und Wärmemix, ein stündlich aufgelöstes Energiemengengerüst mit entsprechender installierter Leistung und ein resultierender CO_2-Preis. Berücksichtigt würden dafür der Strom-, Wärme-, Gas-, Mobilitäts- und CO_2-Markt, einhergehend mit einem breit gefächerten Technologieportfolio von EE-Erzeugungsanlagen über Stromspeicher, Elektrofahrzeugen und Kraft-Wärme-Kopplung bis hin zu Power-to-Heat, Power-to-Gas und Wärmepumpen.

Als Zielzustand wurde ein Energiesystem in Deutschland genannt, in dem, unter Berücksichtigung des internationalen Schiffverkehrs, 83 % der Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 eingespart werden. Für die Erreichung dieses Ziels nannte Frau Jentsch eine ermittelte Power-to-Gas Leistung von 18 GW, mit der 30 TWh fossilen Erdgases verdrängt und damit verbundene Emissionen eingespart würden. Gleichzeitig gäbe es eine Langzeit-Ausgleichsoption für die Stromproduktion.

Im Rahmen der Diskussion erklärte Frau Jentsch, dass neben Power-to-Gas im Modell auch mit einem Einsatz von Power-to-Heat gerechnet wird. So könne für die Erzeugung von Wärme der Umweg über Power-to-Gas mit einer anschließenden Verbrennung des Gases und weiteren Energieverlusten vermieden werden. Power-to-Heat sei deshalb nach heutigem Stand die effizientere Technologie für den Wärmesektor. Aus volkswirtschaftlicher Sicht sei eine parallele Anwendung beider Technologien zu bevorzugen.

6. Förderprojekte und Förderinitiativen des BMBF für P2G und P2L

Astrid Lewalter, Energietechnologien, Grundlagenforschung, Energieinfrastrukturen, Projektträger Jülich

In ihrem Vortrag zu den Förderbedingungen von Power-to-Gas und Power-to-Liquid Projekten stellte Astrid Lewalter die aktuellen Förderprogramme des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) vor und ging dabei zunächst auf die Struktur des BMBF ein. Für neue Projekte seien insbesondere die Abteilungen „Strategien und Grundsatzfragen“, „Schlüsseltechnologien – Forschung für Innovationen und „Zukunftsvorsorge – Forschung für Grundlagen und Nachhaltigkeit“ zuständig.

Über die BMBF-Plattform ‚FONA – Forschung für nachhaltige Entwicklung‘ fördere das BMBF den gesamten Forschungsprozess von den Grundlagen bis zur Anwendung um Beiträge zur Bekämpfung des Klimawandels leisten zu können. In diesem Zusammenhang stellte Frau Lewalter verschiedene Förderrichtlinien zur Thematik der stofflichen Nutzung von CO_2 vor. Darüber hinaus gebe es außerdem die Förderinitiativen ‚Energiespeicher‘ und ‚Materialforschung für die Energiewende‘. In Planung sei zudem ein neues Kopernikus-Großprojekt im Themenbereich Power-to-X. Außerdem gebe es zur Förderung der Materialforschung das Programm, WING – Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft‘ und weitere themenoffene Programme.

Abbildung 5: Landkarte über bereits geförderte Power-to-X Projekte. Dunkelgrün umrandete Projekte werden im Rahmen der FONA-Plattform gefördert, hellgrüne durch das 6. Energieforschungsprogramm und das HYPOS Projekt ist einem Themenoffenen Programm „Unternehmen Region“ zugehörig. (Lewalter 2015, PtJ)

Im Anschluss ging Frau Lewalter auf bereits vorhandene und geförderte Projekte rund um das Thema Power-to-Gas ein. So gebe es Projekte zur Erforschung der Wasserelektrolyse mit verbesserten bzw. neuartigen Katalysatoren und MEA’s (Membrane Electrode Assemblies). Ziele seien Katalysatoren ohne oder mit reduziertem Edelmetallgehalt. Des Weiteren werde die Forschung zur effizienten Wasserstoffspeicherung und für alternative H_2-Produktionsverfahren, beispielsweise mittels photoelektrochemischer Erzeugung, gefördert. Bezüglich Power-to-X gebe es derzeit außerdem Projekte für die stoffliche Nutzung von CO_2, wie beispielsweise zur Nutzung von Rauchgasen für die Erzeugung von Basischemikalien. Nicht zuletzt würde zudem das Power-

to-Liquid Projekt der Firma sunfire für die Herstellung synthetischer Flüssigkraftstoffe und eines Naptha-Ersatzes gefördert.
Noch offene Calls seien die Förderrichtlinien CO2Plus, r+Impuls (Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Impulse für industrielle Ressourceneffizienz) und InnoEMat (Innovative Elektrochemie mit neuen Materialien).

7. Regulatorische Bedingungen für den Einsatz von PtG-Anlagen

Simon Schäfer-Stradowsky, Geschäftsführer, Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität – Recht, Ökonomie und Politik e.V., IKEM

Simon Schäfer-Stradowsky ging in seinem Vortrag auf die Probleme der derzeitigen Gesetzeslage in Deutschland bezüglich der Etablierung von Geschäftsmodellen für Power-to-Gas-Technologien ein. Ein Ziel des IKEM sei die Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für den Gesetzgeber zum Abbau von Hemmnissen für die Förderung von Speichern und Power-to-Gas (P2G).
Aus dem Vortrag wurde zunächst deutlich, dass es eine Reihe von Unklarheiten bezüglich der Einordnung von P2G in den Gesetzesrahmen gibt, gleichzeitig aber die gesetzliche Regulierung einen maßgeblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Geschäftsmodellen ausübt.
So sei die definitorische Einordnung von P2G im EnWG entscheidend für die Höhe der Strombezugskosten. Neben den Energiebeschaffungskosten seien die EEG-Umlage, Stromsteuern und Netzentgelte die wichtigsten Strompreisbestandteile. Eine allgemeine Befreiung von der Zahlung dieser Bestandteile gebe es für Marktteilnehmer nicht. Wie hoch deren Kosten sind, hinge allerdings davon ab, ob ein Unternehmen bzw. eine Anlage als Letztverbraucher, Speicher oder stromintensives Unternehmen eingestuft werde. Demnach würde eine Power-to-Gas Anlage derzeit als Letztverbraucher eingeordnet, wenn das produzierte Gas nicht zur Rückverstromung verwendet sowie der erzeugte Strom nicht in das selbe Netz zurückgespeist wird und müsste somit die EEG-Umlage in voller Höhe zahlen. Eine Definition als Speicheranlage sei nach § 3 Nr. 31 EnWG nur möglich, wenn die P2G-Anlage von einem Gasversorgungsunternehmen betrieben wird. Im § 118 Abs. 6 EnWG seien Elektrolyseure allerdings als Anlagen zur Speicherung elektrischer Energie definiert und demnach von Netzentgelten und Einspeiseentgelten in das Gasnetz befreit.
Herr Schäfer-Stradowsky ging außerdem auf mögliche Verwertungspfade für strombasiertes Gas ein. EEG-Vergütungsanspruch gelte nach §19 Abs. 4 EEG auch für Strom aus zwischengespeichertem Gas. Der Elektrolyseur müsse dazu den Strom direkt von einer EE-Anlage beziehen. Die Höhe der Vergütung entspreche dann jener Vergütung, die der EE-Anlagenbetreiber auch bei einer direkten Einspeisung des Stroms erhalten hätte.
Bezüglich einer Anwendung im Wärmesektor sei zu beachten, dass Power-to-Gas keine erneuerbare Energie im Sinne des Erneuerbare-Energien-Wärmegesetzes (EEWärmeG) ist und demnach nicht zur Erfüllung der EE-Nutzungspflicht angerechnet werden kann. Somit ergebe sich

bisher kein Anreiz für die Nutzung im Wärmesektor. Auch eine Anwendung im Verkehrssektor sei derzeit keine Option um den Anteil erneuerbarer Energien in der Mobilität zu erhöhen, da Power-to-Gas im Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) bisher nicht von der Definition der Biokraftstoffe erfasst ist.

Zusammenfassend erläuterte Herr Schäfer-Stradowsky, dass es dringend klarer Regelungen bedarf, insbesondere im Zusammenhang der Strombezugskosten und dass ein zentraler Einsatz von Power-to-Gas zur Vermeidung des Netzausbaus stärker gefördert werden sollte. Es sei außerdem empfehlenswert, einen systemdienlichen Einsatz durch Netzbetreiber zuzulassen.

8. Erste Erfahrungen mit der biologischen Methanisierung in Verbindung mit einer Einspeisung in das Erdgasnetz

Jonas Klückers, Projektentwicklung Power-to-Gas, MicrobEnergy GmbH/ Viessmann Group

In seinem Vortrag stellte Jonas Klückers die Pilotanlage der MicrobEnergy GmbH/ Viessmann Group zur biologischen Methanisierung vor. Diese Anlage sei zu Demonstrationszwecken geplant worden und ist am 2. März 2015 in Betrieb gegangen.

Zur Anlage gehöre ein PEM-Elektrolyseur mit einer Leistung von 300 kW und einer maximalen Wasserstoffproduktion von 60 Nm^3 pro Stunde. Eine standortnahe Biomethananlage bzw. die dazugehörige Aufbereitungsanlage produziere CO_2, welches zur biologischen Fermentierung genutzt wird. Da bei der Anlagenplanung die Qualität des produzierten Gases noch nicht klar gewesen sei, habe man eine Leitung zurück zum Gasspeicher der Biogasanlage installiert. Bei einer mangelnden Gasqualität wäre es so möglich, das Gas nachträglich aufbereiten zu lassen. Im laufenden Betrieb habe sich allerdings gezeigt, dass eine außerordentlich hohe Gasqualität erreicht wird und diese den Ansprüchen für eine direkte Einspeisung in das Gasnetz gerecht wird. Darüber hinaus sei die Anlage sehr flexibel und innerhalb von 30 Sekunden betriebsbereit, auch nach mehrtägigem Stillstand.

In einem Versuch wurde anstelle von abgeschiedenem CO_2 direkt das erzeugte Biogas in die biologische Methanisierungseinheit eingeleitet. Auch bei dieser Betriebsführung erfüllte das produzierte Gas die Qualitätskriterien für Biomethan.

Einheiten in ct/kWh Speichergas

Investitionskosten in €/kW$_{el}$	Strombezugskosten am Elektrolyseur in ct/kWh															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
500	0,2	2,4	4,7	7,0	9,2	11,5	13,7	16,0	18,3	20,5	22,8	25,1	27,3	29,6	31,9	34,1
750	1,2	3,5	5,8	8,0	10,3	12,5	14,8	17,1	19,3	21,6	23,9	26,1	28,4	30,7	32,9	35,2
1.000	2,3	[illegible]	6,8	9,1	11,4	13,6	15,9	18,1	20,4	22,7	24,9	27,2	29,5	31,7	34,0	36,3
1.250	3,4	[illegible]	[illegible]	[illegible]	12,4	14,7	16,9	19,2	21,5	23,7	26,0	28,3	30,5	32,8	35,1	37,3
1.500	4,4	[illegible]	[illegible]	[illegible]	13,5	15,7	18,0	20,3	22,5	24,8	27,1	29,3	31,6	33,9	36,1	38,4
1.750	5,5	7,8	10,0	[illegible]	14,6	16,8	19,1	21,3	23,6	25,9	28,1	30,4	32,7	34,9	37,2	39,5
2.000	6,6	8,8	11,1	13,4	15,6	17,9	20,1	22,4	24,7	26,9	29,2	31,5	33,7	36,0	38,3	40,5
2.250	7,6	9,9	12,2	14,4	16,7	18,9	21,2	23,5	25,7	28,0	30,3	32,5	34,8	37,1	39,3	41,6
2.500	8,7	11,0	13,2	15,5	17,8	20,0	22,3	24,5	26,8	29,1	31,3	33,6	35,9	38,1	40,4	42,7
2.750	9,8	12,0	14,3	16,6	18,8	21,1	23,3	25,6	27,9	30,1	32,4	34,7	36,9	39,2	41,5	43,7
3.000	10,8	13,1	15,4	17,6	19,9	22,1	24,4	26,7	28,9	31,2	33,5	35,7	38,0	40,3	42,5	44,8
3.250	11,9	14,2	16,4	18,7	21,0	23,2	25,5	27,7	30,0	32,3	34,5	36,8	39,1	41,3	43,6	45,9
3.500	13,0	15,2	17,5	19,8	22,0	24,3	26,5	28,8	31,1	33,3	35,6	37,9	40,1	42,4	44,7	46,9
3.750	14,0	16,3	18,6	20,8	23,1	25,3	27,6	29,9	32,1	34,4	36,7	38,9	41,2	43,5	45,7	48,0
4.000	15,1	17,4	19,6	21,9	24,2	26,4	28,7	30,9	33,2	35,5	37,7	40,0	42,3	44,5	46,8	49,1

Kostensituation 2015/16

Abbildung 6: Sensitivität der Herstellungskosten für Methan in Abhängigkeit des Strompreises und der Investitionskosten. (Klückers 2015, Viessmann Group)

Die Kosten für die Planung und den Bau der gesamten Anlage wurden auf 3 Millionen Euro beziffert. Das produzierte Gas habe bei einer Anrechnung der Abschreibung einen Preis von 40 – 50 Cent/kWh. Dabei betonte Herr Klückers, dass es sich um eine Demonstrationsanlage handelt. Es wurde sehr viel Messtechnik installiert, welche nach einer durchgeführten Sensitivitätsanalyse nur zum Teil wirklich notwendig sei. Eine neu gebaute Anlage könne somit Gas für 20 – 25 Cent/kWh liefern. Durch eine Befreiung von der EEG Umlage könne so grünes P2G-Gas erzeugt werden, dass allerdings noch immer ungefähr viermal so teuer wäre wie entsprechendes fossiles Gas. Eine Konkurrenzposition zu fossilem Gas werde daher in näherer Zukunft als kaum realistisch gesehen. Man versuche aktuell spezielle Nischen zu bedienen, in denen der Preis kein zu großes Hemmnis darstellt. Mögliche Kundengruppen würde man aktuell auf dem Kraftstoffmarkt sehen. Als Stichwort wurde hier die Audi e-gas Tankkarte genannt. Eine weitere Möglichkeit seien der Wärme- und Biokraftstoffmarkt.

Herr Klückers berichtete in der nachfolgenden Diskussion, dass das Nebenprodukt Sauerstoff aus dem Elektrolyseprozess derzeit nicht verwendet wird. Man sehe allerdings eine mögliche Anwendung an Klärwerkstandorten. Ob der Sauerstoff auch für eine Verwendung in der chemischen Industrie interessant ist, sei noch zu prüfen. Auf die Frage, wie empfindlich die Mikroorganismen sind, betonte Herr Klückers, dass es bisher keinerlei Probleme mit der Anlage gegeben habe und auch im Winter bei kalten Außentemperaturen nicht mit Problemen gerechnet werde.

9. Green Shipping – Grüne Welle im Wattenmeer

Claus Hirsch, Technischer Inspektor, Reederei AG EMS

Claus Hirsch berichtete in seinem Vortrag vom Umbau des Fährschiffes MS Ostfriesland der Reederei AG EMS hin zu einer umweltfreundlicheren LNG-betriebenen Fähre. Die Reederei setze als erste deutsche Reederei auf die LNG-Technik und erhalte eine EU-Förderung für den innovativen Umbau. Die Umgestaltung der Fähre beinhaltete einen kompletten Neubau des Achterschiffes, in dem der Diesel-Gas-Elektrische (Dual Fuel) Antrieb untergebracht wurde. Der neue Antrieb bestehe dabei aus zwei Schottel Ruderpropellern, die für ein hohes Maß an Manövrierfähigkeit sorgen, zwei Hauptmaschinen der Firma Wärtsilä und zwei Hilfsdieselmotoren von Mitsubishi. Gespeichert werde das LNG in vakuumisolierten Tanks, die das Gas auch nach 60 Tagen noch ohne Verluste speichern können.

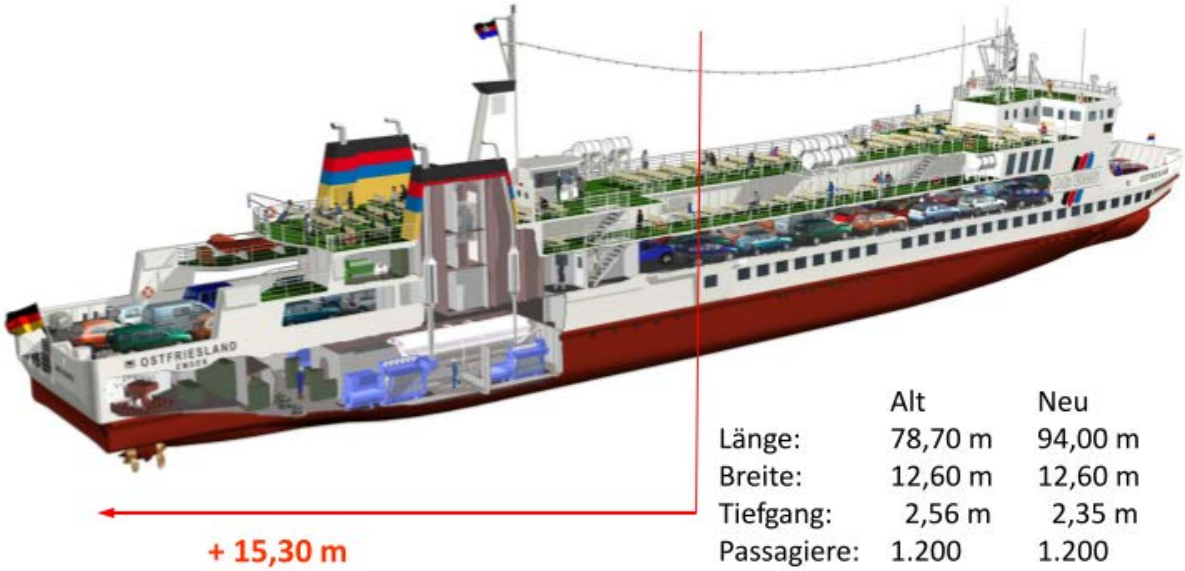


Abbildung 7: Technische Umsetzung des Fährschiff-Umbaus. Das Achterschiff wurde für den neuen LNG-Antrieb komplett erneuert. (Hirsch 2015, Reederei AG EMS)

Herr Hirsch ging außerdem auf die Vorzüge des Liquefied Natural Gas (LNG) gegenüber weiteren Gas-Kraftstoffen ein und verwies dabei auf die hohe Energiedichte. Zur Verfügung gestellt werde das LNG über Bargen oder Tankwagen, die an den großen europäischen Häfen, den HUB's, bedient werden. Zudem würde derzeit eine flächendeckende Logistik für das LNG aufgebaut.

Hintergrund der Umstellung auf den LNG-Betrieb sei die Umweltfreundlichkeit gegenüber der konventionellen Diesel-Antriebe gewesen. Demnach würden im Fährbetrieb die CO_2-Emissionen um 20 % und weitere schädliche Verbindungen wie Schwefel- und Stickoxide nahezu vollständig vermieden. Feinstaubemissionen entfielen bei der Verbrennung von LNG gänzlich. Mit der Modernisierung der Fähre wurden neben der besseren Umweltfreundlichkeit zudem gleichzeitig weitere Vorteile geschaffen wie die Fahrtzeitverkürzung auf der Strecke Emden – Borkum und eine erhöhte Ladedeckkapazität mit mehr Platz für die Fahrgäste und für Gepäckstücke.

In der anschließenden Diskussion betonte Herr Hirsch, dass grundsätzlich auch Bedarf an strombasierten Kraftstoffe bestehe, diese aber in hohem Maße zur Verfügung stehen müssten. Ein Fährschiff benötige immerhin 900 - 1000 t LNG pro Jahr. Dabei seien die Gasmotoren merklich effizienter als Dieselmotoren. Bezüglich Bio-LNG gebe es ferner die Schwierigkeit, dass dieses zunächst weiter aufbereitet werden muss, bevor es für die Motoren eingesetzt werden kann und es derzeit keine Lieferanten gibt.

10. Systemdienlichkeit von PtG-Anlagen

Tobias Block, Erneuerbare Kraftstoffe, Audi AG

Zum Abschluss des Workshops trug Herr Tobias Block zur Systemdienlichkeit von Power-to-Gas Anlagen am Beispiel der Audi e-Gas Anlage in Werlte vor. Der Vortrag ging zunächst auf die Gesetzgebung zur Ermittlung von Umweltwirkungen verschiedener Kraftstoffkonzepte ein. Herr Block wies darauf hin, dass eine Tank-to-Wheel Betrachtung, wie sie heute angewendet wird, der Realität nicht gerecht werde. Bei der Tank-to-Wheel Analyse würden lediglich jene Emissionen betrachtet, die auf dem Weg vom Tank bis zum Antrieb bei der Umsetzung des Kraftstoffes entstehen. Wichtig wäre daher eine ganzheitliche Betrachtung, die von der Herstellung des Fahrzeugs über die Kraftstoffherstellung bis hin zur Nutzung und des Recyclings, den gesamten Lebenszyklus abdeckt.

Abbildung 8: In der derzeitigen Gesetzgebung wird lediglich die Nutzung des Kraftstoffes bei der Ermittlung von Emissionswerten berücksichtig (Tank-to-Wheel). Die Audi AG empfiehlt eine ganzheitliche Betrachtung des Lebenszyklus, da andernfalls strombasierte Kraftstoffe massiv benachteiligt werden. (Block 2015, Audi AG)

Anschließend wurde die Audi e-Gas Anlage in Werlte vorgestellt. Mit regenerativ erzeugtem Strom wird hier mittels alkalischer Elektrolyse und CO_2, welches aus einer nebenstehenden Biogasanlage stammt, in einem Methanisierungsreaktor synthetisches Methan, das e-Gas, hergestellt. Dieses e-Gas entspreche in seiner Qualität dem fossilen Erdgas und kann daher ohne

Restriktionen in das Erdgasnetz eingespeist werden und, je nach Verwendungspfad, für industrielle Prozesse, eine Rückverstromung durch Gaskraftwerke oder als Antrieb für Erdgas-betriebene Fahrzeuge verwendet werden.
Gerade im Mobilitätssektor ergebe sich ein besonders hohes Marktpotential für strombasierte, synthetische Kraftstoffe, da elektrische Antriebe zwar im Schienen- und Individualverkehr Anwendung finden, nicht aber im Langstrecken-, Flug-, Schiffs- und Schwerlastverkehr und auch Biokraftstoffe langfristig nur begrenzt zur Verfügung stehen werden. Ferner würden bei hohen Anteilen erneuerbarer Energien von über 75 % in Zeiten geringer Stromproduktion Backup-Kraftwerke benötigt, die mittels Power-to-Gas die benötigte Leistung zur Verfügung stellen könnten. Unabhängige Studien würden zudem das volkswirtschaftliche Potential des Power-to-Gas Konzeptes zeigen.
Durch die sehr schnelle Anfahrzeit des verwendeten Elektrolyseurs von weniger als fünf Minuten zum Volllastbetrieb würden die Präqualifikationskriterien der Sekundärregelleistung erfüllt. Eine entsprechende Gasqualität mit einem Methananteil von > 90 % werde für eine Einspeisung ins Gasnetz ebenfalls innerhalb von fünf Minuten erreicht. Von technischer Seite seien daher die Weichen für eine erfolgreiche Anwendung gestellt, so dass nun Seitens der Politik entsprechende gesetzliche Änderungen benötigt würden, um einen wirtschaftlichen Betrieb zu ermöglichen. Herr Block nannte hier drei wichtige Stellschrauben, die es schnellstmöglich umzusetzen gelte. Bezüglich der CO_2-Anrechnung müsse von der bisherigen Tank-to-Wheel Betrachtung abgesehen werden, da ohne die Berücksichtigung der Kraftstoffvorkette höhere CO_2-Vermeidungskosten als bei anderen alternativen Antriebskonzepten vorliegen. Es solle daher entweder eine Gleichstellung wie beispielsweise mit der Elektromobilität als Zero Emission Vehicle stattfinden oder alternativ eine exakte Cradle-to-Cradle Lebenszyklusanalyse eingeführt werden. Des Weiteren fordere Audi eine Einordnung von Power-to-Gas Anlagen als „Speicher“ im EnWG anstelle des „Letztverbraucher-Status“, wie es derzeit der Fall sei. Nicht zuletzt müsse zudem eine Gleichstellung von synthetischem Methan mit Biogas im BImSchG erfolgen, damit eine Erfüllung der Treibhausgasminderungsquote möglich sei.
Unter der derzeitigen Gesetzeslage sei ein Betrieb der e-Gas Anlage wirtschaftlich auf keinen Fall möglich. Es könnte also möglich sein, dass, ohne gesetzliche Anpassungen, mit dem Ablauf der Förderung die Anlage stillgelegt werde.

