

Abschlussbericht

Programmbegleitforschung Innovative Antriebe und Fahrzeuge

Innovative Antriebe im straßengebundenen ÖPNV

Beauftragt durch:



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

Koordiniert durch:



Koordination Begleitforschung Bus



Kurzfassung	3
--------------------	----------

1

Einführung	13
-------------------	-----------

1.1.	Ausgangssituation – Rahmenbedingungen und politischer Kontext	13
1.2.	Inhalte der Begleitforschung Bus	17
1.3.	Betrachtete Technologien	22
1.4.	Datenbasis der Begleitforschung Bus	31

2

Ergebnisse	34
-------------------	-----------

2.1.	Anforderungen	34
2.1.1.	Betreiberanforderungen	34
2.1.2.	Planungszeiträume	37
2.1.3.	Politische Rahmenbedingungen	40
2.1.4.	E-Mobilitätskonzepte	45
2.2.	Praxistauglichkeit und Einsatzreife	50
2.2.1.	Laufleistung	50
2.2.2.	Verfügbarkeit	67
2.2.3.	Einsatzreife / Technology Readiness Level	75
2.2.4.	Zusammenfassung der Ergebnisse zu Praxistauglichkeit und Einsatzreife	80
2.3.	Energieeffizienz und Energieverbrauch	82
2.3.1.	Energieverbrauch Fahrzeug	82
2.3.2.	Einfluss klimatischer Bedingungen auf den Energieverbrauch	84
2.3.3.	Energieverbrauch Ladeinfrastruktur	89
2.3.4.	Zusammenfassung der Ergebnisse zu Energieeffizienz und Energieverbrauch	93
2.4.	Ökologie	94
2.4.1.	Untersuchungsrahmen	96
2.4.2.	Ergebnisse	102
2.4.3.	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Ökologie	111

2.5.	Wirtschaftlichkeit	112
2.5.1.	Referenzszenarien	113
2.5.2.	Energieträger	116
2.5.3.	Wirtschaftlichkeitsanalyse	128
2.5.4.	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Wirtschaftlichkeit	141
2.6.	Leitfaden und Entscheidungstool	143

3

Zusammenfassung	147
------------------------	------------

4

Ausblick	159
-----------------	------------

4.1.	Handlungsoptionen	161
4.2.	Technische Weiterentwicklung Komponenten	167
4.3.	Marktpotenzial	177
4.4.	Sektorenkopplung	178

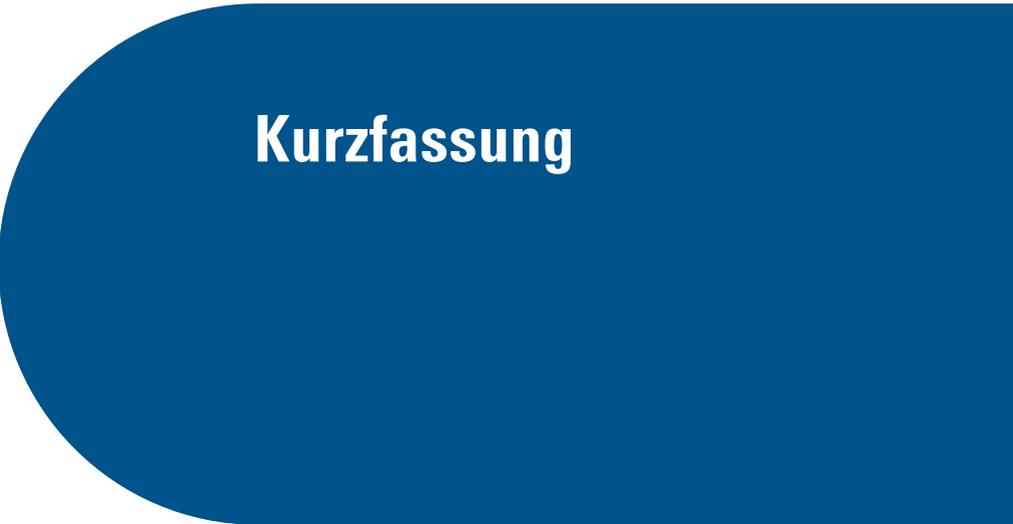
5

Anhang	181
---------------	------------

—	Abbildungsverzeichnis	181
—	Tabellenverzeichnis	185
—	Abkürzungsverzeichnis	186

6

Weiterführende Informationen	188
-------------------------------------	------------



Kurzfassung

Da der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) einen unerlässlichen Baustein zur Gewährleistung der individuellen Mobilität der Bevölkerung darstellt, gilt es, diesen klima- und umweltfreundlicher zu gestalten. Nur mit einem Umstieg auf emissionsfreie, effiziente und leise Busse mit alternativen Antrieben können die Klimaschutzziele in den nächsten Jahren eingehalten werden. So soll eine Halbierung der Emissionen aus dem ÖPNV bis 2045 gegenüber 2019 umgesetzt werden. Entsprechend verfolgt die Bundesregierung als Teil des jüngst überarbeiteten Klimaschutzprogrammes das konkrete Ziel, dass 2030 die Hälfte der Stadtbusse elektrisch fährt. Mit Inkrafttreten der Clean Vehicles Directive bzw. dem Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungsgesetz – (SaubFahrzeugBeschG) gibt es nun erstmalig eine eindeutige gesetzliche Vorgabe zur anteiligen Beschaffung und zum Betrieb „sauberer“ bzw. „emissionsfreier“ Busse. Daraus ergibt sich durch die Umsetzung der CVD allein in Deutschland bis 2025 bereits ein kurzfristiges Marktpotenzial von jährlich ca. 2.000 sauberen bzw. ca. 1.000 emissionsfreien ÖPNV-Bussen. Dieses wächst im Rahmen der zweiten Stufe der CVD Richtlinie bis 2030 auf ca. 3.000 saubere bzw. ca. 1.500 emissionsfreie Busse an. Insgesamt wird das Marktpotenzial gerade für lokal emissionsfreie Stadtbusse aber höher eingeschätzt, da zur Erreichung der zuvor genannten Klimaschutzziele der Bundesregierung (50 % emissionsfreie Stadtbusse im Bestand) es bis 2030 einer Neubeschaffungsquote in der Größenordnung der Anzahl der sauberen Fahrzeuge bedarf.

Die Einführung und anschließende (Teil-) Umstellung auf emissionsfreie Busse mit neuartigen Antriebskomponenten, inklusive der Errichtung der erforderlichen Energieversorgungsinfrastruktur, stellt die Verkehrsunternehmen vor Herausforderungen. Zur Unterstützung des Umstiegs haben Bund, Länder und die europäische Union, verschiedene Förderprogramme zur Marktinitiierung und Hochlauf aufgelegt. Dabei fördern das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) und das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) die Anschaffung von elektrischen Bussystemen, bestehend aus Fahrzeugen und der benötigten Energieversorgungsinfrastruktur. Zusätzlich fördert das BMDV Forschungs- und Entwicklungsprojekte sowie die Erstellung von Elektromobilitätskonzepten zur weiteren Unterstützung der Marktvorbereitung und des Markthochlaufs für Elektromobilitätsanwendungen.

Mit dem Ziel, die Einzelergebnisse der geförderten Projekte zur Einführung von emissionsfreien Nahverkehrsbussen zusammenzuführen, wurde seitens des BMDV eine programmatische Begleitforschung (kurz. BeFo) initiiert. Die Begleitforschung Bus bündelt und führt im Sinne einer Gesamtschau die Erkenntnisse und Erfahrungen der einzelnen Projekte aus den drei Förderbereichen Fahrzeugbeschaffung, Elektromobilitätskonzepte und Forschungs- und Entwicklungsprojekte zusammen und bewertet diese.

Im Ergebnis verfolgt die Begleitforschung Bus das Ziel, insbesondere bei den Verkehrsunternehmen und kommunalen Aufgabenträgern, ein besseres Verständnis für die technische bzw. betriebliche Eignung der einzelnen emissionsfreien Antriebstechnologien im Kontext der eigenen spezifischen Einsatzbedingungen und für die damit verbundenen ökonomischen Auswirkungen zu schaffen.

So wurde zur Erstinformation über emissionsfreie Bussysteme ein Leitfaden entwickelt. Darauf aufbauend wurde ein Online-Entscheidungswerkzeug entwickelt, das Verkehrsunternehmen anhand der von ihnen bereitgestellten Eingangsdaten zu ihren spezifischen betrieblichen Abläufen indikative Informationen liefert. Der Leitfaden und das Tool sind verfügbar unter <http://www.ebustool.de>.

Darüber hinaus wurde eine Reihe von Veröffentlichungen zu verschiedenen Themen erstellt. So wurde neben dem vorliegenden Abschlussbericht eine Förderprojektübersicht, eine Analyse der mit BMDV-Förderung erstellten E-Mobilitätskonzepte mit ÖPNV-Bezug und eine Gesetzeskarte Elektromobilität im ÖPNV erarbeitet. Zusammen mit den hier im Bericht in den verschiedenen Kapiteln referenzierten Detailberichten zu einzelnen Bewertungskriterien, sind diese im Starterset Elektromobilität¹ unter dem Baustein ÖPNV zu finden und stellen ein umfassendes Informationsangebot für Verkehrsunternehmen und kommunale Aufgabenträger dar.

¹ Siehe <https://www.starterset-elektromobilitaet.de/Bausteine/OEPNV>

Die vom BMDV und BMUV 2011 initiierte Arbeitsgruppe „Innovative Antriebe Bus“ (AG Bus) dient in diesem Zusammenhang als Plattform für den direkten Informations- und Erfahrungsaustausch zwischen den verschiedenen Akteuren. Die Ziele der AG Bus sind:

- technologieoffene Ergebnisse aus den einzelnen Fördervorhaben zusammenzuführen
- teilnehmende Unternehmen und Organisationen zu vernetzen, einen regen Austausch untereinander zu fördern, Wissen zu vertiefen
- neue Akteure zu befähigen, in das Thema Elektromobilität einzusteigen
- Identifikation weiterer Handlungsfelder und gegebenenfalls erforderlicher F&E Bedarfe

Nicht zuletzt die stetig zunehmende Anzahl an Teilnehmern der AG-Bus-Treffen dokumentiert das Interesse der verschiedenen Stakeholder an den Ergebnissen.

Nachfolgend werden die wesentlichen Ergebnisse der Begleitforschung Bus zu den vier Bewertungskategorien Praxistauglichkeit, Energieeffizienz, Ökologie und Wirtschaftlichkeit dargestellt. Ermöglicht wurde die Durchführung der Begleitforschung und die Erarbeitung der hier dargestellten Ergebnisse durch die Bereitschaft der an der Begleitforschung teilnehmenden Verkehrsunternehmen detaillierte Betriebsdaten und ihre Erfahrungen aus der Praxis dem BeFo Team unter Leitung von Sphera Solutions bereitzustellen. Diesen Verkehrsunternehmen gebührt an dieser Stelle nochmals der Dank des BeFo Teams.

Praxistauglichkeit und Energieeffizienz

Batteriebusse

Für Batteriebusse liegen die Betriebsdaten von mehr als 130 Bussen von 8 verschiedenen Herstellern vor, zum Teil über einen Zeitraum von mehr als zwei Jahren. Davon sind 117 Depotlader (112 Solobusse, 5 Gelenkbusse) und 14 Gelegenheitslader (4 Midibusse, 9 Solobusse, 1 Gelenkbus). Die umfangreichere Datenbasis im Vergleich zum letzten Bericht der AG Bus (2016) ermöglicht eine umfassende und belastbare Bewertung.

Die eingesetzten Batteriebusse weisen im Betrachtungszeitraum eine Verfügbarkeit von insgesamt ca. 87 % auf, mit knapp 87 % für Depotlader und 88 % für Gelegenheitslader. Dies stellt eine deutliche Steigerung im Vergleich zum letzten Statusbericht der AG Bus (2016) dar, in welchem die Depotlader eine Verfügbarkeit von

72 % und die Gelegenheitslader eine Verfügbarkeit von 76 % aufwiesen. Um einen reibungslosen Betriebsablauf zu gewährleisten, wird eine Ladeinfrastruktur mit idealerweise 100 % Verfügbarkeit benötigt. Aktuell liegt diese im Durchschnitt bei 96 %.

Vergleicht man die bisher erzielten Tagesfahrleistungen mit den Reichweitenanforderungen der Verkehrsunternehmen, so zeigt sich, dass dies derzeit eine der zentralen Herausforderungen für den Einsatz von Batteriebussen ist. Mit knapp 80 % fordert die überwiegende Mehrheit der mehr als 30 teilnehmenden Verkehrsunternehmen eine tägliche Reichweite von mindestens 200 km, 20 % sieht sogar eine tägliche Reichweite von mehr als 350 km als erforderlich an.

Die beiden relevanten Faktoren für die Reichweite sind der spezifische Energieverbrauch je km und die installierte Batteriekapazität. Die mittlere installierte Batteriespeicherkapazität liegt bei z. B. den Solofahrzeugen mit Depotladung bei knapp 300 kWh und bei den Gelegenheitsladern bei 230 kWh. Bezüglich des Energiebedarfs spielt das gewählte Heizungskonzept die entscheidende Rolle. Wenn im Sinne eines vollständig emissionsfreien Betriebes rein elektrisch geheizt wird, verringert sich die erzielbaren Reichweiten gerade in kalten Wintermonaten um bis zu 50 % und liegt somit weit unter den geforderten Reichweiten.

Um diese Reichweitenlücke zu adressieren, stehen verschiedene Optionen zur Verfügung, wie etwa die Verminderung des Energieverbrauchs, die Vergrößerung der Speicherkapazität der Batterie, die Prüfung, inwiefern Gelegenheitsladung untertägig, oder alternativ der Einsatz von Brennstoffzellenbussen möglich ist, der Einsatz einer brennstoffbasierten Zusatzheizung unter Verwendung von Brennstoffen aus erneuerbaren Energien oder die Anpassung der Umlaufpläne.



Quelle: BVG 2020

In Bezug, auf den sich ergebenden Energieverbrauch sind neben dem unmittelbar fahrzeugseitig ermittelten Energiebedarf noch weitere zusätzliche Energiebedarfe zu berücksichtigen. Diese ergeben sich zum einen aus dem regelmäßig erforderlichen Batteriebalancing, zur Anpassung des Ladungsniveaus der einzelnen Batteriezellen und den Ladungsverlusten der Batterie, zum anderen aus dem Vorkonditionieren des Fahrzeuges sowie den Wandlungsverlusten. In Summe ist zusätzlich zum fahrzeugseitig ermittelten Energiebedarf nochmals mit einem zusätzlichen Energiebedarf in der Größenordnung von 25–30 %, bezogen auf den fahrzeugseitigen Energiebedarf zu rechnen.

Die Bewertung des derzeitigen technischen Reifegrades der Batteriebusse durch die Verkehrsunternehmen fällt überwiegend positiv aus. So schätzt knapp die Hälfte der Verkehrsunternehmen die Busse nach ersten Betriebserfahrungen als serienreif (Technology Readiness Level – TLR 9) und ein weiteres Viertel als nah an der Serienreife (TRL 8) ein. Die formulierte Erwartungshaltung von mehr als 90 % der Verkehrsunternehmen, dass die Batteriebusse nach einem Jahr serienreif sein sollten, wird damit noch nicht vollumfänglich erfüllt. Bezüglich der Ladeinfrastruktur schätzen knapp 80 % der Verkehrsunternehmen das Batteriebusssystem als serienreif bzw. seriennah ein. Ein ähnliches Bild bietet sich bei der Verfügbarkeit. Die von den Verkehrsunternehmen zu Beginn des Einsatzes formulierte Erwartungshaltung bezüglich der Verfügbarkeit wurde in der überwiegenden Mehrheit der Fälle (75 %) erreicht. Im Betrieb erreichen die Batteriebusse nahezu 90 % Verfügbarkeit. Dieser Wert liegt nur geringfügig unter den Verfügbarkeiten der Dieselsebusse (durchschnittlich 93 %). Generell ist zu beobachten, dass die Verkehrsunternehmen an die Batteriebusstechnologie bereits durchaus hohe Erwartungen haben, die von der Technologie aber auch bereits weitgehend erfüllt wird.

Brennstoffzellenbusse

Brennstoffzellenbusse konnten erstmalig in die Begleitforschung aufgenommen werden. So liegen Daten von 45 Brennstoffzellenbussen von zwei Verkehrsunternehmen über einen Zeitraum von bis zu 16 Monaten vor. Die Einschätzungen zum Brennstoffzellenbusssystem sind aber mit Blick auf die aktuell noch überschaubare Datenbasis noch nicht vollumfänglich belastbar.

Die Verfügbarkeit der Brennstoffzellenbusse liegt derzeit im Mittel bei rund 78 % und weist damit noch Optimierungsbedarf auf. Hauptausfallursachen sind das Brennstoffzellensystem und auch die konventionellen, nicht antriebsbezogenen mechanischen Komponenten. Bezüglich der Tankstellenverfügbarkeit liegen derzeit erste Daten für eine der vier genutzten Tankstellen über einen Zeitraum von 15 Monaten vor, da sich

die übrigen noch im Probetrieb befinden bzw. noch nicht an die Verkehrsunternehmen übergeben sind. Für diese Tankstelle liegt die Verfügbarkeit im Betrachtungszeitraum bei aktuell gut 93 %, wobei sich die Verfügbarkeit in den letzten 6 Monaten mit Verfügbarkeitswerten >97 % positiv entwickelt hat.

Der Verbrauch der Busse liegt im Mittel bei ca. 9 kg H₂/100 km. Im Vergleich zu den Batteriebusen steigt bei niedrigen Temperaturen der Energieverbrauch der BZ-Busse in geringerem Umfang an. Damit zeigen die Busse Reichweiten von mindestens 300 km, auch in den Wintermonaten und erfüllen damit die Erwartungen.

Mit Blick auf die derzeit noch relativ geringen mittleren täglichen Laufleistungen zeigt sich die Relevanz der effizienten betrieblichen Integration der Fahrzeugbetankung in die täglichen Fahrzeugversorgungsprozesse. So kann eine dezentrale Lage der Wasserstofftankstelle erhebliche personelle Mehraufwendungen nach sich ziehen. Ein Lösungsansatz ist z. B. die Reorganisation der betrieblichen Abläufe. Die Tankdauer liegt im Mittel bei 10–12 Minuten und erfüllt damit genauso wie der Verbrauch und die erzielte Reichweite die Betreibererwartungen.

Insgesamt wird der technische Reifegrad der Busse von den Verkehrsunternehmen aktuell im Bereich Prototyp im Feldtest (TRL7) bis seriennah (TRL 8) bewertet und entspricht damit weitestgehend der zu Beginn des Einsatzes formulierten Erwartungshaltung. Es zeigt sich, dass die Brennstoffzellenbusse vom Reifegrad her noch nicht das Niveau von Batteriebusen erreicht haben. Dies entspricht aber mit Blick auf den Entwicklungsstand bzw. auf den erst noch anstehenden Markthochlauf den Erwartungen an die Technologie. Mit Blick auf die Wasserstofftankstellen wurden in einem Projekt bewusst mehrere Tankstellenkonzepte errichtet, die noch Forschungscharakter aufweisen. Insofern weist die Erwartungshaltung bezüglich der Einsatzreife mit TRL 3 bis 9 eine im Vergleich zu den BZ-Bussen eine größere Bandbreite auf. Diese Erwartungen werden von den verschiedenen Tankstellen weitgehend erfüllt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Praxistauglichkeit und Einsatzreife der elektrischen Busse sich weiter verbessert hat, diese aber auch noch weiter zu steigern sind. Bildet beim Batteriebus gerade die Reichweite ein Schwerpunktthema für weitere Optimierungen, so geht es beim BZ-Bussystem vor allem darum, die Verfügbarkeit sowohl der Fahrzeuge als auch der Wasserstofftankstellen zu steigern. Hier gibt es vor allem bezüglich der Ersatzteilverfügbarkeit weiteres Optimierungspotenzial.



Quelle: WSW mobil 2021

Ökologie

Durch die Verlagerung der Umweltwirkungen vom eigentlichen Busbetrieb auf die Energieträgerbereitstellung und auf die Fahrzeugherstellung, ist es erforderlich, den gesamten Lebenszyklus der Bussysteme zu betrachten. Die Bewertung zeigt, dass für eine Realisierung der Emissionsminderungspotenziale in relevantem Umfang der Einsatz erneuerbarer Energieträger eine unabdingbare Grundvoraussetzung ist. So lassen sich durch den Einsatz von Strom aus den erneuerbaren Quellen Wind und Photovoltaik (PV) Einsparungen von 75–85 % bei den Treibhausgasen (THG) und 50–75 % bei den Stickoxidemissionen (NO_x) erzielen. Mit dem Einsatz rein elektrischer Heizkonzepte lassen sich die höchsten Emissionseinsparungen erzielen. Kommen brennstoffbasierte Heizkonzepte zur Anwendung, bietet der Einsatz von Brennstoffen aus erneuerbaren Energieträgern, die die Anforderungen der europäischen Erneuerbaren Energien Richtlinie II (RED II) erfüllen, eine Option die zusätzlichen THG-Emissionen so gering wie möglich zu halten.

Wirtschaftlichkeit

Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsanalyse wurden der Batteriebus mit Depot- und Gelegenheitsladung sowie BZ-Bus und BZ-Range-Extender (BZ-REX) untersucht. Die durchgeführte Wirtschaftlichkeitsanalyse zur Ermittlung der Gesamtbetriebskosten der unterschiedlichen E-Bussysteme im Sinne einer TCO-Kostenermittlung verdeutlicht, dass der Einsatz von E-Bussen kurz- bis mittelfristig mit Mehrkosten gegenüber Dieselmotoren als etablierte Referenztechnologie verbunden ist. Diese liegen ohne Förderung bei 0,5–1,3 €/km bzw. 16–38 %. Dabei ist der sich in Anhängigkeit der Umlaufplanung ergebende Fahrzeugmehrbedarf für den Batteriebus mit Depotladung eine entscheidende Größe für die Mehrkosten. Die H₂-Bereitstellungskosten spielen

gerade beim BZ-Bus und auch beim BZ-REX eine wesentliche Rolle. Auf der anderen Seite lässt sich durch einen steigenden CO₂-Preis für fossilen Diesel die Kostenlücke für alle E-Bussysteme gleichermaßen reduzieren.

Batteriebus- wie Brennstoffzellenbussysteme können derzeit nur unter Nutzung von Förderungen und unter bestimmten Bedingungen annähernd wirtschaftlich bzw. mit Mehrkosten im Bereich von < 15 % eingesetzt werden. Weiterhin verdeutlicht die durchgeführte Sensitivitätsanalyse nochmals anschaulich, dass die jeweiligen Mehrkosten der einzelnen Antriebstechnologien unter den jeweils spezifischen Einsatzrandbedingungen, von verschiedenen Faktoren abhängen. Hier sind betriebliche (z. B. Fahrzeugmehrbedarf), regulatorische (z. B. Reduktion EEG-Umlage) und wirtschaftliche (z. B. Fahrzeugpreis, Energiebezugskosten) Faktoren zu nennen.

