

Dekarbonisierung des Busverkehrs in Städten

Die Antriebswende im Busverkehr kommt und viele Strategien stehen dafür zur Verfügung – doch wie wirtschaftlich sind die verschiedenen Technologien und welche Klimabilanz haben diese gegenüber konventionellen Antrieben? Analyse und Vorstellung der neuen „eObus“-Linie in Salzburg

Fabien Laurent, Berlin; Peter Brandl, Salzburg

Um den Klimawandel zu hemmen sind gravierende Änderungen im Verkehrssektor erforderlich. Die anthropogene Mobilität und der Gütertransport sollen im Jahr 2050 weitgehend klimaneutral erfolgen, um das Pariser Abkommen zu erfüllen. Der aktuelle Trend zeigt leider in die Gegenrichtung: Für den Verkehr werden zunehmend mehr fossile Kraftstoffe verbrannt. Laut den letzten Einschätzungen der Europäischen Umweltagentur (EUA) lagen die verkehrsbezogenen Treibhausgasemissionen in der EU im Jahr 2017 um 28 Prozent höher als 1990 [1]. Dabei ist der Straßenverkehr mit 82 Prozent der sektorspezifischen Emissionen der Hauptverursacher.

Neben der Verlagerung von Verkehrsleistungen auf den nicht motorisierten Verkehr oder bereits elektrisch fahrende Verkehrsmittel ist daher eine Antriebstechnikwende im Straßenverkehr erforderlich. Um die Emissionen des Verkehrs zu senken sind 2019 auf EU-Ebene mehrere Regelungen beschlossen worden, die unter anderem geringere CO₂-Grenzwerte für neuzugelassene Pkw und Lkw bis 2025 und 2030 festlegen.

Die zügigsten und konkretesten Vorgaben der EU wurden aber im Bereich der Beschaffung neuer Linienbusse für den ÖPNV gesetzt. Mit Verabschiedung der „Clean-Vehicles“-Richtlinie (EU 2019/1161) sind die EU-Mitgliedsstaaten bereits ab Mitte 2021 dazu verpflichtet, emissionsarme und emissionsfreie Fahrzeuge in vorgeschriebenen Mindestmengen einzuführen. So sollen in den meisten westeuropäischen Ländern, inklusive Deutschland und Österreich, im Zeitraum von August 2021 bis Dezember 2025 mindestens 22,5 Prozent der neu beschaff-

ten Linienbusse emissionsfrei, das heißt ohne Verbrennungsmotor, sein. Für eine zweite Periode bis Dezember 2030 beträgt die Quote 32,5 Prozent.

Der Busverkehr soll damit zum Spitzenreiter der Antriebswende werden und den Markt für alternative Antriebe fördern. Für Aufgabenträger und Verkehrsunternehmen des ÖPNV, insbesondere im städtischen Verkehr, heißt das aber auch, dass sie jetzt handeln und ihre Dekarbonisierungsstrategien entwickeln müssen.

Technische Möglichkeiten alternativer Antriebe für Busse

Als Ersatz für fossile Kraftstoffe stehen mehrere nicht-fossile Alternativen zur Verfügung. Zum einen kann Strom aus erneuerbaren Energiequellen für die direkte Versorgung von Elektrobussen mittels Oberleitungen oder für die Nachladung von deren Batterien genutzt werden. Verschie-

dene Ladekonzepte mit Ladeinfrastruktur im Depot, an Endstellen oder an der Strecke werden am Markt angeboten (Abb. 2). Alternativ können Brennstoffzellenbusse in Kombination mit „grünem“ ökostrom-basiertem Wasserstoff genutzt werden. Des Weiteren können Busse auch von Verbrennungsmotoren mit Biokraftstoffen (Biogas) angetrieben werden. In diesem Artikel wird allerdings der Fokus auf lokal emissionsfreie Antriebe gesetzt.

Wie in der VDV-Elektrobuskonferenz 2020 berichtet, werden in Deutschland derzeit zwei Strategien am meisten umgesetzt: Über die Hälfte der 60 vom Bund geförderten Vorhaben betreffen Batteriebusse mit einer Nachladung im Betriebshof (=> Depotladung), ein Viertel Batteriebusse mit Nachladung an Endstellen (=> Endstellenladung). Bei der Depotladung sind insbesondere Standard-12m-Busse am Markt verfügbar. Gelenkbusse mit ausschließlicher Depotladung sind bei deutschen

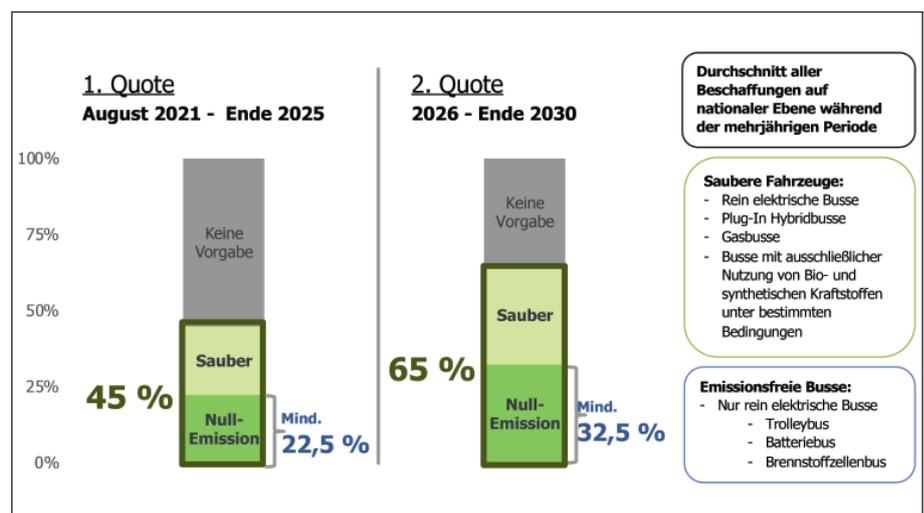


Abb. 1: Übersicht der Beschaffungsvorgaben der neuen Clean-Vehicles Directive.



Zum Autor

Fabien Laurent ist Verkehrsplaner und absolvierte im Rahmen eines Doppeldiploms an der École Centrale Paris und an der Technische Universität Berlin sein Studium. Seit 2018 arbeitet er bei KCW in Berlin und beschäftigt sich dort mit Themen der Verkehrswende generell und insbesondere mit Strategien zur Umstellung des Busverkehrs auf alternative Antriebe für Aufgabenträger des ÖPNV.