Zusammenfassung und Erkenntnisse für das agentenbasierte Modell

Die Vorträge und Diskussionsrunden haben im Tenor der Teilnehmer vor allem eines gezeigt: Power-to-Fuel ist keine Zukunftsmusik, sondern befindet sich kurz vor dem Scaling up und ansatzweise auch schon in der Umsetzung. Dies beweisen die zahlreichen bereits laufenden Pilotprojekte. Auch branchenübergreifend herrscht ein reges Interesse an dieser vielversprechenden

Transformationsoption. Es gilt nun, den nötigen Rahmen zu schaffen, um P2F in die Energiewende zu integrieren. Im Rahmen der Veranstaltung wurden von den Teilnehmern drei Hauptpunkte genannt, die einer Wirtschaftlichkeit von P2F im Wege stehen und deren Umsetzung für die Geschäftsmodelle der Stakeholder von hoher Bedeutung sind:

1. Es sollte für einen P2F-Betreiber möglich sein, „grünen“ Strom aus dem Netz zu beziehen. Dies ist derzeit nicht möglich, da „grüner“ Strom an der Entnahmestelle definitorisch als „Graustrom“ deklariert wird, um eine doppelte Anrechnung zu vermeiden. Lediglich die direkte Kopplung mit einer Erzeugungsanlage erneuerbarer Elektrizität würde den Bezug von „grünem“ Strom ermöglichen. Da P2F-Anlagen aber letztlich keine Verbraucher sind, sondern die Energie umwandeln, wird hier eine entsprechende Neuregelung gefordert.
2. Der Status eines P2F-Betreibers im EnWG sollte neu definiert werden. Sofern das mittels P2F hergestellte Produkt nicht zur Rückverstromung in dasselbe Netz der Entnahme verwendet wird, gilt die P2F-Anlage unglücklicherweise als Letztverbraucher. Es wird daher eine Neueinordnung als Netzkomponente oder Speicher gefordert, wodurch eine Befreiung von der EEG-Umlage möglich wäre. Eine Einordnung als „stromintensives Unternehmen“, wodurch eine stark reduzierte EEG-Umlage gezahlt werden müsste, ist derzeit ebenfalls nicht in Aussicht. Generell ist allerdings zu klären, wer für die nicht gezahlte Umlage der befreiten Unternehmen aufkommen soll. Momentan ist es so, dass die EEG-Umlage für Letztverbraucher immer teurer wird, was vor allem der Befreiung von immer mehr stromintensiven Unternehmen geschuldet ist.
3. Die EU-Richtlinie zu Biokraftstoffen sollte möglichst schnell in nationales Recht umgesetzt werden. Eine Änderung im BImSchG ist dringend nötig, damit P2F zur Erfüllung der Treibhausgasminderungsquote (ehemals Biokraftstoffquote) anerkannt werden kann. Ohne diesen Status sind strombasierte Kraftstoffe im Markt gegenüber Biokraftstoffen massiv benachteiligt.

Die Teilnehmer gehen davon aus, dass in näherer Zukunft Anpassungen in der Gesetzgebung durchgeführt werden. Für den Erfolg einer staatlichen Umsetzung von förderlichen Maßnahmen plädieren die Betreiber dafür, dass die beteiligten Akteure der Branche mit gemeinsamen Forderungen an einem Strang ziehen. Ein Szenario im agentenbasierten Modell des Projektes RESYSTRA wird die Berücksichtigung möglicher Auswirkungen der hier vorgetragenen veränderten staatlichen Regulierungen aufzeigen, um die sich dadurch eröffnenden neuen Perspektiven für P2F im deutschen Energiesystem ausloten zu können.

In den Wirtschaftlichkeitsberechnungen für modellierte P2F-Betreiber werden auf diese Weise, je nach Szenario, Rechnungen sowohl nach gegenwärtiger Gesetzeslage, als auch nach den als nötig erachteten Anpassungen möglich. Verschiedene Regulierungsoptionen können im Modell flexibel (auch auf der Zeitschiene) gehandhabt werden. Da solche Maßnahmen allerdings nicht

nur direkt die Kosten der Betreiber beeinflussen, sondern auch die Nachfrage nach den hergestellten Produkten, ergeben sich dynamische Änderungen auf den betroffenen Märkten. So könnten beispielsweise die Anerkennung im BImSchG als Biokraftstoff und höhere Preise für EU-Emissionszertifikate die Nachfrage nach Wasserstoff und Methan seitens der Raffinerien und weiterer Industriezweige deutlich erhöhen. Auch die Summe der staatlichen Fördermittel und -projekte wird großen Einfluss auf den Zeitpunkt der Wirtschaftlichkeit von P2F ausüben. Es ist anzunehmen, dass die allgemeinen Investitions- und Betriebskosten bei einer starken Förderung eine stärkere Degression erfahren als wenn die neue Technologie den Marktmechanismen überlassen werden würde. Eine deutliche Botschaft aus dem Workshop für die Modellierer ist außerdem, dass Unternehmen nicht zwangsläufig immer direkt gewinnorientiert in P2F investieren, sondern auch prospektiv handeln und in gewissem Maße (bzw. für eine gewisse Zeit) auch bereit sind Verluste in Kauf zu nehmen, um Techniktrends nicht zu verpassen und auf lange Sicht Vorteile zu erwirtschaften.

Während des Workshops wurde zudem über Akzeptanzaspekte neuer Technologien gesprochen und diese als wichtige Rahmenbedingungen für deren Erfolg identifiziert. So wurde diskutiert, dass bspw. in früheren volkswirtschaftlichen Optimierungsmodellen CCS (Carbon Capture & Storage) als eine effektive Methode zur Reduktion von CO_2-Emissionen ausgemacht wurde, diese bisher allerdings aufgrund von mangelnder Akzeptanz über Pilotprojekte hinaus nicht umgesetzt werden konnte. Die anwesenden Betreiber der P2F-Anlagen haben bisher keine Schwierigkeiten bezüglich gesellschaftlicher Akzeptanz in ihren Projekten erfahren. Andererseits scheint es derzeit für synthetische Treibstoffe im Vergleich zu Biokraftstoffen in Einzelfällen eine höhere Zahlungsbereitschaft zu geben. Dieser und weitere gesellschaftlich mehr oder minder steuerbare Aspekte fließen ebenfalls in das Modell im Sinne einer preisgetriebenen Nachfrage ein. Wie stark die höhere Zahlungsbereitschaft ausfällt und ob die Gesellschaft auch Einfluss auf staatliche Regulierungen nimmt, hängt von der Stärke gesellschaftlicher Einflussnahmen (Gesellschafts-Push) ab. Letztere können bekannter Weise durch Extremereignisse und/oder Skandalisierungskampagnen stark beeinflusst werden.

Aus den Berichten der Projekte der sunfire GmbH, der Audi AG und der MicrobEnergy GmbH/ Viessmann Group wurde deutlich, dass die hergestellten Gase und Flüssigkraftstoffe höchsten Qualitätsansprüchen genügen und dementsprechend problemlos in der bereits vorhandenen Infrastruktur genutzt werden können. Die Anlagen können flexibel betrieben werden und sind in der Regel innerhalb weniger Minuten unter voller Last betriebsbereit. Wie stark sich Lastgradienten auf die Lebensdauer der Elektrolysezellen auswirken, muss allerdings in den noch jungen Projekten weiterhin geklärt werden. Die Effizienz des Gesamtprozesses P2F konnte auf jeden Fall durch optimierte Betriebsabläufe stetig verbessert werden. Durch technische Fortschritte ist – im Sinne einer Lernkurve - zudem mit weiteren Wirkungsgradverbesserungen zu rechnen. Sie werden folglich auch mit einem (behutsam angesetzten) linearen Trend in das Modell einbezogen.

Ein wichtiger nächster Schritt von technischer Seite ist nun ein „Upscaling“ der vorhandenen Technik aus den Pilotprojekten zu industriellen Großanlagen.

Aus den Diskussionen hat sich weiterhin ergeben, dass – mit Blick auf die für synthetische Treibstoffe relevante Verfügbarkeit großer Mengen von CO_2 – die Akteure in absehbarer Zukunft nicht mit CO_2 aus Industrieprozessen zu negativen Preisen rechnen. Auch der im Elektrolyseprozess als weiteres Produkt entstehende Sauerstoff wird nicht als zusätzliche Vermarktungsoption betrachtet, da derzeit das schwierige Handling eine zu große Hürde darstellt. Von hoher Bedeutung werden auf jeden Fall zukünftig zu erwartende Strompreise bzw. Strompreismuster sein. Es wurde von einem Teilnehmer eingebracht, dass auch Stromüberschüsse zu angemessenen Preisen vermarktet werden müssen, da ansonsten die Verbraucher in Zeiten geringerer Produktion mit sehr hohen Preisen dafür aufkommen müssen und Überschüsse in dem Sinne, als dass zu viel Strom produziert werde, eigentlich gar nicht existieren. Wenn es in Zukunft deutlich mehr EE-Erzeugungsanlagen gibt, sollte die generelle Vermarktung der volatilen Erzeugung umstrukturiert werden (Stichwort: Strommarkt 2.0).

Rückblickend kann gesagt werden, dass die vielen Anregungen und Beiträge der Workshop-Teilnehmer äußerst hilfreich waren für das vertiefte Systemverständnis, welches wiederum eine fundamentale Voraussetzung für eine angemessene Modellentwicklung darstellt. Ein besonders wichtiger Punkt, der bei der weiteren Ausgestaltung berücksichtigt wird, besteht darin, dass das Modell, wenn es auch für die auf dem Workshop anwesenden vor allem wirtschaftlichen Akteure hilfreich sein soll, so schlank wie möglich zu gestalten ist und einen klaren Fokus auf betriebswirtschaftliche Kalkulationen für P2F-Betreiber legen muss. Eine zu detaillierte Berücksichtigung vieler äußerer Einflüsse gemäß des Multi-Impulsmodells würde zu einem sehr komplexen System mit großen Unsicherheiten in den Berechnungen führen, wodurch die Ergebnisse tendenziell diffus würden. Gleichwohl werden als entscheidend erachtete systemexterne Einflüsse und Handlungen in das Modell implementiert, mit der Möglichkeit sie nach Bedarf aktivieren und deaktivieren zu können. Auswirkungen von gesellschaftlichen und staatlichen Einflüssen auf die Rahmenbedingungen und die Realisierungsmöglichkeiten der Transformationsoption P2F können so weiterhin durchgespielt werden.

10.4 RESYSTRA Agent-Based Model description

Kasper Kisjes, Christian Schnuelle, Igor Nikolic, Pablo Thier

The model description follows the ODD (Overview, Design concepts, Details) protocol for describing individual- and agent-based models (Grimm et al. 2006 , 2010).

1. Purpose

The model's purpose is to study the uptake 'from niche to market' of power-to-fuel technologies, in a range of fuel markets, given varying market conditions, subsidy regimes and other government policy. It can be used to find the most (cost-)effective paths from the perspective of different stakeholders.

2. Entities, State Variables, and Scales

The model includes Operators, Customers, and Subsidizers as active agent types. Each agent actually represents a whole group of agents, who are together considered as individuals. In addition, the model includes Technology classes, (installed) Technology instances, and Business Cases as passive object types. Figure 1 shows the main agent and object types and how they interrelate. Tables 1-7 list the state variables of the agent and object types. The tables only mention functional state variables, not technical support variables. Those depend on the implementation and can be found in the code itself.

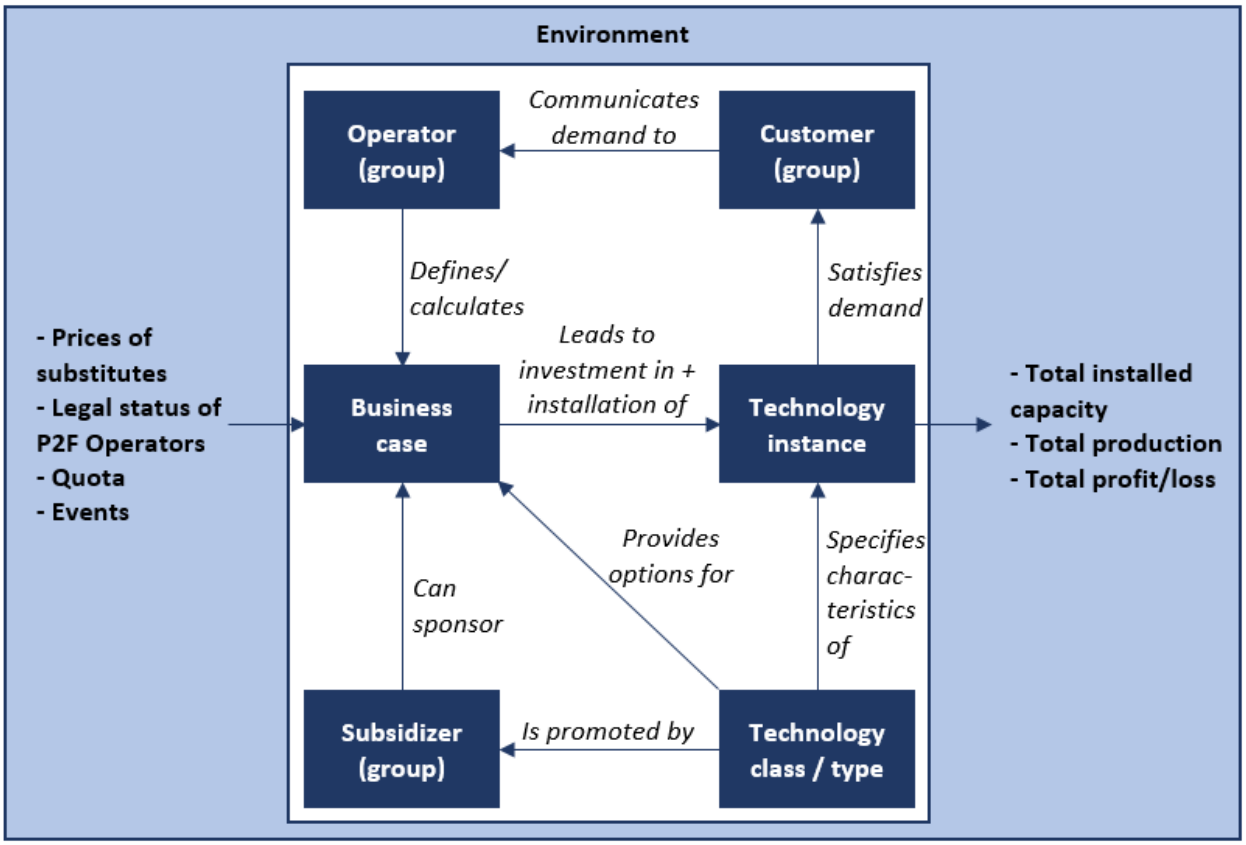


Figure 1: Entity relation diagram

Model time progresses in discrete steps that represent one year each. The temporal scope is typically 20 years, but validity of the model is actually limited in a more logical way: the model can run as long as promotive mechanisms are required for viable investments in P2F technology. In

certain circumstances, the transition from niche to market, when no more subsidies and other instruments are needed, may take place in less than those 20 years. In those cases, the model should stop running at that moment, because at that point other market dynamics (price setting, switching between suppliers, etc.) should get a much bigger role than they now have in the model. The model has no explicit spatial dimensions or aspects, agents are simply shown somewhere in the model dashboard, but do not have any meaningful location.

Environment	
State variable	**Description**
Generic metadata	
Scenario name	As string, e.g. 'Baseline'
Scenario date	As string, e.g. '2016-04-08'
Tick time unit	As string, e.g. 'year'. Ticks are measured in this unit
Operational time unit	As string, e.g. 'hour'. Capacities and production rates are measured in this unit
Time unit scale factor	Number of operational time units in one tick time unit
Currency	As string, e.g. 'euro'
First tick	The first tick value, measured in the tick time unit. E.g. (the year) '2015'
Maximum number of time steps	Tick number after which the simulation will automatically stop
Table that specifies available learning effect types for Operators, and associated measuring units	Multiple types of learning effects are allowed in the model, and they may be expressed in terms of different 'measuring units'
Policy-related	
Individual relative fixed operating cost reduction per year of experience	For individual Operators, the fractional reduction in the fixed part of the operating costs of new installations, per year of experience
Maximum individual fixed operating cost reduction	Limit to the reduction in fixed operating cost
Tax per kWh per legal status of P2F Operators	Table that stores the available legal statuses that P2F Operators might have (now or in the future), and the associated total electricity tax per kWh in each case
Legal status of P2F operators	Currently applicable legal status of P2F Operators
CO2 emission certificate price	In relation to emission trading scheme, the currently applicable price of one ton emission of CO2
Official greenhouse gas reduction potential for biofuel	Assumed reduction potential of biofuel (in relation to subsidies/quota)
Official greenhouse gas reduction potential for P2L	Assumed reduction potential of P2L (in relation to subsidies/quota). Can be over 100% just to stimulate P2F use!
Average utilization of Renewable energy producers	Assumed average utilization of sources of renewable electricity (used to get from capacity to actual output)
Bioquotum for refineries	External quotum for refineries. Biofuels can be replaced by P2L and P2H, that's the main driver for P2F adoption by refineries in the model.
Market-related	

Electricity price	Average price for which Operators can buy their input electricity. Assumptions on the P2F utilization rate and electricity price are strongly interrelated. We're not interested in the average electricity price overall, but instead the average price at the time that P2F installations are actually operated (!)
Electricity price increase per time step	Linear increase of the electricity price (may be negative)
Table with measuring units for all products	Table that specifies the measuring unit for each product type known/used in the input sheet
Table with base prices for all substitute products	Table that specifies initial prices for all substitute products, not yet taking into account the effects of emission certificate trading
Table with development pattern for base prices of substitute products	Table that specifies how those prices change over time, conforming to the logic of Events. The development list specifies: 0) change operator 1) change value 2) first tick 3) last tick
Table with CO2 emissions of substitute products	Table that specifies CO2 emission in ton per unit of a substitute
Table with prices for substitute products, including applicable CO2 emission permit costs	Table that specifies the substitute prices WITH emission certificate trading taken into account
Table with demand sizes of abstract Customer groups	Table that specifies demand sizes of abstract Customer groups
Table with development patterns for those demand sizes	Table that specifies development patterns for those demand sizes, conforming to the logic of Events. The development list specifies: 0) change operator 1) change value 2) first tick 3) last tick
Derived global statistics	
Total installed input capacity	Total input capacity of all installed P2F installations in the model
Total awarded subsidies	Sum of awarded subsidies over all technology types
Total Operator investments	Sum of Operator investments over all Operators and technology types.
Event-related	
Table with events (implemented as Event turtles) with the following fields/attributes: - Event id - Description - First tick - Last tick - Thing that changes - Change type	 - Each event has a unique id, starting at 1 - Description of the event - Tick when the event effect first takes place - Tick when the event effect last takes place. If equal to the first tick, it is a one-time event. Otherwise, it is a change that stretches out over a longer time - Textual description of the model concept that is affected by the event. Is interpreted in the dedicated event updating procedures.

- Change value	- Textual description of what happens to the current value. Can be either 'replace', 'add' or 'multiply'. - The value by which the original value changes, according to the change type. E.g. if type is 'add' and value is '-4', then the original value is decreased by 4.

Operator (=active agent)	
State variable	**Description**
Static state variables	
Operator ID	Unique Operator ID
Group name	Group name of this Operator. There can be multiple Operators in the same group
Base cash inflow per tick	'Income' that adds to the cash balance each time step
Investment threshold table, with per entry: - Technology type (=table key) - investment threshold type - investment threshold horizon	Investment threshold information, with separate entries per technology type. Options: "ROI period" (must earn back) or "Budget" (allow losses) Determines how long the Operator looks ahead in calculations
Renewable energy capacity	Capacity of personal sources of Renewable Energy of this Operator. Measured in kW
Minimum installation size	Smallest input capacity size for Technology instances that this Operator is willing to invest in (some only want big units)
Allowed Customer labels	Not all Operators can deliver to all Customers, and vice versa. The sub-markets have restricted access. The allocation between Operators and Customers is specified in the input file, and stored in this attribute
Dynamic state variables	
Cash balance	Cash balance, measured in main-currency
Chosen Technology type	Chosen Technology type. As soon as the Operator installs a Technology instance of one type, she cannot ever install a Technology instance of a different type
Owned Technology instances	List of pointers to installed Technology instance turtles
Cumulative experience	Cumulative experience with the selected technology type (if any). Starts building up as soon as the Operator installs a Technology. Measured in years * installations. Two installations for one year give the same amount of experience as one installation for two years
Allocated renewable energy production rate	Proportion of Renewable Energy production that is currently allocated as input for one of the installed Technology instances of this Operator
Derived state variables	
Relative discount on fixed operating cost	As a fraction (0-1). Calculated based on cumulative experience
Renewable energy production rate	Production rate of personal sources of Renewable Energy of this Operator. Measured in kW. Calculated based on the global variable for RE utilization

Total input capacity	Sum of the input capacity of the installed Technology instances of this Operator
Current profit per tick	In main-currency per tick-time-unit
Current profit per unit of input	Same but per unit of main input
Total received subsidy	Accumulation of received subsidy over the course of the model run (= a custom statistic)
Total invested money	Accumulation of invested money over the course of the model run (= a custom statistic)
Total amount produced	Accumulation of total amount of output product produced by installed technology instances of this Operator, over the course of the model run (= a custom statistic)

Customer (=active agent)	
State variable	**Description**
Static state variables	
Customer id	Unique Customer ID
Group name	Customer group name
Demanded product types list	Customers want to buy a specific type of Product, or maybe several ones that they consider just as good
Substitute product type	The substitute product determines the price that Customers are willing to pay
Willingness-to-pay fraction	Fraction of the price that Customers are willing to pay for the novel (demanded) product, in addition to the price of the substitute product itself
Parent group	Demand sizes are administered in 'parent customer groups'. For each Customer we need to know what group they're part of to know how much they can buy
Fraction of parent group	Demand sizes are administered in 'parent customer groups'. For each Customer we need to know what fraction of their group they represent, to know how much they can buy
Quotum fraction development over time	Development trend in the quotum fraction (might be linear or exponential). Four items: change operator, change value, first tick, last tick (same logic as for Events)
Mixing rate increase per time step	We allow for a standard linear pattern in the mixing rate, represented by this attribute
Dynamic state variables	
Mixing rate	The mixing rate allows for the possibility that the novel product is bought together with the substitute product, in a certain mixing proportion
Quotum fraction	Maximum fraction of its total demand that the Customer wants (or has) to fulfill with the novel product. Restricts total demand
Derived state variables	
Potential demand per tick	This just stores the parent group size multiplied by the fraction that this Customer represents
Actual demand per tick	This stores the potential demand multiplied by the quotum fraction

Maximum unit price (with mixing)	Maximum price that the customer is willing to pay for the novel product, given price leverage effects from mixing with the substitute
Assigned demand per tick	This is the part of the demand that is actually being fulfilled by actual production by an Operator (and cannot be fulfilled again)
Latent demand per tick (with mixing)	This is the remaining part, so the part of the demand that has yet to be fulfilled by actual production by an Operator

Subsidizer (=active agent)	
State variable	**Description**
Static state variables	
Subsidizer id	Unique id per Subsidizer
Subsidized technology (output) type	Each Subsidizer sponsors a specific output product, which may be produced by various Technology types
Available subsidy increase per time step	In main-currency per tick
Dynamic state variables	
Currently available subsidy	In main-currency
Received subsidy requests list	List of pointers to Business-case turtles relevant for this Subsidizer, so it knows what has to be evaluated
Derived state variables	
Total awarded subsidy	In main-currency

Technology class (=passive object) *(* = shared attribute with Technology instance)*	
State variable	**Description**
Static state variables	
Technology class id*	Unique id per Technology class
Technology name*	Name of this technology (can be defined very broadly or very specifically based on the project)
Main input type*	Name of the main input product of this technology. Must be an item in the global Products list
Main input measuring unit*	Measuring unit associated with the main input product
Main output type*	Name of the main output product of this technology. Must be an item in the global Products list
Main output measuring unit*	Measuring unit associated with the main output product
Average utilization rate*	Average utilization rate of the technology, i.e. the production rate as a fraction of the capacity
Capacity options list	List of possible input capacities for this technology type
Initial relative investment cost	Relative investment cost at the beginning of the run. Used to calculate learning effects
Initial relative yearly operating cost	Yearly operating cost, expressed as fraction of the initial investment cost
Initial conversion rate	Conversion rate at the beginning of the run. Used to calculate learning effects
Investment cost learning effect rule	Learning effect rule for investment costs. 0) learning effect type 1) relative effect 2) limit value

Efficiency learning effect rule	Learning effect rule for the conversion rate. 0) learning effect type 1) relative effect 2) limit value
Total pre-existing input capacity	Assumed external capacity (outside the model). Important for global learning effects
Dynamic state variables	
Conversion rate*	Conversion rate, i.e. the output rate relative to the input rate, measured in unit of main output per unit of main input
Relative scaling discount for relative investment cost*	A relative discount on investment costs (as fraction) per unit of input capacity
Relative scaling discount for relative fixed operating cost*	A relative discount on operating costs (as fraction) per unit of input capacity
Derived state variables	
Relative investment cost*	Current investment cost for new installations of this technology, per unit of input capacity. Measured in main-currency per unit of input capacity
Relative fixed operating cost*	Fixed operating cost per tick time unit, relative to total investment cost
Total amount produced*	Accumulated statistic that keeps track of the total amount produced for this technology class
Number installed in model	Number that keeps track of how many installations of this type are installed in the model
Total input capacity in model	Sum of the capacity of installed technology instances of this type in the model
Total output rate per time step	Sum of the output rate of installed technology instances of this type in the model
Lowest established unit price	Lowest established unit price of installed technology instances of this type in the model
Highest established unit price	Highest established unit price of installed technology instances of this type in the model
Most recently established unit price	Most recent established unit price of installed technology instances of this type in the model
Average established operational profit per unit of input	Average profit per unit of input capacity for all active Technology instances of this type

Technology instance (=passive object) *(* = shared attribute with Technology class)*	
State variable	**Description**
Static state variables	
Technology class id*	Unique id per Technology class
Technology name*	Name of this technology (can be defined very broadly or very specifically based on the project)
Main input type*	Name of the main input product of this technology. Must be an item in the global Products list
Main input measuring unit*	Measuring unit associated with the main input product
Main output type*	Name of the main output product of this technology. Must be an item in the global Products list
Main output measuring unit*	Measuring unit associated with the main output product