Im Ergebnis kann für die untersuchten E-Bussysteme eine Indikation zu den wirtschaftlichen Auswirkungen auf die künftigen Haushalts- und Ressortplanungen für den straßengebunden ÖPNV gegeben werden.

Ausblick

Um das angestrebte Ziel einer möglichst weitreichenden Umstellung des busbasierten ÖPNV auf alternative Antriebe als Beitrag zum Klima- und Umweltschutz zu erreichen, gilt es den erkennbar begonnenen Markthochlauf für lokal emissionsfreie Busse zu stabilisieren und weiter zu intensivieren. Hierzu bedarf es der fortgesetzten nachhaltigen Stärkung der Innovationskraft der Akteure auf breiter Front hinsichtlich weiterer technischer Entwicklung und der fortlaufenden Optimierung der betrieblichen Abläufe und Infrastruktur.

Kurzfristig gilt es, die Rahmenbedingungen so anzupassen, dass regulatorische Hürden aus dem Weg geräumt werden, langwierige Planungs- und Genehmigungsprozesse vereinfacht werden und Investitionssicherheit sichergestellt wird. Wer heute die Umstellung auf alternativ angetriebene Fahrzeuge angeht, muss langfristige Sicherheit haben, dass sich die Grundlagen seiner Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nicht durch kurzfristig veränderte Förderregime und unklare Befreiungstatbestände bei gesetzlichen Abgaben (z. B. EEG-Umlage) während der Laufzeit gegebenenfalls verschlechtern. Es gilt die begonnene Entwicklung eines sich selbsttragenden Marktes konstruktiv unterstützend zu begleiten.

Dementsprechend wurden verschiedene Handlungsoptionen entwickelt, um den Hochlauf der emissionsarmen Antriebsformen weiter zu unterstützen. Dabei geht es nicht nur um eine dem angestrebten Markthochlauf dienliche Ausgestaltung der gesetzlichen Vorgaben, sondern auch darum die Akzeptanz für die alternativen Antriebstechnologien bei den Verkehrsunternehmen und deren Kunden sicherzustellen bzw. weiter zu verbessern. Eine Übersicht über die konkret entwickelten Handlungsoptionen gliedert sich in drei Handlungsfelder:

- **Förderung** zur Reduzierung der Kostenunterschiede, zum Erkenntnisgewinn und zur Marktvorbereitung und zum -hochlauf: Schaffung von finanziellen Anreizen zur Beschaffung von emissionsfreien Bussystemen (Fahrzeuge und Infrastruktur), Studien/Konzepte, F&E Vorhaben zu Komponenten und deren Integration in das Gesamtsystem
- **Umwelt, Regularien & Prozesse:** Festlegung von Zielvorgaben für den Einsatz von Bussen im ÖPNV (z. B. die CVD-Anforderungen als Mindestvorgabe oder ambitioniertere Zielsetzungen hinsichtlich Klima- und Umweltschutz), Berücksichtigung von Emissionskosten (z. B. CO₂-Preis)
 - Steuerung von Beschaffungsprozessen über gesetzliche und regulatorische Vorgaben (z. B. CVD)
 - Vereinfachung und Beschleunigung der Prozesse für die Fördermittelbeantragung zur Beschaffung von Fahrzeugen und Energieversorgungsinfrastruktur, Berücksichtigung erforderlicher Vorlaufzeiten bei der Vergabe von Verkehren (mindestens 24 Monate Vorlaufzeit erforderlich für Fördermittelbeschaffung, Planung, Beschaffung, Lieferung/Bau und Inbetriebnahme)
 - Ergänzung der derzeit bereitgestellten Fördermittel zur weiteren Unterstützung des einsetzenden Markthochlaufs
 - Verlängerung Laufzeit Konzessionen / Dienstleistungsverträge (verlängerte Abschreibungszeiträume)
 - Anpassung Regularien Energieversorgung (z. B. Betreiber einer öffentlichen Ladeinfrastruktur wird Stromlieferant mit allen sich daraus ergebenden Konsequenzen)
- **Wissensvermittlung und Akzeptanz:** Aufbau und Verbreitung von Wissen bzgl. alternativer Antriebstechnologien und Infrastruktursystemen von Elektrobussystemen (z. B. bezüglich ihrer Komfortmerkmale, ihrer Umweltwirkungen) zur Sicherung bzw. Steigerung der Akzeptanz der Technologien bei Verkehrsunternehmen, Aufgabenträgern und Fahrgästen

Hinsichtlich der technischen Weiterentwicklung von Schlüsselkomponenten ergeben sich aus den betrieblichen Anforderungen sowie der Notwendigkeit, die in der Anschaffung nach wie vor sehr teuren Komponenten wie z. B. die Hochvoltbatterien möglichst lange nutzen zu können, verschiedene Ansätze für Weiterentwicklungen.

Diese zielen primär auf die Minimierung des Energiebedarfs sowie das Monitoring von Batterien ab, um erhöhte Reichweiten sowie eine Verlängerung der Nutzungsdauer für Batterien zu erreichen. Weitere Entwicklungsthemen sind z. B. Bauraum, Gewicht und Produktionskosten. Bei Brennstoffzellenbussen stellt zusätzlich die Phlegmatisierung der Brennstoffzelle, also die Vermeidung hochdynamischer Leistungsänderungen, ein Zielkriterium dar, was wiederum deren Nutzungsdauer erhöht. Hinzu kommen sog. Reichweitensicherungsfunktionen (RSF), die bei einem absehbaren Nichterreichen eines vorgesehenen Umlaufplans entsprechende Maßnahmen zur Verringerung des Energieverbrauchs einleiten.

Bezüglich der Marktpotenziale der verfügbaren emissionsfreien Antriebe kann aktuell keine abschließende Prognose erfolgen. Wie die durchgeführten Analysen zeigen, betragen annähernd 20 % der Umläufe bei den Verkehrsunternehmen mehr als 300 km. Brennstoffzellenbusse können diese Anforderung zwar heute schon erfüllen, weisen zum Teil jedoch noch höhere Systemkosten (inkl. H₂ Bereitstellung) auf als Batteriebusse, die diese Reichweite jedoch aktuell nicht erfüllen können. Eine technologieoffene Förderung von Batterie- und Brennstoffzellenbussen ist also weiterhin notwendig. Bezüglich der Förderung ist gleichzeitig zu berücksichtigen, dass diese neben der Klimaschutzzielsetzung als Unterstützung des Markthochlaufs gedacht ist, bis sich ein selbsttragender Markt entwickelt hat, von daher besteht seitens der verschiedenen Fördermittelgeber das formulierte Ziel die Förderintensität perspektivisch zurückzufahren. Dies bedingt, dass die Anbieter von emissionsfreien Bussen und zugehöriger Ladeinfrastruktur mittel- bis langfristig Kostenreduktionen im hierfür erforderlichen Umfang realisieren können.

Schließlich können die emissionsfreien Antriebstechnologien unterschiedliche Beiträge zur angestrebten Sektorenkopplung im Kontext der Energiewende liefern. So stellen die Batterien von Bussen, als mobile oder im „zweiten Leben“ auch als stationäre, elektrochemische Speicher eine kurzfristige Speicheroption für die fluktuierende Erzeugung erneuerbarer Energien dar. Technisch ist das bereits heute möglich, doch auch hier sind noch eine Reihe regulatorischer Hürden zu bewältigen. Bei Brennstoffzellenbussen führt die Transformation der volatilen erneuerbaren Energie in Wasserstoff zu einer zeitlichen Entkopplung von Strombezug für die Elektrolyse des Wasserstoffs und Betankung der Busse. Durch die Nutzung von Strommengen, die z. B. in windstarken Zeiten von großen Wasserstoffproduktionsanlagen absorbiert werden, kann damit auch die Gesamteffizienz eines auf erneuerbare Energien ausgerichteten Energiesystems gesteigert werden, obwohl die Wirkungsgradverluste des einzelnen Brennstoffzellenbusses zusammen mit den Effizienzverlusten der H₂-Erzeugung höher sind als die des Batteriebusses.

1 Einführung

1.1. Ausgangssituation – Rahmenbedingungen und politischer Kontext

Ziel der Bundesregierung ist es, den Verkehrssektor energieeffizienter sowie klima- und umweltverträglicher zu gestalten. Eine der wesentlichen Voraussetzungen für das Erreichen dieses Ziels ist die Umstellung des Verkehrs auf erneuerbare Energien in Verbindung mit emissionsarmen Antriebstechnologien. Als Teil des jüngst überarbeiteten Klimaschutzprogrammes hat die Bundesregierung das konkrete Ziel formuliert, dass in 2030 die Hälfte der Stadtbusse elektrisch fährt. Die Elektromobilität ist somit für das Erreichen des Zieles der Energiewende ein erfolgskritischer Faktor. Verschiedene Förderprogramme und Demonstrationsvorhaben haben seit 2009 maßgeblich zur Entwicklung der Elektromobilität in Deutschland beigetragen. Im Rahmen der aktuellen Förderprogramme wird nun neben klassischen Forschungs- und Entwicklungsprojekten verstärkt der Markthochlauf alternativer Antriebe gefördert.

Als zentraler Baustein des Verkehrssystems befördert der Öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) bereits heute in Deutschland jährlich rund 10 Milliarden Fahrgäste sowohl in Ballungsgebieten als auch im ländlichen Raum. Bezogen auf die beförderten Personen verbrauchen seine Fahrzeuge weniger Energie, benötigen weniger Fläche im Verkehr auf der Straße und sparen damit wichtige Ressourcen im Vergleich

zum motorisierten Individualverkehr. Allerdings sind die Busse infolge ihrer hohen Laufleistungen und des überwiegenden Dieselantriebs auch Emittenten von Schadstoffen wie z. B. Stickoxiden und Lärm, gerade in dichtbesiedelten Stadtgebieten. Da in jüngster Vergangenheit und auch heute immer noch in einer Reihe deutscher Städte die Schadstoffgrenzwerte nicht eingehalten werden und die Lärmbelastung der Bevölkerung durch Straßen- bzw. Umgebungslärm ein drängendes Umweltproblem darstellt, stehen die Verkehrsunternehmen derzeit vor der Aufgabe, den Umstieg von Dieselbussen auf einen klima- und umweltfreundlichen ÖPNV mit alternativ angetriebenen Bussen zu realisieren. Schließlich ist seit August 2021 die geltende Clean Vehicles Directive (CVD) der europäischen Kommission die Einführung von Bussen mit alternativen Antrieben bei Neubeschaffungen bzw. -vergaben, zumindest anteilig, verpflichtend².

² Nähere Informationen zur Clean Vehicles Directive der Europäischen Kommission und ihrer Umsetzung finden sich im nächsten Abschnitt.

Gerade der ÖPNV spielt eine wichtige Rolle bei der Verkehrs- bzw. der Energiewende im Verkehr. Die Elektrifizierung des Antriebsstranges stellt die aktuell am intensivsten verfolgte Alternative für innovative Antriebssysteme für Nahverkehrsbusse dar. Dabei stehen im Wesentlichen drei Optionen zur Verfügung, die alle über einen elektrischen Antrieb verfügen und dementsprechend unter dem Oberbegriff E-Bus zusammengefasst werden können:

- Batteriebusse (BEV-Bus, im Bericht auch synonym mit Batteriebus bezeichnet)
- Wasserstoffangetriebene Brennstoffzellenbusse (BZ-Bus)
- Oberleitungsbusse (OBus, auch bekannt unter dem Begriff „Trolleybusse“)
- Hybrid-Oberleitungsbusse (HOBUS, Kombination aus Batterie- und Oberleitungsbus)

Ein solch grundlegender Wechsel der Antriebstechnologie, der statt des etablierten, zumeist Diesel-angetriebenen Verbrennungsmotors elektrische Antriebe vorsieht, stellt für die Verkehrsunternehmen eine beträchtliche Herausforderung dar und erfordert einen ganzheitlichen Ansatz. Er umfasst neben der Auswahl der am besten geeigneten Antriebstechnologie und Fahrzeugkonfiguration auch die Art der Energieversorgung sowie eine neue Organisation des Betriebes.

Die Eignung der verschiedenen zur Verfügung stehenden innovativen Antriebe wird maßgeblich durch die jeweiligen betrieblichen und technischen Rahmenbedingungen sowie die Kosten bestimmt. Für die zentralen Komponenten der Elektrobusse (wie Batterien und Brennstoffzellen) und die notwendige Infrastruktur (wie Ladestationen und Elektrolyseure zur H₂-Produktion) wird dabei für die nächsten Jahre noch ein erhebliches technisches und ökonomisches Optimierungspotenzial erwartet. Die Verkehrsunternehmen stehen also bei der Umstellung auf einen emissionsarmen bzw. -freien ÖPNV einer ganzen Reihe von Unsicherheiten gegenüber.

³ Eine Übersicht zu den verschiedenen Förderprogrammen auf EU-, Bundes- und Landesebene findet sich in der Förderübersicht unter <https://www.starterset-elektromobilität.de/Bausteine/OEPNV>

⁴ NOW GmbH auf Basis KBA: Auswertung KBA-Zahlen Juli 2021. 895 Batteriebusse, 81 OBusse, 51 BZ Busse. <https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/08/KBA-Report-07-2021.pdf>, letzter Zugriff 13.8.2021

⁵ NOW GmbH: Förderprogramme Elektromobilität, <https://www.now-gmbh.de/foerderung/foerderprogramme/elektromobilitat>, letzter Zugriff am 13.08.2021

⁶ United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC): Paris Agreement, 2015, https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf, 08.06.2021 um 16:40

⁷ Bundesregierung: Gesetz zur Umsetzung der Richtlinie (EU) 2019/1161 vom 20. Juni 2019 zur Änderung der Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge sowie zur Änderung verbarechtlicher Vorschriften (Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungsgesetz – SaubFahrzeug-BeschG), veröffentlicht im Bundesgesetzblatt am 14. Juni 2021.

⁸ Europäische Kommission: Richtlinie (EU) 2019/1161 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019 zur Änderung der Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge (Clean Vehicles Directive (CVD)), 2019, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L1161&from=EN>, 08.06.2021 um 16:45

Um die Verkehrsunternehmen bei der Umstellung zu unterstützen, gibt es verschiedene Förderinitiativen auf europäischer, Bundes- und Landesebene³, und diese zeigen Wirkung. Während vor einigen Jahren der Einsatz von Elektrobussen für den Öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) meist nur vereinzelt als Testbetrieb im Rahmen von geförderten Forschungs- und Demonstrationsvorhaben stattgefunden hat, steigt mittlerweile die Zahl von E-Bussen im Regelbetrieb. Bereits über 1.000 E-Busse waren laut KBA im Juli 2021 im Einsatz⁴.

Das Bundesverkehrsministerium (BMDV) fördert aktuell über die bis 2025 laufende Förderrichtlinie Elektromobilität folgende Elemente:

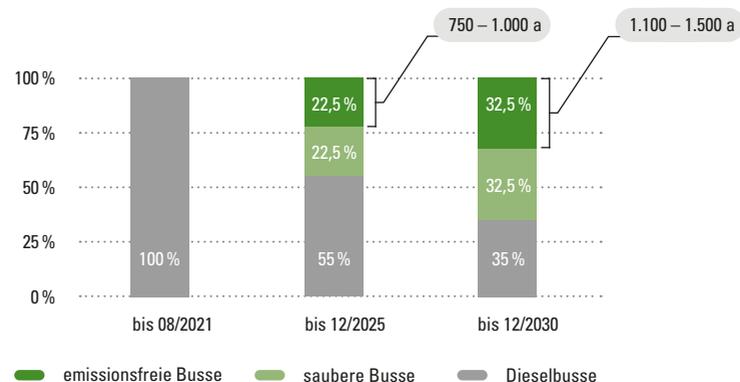
- Beschaffung von batterieelektrischen Fahrzeugen und der für den Betrieb notwendigen Ladeinfrastruktur,
- kommunale und gewerbliche Elektromobilitätskonzepte,
- Forschung und Entwicklungsprojekte⁵

Über das Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP II) werden entsprechend des Förderschwerpunktes die Beschaffung von Fahrzeugen und der zugehörigen Tankinfrastruktur sowie Forschungs- und Entwicklungsprojekte (F&E) gefördert. Im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS) werden F&E-Projekte zu weiteren alternativen Antrieben, z. B. Hybridoberleitungsbusse, gefördert, sodass sich insgesamt eine technologieoffene Unterstützung des Markthochlaufs für alternative Antriebe bei Nahverkehrsbusen ergibt.

Gesetzliche Treiber

Die eingangs erwähnten Anforderungen hinsichtlich der Luftqualität sowie der Lärminderung in den Innenstädten und die gesellschaftlichen Anstrengungen, den Ausstoß an Treibhausgasen zum Schutze des Klimas, wie im Klimaschutzabkommen von Paris⁶ geregelt, zu reduzieren, stellen die wesentlichen Treiber für den Einsatz von Elektrobussen bzw. sogenannten Nullemissionsfahrzeugen im ÖPNV dar.

Als aktuell relevantester Treiber für die Verbreitung von Elektrobussen kann das Gesetz zur Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge (Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungsgesetz – SaubFahrzeug-BeschG)⁷ angesehen werden, welches die Umsetzung der europäischen Clean Vehicles Directive (CVD)⁸ regelt.

ABBILDUNG 1 Quotenregelung nach EU Clean Vehicles Directive bzw. SaubFahrzeugBeschG seit 2.8.2021


Das SaubFahrzeugBeschG gibt seit dem 2.8.2021 verbindliche Quoten für die Neubeschaffung von „sauberen und emissionsfreien“ Bussen für den ÖPNV vor. Damit wird für den deutschen ÖPNV festgelegt, dass zunächst ab dem 2.8.2021 bis zum 31.12.2025 mindestens 45 % der neu zu beschaffenden Busse bzw. im Rahmen neu vergebener Dienstleistungsaufträge zur Personenbeförderung eingesetzten Fahrzeuge alternative bzw. als „Saubere“ klassifizierte Antriebskonzepte zu verwenden haben, die Hälfte davon wiederum emissionsfrei (siehe Abbildung 1). Zu den „sauberen“ Antriebskonzepten zählen laut Gesetz alternative Kraftstoffe wie GtL, CNG, LNG und Biokraftstoffe bzw. Diesel-Plug-In-Hybride. Mindestens 22,5 % der neu zu beschaffenden bzw. im Rahmen neu vergebener Linienverkehre eingesetzten Busse müssen emissionsfrei sein. Als emissionsfrei gelten im Sinne der CVD elektrisch angetriebene Busse (Batterie-, BZ- oder Oberleitungsbusse) und Busse mit H₂-Verbrennungsmotor.

Hieraus ergibt sich in Deutschland voraussichtlich ein Umstellungsbedarf von bis zu ca. 1.000 emissionsfreien Bussen pro Jahr⁹. Weitere potenzielle Treiber für den steigenden Einsatz von E-Bussen ergeben sich aus der Umsetzung der Renewable Energy Directive II (RED II) und der Novellierung des Erneuerbaren-Energie-Gesetzes 2021 (EEG 2021). Das EEG 2021 sieht für Verkehrsunternehmen ab 2022 eine Reduktion der EEG-Umlage auf 20 % für den fahrbetriebsbedingten elektrischen Energieverbrauch (ab 100 MWh Jahresverbrauch) vor und führt damit zu einer Entlastung der Verkehrsunternehmen um mehr als 5 ct/kWh. Mit der „Verordnung zur Festlegung weiterer Bestimmungen zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminierungs-Quote“ für die Umsetzung der RED II wird hingegen der elektrische Energieeinsatz mit dem dreifachen seines Energiegehaltes für die Erfüllung der Treibhausgasminierungs-Quote angerechnet. Damit wird zumindest prinzipiell ein Anreiz für Inverkehr-

⁹ Ab dem 1.1.2026 steigt die Quote an sauberen Bussen auf mindestens 65 %, so dass dann bereits mindestens 32,5 % der neu eingesetzten Busse emissionsfrei sein müssen. In Stückzahlen ausgedrückt ergibt sich daraus eine geschätzte Nachfrage für bis zu 1.500 emissionsfreie Busse pro Jahr.

bringer von fossilen Kraftstoffen (Verpflichtete im Sinne §37 BlmschG) geschaffen, Verkehrsunternehmen attraktive Konditionen für den Fahrstrombezug anzubieten. So sichert sich der Inverkehrbringer von fossilen Kraftstoffen dessen Anrechnung auf die eigene THG-Minderungsquote.

Überblick und weiterführende Informationen zu den politischen Rahmenbedingungen auf den unterschiedlichen politischen Ebenen finden sich im Kapitel 2.1.3.

1.2. Inhalte der Begleitforschung Bus

Programmatische Begleitforschung des Bundesverkehrsministerium

Mit dem Ziel, die Einzelergebnisse der im Rahmen der verschiedenen in Kapitel 1.1 genannten Förderprogramme geförderten Projekte zur Unterstützung der Marktvorbereitung und -aktivierung für Elektromobilitätsanwendungen zusammenzuführen, wurde im Zusammenhang mit der Umsetzung der Förderrichtlinie Elektromobilität eine programmatische Begleitforschung seitens des BMDV initiiert. Die Begleitforschung bündelt die Projektergebnisse aus den drei Förderbereichen Fahrzeugbeschaffung, Elektromobilitätskonzepte und F&E-Projekte und wertet diese aus. Zwischen den beteiligten Unternehmen und Organisationen finden eine Vernetzung und ein reger Austausch statt, um Wissen zu vertiefen und neue Akteure zu befähigen, in das Thema Elektromobilität einzusteigen und perspektivisch die Bestandsflotte auf alternative Antriebe umzustellen. Die Ergebnisse werden über das Starterset Elektromobilität der breiteren Öffentlichkeit zugänglich gemacht sowie direkt an die relevanten Stakeholder der Themenfelder und kommunale Akteure übergeben. Weiterhin bietet die Programmbegleitforschung die Möglichkeit, den eigenen Flotteneinsatz hinsichtlich der technischen und wirtschaftlichen Potenziale sowie der Umweltwirkung im Gesamtkontext der im Programm geförderten Fahrzeuge einzuordnen. Die Steuerung der programmatischen Begleitforschung erfolgt durch die Programmgesellschaft NOW (Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie).