Zum Autor

Peter Brandl ist als Bereichs- und Betriebsleiter für den Verkehr der Salzburg AG verantwortlich. Er studierte an der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck Bauingenieurwesen mit der Vertiefung Verkehrswesen und Infrastrukturplanung. Unter anderem nach seiner Tätigkeit im Bereich der Verkehrsökonomie bei der PTV in Karlsruhe ist Brandl seit 2001 bei der Salzburg AG tätig.

Herstellern 2020/2021 als serienreif angekündigt. Um möglichst lange Umläufe bewältigen zu können, sind die Fahrzeuge mit entsprechenden großen Energiespeichern ausgestattet, soweit die Nutzlast (und in fine die Fahrgastkapazität) vom Batteriegewicht nicht erheblich beeinträchtigt wird. Bei Standardbussen können Batterien typischerweise zwischen zwei und drei Tonnen schwer sein, wodurch verlässliche Reichweiten von 150 bis 200 km auch unter ungünstigen Betriebsbedingungen erreicht werden können. Dabei gilt es zwischen Verbrennungszusatzheizung und Reichweite abzuwägen. Die Einsetzbarkeit des Depot-

laders bleibt im Vergleich zum konventionellen Dieselbus (>400 km Reichweite) deutlich geringer. Je nach bisheriger Umlaufstruktur sind damit erhebliche Mehraufwände bei Fahrzeugen, Fahrpersonal und Abstellflächen in Kauf zu nehmen. Infrastrukturseitig liegt eine wesentliche Herausforderung bei großen Flotten in der optimierten Nachladung der Fahrzeuge und im entsprechenden Ausbau des Stromnetzanschlusses im Betriebshof.

Obwohl die Energiedichten von Li-Ion-Batterien auf Zellebene nur noch wenige Fortschritte aufweisen, werden auf Modul-

ebene größere Kapazitäten erreicht: Ende 2018 lag die typische Batteriekapazität von 12m-Depotladern noch bei 250–350 kWh. Anfang 2020 weisen die neusten Modelle über 400 kWh auf und ab 2021 werden von einigen Batterieherstellern Kapazitäten von 500 kWh ohne Gewichtserhöhung in Aussicht gestellt. Damit könnte ein Standardbus künftig einwandfrei über 250 km ohne Nachladung zurücklegen. Größere Kapazitäten erhöhen aber auch die künftigen Ladezeit- und Leistungsbedarfe von Depotladern im Betriebshof. Es bleibt auch die Frage, ob diese Entwicklungen mit einer Verringerung des ökologischen Fußabdrucks von Batterien einhergeht.

Bei einer Endstellenladung werden im direkten Umfeld der Endstelle Abstellflächen gesichert und Schnellladesäulen mit entsprechendem Unterwerk errichtet. Um die Ladezeit an der Endhaltestelle zu verringern, werden die Batterien meistens konduktiv per Pantographen nachgeladen, welche die höchsten Ladeleistungen erlauben. Damit die starken Ladeleistungen die Batterielebensdauer nicht negativ beeinträchtigen, müssen hochleistungsfähige Batterien zum Einsatz kommen. Dafür sinkt der Speicherbedarf, denn die Batterie muss nicht mehr einen ganzen Tagesumlauf bewältigen. Sie wird in der Regel für eine Reichweite von zirka 50 bis 60 km dimensioniert, damit der Bus beim Ausfall eines Ladepunkts oder bei Verspätungen ohne Aufladen bis zur nächsten Endhaltestelle weiterfahren kann. So sind bereits Gelenkbusse (Batteriegrößenordnung: 180 kWh)

Quelle: Darstellung der Autoren aus trolley:motion*

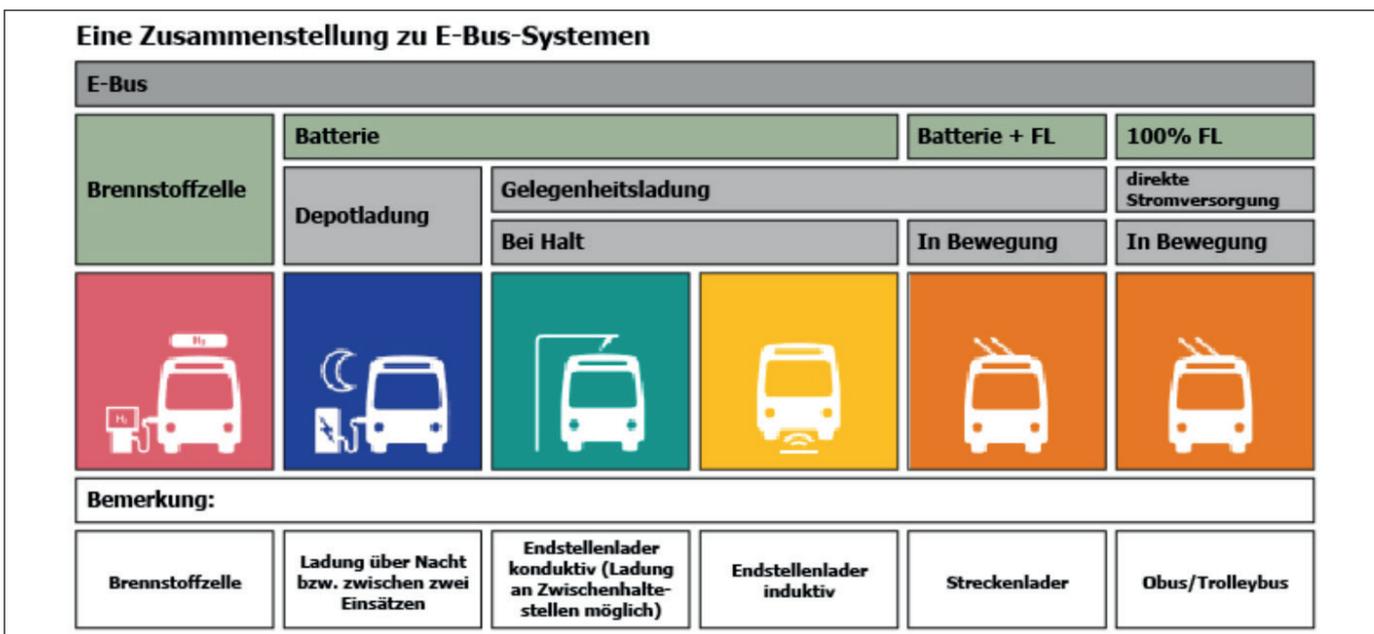


Abb. 2: Übersicht der unterschiedlichen Systeme mit emissionsfreiem Antrieb. * <https://www.trolley:motion.eu/freier-wissensbereich/>, Okt.2019

mit diesem Ladekonzept im Einsatz. Gegebenenfalls müssen die Umläufe mit längeren Wendezeiten angepasst werden, um neben der Ladezeit auch ausreichende Pufferzeit zum Abbau von Verspätungen zu gewährleisten. Eine erweiterte Form ist hier die Gelegenheitsladung an verschiedenen Zwischenhaltestellen, die allerdings bisher nur in wenigen Pilotprojekten eingesetzt wird.