Average utilization rate*	Average utilization rate of the technology, i.e. the production rate as a fraction of the capacity
Technology instance id	Unique technology instance id
Owning Operator	Pointer to the owning Operator of this Technology instance
Installation time step	This variable stores when the Technology instance was installed
Input capacity	Input capacity of this Technology instance, in unit of main input per operational-time-unit
Total investment cost	Total investment cost of this Technology instance
Established unit price	Established unit price for this Technology instance, in main currency per unit of main output. Price is established when evaluating Business cases
Allocated local renewable energy production rate	If applicable, the amount of the Renewable Energy production of the owning Operator that was allocated to this Technology instance
Dynamic state variables	
Conversion rate*	Conversion rate, i.e. the output rate relative to the input rate, measured in unit of main output per unit of main input
Relative scaling discount for relative investment cost*	A relative discount on investment costs (as fraction) per unit of input capacity
Relative scaling discount for relative fixed operating cost*	A relative discount on operating costs (as fraction) per unit of input capacity
Derived state variables	
Relative investment cost*	Current investment cost for new installations of this technology, per unit of input capacity. Measured in main-currency per unit of input capacity
Relative fixed operating cost*	Fixed operating cost per tick time unit, relative to total investment cost
Total amount produced*	Accumulated statistic that keeps track of the total amount produced for this technology instance
Input rate	Input rate of this Technology instance, in unit of main input per operational-time-unit
Output rate	Output rate of this Technology instance, in unit of main output per operational-time-unit
Input rate per time step	Input rate of this Technology instance, in unit of main input per tick-time-unit
Output rate per time step	Output rate of this Technology instance, in unit of main output per tick-time-unit
Total operating cost per time step	Current operating cost per tick, including costs of input products
Total operating cost per output unit	Current operating cost per unit of main output, including costs of input products
Total revenue per tick	Current revenue per tick from this Technology instance, in main-currency per tick-time-unit
Variable operating cost except costs of input	Current variable operating cost except costs of input, measured per unit of main output

Operational profit per time step	Current difference between revenue and operating cost
Operational profit per unit of input	Same but now per unit of input capacity

Business case (=passive object)	
State variable	**Description**
Static state variables	
Operator	Pointer to the Operator that constructed this Business case
Technology class name	Name of the Technology that this Business case applies to
Input capacity	Input capacity that this Business case applies to
Approved by Subsidizer?	Stores whether this Business case was approved by the Subsidizer
Approved by Operator?	Stores whether this Business case was chosen by the Operator (for the rare cases when the Operator gets to choose between approved business cases for different Technologies)
Established unit price (if selected)	If selected for installation, this attribute stores what the established unit price was in the allocation process
Actual awarded subsidy (if selected)	If selected for installation, this attribute stores the subsidy that was assigned to this business case
Dynamic state variables	
(temporary) minimum subsidy given current evaluation price per unit	Technical attribute to temporarily store the required subsidy, given the evaluation price at a certain point in the allocation process
Derived state variables	
Technology's main output type	Main output type of that Technology
Operator's id	Operator ID of that Operator. Serves to restore the pointer connection when restoring a model state
Operator's threshold type	Threshold type (see Operator)
Operator's threshold horizon	Horizon (see Operator)
Operator's cash balance	Cash-balance (see Operator)
Operator's unallocated cash inflow per time step	Unallocated cash inflow per tick of Operator. Relates to the amount of loss that the Operator is willing/able to make (see Operator)
Operator's relative discount on fixed operating cost	Applicable discount on fixed operating cost (see Operator)
Operator's allowed Customer labels list	Based on the Operator/Customer allocation matrix. Not all Operators can serve to all Customers (and vice versa)
Operating cost per time step	Resulting operating cost per tick
Total operating cost over horizon	Total operating cost over the whole horizon
Initial investment	Required up-front investment for this Business case
Actual output rate	Output rate associated with the input capacity
Actual output rate per time step	Output rate per tick

Minimum required subsidy	The minimum required subsidy can be determined either by the gap to cover the investment cost, or by the total losses made in the period (or a combination)
Minimum required unit price	If investment type is 'ROI', the Operator will not allow a structural loss on the operation. That means that the unit price needs to be enough to cover daily operation
Minimum required combined income (subsidy+revenue) over horizon	Calculated as initial-investment + total-operating-cost. If threshold type is budget, the unallocated cash flow can be subtracted from this, reducing required income (i.e. the Operator is willing to make a certain loss)

3. Process overview and scheduling

Table 8 lists the main model procedures that iterate as long as no end condition is reached. The model is completely deterministic (given a set of input parameters, the result is always the same). Whenever applicable, agents are processed in order of their unique ID (this has some, but negligible, influence on the allocation of new production volume and no influence elsewhere). All competition-like interactions (e.g. who gets awarded subsidy) are resolved deterministically based on a multi-criteria approach (see section 4), and initiative within the scope of a time step (who gets to do something first) plays no role at all.

Main model procedures – these iterate as long as end condition is not reached			
#	**Procedure**	**Related agents and objects**	**Description**
0	If not initialized: initialize	All types	Read in all input variables. Initialization is described in more detail in section 5.
1	Process learning	Operator, Technology class	Operators update their experience level and calculate the newly applicable reduction in fixed operating costs. Technology classes update collective learning effects, leading to reduced investment costs and improved conversion rates
2	Implement selected Business Cases	Operator, Subsidizer, Business Case, Technology instance	Implementing a selected Business Case means that the Operator receives the specified subsidy from the Subsidizer, and the associated Technology is installed as a new object instance in the model. The additional production rate is assigned to the highest paying Customer(s). After this, all Business Cases become inactive.
3	Update market variables	Environment	Update market prices, process CO2 emission certificate prices, and update abstract market demand sizes
4	Update scenario variables	Environment	Process Events: if the current time step is between the first and last time step specified for the Event, process the model change that the Event describes
5	Process subsidy inflows	Subsidizer	Add subsidy inflows to the current available subsidy of each Subsidizer

6	Update Customer dynamic variables	Customer	Update mixing rates, quotum fractions, potential and actual demand, and reservation price (willingness to pay)
7	Update and process operational money flows	Operator, Technology instance	Update current profit of Operators, based on their owned Technologies, then add profit and base income to their cash balance
8	Make new Business Cases	Operator, Business Case	Operators calculate Business Cases for all Technology types and input capacities that they're allowed to invest in. For every such combination, they calculate total investment and operating costs over the investment horizon, compare it to the money they are willing to lose, and conclude with a minimum amount of money that they need as combined revenue (subsidy + sales). At this point, the equilibrium price of the product for this time step is not yet known!
9	Select viable Business Cases	Subsidizer, Operator	Each Subsidizer constructs a demand curve for its supported Technology type, based on all Customers that are willing to buy it. It then traverses the demand curve. At each price point (and associated demand size), they: 1. Calculate how much subsidy each Business Case (for their Technology type) would require to meet the specified minimum amount of combined income 2. Sort those Business Cases based on the ratio 'input capacity / required subsidy' 3. Determine the total newly realized input capacity, assuming that the Business Cases get awarded subsidy in that order, as long as their total subsidy budget allows it. Then the Subsidizer determines at what price point the total newly realized input capacity is maximized, and marks the associated Business Cases as 'approved'. Finally, Operators need to check whether multiple of their Business Cases were approved, for then they are only allowed to choose one.
10	Technical stuff	Observer	Update reporter variables, store model state (so it can later be restored for inspection), update charts, update time slider
11	If end condition is met: finish run	Observer	At the end of the run, there's some more technical stuff that includes writing all results to an output file

4. Design Concepts

Basic principles and assumptions

The model focuses on *investment decisions in* (or the *adoption pattern of*) *innovative technologies* that are *not yet profitable without subsidies, quotas and other government instruments*. The model explicitly is not suited for technologies that are already profitable by themselves, as market dynamics in the model are too limited to represent dynamic allocation of supply and demand in a realistic way.

Other central assumptions in the model include:

- Operational management of technology instances, once installed, is out of scope for the model. This implicates the following:
  - Properties of technology instances never change
  - Allocated production volume to Customers never changes
  - There are no price renegotiations
  - The utilization rate of technology instances remains constant for its entire lifetime (which is infinite)
  - The only exception here is that operating costs may change due to (externally) fluctuating electricity and CO2 prices.
- Customer demand for synthetic fuels may only increase over time, or stay constant. The model contains no logic to deal with declining customer demand (which might lead to unallocated production).
- A crucial assumption is that Operators will actually invest, given that there's subsidy available.
- New technology instances can only be installed if there is enough demand for its full production volume, although production may be split up between various Customers. Operators cannot just sell part of their production capacity (given utilization rate): it is all or nothing.
- Operators must start without any owned Technology instances at the start of the model. However, they may start with some previously built-up experience.
- Effective customer demand may be limited by quota. If it is, then only part of its potential demand ‘counts’ within model interactions: the other part is not considered at all. Alternatively (or in addition), Customers may have a relative willingness to pay that indicates how much more they are willing to pay, compared to the specified substitute product type. Quota-based customers typically compare prices to other products that count towards meeting the quota (e.g. biofuels), while ‘green’ or strategically behaving customers typically compare to the price of a more conventional substitute type (e.g. conventional petrol gas)

- We impose a limit on the number of technology instances of the same capacity that Operators may install. Once they have installed 2 technologies of the smallest available capacity, for the third one they have to scale up to the next capacity option (except if they're already at the highest available capacity…)
- The model allows two types of investment thresholds for Operators: 'Budget' and 'ROI'.
    - 'Budget' means that they are willing to lose a certain amount of money, consistent with available funds and cash inflow for investment purposes
    - 'ROI' means that they have to earn back their investment within the specified horizon
- The model includes logic to allow tax discounts for Operators that produce their own (renewable) energy. Like P2F technology, RE production involves a certain utilization rate, and we need to keep track of how much of the RE capacity is already allocated to P2F technology instances, to avoid double-counting of discounts. The model assumes that the RE capacity is first multiplied by a specific RE utilization rate. Then the Operator knows its production rate. That production rate can then be assigned to P2F technologies. In reality, P2F utilization may be low if it only operates at times when electricity prices are very low. Those are typically the times when above-average production capacity would be available from private RE installations (excess electricity). But the model just assumed a constant production rate for private RE, as only the total amount of electricity produced in one time step is of interest.
- The model includes the option of mixing P2F fuels with conventional products, to leverage price at the cost of pure P2F sales volume. The mixing rate may vary per Customer, and may be subject to a linear change pattern over time.

<u>Sensing + prediction</u>

The model assumes full transparency on technology properties, prices of substitutes and reservation prices. Agents thus have complete knowledge of the current state of the world. Still, a clear limit to their rationality is that they sense the world as-is, and are not able to take observed patterns and trends into account in their reasoning. Their predictions (specifically on profitability) are therefore based exclusively on the current state of the world.

<u>Objectives</u>

All three active agent types operate from implicit objectives. For Customers, the (implicit) objective is to procure their required fuels from the market as cheap as possible, taking into account any applicable bonuses for certain product types. For Operators, the objective is to install a new technology instance whenever possible, but without making unacceptable losses. For Subsidizers, the objective is to maximize the installed capacity of their championed technology type, within the bounds of their available funds.

Rationality

Calculations and choices of Operators and Customers extend beyond just money-oriented reasoning: both Operators and Customers may have ‘non-rational’ preferences for different types of products, even if those would fulfill the same goals or needs. For Operators, these preferences are captured through heterogeneously parameterized investment threshold values. For Customers, their preference for (or aversion of) is captured by their relative willingness to pay, which comes into play when comparing prices with those of substitute products.

Learning + Emergence

Learning is a central mechanic in the model, although not in the evolutionary sense of adapting to circumstances, but rather in the sense of building up experience and thereby gaining advantages. For individual Operators, more experience means that new installations can be operated more cheaply, as some pitfalls can be avoided. Operating costs of existing installations do not change. The benefit is only related to fixed operating costs, not to variable operating costs. For technology classes in general, more collective experience (by all Operators) leads to lower investment costs (for all Operators) and a better conversion rate. These collective learning effects represent a main emerging property of the system, together with the total installed capacity of power-to-fuel technology.

Interaction

The interactions taking place in the model can be extracted from figure 1 (section 2). In summary, Customers communicate their demand to Operators, Operators communicate Business Cases to Subsidizers, Subsidizers award some Business cases, giving money to Operators to install the associated Technology. The new production volume is allocated to the highest paying Customer and assumed to be continued to be sold at that price to that Customer for the whole model run. The model does not involve any direct competition: when new production becomes available at a lower price, it does not interfere with already allocated demand: such price wars are outside the scope of this model.

Stochasticity

The model involves no stochasticity at all. Agents are always processed in the same sequence. For any case that might involve ties (e.g. between two Business Cases of which only one can be awarded money), the model includes rules to resolve those ties. Input variables are always exact and never specify a probabilistic distribution. Location-related stochasticity (where do agents start in the model, and where do they move towards) is not present in the model. The complete lack of stochasticity has a major advantage, as it means that we only have to run any model setup once, and can observe the model evolve deterministically based on our set of rules. Re-running the model gives exactly the same results. This makes the model a great tool to use in real-life demo situations with stakeholders.

Observation

The model is set up such that we record the full model state (i.e. the current value of all state variables) at every time step, and log those to an output file. However, some output variables are clearly more important than others. Among the most important observations would be the total installed capacity per technology type, as well as the investment costs and conversion rate at the end of a run. Also, we keep track of total production volume per technology type. Finally, since the model has economic focus, we track profitability of technology instances, which in turn allows some observation on the profitability of technology classes and Operators.

5. Initialization

Model initialization involves no more than reading in all information from the input text file, then either storing the information in global state variables, or generating agent and object instances with the specified state variable values, depending on the type of information. As soon as everything has been read in, the model is ready to run.

Table 9 lists parameter values for the basis scenario. These values represent the initial values, which may change over time due to imposed development patterns, Events and model dynamics.

Environment	
State variable	**Initial value**
Generic metadata	
Scenario name	Basis scenario
Scenario date	*<date when input file is generated>*
Tick time unit	Year
Operational time unit	Hour
Time unit scale factor	8760
Currency	Euro
First tick	2015
Maximum number of time steps	20 Years
Table that specifies available learning effect types for Operators, and associated measuring units	Capacity doubling (measuring unit: fraction) *Explanation: with every capacity doubling, the value of interest reduces by the specified fraction* Linear per tick (measuring unit: applicable unit / Year)
Policy-related	
Individual relative fixed operating cost reduction per year of experience (Ref 13-14)	2%
Maximum individual fixed operating cost reduction (Ref 13-14)	20%
Tax per kWh per legal status of P2F Operators (Ref 20-21)	End Consumer: 0.1306 Euro/kWh Energy-Intensive Industry: 0.0765 Euro/kWh Storage: 0.0665 Euro/kWh

	Locally produced electricity (any legal status): 0.0254 Euro/kWh
Legal status of P2F operators	End Consumer
CO2 emission certificate price (Ref 22-25)	6.5 Euro / ton
Official greenhouse gas reduction potential for biofuel (Ref 26)	60%
Official greenhouse gas reduction potential for P2L (Ref 27)	0%
Average utilization of Renewable energy producers (Ref 28)	22%
Bioquotum for refineries (Ref 29)	6%
Market-related	
Electricity price (Ref 15-19)	0.02 Euro/kWh
Electricity price increase per time step	0.0 Euro/kWh
Table with measuring units for all products	List of Products: Electricity, Hydrogen, Methane, Liquid, CO2 *See Appendix for full table*
Table with base prices for all substitute products (Ref 1-4)	List of substitute products: Private conventional gas, Industrial conventional gas, Conventional oil, Fossil-based H2, Conventional mobility H2, Biodiesel, Biogas, Biopetrol *See Appendix for full table*
Table with development pattern for base prices of substitute products (Ref 5-6)	*See Appendix for full table*
Table with CO2 emissions of substitute products (Ref 7)	*See Appendix for full table*
Table with prices for substitute products, including applicable CO2 emission permit costs	*<calculated by model>*
Table with demand sizes of abstract Customer groups (Ref 8-12)	List of Customer groups: Industrial gas, Mobility gas, Private gas, Industrial H2, Fuelcell mobility, Industrial oil from refinery, Mobility oil from refinery, Private oil from refinery, Refinery oil *See Appendix for full table*
Table with development patterns for those demand sizes	*See Appendix for full table*
Derived global statistics	
Total installed input capacity	0
Total awarded subsidies	0
Total Operator investments	0
Event-related	

Table with events (implemented as Event turtles) with the following fields/attributes: - Event id - Description - First tick - Last tick - Thing that changes - Change type - Change value	List of Events: Storage status for Operators, CO2 ETS reformed, CO2 certificate scarcity, Higher P2L GHG reduction potential, Subsidy decrease *See Appendix for full table*

Operator (=active agent) (table 1 of 3)				
State variable	**Initial value**			
Static state variables				
Operator ID	*<automatic>*	*<automatic>*	*<automatic>*	*<automatic>*
Group name	Progressive Car Manufacturers	Conservative Car Manufacturers	Progressive Industry	Conservative Industry
Base cash inflow per tick	500k Euro	500k Euro	500k Euro	300k Euro
Investment threshold table, with per entry: - Technology type (=table key) - investment threshold type - investment threshold horizon	All Techs 'Budget' type 5 years	All Techs 'ROI' type 4 years	All Techs 'Budget' type 5 years	All Techs 'ROI' type 4 years
Renewable energy capacity	N/A	N/A	N/A	N/A
Minimum installation size	1 MW	20 MW	1 MW	20 MW
Allowed Customer labels	Green car drivers, fuelcell mobilists, gas-based car industry, liquid-based car industry		Green H2 industry, Green gas industry, Green liquid industry, Common industrial gas, Common industrial liquid	
Dynamic state variables				
Cash balance	15M Euro	30M Euro	15M Euro	30M Euro
Chosen Technology type	N/A	N/A	N/A	N/A
Owned Technology instances	*(empty set)*	*(empty set)*	*(empty set)*	*(empty set)*
Cumulative experience	0	0	0	0
Allocated renewable energy production rate	0	0	0	0
Derived state variables				
Relative discount on fixed operating cost	*<calculated by model>*			
Renewable energy production rate	*<calculated by model>*			
Total input capacity	*<calculated by model>*			
Current profit per tick	*<calculated by model>*			
Current profit per unit of input	*<calculated by model>*			

Total received subsidy	*<calculated by model>*
Total invested money	*<calculated by model>*
Total amount produced	*<calculated by model>*

Operator (=active agent) (table 2 of 3)				
State variable	**Initial value**			
Static state variables				
Operator ID	*<automatic>*	*<automatic>*	*<automatic>*	*<automatic>*
Group name	Strategic P2F Investors	Big Wind Park Owner	Small Wind Park Owner	Electricity Provider
Base cash inflow per tick	300k Euro	500k Euro	200k Euro	300k Euro
Investment threshold table, with per entry: - Technology type (=table key) - investment threshold type - investment threshold horizon	All Techs 'Budget' type 5 years	All Techs 'ROI' type 4 years	All Techs 'ROI' type 4 years	All Techs 'ROI' type 4 years
Renewable energy capacity	N/A	50 MW	20 MW	N/A
Minimum installation size	1 MW	5 MW	1 MW	20 MW
Allowed Customer labels	(list of all customers except refineries)			
Dynamic state variables				
Cash balance	5M Euro	10M Euro	2M Euro	7M Euro
Chosen Technology type	N/A	N/A	N/A	N/A
Owned Technology instances	*(empty set)*	*(empty set)*	*(empty set)*	*(empty set)*
Cumulative experience	0	0	0	0
Allocated renewable energy production rate	0	0	0	0
Derived state variables				
Relative discount on fixed operating cost	*<calculated by model>*			
Renewable energy production rate	*<calculated by model>*			
Total input capacity	*<calculated by model>*			
Current profit per tick	*<calculated by model>*			
Current profit per unit of input	*<calculated by model>*			
Total received subsidy	*<calculated by model>*			
Total invested money	*<calculated by model>*			
Total amount produced	*<calculated by model>*			

Operator (=active agent) (table 3 of 3)				
State variable	**Initial value**			
Static state variables				
Operator ID	*<automatic>*	*<automatic>*	*<automatic>*	*<automatic>*
Group name	Refinery (hydrogen investments)	Refinery (Liquid investments)	Progressive Gas Provider	Conservative Gas Provider

Base cash inflow per tick	1M Euro	500k Euro	500k Euro	1M Euro
Investment threshold table, with per entry: - Technology type (=table key) - investment threshold type - investment threshold horizon	P2H 'Budget' type 5 years	P2L 'Budget' type 5 years	P2H/P2M 'Budget' type 5 years	P2H/P2M 'ROI' type 4 years
Renewable energy capacity	N/A	N/A	N/A	N/A
Minimum installation size	20 MW	5 MW	1 MW	20 MW
Allowed Customer labels	H2 oil refineries	Liquid oil refineries	Green households, green+ households	
Dynamic state variables				
Cash balance	35M Euro	10M Euro	2M Euro	10M Euro
Chosen Technology type	N/A	N/A	N/A	N/A
Owned Technology instances	*(empty set)*	*(empty set)*	*(empty set)*	*(empty set)*
Cumulative experience	0	0	0	0
Allocated renewable energy production rate	0	0	0	0
Derived state variables				
Relative discount on fixed operating cost	*<calculated by model>*			
Renewable energy production rate	*<calculated by model>*			
Total input capacity	*<calculated by model>*			
Current profit per tick	*<calculated by model>*			
Current profit per unit of input	*<calculated by model>*			
Total received subsidy	*<calculated by model>*			
Total invested money	*<calculated by model>*			
Total amount produced	*<calculated by model>*			

Customer (=active agent) (table 1 of 4)				
State variable	**Initial value**			
Static state variables				
Customer id	*<automatic>*	*<automatic>*	*<automatic>*	*<automatic>*
Group name	Green households	Green+ households	Green car drivers	Fuelcell mobilists
Demanded product types list	Hydrogen, methane		Methane, liquid	Hydrogen
Substitute product type	Private conventional gas		Conventional oil	Fossil-based H2
Willingness-to-pay fraction	10%	20%	15%	10%
Parent group	Private gas		Mobility oil	Fuelcell mobility
Fraction of parent group	1%	0.15%	1%	50%
Quotum fraction development over time	N/A	N/A	N/A	N/A

Mixing rate increase per time step	+1% (linear, absolute)	+1% (linear, absolute)	+1% (linear, absolute)	+1% (linear, absolute)
Dynamic state variables				
Mixing rate	2%	3%	2%	50%
Quotum fraction	100% (=N/A)	100% (=N/A)	100% (=N/A)	100% (=N/A)
Derived state variables				
Potential demand per tick	*<calculated by model>*			
Actual demand per tick	*<calculated by model>*			
Maximum unit price (with mixing)	*<calculated by model>*			
Assigned demand per tick	*<calculated by model>*			
Latent demand per tick (with mixing)	*<calculated by model>*			

Customer (=active agent) (table 2 of 4)				
State variable	**Initial value**			
Static state variables				
Customer id	*<automatic>*	*<automatic>*	*<automatic>*	*<automatic>*
Group name	Green H2 Industry	Green gas industry	Green liquid industry	H2-oriented oil refineries
Demanded product types list	Hydrogen	Hydrogen, methane	Liquid	Hydrogen
Substitute product type	Industrial conventional gas	Conventional oil	Biodiesel	Biodiesel
Willingness-to-pay fraction	5%	5%	5%	20%
Parent group	Industrial H2	Industrial gas	Industrial oil from refinery	Refinery oil
Fraction of parent group	2%	2%	2%	100%
Quotum fraction development over time	N/A	N/A	N/A	+1% (linear, absolute)
Mixing rate increase per time step	+1% (linear, absolute)	+1% (linear, absolute)	+1% (linear, absolute)	0%
Dynamic state variables				
Mixing rate	2%	2%	2%	100% (=N/A)
Quotum fraction	100% (=N/A)	100% (=N/A)	100% (=N/A)	6%
Derived state variables				
Potential demand per tick	*<calculated by model>*			
Actual demand per tick	*<calculated by model>*			
Maximum unit price (with mixing)	*<calculated by model>*			
Assigned demand per tick	*<calculated by model>*			
Latent demand per tick (with mixing)	*<calculated by model>*			

Customer (=active agent) (table 3 of 4)	
State variable	**Initial value**

Static state variables				
Customer id	*<automatic>*	*<automatic>*	*<automatic>*	*<automatic>*
Group name	Liquid-oriented oil refineries	Gas-based car industry	Liquid-based car industry	Aviation industry
Demanded product types list	Liquid	Methane	Liquid	Liquid
Substitute product type	Biodiesel	Biogas	Biodiesel	Biokerosine
Willingness-to-pay fraction	20%	10%	10%	10%
Parent group	Refinery oil	Mobility gas	Mobility oil from refinery	Mobility oil from refinery
Fraction of parent group	100%	100%	90%	1%
Quotum fraction development over time	+1% (linear, absolute)	+1% (linear, absolute)	+1% (linear, absolute)	+0%
Mixing rate increase per time step	0%	0%	0%	0%
Dynamic state variables				
Mixing rate	100% (=N/A)	100% (=N/A)	100% (=N/A)	100% (=N/A)
Quotum fraction	6%	1%	1%	0%
Derived state variables				
Potential demand per tick	*<calculated by model>*			
Actual demand per tick	*<calculated by model>*			
Maximum unit price (with mixing)	*<calculated by model>*			
Assigned demand per tick	*<calculated by model>*			
Latent demand per tick (with mixing)	*<calculated by model>*			

Customer (=active agent) (table 4 of 4)		
State variable	**Initial value**	
Static state variables		
Customer id	*<automatic>*	*<automatic>*
Group name	Common industrial gas	Common industrial liquid
Demanded product types list	Hydrogen, methane	Liquid
Substitute product type	Industrial conventional gas	Conventional oil
Willingness-to-pay fraction	0%	0%
Parent group	Industrial gas	Industrial oil from refinery
Fraction of parent group	95%	98%
Quotum fraction development over time	+0%	+0%
Mixing rate increase per time step	+1% (linear, absolute)	+1% (linear, absolute)
Dynamic state variables		

Mixing rate	10%	10%
Quotum fraction	0%	0%
Derived state variables		
Potential demand per tick	*<calculated by model>*	
Actual demand per tick	*<calculated by model>*	
Maximum unit price (with mixing)	*<calculated by model>*	
Assigned demand per tick	*<calculated by model>*	
Latent demand per tick (with mixing)	*<calculated by model>*	

Subsidizer (=active agent)			
State variable	**Initial value**		
Static state variables			
Subsidizer id	*<automatic>*	*<automatic>*	*<automatic>*
Subsidized technology (output) type	P2H	P2M	P2L
Available subsidy increase per time step	3M Euro	3M Euro	2M Euro
Dynamic state variables			
Currently available subsidy	0M Euro	0M Euro	0M Euro
Received subsidy requests list	*(empty set)*	*(empty set)*	*(empty set)*
Derived state variables			
Total awarded subsidy	*<calculated by model>*		

Technology class (=passive object) *(* = shared attribute with Technology instance)*			
State variable	**Initial value**		
Static state variables			
Technology class id	*<automatic>*	*<automatic>*	*<automatic>*
Technology name	P2H	P2M	P2L
Main input type	Electricity	Electricity	Electricity
Main input measuring unit	kWh	kWh	kWh
Main output type	Hydrogen	Methane	Liquid
Main output measuring unit	kWh	kWh	kWh
Average utilization rate	34%	34%	34%
Capacity options list	1 / 5 / 20 / 100 MW (electricity input capacity)		
Initial relative investment cost (Ref 34-39)	1500 Euro / kW	3000 Euro / kW	3500 Euro / kW
Initial relative yearly operating cost	4% of investment cost	4% of investment cost	4% of investment cost
Initial conversion rate (Ref 30-35)	65%	55%	50%
Investment cost learning effect rule (Ref 34-39)	20% decrease with each capac-	20% decrease with each capac-	20% decrease with each capacity doubling. Lower limit 1000 Euro / kW

	ity doubling. Lower limit 520 Euro / kW	ity doubling. Lower limit 1000 Euro / kW	
Efficiency learning effect rule (Ref 30-35)	1% increase linear per year. Max efficiency 70%	1% increase linear per year. Max efficiency 65%	1% increase linear per year. Max efficiency 65%
Total pre-existing input capacity	12 MW	8 MW	1 MW
Dynamic state variables			
Conversion rate	*<calculated by model based on initial conversion rate and total installed input capacity>*		
Relative scaling discount for relative investment cost (Ref 34-39)	Linear up to 25% discount for 100 MW	Linear up to 25% discount for 100 MW	Linear up to 25% discount for 100 MW
Relative scaling discount for relative fixed operating cost	Linear up to 25% discount for 100 MW	Linear up to 25% discount for 100 MW	Linear up to 25% discount for 100 MW
Derived state variables			
Relative investment cost	*<calculated by model>*		
Relative fixed operating cost	*<calculated by model>*		
Total amount produced	*<calculated by model>*		
Number installed in model	*<calculated by model>*		
Total input capacity in model	*<calculated by model>*		
Total output rate per time step	*<calculated by model>*		
Lowest established unit price	*<calculated by model>*		
Highest established unit price	*<calculated by model>*		
Most recently established unit price	*<calculated by model>*		
Average established operational profit per unit of input	*<calculated by model>*		

Technology instances and Business Cases generate during runtime, based on the state of the model and not directly related to any exogenous input.