Um den Markthochlauf der Elektromobilität zu unterstützen, wurden vier wesentliche Themenfelder identifiziert, welche die Säulen der laufenden Programmbegleitforschung darstellen:

- Innovative Antriebe und Fahrzeuge
- Rahmenbedingungen / Markt
- Vernetzte Mobilität
- Infrastruktur

Die Begleitforschung Bus

Die Fahrzeugklasse Bus steht im Fokus des Themenfeldes Innovative Antriebe und Fahrzeuge. Mit der Durchführung der Begleitforschung Innovative Antriebe im straßengebundenen ÖPNV, kurz Begleitforschung Bus (BeFo Bus), hat das Bundesverkehrsministerium im Herbst 2018 ein Konsortium¹⁰ unter der Leitung von Sphera beauftragt. Die Begleitforschung setzt die vorhergehenden Begleitforschungsaktivitäten zu (teil-) elektrifizierten Bussen (Dieselhybridbusse und Batteriebusse) im Rahmen des vom BMDV geförderten F&E Projektes EFBEL (FKZ 03EM0603) sowie weiterer vom BMDV geförderten Projekte unter Federführung von Sphera (vormals thinkstep) fort. Sie wurden gemeinsam mit mehreren Partnern des aktuellen BeFo Bus Konsortiums bearbeitet.

Die Begleitforschung Bus verfolgt entsprechend der Vorgabe des BMDV folgende übergeordnete Ziele:

- Detaillierte Analyse und Bewertung der geförderten E-Bussysteme, bestehend aus Bussen mit elektrischem Antrieb und der zugehörigen Lade- bzw. Tankinfrastruktur unter Berücksichtigung der jeweiligen Einsatzbedingungen.
- Aufbauend auf den Ergebnissen der durchgeführten Bewertung die Entwicklung und Bereitstellung von Informationen und Entscheidungshilfen, z. B. in Form eines Leitfadens und eines interaktiven, rechnergestützten Tools für Verkehrsunternehmen bzw. Aufgabenträger zur Unterstützung der Auswahl des geeigneten E-Bussystems unter Berücksichtigung des jeweils spezifischen Einsatzkontexts vor Ort.

Die Ergebnisse der Begleitforschung Bus werden im vorliegenden Abschlussbericht vorgestellt.

Die Bewertung der E-Busse erfolgte anhand der eingehenden Analyse der betrieblichen Anforderungen (siehe Kapitel 2.1), der im Laufe des Untersuchungszeitraum (Q1 2019 bis Q2 2021) erzielten Einsatzreife (siehe Kapitel 2.2) und der Energieeffizienz (siehe Kapitel 2.3). Darüber hinaus erfolgte eine lebenszyklusbasierte ökologische und wirtschaftliche Bewertung der eingesetzten E-Bussysteme (siehe Kapitel 2.4 und 2.5). Ergänzt wird die Technologiebewertung um Informationen und Ergebnisse aus sieben F&E-Projekten zu verschiedenen E-Busthemen sowie 13 E-Mobilitätskonzeptstudien. Letztere widmen sich entweder schwerpunktmäßig dem busbasierten ÖPNV oder betrachten den ÖPNV zumindest als einen Teilbereich.

Als Referenztechnologie für die Evaluation innerhalb der einzelnen Bewertungskategorien wird der etablierte Dieselmotor herangezogen. Tabelle 1 führt die für die Evaluation verwendeten Bewertungskategorien und -kriterien auf. Um die Praxistauglichkeit und Einsatzreife der Busse zu bewerten, erfolgt die Auswertung der im Untersuchungszeitraum erfassten Betriebsdaten entsprechend den gewählten Bewertungskriterien, wie etwa der Laufleistung, der Verfügbarkeit, des Einsatzreifegrades und des Energieverbrauchs inkl. der Energieeffizienz der Energieversorgungsinfrastruktur.

Innerhalb der Bewertungskriterien erfolgt auch, soweit sinnvoll möglich, ein Abgleich mit den seitens der Verkehrsunternehmen formulierten Anforderungen und Erwartungen an die eingesetzte Technologie im Sinne eines Soll-Ist-Abgleichs. Beispiele hierfür sind die Reichweite und die Einschätzung des Reifegrades der Technologie.

TABELLE 1 Bewertungskategorien und -kriterien der Begleitforschung Bus

Bewertungskategorie	Bewertungskriterien
Praxistauglichkeit und Einsatzreife	Täglicher Einsatz (Laufleistung, Reichweite)
	Verfügbarkeit Fahrzeuge
	Verfügbarkeit Ladeinfrastruktur
	Einsatzreife / Technology Readiness Level (TRL)
Effizienz	Energieverbrauch Fahrzeug
	Einfluss klimatischer Bedingungen
	Energieverbrauch Ladeinfrastruktur
Ökologie und Klimaschutz	Reduktion CO ₂
	Reduktion NO _x , Feinstaub / PM
	Sensitivitätsanalyse
Wirtschaftlichkeit	Lebenszykluskosten (total cost of ownership, TCO)
	Sensitivitätsanalyse

¹⁰ Das Konsortium zur Durchführung der Begleitforschung innovative Antriebe Bus wird von Sphera Solutions koordiniert. Weitere Partner sind VCDB, hySOLUTIONS, Fraunhofer IVI, SEK Consulting und die IVV Aachen.

Nach der technischen Evaluation erfolgt die Untersuchung der ökologischen Effekte sowie der Wirtschaftlichkeit der E-Busse über ihren Lebenszyklus im Vergleich zu konventionellen Dieselnissen.

Basierend auf den Ergebnissen der technisch-betrieblichen, ökologischen und wirtschaftlichen Bewertung wurde ein Leitfaden erstellt und ein Entscheidungstool entwickelt, die beide in Kapitel 2.6 kurz vorgestellt werden.

Arbeitsgruppe Innovative Antriebe Bus

Die Ergebnisse werden den Stakeholdern unter anderem im Rahmen der Arbeitsgruppe Innovative Antriebe Bus (kurz AG Bus) zur Verfügung gestellt. Die AG Bus wurde gemeinsam vom Bundesverkehrs- und Bundesumweltministerium 2012 initiiert und dient seither als Plattform für den Informations- und Erfahrungsaustausch zwischen Verkehrsunternehmen, Herstellern, Forschungsinstitutionen und den fördernden Bundesministerien. Dabei vernetzt sie die 34 seitens des BMDV geförderten E-Busprojekte bei 33 Verkehrsunternehmen mit ihren mehr als 380 Elektrobussen untereinander (siehe Abbildung 2) sowie mit den vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUV) geförderten E-Busprojekten (65 Verkehrsunternehmen und knapp 1.500 E-Busse). Bei den vom BMUV geförderten Projekten handelt es sich ausschließlich um Batteriebusse.

Die Punkte in der Übersichtskarte zu den vom BMDV geförderten Projekten sind in Abhängigkeit der Antriebsart und dem Informationsstand eingefärbt. Nähere Informationen zu den einzelnen Projekten inklusive der vom BMUV geförderten Projekte finden sich in der Projektübersichtsbroschüre 2021¹¹.

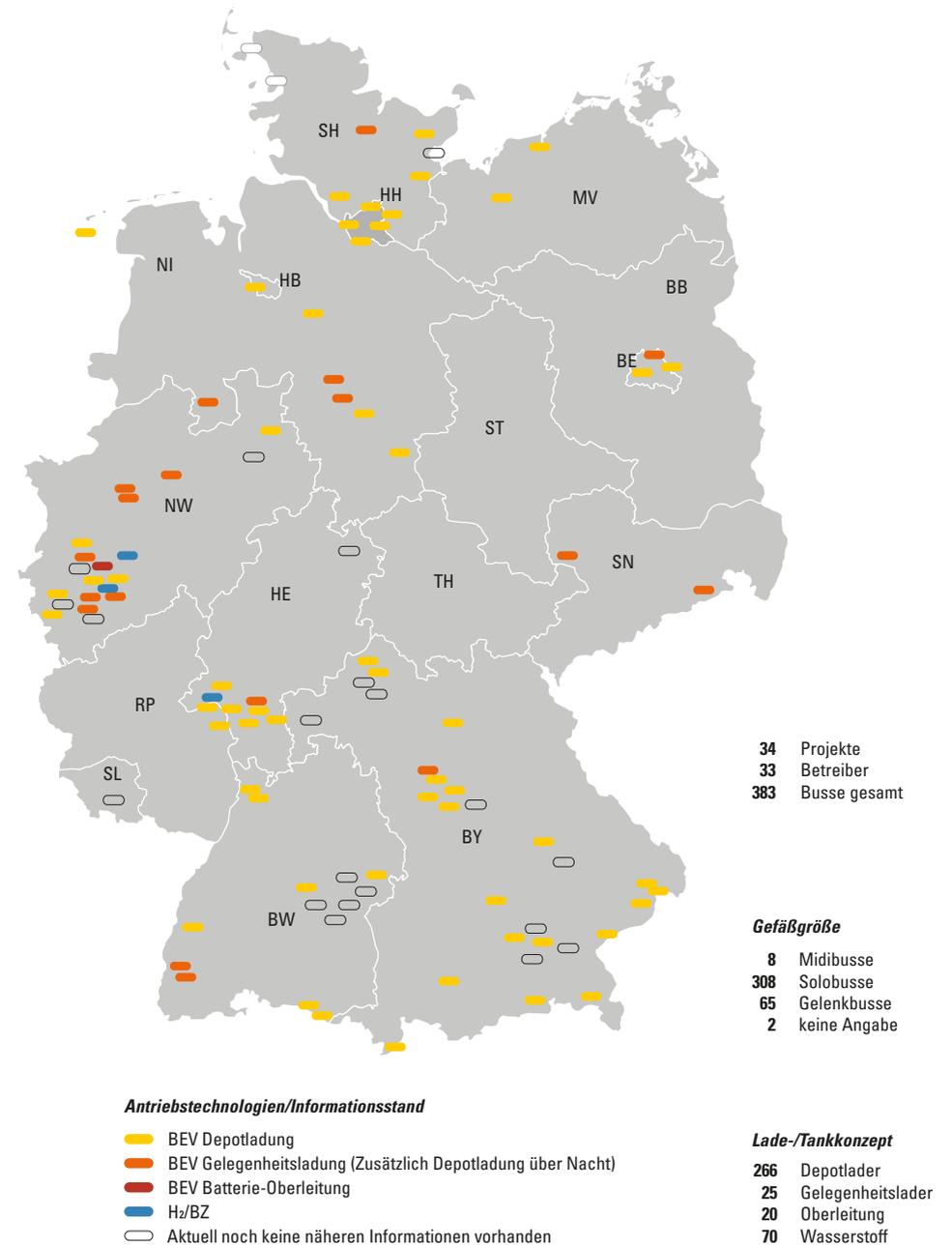
¹¹ Die Projektübersichtsbroschüre 2021 findet sich auf dem Starterset Elektromobilität unter www.starterset-elektromobilitaet.de/Bausteine/OEPNV.



Quelle: Hamburger Hochbahn 2021

Quelle: Regionalverkehr Köln GmbH 2021

ABBILDUNG 2 Übersicht BMDV-geförderte E-Busprojekte



1.3. Betrachtete Technologien

Fahrzeuge

Gemäß CVD gilt ein Fahrzeug als „emissionsfreies Fahrzeug“, wenn die Emissionen im Betrieb des Fahrzeugs weniger als 1 g CO₂/kWh betragen. Dazu zählen Fahrzeuge, die mit elektrischer Energie, im Bericht wird im Sinne der Vereinfachung auch der Begriff „Strom“ verwendet, oder Wasserstoff betrieben werden. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die in der Programmbegleitforschung betrachteten emissionsfreien Antriebsarten für Nahverkehrsbusse. Batteriebusse (BEV-Bus) werden dabei über einen Elektromotor angetrieben, der entweder als Zentralmotor, als radnaher Motor (mit Getriebestufe) oder als Radnabenmotor installiert ist. Um den Elektromotor anzutreiben, wird dabei entweder die elektrische Energie in einer Batterie gespeichert oder über eine Oberleitung zugeführt. Dabei ist zwischen Stromzufuhr während der Fahrt über die Fahrleitung bei Oberleitungsbussen oder der Stromzufuhr während des Ladevorgangs zu unterscheiden. Hier kann nochmals zwischen konduktiver (kabelgebunden) und induktiver (Ladeplatte mit Spule) Stromzufuhr unterschieden werden. Damit OBusse auch auf oberleitungsfreien Strecken fahren können, haben sie eine zusätzliche Stromquelle an Bord. War dies früher ein meist dieselbetriebener Zusatzgenerator, der von der Leistungsfähigkeit aber nicht für den regulären Fahrbetrieb konzipiert war, sondern primär als Mindestenergieversorgung des Fahrzeuges zur Überbrückung fahrleitungloser Streckenabschnitte, z. B. auf dem Betriebshof¹², fungierte, wird diese Funktion mittlerweile von einem Hochvolt-Batteriespeicher übernommen. Diese mit Hochvoltbatterien ausgestatteten OBusse werden Hybrid-OBusse genannt, die je nach installierter Batteriekapazität auch mehrere km ohne Fahrdrat zurücklegen können. Dieser ermöglicht nun auch mit seiner Leistungsfähigkeit einen vollwertigen Fahrbetrieb auf längeren oberleitungsfreien Abschnitten.

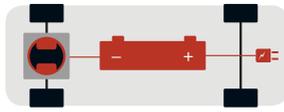
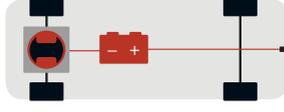
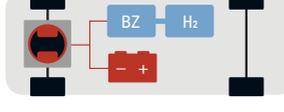
Bei den Brennstoffzellen-Bussen (BZ) wird der an Bord gespeicherte Wasserstoff in einer Brennstoffzelle in Strom umgewandelt. Über eine Zapfsäule wird der Bus mit komprimiertem Wasserstoff betankt. Dies dauert typischerweise – je nach Tankgröße und Konfiguration der Tankstelle – weniger als zehn Minuten. Brennstoffzellenbusse sind ebenfalls grundsätzlich mit einer Hochvoltbatterie ausgestattet. Diese dient als Pufferspeicher zur Rekuperation der Bremsenergie und zur Bereitstellung von zusätzlicher Leistung für den Antrieb, z. B. beim Anfahren. Sie ist bedarfsgerecht mit einer deutlich geringeren Kapazität im Vergleich zu einem Batteriebus ausgelegt und verfügt in der der Regel nicht über eine externe Nachlademöglichkeit.

¹² Der Begriff „Betriebshof“ wird im Bericht synonym mit dem Begriff „Depot“ verwendet.

Aufgrund der Umwandlungsverluste weisen wasserstoffbetriebene Fahrzeuge im Vergleich zu BEV-Fahrzeugen einen geringeren energetischen Wirkungsgrad auf. Dafür existieren deutliche Vorteile im Hinblick auf Betankungszeit und Reichweite.

Darüber hinaus gibt es noch zwei weitere wasserstoffbetriebene Antriebskonzepte, die sich aktuell in der Entwicklung befinden und derzeit noch nicht im Einsatz bei Verkehrsbetrieben sind, aber an dieser Stelle der Vollständigkeit halber erwähnt werden sollen. Dies ist zum einen der Brennstoffzellen-Range-Extender (BZ-REX) und der Wasserstoffverbrennungsmotor. Der BZ-REX stellt eine Kombination des Batteriebusses mit (großer) HV-Batterie und externer Nachladung sowie einer Brennstoffzelle mit H₂-Speicher zur Reichweitenverlängerung dar. Dementsprechend sind für dieses Antriebskonzept sowohl eine Lade- als auch eine H₂-Tankinfrastruktur vorzuhalten. Der H₂-Verbrennungsmotor bietet Synergien mit der etablierten (Gas-)Verbrennungsmotorentechnik und stellt perspektivisch eine kostengünstigere Alternative zum H₂/BZ-Bus dar, da die meisten der „klassischen“ Antriebsstrangkomponenten des etablierten Verbrennungsmotors genutzt werden können. Er weist allerdings prinzipbedingt einen niedrigeren Wirkungsgrad im Vergleich zur Brennstoffzelle auf und bedarf weiterhin einer Abgasnachbehandlung, vor allem bezüglich Stickoxidemissionen.

TABELLE 2 Übersicht betrachteter alternativer Antriebsoptionen für Busse

	Prinzip	Foto	Reife
Strom	BEV 	Vestische Straßenbahnen GmbH 	Serie
	OBus 	Stadtwerke Solingen GmbH 	Serie
Wasserstoff	BZ-Bus 	Stuttgarter Straßenbahnen AG 	(Klein-) Serie

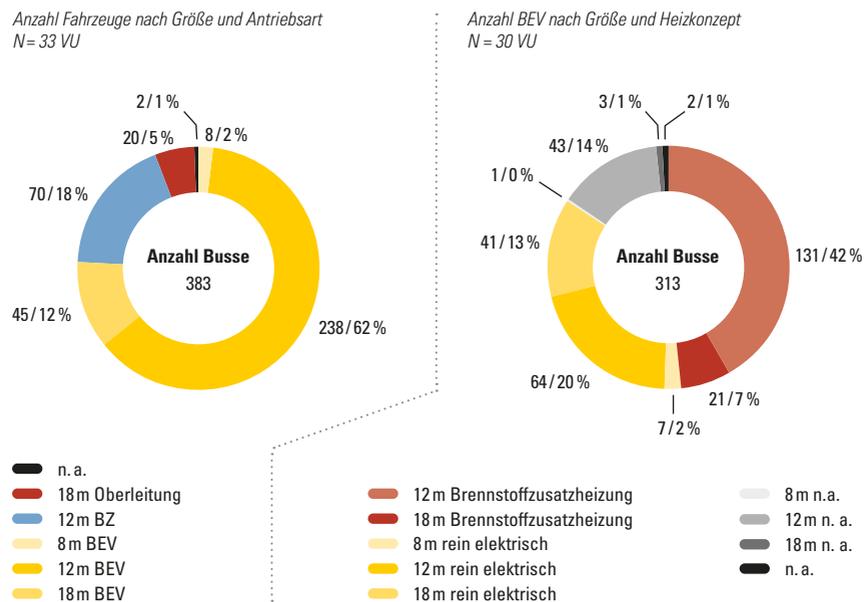
Übersicht zu den geförderten Bussen nach Gefäßgröße und Heizungskonzept

Während es sich bei den 70 geförderten Brennstoffzellenbussen, die bei 2 Verkehrsunternehmen eingesetzt werden, ausschließlich um 12-m-Busse handelt, kommen bei den 20 geförderten Oberleitungsbussen nur 18-m-OBusse zum Einsatz. Diese werden alle von einem Verkehrsunternehmen betrieben. Den größten Anteil der durch das BMDV geförderten Busse machen die 313 Batteriebusse (inkl. OBusse) aus, die bei 31 Verkehrsunternehmen betrieben werden. Dabei handelt es vornehmlich um 12-m-Busse (238), gefolgt von den 18-m- (45) und 8-m- (8) Bussen. Von weiteren zwei geförderten Bussen ist die Gefäßgröße noch nicht bekannt, da das Projekt aktuell ruht.

Mit Blick auf den zu erwartenden Energieverbrauch von Batteriebussen ist das gewählte Heizungs- bzw. Klimatisierungskonzept entscheidend. So werden entsprechend Abbildung 3 knapp 50 % der Busse (152) über eine Brennstoffzusatzheizung beheizt, weitere 36 % (112) rein elektrisch. Von ca. 15 % der Busse (49) ist noch nicht bekannt, welches Heizungskonzept gewählt wird. Der Einfluss des Heizungskonzeptes auf den elektrischen Energiebedarf wird in Kapitel 2.3.2 genauer untersucht

13 N steht für die Anzahl Verkehrsunternehmen

ABBILDUNG 3 Aufteilung der geförderten Busse nach Antriebsart und Gefäßgröße, BEV nach Heizungskonzept und Gefäßgröße¹³



Marktübersicht / Verfügbarkeit

Im Rahmen der Begleitforschung Bus wurden auf Grundlage von kontinuierlichen Marktrecherchen die Marktverfügbarkeit der untersuchten Antriebstechnologien mit Blick auf die mögliche Umsetzung der jeweiligen Technologievariante betrachtet. Das Ergebnis dieser Recherchen zeigt auf, dass bereits ein etablierter Markt für die 12-m- und 18-m-Batteriebusse vorhanden ist. Für den 12-m-Brennstoffzellenbus wurden aktuell drei relevante Hersteller identifiziert, wobei aktuell noch kein 18-m-Brennstoffzellenbus marktverfügbar ist. Diese Fahrzeugkategorie ist laut Herstellerangaben für den Zeithorizont 2023 / 24 angekündigt. Das BZ-REX-Konzept wird derzeit durch keinen Hersteller angeboten. Die Technologie des Oberleitungsbusses wird durch eine geringe Anzahl, jedoch als etabliert einzustufender Hersteller, sowohl im 12-m- als auch 18-m-Bereich, marktseitig abgedeckt.

Energieversorgungsinfrastruktur

Batteriebusse

Für die Energieversorgung der Batteriebusse, d. h. die Nachladung, gibt es zwei unterschiedliche Konzepte, um den Ladevorgang bestmöglich in den Betrieb zu integrieren. Eine Variante ist die Nachladung der Fahrzeuge während Betriebspausen im Depot, was vorzugsweise über Nacht stattfindet. Die Nachladung kann aber auch untertäglich in einer Betriebspause erfolgen. Dieses Konzept wird Depotladung genannt. Bei der zweiten Variante wird der Bus zusätzlich regelmäßig im Betrieb nachgeladen. Bei der sogenannten „Gelegenheitsladung“ findet die Nachladung der Hochvoltbatterie normalerweise auf der Strecke statt, z. B. an Endhaltestellen oder Wendepunkten während den planmäßigen Wendezeiten oder Fahrerpausen.

Als Depotlader ausgelegte Batteriebusse verfügen für gewöhnlich über eine möglichst große Batteriekapazität und die eingesetzte Batterietechnologie ist üblicherweise nur bedingt schnellladefähig. Das bedeutet, dass sie, abhängig von der eingesetzten Batterietechnologie, üblicherweise nur eine Ladeleistung verträgt, die vom Zahlenwert her maximal im Bereich ihrer Kapazität liegt. Zur Veranschaulichung soll folgendes Beispiel dienen. Eine NMC-Batterie mit einer Batteriekapazität von 250 kWh wird zur Gewährleistung der Lebensdauer normalerweise mit maximal 250 kW geladen werden. Das Verhältnis zwischen Ladeleistung und Speicherkapazität wird als Laderate (C) ausgedrückt, d. h. die Laderate bei Depotladern liegt in der Regel bei ≤ 1 . Die Energieübertragung erfolgt zumeist per Ladekabel mit Stecker, alternativ mit Stromabnehmer (Pantograph), der entweder ortsfest an der Ladeinfrastruktur oder auf dem Fahrzeugdach montiert ist. Um Lastspitzen zu vermeiden,

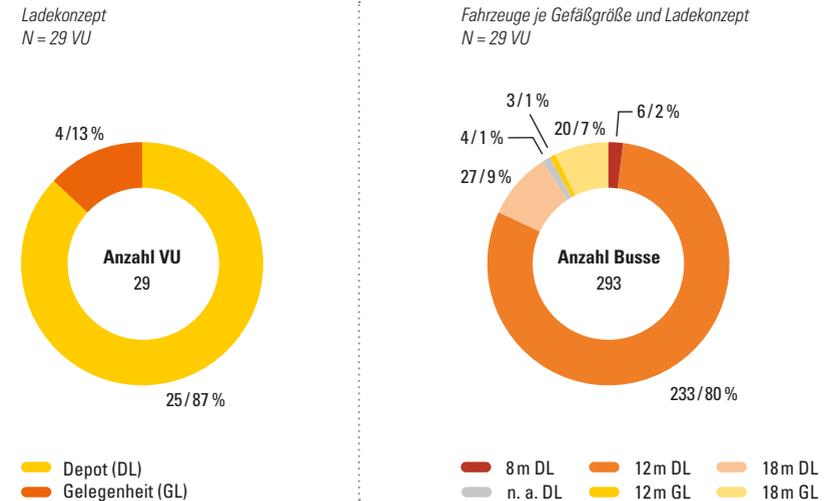
die ohnedies aus Netzentsicht möglichst minimal zu halten sind, empfiehlt es sich gerade beim absehbaren Einsatz einer größeren Anzahl an Batteriebussen ein Lademanagement vorzusehen. Es steuert sowohl die individuelle Ladeleistung als auch den Zeitpunkt des Ladevorgangs der einzelnen Busse.