Zudem gewinnt ein drittes Ladekonzept für batterieelektrische Busse, nämlich das Nachladen der Batterien während der Fahrt (=> Streckenladung; auch In-Motion-Charging genannt [2]) mit partieller Elektrifizierung des Linienwegs mittels Oberleitung an Bedeutung. Die Ladetechnologie beruht auf der von Obussen (in mehreren Regionen auch als Trolleybusse bezeichnet), die seit mehr als einhundert Jahren einen elektrischen und emissionsfreien Busbetrieb ermöglicht. Mit sehr hoher Zuverlässigkeit und langer Nutzungsdauer (>18 Jahre) fahren Obusse in weltweit über 300 aktiven Trolleybusnetzen. Salzburg in Österreich wie auch Zürich in der Schweiz sind mit jeweils über 110 Obussen Spitzenreiter im deutschsprachigen Raum.

Durch die Anwendung dieser bewährten Technologie für die Nachladung von Batteriebussen während der Fahrt kann der Freiheitsgrad des Batteriebusse mit der Zuverlässigkeit des Trolleybusses kombiniert werden. Da die Nachladung regelmäßig während der produktiven Zeit im Fahrgastbetrieb stattfindet, hat die Umstellung auf Streckenladung grundsätzlich keine Auswirkung auf die Umläufe und die erforderliche Reichweite im Batteriebetrieb kann auf 10 bis 20 km gesenkt werden. Selbst bei Gelenkbussen beträgt die erforderliche Batteriekapazität damit nur noch zirka 60 kWh. Insbesondere in Städten, die bereits über ein Oberleitungsnetz verfügen, können Dieselbuslinien, die teilweise unter Oberleitung verkehren, mit nur geringen Infrastrukturkosten auf Elektrobetrieb umgestellt werden, wie beispielsweise in Zürich, Solingen oder Salzburg (siehe unten). In Deutschland planen aber auch Städte ohne Obusbetrieb wie Berlin und Marburg die Einführung dieser Technologie für Linien mit langen Fahrzeugen und dichten Takten. Die chinesische Hauptstadt Beijing hat bereits ab 2015 die meisten ihrer BRT-Linien auf Gelenkbusse mit Streckenladung umgestellt [3]. Je nach Anwendungsfall kann der oberleitungsfreie Anteil 40 bis 70 Prozent des Linienwegs betragen [4], wobei nicht nur die Batterie-

kapazität, sondern auch die Ladezeit und die Leistungsfähigkeit der notwendigen Infrastruktur (Oberleitung und Unterwerke) ausschlaggebend sind. Höhere Elektrifizierungsgrade verringern darüber hinaus die Belastung der Batterien. Die Ladestrecken können dort errichtet werden, wo es unter den Gesichtspunkten der Wirtschaftlichkeit, der Angebotsplanung, der betrieblichen Erfordernisse und der Stadtverträglichkeit am sinnvollsten erscheint.

Ein weiteres batterieelektrisches Ladekonzept besteht mit dem Brennstoffzellenbus. Neben dem Wasserstofftank und der Brennstoffzelle, die den Wasserstoff in Strom umwandelt, verfügt der Bus über einen Elektroantrieb und eine kleine Batterie (zirka 30 kWh bei Standardbussen). Wird der Wasserstoff nur als Range-Extender vorgesehen, wird die Batterie größer dimensioniert. Mit vollem Tank kann der Bus über 300 km fahren und nähert sich damit der Reichweite konventioneller Dieselbusse an. Im Vergleich zu batterieelektrischen Bussen sind Brennstoffzellenfahrzeuge mit weniger als 100 Stück in ganz Europa [5] im Jahr 2019 noch wenig verbreitet. Jedoch werden 2020/2021 mehrere europäische Fahrzeughersteller mit einem serienreifen Modell am Markt verfügbar sein und es sind bereits Zuwendungsbescheide für über 100 Fahrzeuge in Deutschland genehmigt. Neben der noch geringen Erfahrung mit Brennstoffzellenbussen liegt eine Herausforderung bei der Versorgung und Lagerung des notwendigen Wasserstoffs. Dieser kann günstig als Abfall der Chlor-Chemieindustrie zur Verfügung stehen (neun Prozent der deutschen Produktion [6]), wobei eine Verwertung in lokalen Busbetrieben sinnvoll sein kann, wie es in den Regionen Köln oder Frankfurt am Main geplant ist. Wenn keine Quelle im näheren Umfeld vorhanden ist, soll Wasserstoff

vor Ort mit einem Elektrolyseur produziert werden, wobei dann der Stromanschluss, vergleichbar mit dem Depotlader-Konzept, dem Leistungsbedarf der Elektrolyse entsprechen muss.

Hierbei ist der sehr hohe Energieaufwand für die Herstellung von (öko-)strombasiertem Wasserstoff per Elektrolyse zu beachten, die zu einer zwei bis dreimal geringeren Primärenergieeffizienz von Brennstoffzellenbussen im Vergleich zu rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen führt. Neben Elektrolyse und Verdichtung des Wasserstoffs (Wirkungsgrad bei 60 Prozent) muss der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle berücksichtigt werden (etwa 50 bis 60 Prozent). Die Versorgung des Elektromotors mit Batterien hat hingegen einen Wirkungsgrad von etwa 80 bis 90 Prozent. Nach aktuellem Stand der Forschung sind geringe Fortschritte bei Brennstoffzellen und Elektrolyse zu erwarten, die allerdings keine Annäherung mit der Energieeffizienz von reinen Batteriefahrzeugen in Aussicht stellen [7].

Noch weniger energieeffizient und entsprechend teuer ist die Herstellung und Verwendung von strombasiertem Methan (PtG) oder Diesel (PtL), deren Herstellung zusätzliche Prozesse mit Energieverlusten erfordern (Herstellungswirkungsgrad bei 45–50 Prozent [8]) und in deutlich weniger effizienten Verbrennungsantrieben genutzt werden (im Vergleich zu E-Antrieben).