6. Input data

The model does not use external input data to represent time-varying processes.

7. Submodels

This section elaborates on the inner workings of the following ‘sub’models, i.e. logically separated processes that make up part of the model code:

- Learning effects
- Business case calculations
- Award of subsidies, price setting and allocation of demand

<u>Submodel 1: Learning effects</u>

The model involves two main types of learning that influence costs and efficiency of new Technology instances.

- Collective learning: occurs at the level of Technology Classes, applies to all Operators that want to install new Technology instances, and changes the values of investment costs and fixed operating costs.
- Individual learning: applies to individual Operators.

Collective learning comes in two flavours:

- Linear over time: in this case, the value of interest increases (or decreases) by a fixed amount at the beginning of each time step.
- Loglinear based on installed capacity. In this case, the value of interest is assumed to increase (or reduce) by a fixed value every time that the installed capacity of the respective Technology class doubles

Individual learning only affects fixed operating costs and is linearly dependent on the cumulative experience that the Operator in question has built up over time.

- The cumulative experience is assumed to depend on both the number of Technology instances operated by the Operator, and how long he has operated them.
- Example: in year 5, an Operator starts with a cumulative experience of 7 ‘years’ and operated 2 Technology instances in the previous year. The cumulative experience than increases from 7 to 9 ‘years’.

For all types of learning, thresholds apply that limit the maximum amount of reduction or improvement that can be obtained through learning.

<u>Submodel 2: Business case calculations</u>

During the Business Case calculation step, all Operators evaluate what Technologies they are still allowed to invest in, at what capacity, what the total costs would be over their investment horizon, and how much income the Technology would have to generate (by subsidy and/or selling of products) to meet their investment threshold.

Operators only calculate Business Cases for Technologies (type + capacity) that they are allowed to invest in. Three rules apply together govern whether an Operator is allowed to invest in a Technology:

1. Once an Operator has invested in its first Technology instance, she can never switch to another class, so from then on she will only calculate new Business Cases for that Technology class.
2. Operators have a minimum capacity at which they are willing to invest. They cannot invest in smaller installations than that specified size.
3. Operators are only allowed to have a maximum of two instances of a given capacity option. After that, they will have to upgrade to a larger capacity.

For each allowed Technologies (type + capacity), the Operator creates a Business Case object and calculates the attributes, taking into account production at a constant rate based on the fixed utilization rate specified for that Technology class, over the course of the full investment horizon that this Operator works with for this Technology class.

The Operator makes the following calculations ('tick' means 'time step') (attribute values are underlined):

(preparation)

1. Actual-input-rate = Input-capacity * Average-utilization-rate
    - Actual-input-rate-per-tick = Actual-input-rate * Time-unit-scale-factor
2. Actual-output-rate = Actual-input-rate * Conversion-rate
    - Actual-output-rate-per-tick = Actual-output-rate * Time-unit-scale-factor
3. Unallocated-cash-inflow-per-tick = Base-case-inflow-per-tick + Current-profit-per-tick
4. Available-renewable-energy-production-rate = Total-renewable-energy-production-rate – Allocated-renewable-energy-production-rate
5. Newly-allocated-renewable-energy-production-rate = minimum of (Actual-input-rate; Available-renewable-energy-production-rate)

(investment costs)

6. Relative-investment-discount = Input-capacity * Relative-investment-cost-relative-scaling-discount
7. Initial-investment = relative-investment-cost * input-capacity * (1 - relative-investment-discount)

(costs of input electricity and applicable taxes)

8. Base-electricity-costs = electricity-price * input-rate-per-tick
    - Even if local production is used, the electricity price is 'paid' by not selling to the market
9. Local-renewable-energy-fraction = newly-allocated-renewable-energy-production-rate / input-rate
10. Local-renewable-energy-tax-per-tick = input-rate-per-tick * local-renewable-energy-fraction * tax-for-local-use
11. Other-electricity-tax-per-tick = input-rate-per-tick * (1 - local-renewable-energy-fraction) * applicable-tax-based-on-current-legal-status-of-P2F-Operators
12. Total-electricity-costs-per-tick = base-electricity-costs + local-renewable-energy-tax + other-electricity-tax

(operating costs)

13. Global-relative-discount-on-operating-cost = input-capacity * relative-fixed-operating-cost-relative-scaling-discount

14. Fixed-operating-cost-per-tick = initial-investment * relative-fixed-operating-cost * (1 – global-relative-discount-on-operating-cost) * 1 – individual-relative-discount-on-operating-cost)
15. Variable-operating-cost-per-tick-except-inputs = output-rate-per-tick * variable-operating-cost-except-input
16. Total-operating-cost-per-tick = fixed-operating-cost-per-tick + total-electricity-costs-per-tick + variable-operating-cost-per-tick-except-inputs
17. Total-operating-cost = total-operating-cost-per-tick * investment-horizon

(financial requirements the Operator determines for investing in this Technology class and capacity)

18. Minimum-subsidy = initial-investment – cash-balance
    - (cannot become negative)
19. Minimum-regular-revenue-per-tick = total-operating-cost-per-tick – unallocated-cash-inflow-per-tick
    - (Operator must be able to cover operational losses, also after the investment horizon)
20. Minimum-unit-price = minimum-regular-revenue-per-tick / actual-output-rate-per-tick
21. Minimum-combined-income-over-horizon = initial-investment + total-operating-cost
22. If investment-type equals 'ROI' instead of 'Budget':
    - Total-unallocated-cash-inflow-over-horizon = unallocated-cash-inflow-per-tick * investment-horizon
    - Minimum-combined-income-over-horizon = Minimum-combined-income-over-horizon – total-unallocated-cash-inflow-over-horizon
    - (in case of ROI, the Operator is not willing to lose any cash on operations, even if she would have the cash available if needed)

The calculation of the minimum combined income over the horizon concludes the Business Case calculation.

Submodel 3: Award of subsidies, price setting and allocation of demand

When all Operators have calculated their Business Cases, the Business Cases are 'sent' to the Subsidizers, who then decide how to allocate their available subsidy funds, according to the following steps (executed for each Technology class separately):

1. Determine the relevant selling prices based on Customer demand
2. At each relevant selling price:
    a. Determine total volume that can be sold (sum of demand of all Customers with a reservation price at or below the selected price)

b. Filter the Business Cases on whether they accept the selected selling price (based on minimum required unit price, see Business Case calculation).
c. For filtered Business Cases, calculate:
    i. Regular-income = output-rate * selling price)
    ii. Required-subsidy = minimum-combined-income-over-horizon – regular-income
    iii. Calculate definitive required subsidy by comparing required-subsidy with min-required-subsidy (calculated during Business Case calculations)
    iv. Output-rate-over-subsidy-ratio = output-rate / required-subsidy (or set equal to output-rate if required-subsidy is below 1 euro).
d. Arrange the filtered Business-Cases in order of output-rate-over-subsidy-ratio
e. Traverse those Business-Cases, marking them ‘approved’ if the remaining amount of subsidy still exceeds the amount required by the Business Case
f. Calculate the total output rate that would be achieved at this selling price

3. Determine the selling price at which the total new output rate is maximized
4. Retrieve what Business-Cases were marked as ‘approved’ at that selling price and confirm their approval

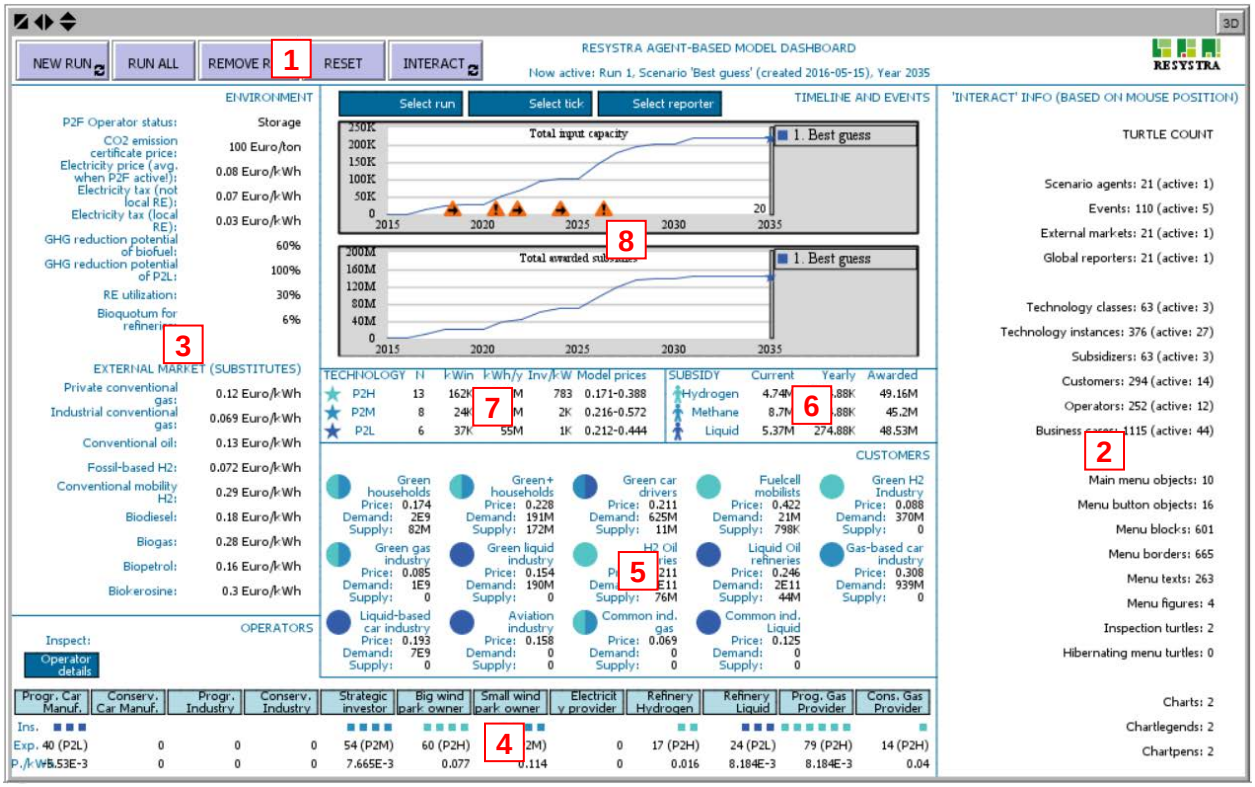
In some rare cases, one Operator may get Business Cases approved from two different Subsidizers. As she is only allowed to invest in one Technology class, she selects the one best matching her investment preferences and discards the other Business Case. The associated subsidy money for the discarded Business Case is then not awarded at all and can be reallocated in the next time step.

8. Model interface

This section is not a formal part of the ODD-framework. However, we added it here because it gives the reader a better idea of how the model can be used.

The model interface is basically an interactive ‘dashboard’, that shows key values for all model concepts and is able to provide more detail based on user interaction.

Figure 2 shows the model interface, just after a run has completed, without any element being selected by the user.



The elements in the dashboard include (numbers correspond to figure 2):

1. Main control buttons, to add a new run (thereby selecting a scenario based on available input text files in the Data folder), automatically start sequential runs for all available input files, remove a specific run, completely reset the model, or toggle the Interactive Mode that allows users to see additional details when hovering over specific elements in the model. Next to the five buttons, the header bar also shows the active run id, scenario, and time step
2. Detail panel, that shows additional information when in Interactive Mode (in figure 2, no element is selected, so the panel just lists counts of all agent and object types)
3. Environment variables, relating to policy aspects as well as prices of substitutes.
4. Operators. Operators are shown as buttons. When hovering over Operator buttons in Interactive Mode, the Information panel shows current values of all attributes of that Operator. Interactive mode also allows to inspect Business Case details when hovering over the Operator button (this setting can be selected using the dark blue button in the Operator area). Always visible for each Operator are the following three things:
    a. Installed technology instances, shown as blue boxes with colors identifying Technology type, corresponding to the Technology section. Capacity upgrades are shown as additional boxes here. In Interactive Mode, the boxes can be interacted with to show detailed info about the Technology instance
    b. Total experience gained over the course of the model
    c. The average selling price per kWh for the installed Technology instances of this Operator

5. Customers. Customers are shown as circles, filled in the color that corresponds with the technology (or technologies) corresponding with their demanded product(s). Again, hovering over the Customer circle when in Interactive Mode provides detailed info on that Customer. Always visible are:
    a. Current price at which the Customer prefers the ‘new’ product over its substitute product
    b. Total demand, given quota and mixing rates
    c. Part of that demand that is already being supplied by installed Technology instances of Operators
6. Subsidizers. Subsidizers are shown as human forms, again with a color corresponding to the Technology that they support. Hovering the Subsidizer icon in Interactive Mode provides additional information, but the dashboard always shows:
    a. Current amount of subsidy available (subsidy may build up over the years while not awarded)
    b. Yearly inflow of additional money to award as subsidy (=yearly subsidy)
    c. Sum of awarded subsidy so far
7. Technologies. Again, color-coded and with details in Interactive Mode. Always shown in the model are:
    a. Number of instances of that Technology currently installed by Operators
    b. Total input capacity of those instances in kW (including initially installed exogenous capacity in other sectors)
    c. Total yearly output production of those instances in kWh/Year
    d. Current investment costs per kW
    e. Range of established output prices over all instances of this Technology in the model
8. Timeline. The timeline shows development of ANY model variable over the course of all (at most 5) completed runs. In Interactive Mode, the plot areas show the exact value based on the mouse position. Also, the three dark-blue buttons in the timeline area allow to:
    a. Change the active run that all dashboard values are based on (if multiple runs were executed in this sessions)
    b. Change the active time step that all dashboard values are based on
    c. Change the reporter for one of the charts, i.e. change the model variable that they track the values of. This can be done before, during or after completion of a run.

References

Nr.	Full reference
1	Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (2015): Monitoringbericht 2015. Bonn: Bundesnetzagentur. Online verfügbar unter http://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2015/Monitoringbericht_2015_BA.pdf?__blob=publicationFile&v=4.
2	Mineralölwirtschaftsverband e.V. (2015): Jahresbericht 2015. Mineralöl-Zahlen 2014. Berlin: Mineralölwirtschaftsverband e.V.. Online verfügbar unter http://mwv.de/upload/Publikationen/dateien/MWV-JB_Web_2014_HBr2W53p7xHJWyQ.pdf.
3	Clean Energy Partnership (2015): FAQ. Wesentlich Fragen und Antworten auf einen Blick. https://cleanenergypartnership.de/faq/wasserstoffinfrastruktur/?scroll=true.
4	Union zur Förderung von Öl- und Proteinpflanzen e.V. (o.J.): UFOP- Marktinformationen Ölsaaten und Biokraftstoffe. Berlin: Union zur Förderung von Öl- und Proteinpflanzen e.V. Online verfügbar unter http://www.ufop.de/files/4014/2020/5592/RZ_MI_0115.pdf.
5	Schlesinger, Michael; Lindenberger, Dietmar; und Christian Lutz (2014): Entwicklung der Energiemärkte. Energiereferenzprognose. Basel/Köln/Osnabrück: Prognos, Energiewirtschaftliches Institut an der Universität Köln, Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung. Online verfügbar unter http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/entwicklung-der-energiemaerkte-energiereferenzprognose-endbericht,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf.
6	DLR, Fraunhofer IWES, und IfnE (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Stuttgart/Kassel/Teltow. Online verfügbar unter http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Politische_Papiere_anderer/12.03.29.BMU_Leitstudie2011/BMU_Leitstudie2011.pdf.
7	Fritsche, Uwe R. (2007): Endenergiebezogene Gesamtemissionen für Treibhausgase aus fossilen Energieträgern unter Einbeziehung der Bereitstellungsvorketten. Darmstadt: Öko-Institut e.V.. Online verfügbar unter http://www.iinas.org/tl_files/iinas/downloads/GEMIS/2007_thg_fossil_BGW.pdf.
8	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2016): Zahlen und Fakten Energiedaten – Nationale und Internationale Entwicklung. Online verfügbar unter http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/energiedaten.html
9	Hydrogeit (o.J.): Wissen / Wasserstoff-Steckbrief. Online verfügbar unter http://www.hydrogeit.de/wasserstoff.htm.
10	Agora Energiewende (2014): Stromspeicher in der Energiewende. Untersuchung zum Bedarf an neuen Stromspeichern in Deutschland für den Erzeugungsausgleich, Systemdienstleistungen und im Verteilnetz. Berlin. Online verfügbar unter Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.; Ludwig-Bölkow-Systemtechnik; Fraunhofer ISE; und KBB Underground Technologies (2015): Studie über die Planung einer Demonstrationsanlage zur Wasserstoff-Kraftstoffgewinnung durch Elektrolyse mit Zwischenspeicherung in Salzkavernen unter Druck. Stuttgart. Online verfügbar unter http://www.lbst.de/ressources/docs2015/BMBF_0325501_PlanDelyKaD-Studie.pdf.
11	Kempkens, Wolfgang (2014): Öko-Institut erteilt Power-To-Gas-Technologie klare Absage. Online verfügbar unter

	http://www.ingenieur.de/Branchen/Energiewirtschaft/Oeko-Institut-erteilt-Power-to-Gas-Technologie-klare-Absage.
12	Harks, Enno (o.J.): power-to-gas-to-refining (…to tank). Stromspeicher und Brücke zum Verkehr. Online verfügbar unter http://www.innovationsforum-energiewende.de/fileadmin/user_upload/2015-10-IfE-P2G2R-BP-Harks-v4.pdf.
13	Uwe Albrecht, Matthias Altmann, Jan Michalski, Tetyana Raksha, Werner Weindorf (2013): Analyse der Kosten Erneuerbarer Gase. Eine Expertise der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH. Online verfügbar unter http://www.lbst.de/download/2014/20131217_BEE-PST_LBST_Studie_EEGase.pdf
14	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.; Ludwig-Bölkow-Systemtechnik; Fraunhofer ISE; und KBB Underground Technologies (2015): Studie über die Planung einer Demonstrationsanlage zur Wasserstoff-Kraftstoffgewinnung durch Elektrolyse mit Zwischenspeicherung in Salzkavernen unter Druck. Stuttgart. Online verfügbar unter http://www.lbst.de/ressources/docs2015/BMBF_0325501_PlanDelyKaD-Studie.pdf.
15	Fraunhofer ISI; Ecofys (2015): Electricity Costs of Energy Intensive Industries – An International Comparison. Online verfügbar unter http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/x/de/projekte/Strompreiswirkung_330639/Industriestrompreise_englisch.pdf
16	Agentur für Erneuerbare Energien (2013): Studienvergleich: Entwicklung der Stromgroßhandels- und der CO2-Zertifikatspreise.
17	Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (2010): Potentiale der Wind-Wasserstoff-Technologie in der Freien und Hansestadt Hamburg und in Schleswig-Holstein. Untersuchung im Auftrag der Wasserstoffgesellschaft Hamburg e.V.
18	European Energy Exchange AG (2016): Aktuelle Börsenpreise. Online verfügbar unter: https://www.eex.com/de/marktdaten#/marktdaten
19	Proteus Solutions GbR (2016): Energy Charts. Online verfügbar unter https://proteus-solutions.de/~Photovoltaik/Strompreis:tM.F06!sM.EX1.asp
20	Strom-Report.de (2016): Strompreiserhöhungen in Deutschland 2016. Online verfügbar unter http://strom-report.de/eeg-umlage/.
21	Fraunhofer ISI; Ecofys (2015): Electricity Costs of Energy Intensive Industries – An International Comparison. Online verfügbar unter http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/x/de/projekte/Strompreiswirkung_330639/Industriestrompreise_englisch.pdf
22	European Energy Exchange AG (2016): Aktuelle Börsenpreise. Online verfügbar unter: https://www.eex.com/de/marktdaten#/marktdaten
23	Schlesinger, Michael; Lindenberger, Dietmar; und Christian Lutz (2014): Entwicklung der Energiemärkte. Energiereferenzprognose. Basel/Köln/Osnabrück: Prognos, Energiewirtschaftliches Institut an der Universität Köln, Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung. Online verfügbar unter http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/entwicklung-der-energiemaerkte-energiereferenzprognose-endbericht,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf.
24	Fraunhofer ISE (2015): Was kostet die Energiewende? Wege zur Transformation des Energiesystems bis 2050. Freiburg. Online verfügbar unter https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/studie-was-kostet-die-energiewende.pdf