Bei der Gelegenheitsladung verfügen die Batteriebusse normalerweise über niedrigere Batteriekapazitäten, da die Nachladung mehrfach am Tag erfolgt, vorzugsweise während der Wendezeit bzw. der längeren planmäßigen Standzeiten. Da in dieser Zeit eine möglichst große Energiemenge übertragen werden soll, kommen hier hohe Ladeleistungen von bis zu 450 kW zum Einsatz. Durch die Kombination von tendenziell geringer Batteriekapazität und hoher Ladeleistung können sich Laderaten von zum Teil deutlich größer 1 ergeben. In diesem Fall kommt eine alternative Batterietechnologie auf Basis Lithiumtitanoxid (LTO) zum Einsatz. Diese Batterietechnologie ist für hohe Laderaten bis zu 6 C oder zum Teil noch höher ausgelegt. Die Stromübertragung erfolgt üblicherweise aufgrund der hohen Ladeleistung per Pantograph. Die Ladeinfrastruktur für Gelegenheitslader ist entsprechend auf oder unmittelbar in der Nähe einer Linie im öffentlichen Raum zu errichten. Für die Ladung über Nacht, die in der Regel aufgrund der längeren Standzeit des Fahrzeugs mit geringerer Ladeleistung erfolgen kann, bietet sich der Betriebshof an. Die Errichtung der Ladeinfrastruktur im öffentlichen Raum kann durchaus anspruchsvoll sein, da neben der erforderlichen Anschlussleistung im Bereich 250–450 kW je Ladepunkt ggf. auch ein zweiter Ladepunkt an einer Endhaltestelle vorzusehen ist, um einen möglichst reibungslosen betrieblichen Ablauf zu gewährleisten. Damit sollen negative Auswirkungen bei Auftreten von Verspätungen bzw. einer technischen Störung in einem der Ladepunkte vermieden werden. Räumlich sollte der zweite Ladepunkt unabhängig von der Belegsituation des ersten Ladepunktes erreichbar sein, was hinsichtlich des Platzbedarfes zu berücksichtigen ist. Weiterhin ist die Auslegung des Gelegenheitsladerkonzeptes möglichst so zu gestalten, dass trotz ggf. auftretender Betriebsstörungen, wie z. B. Ausfall oder Nichterreichbarkeit eines Ladepunktes an einem der Endpunkte, ein zuverlässiger Betrieb stattfinden kann.



Quelle: Rhein-Neckar-Verkehr 2020

ABBILDUNG 4 Ladekonzept – Batteriebusse

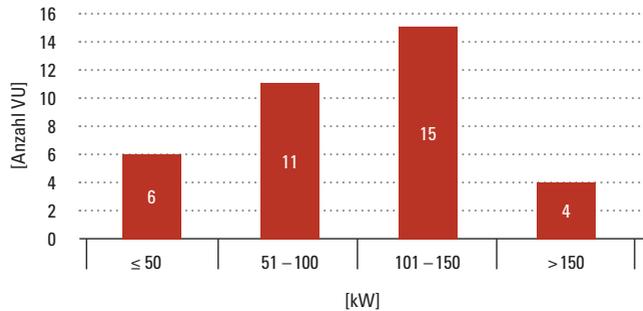


Mit Blick auf die Wahl des Ladekonzeptes haben sich innerhalb der vom BMDV geförderten Projekte 87 % der Verkehrsbetriebe für die ausschließliche Depotladung entschieden, wohingegen 13 % die Gelegenheitsladung nutzen (siehe Abbildung 4). Gemessen an der Anzahl der Fahrzeuge wird ein noch höherer Anteil mittels Depotladung mit Energie versorgt. 267 Busse bzw. über 90 % aller geförderten Busse werden per Depotladung geladen. Bei den 12-m-Bussen sind es sogar über 97 %. Bei den 18-m-Bussen werden 25 Busse (60 %) per Depotladung und 17 Busse (40 %) per Gelegenheitsladung geladen. Die geförderten 8-m-Busse werden ausschließlich per Gelegenheitsladung nachgeladen und von 2 Bussen ist das Ladekonzept aufgrund des Projektstandes noch nicht bekannt.

Bezüglich der maximal installierten Ladeleistung haben rund ein Drittel der Verkehrsbetriebe mindestens zwei unterschiedliche Ladeleistungen an den Ladepunkten installiert. 53 % der installierten Leistungen sind größer als 100 kW. Leistungen von über 150 kW sind erwartungsgemäß von Verkehrsunternehmen installiert, die die Gelegenheitsladung auf der Strecke nutzen (siehe Abbildung 5).

ABBILDUNG 5 Installierte Ladeleistung – Batteriebusse

N = 26 VU



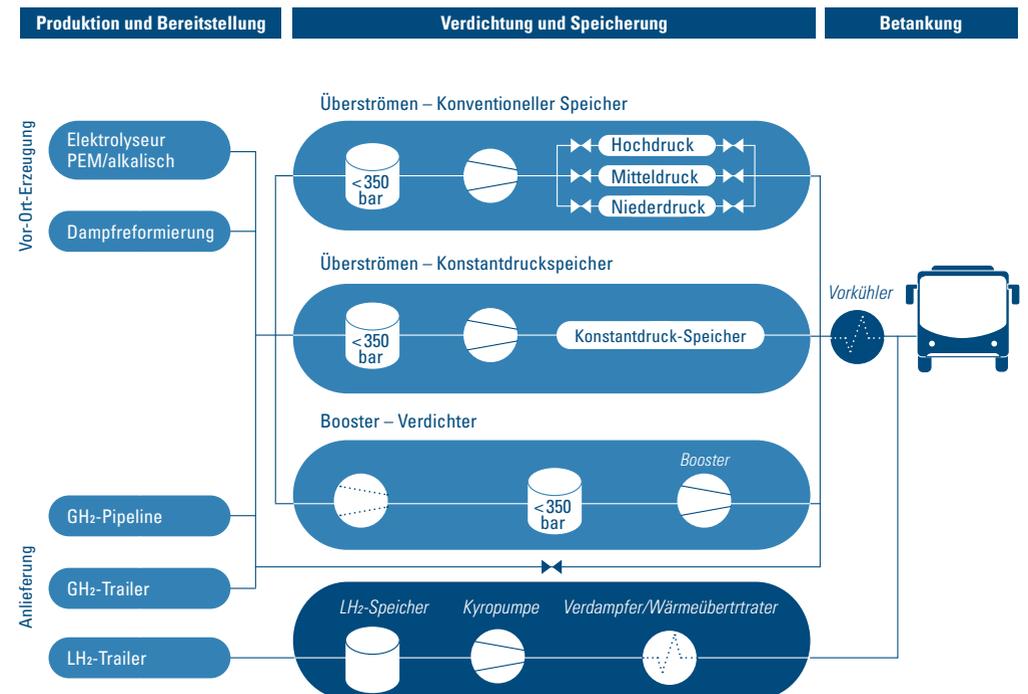
Oberleitung

OBusse werden zur Versorgung mit der benötigten elektrischen Energie während der Fahrt und auch im Stand über einen Stromabnehmer mit einer Oberleitung verbunden. Ist das Fahrzeug mit einer HV-Batterie als Energiespeicher ausgestattet, wird zusätzlich zur für den Betrieb des Fahrzeuges benötigten elektrischen Energie während der Fahrt (sogenanntes dynamisches Laden) oder auch im Stand weitere elektrische Energie aufgenommen, um die HV-Batterie zu laden. Dies führt zu einer Erhöhung der Abnahmeleistung, hier kann es in Bestandssystemen erforderlich sein, die Oberleitungsinfrastruktur für diese erhöhte Energieaufnahme zu ertüchtigen, bzw. ist die Abnahmeleistung z. B. im Stand zu begrenzen, um punktuelle thermische Belastungen am Stromabnehmer bzw. an der Fahrleitung zu vermeiden. Die Nachladung im Stand kann alternativ über einen dafür ausgelegten stationären Lademasen an der Endhaltestelle unter Verwendung der dafür ausgelegten Stromabnehmer des OBus erfolgen, wie dies z. B. in Solingen der Fall ist.

Wasserstoffinfrastruktur

Die Energieversorgungsinfrastruktur der Brennstoffzellenbusse ähnelt der von Erdgasfahrzeugen. Um ausreichend Energie im Fahrzeug zur Verfügung zu haben, muss der Wasserstoff auf Grund seiner geringen volumetrischen Energiedichte auf ein hohes Druckniveau verdichtet werden. Dabei wird beim Betankungsvorgang ein ausreichender Druckunterschied zwischen Tankstelle (bis zu 500 bar) und Bus (350 bar Enddruck) benötigt, damit der Wasserstoff in den Tank des Fahrzeugs strömt. In Abbildung 6 ist der prinzipielle Aufbau einer Wasserstofftankstelleninfrastruktur mit Bereitstellung, Verdichtung & Speicherung und Betankung dargestellt.

ABBILDUNG 6 Prinzipskizze einer Wasserstofftankstelle inklusive Anlieferung, Verdichtung, Speicherung und Betankung (Kupferschmid & Faltenbacher)



Für die Bereitstellung des Wasserstoffs gibt es verschiedene Bereitstellungskonzepte, die eine Entscheidung im Einzelfall erfordern. Bei der Anlieferung des Wasserstoffs per LKW wird dieser entweder in gasförmiger Form bei 200–300 bar oder bei größerem Bedarf in flüssiger Form transportiert. Weiterhin besteht bei unmittelbarer Nähe zu einer Wasserstoffherstellungsanlage die Möglichkeit, eine Anbindung mittels Pipeline zu nutzen. Auch kann der Wasserstoff vor Ort mittels eines Elektrolyseurs selbst erzeugt werden.

Das aktuell von den Verkehrsunternehmen präferierte H₂-Versorgungskonzept sieht die Versorgung einer eigenen Betriebshoftankstelle über CH₂ Trailer (gasförmig im Trailer mit Druckniveaus von 200–300 bar, perspektivisch bis zu 700 bar, Compressed Gaseous Hydrogen (CGH₂)) vor. Dabei werden die CGH₂ Trailer im Tauschverfahren, auch Swap-Verfahren genannt, vom H₂-Lieferanten per Lkw gebracht, so dass mindestens zwei Trailerstellplätze vorzusehen sind. Perspektivisch ist es wünschenswert, die Versorgung von Betriebshoftankstellen über ein H₂-Gasnetz zu realisieren, da dies den logistischen und betrieblichen Aufwand sowie die transportbedingten Kosten und Umweltwirkungen reduziert. In der Fläche wird dieser Aufbau eines H₂-Netzes in Deutschland voraussichtlich noch einige Zeit benötigen. Mit dem Aufbau von lokalen H₂-Netzen, sogenannten H₂-Microgrids, wie sie bereits an verschiedenen Orten in Deutschland geplant bzw. vorbereitet werden, besteht die Möglichkeit hierzu erste Erfahrungen zu sammeln und damit ‚Best-practise‘ Beispiele zu schaffen.

Soweit sich öffentliche, für die Betankung von Bussen geeignete H₂-Tankstellen in unmittelbarer räumlicher Nähe zum Betriebshof bzw. zum Linienverlauf befinden, bietet es sich an diese ebenfalls zu nutzen, sei es als Back-up oder in der Anfangsphase mit einer noch geringen Anzahl Fahrzeugen als Hauptversorgung wenn noch keine Betriebshoftankstelle vorhanden ist. Aus betrieblicher Sicht ist es aber sinnvoll eine eigene H₂-Tankstelle zu errichten, da hierbei betriebliche Aspekte wie z. B. Redundanz, Betankungskapazität, Erstbefüllung druckloser H₂-Tanks nach Wartung etc. spezifisch auf die Anforderungen des jeweiligen Verkehrsunternehmens angepasst werden können. Aufgrund des mit der Errichtung einer H₂-Tankstelle verbundenen Planungs- Genehmigungs- und Investitionsaufwandes bietet es sich an diese für eine gewisse Mindestflottengröße, z. B. mindestens 10 Fahrzeuge, zu planen.

Auf Grund der Beschaffenheit von Wasserstoff, welcher in bestimmten Mischungsverhältnissen mit Luft ein explosives Gemisch bildet, müssen bei der Errichtung der Tankstelle bestimmte bauliche Maßnahmen und Sicherheitsabstände eingehalten werden. Nähere Details finden sich in VdTÜV-Merkblatt 514.

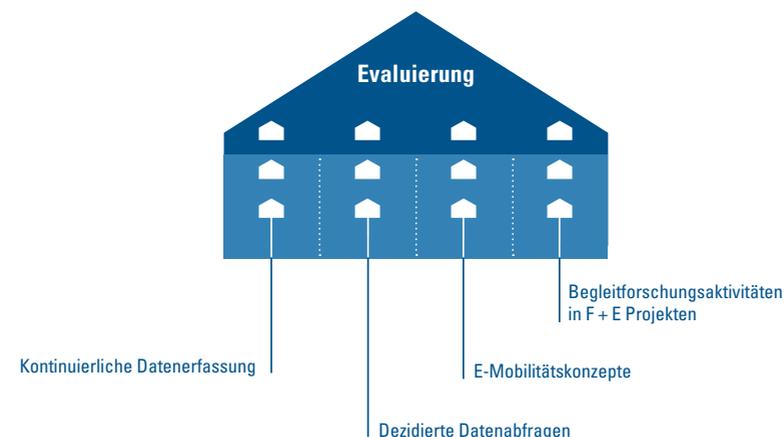
Marktübersicht / Verfügbarkeit

Hinsichtlich der Energieversorgungsinfrastruktur lässt sich im Ergebnis der durchgeführten Marktrecherchen ein breites Spektrum an Anbietern von Lade-, Oberleitungs- und Wasserstofftankinfrastruktur sowohl bezüglich einzelner Komponenten der Infrastruktur als auch in Bezug auf Komplettanbieter von schlüsselfertigen Infrastrukturlösungen und damit bereits eine insgesamt gute Verfügbarkeit der verschiedenen Energieversorgungstechnologien konstatieren.

1.4. Datenbasis der Begleitforschung Bus

Die Datenbasis für die Evaluierungsaktivitäten innerhalb der Begleitforschung Bus basiert auf vier Säulen (siehe Abbildung 7). Diese sind im Einzelnen die kontinuierliche Langzeiterfassung von Betriebsdaten (siehe Kapitel 2.2ff), die dezidierten Erhebungen von Informationen in Form von Befragungen, die E-Mobilitätskonzepte mit ÖPNV-Bezug und die individuellen Begleitforschungsaktivitäten in den F&E-Projekten.

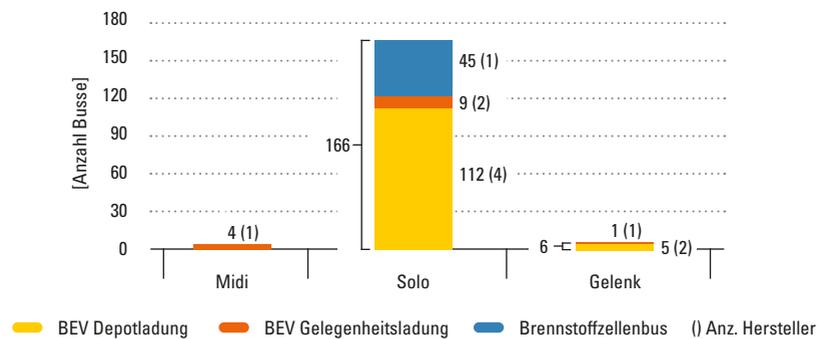
ABBILDUNG 7 Datenbasis der Evaluierungsaktivitäten in der Begleitforschung Bus



Aus der kontinuierlichen Betriebsdatenerfassung, die den Zeitraum Februar 2019 bis einschließlich April 2021 abdeckt, liegen insgesamt Daten für bis zu 236 Nahverkehrsbusse von 19 Verkehrsunternehmen vor. Davon sind 131 Batteriebusse, 45 Brennstoffzellen-Fahrzeuge (siehe Abbildung 8) und 60 konventionelle Dieselbusse.

Grundlage für die kontinuierliche Betriebsdatenerfassung ist das Minimaldatenset, wie es von der NOW, dem Deutschen Dialog Institut (DDI) und der Ingenieurgruppe für Verkehrswesen und Verfahrensentwicklung (IVV) 2016 veröffentlicht wurde. Die Datenerfassung erfolgte mittels Datenloggern bzw. teilweise manuell durch die Verkehrsunternehmen. Bei den Datenloggern handelt es sich entweder um Datenlogger direkt vom Bushersteller oder von Drittanbietern. Die erhobenen Betriebsdaten wurden in der webbasierten Software SoFi von Sphera eingepflegt und ausgewertet. Diese Daten dienen der Bewertung der Betriebserfahrungen und -performance im Sinne einer Fortschrittskontrolle über den Betrachtungszeitraum dieses Berichts.

ABBILDUNG 8 Betrachtete E-Busse nach Fahrzeuggröße und Antriebstechnologie



Die in Kapitel 2 dieses Abschlussberichts dargestellten Daten entsprechen dem Stand der im Juni 2021 verfügbaren Daten. Ergänzt werden diese Daten durch Referenzwerte von Diesellbussen, um einen Vergleich mit der Referenztechnologie ÖPNV zu ermöglichen. Dieses methodische Vorgehen hat sich in den Vorgängeraktivitäten bewährt und wird kontinuierlich optimiert.

Weitere Daten- und Informationsquellen für die Evaluierungsaktivitäten in der BeFo Bus stellen dezidierte Befragungen der geförderten Verkehrsunternehmen zu konkreten Fragestellungen und Themen der Begleitforschung. Ein Beispiel hierfür ist die Abfrage der Betreiberanforderungen einschließlich der Erwartungshaltung bezüglich Technologiereifegrad, Reichweite etc. zu Beginn der BeFo Bus im 4. Quartal 2018. Die erneute Befragung der Verkehrsunternehmen in Bezug auf den Erfüllungsgrad der ursprünglich formulierten Erwartungen stammt vom Sommer 2021. Zusätzlich werden die Daten und Ergebnisse der ebenfalls vom BMDV geförderten E-Mobilitätskonzepte mit ÖPNV-Bezug analysiert. Die Ergebnisse der im Rahmen der Förderrichtlinien Elektromobilität und der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung geförderten F&E-Projekte bilden schließlich die vierte Säule der Datengrundlage.



Quelle: Berliner Verkehrsbetriebe, 2021



Quelle: WSW Mobil GmbH, 2021

2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Begleitforschung Bus decken die in Kapitel 1.2 genannten Evaluationskategorien Praxistauglichkeit (Kapitel 2.2), Energieeffizienz (Kapitel 2.3), Ökologie (Kapitel 2.4) und Wirtschaftlichkeit (Kapitel 2.5) ab. Weiterhin wird der im Rahmen der Begleitforschung erstellte Leitfaden und das dazugehörige e-bustool zur Unterstützung bei der Systemauswahl vorgestellt (Kapitel 2.6).

Zunächst werden die Anforderungen der Verkehrsbetriebe an die Busse mit elektrischen Antrieben dargestellt und aufgezeigt, wie die erfolgreiche Integration in den Betrieb konzeptioniert werden kann (Kapitel 2.1).

2.1. Anforderungen

2.1.1. Betreiberanforderungen

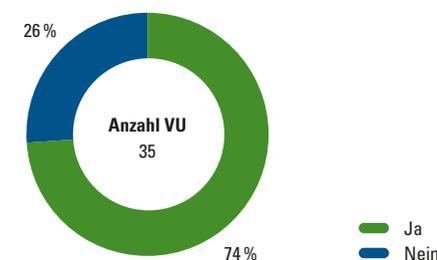
Die Anforderungen zur Einführung und den Betrieb von E-Bussen sind sowohl nutzerspezifisch, als auch abhängig vom Antriebssystem, vielfältig. Im Rahmen des Projektes wurden die vom BMDV geförderten Verkehrsunternehmen zu Beginn der

Begleitforschung Bus hinsichtlich ihrer an den E-Busbetrieb gestellten Anforderungen befragt. Die Betreiberanforderungen wurden den folgenden vier Bereichen zugeordnet:

- I) Technische Anforderungen
- II) Betriebliche Anforderungen
- III) Ökonomische Anforderungen
- IV) Ökologische Anforderungen

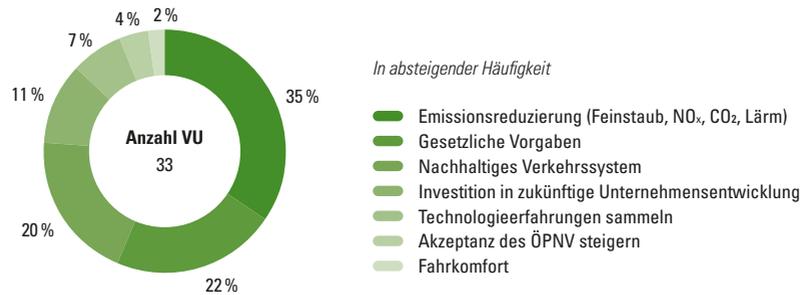
Grundlage bilden die im Rahmen der *Programmbegleitforschung Innovative Antriebe und Fahrzeuge* erhaltenen Rückmeldungen der Verkehrsbetriebe zum Erhebungsbogen „Betreiberanforderungen“, welcher mit dem Minimaldatenset (MDS) an diese verschickt wurde. So gibt Abbildung 9 einen Überblick über die bestehenden Erfahrungen und Vorkenntnisse der 35 betrachteten Verkehrsunternehmen im Bereich Elektromobilität.