Einsatzbereiche und Lebenszykluskosten nach Technologie

Nach aktuellem Stand weist jede Technologie Mehrkosten gegenüber dem Dieselbetrieb auf. Die Dekarbonisierung des Busverkehrs ist mit unterschiedlichen Mehrkosten verbunden:

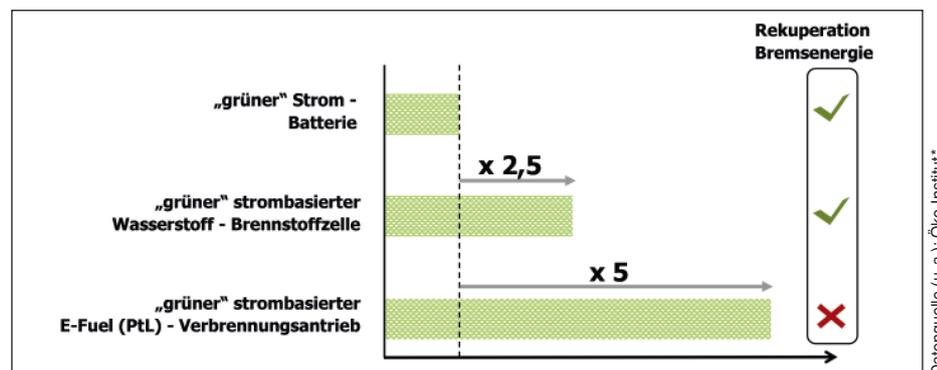


Abb. 3: Primärenergieverbräuche (Ökostrom) nach Antriebsenergie für dieselbe Leistung. KCW auf Basis aktueller Energieverbräuche und Wirkungsgrade (2019) (* Die Bedeutung strombasierter Kraftstoffe in Deutschland, November 2019)

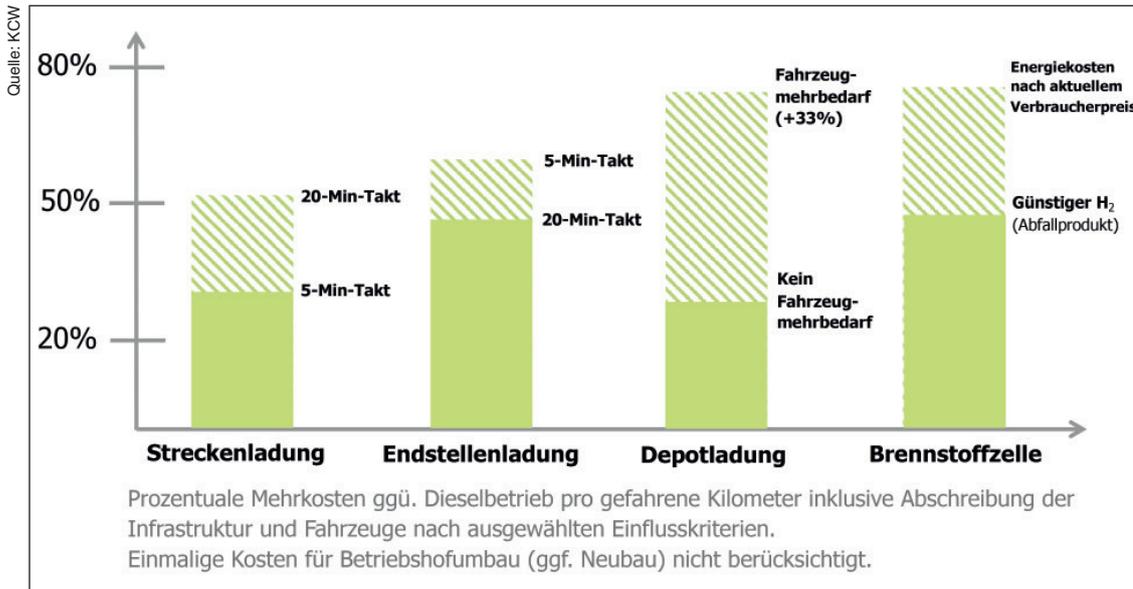


Abb. 4: Mehrkosten über den Lebenszyklus gegenüber Dieselbetrieb nach Einsatzbereichen.

(Berechnungen der Autoren am Beispiel einer 15 km-langen Buslinie im Großstadtverkehr auf Basis von Literaturangaben und eigener Marktkenntnis (2018))

- **Deutlich höhere Investitionen für die Beschaffung der Fahrzeuge:** Aktuelle Preise für (batterie)elektrische Busse liegen bei einem Faktor 2 bis 2,5 gegenüber herkömmlichen Dieseln; Brennstoffzellenbusse liegen dabei eher am oberen Rand dieser Preisfaktorspanne.
- **Kosten für die Errichtung der Ladeinfrastruktur:** Im Vergleich zu den Fahrzeuginvestitionen sind die Investitionen für die Infrastruktur in der TCO jedoch von geringerer Bedeutung, unter anderem durch eine längere Abschreibungsdauer.
- **Anpassung der Betriebshöfe für die Wartung elektrischer Fahrzeuge:** Bau von Dacharbeitsständen, sichere Lagerräume für Batterien sowie spezifische elektrische Prüfausrüstungen, Etablierung von neuen Stromleitungen entsprechend dem Leistungsbedarf (abhängig von der Ladetechnologie) und IT-Anlagen.
- **Eventuell zusätzliche Fahrzeugbedarfe:** Bei der Depot- und Endstellenladung müssen Ladezeiten und Reichweiten im Umlaufplan berücksichtigt werden, die zu einem erhöhten Fahrzeugbedarf (und dadurch auch Abstellflächen, Wartung, Verwaltung...) führen können.
- **Gegebenenfalls höhere Betriebskosten:** Tausch der Batterien und Brennstoffzellen voraussichtlich mindestens einmal in der Laufzeit des Fahrzeugs. Gegebenenfalls zusätzliche Betriebskosten aufgrund eines Fahrzeugmehrbedarfs. Durch effizientere Antriebe kann allerdings grundsätzlich mit geringeren Energiekosten bei batterieelektrischen Bussen gerechnet werden [9]. Bei dem Einsatz von Wasserstoff hängt der Preis von der Erzeugung ab: Wenn er nicht

unter günstigen Bedingungen als Abfallprodukt zur Verfügung steht, ist bei den aktuellen Herstellungs- und Transportkosten von „grünem“ Wasserstoff mit höheren Energiekosten als beim Diesel zu rechnen.

Letztlich sind die Lebenszykluskosten der verfügbaren Technologien abhängig von den spezifischen Eigenschaften des Busverkehrs und den lokalen Rahmenbedingungen. Die wesentlichen Einflussfaktoren sind:

- **Betriebliche Kriterien,** die den Fahrzeug- und Infrastrukturbedarf bestimmen: Linielängen, Taktangebot, Umlauflänge, Netzkonfiguration, Abstellkapazität in Betriebshöfen, Flexibilität im Fahrzeugeinsatz samt Reservehaltung, et cetera (gegebenenfalls erhöht durch unterschiedliche/wirtschaftliche Dimensionierung der Fahrzeuge / Batterien).
- **Lokale Rahmenbedingungen:** Topographie, Flächennutzung, lokal verfügbare Energiequellen, Kapazität des vorhandenen Versorgungsstromnetzes.