25	Agentur für Erneuerbare Energien (2013): Studienvergleich: Entwicklung der Stromgroßhandels- und der CO2-Zertifikatspreise.
26	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (2011): Standard-THG-Emissionen für Biokraftstoffe. Online verfügbar unter https://mediathek.fnr.de/standard-thg-emissionen-fur-biokraftstoffe.html.
27	Deutsche Energie-Agentur (2013): Eckpunktepapier. Der Beitrag von Power to Gas zur Erreichung der energiepolitischen Zielstellungen im Kontext der Energiewende. Berlin. Online verfügbar unter http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Presse/Meldungen/2013/Eckpunktepapier_Jahreskonf_PtG.pdf.
28	Fraunhofer IWES (o.J.): Vollaststunden. Online verfügbar unter http://windmonitor.iwes.fraunhofer.de/windmonitor_de/3_Onshore/5_betriebsergebnisse/1_volllaststunden/.
29	Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (1974). Online verfügbar unter http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimschg/gesamt.pdf.
30	DVGW; DBI; Outotec; Energie Institut (2014): Technoökonomische Studie von Power-to-Gas-Konzepten. Bonn
31	Fraunhofer ISE, FCBAT (2010): Stand und Entwicklungspotential der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien. NOW-Studie.
32	Planet; Fachhochschule Lübeck Projekt-GmbH; Fraunhofer ISI; Institut für Energie und Umwelt e.V.; und KBB Underground Technologies (2014): Integration von Wind-Wasserstoff-Systemen in das Energiesystem. Abschlussbericht. Online verfügbar unter https://www.now-gmbh.de/content/5-service/4-publikationen/4-nip-wasserstoff-und-brennstoffzellentechnologie/abschlussbericht_integration_von_wind-wasserstoff-systemen_in_das_energiesystem.pdf.
33	Schmidt, Patrick R.; Zittel, Werner; Weindorf, Werner; und Tetyana Raksha (2016): Renewables in transport 2016. Empowering a sustainable mobility future with zero emission fuels from renewable electricity. Frankfurt a.M.: Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V.. Online verfügbar unter http://www.lbst.de/ressources/docs2016/FVV_H1086_Renewables-in-Transport-2050-Kraftstoffstudie_II.pdf.
34	Sterner, Michael; Thema, Martin; Eckert, Fabian; Lenck, Thorsten; und Philipp Götz (2015): Bedeutung der Notwendigkeit von Windgas für die Energiewende in Deutschland. Regensburg/Hamburg/Berlin: Forschungsstelle Energienetze und Energiespeicher, OTH Regensburg, Energy Brainpool, im Auftrag von Greenpeace Energy. Online verfügbar unter http://www.speicherinitiative.at/assets/Uploads/Downloads/01-2015-FENES-EBP-GPE-Windgas-Studie.pdf.
35	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.; Ludwig-Bölkow-Systemtechnik; Fraunhofer ISE; und KBB Underground Technologies (2015): Studie über die Planung einer Demonstrationsanlage zur Wasserstoff-Kraftstoffgewinnung durch Elektrolyse mit Zwischenspeicherung in Salzkavernen unter Druck. Stuttgart. Online verfügbar unter http://www.lbst.de/ressources/docs2015/BMBF_0325501_PlanDelyKaD-Studie.pdf.
36	Fraunhofer ISE (2015): Was kostet die Energiewende? Wege zur Transformation des Energiesystems bis 2050. Freiburg. Online verfügbar unter https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/studie-was-kostet-die-energiewende.pdf

37	DVGW; DBI; Outotec; Energie Institut (2014): Technoökonomische Studie von Power-to-Gas-Konzepten. Bonn
38	Agora Energiewende (2014): Stromspeicher in der Energiewende. Untersuchung zum Bedarf an neuen Stromspeichern in Deutschland für den Erzeugungsausgleich, Systemdienstleistungen und im Verteilnetz. Berlin. Online verfügbar unter Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.; Ludwig-Bölkow-Systemtechnik; Fraunhofer ISE; und KBB Underground Technologies (2015): Studie über die Planung einer Demonstrationsanlage zur Wasserstoff-Kraftstoffgewinnung durch Elektrolyse mit Zwischenspeicherung in Salzkavernen unter Druck. Stuttgart. Online verfügbar unter http://www.lbst.de/ressources/docs2015/BMBF_0325501_PlanDelyKaD-Studie.pdf.
39	Schmidt, Patrick R.; Zittel, Werner; Weindorf, Werner; und Tetyana Raksha (2016): Renewables in transport 2016. Empowering a sustainable mobility future with zero emission fuels from renewable electricity. Frankfurt a.M.: Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V.. Online verfügbar unter http://www.lbst.de/ressources/docs2016/FVV_H1086_Renewables-in-Transport-2050-Kraftstoffstudie_II.pdf

Appendix

Products and measuring units	
Product	**Measuring unit**
Electricity	kWh
Hydrogen	kWh
Methane	kWh
Liquid (fuel)	kWh
CO2	ton

Substitute products prices and CO2 emissions			
Substitute product	**Initial price**	**Price development**	**CO_2 emission**
Private conventional gas	0.072 Euro/kWh	+2% linear yearly	0.000198 ton/kWh
Industrial conventional gas	0.036 Euro/kWh	+2% linear yearly	0.000198 ton/kWh
Conventional oil	0.071Euro/kWh	+2% linear yearly	0.000274 ton/kWh
Fossil-based H2	0.06 Euro/kWh	+2% linear yearly	0 ton/kWh
Conventional mobility H2	0.29 Euro/kWh	N/A	0 ton/kWh
Biodiesel	0.078 Euro/kWh	+2% linear yearly	0 ton/kWh
Biogas	0.08 Euro/kWh	+2% linear yearly	0 ton/kWh
Biopetrol	0.07 Euro/kWh	+2% linear yearly	0 ton/kWh
Biokerosine	0.8 Euro/kWh	+2% linear yearly	0 ton/kWh

Demand sizes and development			
Abstract market	**Base product class**	**Yearly demand size**	**Demand development**
Industrial gas	Methane	$2.3 * 10^{11}$	+1% linear yearly until 2025, then constant
Mobility gas	Methane	$2.5 * 10^{9}$	+5% linear yearly
Private gas	Methane	$2.9 * 10^{11}$	-2% linear yearly
Industrial H2	Hydrogen	$6 * 10^{10}$	+2% linear yearly
Fuelcell mobility	Hydrogen	$2.5 * 10^{6}$	*120% exponential growth
Industrial oil from refinery	Liquid	$3.6 * 10^{10}$	+1% linear yearly
Mobility oil from refinery	Liquid	$6.8 * 10^{11}$	Constant until 2025, then -1% linear yearly
Private oil from refinery	Liquid	$1.6 * 10^{11}$	Constant until 2020, then -2% linear yearly
Refinery oil	Liquid	$8.3 * 10^{11}$	Constant until 2018, then -1% linear yearly

10.5 Abschluss-Workshops Resystra um 15./16.09.2016 in Bremen: Programm, Teilnehmerliste und Protokoll mit Fazit

Programm

„Auf dem Weg zu einem resilienten Energiesystem – Ziele, Möglichkeiten und Grenzen der Richtungsgebung einer großen Transformation“

Zeit: 15.09.2016, 13:00 – 16.09.2016, 14:00

Ort: Universität Bremen, Gebäude FZB Raum 0240

Ziele des Workshops:

c) Theorie: Diskussion einer zukünftigen resilienten Struktur des Energiesystems sowie des Stellenwerts einer solchen Leitorientierung für die Transformation auf verschiedenen Ebenen vor dem Hintergrund der Ergebnisse des Projekts RESYSTRA.

d) Kooperation: Identifikation von Themenstellungen, an denen gemeinsam weitergearbeitet werden könnte.

Donnerstag, 15. September 2016

Ab 12:30	***Ankunft und Anmeldung mit Mittagsimbiss***
13:00	**Begrüßung und kurze Vorstellungsrunde** Prof. Dr. Arnim von Gleich, Universität Bremen
13:15 -13:40	**Rekapitulation zentraler Ergebnisse des Projekts RESYSTRA** Pablo Thier, Universität Bremen (15 Min Vortrag, 10 Min Fragen, Diskussion)
13:40 -14:10	**Resiliente Energiesysteme** Prof. Dr. Stefan Gößling-Reisemann, Universität Bremen (20 Min Vortrag, 10 Min Fragen, Diskussion)
14:10 -14:40	**Ansätze zum Resilience Engineering für Energiesysteme** Dr. Alexander Stolz, Ernst-Mach-Institut Freiburg (20 Min Vortrag, 10 Min Fragen, Diskussion)
14:40 -15:10	**Hybridnetze als Beitrag zu einem resilienten Energiesystem** Prof. Dr. Sebastian Lehnhoff, Universität Oldenburg und OFFIS (20 Min Vortrag, 10 Min Fragen, Diskussion)
15:10 -15:30	**Poster-Rundgang**
15:30 -15:50	***Kaffeepause***
15:50-16:20	**Richtungsgebung von Systeminnovationen mithilfe von Leitorientierungen** Urte Brand, Universität Bremen (20 Min Vortrag, 10 Min Fragen, Diskussion)
16:20-16:50	**Leitorientierungen von Schlüsselakteuren der Transformation: Die Rolle und Motivation von Energie-Start-ups** Prof. Dr. Klaus Fichter, Universität Oldenburg und Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit (20 Min Vortrag, 10 Min Fragen, Diskussion)
16:50-17:15	**Blitzlicht zum Tagesabschluss: Erkenntnisse und Fragen**
18:00	***Rundgang durch die Bremer Innenstadt geführt von A. von Gleich***
19:00	***Gemeinsames Abendessen im Becks in’n Snoor***

Freitag, 16. September 2016

09:00 -09:15	**Zentrale Erkenntnisse des Vortages** Projektteam RESYSTRA
09:15 -09:45	**Black Swans in der Energiewende** Dr. Almut Kirchner, prognos Basel (20 Min Vortrag, 10 Min Fragen, Diskussion)
09:45 -10:15	**Transitionspfade im deutschen Stromsystem: Entwicklungen in Netz, Erzeugung und Nachfrage** Dr. Nele Friedrichsen, Fraunhofer ISI Karlsruhe (20 Min Vortrag, 10 Min Fragen, Diskussion)
10:15 -10:45	**Resiliente Energiesysteme - Durch den Ausbau der Übertragungs-netze?** Dr. Christoph Riegel, Bundesnetzagentur Bonn (20 Min Vortrag, 10 Min Fragen, Diskussion)
10:45 -11:15	***Kaffeepause***
11:15 -11:45	**Wie regionale Zellen zur Resilienz des Energiesystems beitragen** Dr. Karsten Burges, Ecofys Germany, Berlin (20 Min Vortrag, 10 Min Fragen, Diskussion)
11:45 -12:15	**Alternative bzw. konkurrierende zukünftige Strukturen des Energie-systems aus Sicht von ENERGY-TRANS** Prof. Dr. Armin Grunwald, Karlsruher Institut für Technologie und ITAS (20 Min Vortrag, 10 Min Fragen, Diskussion)
12:15 -12:45	**Fazit und Abschlussdiskussion** Projektteam RESYSTRA
12:45 -14:00	***Ausklang mit Mittagsimbiss***

Teilnehmerliste am Abschluss Workshop

Name	Vorname	Titel	Institution
Bäumer	Marcus	Prof. Dr.	Universität Bremen
Brand	Urte		Universität Bremen
Burges	Karsten	Dr.	Ecofys Germany GmbH
Eberspächer	Achim	Dr.	acatech
Fichter	Klaus	Prof. Dr.	Universität Oldenburg
Giese	Bernd	Dr.	Universität Bremen
Gößling-Reisemann	Stefan	Prof. Dr.	Universität Bremen
Grunwald	Armin	Prof. Dr.	ITAS
Grundwald	Leander		Fraunhofer UMSICHT
Friedrichsen	Nele	Dr.	Fraunhofer ISI
Kirchner	Almut	Dr.	Prognos
Knies	Jürgen		Jade Hochschule
Lehnhoff	Sebastian	Prof. Dr.	OFFIS
Logemann	Viola		Universität Bremen
Neubauer	Linda		Universität Oldenburg
Riegel	Christoph	Dr.	Bundesnetzagentur
Schill	Cornelius		Fraunhofer UMSICHT
Schnülle	Christian		Universität Bremen
Stolz	Alexander	Dr.	Fraunhofer EMI
Thier	Pablo		Universität Bremen
von Gleich	Arnim	Prof. Dr.	Universität Bremen
Wrobel	Patrick		Fraunhofer UMSICHT

Protokoll und Fazit des Abschluss-Workshops:

„Auf dem Weg zu einem resilienten Energiesystem – Ziele, Möglichkeiten und Grenzen der Richtungsgebung einer großen Transformation“

15./16.09.2016, Bremen

Nina Böcker, Urte Brand, Bernd Giese, Arnim von Gleich, Stefan Gößling-Reisemann, Viola Logemann, Christian Schnülle, Pablo Thier

Impressum

Universität Bremen

FB Produktionstechnik
FG Technikgestaltung und Technologieentwicklung
Badgasteiner Str. 1
28359 Bremen

artec | Forschungszentrum Nachhaltigkeit
Enrique-Schmidt-Str. 7
28359 Bremen

Autoren

Nina Böcker, Universität Bremen
Urte Brand, Universität Bremen
Bernd Giese, Universität Bremen
Arnim von Gleich, Universität Bremen
Stefan Gößling-Reisemann, Universität Bremen
Viola Logemann, Universität Bremen
Christian Schnülle, Universität Bremen
Pablo Thier, Universität Bremen

Die vorliegende Publikation wurde im Rahmen des Forschungsverbundes RESYSTRA – Resiliente Gestaltung des Energiesystems am Beispiel der Transformationsoptionen „EE-Methan-System“ und „Regionale Selbstversorgung“ erstellt. Für den Inhalt sind die genannten Autorinnen und Autoren verantwortlich.

Diese Publikation ist im Internet als pdf-Datei abrufbar unter: www.resystra.de.

Bremen, Dezember 2016 (Korrigierte Version 2)

Einleitung

Der vorliegende Text dient der Zusammenfassung des Abschluss-Workshops des Projektes RESYSTRA, welcher am 15. und 16. September 2016 in Bremen stattfand. Auf dem Workshop wurden zentrale Inhalte und Ergebnisse des Projekts rekapituliert und zur Diskussion gestellt. Bereits im Vorfeld des Workshops war den Teilnehmenden ein Thesenpapier[119] zur Verfügung gestellt worden, verbunden mit der Bitte in ihren Beiträgen darauf Bezug zu nehmen. Die Teilnahme zahlreicher Experten aus dem Bereich der Energie-, Resilienz-, Transformations- und Innovationsforschung, aber auch von Akteuren aus der Praxis, beispielsweise der BundesNetzAgentur, trug zu einer lebhaften interdisziplinären Diskussion auf der Veranstaltung bei. Mit der Durchführung des Abschluss-Workshops wurden primär folgende Ziele verfolgt:

e) Theorie: Diskussion einer zukünftigen resilienten Struktur des Energiesystems sowie des Stellenwerts einer solchen Leitorientierung für die Transformation auf verschiedenen Ebenen vor dem Hintergrund der Ergebnisse des Projektes RESYSTRA.
f) Kooperation: Identifikation von Themenstellungen, an denen gemeinsam weitergearbeitet werden könnte.

Zunächst werden die einzelnen Vorträge zusammenfassend wiedergegeben bevor im Anschluss eine knappe Zusammenfassung der zentralen Workshop-Erkenntnisse aus Sicht des Projektteams erfolgt. Die Folien der einzelnen Vorträge sind auf Anfrage erhältlich.

Darstellung der Vorträge und Diskussionen

Tag 1: Donnerstag 15. September 2016

Pablo Thier, Universität Bremen: Rekapitulation zentraler Ergebnisse des Projekts RESYSTRA

Herr Thier gab in seinem Vortrag einen Überblick über das BMBF-Verbundprojekt RESYSTRA und stellte das Konzept einer zellularen Struktur des Energiesystems vor.

Im Projekt Resystra wird das Energiesystem als sozio-technisches System betrachtet. Im Fokus standen Fragen der zukünftigen Entwicklung. Dabei ging es zum einen um die **anzustrebende Struktur** des Energiesystems unter besonderer Berücksichtigung der erweiterten Versorgungssicherheit (**Resilienz**) und zum anderen um den **Prozess der Transformation** des Energiesystems mit Fokus auf den Möglichkeiten und Grenzen der Richtungsgebung von systemischen Innovationen mit Hilfe von **Leitorientierungen**. Im Projekt wurden das Leitkonzept „Resiliente Systeme“ sowie die Gestaltungsleitbilder regionales resilientes Energiesystem für die Fallbeispiele Osterholz und Wolfhagen sowie auf nationaler Ebene Power-to-Fuel (strombasierte synthetische

[119] Das Thesenpapier ist auf der Website von RESYSTRA, www.resystra.de, abrufbar.

Kraftstoffe) erarbeitet. Die Analysemethode „strukturelle Vulnerabilitätsanalyse“ sowie das Schildkrötenmodell zur Darstellung der richtungsgebenden Faktoren von Transformationen, wurden weiterentwickelt. Dynamische Modelle zur Simulation der Wirkungen entsprechender Ausbaumaßnahmen in den Regionen wurden ebenso erarbeitet, wie ein agentenbasiertes Modell zur Simulation der nötigen Anforderungen an eine Integration von Power-to-Fuel in den Markt. Als Grundlage für die Erarbeitung der Gestaltungsleitbilder dienten Untersuchungen mit sozio-ökonomischen Methoden (Analyse der Wertschöpfungskettenanalyse, Akteursanalyse, Leitorientierungsanalyse). Die Identifizierung einer zellularen Struktur mit subsidiärer Steuerung, („regionale Zellen“) als erste Annäherung an ein resilienteres System erfolgte durch die Auswahl und Überprüfung von Gestaltungselementen resilienter Systeme, welche ursprünglich aus der Ökosystemtheorie stammen, hinzu kamen eine Literaturrecherche sowie Experten-Interviews. Die Gestaltungsleitbilder sind somit gespeist zum einen aus der Theorie ‚Resilienter Systeme‘ (top down) und zum anderen aus den in den Regionen vorfindbaren Überzeugungen, Leitbildern und strukturellen Gegebenheiten (bottom up). Die Idee einer zellularen Struktur bedeutet, dass das Energiesystem auf verschiedenen Ebenen aus Zellen aufgebaut wird. Die Idee der Subsidiarität verfolgt das Ziel, dass alle Dinge, die auf den untersten Ebenen geregelt werden können auch dort geregelt werden sollen. Jede einzelne Zelle und damit auch alle „lebenserhaltenden“ sektorenübergreifenden Funktionen sind lose mit den anderen Zellen gekoppelt. Bei Abkopplung vom Verbundnetz, z.B. im Störungsfall, welche zum richtigen Zeitpunkt geschehen muss, werden die Funktionen/Dienstleitungen autonom in der Zelle erbracht. Dies impliziert, dass Steuer- und Regelmechanismen sowie zugehörige Speicher und Puffer in der Zelle vorhanden sein müssen. Der Begriff der losen Kopplung ist dabei nicht nur auf die technische Ebene beschränkt, sondern wird auch auf ökonomische und gesellschaftliche Aspekte übertragen.

Diskussion:

Es wurde angemerkt, dass die energetische Selbstversorgung im Rahmen einer Zelle nicht unbedeutende Nebenwirkungen nach sich ziehen kann. So würde das Angebot möglichst vieler Funktionen innerhalb der Zelle zu immensen Mehrkosten durch die dadurch entstehenden Redundanzen führen. Zudem dürfte die Marktmacht einzelner Akteure in der Zelle enorm steigen (weniger Wettbewerber). Beides dürfte auch Auswirkungen auf die Resilienz eines Systems haben (negativ: z.B. Ressourcen und Preise, positiv z.B. Redundanzen). Der zelluläre Ansatz (VDE Studie) geht zwar davon aus, dass es sowohl regionale Märkte als auch überregionalen Märkte und Strukturen geben wird. Der regionale Strom würde allerdings vorteilhafter vermarktet. Er könnte z.B. kostengünstiger sein oder der überregionale Strom wird durch höhere Netzentgelte verteuert. In der Tat könnten dann Marktverzerrungen entstehen und regionale Akteure bevorzugt werden.

Des Weiteren wurde der Punkt der Finanzierung diskutiert. So erfordert der Aufbau eines resilienten bzw. zellularen Systems zunächst hohe finanzielle Investitionen. Wenn vom Prinzip der Subsidiarität ausgegangen wird, bedeutet dies, dass die Kosten von den Regionen getragen werden müssen. Das könnte zu Wettbewerbsverzerrungen führen. Es sollten folglich Lösungen gefunden werden, wie diese Nachteile ausgeglichen werden können.

Zudem wurde in der Diskussion aufgezeigt, dass ein resilientes System nur mit einer entsprechend abgestimmten Infrastruktur funktionieren kann. Daher sollte genauer definiert werden, wie groß eine Region sein muss, um ein eigenes resilientes System funktional aufbauen zu können. Die Frage nach der optimalen Größe einer Zelle kann jedoch nicht pauschal beantwortet werden. Für jedes Teilsystem (technisch, regulativ, marktbezogen) kann die optimale Größe durchaus unterschiedlich sein. Es wurde angemerkt, dass große Verbundnetze auch eine Stütze für das zellulare System darstellen werden. Momentan existieren durchaus schon Ansätze zu einer Dezentralisierung auch der Steuerung, weil das Management des Systems mit dezentralen Anlagen immer schwieriger wird. Außerdem wurde auf das Spannungsverhältnis zwischen Resilienz und Effizienz hingewiesen, welches analog zum Spannungsverhältnis dezentral vs. zentral diskutiert werden muss. Gefordert ist eine mehrdimensionale Optimierung.

Eine Lösungsstrategie könnte sein, von Beispielen zu lernen: So könnten z.B. die Regelzonen in der EU als Zellen angesehen werden. Ein Austausch zwischen den Zonen ist erlaubt. Anders sehe dies in Japan aus. Dort würde der Austausch an den Koppelstellen minimiert. Das System besteht dort also quasi aus nur einer Zelle, die zentral geregelt wird. Bei der Analyse des japanischen Systems kann erkannt werden, was bei großen Zellen nicht funktioniert.

Abschließend wurde die Meinung geäußert, dass eine zellulare Struktur auf mehreren Ebenen über kurz oder lang unumgänglich sei.

Prof. Dr. Stefan Gößling-Reisemann, Universität Bremen: Resiliente Energiesysteme

Die Transformation zu einem Resilienten Energiesystem, welches auf alle möglichen auch noch unbekannten Ereignisse nach dem Motto: „Komme was wolle“ vorbereitet sein soll, ist eine mögliche Antwort auf die zunehmenden Unsicherheiten, Komplexitäten und die Dezentralisierung im Energiesystem. Dies gilt auch für sogenannte Schwarze Schwäne (unknown unknowns), also für Stressoren, deren Art und Wirkweise völlig unbekannt sind.

Herr Gößling-Reisemann gab nach einer allgemeinen Einführung einen historischen Überblick über den Begriff der Resilienz und ging dabei auch näher auf Lovins und Lovins ein, die schon 1977 in ihrem Buch „Soft Energy Path“ vorschlagen, der Ausbreitung von Störungen in komplexen Systemen durch Lokalität entgegenzuwirken. Im Weiteren wurde die Arbeitsgruppe ‚Risiko und Resilienz‘ des Akademienprojekts ‚Energiesysteme der Zukunft‘ sowie der Ansatz von Hollnagel

et al. zum Resilience Engineering vorgestellt, bei dem Resilienz eine Anpassung an langsame und langfristige Änderung beinhaltet, also die Dimension verschiedener Zeitskalen berücksichtigt wird. Hollnagel geht davon aus, dass die Leistung sozio-technischer Systeme kontinuierlich fluktuiert und im Falle einer unerwarteten Resonanz eine erhöhte Leistungsfluktuation zu einer Störung führt. Ein Weg vorzusorgen, bestünde somit darin, Leistungsfluktuationen zu dämpfen. Der Vortrag schloss mit einer Synthese der vorgestellten Ansätze und zeigte zum einen Gestaltungselemente wie Diversität, Redundanz, Subsidiarität oder Modularität und zum anderen eine Prozesskette auf, um zu resilienteren Systemen zu gelangen. In letzterer wurden die folgenden Maßnahmen betont: 1) Vorsorgende Systemgestaltung; 2) Schäden überwinden; 3) für die Zukunft lernen; 4) Prävention verbessern. Als Ausblick wurden offene Fragen zu der Menge und Kombination von Resilienzgestaltungselementen, zu existierenden resilienten Systemen, zur Schärfung von Begriffen und zu dem Trade-off zwischen Effizienz, Resilienz und Bezahlbarkeit vorgestellt.

Diskussion:

In der anschließenden Diskussion kam die Sprache auf die Qualität der Systemleistungen, die in der verwendeten Definition von Resilienz ja eine wichtige Rolle spielen. Es wurde die Frage gestellt, ob diese Dienstleistungen auf das für die Funktionsfähigkeit des Systems unbedingt Notwendige reduziert werden könnten. Nun ist in dem verfolgten Ansatz gerade nicht der Erhalt des Systems oder der Erhalt seiner ‚Funktionsfähigkeit' im Fokus. Der Fokus liegt auf den Dienstleistungen, die vom System erwartet werden. Sie werden durch seine Nutzer bestimmt. Aber an diesem Punkt ist die Frage nach der Qualität – und eben auch nach der Minimalqualität im Falle einer Krise - durchaus berechtigt. So etwas müsste ausgehandelt werden. Zudem wurde festgestellt, dass dieser Punkt bei der Systemgestaltung bzw. den Gestaltungselementen so berücksichtigt werden muss, dass die Systemanforderungen flexibel gehandhabt und Dienstleistungen auch auf andere Systeme übertragen werden können. Weiter wurde argumentiert, dass ein resilientes System sowohl auf abrupte Veränderungen reagieren als sich auch an langfristige schleichende Veränderungen anpassen können muss. Um letzteres möglich zu machen, muss das resiliente System auch verdeckte langfristige Veränderungen erkennen. Als ein Beispiel wurden hier die Bürgerinitiativen gegen den Netzausbau genannt, die z.B. durch Monitoring von Akzeptanz sichtbar und beobachtbar gemacht werden könnten, sodass auf diese Initiativen rechtzeitig reagiert werden könne. Demnach muss ein resilientes System frühzeitig zu entsprechenden Antizipationen in der Lage sein.