ABBILDUNG 9 Bestehende Erfahrungen/Vorkenntnisse im Bereich Elektromobilität



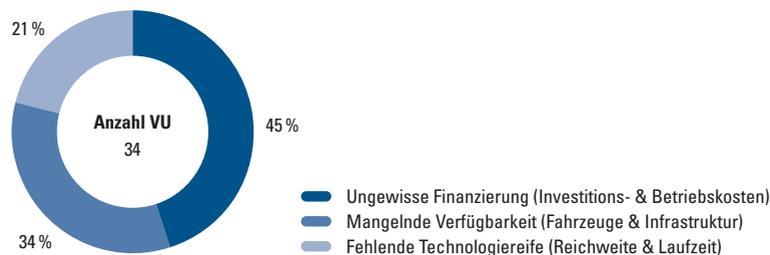
Die Motivation der Verkehrsunternehmen für die Umstellung auf Elektromobilität besteht hauptsächlich in der allgemeinen Emissionsreduzierung (35 %), welche sich eng an den mittlerweile bestehenden gesetzlichen Vorgaben (22 %) orientiert. Des Weiteren wird die Umstellung auf Elektromobilität als eine Investition in ein nachhaltiges Verkehrssystem gesehen, wodurch auch die zukünftige Unternehmensentwicklung gesichert werden soll. Technologieerfahrungen zu sammeln und für den Kunden die Akzeptanz und den Fahrkomfort des ÖPNV zu steigern sind weitere Motivationsfaktoren für die Verkehrsunternehmen (siehe Abbildung 10).

ABBILDUNG 10 Motivation für Elektromobilität



Auf dem Weg der Umsetzung der Projekte zur Elektromobilität im Busbereich geben die Verkehrsunternehmen verstärkt Unsicherheiten bezüglich der Finanzierung der Investitions- & Betriebskosten (45 %) an (siehe Abbildung 11). Weiterhin wird von einer mangelnden Verfügbarkeit der Fahrzeuge bzw. der notwendigen Infrastruktur für die Beschaffung ausgegangen (34 %). Eine fehlende Technologiereife (21 %), unter anderem die Aspekte Reichweite und Ladezeit betreffend, stellt die Verkehrsunternehmen bei der Umstellung ebenfalls vor eine Herausforderung.

ABBILDUNG 11 Hemmnisse der Umstellung auf Elektromobilität



Im Ergebnis liegt eine Auswertung relevanter technischer, betrieblicher, ökonomischer und ökologischer Anforderungen für die Einführung von E-Bussen vor.

Weitere Informationen können dem Detailbericht zu den Betreiberanforderungen entnommen werden, der im Starterset Elektromobilität verfügbar ist.

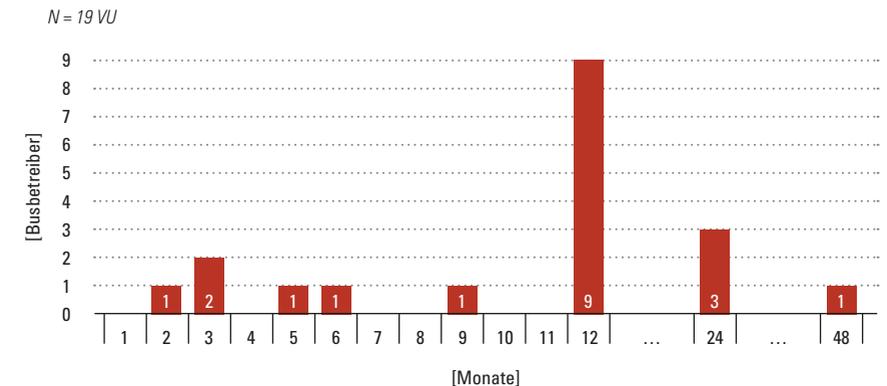
2.1.2. Planungszeiträume

Ein Untersuchungsgegenstand der Begleitforschung war die Ermittlung der ungefähr anzusetzenden Zeiträume für die einzelnen Projekt- bzw. Umsetzungsschritte, ausgehend von der grundsätzlichen Entscheidungsfindung zur Einführung von E-Bussen bis hin zur Umsetzungsplanung und der tatsächlichen Inbetriebnahme der neuen Technologie, bestehend aus Fahrzeugen und der dazugehörigen Lade- bzw. Tankinfrastruktur.

Entscheidungsfindung zur Einführung von E-Bussen

Basierend auf der Rückmeldung von 19 Verkehrsunternehmen sind für die Entscheidungsfindung zur Einführung der Elektromobilität in die Busflotte 2 bis hin zu 48 Monate angegeben (siehe Abbildung 12). Die Dauer ist primär bestimmt durch die politischen Entscheidungsprozesse und die innerbetrieblichen Voraussetzungen für eine Einführung der E-Busse. Bei der Mehrheit der Verkehrsunternehmen (39 %) hat der Entscheidungsfindungsprozess ca. 12 Monate gedauert. Bei gut 30 % lag die Dauer unter 12 Monaten und bei rund 20 % darüber.

ABBILDUNG 12 Dauer der Entscheidung für Einführung Elektromobilität

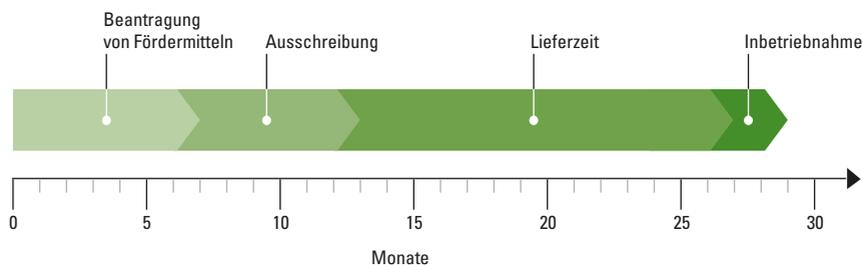


Umsetzungszeitleiste

Ist die Entscheidung zur Einführung getroffen, geht es an die Umsetzung. Je nachdem, ob man beabsichtigt Fördermittel in Anspruch zu nehmen und ob gerade ein entsprechender Förderaufruf geöffnet ist, sind für die Beantragung und Bewilligung der Fördermittel ca. (3–) 6 Monate zu veranschlagen. Für die Ausschreibung sind von der Erstellung der Lastenhefte bis zur Vergabe ca. (4–) 6 Monate vorzusehen.

Liegt der Auftragswert über den einschlägigen Schwellenwerten (aktuell 428.000 €), ist eine europaweite Ausschreibung erforderlich, die tendenziell länger, d. h. bis zu 8 Monate, dauern kann. Demensprechend ist für die komplette Beschaffung inkl. Fördermittelbeantragung und Ausschreibung ein Zeitraum in der Größenordnung von 9–14 Monaten einzurechnen. Ist die Vergabe zur Beschaffung erfolgt, bestimmt die Lieferzeit die weitere Dauer bis zur Inbetriebnahme. Derzeit betragen die Lieferzeiten für die Busse abhängig vom Lieferanten zwischen 9 und 14 Monaten. Als realistisch wird die Lieferzeit von einem Jahr eingeschätzt, allerdings sind aktuell Lieferverzögerungen nicht unüblich. Für die eigentliche Inbetriebnahme sind zusätzlich nochmals 2 Wochen bis 2 Monate einzuplanen. Je nach Abnahmeregime des Verkehrsunternehmens ergibt sich also ein Umsetzungszeitraum von 18–28 Monaten, wobei dies als eine Richtgröße zu verstehen ist, die auf Basis der bisher betrachteten Umsetzungsprojekte zur Einführung von E-Bussen abgeleitet wurde. Die tatsächlichen Zeiträume sind natürlich stark abhängig von den Gegebenheiten vor Ort sowie der Lieferzeit des gewählten Lieferanten (siehe Abbildung 13).

ABBILDUNG 13 Umsetzungszeitleiste

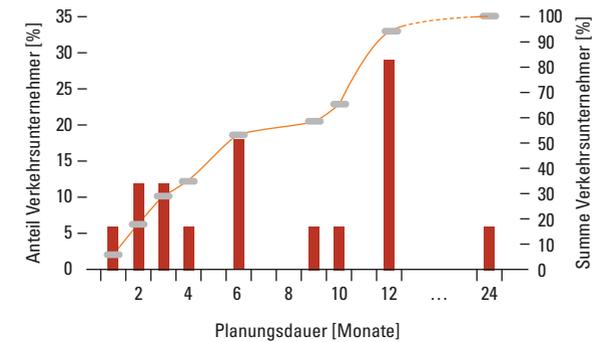


Grundsätzlich fügt sich die Planung und Umsetzung der Lade- bzw. Tankinfrastruktur in den zuvor skizzierten Zeitrahmen ein, wobei sich die Phasen inhaltlich bedingt etwas anders darstellen.

Zunächst ist für die Errichtung der Energieversorgungsinfrastruktur eine detaillierte Planung durchzuführen, die die örtlichen Gegebenheiten berücksichtigt. Abhängig von Anzahl und Ausprägung der vorgesehenen Ladepunkte kann der hierfür benötigte Zeitraum bis zu 24 Monate (siehe Abbildung 14) umfassen, wie eine Abfrage bei den Verkehrsunternehmen ergab. Sollten nicht sehr spezielle Anforderungen bestehen, sei es durch die örtlichen Gegebenheiten oder aufgrund der Notwendigkeit, gleich eine sehr große Anzahl an Fahrzeugen zu versorgen, erscheint ein Planungszeitraum von 6 (– 12) Monaten als angemessen.

ABBILDUNG 14 Planungsdauer für die Errichtung der Infrastruktur für Batteriebusse

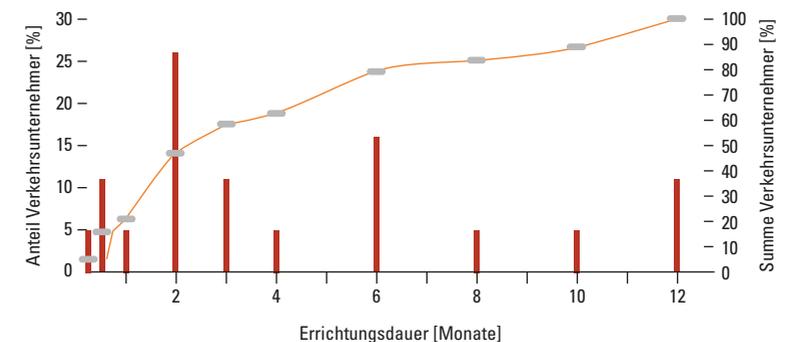
N = 17 VU



Ähnliches gilt für die Errichtung der Infrastruktur. Fast die Hälfte der Verkehrsunternehmen (47 %) gab an, zwischen 2 bis 6 Monaten für die Errichtung benötigt zu haben. Für größere Installationen können durchaus bis zu 12 Monate erforderlich sein (siehe Abbildung 15).

ABBILDUNG 15 Dauer für die Errichtung der Infrastruktur für Batteriebusse

N = 19 VU



Insgesamt bewegt sich die beobachtete Gesamtdauer für die Planung- und Installation zwischen wenigen Monaten bis zu 2,5 Jahre. Ein erster Richtwert wird mit 12–18 Monate angegeben, wobei ein ganz wesentlicher Einflussfaktor auf die Dauer der Umsetzung, gerade der Ladeinfrastruktur, der Netzanschluss (siehe Kapitel 2.5.2) ist. Sofern hier eine umfangreichere Netzertüchtigung erforderlich sein sollte, kann sich die Dauer für die Errichtung der Ladeinfrastruktur auch schnell um ein Jahr oder noch länger verlängern. Daher empfiehlt es sich, frühzeitig im Planungsprozess zur Einführung von E-Bussen den Kontakt zum Netzbetreiber zu suchen, um die Leistungsverfügbarkeit zu klären. Eventuell ist eine Netzertüchtigung erforderlich, für deren Umsetzung der notwendige Zeitraum bestimmt werden muss.

Für eine H₂-Tankinfrastruktur sollten 18–24 Monate eingeplant werden, da hier ein umfangreicherer Genehmigungsprozess zu durchlaufen ist und die Genehmigungsbehörden vor Ort aktuell in den meisten Fällen noch wenig oder keine Erfahrung mit der Genehmigung von H₂-Tankinfrastruktur haben.

Grundsätzlich kann die Planung und Beschaffung der Energieversorgungsinfrastruktur parallel zur Beschaffung der Fahrzeuge erfolgen, wobei auf eine sinnvolle zeitliche Abstimmung mit der Fahrzeugbeschaffung zu achten ist, z. B. in Bezug auf Schnittstellen für die ggf. erforderliche Kommunikation zwischen Fahrzeugen und der Energieversorgungsinfrastruktur (siehe Kapitel 4.2 zur Infrastrukturstandardisierung) sowie der Leistungsfähigkeit der jeweiligen Infrastruktur (Lade-/Tankleistung und Speichergröße der Fahrzeuge sind aufeinander abzustimmen) etc.

2.1.3. Politische Rahmenbedingungen

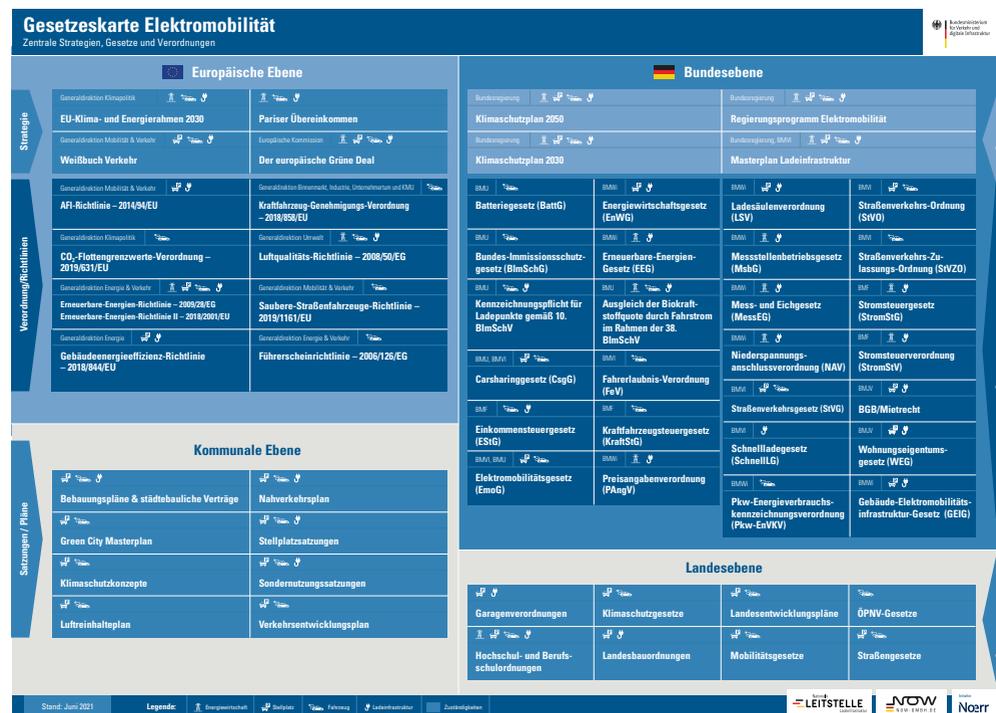
Die Auswertung der politischen Rahmenbedingungen im Bereich der ÖPNV-Elektrifizierung ermöglichte die Identifikation zentraler politischer Einflussgrößen auf deren Markthochlauf auf europäischer-, Bundes-, Länder- und kommunaler Ebene.

Qualitativ ausgewertet wurden insbesondere die Ziele/Inhalte der jeweiligen Strategien, Verordnungen, Gesetze, Richtlinien, Satzungen, Pläne und sonstigen Rahmenbedingungen in Verbindung mit dem geplanten Umsetzungszeitraum. Dadurch konnten einerseits langfristige Entwicklungstendenzen zur Verbreitung der Elektromobilität im ÖPNV identifiziert werden, andererseits wurden Instrumente erkennbar, die kurzfristig und unmittelbar Auswirkungen auf die Einführung von Elektrobussen haben.

Gesetzeskarte „Elektromobilität im ÖPNV“

Die wesentlichen Ergebnisse der ebenspezifischen Auswertung wurden in Form einer Gesetzeskarte „Elektromobilität im ÖPNV“ und einer dazugehörigen Broschüre mit weiterführenden Informationen zu den einzelnen Strategien, Gesetzen und Verordnungen dargestellt. Diese stehen im Starterset Elektromobilität unter <https://www.starterset-elektromobilitaet.de/Bausteine/OEPNV> zum Download zur Verfügung. (siehe Abbildung 16)

ABBILDUNG 16 Gesetzeskarte „Elektromobilität im ÖPNV“



Die wesentlichen Ergebnisse werden nachfolgend für die einzelnen politischen Ebenen, von der europäischen bis zur kommunalen Ebene, zusammengefasst dargestellt.

Europäische Ebene

Strategien

Auf europäischer Ebene bildet die Begrenzung der globalen Erderwärmung auf maximal 2 °C das übergeordnete Ziel. Des Weiteren wird die Minderung von Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor um mindestens 40 % (bis 2030) bis maximal 60 % (bis 2050) gegenüber dem Bezugsjahr 1990 in mehreren Strategien als Ziel genannt.

Als konkrete Zeithorizonte werden die Jahre 2030 und 2050 zur Zielerreichung anvisiert. Demzufolge beschreiben die oben genannten Ziele eine mittel- bis langfristige Europapolitik und geben Planungssicherheit, um Anpassungsprozesse zur Einführung von Elektrobussen zu steuern.

Im Rahmen der europäischen Wasserstoffstrategie wird der Ausbau der Elektrolyseleistung zur Erzeugung von erneuerbarem Wasserstoff forciert. Hierfür sind sowohl kurz- als auch mittel- und langfristige Zeiträume (2020, 2024 und 2030–2050) definiert.

Verordnung / Richtlinien

Die Verordnungen/Richtlinien auf europäischer Ebene enthalten zusammengefasst nachfolgende Ziele bzw. Inhalte:

- Aufbau Infrastrukturen für alternative Kraftstoffe
- Festlegung von Anforderungen an die CO₂-Emissionsleistung
- Festlegung von Mindeststeuersätzen sowie Steuerbefreiungen für Energie
- Festlegung des Anteils erneuerbarer Energien
- Festlegung konkreter Schadstoffgrenzwerte
- Festlegung von Mindestzielen für den Anteil sauberer bzw. emissionsfreier schwerer Nutzfahrzeuge (M3) bei der öffentlichen Auftragsvergabe
- Festlegung von verbindlichen nationalen Jahreszielen für die Reduzierung der Treibhausgasemissionen

Hinsichtlich der Zielerreichungszeiträume zeigte sich, dass die Jahre 2020, 2025, 2030 fokussiert werden. Demzufolge sind in den o. g. Bereichen sowohl kurz- bis mittelfristig wesentliche Effekte zu erwarten.

Bundesebene

Auf Bundesebene wurden nachfolgende Ziele bzw. Inhalte der politischen Instrumente identifiziert:

- Minderung von Treibhausgasen im Verkehrssektor um mindestens 65 % (bis 2030)
- Strategie zum Ausbau der Elektromobilität
- Aufbau einer bedarfsgerechten Tankinfrastruktur zur Versorgung der Fahrzeuge mit Wasserstoff
- Erhöhung des Anteils an erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch
- Gestaltung des Markthochlaufs und Entwicklung der Nachfrage von Brennstoffzellentechnologien, u. a. über Festlegung degressiver Investitionszuschüsse
- Umsetzung der Clean Vehicles Directive (CVD) zur Unterstützung der Einführung von Null-Emissions-Fahrzeugen im kommunalen Verkehr
- Machbarkeitsstudien zur begleitenden Untersuchung des Einsatzes von Elektrobussen
- Förderung von Leuchtturmprojekten
- Festsetzung von Kostenreduktionszielen für Brennstoffzellenbusse und Wasserstoffinfrastrukturkomponenten, z. B. durch die Festlegung maximal förderfähiger Kosten von BZ-Bussen
- Regelung von Vorgaben bzgl. Errichtung und Betrieb von Lade- und Betankungsinfrastruktur
- Reform der staatlichen induzierten Strompreisbestandteile, insbesondere EEG-Ermäßigung bzw. Befreiung beim Einsatz in Batteriebusen oder bei der Verwendung für die Produktion von grünem Wasserstoff
- Förderung und Weiterentwicklung von Technologien zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien
- Steuerentlastung für den öffentlichen Personennahverkehr
- Sicherstellung einer umweltfreundlichen Entsorgung von Altbatterien



Quelle: Vestische Straßenbahnen GmbH

Länderebene

Auf Länderebene wurden nachfolgende Ziele bzw. Inhalte der analysierten Strategien und Gesetze/Verordnungen identifiziert:

- Erreichung der Klimaschutzziele im Verkehrssektor
- Förderung von Elektromobilität und dazugehöriger Infrastruktur im ÖPNV
- Errichtung & Betrieb von Ladeinfrastruktur
- Aufbau einer Wasserstofftankstelleninfrastruktur (Tankstellen und Elektrolyseanlagen) u. a. für Brennstoffzellenbusse
- Überprüfung der bestehenden Richtlinien für Beschaffung und Vergabe hinsichtlich deren Anwendbarkeit auf Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie

Kommunale Ebene

Auf kommunaler Ebene wurden nachfolgende Ziele bzw. Inhalte der analysierten Strategien und Satzungen/Pläne identifiziert:

- Verbesserung der Luftqualität
- Erreichung der Klimaschutzziele
- Reduzierung der verkehrsbedingten Schadstoffemissionen
- Schaffung von Vorgaben zur Elektrifizierung des ÖPNV
- Anschaffung und Erprobung von Elektrobussen
- Aufnahme des Betriebes der ersten Buslinie mit Elektrofahrzeugen (bis 2020)
- Förderung von Elektromobilität / emissionsfreier Fahrzeuge
- Harmonisierung der straßenrechtlichen Sondernutzungen bzgl. Errichtung von Ladeinfrastruktur

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass auf allen untersuchten Ebenen sowohl kurz-, mittel-, als auch langfristige politische Rahmenbedingungen und Zielsetzungen identifiziert werden konnten, die grundlegende Auswirkungen auf die Elektrifizierung des straßengebundenen ÖPNV haben werden.

2.1.4. E-Mobilitätskonzepte

Ziele

Die im Rahmen der Förderrichtlinie Elektromobilität vom 5. Dezember 2017 durch das BMDV geförderten Elektromobilitätskonzepte, die die gesamtsystemische Integration der Elektromobilität in kommunale und regionale Nachhaltigkeitsinitiativen bzw. -konzepte behandeln, werden hinsichtlich ihrer Wirksamkeit, Umsetzbarkeit und Verstärkung ausgewertet. Den Schwerpunkt bilden solche Konzepte, die die Umstellung des ÖPNV auf den Einsatz von E-Bussen beleuchten.