Abbildung 4 zeigt die Entwicklung der Lebenszykluskosten bei der Umstellung einer fiktiven Buslinie mit verschiedenen Betriebsbedingungen auf ausgewählte Technologien gegenüber dem Dieseln. Fahrzeug- und Infrastrukturinvestitionen werden über die zu erwartende Lebensdauer der Elemente abgeschrieben. Für den Streckenlader wird auf Basis der Praxiserfahrung von Trolleybusbetrieben eine Lebensdauer der Fahrzeuge von 18 Jahren zugrunde gelegt, während der die Batterie

zweimal getauscht wird. Für die anderen Technologien wird aufgrund des jüngeren Reifestands sowie mangelnder langjähriger Betriebserfahrungen eine Lebensdauer von zwölf Jahren zugrunde gelegt. Die Lade- und Tankinfrastruktur wird über 15 Jahre abgeschrieben, Fahrleitungsanlagen über 30 Jahre. Beim Endstellenlader wird je nach Takt von einem bis drei Ladepunkten pro Endstelle ausgegangen. Beim Streckenlader wird ein Oberleitungsanteil von 50 Prozent (1 Mio Euro pro km) angenommen. Nicht in der Analyse enthalten sind einmalige Kosten für Betriebshofanpassungen samt Anbindung ans Energienetz sowie mögliche, potenziell sehr hohe einmalige Kosten für den Neubau eines Betriebshofs.

Ist eine Umstellung auf Depotladung ohne Fahrzeugmehrbedarf möglich (= nach aktuellem Stand der Technik bei Umläufen unter 200 km), hat diese Technologie über den Lebenszyklus die beste Wirtschaftlichkeitsbilanz. Müssen bei Depotladern die Umläufe mit einem erhöhten Fahrzeugbedarf angepasst werden, steigen die Kosten aufgrund der höheren Fahrzeuginvestitionen und der mit dem Betrieb verbundenen Fahrpersonal- und Energiekosten merklich. Ladekonzepte mit Nachladung während des Betriebs können dann trotz höherer Infrastrukturinvestitionen durch die geringeren Fahrzeug- und Betriebskosten deutliche Kosteneinsparungen über den Lebenszyklus erzielen.

Insbesondere mit steigender Netzdichte und dichterem Taktfolge dreht sich das Ergebnis in Richtung Streckenlader. Die

wirtschaftliche Amortisation der einmal investierten Infrastruktur verbessert sich hier gegenüber den Fahrzeuginvestitionen und den vermehrten Betriebskosten durch den erhöhten Batteriebedarf [10]. Bei geringeren Takten ist der Infrastrukturbedarf für die Endstellenladung geringer und kann gegenüber einer Elektrifizierung mit Oberleitung wirtschaftlich sinnvoller sein.

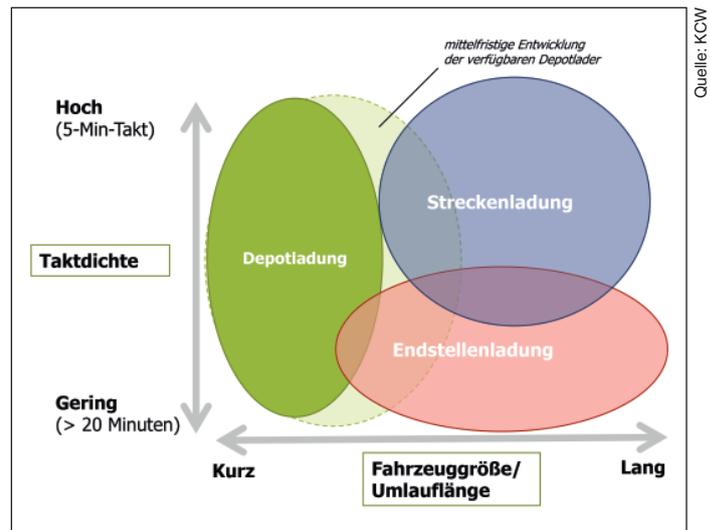
Der Einsatz von Brennstoffzellenbussen ist trotz des Vorteils höherer Reichweiten aufgrund der höheren Fahrzeuginvestitions- und Energiekosten mit höheren Lebenszykluskosten verbunden. Auch Wartungskosten sind laut bisherigen Erfahrungen aus den USA merklich höher als die von Dieselsebussen [11], wobei die Einführung serienreifer Fahrzeuge diese Kosten reduzieren soll. Unter besonderen lokalen Rahmenbedingungen können Brennstoffzellenbusse eine sinnvolle Variante darstellen. Das betrifft beispielweise Gebiete, in denen

- Wasserstoff günstig als Abfallprodukt genutzt werden kann,
- die anspruchsvolle Topographie den Einsatz eines reinen Batteriebusse nicht zulassen würde,
- oder das vorhandene Stromnetz für die Nachladung von Batteriebussen nicht leistungsfähig genug wäre (zum Beispiel im ländlichen Raum).

Überschlägige ökologische Beurteilung alternativer Antriebe

Dank der emissionsfreien Antriebe werden beim Fahren keine Emissionen mehr ausgestoßen. Zusätzliche Treibhausgasemissionen entstehen hingegen im Sektor der Energieproduktion und -bereitstellung sowie im Sektor Industrie (Herstellung der Komponenten für die Fahrzeuge und dabei auch der Batterien, Brennstoffzellen et cetera). Die sektorübergreifende Klimabilanz der Technologie hängt also maßgeblich von der Klimabilanz der Herstellung der Fahrnergie und der Fahrzeuge ab, wobei der genutzte Strommix von entscheidender Bedeutung ist. Laut Umweltbundesamt lag der Emissionsfaktor im Jahr 2018 für Deutschland bei 474 g CO₂-äq/kWh. Auch bei Ökostrom entstehen Emissionen für den Bau und Betrieb der Anlagen. Auf Basis des deutschen Mix an erneuerbarem Strom im Jahr 2018 und anhand der Emissionsfaktoren des IPCC für erneuerbare Energien (PV, Wind, Wasserkraft, Biomasse) kann ein Emissionsfaktor von 62 g CO₂-äq/kWh für Ökostrom ermittelt werden.

Abb. 5: Einsatzbereiche für emissionsfreie Bustechnologien.