Bezüglich der Schwarzen Schwäne wurde in Frage gestellt wie unbekannt diese vermeintlichen Unbekannten tatsächlich sind, und ob es in den meisten Fällen nicht doch Experten gäbe, die diese Black Swans erwarteten. Es wurde festgestellt, dass viele Ereignisse, die derzeit als Schwarze Schwäne bezeichnet werden, keine sind, sondern es sich eher um zwar bekannte aber extrem unwahrscheinliche Ereignisse handelt. Echte schwarze Schwäne aus dem Gebiet der

Chemikalien bzw. Gefahrstoffe, waren z.B. die Ozon zerstörende Wirkung von FCKWs und die hormonähnliche Wirkung zahlreicher Industriechemikalien oder aus dem Bereich der biologischen Risiken das Auftreten von HIV und BSE. Für die Debatte um Resilienz und Schwarze Schwäne würde es allerdings ausreichen, dass diese Ereignisse den Instanzen, die die entsprechenden Entscheidungen treffen müssen, nicht bekannt seien. Daran wurde der Vorschlag angeschlossen, dass beim Umgang mit möglichen Risiken die Verantwortlichkeiten neu verteilt werden sollten, damit eine gewisse Trennung zwischen Risikoanalyse und Risikomanagement wirksam wird. Es soll damit vermieden werden, dass die Risikoanalyse schon durch den Blick auf eventuelle nötige Risikomanagementmaßnahmen gehemmt wird (historisches Beispiel die Trennung des Bundesinstituts für Risikobewertung vom Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit nach der BSE-Krise – wohl auch ein echter schwarzer Schwan). Außerdem wurde bemängelt, dass der Begriff der Resilienz oft zu defensiv verwendet wird und oft nur als Lösung zum Umgang mit unknown unknowns. Es wurde die Meinung vertreten, dass Resilienz ein Wert für sich sei und deshalb offensiv beworben werden solle.

Dr. Alexander Stolz, Ernst-Mach-Institut Freiburg: Ansätze zum Resilience Engineering für Energiesysteme

Herr Stolz stellte in seinem Vortrag einen ingenieurtechnischen Ansatz zur Resilienzermittlung am Beispiel eines Offshore-Netzknotens vor. Die Leistungen eines Resilienten Systems beschreibt er mit dem Erhalt kritischer Funktionalität, der Absicherung einer ‚graceful degradation' (einer graduellen Leistungsabnahme) sowie einer schnellen Wiederherstellung von komplexen Systemen. Für ausgefallene Funktionalitäten gibt die Zeitspanne bis zu ihrer Wiederherstellung Aufschluss über den Grad der Resilienz des Systems. Das dazu notwendige Resilience-Engineering wird, angelehnt an den Kreislauf des Risikomanagements, in die Phasen Prevent, Prepare, Protect, Respond und Recover eingeteilt. Die Resilienzanalyse ist so gesehen ein ergänzender Part der Risikoanalyse und eine Basis des Risikomanagements bei denen fünf Elemente im Zentrum stehen: Systembeschreibung und –modellierung, analytische quantitative Methoden der Systemanalyse, Systemsimulation, Ingenieuransätze und Experimente. Durch ein detailliertes Risikomanagement können die möglichen Wirkungen des Auftretens von Schwarzen Schwänen verringert werden. In seinem Beispiel für einen resilienz-informierten ingenieurtechnischen Ansatz zum Risikomanagement ging Alexander Stolz auf die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Auswirkungen einer mutwillig herbeigeführten Explosion an den Stahlstützen eines Offshore-Netzknotens ein sowie auf das Verhältnis von Aufwand und Wirkung von Vorsorgemaßnahmen. Zum Schluss stellte er einen Ansatz zur Quantifizierung von Resilienz vor, mit dem die Folgen eines disruptiven Ereignisses in Form eines Resilienz-Dreiecks dargestellt und berechnet werden können. Wobei die Steilheit des Abfalls der Leistung im ‚average response slope' und die Steilheit des Wiedergewinnens der Funktionalität im ‚average recovery slope' zwei Seiten dieses Dreiecks bilden. Die vom Dreieck eingeschlossene Fläche (Ausmaß des Verlusts, Geschwindigkeit der

Wiederherstellung über die Zeit) dann die Basis für die Quantifizierung. Als Motivation für diese Quantifizierung von Resilienz wurde angeführt, dass sie die Kommunikation mit Entscheidungsträgern und Politik vereinfacht. Letztendlich müssten zusätzliche Investitionen und Kosten immer begründet werden und hierfür helfe es quantitative Daten zu zeigen.

Diskussion:

In der nachfolgenden Diskussion wurde auf das Verhältnis zwischen der Anzahl der Szenarien und dem Detaillierungsgrad verwiesen. Je mehr Szenarien entworfen werden, desto weniger detailliert dürfen diese sein. Ein hoher Detaillierungsgrad bei einzelnen Szenarien sei allerdings notwendig, um Entscheidungsträger zu überzeugen, an bestimmten detailliert dargestellten Ansatzpunkten zu investieren, damit das Risiko insgesamt minimiert werden könne. Offen blieb wie die Begriffe „Resilienz“ und „Vulnerabilität“ voneinander abgegrenzt werden, da im Vortrag von Herrn Stolz viele Möglichkeiten der Korrespondenz von Risikoanalyse und Vulnerabilitätsanalyse aufgezeigt wurden. In Resystra wird zwischen Resilienz als Gestaltungsleitbild und der Vulnerabilität als analytische Kategorie unterschieden. Hier soll also nur die Vulnerabilität quantifiziert werden. Außerdem wurde die Frage gestellt, welche Interessen Unternehmen an der Analyse von Schwarzen Schwänen hätten. Schwarze Schwäne werden von Unternehmen oft außerhalb ihrer Verantwortung unter sog. „höherer Gewalt“ eingeordnet. Daher müssten Anreize gesetzt werden, damit entsprechende Analysen durchgeführt werden. Außerdem sollte in den verschiedenen Ingenieursdisziplinen mehr gegenseitiges Verständnis entwickelt werden, um die Vorbereitung auf und den Umgang mit unerwarteten Ereignisse zu verbessern.

Prof. Dr. Sebastian Lehnhoff, Universität Oldenburg und OFFIS: Hybridnetze als Beitrag zu einem resilienten Energiesystem

Herr Lehnhoff stellte in seinem Vortrag Hybridnetze (Strom, Gas, Wärme, Mobilität, IT) am Beispiel eines acatech Projekts und des Projekts „Energetische Nachbarschaften“ in Oldenburg vor. Kennzeichen von Hybridnetzen ist eine domänenübergreifende integrierte (mehrdimensionale) Kopplung von Prozessen, wodurch sich abhängig von der Domänenzahl die Kopplungspunkte und die Freiheitsgrade erhöhen und damit auch die Komplexität. Als Beispiel wurde die Stromumwandlungstechnologie Power-to-Gas vorgestellt, sowie ein möglicher Ordnungsrahmen für Hybridnetze. Des Weiteren wurden die Prozessketten bewertet, um vielversprechende Geschäftsfelder zu identifizieren. Eine spontane Umschaltung zwischen Energieträgern und flexiblen Infrastrukturen erfordert einen höheren Grad an Automatisierung.

Im Unterschied zu zellularen Strukturen sei jedoch eine regionale Abgrenzung in der Definition nicht enthalten. Aufgrund regional unterschiedlicher Potentiale wurde allerdings auch eine lokale/regionale Betrachtung zur Optimierung von Hybridnetzen für erforderlich gehalten. Des Weiteren sei aufgrund der Komplexität die Nutzung von Automatisierungsmöglichkeiten in Form von

verteilten IKT-Ansätzen nötig. Für eine Umsetzung bedarf es systemisch wirkender Förderanreize.

Bei den Energetischen Nachbarschaften geht es um die energetische Kopplung in einem Industriegebiet. Dort wird untersucht welche Prozesse und welche Form von Automatisierung notwendig sind. Die Realisierung wurde als durchaus möglich befunden. Als Herausforderungen wurden vor allem Akzeptanz, die Beschaffung von sensiblen Daten, sowie die Regulierung identifiziert (Kopplung von Rechts- und Versorgungssicherheit). Ein weiteres Ergebnis war, dass Projekte einen Haupt-Ansprechpartner (Kümmerer) bräuchten.

Abschließend gab Herr Lehnhoff einen Ausblick auf das kommende Projekt „Smart City Lab Fliegerhorst“, bei dem ein multimodales Versorgungssystem im Vordergrund stehen. Im eingereichten Projektantrag ENaQ der BMBF-Förderinitiative Energieeffiziente Stadt werden neben sozioökonomischen Entwicklungen auch eine Reihe innovativer Ansätze der Vermarktung, wie die peer-to-peer Vermarktung über Block-Chains, oder Geschäftsmodellentwicklung, wie Speichergenossenschaften, erprobt. Interessant sind die Fragen, wer ist Betreiber bzw. wer trägt die Systemverantwortung? In Bezug auf Resilienz stellt sich zumindest die Frage, wie eine Dunkelflaute überstanden werden könne.

Diskussion:

In der Diskussion wurde angemerkt, dass an den im Vortrag genannten Beispielen verschiedene Fragen untersucht werden könnten. So z.B. ob regionale Optimierung im Sinne von Hybridnetzen, bzw. multimodalen Quartieren nur zur eigenen Resilienz oder auch zur überregionalen Resilienz beitragen, indem sie z.B. Flexibilitäten zur Verfügung stellen. Zusätzlich könnte die Frage untersucht werden, wie viel die Versorgungssicherheit der Region wert sei? Welches Maß an Ausfallsicherheit im regionalen System ist gewünscht, wenn z.B. die importierten Energieressourcen ausfallen.

Im Unterschied zu dem im Projekt Resystra vorgestellten Ansatz regionaler Zellen wird bei den vorgestellten Projekten zu Hybridnetzender ein Inselbetriebmodus nicht weiter betrachtet. Reglung und Steuerung erfolgen weiterhin durch die Übertragungsnetzbetreiber. Offen blieb die Frage, wer die Systemverantwortung bei Block Chains trage und was passiere, wenn IDs verloren gehen.

Weiter wurde argumentiert, dass die Dimension der Wirtschaftlichkeit berücksichtig werden müsse. Vor allem eine Wertschöpfungskettenanalyse sollte durchgeführt werden. Die Kosten werden bei den hochgradig automatisierten Prozessen nach oben abgeschätzt. Das Geschäftsmodell ist derzeit aber noch offen und soll im Living Lab ermittelt und vertieft werden. Abschließend wurde festgehalten, dass die Akzeptanz bei den umsetzenden Akteuren (Planer, Regionalpolitiker, EVUs) für einen Paradigmenwechsel hin zu Engpassmanagement, zur Digitalisierung,

zu neuen Geschäftsmodellen, wie z.B. Block Chains, eher mäßig ist. Offensichtlich sei, dass die Komplexität durch die Umstellungen steige und dadurch auch die Vermittelbarkeit der Maßnahmen erschwert würde.

Urte Brand, Universität Bremen: Richtungsgebung von Systeminnovationen mithilfe von Leitorientierungen

Frau Brand stellt in ihrem Vortrag vor dem Hintergrund erwartbarer und möglicher Risiken und Überraschungen Möglichkeiten der Richtungsgebung von Transformationsprozessen (Systeminnovationen) in Richtung auf ein Resilientes Energiesystem vor und fokussiert dabei auf Leitorientierungen als mögliche Richtungsimpulse. Zunächst beschreibt sie das von ihr mit Bezug zu Systeminnovationen weiterentwickelte „Schildkrötenmodell der richtungsgebenden Einflussfaktoren" als Möglichkeit die wichtigsten richtungsgebenden Impulse strukturiert darzustellen. Das Modell zeigt neun übergeordnete richtungsgebende Einflussfaktoren (Regulativer Push, Anreiz Pull, Technology Push, Market Pull, Skandalisierungs Push, Vision Pull, Metafaktoren, Leitakteure, Netzwerk der Leitakteure), denen Richtungsimpulse zugeordnet werden können und die sich je nach betrachteter Systeminnovation unterscheiden. In diesem Zusammenhang geht Frau Brand davon aus, dass eine Richtungsgebung von Systeminnovationen durch die Kompatibilität und Komplementarität von Richtungsimpulsen befördert werden kann. Im weiteren Verlauf des Vortrages wird der Fokus auf einen richtungsgebenden Einflussfaktor, dem Vision Pull, und dem Richtungsimpuls „Leitbilder[120]" gerichtet und den beiden Fragen nachgegangen, ob und wie mit Leitbildern bewusst Systeminnovationen richtungsgebend beeinflusst werden können. Hierbei unterscheidet Frau Brand zwischen drei Faktoren, welche die Wirksamkeit von Leitbildern befördern können und untersuchungswürdig sind: inhaltsbezogene, prozessbezogene und systembezogene Wirksamkeitsfaktoren. Weiterhin geht sie davon aus, dass (propagierte) Leitbildideen (erstrebenswert, potenziell) zu „echten" Leitbildern (von Resonanz getragen oder sogar handlungsleitend) transformiert werden müssen, um Richtung geben zu können. Außerdem unterscheidet Frau Brand zwischen drei Ausdifferenzierungen (Ebenen) von Leitbildern anhand des sogenannten Dreiebenenmodells. In diesem Modell werden die drei Ebenen übergeordnet als Leitorientierungen bezeichnet und gemäß den sechs Kriterien Generalisierungsniveau, gesellschaftliche Reichweite, räumliche Reichweite, zeitliche Reichweite, zeitlicher Bezug (Gegenwart/Zukunft) und Realitätsbezug unterschieden in: 1.) Weltbilder, 2.) Leitkonzepte und 3.) Gestaltungsleitbilder. Ausgehend von dem Dreiebenenmodell trifft Frau Brand die Aussage, dass die auf der mittleren Ebene verorteten Leitkonzepte besonders dann ihre richtungsgebende Wirkung entfalten können, wenn sie Bezug zu tiefer liegenden (stärker erwünschten) Weltbildern und (höher liegenden) konkretisierten (machbaren) Gestaltungsleitbildern aufweisen. Im weiteren Verlauf stellt

[120] Leitbilder werden als sozial geteilte, gleichzeitig erwünschte und für machbar gehaltene Zukunftsvorstellungen verstanden, die das Denken und Handeln von Akteuren prägen (Giesel 2007; Dierkes et al. 1992).

Frau Brand die empirischen Studien vor, mit denen sie die o.g. Forschungsfragen nach den Möglichkeiten und Grenzen von leitorientierungsgesteuerten Systeminnovationen/Transformationen untersucht hat. Hierbei kommt sie zu dem Schluss, dass eine Richtungsgebung mittels Leitorientierungen möglich ist, wenn gewisse Wirksamkeitsfaktoren Berücksichtigung finden, die sie im Rahmen ihrer Untersuchungen identifiziert hat und im Vortrag näher vorstellt. In diesem Zusammenhang zeigt Frau Brand das von ihr weiterentwickelte Phasenmodell eines idealtypischen Leitorientierungsprozesses, welches von vier Phasen ausgeht, in denen Leitkonzepte wirksam propagiert werden können. Abschließend hält sie fest, dass folgende Faktoren von besonderer Bedeutung für die Wirksamkeit von Leitkonzepten sind: 1.) Bezug zu Weltbildern und Gestaltungsleitbildern, 2.) Einbindung von ausgewählten Adressaten, 3.) Aufzeigen von vorbildhaften Praxisbeispielen, 4.) Balance zwischen Top-down- und Bottom-up-Ansatz.[121]

Diskussion:

In der Diskussion wurde nach dem Verhältnis von Leitorientierungen und mentalen Modellen gefragt. Es wurde betont, dass nicht vernachlässigt werden dürfe, welche Legitimation ein Impulsgeber besitze, da die Wirkung eines Leitbildes von der Macht abhänge, die der jeweilige Akteur habe. Außerdem dürften im Normalfall unterschiedliche Leitbilder gleichzeitig existieren und miteinander konkurrieren. Und diese Leitbilder können auch nur teilweise gemeinsame Schnittmengen haben. Bspw. wurden im Leitbild „100%EE-Region“ Verkehr und Wärme außen vor gelassen. Nichtsdestotrotz konnte dieses Leitbild viel in den untersuchten Regionen bewirken. Und schließlich stimmten Regularien nicht immer in ihrer Richtung überein und könnten anstatt als Impuls auch als Bremse wirken. Es wurde angemerkt, dass das Modell der Schildkröte allerdings Möglichkeiten biete auch nicht kompatible Impulse zu integrieren. Des Weiteren wurde festgehalten, dass die gezeigten Fallbeispiele keine offene Leitbildentwicklung darstellten, sondern von den Prozessträgern versucht wurde, Resonanz für bestimmte Begriffe zu finden.

Außerdem wurde verdeutlicht, dass gemäß der Multi-Impuls-Hypothese Einflussfaktoren und deren Richtungsimpulse nur im Zusammenspiel wirkten und es daher nur bei extremen Ausnahmefällen einzelne dominante Richtungsimpulse bzw. Leitorientierungen geben könne (z.B. wenn der Präsident der Vereinigten Staaten das Ziel vorgibt eine Mondlandung durchzuführen). Durchaus festzustellen war aber, dass Leitorientierungen Einfluss auf andere Richtungsimpulse wie die Nachfrage (Market Pull) haben könnten. Z.B. habe in Leutkirch der Wunsch nach Autonomie dazu

[121] Die detaillierten Untersuchungsergebnisse sind u.a. zu finden in:

Brand, U. (im Erscheinen): Leitkonzepte Nachhaltigkeit und Resilienz als Richtungsgeber von Transformationsprozessen in Energiesystemen. Dissertation, Universität Bremen;

Brand, U.; Gleich, A. v. (2015): Transformation toward a Secure and Precaution-Oriented Energy System with the Guiding Concept of Resilience – Implementation of Low-Exergy Solutions in Northwestern Germany. Energies, 8(7), S. 6995-7019.

geführt, dass Bürger nur individuelle Sanierungen (und keine gemeinschaftlichen Nahwärmenetze) realisieren wollten. Abschließend wurde festgehalten, dass das Schildkrötenmodell mehreren Zwecken gleichzeitig diene, es sei 1. Analyseraster und 2. Struktur zur Veranschaulichung der Ergebnisse der Innovationsforschung, 3. Grundlage der agentenbasierten Modellierung (Strukturierung von Modellelementen und Beziehungen zwischen ihnen) sowie 4.Grundlage der Maßnahmenoptionen.

Prof. Dr. Klaus Fichter, Universität Oldenburg und Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit: Leitorientierungen von Schlüsselakteuren der Transformation: Die Rolle und Motivation von Energie-Start-ups

Anmerkungen zum RESYSTRA-Ergebnispapier:

Herr Fichter unterstützt die Aussage, Resilienz als 4. Nachhaltigkeitsprinzip aufzufassen. Ihm zufolge bietet das Schildkrötenmodell eine hilfreiche Strukturierung für qualitative Untersuchungen zur Adaptation von Systeminnovationen. Man könne anhand von drei Fallstudien allerdings keine Aussage zur Gewichtung der Einflussfaktoren/Richtungsimpulse treffen. Man könne zwar festhalten, dass Leitkonzepte in den meisten systemischen Innovationen eine wichtige Rolle spielen. Sie müssen aber immer im Zusammenspiel mit den anderen Einflussfaktoren betrachtet werden.

Nach seinem Verständnis von „Leitakteuren“ darf nicht auf der kognitiven/mentalen Ebene stehen geblieben werden. Die Arbeiten von Resystra beschäftigten sich sehr viel mit Ideen und Zukunftsvorstellungen. Es ist jedoch ebenso wichtig zu untersuchen, wie diese letztendlich auf das konkrete Handeln wirken. Er spricht daher von einem performativen Konzept: Der Leitakteur leitet nicht nur im ideellen Sinne, sondern auch durch faktisches Handeln. Des Weiteren merkt Fichter an, dass die Hypothese der Notwendigkeit von „Kompatibilität und Komplementarität der Richtungsimpulse“ eine Idealvorstellung sei, die in Wirklichkeit nicht so zu finden ist. Richtungsimpulse wirkten nicht immer in dieselbe Richtung. Es gibt befördernde und behindernde Faktoren. Auch müsse das Konzept von Macht in das Modell integriert werden, nicht zuletzt weil es sich auch um einen Kampf um und zwischen Leitorientierungen handele.

Nach Fichter konnten viele Erkenntnisse mit der explorativen Untersuchung der drei Fälle gewonnen werden. Allerdings ließen sich aufgrund der kleinen Fallzahl keine allgemeingültigen Aussagen treffen. Eine Generalisierung in Form von Handlungsempfehlungen, auf welche Weise Leitorientierungsprozesse durchgeführt werden sollten, sei daher nur sehr eingeschränkt möglich.

Er hebt hervor, dass in den Ergebnissen der Studie, zu denen auch Handlungsempfehlungen gehören, Unternehmertum eine wesentliche Rolle spielt und in der Schildkröte ergänzt werden sollte. Dieser Begriff sei weiter gefasst und würde auch Wirtschaftsunternehmen miteinbinden und nicht nur die bisher genannten Akteure wie Genossenschaften, NGOs und Bürger einschlie-

ßen. Fichter bringt an, dass bei manchen der im RESYSTRA-Papier formulierten Handlungsempfehlungen nicht ganz deutlich wird, wie diese konkret umzusetzen seien. Z.B wie der Bezug zu bereits verinnerlichten Leitorientierungen genau hergestellt werden könne und wie diese in die Gestaltungsleitbilder einbezogen werden können. Zudem betont er, dass neben Energiegenossenschaften viele weitere Akteure wie Start-ups unterstützt werden sollten, um die Energiewende voranzubringen.

Vortrag:

Im Anschluss stellte Fichter die Studie „Diffusionspfade für Nachhaltigkeitsinnovationen“ vor, in der 100 Umweltinnovationen (50% aus dem Energiebereich) untersucht wurden. Hier fokussiert die Untersuchung der Frage: Wer sind die Marktpioniere bei Innovationen?

Hierbei wurden unterschieden in 1.) Innovationsgrad (Verbesserungsinnovationen und Grundlageninnovationen) und 2.) Erstanbieter (Pionier): etablierte Unternehmen und Gründer-Unternehmen (z.B. Start-ups eigens für Innovation gegründet). Die Studie kam zu dem Ergebnis, dass Gründer-Unternehmen oft Grundlageninnovationen, etablierte Unternehmen vor allem Verbesserungsinnovationen hervorbringen. Daher, so Fichter, spielen Gründer-Unternehmen eine wesentliche Rolle als Leitakteure. Aus diesem Grund beschäftigte sich Fichter mit Start-ups in diesem Bereich. Die Green Economy sei ein zunehmend wichtiger Gründungsbereich und Fichter zeigt, dass zwei Drittel der grünen Gründungen im Energiesektor stattfinden. Im Energiebereich haben 86% der Gründungen einen ökologischen Hintergrund. Dieser sei also ein wichtiger Motor für Gründungen. Zu Leitorientierungen in Energie-Start-Ups dieser Branche stellt Fichter zwei Qualifizierungsarbeiten an der Uni-Oldenburg vor (Chichowitz 2016, Bergset 2016). Den Studien zufolge gibt es unterschiedliche Motive für die Gründung dieser Start-ups (von „Weltverbesserung“ und „Energiewende vorantreiben“ bis zur „Profitorientierung“). Allerdings seien ökologische Motive mehrheitlich ein Beweggrund. Fichter argumentiert, dass Start-ups aufgrund dieser ökologischen Orientierung gut qualifiziertes Personal anzuziehen vermögen. Es gebe in dieser Sparte einen überdurchschnittlich hohen Anteil an innovativen Gründungen. Ein Problem sei aber, dass die Start-ups oft mit hoher Produktkomplexität konfrontiert seien, was dann in langen Entwicklungszeiten resultiere, was wiederum einen hohen Finanzierungsaufwand bedeutete. Es handele sich meist um Nischenprodukte. Problematisch sei außerdem, dass vielen Investoren das nötige Fachwissen fehle und die Start-ups sehr abhängig von politischen Rahmenbedingungen und Genehmigungsverfahren seien. Diese könnten einen „Push“ darstellen, manchmal aber auch eine Behinderung.

Abschließend stellt er im Vortrag die Frage, wie die Rolle von Energie-Start-ups weiter gestärkt werden kann. Dazu zeigt er drei Ansätze auf. 1.) Leitorientierungen explizit machen, dazu wurde z.B. ein Instrument zur Geschäftsmodellentwicklung, der Sustainable Business Canvas entwickelt, 2.) Spezialisierung/Profilierung von Gründerzentren / Akzeleratoren / Cluster für grüne

Gründungen, 3.) Erhöhung der Sichtbarkeit von Energie-Start-ups und Schaffung von Vorbildern (Award, Gründerportal etc.).

Diskussion:

In der Diskussion stand zunächst die Rolle der Start-ups in Transformationsprozessen im Zentrum: Start-ups sind Schlüsselakteur für die Einführung von Innovationen in den Markt. Wenn dies gut gelungen sei, werden die Ideen eventuell von größeren Unternehmen aufgekauft (Kooperation, Joint Venture etc.). Ein leistungsfähiger Verband (z.B. der Solaranlagen-Hersteller) könne bspw. einen wichtigen Faktor darstellen, um aus der Nische herauszukommen und Einfluss auf die Förderbedingungen haben. So könnten auch engagierte Betreiber Regulation verändern (z.B. Power-to-Fuel). Des Weiteren wurde auf die Nachfrage hin erläutert, dass das Konzept der Resilienz eine Ergänzung der drei Dimensionen der Nachhaltigkeit, Effizienz, Konsistenz und Suffizienz um die Risikodimension darstelle. Es reiche nicht aus die „klassische Versorgungsicherheit" auszuweiten, da mit Resilienz auch eine Vorbereitung auf unknown unknowns durch Innovationsfähigkeit und Improvisationsfähigkeit von Systemen verstanden wird. Für dieses breiter gefasste Verständnis der Risikodimension sei vor allem im Kontakt mit Stakeholdern der Begriff der Resilienz wichtig.

Ergebnisse der Blitzlichtrunde zum Tagesabschluss: Erkenntnisse und Fragen zu den Beiträgen des ersten Tages stichpunktartig notiert

Generelle Anmerkungen:

- Ein solcher interdisziplinärer Austausch ist in diesem Gegenstandbereich unverzichtbar.
- Der Begriff der Effizienz ist mehrfach gefallen. Der Fokus sollte weiterhin auf Resilienz liegen, da z.B. Power-to-Fuel momentan im Hinblick auf Effizienz keine Chance hat.