Die Konzeptauswertung soll in erster Linie Aussagen zu folgenden Aspekten liefern:

- Bewertung des Technologieeinsatzes und der Auswirkungen der jeweiligen Technologie auf die Infrastruktur im Betriebshof oder auf der Strecke
- Darstellung des Status Quo der Elektrifizierung im ÖPNV und der regionalen Rahmenbedingungen sowie von Zeitplänen für die Umstellung und daraus resultierenden Ableitungen für den Markthochlauf von Bussen mit alternativen Antrieben im ÖPNV

Um mögliche Cluster abzuleiten, werden alle Analyseergebnisse vergleichend gegenübergestellt. So sollen zum Beispiel die Gemeinsamkeiten der Städte aufgezeigt werden, in denen die gleiche Technologie empfohlen wurde.

Aus den Konzeptauswertungen werden generelle Aussagen zu Motivationsfaktoren und Hemmnissen beim Übergang eines dieselbasierten innerstädtischen ÖPNV hin zu elektrisch angetriebenen Bussen generiert. Zu betrachten ist hierbei das Gesamtsystem, bestehend aus Fahrzeugen, Ladeinfrastruktur, Energieversorgung sowie Instrumenten zur Betriebssteuerung und -überwachung. Brennstoffzellenbusse mit zugehöriger H₂-Tankinfrastruktur wurden im Rahmen der durchgeführten E-Mobilitätskonzepte nicht betrachtet, da sie nicht Fördergegenstand waren. Einzubeziehen sind ebenfalls die jeweiligen Anforderungsprofile der Verkehrsunternehmen/Anwender und die betrieblichen und technischen Rahmenbedingungen, die maßgeblich Einfluss auf die Wahl des geeigneten Systemkonzepts haben.

Auf Basis der Erkenntnisse dieser Untersuchung wird eine Mustergliederung für Machbarkeitsstudien erstellt, welche Verkehrsunternehmen und Aufgabenträgern als Unterstützung bei der Gestaltung künftiger Umstellungskonzepte dienen soll.

Vorgehensweise

Gegenstand der Untersuchung bilden, die im Rahmen der Förderrichtlinie Elektromobilität bewilligten Elektromobilitätskonzepte mit ÖPNV-Bezug. Nach den ersten drei Förderaufrufen wurden insgesamt 129 kommunale Elektromobilitätskonzepte gefördert, von denen 21 Konzepte einen ÖPNV Bezug haben.

Die Konzepte werden in Konzepte mit Schwerpunkt ÖPNV und solche, in denen der ÖPNV nur einen Teilbereich abdeckt, unterschieden. Im Mittelpunkt der Untersuchung stehen die Konzepte, die ausschließlich die Umstellung des ÖPNV auf Elektromobilität beleuchten (Schwerpunkt ÖPNV). Die Konzepte mit dem ÖPNV als Teilbereich betrachten diesen nur als einen Abschnitt in einer intermodalen Wegekette. Daraus werden Erkenntnisse zu möglichen Verknüpfungspunkten mit dem ÖPNV und den funktionalen Schnittstellen zwischen den betrachteten Teilbereichen der Verkehrssysteme abgeleitet. Um Synergieeffekte mit den durch das BMDV betriebenen Begleitforschungen zu schaffen, werden weiterhin die Erkenntnisse der Begleitforschung „Vernetzte Mobilität“ beleuchtet.

Zur Erfassung detaillierter Informationen werden Erhebungskriterien definiert, die für die Auswertung und Gegenüberstellung der zu untersuchenden Konzepte herangezogen werden. Die Erhebungskriterien werden in einem standardisierten Erhebungsbogen zusammengeführt, der der Konzeptanalyse zugrunde gelegt wird.

Die Beurteilung der Analyseergebnisse und folglich die vergleichende Gegenüberstellung der Elektromobilitätskonzepte erfolgt letztlich über Bewertungsindikatoren, die unmittelbar aus den Erhebungskriterien abgeleitet werden. Schlussfolgernd kann im Ergebnis eine Aussage hinsichtlich der Möglichkeiten und Hemmnisse zur Umstellung des ÖPNV auf Elektromobilität getroffen werden.

Motivationsfaktoren

Die Hauptmotive für die Umstellung der Busflotte auf emissionsfreie Antriebstechnologien sind die geringere Umweltbelastung, die positive Öffentlichkeitswirkung und ein damit verbundener Imagegewinn, zum Teil die geringen Betriebskosten, die sich entwickelnde Vielfalt an serienreifen Bustypen und Energieversorgungssystemen sowie die durch Bund und Länder in Aussicht gestellte finanzielle Unterstützung bezüglich der Einführung von Elektrobussystemen.

Geringe Umweltbelastung

Die mit dem Elektrobusbetrieb erwarteten positiven ökologischen Effekte bestimmen entscheidend die Aktivitäten der Verkehrsbetriebe und Kommunen. Neben dem eigenen ökologischen Bewusstsein, einen Beitrag zur Verbesserung der Lebensqualität leisten zu wollen, sollen mit der Umstellung des Linienbusverkehrs auf E-Busse auch die gesetzlichen Auflagen zur Reduzierung der Emissionen in den Innenstädten erfüllt werden.

Imagegewinn

Durch die Umstellung des Busbetriebs auf emissionsfreie Antriebstechnologien nimmt der ÖPNV eine Vorbildfunktion innerhalb der Gesellschaft ein. Das ökologisch bewusste Handeln wird von der Allgemeinheit positiv bewertet und unterstützt das positive Image der Verkehrsunternehmen und Aufgabenträger.

Geringe Betriebskosten

Die Verkehrsunternehmen erwarten gegenüber dem Referenzsystem Dieselbus deutliche Kostenvorteile in den Betriebskosten. Durch den Wegfall wartungs- und instandhaltungsintensiver Fahrzeugkomponenten, insbesondere durch den vereinfachten Antriebsstrang, wird zum Teil mit einem geringeren Wartungs- und Instandhaltungsaufwand und entsprechend geringeren Kosten gerechnet. Infolge des höheren Wirkungsgrades im Antriebsstrang sowie der Rekuperationsfähigkeit von E-Bussen wird von einer höheren Energieeffizienz und somit geringeren Energiekosten pro Kilometer ausgegangen.

Vielfalt an serienreifen Bustypen und Energieversorgungssystemen

Durch die schrittweise Verbesserung der betrieblichen Verfügbarkeit von E-Bussen und der Entwicklung einer immer größer werdenden Vielfalt an technologischen Lösungen im Bereich der elektrischen Antriebs- und Energiezuführungssysteme, die mittlerweile auf dem Markt verfügbar sind und zum Teil bereits Serienreife erlangt haben, sehen die Verkehrsbetriebe die Möglichkeit, den eigenen Betrieb adäquat abbilden zu können. Somit stellen sie sich vermehrt der Herausforderung, ein für sie geeignetes Betriebskonzept zu entwickeln und schrittweise umzusetzen.

Finanzielle Unterstützung

Die durch Bund und Länder in Aussicht gestellte finanzielle Unterstützung bei der E-Busbeschaffung sowie die bestehende Möglichkeit zur Reduzierung der EEG-Umlage bzw. deren von der neuen Bundesregierung geplante Entfall ab 2023 (siehe Kapitel 2.5.2) auf Strom für die E-Busladung motiviert Verkehrsunternehmen und Kommunen, die Umstellung auf emissionsfreie Antriebstechnologien für ihren Anwendungsfall zu untersuchen.

Hemmnisse und Herausforderungen

Als grundlegende Hemmnisse bei der Umstellung der Busflotte auf E-Busbetrieb werden folgende Aspekte gesehen:

- das komplexe Akteursgefüge im ÖPNV
- der hohe Planungsaufwand und der mit dem E-Busbetrieb gegebenenfalls verbundene hohe betriebliche Anpassungsbedarf
- das geringe Angebot marktverfügbarer Produkte
- die hohen Mehrkosten gegenüber Dieselnissen
- die große Unsicherheit bezüglich der Fördermittelbereitstellung
- die Ungewissheit gegenüber den tatsächlichen Betriebsergebnissen beim E-Buseinsatz

Komplexes Akteurs-Gefüge im ÖPNV

Bei grundlegenden Entscheidungen über Änderungen der Antriebstechnologie für die Erbringung des ÖPNV-Angebots vom dieselbasierten hin zum alternativ angetriebenen ÖPNV sind viele Meinungen und Perspektiven zu berücksichtigen und gegeneinander abzuwägen. Grund hierfür ist das komplexe Akteursgefüge aus Aufgabenträger, Verkehrsbetrieb, ggf. Subunternehmern, Trägern öffentlicher Belange und häufig dem Verkehrsverbund.

Hoher Planungsaufwand und hoher betrieblicher Anpassungsbedarf

Zudem schätzen die Akteure den Aufwand in der Konzeptstudien-, der Projektplanungs- sowie der Umsetzungsphase als hoch ein. Unter den Maßgaben betrieblicher, technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Kenngrößen ist ein für den Anwendungsfall optimales Einsatz- und Betriebskonzept zu entwickeln. Die Entscheidungsfindung und letztlich die Festlegung der geeigneten Technologie setzt umfangreiches Wissen voraus und wird daher als anspruchsvoll eingeschätzt. Der mit dem E-Busbetrieb verbundene notwendige betriebliche Anpassungsbedarf stellt eine weitere Herausforderung dar. Mit den derzeit verfügbaren Technologien können nur beschränkte Reichweiten erzielt werden. Um den dieselbasierten Busbetrieb adäquat ersetzen zu können, sind entsprechend betriebliche und technische Anpassungen erforderlich, die teilweise als zu umfangreich und wirtschaftlich nicht abbildbar eingeschätzt werden.

Geringes Angebot marktverfügbarer Produkte

Im Gegensatz zu den Zuwendungsempfängern, die durch die Vielfalt an serienreifen Bustypen und Energieversorgungssystemen zur Umstellung auf emissionsfreie Antriebstechnologien motiviert werden, sehen andere Zuwendungsempfänger noch nicht die Möglichkeit, mit den marktverfügbaren Produkten ihre spezifischen Bedürfnisse und betrieblichen Anforderungen zu erfüllen. Im Konkreten wurde zum Zeitpunkt der Durchführung der Studien (2019–2020) der Markteintritt marktführender europäischer Dieselnishersteller erwartet.

Hohe Mehrkosten

Der gegenüber dem herkömmlichen Bussystem höhere Investitionsbedarf für Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur wird als die generelle Herausforderung gesehen. Auch unter Einbeziehung von Fördermöglichkeiten bestehen teils beträchtliche Mehrkosten, die über die geringeren Betriebskosten zum Teil nicht ausgeglichen werden können.

Ungewissheit hinsichtlich der tatsächlichen Betriebsergebnisse

Die generellen Unsicherheiten bzgl. der tatsächlichen Betriebskosteneinsparungen (hier liegen noch keine belastbaren Erfahrungswerte vor) hemmen einen Teil der Zuwendungsempfänger, Umsetzungsschritte festzulegen und mit der Umstellung zu beginnen.

Unsicherheit bezüglich der Fördermittelbereitstellung

Da die Umsetzung maßgeblich von der Finanzierung abhängig ist, sind die Akteure bestrebt, die existierenden Fördermöglichkeiten bestmöglich auszuschöpfen. Das Elektrobussystem ist ein komplexes System mit zum Teil auch unbekanntenen Komponenten, wie z. B. Ladeinfrastruktur. Deshalb sehen sich die Akteure teilweise nicht in der Lage, alle förderfähigen Systemkomponenten konkret zu definieren und in den Kontext des Förderprogramms zu setzen. Sofern eine komplette Systemumstellung erfolgen soll, sind die Akteure teilweise gehemmt, den ersten Schritt in Richtung E-Buseinführung zu gehen, da dieses Vorhaben wirtschaftlich nur durch eine verbindliche Verfügbarkeit von Fördermitteln abbildbar ist und die benötigten Fördermittel zu Beginn der Systemumstellung nicht zugesichert werden können.

Außerdem:

Generell ist festzustellen, dass die Einstiegshürden zur Elektrifizierung der Busflotte für Verkehrsbetriebe ohne U-Bahn- oder Straßenbahnnetz höher sind als für Verkehrsbetriebe mit entsprechenden Angeboten. Verkehrsbetriebe, die bereits elektrische Schienenverkehre betreiben, können beispielsweise bei der Werkstattausrüstung, dem Schulungsbedarf etc. auf bereits vorhandene Infrastrukturen und Systeme zurückgreifen.

Die herausgearbeiteten Motive, die das Verhalten der Akteure in Bezug auf die Einführung elektrischer Antriebskonzepte beeinflussen, stellen zum Teil sowohl Motivations- als auch Hemmnisfaktoren dar. So veranlasst bspw. die Verfügbarkeit von Fördermitteln die Akteure, sich dem komplexen Thema der E-Buseinführung zu widmen und die Systemumstellung schrittweise aktiv zu verfolgen. Hingegen stellen Unsicherheiten hinsichtlich der tatsächlichen Gewährung der Fördermittel, welche im Wettbewerb vergeben werden, ein Hemmnis dar.

Weitere Informationen können der Broschüre zur Auswertung der E-Mobilitätskonzepte mit ÖPNV Bezug entnommen werden, die im *Starterset Elektromobilität* verfügbar ist.

2.2. Praxistauglichkeit und Einsatzreife

2.2.1. Laufleistung

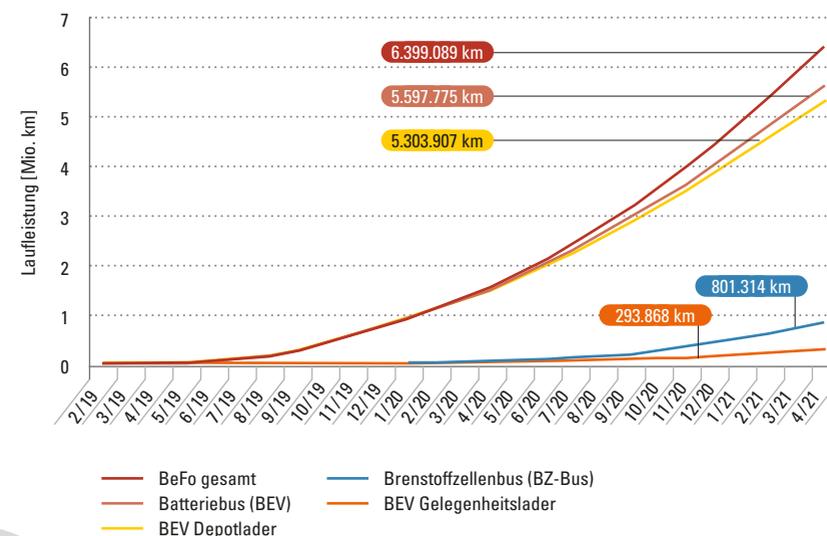
Insgesamt 19 Verkehrsbetriebe lieferten im Rahmen der Begleitforschung Bus Betriebsdaten ihrer Batterie- und Brennstoffzellen-Fahrzeuge. Im Zeitraum Februar 2019 bis April 2021 (27 Monate) konnten damit Daten von insgesamt bis zu 176 Bussen (131 BEV, 45 BZ) mit einer kumulierten Laufleistung von knapp 6,5 Millionen Kilometer (BEV + BZ) erfasst werden (siehe Abbildung 17). Je nach Verkehrsbetrieb liegen die Betriebsdaten auf täglicher Basis oder je Fahrt vor, wobei im Rahmen der Begleitforschung eine Fahrt wie folgt definiert ist: Zündung an/aus und eine Mindestfahrtdlänge von 10 km. Neben den BEV- und BZ-Bussen wurden auch Daten für insgesamt 60 Dieselreferenzbusse erhoben, welche im Zeitraum Februar 2019 bis Dezember 2020 auf eine kumulierte Laufleistung von knapp 3,4 Millionen Kilometer kamen. Für 2020 standen allerdings nur Daten für bis zu 14 Dieselbusse zur Verfügung.

Für die Batteriebusse ist aufgrund ihres mehr als zweijährigen Betrachtungszeitraums (Inbetriebnahme Depotlader im Februar 2019, Inbetriebnahme Gelegenheitslader im April 2019) und der Anzahl an erfassten Fahrzeugen eine umfangreiche Datengrundlage gegeben. Die Datenbasis vergrößerte sich dabei im Vergleich zu der vorherigen Begleitforschung aus den Jahren 2013 bis 2016 bezüglich der Anzahl der Fahrzeuge um ca. den Faktor 8 und in Bezug auf die Fahrleistung um rund den Faktor 27.

Für die Brennstoffzellenbusse, die erstmalig Bestandteil der Begleitforschung sind, ergibt sich aufgrund der geringeren Fahrzeuganzahl und des späteren Zeitpunktes der

Inbetriebnahme (Inbetriebnahme der ersten 10 Busse im Januar 2020) eine entsprechend geringere Laufleistung. Seit November 2020 befinden sich 45 BZ-Busse in Betrieb und die Laufleistung liegt mit Stand April 2021 bei ca. 850.000 km. Im Laufe des Jahres 2021 sollen noch weitere 25 vom BMDV geförderte Busse in Betrieb genommen werden, sodass eine weitere stetige Erhöhung der Laufleistung absehbar ist. Diese zusätzlichen Fahrzeuge verstärken jeweils die Flotten bei den beiden Verkehrsunternehmen, die bereits die 45 BZ-Busse betreiben.

ABBILDUNG 17 Gesamtlaufleistung und Laufleistung nach Antriebstechnologie*



*Anzahl
127 BEV (Ø 72 |
3 – 121/Mon.)
45 BZ (Ø 26 |
5 – 45/Mon.)
Zeitraum
2/2019 – 4/2021

Für die BEV- als auch die BZ-Busse zeigte sich im Laufe des Untersuchungsraums ein positiver Trend hinsichtlich der Laufleistung und auch der Verfügbarkeit der Busse (siehe folgendes Kapitel 2.2.2), was auf eine positive Lernkurve mit der neu eingeführten Technologie zurückzuführen ist. Je länger die Busse betrieben werden, desto mehr Erfahrung und Vertrauen sammeln Verkehrsunternehmen. Dies beeinflusst positiv den ganzen Betrieb – von der Ladung über die Einsatzplanung bis hin zum täglichen Einsatz.

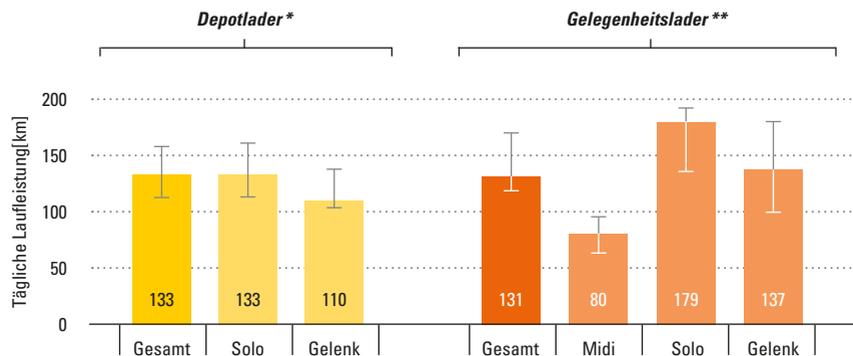
Nachfolgend wird der Einsatz der Batteriebusse anhand der täglichen und monatlichen Fahrleistungen sowie den monatlichen Betriebstagen betrachtet und mit Anforderungen der Verkehrsunternehmen verglichen.

Batteriebusse

Bei der Auswertung der Betriebsdaten der Batteriebusse wird zwischen Depot- und Gelegenheitsladern unterschieden, welche zudem nochmals in Midi-, Solo- und Gelenkbusse aufgeteilt sind. Bei der Depotladung werden die Busse auf dem Betriebshof geladen, wohingegen die Busse bei der Gelegenheitsladung auf der Strecke nachgeladen werden. Bei der Gelegenheitsladung werden die Busse in der Regel allerdings ebenfalls über Nacht im Depot vollständig geladen.

Abbildung 18 zeigt die durchschnittliche tägliche Fahrleistung der Batteriebusse. Die erhobenen Daten beziehen sich dabei maximal auf den gesamten Zeitraum der Begleitforschung von Februar 2019 bis April 2021.

ABBILDUNG 18 Mittlere tägliche Laufleistung der Batteriebusse je Bus



* Anzahl Depotlader

Solo (Ø 64 | 3 – 103 / Mon. | 11 VU)

Gelenk (Ø 4 | 3 – 5 / Mon. | 2 VU)

* Zeitraum Depotlader

Solo (2 / 19 – 4 / 21)

Gelenk (7 / 20 – 4 / 21)

** Anzahl Gelegenheitslader

Midi (Ø 4 | 2 – 4 / Mon. | 1 VU)

Solo (Ø 3 | 1 – 8 / Mon. | 3 VU)

Gelenk (Ø 1 | 1 / Mon. | 1 VU)

** Zeitraum Gelegenheitslader

Midi (7 / 19 – 4 / 21)

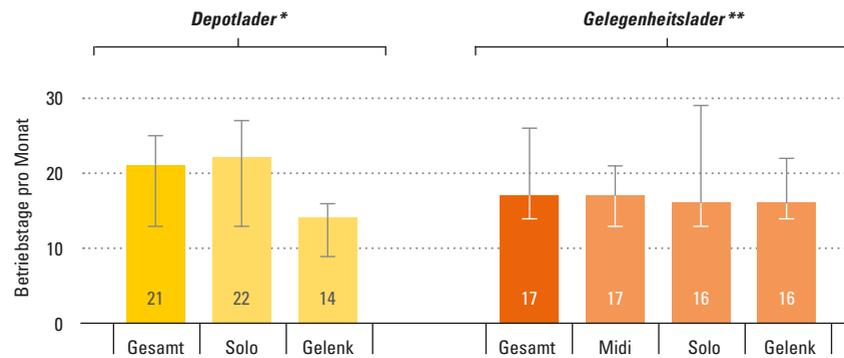
Solo (4 / 19 – 4 / 21)

Gelenk (12 / 20 – 4 / 21)

Bei den Depotladern betrug die mittlere tägliche Laufleistung 133 km. Dieser Durchschnittswert setzt sich aus Betriebsdaten von bis zu 103 Solobussen (Feb. 19 – Apr. 21) mit einer durchschnittlichen Laufleistung von 133 km und bis zu 5 Gelenkbussen (Jul. 20 – Apr. 21) mit einer durchschnittlichen Laufleistung von 110 km zusammen. Die installierte Batteriekapazität der Solobusse liegt dabei bei ca. 290 kWh und die der Gelenkbusse bei ca. 410 kWh. Eines der beiden VU, welches Gelenkbusse im Betrieb hat, gibt zudem eine Verfügbarkeit der Busse von lediglich 60–70 % und einen TRL von 7 an, wodurch die geringere durchschnittliche Fahrleistung der Gelenkbusse im Vergleich zu den Solobussen zu erklären ist. Auf Grund der deutlich geringeren Anzahl an Bussen sowie dem kürzeren Betrachtungszeitraum der Gelenkbusse wird der Gesamtdurchschnitt der Depotlader allerdings nicht beeinflusst. Ein Vergleich mit der Begleitforschung aus den Jahren 2013 bis 2016 kann nicht angestellt werden, da damals nur Betriebsdaten für 4 Midibusse mit Depotladung aufgenommen wurden und die Gefäßgröße eine entscheidende Rolle für die Reichweite spielt.