Mit dem aktuellen Strommix erzielen Elektrobusse nur eine bessere CO₂-Bilanz als fossilbetriebene Busse, wenn die Energieverluste zwischen der Stromquelle und dem Elektroantrieb minimal sind, also bei reinen Batteriebussen (Abb. 6). Ein steigender Anteil an Ökostrom führt zu weiteren hohen Einsparungen. Bei der Fahrzeugherstellung ist insbesondere die Herstellung der Batterien zu berücksichtigen. Der in der jüngsten Literatur ermittelte Emissionsfaktor inklusive der Gewinnung der notwendigen Materialien – etwa Lithium, Kobalt, Mangan, Nickel – schwankt zwar erheblich je nach Annahme (insbesondere zum Strommix des Herstellungslands), liegt jedoch zwischen 60 und 110 kg CO₂-äq/kWh [12]. Bei einer 450 kWh-großen Batterie für einen Standardbus-Depotlader ist der damit verbundene „ökologische Rucksack“ erst nach einer Fahrleistung von zirka 40.000 bis 75.000 km durch den effizienteren Fahrbetrieb (Strommix gegenüber Diesel) gedeckt. Die Klimabilanz der Batterie kann insofern bei Depotladern nicht vernachlässigt werden, aber sie ist deutlich geringer als die der Fahrnergie über den Lebenszyklus. Streckenlader und Endstellenlader zeichnen sich dank des geringeren Batteriebedarfs mit einer günstigeren Öko- und Klimabilanz aus.

Bei der Herstellung von Brennstoffzellenbussen führt insbesondere der hohe Bedarf an Platin und Kohlenstoff für die Brennstoffzelle und den Wasserstofftank zu höheren CO₂-Emissionen gegenüber dem Dieselsebus. Aus Sicht des Klimaschutzes ist jedoch die Herstellung des Wasserstoffes von höherer Bedeutung. Die Substituierung fossiler Kraftstoffe mit strombasierendem Wasserstoff ergibt nur Sinn, wenn für

dessen Herstellung ein sehr hoher Anteil an „grünem“ Strom genutzt wird (Abb. 6). Da die Herstellung von Wasserstoff aus erneuerbarem Strom mit lediglich etwa ein Prozent der gesamten deutschen Produktion (gegen rund 90 Prozent aus der Dampfpreformierung von Erdgas) derzeit marginal ist, sollten daher entsprechende Anlagen bei einer Entwicklung des Brennstoffzellenfahrzeugmarkts kräftig ausgebaut werden [13]. Doch selbst dann bleibt die Klimabilanz dieser Technologie aufgrund des deutlich höheren Primärenergiebedarfs an Ökostrom schlechter als bei reinen ökostrombetriebenen Batteriebussen.

In diesem Artikel nicht betrachtet, in einer Gesamtbetrachtung der Dekarbonisierung des Verkehrs allerdings nicht außer Acht zu lassen, ist die Gefahr der – erneuten – Abhängigkeit von knappen Rohstoffen (Lithium, Kobalt, Kupfer, Platin et cetera) [14].

Fallbeispiel Salzburg

Neuerdings kommen neue elektrische Gelenkbusse mit Streckenladung – in Salzburg „eObus“ genannt – im regulären Betrieb zum Einsatz, wodurch jährlich eine Leistung von über 150.000 km elektrisch und emissionsfrei – und ohne zusätzliche Infrastruktur – erbracht wird.

Dabei weist die Stadt eine langjährige Erfahrung mit elektrischen Bussen auf und kann auf bereits vorhandener Infrastruktur für die Nachladung der Streckenlader zählen: Bereits seit 1940 verfügt die Stadt Salzburg über einen Obusbetrieb. Und während das System Obus in der Nachkriegszeit weltweit zunehmend vom Dieselsebus abgelöst wurde, konnte sich das System in der

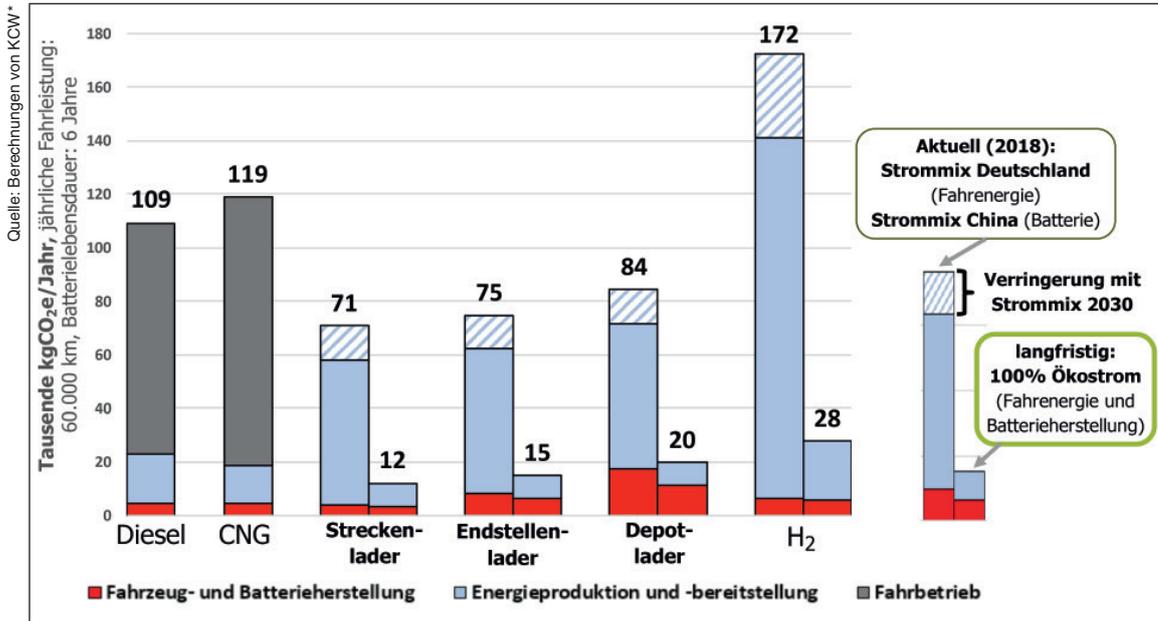


Abb. 6: Klimabilanz über den Lebenszyklus jeweiliger Busantriebstechnologien (Gelenkbus).

(* Berechnungen auf Basis von UBA, BMVI (Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen des ÖPNV), Swedish Environmental Research Institute, Öko-Institut und Fraunhofer ISE)

historischen Mozartstadt behaupten, wurde sogar Schritt für Schritt ausgebaut und stellt heute ein klimaverträgliches ÖPNV-Netz dar, welches seinesgleichen sucht.