Offengebliebene Fragen:

- Genauere Definitionen der Begriffe Region, Zelle und Ebene
- Abgrenzung zwischen resilience engineering (Hollnagel) und engineering resilience (Holling)
- Klarheit, wessen Resilienz gemeint ist und untersucht wird (Resilienz für wen?).
- Genauere Unterscheidung zwischen Schwarzen Schwänen und Unknown Unknowns
- Das optimale Maß an Subsidiarität
- Resilienz und Gesamtverantwortung. Wie mit Regionen umgegangen werden kann, die aufgrund ihrer ländlichen Beschaffenheit u.ä. nicht das notwendige Potential für eine dezentrale Versorgung mit erneuerbaren Energien aufweisen.

- Wann ist der Einsatz eines bestimmten Instrumentes am sinnvollsten? (z.B. unter welchen Bedingungen weist eine Risikoanalyse einen höheren Mehrwert auf als die Anwendung des Resilienzkonzeptes?)
- Wie resilient (bzw. vulnerabel) ist das gegenwärtige System und wie groß ist das Delta zum angestrebten Resilienten Energiesystem?

Anküpfungspunkte:

- Brands explorative, qualitative Untersuchungen sollten durch quantitative Analysen mit größerer, repräsentativer Fallzahl ergänzt werden.
- Fraglich bleibt, für welche Akteure außerhalb der Wissenschaft der Resilienzbegriff eine Rolle spielt, und ob dieser schon außerhalb dieses Diskurses aufgetaucht ist. Es gilt, konkrete Handlungsanweisungen zu Resilienz zu geben.
- Das Resilienzkonzept geht über den Begriff der Versorgungssicherheit hinaus und eignet sich daher auch sehr gut für Fragestellungen im internationalen Kontext, z.B. bezüglich Entwicklungs- und Schwellenländern.

Tag 2: Freitag 16. September 2016

Zentrale Erkenntnisse des Vortages

Ergebnisse

Allgemein:

- Für 100% Erneuerbare Energien müssen außer Strom noch die weiteren Sektoren berücksichtigt werden
- Eine Kopplung, z.B. der (leitungsgebundenen) Energieträger bzw. Energiesektoren (Strom, Wärme Mobilität), erhöht die Flexibilität aber auch die Komplexität!
- Leitbild-Genese in Top-Down Prozessen ist typisch für Wissenschaftler, die ihre Erkenntnisse umsetzen möchten.

Zellularität:

- Wie eng hängen Resilienz und der zellulare Ansatz zusammen?
- Optimale Größe der Zellen ist system- bzw. betrachtungsabhängig. D.h. eine generelle Aussage wird nicht möglich sein. Des Weiteren ist eine zellulare Struktur Skalen übergreifend (über mehrere Ebenen) zu betrachten.
- Aus der Analyse realer Inselsysteme (England, Irland, Canaren) lässt sich möglicherweise etwas lernen

Resilienz:

- Vulnerabilität, Resilienz und Risiko sollten stärker differenziert werden.
- Resilienz-Interpretation ist Kontext abhängig, z.B. Urban Resilienz
- Schleichende Herausforderungen wie z.B. der Klimawandel, bedeuten nicht, dass diese nur langsam passieren, sondern dass diese Ereignisse als nicht unmittelbar wahrnehmbar klassifiziert werden.
- Resilienz allein als Weg zum Umgang mit Schwarzen Schwänen zu begründen greift zu kurz und macht das Konzept zu defensiv, da Schwarze Schwäne schwierig zu greifen sind. Der Resilienzbegriff sollte mehr mit der Ergreifung von Chancen und Schaffung von Gestaltungsmöglichkeiten (Adaptions- und Innovationsfähigkeit) begründet werden.

Offene Fragen

Allgemein:

- Was sind genau die zusätzlichen Herausforderungen, die sich durch das 1,5 Grad Ziel ergeben?

Zellularität:

- Kann Subsidiarität auch Resilienz mindern?
- Wie sieht das optimale Level von Subsidiarität aus?
- Führt Zellularität zu regionalen Ungleichgewichten?
- Wie wird die optimale Größe von Zellen ermittelt?
- Welche Argumente sprechen für Zellularität als Resilienzgestaltungselement und für eine zellulare Strukturierung des Energiesystems?
- Eine zellulare Struktur erfordert eine Neuordnung der Zuständigkeiten. Wie sieht die Veränderung der Zuständigkeiten konkret aus?
- Wie werden angemessene Systemgrenzen bei der Analyse und der Gestaltung bestimmt?
- Was wird genau unter einer losen Kopplung verstanden (Sektoren, Energieträger, Netzebenen) – und in welcher spezifischen Form wirkt sich diese Resilienz steigernd?

Innovationssystem:

- Welche Rolle spielen Machtverhältnisse und Marktgrößen bei der Richtungsgebung?
- Wie lassen sich konkurrierende Leitbilder ermitteln und ggf. in einem Kräfteparallelogramm darstellen (Kampf der Schildkröten, Macht der Ideen)?
- Wie bringt man propagierte Leitbilder in Resonanz mit verinnerlichten Leitbildern?

Resilienz:

- Resilienz und Effizienz. In der Natur gibt es aufgrund von evolutionären Optimierungsprozessen wohl auch eine ‚effiziente Redundanz'.

- Nach welcher Systematik lassen sich die zusätzlichen Kosten, die durch die Implementierung von Resilienzmaßnahmen ergeben, umlegen?
- Wenn Resilienz gemessen werden soll, ist der Ansatz des Ernst-Mach-Instituts sehr überzeugend. (Bemerkung: Während die Universität Bremen Resilienz als Leitorientierung versteht und nicht Resilienz, sondern nur Vulnerabilität messen möchte, wird z.B. am Ernst-Mach-Institut versucht Resilienz zu quantifizieren. Siehe Zusammenfassung des Vortrages von Dr. Alexander Stolz.)
- Wie lässt sich die Dienstleistung, die ein resilientes System aufrecht zu erhalten hat, bestimmen?
- Wie lässt sich die Leitorientierung Resilienz in den Nachhaltigkeitsdiskurs einordnen?

Dr. Almut Kirchner, prognos Basel: Black Swans in der Energiewende

Frau Kirchner und andere überprüften in der von ihr vorgestellten Studie die Hypothese, dass die Stabilität der Energiewende von der Stabilität ihrer Rahmenbedingungen ausgeht. Sie verweist darauf, dass Black Swans schwer zu definieren sind, nennt aber drei Aspekte, die nach der in der Studie verwendeten Arbeitsdefinition einen Schwarzen Schwan ausmachen: 1.) Black Swans sind überraschend und unerwartet. Sie sind also Ereignisse mit einer relativ kleinen oder stark unterschätzten Eintrittswahrscheinlichkeit. 2.) Black Swans haben enorme Auswirkungen auf ein System, die Welt, auf die Art, wie wir die Welt betrachten. 3.) Nach ihrem Auftreten findet eine nachträgliche Rationalisierung statt („Hätte man sich eigentlich vorher denken können.“).

In der Studie standen zwei Fragestellungen im Zentrum: Welche Schwarzen Schwäne könnten auftreten? Und welche Möglichkeiten für ein Risikomanagement gibt es? Zu Klärung dieser Fragen mussten Risiken überdacht und klassifiziert werden. Es wurde gefragt, welche Risiken auf die Energiewende als komplexes, gesellschaftliches Projekt wirken. Dazu mussten, der Eingangshypothese folgend, Überlegungen angestellt werden, welche Risiken auf die Rahmenbedingungen der Energiewende wirken (Stabilität/Durchführbarkeit des Projektes) und welche Auswirkungen diese Risiken auf das Energiesystem haben. Ferner muss aber auch gefragt werden, welche Risiken, die noch nicht betrachtet wurden, im Prozess der Energiewende selbst steckten (z.B. schleichende Deindustrialisierung, Frage der Machtverhältnisse). Als Ziele der Energiewende nennt Kirchner die CO2- und EE-Ausbauziele der Bundesregierung. Zu den Rahmenbedingungen dieser Ziele zählt sie Rohstoffe für EE, Technologien für EE, Akzeptanz sowie die wirtschaftlichen, sozialen und politischen Verhältnisse. Alle identifizierten Risiken wurden in 15 Risikocluster zusammengefasst. Frau Kirchner erklärt, dass die Studie zu dem überraschenden Ergebnis kam, dass die meisten der erfassten Risiken beherrschbar seien. Allerdings gebe es auch Risiken, die schwierig zu handhaben seien (z.B. der Effekt von sehr günstigen Weltmarktpreisen fossiler Energieträger, mögliche Folgekosten von Klimaschutzstrategien (gesundheitlich

Wirkungen von Dämmstoffen) oder die Entwicklung anderer nicht-fossiler Technologien, wie z. B. der Kernfusionstechnologie oder Meereswasserstoff). Da das Wirtschaftlichkeitsprinzip sehr stark verankert sei, könnten sich langfristig günstige fossile Energiepreise als Schwarzer Schwan entpuppen und den Klimaschutzprozess nachhaltig torpedieren. Anschließend stellt Kirchner die Frage, inwiefern sich Möglichkeiten und Notwendigkeiten zum Handeln ergeben. Diese Handlungen könnten präventiv oder reaktiv erfolgen und auf der politischen oder der technischen Ebene angesiedelt sein. Außerdem müsste der Zeithorizont der Risiken mit bedacht werden. Kirchner sieht die Konsequenzen sowohl auf der Ebene der Ziele als auch der Strategien. Resilienz kann ihr zufolge als viertes Ziel in das energiepolitischen Zieldreieck aufgenommen werden oder als Erweiterung von Versorgungssicherheit interpretiert werden. Resilienz stehe im Spannungsverhältnis zu Wirtschaftlichkeit, was problematisch sei. Weitere Punkte sind für Kirchner die Art der Instrumentenausgestaltung (technologieoffen oder festgelegt) und die Art der Kommunikation. Kirchner kommt zu dem Fazit, dass der Schwerpunkt der Konsequenzen auf der Ziel-Ebene zu finden ist, d.h. die Frage interessiert, wie die Integration von Resilienz in die Gestaltung des Systems (technisch/organisatorisch) vollzogen werden kann. Die Instrumente seien vorhanden und seien anzupassen. Außerdem sei und bleibe die Kommunikation sehr wichtig.

Diskussion:

In der Darstellung von Frau Kirchner ist Akzeptanz im Bereich Prioritätenänderung angesiedelt, denn alle Risiken würden bei der Betrachtung von Wirkungsketten am Ende bei der Akzeptanz landen. Es wurde betont, dass Skandalisierung ein treffender Begriff für Risiken und Bedenken sei, die von gesellschaftlichen Initiativen öffentlich thematisiert werden. Es stellen sich jedoch Fragen wie: „Welche Rolle spielen die Medien? Wie kann eine funktionierende Kommunikation und insb. eine wechselseitige Kommunikation (nicht nur Top Down) umgesetzt werden? Es bestünde die Gefahr einer Scheinpartizipation, d.h. das Trassen bspw. „durchgedrückt“ würden. Hierbei ist auch eine Veränderung der Kommunikationsmentalität durch die Digitalisierung zu erwähnen. Wobei die Digitalisierung kein Schwarzer Schwan sei.

In Hinblick auf das Thema des Vortrages, Schwarze Schwäne, wurde darauf hingewiesen, dass sie attraktiv sind, weil sie auf etwas verweisen, was wir nicht kennen. Es sollte aber beachtet werden, dass Schwarze Schwäne ihre Farbe hin zu grau oder weiß ändern, wenn über sie geredet wird. Offen blieb die Frage, wer in Kenntnis über vermeintliche Schwarzen Schwäne gesetzt werden müsse, damit diese weiß würden. Ist ein kleiner Expertenkreis ausreichend oder müssen Entscheider Kenntnis davon haben. Es wurde eingewendet, dass es gar nicht darum ginge, Schwarze Schwäne (im Vorhinein) zu identifizieren. Vielmehr müsse der Blick weg von möglichen Störereignissen auf die möglicherweise betroffenen Systeme gerichtet werden. Sie gilt es durch eine vorsorgeorientierte Gestaltung auf das Unbekannte, auf Überraschungen, auf Schwarze Schwäne eben, vorzubereiten. Das Dilemma, dass Schwarze Schwäne als Störereignisse nicht

operationalisierbar sind, da sie durch die Untersuchung an Ungewissheit verlieren würden steckte bereits in der Vergabe des Auftrages und erforderte eine Ausweitung des Konzeptes des "Schwarzen Schwanes". Folglich wurden in der Studie nicht nur schwarze Schwäne berücksichtigt, sondern auch Technologien wie Speicher, CCS, nicht-fossile Technologien (als sogenannte „pink swans“), da solche Innovationen die Energiewende sehr stark verändern und zu nicht unerheblichen gestrandeten Investitionen führen können. Dies ist auch der Grund weshalb enorm günstige Speichertechnologien oder Kernfusion als Risiko genannt werden. Ihre Einbindung führt dazu, dass ein völlig anderes Energiesystem aufgebaut wird als ursprünglich geplant und könnte in diesem Übergang zu einer Destabilisierung auf gesellschaftlicher Ebene führen. Wobei in Frage gestellt wurde, ob Richtungsänderungen aufgrund von disruptiven Ereignissen nicht als Risiko, sondern auch als Chance betrachtet werden sollten. Die Bewertung der schwarzen Schwäne sei oft (auch im Vortrag) negativ, aber bspw. gehören Kosten (für Klimaschutz) immer zu einem Transitionsprozess dazu. Es wurde auch in Frage gestellt ob sehr günstige fossile Energie tatsächlich ein Risiko für die Energiewende darstelle, insb. da eine Dekarbonisierung erwünscht sei?

Die Diskussion zeigte, dass es bisher keine einheitliche Definition für schwarze Schwäne gibt. Hierzu wurden zwei mögliche Definitionen vorgeschlagen: 1.) ein unterschätztes „unknown“ oder 2.) Klassifizierung nach der Sicherheit, mit der die statistische Verteilungskurve eines Risikos beschrieben werden könne.

Der Begriff Schwarze Schwäne wird an der Uni Bremen genutzt, um für einen Umbau der Versorgungssysteme in Richtung auf Resilienz zu motivieren. Es stellt sich nun die Frage, wie und insb. von wem Resilienz stärker in die Ziele und Strategien integriert werden kann: Wer hat eigentlich Interesse an der Sicherheit von Versorgungssystemen z. B. gegenüber kriminellen Angriffen? Ist der Staat als regelsetzende Institution gefragt? Dafür spricht auch, dass Resilienz sich auf dem Markt nicht adäquat durchsetzen kann, weil sie im Spannungsverhältnis zu Effizienz und dadurch sich kurzfristig negativ zur Wirtschaftlichkeit verhält.

Dr. Nele Friedrichsen, Fraunhofer ISI Karlsruhe: Transitionspfade im deutschen Stromsystem: Entwicklungen in Netz, Erzeugung und Nachfrage – Interaktionen zwischen Nischen und Regimen

Frau Friedrichsen ging in ihrer Präsentation auf die Teilergebnisse des EU-Projektes Pathways ein. Der Klimawandel erfordert eine Transformation der Sektoren Strom, Wärme und Transport, in der Untersuchung standen vor allem die Interaktionen zwischen den jeweils als Sub-Systeme bzw. Regime betrachteten Bereichen des Elektrizitätssystems - Erzeugung, Nachfrage und Netz als Bindeglied - im Vordergrund sowie die Analyse von Innovationen und deren Auswirkungen auf die Regime. Für die Nischen- und Regimeanalyse wurde mit dem Multi-Level-Ansatz nach

Geels gearbeitet. Nischenentwicklungen oder Landschaftsveränderungen können einen destabilisierenden Druck auf das bestehende Regime ausüben und das Regime kann sich verändern, wenn Probleme und Bedarfe durch die Innovationen aus der Nische besser adressiert werden können. So ist durch die Anti-Atombewegung und den Klimawandel ein hoher Änderungsdruck auf das Erzeugungsregime entstanden, der einen breiten Systemwandel ausgelöst und die Nischeninnovationen Windkraft und Photovoltaik zu neuen Sub-Regimen etabliert hat. Durch die Etablierung neuer Akteure hat der Einfluss der großen vier Versorger deutlich nachgelassen. Das starke Wachstum erneuerbarer Energien kann als Erfolg bewertet werden, es entstehen aber auch neue Probleme wie Akzeptanzaspekte und die Diskussionen um Kosten- und Verteilungseffekte. Zudem wird durch die Veränderungen im Erzeugungsregime ein Anpassungsdruck auf das Stromnetz ausgelöst, mit der Folge eines steigenden Investitionsbedarfs für die Einhaltung der Qualitätsanforderungen. Obwohl der Netzaus- und -umbau begonnen hat, wird aufgrund einer eher konservativen Regulierung und von Akzeptanzproblemen bezüglich des Netzausbaus das Netzregime mit einem moderaten Lock-in bewertet. Auf Seite der Nachfrage haben sich in der jüngeren Vergangenheit nur inkrementelle Änderungen ergeben. Es handelt sich um ein stabiles Regime. Zukünftig wird es aber gerade hier auf radikale Änderungen ankommen, insbesondere bezüglich nachfrageseitiger Flexibilität und vor allem einer insgesamt verminderten Nachfrage nach Energie (bei gleichzeitiger Verschiebung zwischen den Sektoren, insb. einer zunehmenden Elektrizitätsnachfrage durch die Elektrifizierung von Wärme und Mobilität). Aufgrund bisher eher geringer Entwicklungen mit Blick auf höhere Effizienz und Nachfragereduktion wird diesem Regime ein relativ starker Lock-in zugeordnet.

Auf alle drei Regime wirkt ein Änderungsdruck durch den Klimawandel. Die stärksten Effekte zeigen sich schon jetzt im Erzeugungsregime durch gewachsene Nischentechnologien zur Stromerzeugung und das sich bereits wandelnde Regime. Dadurch entstehen Folgeeffekte im Netzregime und perspektivisch auch im Nachfrageregime. Nischeninnovationen wie Smart-Meter könnten die Energiewende unterstützen, indem eine intelligente Netzsteuerung und flexibilisierte Nachfrage zur Lösung des aus dem Erzeugungsregime kommenden Anpassungsdrucks beitragen.

Diskussion

Das Nachfrageregime wurde als stabiles Regime dargestellt. Es wird hier aber mit zunehmender Elektrifizierung des Verkehrs zu einem massiven Anstieg der Stromnachfrage kommen. Es wurde argumentiert, dass das Schildkrötenmodell äußerst hilfreich wäre, um Gelerntes aufzuzeigen und für die Zukunft zu dokumentieren. So könnte für den Lernprozess festgehalten werden, welche Einflussfaktoren es gab und zu welcher Veränderung diese geführt haben (z.B. der politische Wille war für die Energiewende sehr wichtig und die großen vier Energieversorger hatten kein Interesse am Wandel und hätten die Transformation verhindert). Auch eine Kombination des

Schildkrötenmodels (mit Push- und Pullfaktoren) mit einem Multi-Level-Ansatz könnte sehr nutzbringend sein, da auf der Basis dieser beider Modellen ein komplexes Handlungssystem entworfen werden könne, welches z.B. für Akteure wie Stadtwerke sehr hilfreich sei. Weiter wurde diskutiert, ob Smart-Meter tatsächlich ein Nischenprodukt seien, oder ob diese schon in den Massenmarkt etabliert wurden, da sie durch Gesetze in den Markt „katapultiert“ wurden. Die Analyse des Projektes endete im Sommer 2015 und beinhaltete daher diese neueren Gesetze nicht. Es könne jedoch festgehalten werden, dass Smart-Meter das Potential hätten, die Regime zu verändern.

Dr. Christoph Riegel, Bundesnetzagentur Bonn: Resiliente Energiesysteme - Durch den Ausbau der Übertragungsnetze?

Die Planung und der Ausbau des Stromnetzes sind wesentliche Bereiche der Infrastrukturplanung. Herr Riegel vermittelt einen kurzen Überblick über die Verfahrensschritte und die dabei verwendeten Begriffe ‚Raumwiderstände‘ und ‚kritische Infrastruktur‘. Im Zentrum des Vortrages von Herrn Riegel stand die Frage, wie kritische Bereiche innerhalb großer Infrastruktursysteme identifiziert (verortet) werden könnten. Unter einer kritischen Infrastruktur wird dabei (nach der Definition des Bundesministeriums des Innern, BMI) eine Organisation oder eine Einrichtung mit großer Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen verstanden, bei deren Ausfall oder Beeinträchtigung a) nachhaltig wirkende Versorgungsengpässe, b) erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit oder c) andere dramatische Folgen eintreten würden. Die Kritikalität hängt dabei (nach BMI) von den Konsequenzen für die Versorgungssicherheit der Bevölkerung ab. Die zunehmende Vernetzung zwischen und Abhängigkeit von technischen Systemen erhöht die Bedeutung des Themas Kritikalität in (zwischen) Infrastrukturen.

Das Ausfallrisiko wird durch den Grad der Gefährdung, die Anfälligkeit, das jeweilige Bewältigungspotenzial und die Kritikalität bestimmt. Herr Riegel erläuterte am Beispiel eines ausgewählten Gebietes, in dem sich mehrere Infrastrukturen überlagern (Proximitätswerte zwischen Hochspannungsleitung, Bahnlinie, Autobahn und Bundesstraße), die Bestimmung der funktionalen und der räumlichen Kritikalität dieser Strukturen. Ziel der Analyse ist es, in der Regionalplanung durch eine vorsorgeorientierte Gestaltung der Infrastrukturen ein erhöhtes Maß von Resilienz zu erreichen (Resilienzkultur). Resilienz wird von Herrn Riegel dabei umgangssprachlich verkürzt als die Fähigkeit, „wieder auf die Beine zu kommen“ verstanden und in die Bereiche a) Widerstandsfähigkeit, b) Bewältigungskapazität sowie c) Kreativität differenziert.

In dem von Herrn Riegel (in Anlehnung an Boone und Hart, 2013) vorgestellten „Resilienzwürfel“ spielen auf der strategischen Ebene auch Leitbilder bzw. Leitorientierungen eine Rolle. Daran anknüpfend präsentierte er ein „Schildkrötenmodell zum Netzausbau“ mit den aus seiner Sicht

wichtigen Einflussfaktoren. Wobei im „Vision Pull“ beispielhaft „die Energiewende“, „der Atomausstieg“ und „die Decarbonisierung“ dargestellt sind und im Skandalisierungspush „Monstermasten“ und „dreckiger Braunkohlstrom“.

Diskussion:

Fehlende Akzeptanz ist ein Problem. Akzeptanz kann man aber nicht herstellen, sie ist gewissermaßen emergent. Volle Transparenz über Risiken, Nachteile und Verlierer ist dabei notwendig, aber ggf. nur begrenzt hilfreich. Daher sind die frühzeitige Information sowie die Beteiligung der BürgerInnen wichtig, auch politische Akteure (z.B. Landräte) müssen rechtzeitig informiert und einbezogen werden. Ihre Einflüsse auf die Planungen könne die Akzeptanz erhöhen. Akzeptanz könne man nicht ‚herstellen‘ oder ‚beschaffen‘. Eine höhere Technikakzeptanz kann nur generiert werden, wenn von Beginn der Innovation an die Politik und andere Akteure offen Verlierer, Nachteile und auch Risiken thematisierten. Außerdem sollte deutlich gemacht werden, dass der Wille der BürgerInnen in der Umsetzung entscheidend sei. Es sei die richtige Vorgehensweise, wenn die Vorhabenträger, z.B. die Übertragungsnetzbetreiber, durch externe Gutachter unterstützt werden und über Öffentlichkeitsbeteiligung in der Phase der Antragserarbeitung mit allen Trägern öffentlicher Belange, z.B. Kommunen, aktiv kommunizieren um frühzeitig Hinweise in die Planung aufzunehmen und Bürger einzubinden.

Bezüglich der Netzplanung stellen sich auch Fragen nach zellulären Strukturen mit Blick auf Resilienz und ihre Umsetzbarkeit. Der Netzplan werde aber in Zyklen erstellt und überarbeitet, sodass es eine gewisse Zeit dauere, bis bestimmte Aspekte eingearbeitet werden könnten. Es werden allerdings auch heute schon weitere Aspekte in die Szenarioentwicklung mit einbezogen. Eine zellulare Struktur müsse dabei von Anfang an berücksichtigt werden (z.B. bereits im Schritt 1, dem Szenariorahmen). Da aber momentan hauptsächlich die Übertragungsnetzbetreiber für dessen Erstellung zuständig seien, fehle dieser Input noch. Entscheidend sei aber auch das Erreichen eines hinreichenden Konkretisierungsgrads. Der Prozess sei durch ein hohes Maß an Trägheit gekennzeichnet und sollte durch neue Ideen angetrieben werden.