Die Gelegenheitslader erreichten eine durchschnittliche tägliche Laufleistung von 131 km, welche sich dabei aus den Laufleistungen von Midi-, Solo- und Gelenkbussen zusammensetzt. Auch hier gibt es Unterschiede hinsichtlich der Anzahl der Busse sowie den Zeiträumen, für welche Daten vorliegen (vgl. Abbildung 18). Trotz hoher Laufleistungen der Solobusse (179 km), welche mit bis zu 8 Bussen die meisten Busse sowie den längsten Betrachtungszeitraum (Apr. 19 – Apr. 21) der Gelegenheitslader darstellen, liegt der gesamte Durchschnitt bei lediglich 131 km. Dies ist hauptsächlich auf die Laufleistung der Midibusse (80 km) zurückzuführen. Diese verhältnismäßig geringe Laufleistung ist bedingt durch die deutlich geringere installierte Batteriekapazität der Midibusse (96 kWh) im Vergleich zu den Solo- (je nach VU 127 – 396 kWh) und Gelenkbussen (475 kWh). Die Laufleistung der Gelenkbusse bzw. des einen Gelenkbusses (137 km) fällt wie bei den Depotladern nicht stark ins Gewicht. Es handelt sich wie erwähnt, um nur einen Bus, für welchen zudem nur Daten für 4 Monate vorliegen.

Lässt man die Midibusse der Gelegenheitslader außen vor, zeigt sich hier der prinzipbedingte Vorteil von Gelegenheitsladern. Sie können höhere Tagesfahrleistungen erbringen, da die Nachladung üblicherweise auf der Linie, d. h. ohne Rückkehr in das Depot und meist mit höherer Ladeleistung (150–450 kW) erfolgt. Gerade bei den Solobussen ist dies erkennbar, hier liegt die mittlere tägliche Laufleistung bei 179 km. Für die Gelenkbusse ist die Datenlage derzeit noch sehr eingeschränkt und erlaubt zum jetzigen Zeitpunkt noch keine belastbaren Aussagen. Der Vollständigkeit halber sind sie in Abbildung 18 mitaufgeführt. Im Vergleich zur vorherigen Begleitforschung ist gerade bei den Solobussen eine deutliche Steigerung der mittleren täglichen Laufleistung zu verzeichnen, die nun ca. 20 % höher (+ 30 km) liegt und auch auf einer breiteren Datengrundlage basiert, die nun 2 Jahre Betrieb abdeckt

ABBILDUNG 19 Mittlere monatliche Betriebstage der Batteriebusse je Bus

***Anzahl Depotlader**

Solo (Ø 64 | 3 – 103 / Mon. | 11 VU)
 Gelenk (Ø 4 | 3 – 5 / Mon. | 2 VU)

***Zeitraum Depotlader**

Solo (2 / 19 – 4 / 21)
 Gelenk (7 / 20 – 4 / 21)

****Anzahl Gelegenheitslader**

Midi (Ø 4 | 2 – 4 / Mon. | 1 VU)
 Solo (Ø 3 | 1 – 8 / Mon. | 3 VU)
 Gelenk (Ø 1 | 1 / Mon. | 1 VU)

****Zeitraum Gelegenheitslader**

Midi (7 / 19 – 4 / 21)
 Solo (4 / 19 – 4 / 21)
 Gelenk (12 / 20 – 4 / 21)

Abbildung 19 ist zu entnehmen, dass die Depotlader im Monatsdurchschnitt an 21 Tagen in Betrieb waren, während die Gelegenheitslader nur an 17 Tagen im Einsatz waren.

Die Solobusse der Depotlader fahren dabei an durchschnittlich 22 Betriebstagen im Monat. Wie bereits bei der täglichen Laufleistung fallen bei den Depotladern die Gelenkbusse (14 Betriebstage) aufgrund ihrer Anzahl und des Zeitraums mit verfügbaren Daten für die mittlere Anzahl an Betriebstagen über alle Depotlader nicht sonderlich ins Gewicht. Wie eine detailliertere Analyse der Depotlader-Gelenkbusse über die einzelnen Monate zeigte, sind diese Busse ausschließlich zwischen 7 und maximal 18 Betriebstagen je Monat im Einsatz. Der durchschnittliche Wert von 14 Betriebstagen beruht also nicht auf einzelnen Ausreißern, sondern zieht sich über den Betrachtungszeitraum hinweg. Ein Abgleich der Angaben der 2 Verkehrsunternehmen, von welchen die Busse stammen, zur durchschnittlichen Verfügbarkeit sowie dem TRL der Gelenkbusse zeigt, dass die Verfügbarkeit bei einem VU mit lediglich 60–70 % angegeben ist. Der TRL wird von einem VU mit 7 und von dem

zweiten mit 8 bewertet, wodurch sich die geringe Anzahl an Betriebstagen erklären lässt. Die Anzahl an Betriebstagen der Depotlader wurde im Vergleich zu der vorigen Begleitforschung (18 Betriebstage) um etwa 16–20 % gesteigert.

Die Gelegenheitslader liegen im Mittel über alle Gefäßgrößen bei 17 Betriebstagen pro Monat. Die durchschnittlichen Betriebstage je Gefäßgröße sind dabei ausgeglichen auf Midi- (17 Betriebstage), Solo- (16 Betriebstage) und Gelenkbusse (16 Betriebstage) verteilt. Auffällig bei den Solo-Gelegenheitsladern ist die große Bandbreite, welche von minimal 13 bis maximal 29 Betriebstagen reicht (vgl. Abbildung 19). Bei zwei VU konnten die Busse in einzelnen Monaten bereits an 29 Tagen eingesetzt werden, wobei die noch nicht der Regelfall ist. Anhand der Angaben der Verkehrsunternehmen hinsichtlich der Verfügbarkeit und dem TRL aller Gefäßgrößen lässt sich die geringe Anzahl an Betriebstagen ein wenig erklären. So gibt ein VU den TRL der Busse mit lediglich 3–4 und den der Ladeinfrastruktur mit 7 an. Ein weiteres VU gibt sowohl beim TRL der Busse als auch der Ladeinfrastruktur einen Wert von 8 an, jedoch ist die Verfügbarkeit der Busse und der LIS mit lediglich ca. 73 bzw. 70 % angegeben. Die übrigen 3 VU sind mit der Verfügbarkeit der Busse und der LIS (jeweils > 90 %) zufrieden und nennen für Busse und LIS ein TRL von 8–9. Die durchschnittliche Anzahl an Betriebstagen hat sich im Vergleich zu der vorangegangenen Begleitforschung nicht verändert.

Abbildung 20 und Abbildung 21 geben weiteren Aufschluss über die Anzahl der Betriebstage der Busse mit Depot- und Gelegenheitsladung und wie diese sich im Laufe der Zeit entwickelt haben. Sowohl bei den Depotladern (N = 13 VUs) als auch bei den Gelegenheitsladern (N = 4 VUs) ist über alle Gefäßgrößen ein positiver Trend zu erkennen, was u. a. für ein steigendes Vertrauen der VUs in die Technologie spricht. Die Ausnahme bilden die Gelenkbusse mit Depotladung, was jedoch zum einen an der geringen Anzahl an Bussen (3–5 Busse je Monat) von lediglich zwei VUs liegen kann und zum anderen gehören diese Busse zum Teil zu den ersten ausgelieferten Fahrzeugen dieser Gefäßgröße. Es zeigen sich also auch hier die nicht untypischen Anlaufschwierigkeiten bei der Einführung eines neuen Fahrzeugtypen. Der leichte Einbruch der Solobusse mit Depotladung Mitte 2019 ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass zu diesem Zeitpunkt erst eine geringe Anzahl an Fahrzeugen (3–14 BEV Busse) bei erst einem und dann bei zwei VU im Einsatz waren. Zudem stammten die Busse mehrheitlich von einem Hersteller, der in diesem Zeitraum eine Nachrüstung an den Fahrzeugen vornahm, die in diesem Zeitraum zu einem erkennbaren Rückgang der Betriebstage führte. Mit steigender Anzahl an VUs und Bussen über der Zeit werden die Ausschläge auch deutlich gedämpft. Mit durchschnittlich 21 Betriebstagen je Monat liegt damit der Durchschnitt gut 3 Tage über den Erkenntnissen der vorigen Begleitforschung, bei welcher der Durchschnitt bei 18 Betriebstagen im Monat lag.

ABBILDUNG 20 Monatliche Betriebstage der Depotlader über den Betrachtungszeitraum

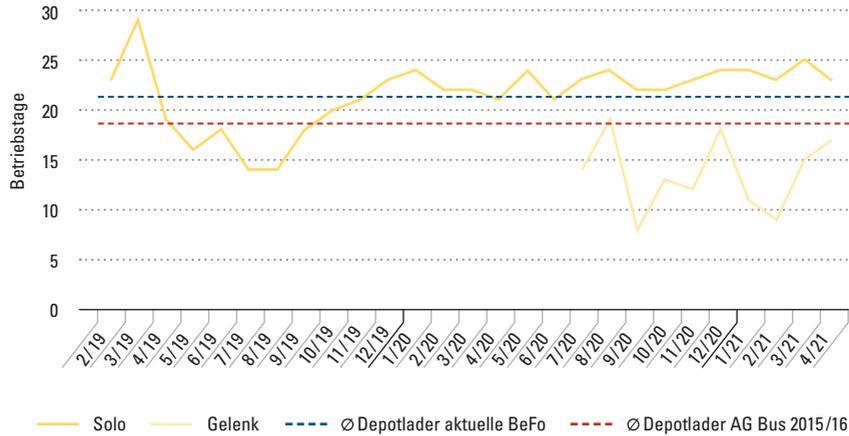


ABBILDUNG 21 Monatliche Betriebstage der Gelegenheitslader über den Betrachtungszeitraum

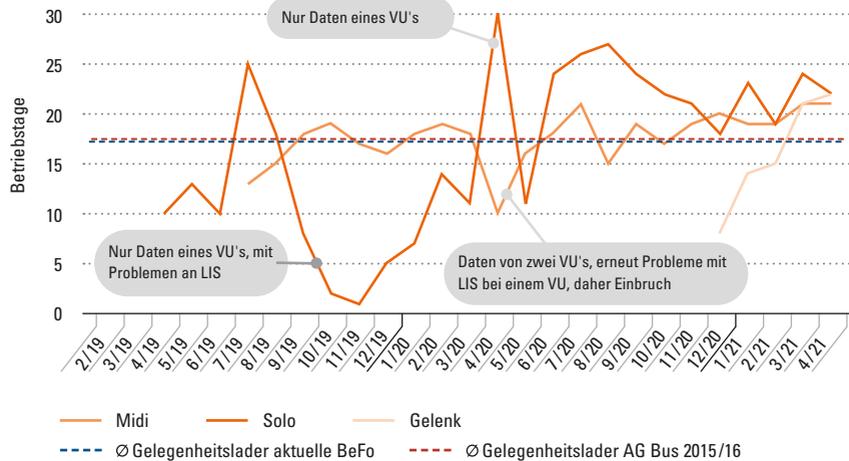
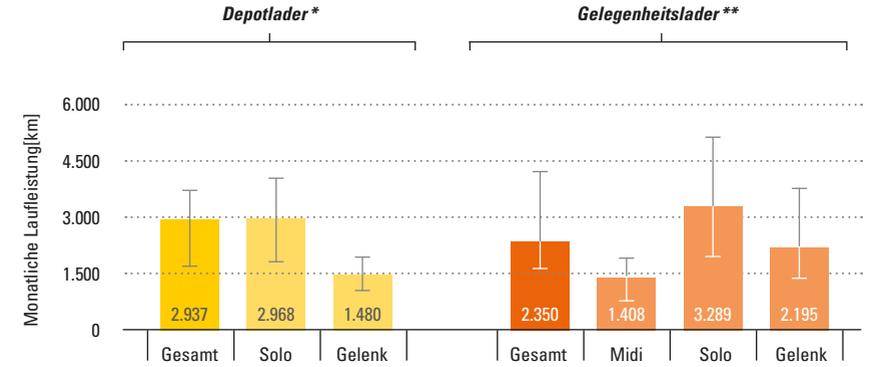


ABBILDUNG 22 Mittlere monatliche Laufleistung der Batteriebusse je Bus



***Anzahl Depotlader**
Solo (Ø 64 | 3 – 103 / Mon. | 11 VU)
Gelenk (Ø 4 | 3 – 5 / Mon. | 2 VU)

****Anzahl Gelegenheitslader**
Midi (Ø 4 | 2 – 4 / Mon. | 1 VU)
Solo (Ø 3 | 1 – 8 / Mon. | 3 VU)
Gelenk (Ø 1 | 1 / Mon. | 1 VU)

***Zeitraum Depotlader**
Solo (2 / 19 – 4 / 21)
Gelenk (7 / 20 – 4 / 21)

****Zeitraum Gelegenheitslader**
Midi (7 / 19 – 4 / 21)
Solo (4 / 19 – 4 / 21)
Gelenk (12 / 20 – 4 / 21)

Die starken Ausschläge an Betriebstagen der Solobusse mit Gelegenheitsladung ist wiederum mit der geringen Anzahl zu begründen. Bis April 2020 waren lediglich zwei Busse eines VUs in Betrieb, wodurch die durchschnittliche Anzahl an Betriebstagen sehr schwanken kann. Mitte 2019 bis Ende 2019 hatte das VU technische Probleme mit der Ladeinfrastruktur, weshalb die Busse nur an wenigen Tagen eingesetzt werden konnten. Im April 2020 hingegen wurden die Busse ausnahmslos täglich betrieben. Ab April 2020 kam ein weiterer Solobus mit Gelegenheitsladung hinzu und gegen Ende des Jahres wurden noch weitere 6 Busse in Betrieb genommen, wodurch auch hier die Kurve der durchschnittlichen Anzahl an Betriebstagen stabilisiert wird. Trotz der oben genannten Schwierigkeiten liegt die durchschnittliche Anzahl bei 17 monatlichen Betriebstagen bei, analog der früheren Begleitforschung.

Vergleicht man die Laufleistungen der Solo- und Gelenkbusse der Depot- und Gelegenheitslader, zeigt sich eine zu erwartende höhere Laufleistung der Gelegenheitslader, da die Gelegenheitslader zum Nachladen nicht zurück in das Depot fahren

müssen, sondern direkt auf der Strecke geladen werden können. Der niedrigere Mittelwert über alle Gelegenheitslader im Vergleich zu den Depotladern ist auf die Midibusse zurückzuführen, welche von Grund auf für deutlich kürzere Umläufe als Solo- oder Gelenkbusse ausgelegt sind. Dadurch wird letztlich der gesamte Schnitt deutlich verringert.

Wie in Abbildung 22 zu sehen ist, liegt die mittlere monatliche Laufleistung bei den Depotladern mit 2.937 km über der monatlichen Laufleistung der Gelegenheitslader mit 2.350 km.

Zudem lässt sich dieser Unterschied der Laufleistungen auch an den Betriebstagen der Depot- bzw. Gelegenheitslader festmachen, wie in Abbildung 19 zu sehen ist. Die Anzahl der monatlichen Betriebstage der Gelegenheitslader liegt ca. 4–5 Tage unter jener von Depotladern. Ausgehend von den zwei unterschiedlichen Ladekonzepten sollten die Gelegenheitslader bei einer gleichen Anzahl an monatlichen Betriebstagen wie die Depotlader in der Regel, auf Grund der Ladetechnologie, eine höhere Laufleistung erzielen. Hierdurch können theoretisch mehr Umläufe und somit auch mehr Kilometer pro Tag gefahren werden. Wie bereits erwähnt handelt es sich bei ca. 25 % der Gelegenheitslader um Midibusse, welche wie oben beschrieben aus mehreren Gründen eine geringere tägliche Laufleistung und somit folglich auch eine geringere monatliche Laufleistung von 1.408 km aufweisen. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Bandbreite zwischen minimalen und maximalen Laufleistungen der Gelegenheitslader größer als die der Depotlader sind. Dies liegt zum Teil in der größeren Bandbreite der Einsatzkontexte bei den VUs begründet. Zudem hatte jedes VU mindestens einen Monat, in welchem ein Bus oder mehrere Busse nicht die gewünschte Laufleistung erbringen konnten.

Bei den Solo-Gelegenheitsladern können derzeit bereits monatliche Laufleistungen von über 5.000 km und bei den Gelenk-Gelegenheitsladern bis zu knapp 3.800 km erzielt werden. Die maximalen monatlichen Laufleistungen der Solo-Depotlader liegen mittlerweile bei über 4.000 km und bei den Gelenk-Depotladern aktuell noch recht niedrig bei knapp 2.000 km. Hier Bedarf es noch weiterer Anstrengungen der Hersteller, um die Zuverlässigkeit der Fahrzeuge zu erhöhen.

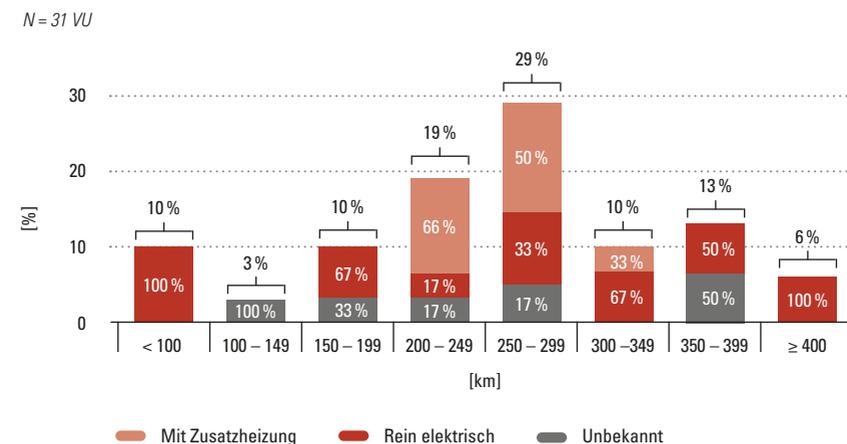
Wie bei der täglichen Laufleistung kann aufgrund der unterschiedlichen Gefäßgrößen kein Vergleich zwischen den Depotladern der alten und der aktuellen Begleitforschung gezogen werden. Vergleicht man wie zuvor die Solo- und Gelenkbusse mit Gelegenheitsladung zwischen der vorherigen Begleitforschung (\varnothing 2.591 km) und der aktuellen Begleitforschung, so ist im Fall der Solobusse eine Steigerung um 15 % zu erkennen.

Abgleich erzielter Tagesfahrleistung mit Reichweitenanforderung

Vergleicht man die bisher erzielten Tagesfahrleistungen mit den Reichweitenanforderungen der Verkehrsunternehmen, zeigt sich, dass dies derzeit einer der zentralen Herausforderungen für den Einsatz von Batteriebussen ist. Wie in Abbildung 23 ersichtlich ist, benötigt mit 77 % die überwiegende Mehrheit der betrachteten 31 Verkehrsunternehmen eine tägliche Reichweite von mindestens 200 km. Der Großteil (58 %) fordert eine Reichweite von 200 bis 350 km pro Tag und rund ein Fünftel (20 %) sieht eine tägliche Reichweite von mehr als 350 km als erforderlich an.

Die Mehrzahl der Verkehrsbetriebe (52 %) wünscht sich einen vollelektrischen Betrieb der Batteriebusse. Allerdings ist die von 11 Verkehrsunternehmen erwartete Reichweite von über 200 km in Kombination mit rein elektrischem Heiz- und Klimatisierungskonzept nur mit hohen Batteriekapazitäten erreichbar. Nur zwei Verkehrsbetriebe, die bereits Elektrobusse betreiben, haben von dem zu Beginn geforderten rein elektrischen Heizungs- und Klimatisierungskonzept abgesehen.

ABBILDUNG 23 Reichweitenanforderungen – Batteriebusse¹⁴



¹⁴ Bei drei Verkehrsbetrieben hat ein Batteriebus Reichweiten von weniger als 100 km sicherzustellen. Die geringe Reichweitenanforderung resultiert in erster Linie aus dem Einsatzzweck wie etwa Gelegenheitsladung oder als reine Altstadtlinie.

Von 13 Verkehrsunternehmen mit Batteriebussen liegen sowohl Daten zur tatsächlichen täglichen Laufleistung als auch zur gewünschten Reichweite und dem Heizungskonzept vor (siehe Abbildung 24). Der Vergleich macht deutlich, dass die derzeit erzielten Reichweiten durchgängig noch nicht den Reichweitenanforderungen des jeweiligen VUs entsprechen. Im Schnitt liegen die Anforderungen um den Faktor 2,4 über der derzeit im Schnitt zurückgelegten Tagesfahrleistung. Daher werden die Busse mindestens einmal pro Tag im Depot geladen und auf Umläufen eingesetzt, die mit den derzeit verfügbaren Reichweiten möglich sind. So werden die Depotlader-Solobusse teilweise auf zwei Umläufen am Tag eingesetzt, ersichtlich aus der ermittelten Zahl von durchschnittlich 1,1 Ladevorgängen pro Tag.

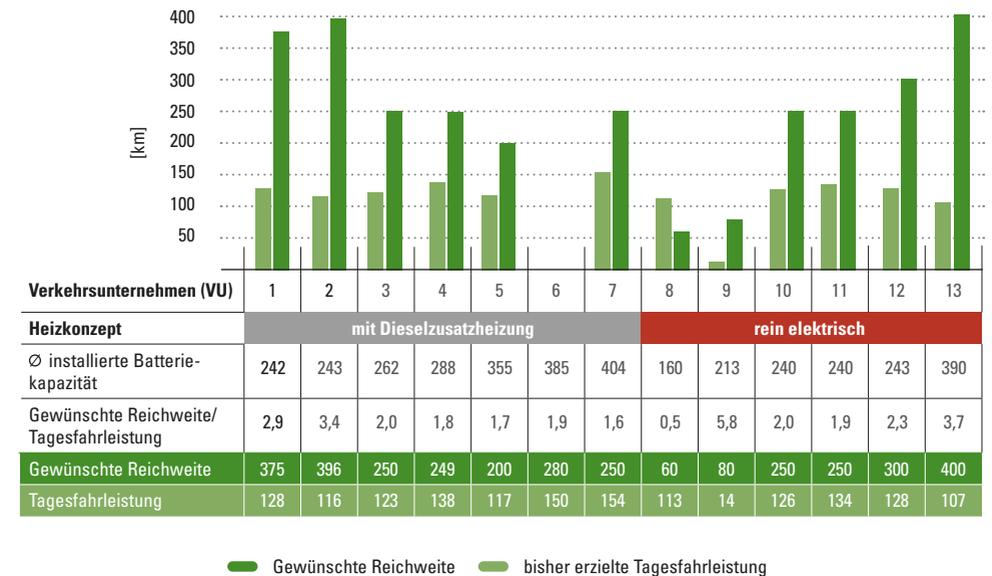
Bei VU 8 werden als einzigem VU schon heute die Reichweitenanforderung seitens des VU übererfüllt. VU 8 ist gleichzeitig auch das einzige Verkehrsunternehmen, das als Ladekonzept die Gelegenheitsladung einsetzt, insofern wird das Thema Reichweite hier unkritischer gesehen und seitens des VU die Reichweitenanforderung entsprechend der herstellerseitig angegebenen Reichweite der BEV-Busse ohne Nachladen angegeben.