Mit den letzten Neubauabschnitten im Fahrleitungsnetz aus dem Jahr 2018 zählt das Oberleitungsnetz mit 121 km Streckenlänge zu einem der größten in Europa. Fast 100 Gelenkbusse verkehren dabei täglich auf zwölf Linien und transportieren damit über 80 Prozent der Fahrgäste elektrisch, dank ausschließlicher Energie aus Wasserkraft sogar 100 Prozent umweltverträglich.

Mit der zunehmenden Etablierung von E-Bussen und dem gleichzeitigen Bedürfnis der Erschließung von Umlandgemeinden rund um Salzburg stellte sich die Frage der weiteren Erschließungsart. Die Einführung reiner E-Busse hätte ein neues System samt Kosten für entsprechende Ladeinfrastruktur und Fahrzeuge mit erheblichem Batteriebedarf bedeutet. Gleichzeitig hätten die E-Busse auf gleichem Linienweg wie die Obusse die vorhandene Fahrleitung konkurrenziert und Synergienpotenziale nicht genutzt. Andererseits bedeutet eine Verlängerung der Fahrleitung immer einen hohen Investitionsbedarf.

Die Notwendigkeit zur schrittweisen Erneuerung der Obusflotte und der langjährige Wunsch der Gemeinde Grödig nach einer schnellen, umsteigefreien Verbindung ins Zentrum der Landeshauptstadt Salzburg bot hierbei eine einmalige Chance zur Umsetzung eines Vorzeigeprojekts. Neu und innovativ ist der Betrieb der vorhandenen

Obuslinie 5 mit Obussen mit einer Traktionsbatterie (als eObus bezeichnet) um 4,2 km über das bisherige Linienende an der Weidenstraße hinaus bis zur Untersbergseilbahn in Grödig/St. Leonhard. Die Ladung der Traktionsbatterien erfolgt dabei komplett während der Fahrt im bestehenden 600-Volt-Gleichstrom-Fahrleitungsnetz der Stadt Salzburg. An der Stadtgrenze bügelt der Obus vollautomatisch ab, bewältigt die knapp 10 km zur neuen Endstation und retour im Batterie-Modus und bügelt dann wieder vollautomatisch an einem Fahrleitungstrichter an der ersten Haltestelle im Oberleitungsnetz wieder auf, um dann zwischen 19,2 km (HVZ) und 11,6 km (NVZ) am Fahrrad nachgeladen zu werden.

In umfangreichen Simulationsberechnungen wurde die Dimensionierung der Batterie durchgeführt, wollte man doch die Batteriegröße nicht zuletzt bezüglich der Wirtschaftlichkeit und dem Gewicht möglichst geringhalten. Ein weiteres Ziel bestand darin, eine möglichst lange Lebensdauer der Batterie zu erreichen, wozu die „sanfte“ Ladung mit 100 A an der bestehenden Fahrleitung einen wesentlichen Beitrag leistet. Trotzdem wurden unter anderem die Parameter Geschwindigkeit (65 km/h), Temperatur (-15 Grad Celsius), kalendarische und zyklische Alterung und Ladezeit inklusive der Annahme einer im Winter teilweise vereisten Fahrleitung um entsprechende Reserven ergänzt, sodass die Batterie nun mit 60 kWh ausgeführt ist.

Anfang September 2019 wurde mit dem Vorlaufbetrieb erfolgreich gestartet. Seit dem internationalen Fahrplanwechsel am

15. Dezember 2019 sind die Fahrten nach Grödig in den Fahrplan der Linie 5 integriert, womit 9 eObusse an Werktagen mit jeder zweiten Fahrt (damit in 20'- und 30'-Takt) und an Sonn- und Feiertagen mit jeder Fahrt (und damit in 20'-Takt) weiter nach Grödig verkehren.

Bei dieser Linie kommen werksneue Fahrzeuge des Typs BGT-N1D vom Schweizer Hersteller Carrosserie Hess AG zum Einsatz, welche nach einem EU-weiten Vergabeverfahren Ende 2018 bestellt wurden. Dabei verfügen die Fahrzeuge nicht nur über modernste Obus-/E-Bus-Technologie sondern auch über ein selbstlernendes Energiemanagementsystem, welches den Fahrleitungsbetrieb sowie den Betrieb mit der Traktionsbatterie gleichermaßen ermöglicht. Die Hauptaufgabe des Energiemanagementsystems ist, eine ideale Ladestrategie für die Traktionsbatterie zu definieren. Die gemessenen oder geschätzten Daten werden in einer virtuellen „Streckenkarte“ positionsbasiert abgespeichert. Bei allen Fahrten stehen die gesammelten Informationen für die Optimierung unter anderem in Bezug auf eine vorausschauende Nachladung, eine priorisierbare Glättung von Spitzenlasten im Netz, eine optimierte Steuerung von Heizung, Lüftung/Klimatisierung und die Maximierung der Batterielebensdauer zur Verfügung. Die von der Berner Fachhochschule entwickelten Lebensdauer-Modelle für die Traktionsbatterien werden bei der Optimierung genutzt, um einen möglichst batterieentlastenden Betrieb zu gewährleisten. Ergänzt wird das Energiemanagement um die Übertragung

des Ladezustandes der jeweiligen eObusse an die Betriebsleitstelle, um bei geringer Ladeleistung im Bedarfsfall frühzeitig dispositiv eingreifen zu können.

Somit ist es gelungen, die Vorteile des Obusses mit der Flexibilität des E-Busses zu verknüpfen und einen weiteren Teil des Salzburger Busverkehrs nachhaltig und kosteneffizient dekarbonisiert zu betreiben, ohne zukünftigen Entwicklungen entgegen zu stehen. Die Batterie konnte in ihrer Dimension klein gehalten werden und es sind keine wesentlichen Aufwendungen für eine Ladeinfrastruktur nötig. Das vorhandene Fahrleitungsnetz dient als Lademöglichkeit, womit sich die Kosten der vorhandenen Infrastruktur mit jedem gefahrenen Kilometer des eObus in der Wirtschaftlichkeitsberechnung reduzieren. Weitere Netz- oder Taktverdichtungen senken abermals die Infrastrukturkosten und könnten sogar zu Erweiterungen im Fahrleitungsnetz führen.