Dr. Karsten Burges, Ecofys Germany, Berlin: Wie regionale Zellen zur Resilienz des Energiesystems beitragen

Herr Burges schickte voraus, dass seiner Einschätzung nach Zellen nichts am Bedarf der Übertragungskapazität ändern würden. Auch gehe es nicht vornehmlich um die Schwarzstartfähigkeit (die auf der Basis von mehrheitlich Windkraft wesentlich schwieriger wird), sondern um die Vermeidung des Black-Out‘ (‚unbemerktes Durchfahren der Störung‘). Er fokussierte in seinem Vortrag auf technische Aspekte von Zellen im elektrischen Energiesystem. Er wies darauf hin, dass der Begriff der regionalen Zelle bisher unscharf und eher subjektiv verwendet werde. Als Motivation für den Ansatz spielt die höhere Widerstandsfähigkeit gegenüber Großstörungen durch die

mögliche Inselnetzbildung eine wichtige Rolle. Er verweist darauf, dass mit neuen potenziellen Bedrohungen von immenser Wucht zu rechnen und andererseits die Abhängigkeit von der Energieversorgung ins Extreme gesteigert werde. Er plädiert dafür nicht vorranging geographische sondern funktionale Zellen zu bilden und zu betrachten, die im Falle einer Störung sich nicht unbedingt auf die volle Funktionsfähigkeit des Systems konzentrieren, sondern darauf, Kritische Infrastrukturen (KRITIS) gezielt und koordiniert aufrechtzuerhalten. Wenn Vollautarkie angestrebt würde, müsste man mit fünffach so hohen Stromkosten rechnen. Aus regulatorischer Sicht, gab es von Seiten der Netzbetreiber seit vielen Jahren starke Widerstände gegen eine Inselnetzbildung von Regionen, auch beispielsweise gegenüber Werksnetzen. Ebenso fordern die aktuellen Anschlussregeln für Erzeugungsanalgen eine Systemstützung bis zur Leistungsgrenze. Grundsätzliche Herausforderungen sind die Zustandserfassung der Netze, eine dynamische Ziehung der Systemgrenzen in Abhängigkeit von den Systemzuständen, die notwendige Geschwindigkeiten der Handlungen und eine gleitende Resynchronisation. Der Zustand aus dem heraus eine Zelle gebildet werden soll (Unterdeckung/Überspeisung) ist prinzipiell nicht vorhersehbar. Möchte man einen Übergang auch bei ungleichem Leistungsfluss ermöglichen, so muss die Trennung in Sekundenbruchteilen erfolgen, am besten innerhalb weniger Schwingungsperioden. Hohe Transienten, Lastabwürfe und die Trennung von Erzeugungsanlagen sind hierfür notwendig und müssen koordiniert werden. Dadurch entsteht gerade in vermeintlich resilienten Zellen eine sehr starke IT Abhängigkeit, mit der Folge, dass wieder neue Verletzlichkeiten geschaffen werden. Die Folgen der Abkopplung von Zellen für das Gesamtsystem sind grundsätzlich kaum vorhersagbar, wenn diese nicht in einem Moment des Leistungsgleichgewichtes geschieht, was in den seltensten Fällen der Fall sein wird. Demzufolge vertrat Herr Burges die These, dass zusätzliche Steuerung und Regelmechanismen auf regionaler Zellebene die Komplexität des Gesamtsystems eher erhöhen als erniedrigen würden. Abschließend wurden eine Reihe offener Fragen aufgezählt, die Betrieb, Kontrolle, IT-Abhängigkeit sowie Komplexität einer unbemerkten Inselnetzbildung adressierten.

Herr Burges fasste seine Erkenntnisse in einer Schluss-These zusammen. Funktionale Zellen würden eher die Resilienz erhöhen als regionale Zellen. Neben der Resilienz sollte das Augenmerk auch auf die Schwarzstartfähigkeit von funktionalen Zellen gerichtet werden.

Diskussion:

In der Diskussion kam die Frage auf, wer für die Steuerung funktionaler Zelle in Frage käme. Naturgemäß läge die Verantwortung bei den Netzbetreibern, da diese über die Daten verfügen und letztendlich die entscheidenden Akteure seien. Außerdem gäbe es bereits Konzepte zu abschaltbaren Lasten. Es wurde angemerkt, dass es hinsichtlich dieses Themas entscheidend sei, welche Akteure Marktmacht besäßen und wer Preise festlegen könne. In der Regel würden Mo-

nopolisten sehr konservativ agieren und sich ausschließlich nach abgesteckten Regularien richten. Das könnte innovatives Handeln behindern. Außerdem sei unklar, wer letztendlich die Mehrkosten tragen solle.

Die Thesen von Herrn Burges widersprachen, der im Projekt Resystra gehegten Hoffnung auf Komplexitätsreduktion durch einen Übergang zu zellularen Systemen. Es stellt sich somit die Frage ob diese Hoffnung nun als unrealistisch verworfen werden müsse? Das alte Energiesystem in Europa war vor allem durch Simplizität gekennzeichnet, für die kaum Computertechnologie notwendig war. Als Steuersignal diente die Frequenz als globale Größe. Herausfordernd sei nun, dass Einspeiser auf Basis erneuerbarer Energiequellen, die über Wechselrichter einspeisen, selbst keine Frequenz besitzen. Im Übrigen sei natürlich die Komplexität eine Herausforderung, sie wird aber nicht als unbeherrschbar angesehen.

Weiter wurde die Rolle von Inselnetzen als Geschäftsfeld diskutiert. Hierzu wurden bereits Pilotprojekte durchgeführt, auch zu automatisierten Arealnetzen. Dieser Ansatz reduziere die Komplexität über Automatisierung und würde sich deshalb mit hoher Wahrscheinlichkeit durchsetzen. Für eine Bewertung sei jedoch genaueres Datenmaterial zu Lastflüssen etc. notwendig. Außerdem gebe es bereits Akteure, die solche Inselnetze umsetzen würden. In diesem Kontext würden funktionale Zellen betrachtet, da Erzeugung und Verbrauch aufeinander abgestimmt sein müssten, um einen hohen Selbstversorgungsgrad zu erreichen.

Anschließend wurde besprochen, wie eine Priorisierung möglich sei, der zufolge nur die kritischen Infrastrukturen bei einer Abschaltung mit Strom versorgt werden. Abschaltungen seien sehr selten. Gemäß einem 5-Stufen Plan werde im Notfall ohne Regulierung oder Beteiligungsmöglichkeit geschaltet. Es werde bspw. über eine Abschaltung bestimmter Straßenzüge oder den Mittelspannungsring reguliert. Dort gebe es aber immer eine Mischung aus Lasten, sodass dies nicht zielführend wäre. Eine Option wäre, alle kritischen Infrastrukturen mit einem eigenen Netz auszustatten. Das wäre allerdings teuer. Eine zweite Möglichkeit wäre Kriterien zu schaffen, nach denen bestimmte Verbraucher abgeschaltet werden und hierfür Schalter einzurichten. Der zweite Ansatz sei eleganter als der erste, könne aber gut umgangen werden. Drittens wäre es denkbar, einen niedrigeren Stromtarif anzubieten, bei dem ein Abwurf erlaubt sei. Die einzelnen Haushalte könnten sich selber über Heimspeicher absichern. Allerdings sei dieser Mischansatz unattraktiv, da die Lasten Kosten-Nutzen-Verhältnisse ungleich verteilt wären. Es wurde vorgeschlagen, dass bei der Einführung von Smart-Grids die Verträge derart gestaltet werden könnten, dass bestimmte Abschaltungsprozesse bereits festgelegt werden. Die Abschaltung, die derzeit bei der Steuerung von unterbrechbaren Verbrauchern stattfinde, auch im Rahmen von DSM, unterscheide sich aber von der Abschaltung im Störungsfall, die nicht wünschenswert sei.

Prof. Dr. Armin Grunwald, Karlsruher Institut für Technologie und ITAS: Sozio-technische Resilienz: Gedanken aus ENERGY-TRANS

In seinem Vortrag stellte Herr Grunwald zunächst zusammenfassend die Kompetenzen und Denkweisen von ENERGY-TRANS vor, um aus dieser Perspektive auf die Thematik von RESYSTRA zu schauen. Im ersten Punkt des Vortrages ging es um die Wahrnehmung der Energiewende. Die große Euphorie mit Visionen wie „unbegrenzte Energieversorgung durch Erneuerbare“ sei inzwischen verflogen. Die Skandalisierung ist in vollem Gang (Energiearmut, Vogelhäcksler). Auch das BMWi schlägt inzwischen aufgrund zunehmender Debatten um Strompreise, Hochspannungsleitungen und Gerechtigkeitsfragen nur noch leisere Töne zum Thema Energiewende an. Es sei nicht zuletzt im Zuge der Thematisierung von Folgelasten allseits eine Ernüchterung eingetreten, auch wenn bisher noch nicht von einer „Wendestimmung“ weg von der Energiewende gesprochen werden könne.

Aus traditioneller Sicht bestehe das Energiesystem aus zwei Seiten: Den Ingenieuren hinter der Steckdose, die sich um das System kümmern und den Bürgern, die sich vor der Steckdose befinden und vom eigentlichen System nichts bemerken solange nichts „stört“. Die Steckdose und das Bankkonto sind die Schnittstellen zwischen diesen zwei Welten. In der Realität ist die Energieinfrastruktur weit mehr als ein rein technisches System, sie wird vielmehr an gesellschaftliche Prozesse und Lebensstile angepasst und umgekehrt, so dass eine technische und gesellschaftliche Symbiose entsteht. Somit handelt es sich bei der Energiewende nicht einfach um eine technische Transformation. Sozio-technische Wechselwirkungen müssen ebenfalls mit transformiert und nicht intendierte Folgen wie Gerechtigkeitsprobleme mit verarbeitet werden. Es geht um einen Umbau ‚auf hoher See und im laufenden Betrieb‘.

Für ein resilientes Energiesystem sind aus sozio-technischer Sichtweise also Innovationen gefordert, die vor allem eine Effizienzsteigerung und Netzsteuerung ermöglichen und jeweils eigene Resilienzanforderungen besitzen. Gleichzeitig müssen Infrastrukturen transformiert bzw. teilweise neu errichten werden. Traditionelle Grenzen zwischen unterschiedlichen Infrastrukturen lösen sich auf, es entsteht stattdessen eine Mega-Infrastruktur mit komplexen Resilienzanforderungen. Soziale und ökonomische Verhältnisse müssen sich zudem ebenfalls anpassen, wobei die Frage aufkam, ob die gesellschaftliche „Trägheit“ Resilienz steigernd oder hinderlich sei. Ein Aspekt sozialer Resilienz ist die Verteilungsgerechtigkeit von ‚Kosten‘ (nicht nur geldökonomisch). Als Ganzes betrachtet existiert die Frage, welche Risiken die Gesellschaft bereit ist zu tragen. Wie weit reicht die Bereitschaft für die Stabilität des Gesamtsystems Abstriche am eigenen Interesse zu akzeptieren. Bezüglich Standortfragen sind somit beispielsweise Individualinteressen und Gemeinwohl gegeneinander abzuwägen. Entsprechend sind im Energiesystem nicht nur die Ingenieure hinter der Steckdose, sondern auch die Nutzer vor der Steckdose für Resilienz mit verantwortlich.

Eine Flexibilisierung der Nachfrage erscheint technisch zur Steigerung der Resilienz sinnvoll. Demand Side Management wird bisher jedoch zu technisch gedacht, da die individuelle Nachfrage sich nicht managen lässt wie eine technische Anlage. Es geht eher darum, wie es um die Solidarität zur Resilienzsteigerung steht. Eine Vorbereitung auf unterschiedliche Qualitätsniveaus der Systemleistungen ist somit notwendig. Eine subsidiäre Steuerung könnte für mehr Solidarität sorgen, da sich eine andere Verantwortungsverteilung ergeben würde.

Diskussion:

Es wurde angemerkt, dass das Thema der Versorgungssicherheit in einem neuen Rahmen diskutiert werden muss. Versorgungssicherheit sollte nicht mehr als unantastbares Gut betrachtet werden. Die Frage sei vielmehr, wer dazu bereit ist, für einen etwaigen Black Out zu bezahlen oder zurückzustecken. Diese Grundsatzdiskussion würde sich noch lange nicht auf dem Weg zu einer Lösung befinden. In dieser Debatte seien die Industrie, Experten und Verbände involviert, während die Verbraucher bisher außen vor blieben. Der soziale Aspekt werde vor allem im Zusammenhang mit der Subsidiarität sichtbar. Hier stelle sich die Frage, wem Verantwortung beigemessen wird, und ob dies nicht der Schlüssel zur Etablierung eines resilientes Systems sei, denn dies würde zu mehr Information und Eigenverantwortung führen.

Als ein Problem wurde benannt, dass es sich im Laufe der Zeit ein „Leben on demand“ als Status Quo etabliert habe, weswegen z.B. auch die Idee des Notfallversorgungskonzeptes des Innenministers keinen Anklang bei der Bevölkerung mehr finde. Diesbezüglich entscheidend sei die Festlegung der Systemgrenze. Es werden transparente, simple Angebote benötigt, wie z.B. ein Preisnachlass für die Inkaufnahme von Stromausfällen. Ein ähnliches Prinzip funktioniere z.B. bei Billig-Flugairlines, da auch dort die Verbraucher bereit seien, für einen geminderten Preis auch geminderten Komfort etc. in Kauf zu nehmen. Die Komponente der Nutzer sei implizit in der in Resystra verwendeten Definition von Resilienz integriert, da es hier um die Aufrechterhaltung der Systemleistungen geht und von den Nutzern festgelegt würde, wie die direkten und indirekten Qualitätskriterien definiert seien. Weiter wurde argumentiert, dass diesbezüglich immer die Selbstbestimmungsfähigkeit als Motivation berücksichtigt werden sollte, da die Option auf ein hohes Maß an Selbstbestimmung auch die allgemeine Akzeptanz der Innovation steigern würde. Hier können auch im Rahmen der Suffizienzdebatte weitergedacht werden, denn es wäre nützlich, weniger von „Verzicht“ zu sprechen als vielmehr von einem „richtigen Maß“ bzw. von ‚wieviel ist genug?‘ Bisherige Untersuchungen zeigten jedoch, dass Akteure sehr heterogen seien. Auch unter den Verbrauchern gäbe es Leitakteure, z. B. Early-Adopters, die als Vorbilder und Trendsetter für andere Verbraucher wirkten.

Des Weiteren wurde betont, dass Resilienz als Leitbild das 100%-EE-Leitbild um den Aspekt Widerstandskraft ergänzen könne.

Zusammenfassung der wichtigsten Workshoperkenntnisse

Resilienz, Zellularität, Subsidiarität und Komplexität

- Resilienz als vierte Nachhaltigkeitsstrategie – neben Effizienz, Konsistenz und Suffizienz – stößt auf Zustimmung. Aufmerksamkeit verdienen aber die Spannungsmomente zwischen diesen vieren.
- Die Komplexität des Energiesystems wird im Zuge der Energiewende im Vergleich zum ‚alten hierarchischen System' in jedem Fall zunehmen. Nicht nur Zellen und deren subsidiäre Steuerung benötigten schließlich komplexitätssteigernde Regelmechanismen (Burges). Ob eine zelluläre Gestaltung diese Komplexität definitiv weiter erhöht oder vermindert, ist ggf. derzeit noch nicht absehbar. Auf jeden Fall kommt es darauf an, auf die Schwarzstartfähigkeit der Zellen zu achten. Auch der Hinweis auf die entstehende ‚Megainfrastruktur' ist beim Thema Komplexität zu berücksichtigen (Grunwald).
- Zellen sollten eher funktional als räumlich definiert werden. Dies würde einen Ansatzpunkt zur Bewältigung des Problems der Solidarität zwischen Zellen (z. B. zwischen Selbstversorgern und Großverbrauchern) bieten. Die optimale Größe von Zellen und das optimale Maß an Subsidiarität sind system- bzw. betrachtungsabhängig. D.h. eine generelle Aussage wird nicht möglich sein. Des Weiteren ist eine funktionelle zellulare Struktur Skalen übergreifend (über mehrere Ebenen) zu betrachten.
- Ein interessanter Ansatz ist die Priorisierung der im Krisenfall aufrecht zu erhaltenden Systemleistungen sowie eine Verständigung über unterschiedliche Qualitäten der Versorgung.
- Offen blieb die Frage, ob die Kopplung (bzw. welche Form der Kopplung) zwischen den (leitungsgebundenen Systemen) Resilienz erhöhend oder Resilienz mindernd wirkt (nur energetische Kopplung oder auch Kuppelproduktion (bspw. Chemieindustrie bzw. Perspektive P2X und Chemie).

Leitkonzept Resilienz und Gestaltungsleitbild Resilientes Energiesystem

- Resilienz wird auch in den Ingenieurwissenschaften noch höchst unterschiedlich verstanden. Dies führt zu nicht unerheblichen Verständigungsproblemen. Das Bremer Verständnis von Resilienz, mit seiner Unterscheidung zwischen dem Resilienten System einerseits und seinen Fähigkeiten und Systemleistungen andererseits, lässt sich mit dem jüngst weiter entwickelten Konzept des ‚Resilienz Engineering' von Hollnagel gut zusammen führen. Hollnagel: „A system is resilient if it can adjust its functioning prior to, during, or following events (changes, disturbances, and opportunities), and thereby sustain required operations under both expected and unexpected conditions" Hollnagel 2016[122]. Auch er hebt mittlerweile

[122] Siehe: http://erikhollnagel.com/ideas/resilience-engineering.html

nicht mehr auf Systemerhalt bzw. Erhalt der Systemfunktionalität ab, sondern unterscheidet zwischen dem Resilienten System und seinen 'required operations'. Auch das Leistungszentrum Nachhaltigkeit an der Universität Freiburg, an dem das Ernst-Mach-Institut Freiburg mit einem Projekt zur Messung von Resilienz beteiligt ist (vgl. den Vortrag von Herrn Stolz), arbeitet mit den Fähigkeiten Resilienter Systeme (Widerstands-, Anpassungs- und Lernfähigkeit). Wobei allerdings die Unterscheidung zwischen Resilientem System und dessen Systemleistungen nicht gleichermaßen ausgeprägt ist: „Unter Resilienz verstehen wir die Fähigkeit, durch widrige Ereignisse verursachte menschliche, finanzielle und sonstige Schäden zu verhindern oder zumindest zu minimieren und im Idealfall aus dem Ereignis gestärkt hervorzugehen" (o. J.).[123].

- Vulnerabilität, Resilienz und Risiko sollten stärker differenziert werden.
- Es stellt sich die Frage wo genau eine Risikoanalyse gefragt ist und wo sich das Leitkonzept Resilienz als geeigneteren Zugang erweist?
- Die Verortung des Leitkonzepts Resilientes Energiesystem im energiepolitischen Zieldreieck/-viereck und die Einordung von Resilienz in die drei Nachhaltigkeitsprinzipien (Effizienz, Suffizienz, Konsistenz) müssen weiter vertieft werden, ebenso das Verhältnis von Resilienz einerseits und Effizienz (Stoff- und Energieströme) und Wirtschaftlichkeit (Geldströme) andererseits.
- Das Spannungsverhältnis von Resilienz und Effizienz sowie Effizienz und Wirtschaftlichkeit bleibt eine große Herausforderung bei der Integration von Resilienz in die Ziele und Strategien der Energiewende.
- Auch angesichts der Tabuisierung von Versorgungssicherheit (wenn auch aus unterschiedlichen Gründen) durch Verfechter der Erneuerbarer Energien und durch die EVUs stellt sich die Frage, wie und insb. von wem Resilienz stärker in die Ziele und Strategien der Energiewende integriert werden kann. Dabei geht es auch darum zwischen lang- und kurzfristiger Effizienz zu unterscheiden sowie zwischen verschiedenen Graden der Versorgungssicherheit. Die langfristige Effizienz und die „erweiterte" Versorgungssicherheit müssen genauer definiert oder zumindest beschrieben werden.
- Die Propagierung von Resilienz mit dem Hinweis auf mögliche Schwarze Schwäne, auf die nur ein Resilientes System vorbereitet sein kann, ist zwar richtig, greift aber mit Blick auf die Fähigkeiten Resilienter Systeme deutlich zu kurz (Kirchner). Es geht schließlich nicht nur um Widerstandsfähigkeit und Improvisationsfähigkeit, sondern auch um Adaptions- und Innovationsfähigkeit. Ein weiteres Problem liegt darin, dass das Konzept ‚Schwarzer Schwan' nicht hinreichend definiert ist, bzw. unpräzise verwendet wird. Als Schwarze Schwäne sollten nur diejenigen Ereignisse bezeichnet werden, die wirklich nicht

[123] Siehe: http://www.leistungszentrum-nachhaltigkeit.de/themen/resilience-engineering/

vorhersehbar waren, also echte Überraschungen darstellten, wie z. B. die ozonzerstörende Wirkung von FCKWs oder das Auftreten von HIV/AIDS und BSE.

- Wer ist Adressat der Forderung nach Resilienz (Frage von Herrn Stolz)? Der Staat? Unternehmen eher nicht?
- Resilienz als Ziel in der Regional- bzw. Infrastrukturplanung (Vortrag von Herrn Riegel): (i) Ausgewählte kritische Regionen (hot spots) – ein Ansatzpunkt! (ii) Akteure und Zuständigkeiten werden adressiert (Planung). (iii)Ebenso: Wo muss das Ziel Resilienz in die Netzplanung eingebaut werden? Antwort: Erster Schritt im Szenariorahmen. Können kritische Regionen und Kontexte (hot spots) als bevorzugte Testfelder für Resiliente Systeme dienen?

Gestaltungsleitbilder Resilientes Energiesystem in den Fallbeispielen

- Die vorfindbaren bereits verinnerlichten Leitorientierungen bieten nicht automatisch einfache Anknüpfungspunkte für das Leitkonzept Resiliente Systeme.
- Top-down- Leitorientierungsprozesse sind nur begrenzt erfolgreich, wenn es nicht gelingt, diese schon verinnerlichten Leitorientierungen mit dem Leitkonzept Resilientes Energiesystem im Konsens zu verbinden. Zudem müssen die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen und die vorfindbaren Bedingungen vor Ort Anknüpfungspunkte und Maßnahmenoptionen ermöglichen. Nur dann wird das Leitkonzept auch zu einem ‚performativen Konzept' (Fichter).

Möglichkeiten und Grenzen der Gestaltung von Systeminnovationen mit Hilfe von Leitorientierungen

Zu berücksichtigende Anmerkungen bezogen sich vor allem auf:

- Die Praxis und Reichweite von Leitorientierungsprozessen (Top-Down vs. Bottom Up sowie die Grenzen der Richtungssicherheit).
- Die Rolle von konkurrierenden Leitkonzepten und die Berücksichtigung von relevanten Konstellationen (auch Macht).
- Die Rolle von Akteuren und möglichen Adressaten, für welche Resilienz ein wichtiges Kriterium darstellen soll: Auf welcher Ebene und zu welchem Zeitpunkt? (Fokus u.a. Planung).
- Die Rolle der Rahmenbedingungen (auf die in den regionalen Fallstudien immer auch verwiesen wurde), die weiterreichende Schritte erst ermöglichen.
- Die auf die zu transformierenden Systeme bezogenen Wirksamkeitsfaktoren „Zeitgemäßheit" (Gelegenheitsfenster) und „Problemlösungsorientierung" sind besonders interpretationsfähig und stark abhängig von der Wahrnehmung von Systemzuständen durch

die jeweiligen Adressaten und Adressanten.

- Eine Generalisierung in Form von Handlungsempfehlungen, d.h. auf welche Weise Leitorientierungsprozesse durchgeführt werden sollten, ist nur eingeschränkt möglich, solange nur drei Fallstudien untersucht wurden.
- Es muss stärker herausgestellt werden, dass in den Untersuchungen nicht darüber geurteilt wurde, ob die intendierte Richtung „richtig“ ist, sondern, ob mit den Leitkonzepten Resilienz bzw. Nachhaltigkeit Systeminnovationen richtungsgebend beeinflusst werden können. Außerdem lag der Fokus der Studien nicht auf der Frage, welches Begriffskonzept (Vision, mentales Modell, Leitorientierung, Utopie o.ä.) am besten zur Richtungsgebung eingesetzt werden kann. Es muss aber begründet werden, warum Leitbilder bzw. Leitorientierungen ausgewählt wurden.

Schildkrötenmodell der richtungsgebenden Einflussfaktoren

- Das weiterentwickelte Schildkrötenmodell im Projekt/Dissertation von Frau Brand stellt eine hilfreiche Strukturierung für mögliche Richtungsimpulse und eine Adaptation für Systeminnovationen dar. Das Schildkrötenmodell dient gleich mehreren Zwecken: Es ist 1. Analyseraster und dient 2. als Struktur zur Veranschaulichung der Ergebnisse der Innovationsforschung, es ist 3. Grundlage der agentenbasierten Modellierung (Strukturierung von Modellelementen und Beziehungen zwischen ihnen) sowie 4. Grundlage der Maßnahmenoptionen.
- Zur Gewichtung der Einflussfaktoren/Richtungsimpulse kann keine allgemeine Aussage gemacht werden. Sie ist nur bezogen auf den jeweils untersuchten Fall beurteilbar. Die untersuchten Fallstudien zeigten, dass Leitkonzepte eine wichtige Rolle spielen, aber nur im Zusammenspiel mit anderen Einflussfaktoren wirken.
- Es ist im Schildkrötenmodell stärker darauf hinzuweisen, dass auch inkompatible Einflussfaktoren (z.B. konkurrierende Leitkonzepte) existieren und wirken.
- Der Leitakteur leitet nicht nur im ideellen Sinne, sondern auch durch faktisches Handeln.
- Beim den richtungsgebenden Einflussfaktoren „Anreiz Pull“ und „Leitakteure“ sind weitaus mehr Richtungsimpulse zu berücksichtigen als nur Energiegenossenschaften, z.B. Start-Ups.
- Das Unternehmertum (Akteure wie Genossenschaften, NGOs, Bürger etc.) hat eine wichtige Rolle als Richtungsgeber.
- Es muss im Schildkrötenmodell stärker berücksichtigt werden, von welchem Akteur mit welchen Machtverhältnissen der Richtungsimpuls kommt, u.a. um die Frage zu beantworten, welche Wirkungsstärke einzelne Richtungsimpulse haben.
- Der Skandalisierungs-Push ist ein wichtiger, bisher nicht angemessen berücksichtigter richtungsgebender, bzw. destabilisierender Einflussfaktor