Ausblick

Für Betreiber und Aufgabenträger des ÖPNV ist die Dekarbonisierung des Busverkehrs eine große Herausforderung in jeglicher Hinsicht: Zunächst einmal sind mit jeder neuen Technologie zusätzliche Kosten im Vergleich zum Betrieb mit Dieseln zu erwarten. Darüber hinaus stellt aktuell keine der vorgestellten Technologien eine Optimallösung für alle Anwendungsfälle dar. Die Entscheidung für eine Technologie ist damit eine strategische Aufgabe, die unter Abwägung der Faktoren betriebliche Flexibilität, Wirtschaftlichkeit, Ökobilanz, Energieeffizienz und Infrastrukturbedarf gefällt werden sollte. Grundsätzlich sind rein batterieelektrische Fahrzeuge nach aktuellem Stand energieeffizienter und wirtschaftlicher als

der Einsatz strombasierter Kraftstoffe (Wasserstoff oder PtL). Eine Ladeinfrastruktur an Endstellen oder an bestimmten Strecken mit Oberleitung erfordert längere Planungsphasen, bietet jedoch bei anspruchsvollen Busverkehren eine gute Alternative zum Depotlader an, wenn dessen Reichweite den Betrieb einschränkt und zu deutlich höheren Betriebskosten führt. Die wirtschaftliche und ökologische Nachhaltigkeit von Streckenladungssystemen ist dann durch die über Jahrzehnte abgeschriebenen Aufwendungen und den effizienten Betrieb ohne Fahrzeug- und Fahrpersonalmehrbedarf für die Anforderungen des Stadtverkehrs in der Regel gegeben. Ein Optimum kann letztendlich in vielen Fällen aus einem Mix an Technologien bestehen, die allerdings bei jedem einzelnen Busnetz in Abhängigkeit des betrieblichen Bedarfs und der lokalen Rahmenbedingungen untersucht werden



Quelle: Salzburg AG

Abb. 7: Neuer eObus der Salzburg AG im Einsatz.

sollten. Die Entwicklung der Technik, der Marktstruktur für die Fahrzeuge, der Energiepreise und der Förderlandschaften sind weitere bewegliche Parameter, welche den Prozess der Dekarbonisierung im Busverkehr beeinflussen werden.

Literatur/Anmerkungen

- [1] European Environment Agency, 2018: <https://www.eea.europa.eu/themes/transport/term/term-briefing-2018>.
- [2] „In-Motion-Charging“ ist ein geschützter Begriff der Firma Kiepe Electric für ihre Batterie-Trolleybus-Ladetechnologie
- [3] Schulz, stadtverkehr 6/2017
- [4] Vgl. technische Untersuchungen für die Umstellung von Dieseln auf Streckenlader in Marburg, Solingen und Verona
- [5] Hydrogen Europe, <https://hydrogeneurope.eu/cleaner-urban-transport-hydrogen-buses>, abgerufen am 25.06.2019
- [6] NOW, Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV
- [7] Forschungszentrum Jülich, <https://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/UK/DE/2018/2018-12-18-brennstoffzelle-wirkungsgrad-weltrekord.html?sessionid=4AF7A01A754D-0D36C1ED08AADA509A89>, abgerufen am 25.06.2019
- [8] Öko-institut, Die Bedeutung strombasierter Stoffe für den Klimaschutz in Deutschland, November 2019
- [9] Bei einem durchschnittlichen Verbrauch von 130 kWh pro 100 km und Stromkosten von 15 cts/kWh ergäben sich Kosten um 20 €/100km für einen E-Standardbus. Bei einem Dieseln liegen die Kosten bei zirka 40–50 €/100km. Bei Brennstoffzellenbussen liegen die Fahrenergiekosten bei einem Wasserstoffpreis von 9 €/kg sogar bei 76 €/100km. Unter günstigen Bedingungen sind Preise unter 4 €/kg möglich.
- [10] Bei der Streckenladung könnte der konstant angenommene Oberleitungsanteil für alle Taktszenarien (50 Prozent) die Kosten bei geringeren Takten überschätzen und die Kosten bei dichten Takten unterschätzen. Erfahrungen aus Solingen und Planungen für Berlin zeigen, dass der Oberleitungsbedarf erheblich schwanken kann. Nimmt man ein Anteil von 30 Prozent bei einem 20-Minuten-Takt (ähnlich wie bei der Linie 695 in Solingen) oder von 60 Prozent bei einem 5-Minuten-Takt (ähnlich wie Planungen in Berlin), liegen die Mehrkosten dieser Technologie relativ konstant bei +40 Prozent gegenüber dem Dieselnbetrieb.
- [11] National Renewable Energy Laboratory, Fuel Cell Buses in U.S. Transit Fleets: Current Status 2018
- [12] Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Annex III: Technology-specific cost and performance parameters, 2014
- [13] Swedish Environmental Research Institute, Lithium-Ion Vehicle Battery Production, 2019
- [14] NOW, Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV
- [15] Brandl, Peter (2014) E-Mobilität mit Zukunftschancen?, DER NAHVERKEHR 5/14

Zusammenfassung/Summary

Dekarbonisierung des Busverkehrs in Städten

Die Zahl der emissionsfreien Busse in Europa wird im neuen Jahrzehnt stark zunehmen, was durch die neue europäische Richtlinie für saubere Fahrzeuge und die Klimaziele vorangetrieben wird. Dies erfordert einen technischen Wechsel von Dieseln zu Elektroantrieben und finanzielle Unterstützung, da jede alternative Technologie höhere Kosten verursacht als herkömmliche Dieseln – vorerst. Dieser Artikel analysiert die Lebenszykluskosten und den Kohlenstoff-Fußabdruck verschiedener Ladekonzepte und Technologien in Bezug auf verschiedene Betriebsfälle (Häufigkeit, Fahrpläne, Reichweite). Jede Technologie hat ihren Bereich und die dynamische Ladetechnik zeigt insbesondere bei hochfrequentierten Buslinien eine gute Lebenszykluskosten- und Umweltbilanz. In Salzburg ersetzen seit Dezember 2019 neue Elektrobusse die Dieseln durch dynamische Ladung, wobei teilweise Oberleitungen des Trolleybusnetzes zur Ladung der Batterie verwendet werden. Generell hängt der geeignete Technologiemitmix für eine nachhaltige, saubere Busstrategie stark von den spezifischen Betriebsanforderungen ab und muss im Einzelfall geprüft werden.

Decarbonisation of bus transport in cities

The number of zero-emission buses in Europe will be strongly growing in the new decade, pushed by the new European Clean-Vehicles Directive and by climate goals. This requires a technical change from diesel to electric powertrains and financial support, as every alternative technology has higher costs than conventional diesel buses – for now on. This article analyses life cycle costs and carbon footprint of different charging concepts and technologies regarding different operation cases (frequency, timetables, range). Every technology has its area of relevance and the dynamic charging technology shows especially for high-frequented bus lines a good life cycle costs and environment balance. In Salzburg, since December 2019, new electric buses are replacing diesel buses with dynamic charging, partially using overhead wires of the trolleybus network to charge the battery. Generally, the appropriate mix of technologies for a sustainable clean bus strategy depends a lot on the specific operation requirements and has to be examined for each case.