Für VU 9 ergibt sich ebenfalls eine relativ geringe Reichweitenanforderung aufgrund des spezifischen Einsatzkontextes (Einsatz auf Flughafenvorfeld). Die bisher erzielte mittlere Tagesfahrleistung fällt hier sehr gering aus, da mit dem Ausbruch der COVID-19-Epidemie nur noch ein sehr eingeschränkter Fahrgastbetrieb erforderlich war. Die erzielte Fahrleistung fällt also nicht ausfallbedingt so niedrig aus, sondern ist auf die veränderten Betriebsbedingungen zurückzuführen.



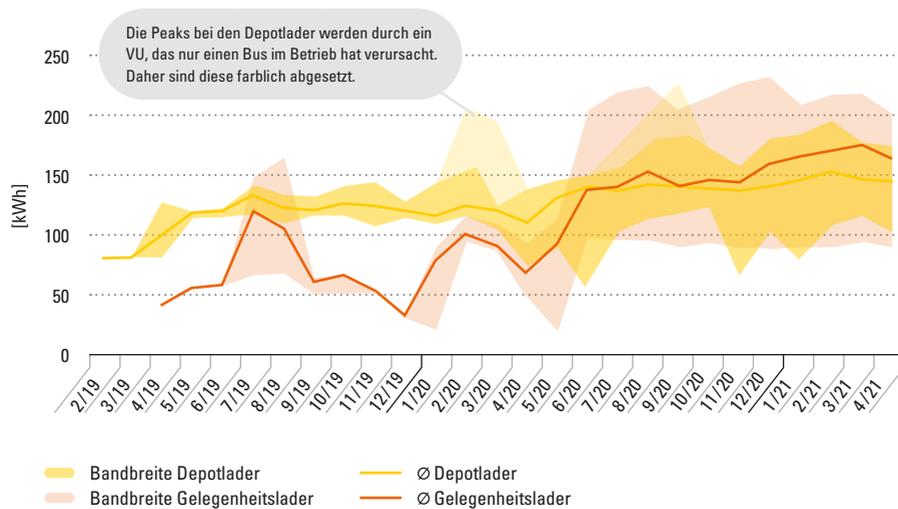
Quelle: VAG Freiburg, 2021

ABBILDUNG 24 Reichweitenanforderungen im Vergleich zur Tagesfahrleistung – Batteriebusse mit Depotladung



Bei Betrachtung der zeitlichen Entwicklung der Tagesfahrleistung in Abbildung 25 wird ersichtlich, dass die durchschnittliche Tagesfahrleistung sowohl bei den Depotladern als auch den Gelegenheitsladern im Zeitverlauf ansteigt. Verursacht durch die COVID-19-Pandemie liegt bei beiden Ladekonzepten ein Einbruch der Tagesfahrleistung im März 2020 vor. Infolge der Schwankungen zu Beginn ist die gemittelte Tagesfahrleistung über den gesamten Zeitraum bei den Depotladern höher als bei den Gelegenheitsladern (siehe Abbildung 25). Ab Juli 2020 übersteigt die durchschnittliche Tagesfahrleistung der Gelegenheitslader die der Depotlader und erreicht im Maximum 172 km/Bus. Die maximale Bandbreite der Gelegenheitslader weist seit Juni 2020 Werte über 200 km/Bus auf. Vereinzelt ist auch bei Depotladern eine höhere Reichweite möglich. Mit Bussen im Überlandeinsatz sind sogar tägliche Fahrleistungen von über 200 km/Bus im außerstädtischen Betrieb umsetzbar. Allerdings liegen hierfür nur die Daten eines Busses vor, der einen geringen Energieverbrauch und hohe Reisegeschwindigkeiten aufweist.

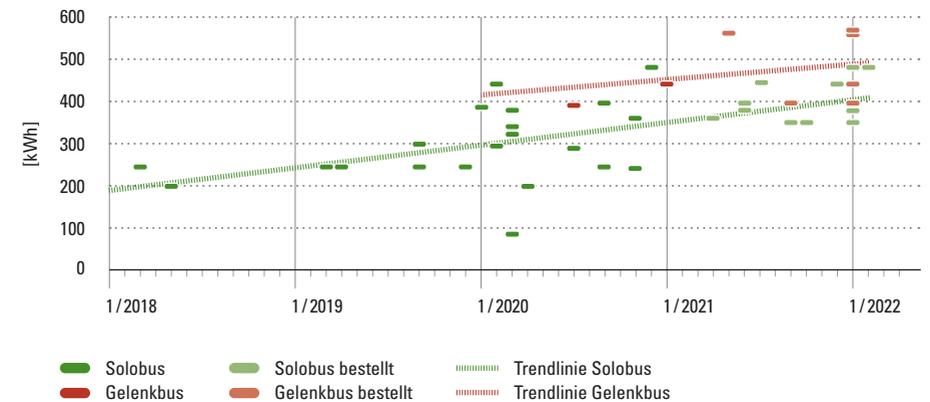
ABBILDUNG 25 Zeitliche Entwicklung der Tagesfahrleistung von Batteriebussen



Die beiden relevanten Faktoren für die Reichweite sind der Energieverbrauch je km und die installierte Batteriekapazität. Während der Energieverbrauch im folgenden Kapitel 2.3 im Detail untersucht wird, ergibt sich aus der Analyse der installierten Kapazitäten im zeitlichen Verlauf der Inbetriebnahme der geförderten Busse, dass diese stetig ansteigen (siehe Abbildung 26). Liegt die mittlere installierte Batteriekapazität bei den geförderten Solofahrzeugen mit Depotladung bei knapp 300 kWh, zeigt die Abbildung 26, dass Solobusse, die zu Beginn der Begleitforschung beschafft wurden, noch installierte Batteriekapazitäten von unter 300 kWh hatten. Zukünftig ist zu erwarten, dass Batteriekapazitäten von deutlich über den aktuell beschaffbaren 400 kWh möglich sind. Auch für Gelenkfahrzeuge sind bereits Fahrzeuge mit ca. 550 kWh Batteriekapazität bestellt. Die Gelegenheitslader werden hier nicht betrachtet, da hier prinzipbedingt durch das Vorhandensein von Ladepunkten – üblicherweise an den Endhaltestellen bzw. Wendepunkten – keine größere Steigerung der installierten Batteriekapazität erforderlich ist. Eine weitere Analyse der erwartbaren Batteriekapazitätsentwicklung findet sich auch in Kapitel 4.2.

Mit perspektivisch höheren Batteriekapazitäten sind auch längere Reichweiten möglich. Wobei bei der Höhe der installierten Batteriekapazitäten absehbar technische Grenzen bestehen und auch aus Gewichtgründen die Steigerung der Kapazität nicht unbegrenzt erfolgen kann (siehe auch Kapitel 4.2). Geringe Batteriekapazitäten können je nach Einsatzkontext auch sinnvoll sein, wie etwa bei der Nutzung für den Flughafenbetrieb. Bei den oben genannten Reichweiten handelt es sich um Durchschnittswerte über den gesamten Zeitraum. Busse mit früherem Betriebsstart und damit niedriger Reichweite fallen somit mehr ins Gewicht.

ABBILDUNG 26 Installierte Batteriekapazitäten Depotlader nach Betriebsbeginn (inkl. bestellter Busse)



Brennstoffzellenbusse

Derzeit werden bei zwei Verkehrsbetrieben Brennstoffzellenbusse im Linienbetrieb eingesetzt. Dabei handelt es sich ausschließlich um Solobusse. Die tägliche Fahrleistung der Brennstoffzellenbusse liegt im Durchschnitt bei 137 km (vgl. Abbildung 27) bei einer Bandbreite von 90 bis 204 km pro Tag.

Derzeitige Einschränkungen bei der Betankung, wie eine außerhalb des Betriebshofes befindliche Tankstelle, eine noch nicht abgeschlossene Abnahme der H₂-Tankstelle, sowie der Mangel an ausgebildetem Tankpersonal, wirken sich negativ auf die Fahrleistung aus. Gerade bei einem der VUs ergibt sich aufgrund der dezentralen Lage der H₂-Tankstelle die Situation, dass die Fahrzeuge aus betrieblichen Gründen etwa jeden zweiten Tag getankt werden. Dies führt dazu, dass die Busse zuverlässig mehr als 250 km zwischen zwei Tankstops erzielen, nur eben über mehrere Tage verteilt. Grundsätzlich können mit Brennstoffzellenbussen Reichweiten von mehr als 300 km zwischen zwei Tankvorgängen erreicht werden.

Wie Abbildung 28 verdeutlicht, sind Brennstoffzellenbusse im Schnitt knapp 14 Tage pro Monat im Einsatz. Im Durchschnitt erreichen die Dieselreferenzfahrzeuge monatliche Betriebstage zwischen 26 und 27 Tagen. Somit werden die Brennstoffzellenbusse derzeit weniger eingesetzt als die Dieselreferenzfahrzeuge. Zu erklären ist dies, abgesehen von den anfänglichen Einschränkungen durch die Betankungsstrategie, auch mit der Verfügbarkeit (siehe Kapitel 2.2.2).

Die monatliche Fahrleistung der Brennstoffzellenbusse lag im Durchschnitt bei rund 1.900 km (vgl. Abbildung 29) und ist damit aktuell noch deutlich geringer als die der Dieselreferenzfahrzeuge, deren monatliche Laufleistung im Mittel bei ca. 4.000 km lag. Je nach Verkehrsunternehmen variiert die durchschnittliche Monatsfahrleistung der Brennstoffzellenbusse zwischen 985 und 3.467 Kilometern.

Wie bereits die tägliche Laufleistung wird auch die monatliche Laufleistung durch die derzeit noch vorhandenen Einschränkungen bei der Betankung beeinflusst (s. Abbildung 29).

ABBILDUNG 27 Mittlere tägliche Laufleistung der Brennstoffzellenbusse je Bus*

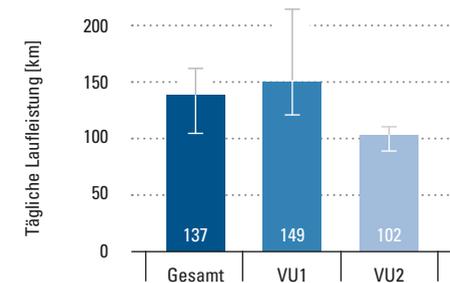
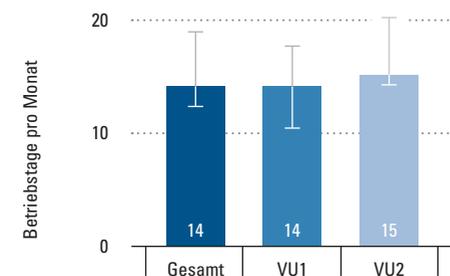
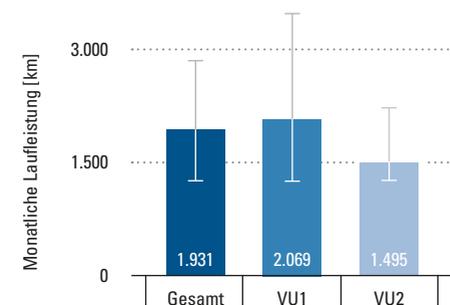


ABBILDUNG 28 Betriebstage der Brennstoffzellenbusse je Bus*



* Anzahl Brennstoffzellenbusse
45
* Zeitraum Brennstoffzellenbusse
1/20 – 4/21

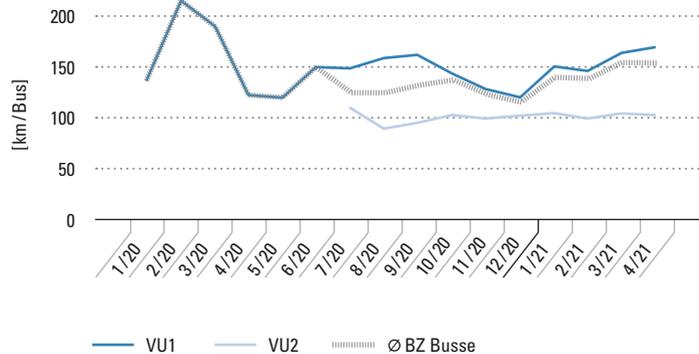
ABBILDUNG 29 Mittlere monatliche Laufleistung der Brennstoffzellenbusse je Bus*



Für die Brennstoffzellenbusse liegen Anforderungen an die erforderliche Reichweite von vier Verkehrsunternehmen vor. Diese liegen bei 250, 300, 340 bzw. 400 km. Das Klimatisierungs- bzw. Heizungskonzept ist antriebstechnologiebedingt voll elektrisch, wobei nur eine Rückmeldung zum erforderlichen Heizungskonzept vorhanden ist, welche einen vollelektrischen Betrieb fordert.

Abbildung 30 stellt die Entwicklung der täglichen Fahrleistung dar. Zu Beginn lag diese höher als im weiteren Verlauf. Dies kann sowohl auf die COVID-19-Pandemie als auch auf die steigende Anzahl von Bussen im weiteren Verlauf der Untersuchung zurückgeführt werden. Insbesondere bei Eingliederung in den Regelbetrieb liegt die Laufleistung der Busse planungsbedingt niedriger. Aber auch die Einschränkungen durch spezielle Tankstellensituationen bei beiden Verkehrsunternehmen mindern die tägliche Laufleistung. Ein weiterer Faktor ist die Verfügbarkeit der Busse, welche durch lange Wartezeiten auf Ersatzteile vor allem für den konventionellen Teil des Busses beeinträchtigt wird (siehe nächstes Kapitel 2.2.2).

ABBILDUNG 30 Zeitliche Entwicklung der Tagesfahrleistung – Brennstoffzellenbusse*



*Anzahl Brennstoffzellenbusse
45 (Ø 26,5 | 5 – 45 / Mon.)

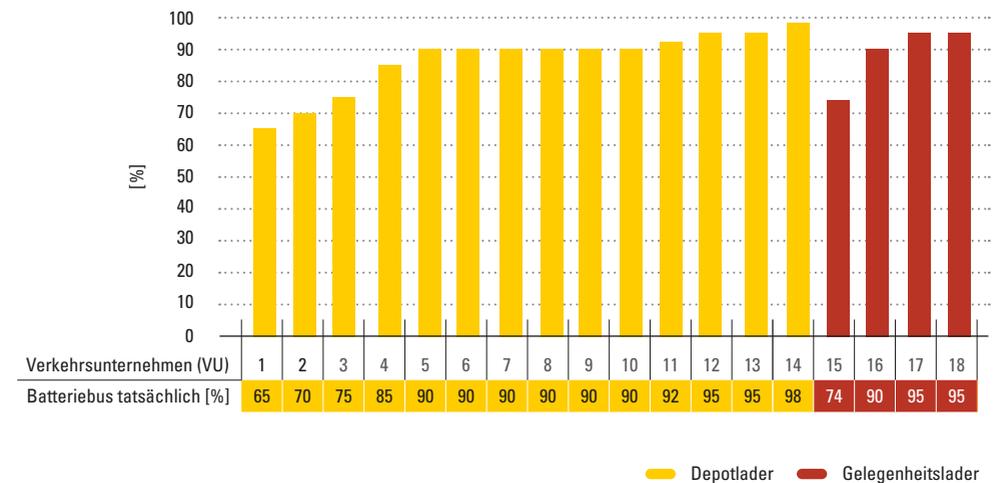
2.2.2. Verfügbarkeit

Batteriebusse

Für den zuverlässigen Einsatz der batterieelektrischen Antriebstechnologie im täglichen Linienbetrieb ist eine möglichst hohe Verfügbarkeit erforderlich. Diese bietet sich dabei als Reifegradmesser für die Praxistauglichkeit der neuen und innovativen Antriebstechnologie an.

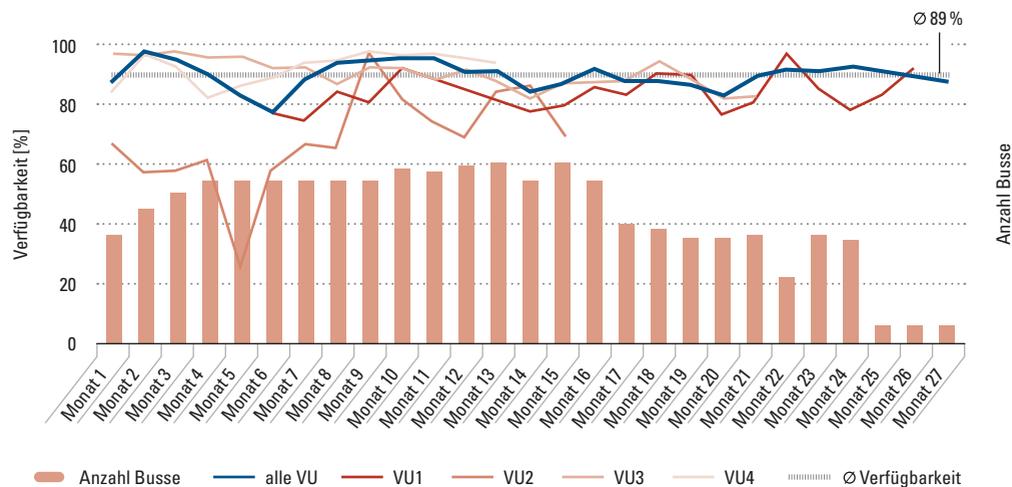
Angaben zur Verfügbarkeit der Batteriebusse liegen von 18 Verkehrsunternehmen vor, 14 davon betreiben Depotlader und 4 Verkehrsunternehmen setzen auf Gelegenheitsladung. Die eingesetzten Batteriebusse weisen im Betrachtungszeitraum eine Verfügbarkeit von ca. insgesamt 87 % auf (siehe Abbildung 31). Betrachtet man die Verfügbarkeit je Nachladekonzept, so ergibt sich ein stabiles Bild. Die Depotlader liegen bei knapp 87 %, während die Gelegenheitslader gut 88 % Verfügbarkeit aufweisen. Dies stellt eine deutliche Verbesserung gegenüber der im letzten Statusbericht der AG Bus von 2016 ermittelten Verfügbarkeit von 72 % für Depotlader und 76 % für Gelegenheitslader dar.

ABBILDUNG 31 Erzielte Verfügbarkeiten der Batteriebusse



Von vier Verkehrsunternehmen liegen detaillierte Verfügbarkeitsdaten von bis zu 60 Bussen auf Tages- oder Wochenbasis vor. Dabei handelt es sich um 58 Solo- und 2 Gelenkbusse, wobei für die Gelenkbusse aufgrund ihrer Inbetriebnahme im Q1 2021 erst Daten für 3 Monate vorliegen. Alle Busse sind Depotlader. Abbildung 32 zeigt die zeitliche Entwicklung der Verfügbarkeit dieser vier VUs sowie eine gemittelte Kurve („BeFo“) über alle Busse, jeweils ab dem ersten Betriebsmonat. Es sind abhängig vom Zeitpunkt der Inbetriebnahme der Busse bei den einzelnen VUs Daten für einen Zeitraum von 15 bis 27 Monate vorhanden. Die mittlere Verfügbarkeit über alle Busse für die detaillierte Verfügbarkeitsdaten vorliegen liegt bei knapp 90 % und deckt sich mit den Angaben aus Abbildung 31. Wie in Abbildung 32 zu erkennen ist, liegt die Fahrzeugverfügbarkeit der Verkehrsunternehmen 3 und 4 konstant bei über 80 % und im Mittel sogar bei ca. 90 %. Die Verfügbarkeit der Fahrzeuge des Verkehrsunternehmens 1 schwankt etwas mehr und reicht von 76 % bis 97 %, was insgesamt eine mittlere Verfügbarkeit von 85 % ergibt. VU 4 hatte nach der Inbetriebnahme zunächst noch Probleme mit den Fahrzeugen, weshalb die Verfügbarkeit bei ca. 60 % lag und in einem Monat auf Grund eines technischen Defekts sogar auf unter 30 % gefallen ist. Nach ca. einem halben Jahr verbesserte sich die Verfügbarkeit spürbar, mit monatlichen Verfügbarkeiten von bis zu 90 %, die mittlere Fahrzeugverfügbarkeit im Verkehrsunternehmen 4 liegt bei einem insgesamt positiven Trend bei knapp 70 %.

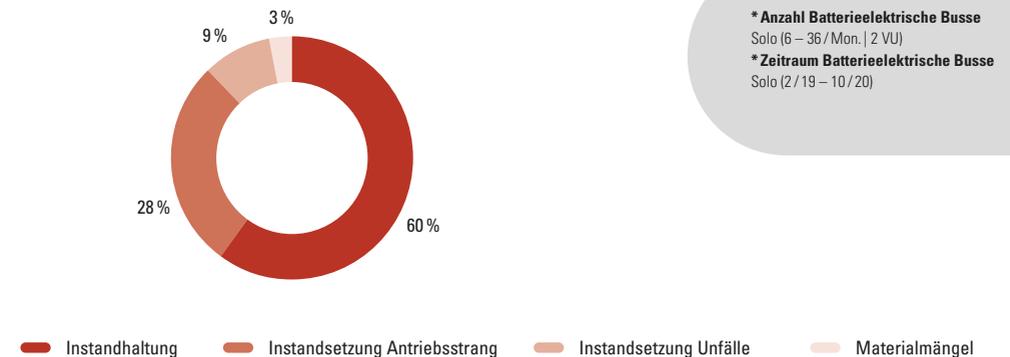
ABBILDUNG 32 Zeitliche Entwicklung der Verfügbarkeit der Batteriebusse



Generell stellt sich bei der Verfügbarkeit immer die Frage nach der Definition bzw. Messung derselben. Während VU 2–4 die Verfügbarkeit anhand einer täglichen Verfügbarkeitsmeldung messen, wird beim VU 1 die Verfügbarkeit über das Verhältnis der Soll- und Ist-km ermittelt.

Anhand der Daten zu Ausfallgründen von zwei Verkehrsunternehmen mit bis zu 36 Bussen (vgl. Abbildung 33) wird erkennbar, dass die Hauptursache für Ausfälle mit 60 % auf die Instandhaltung von nicht antriebsbezogenen Fahrzeugteilen der Busse entfällt, gefolgt von Instandsetzungsmaßnahmen am Elektroantriebsstrang mit 28 %. Weitere 9 % der Ausfälle sind auf die Instandsetzung aufgrund von Unfällen zurückzuführen und 3 % auf Materialmängel.

ABBILDUNG 33 Ausfallgründe – Batteriebusse*

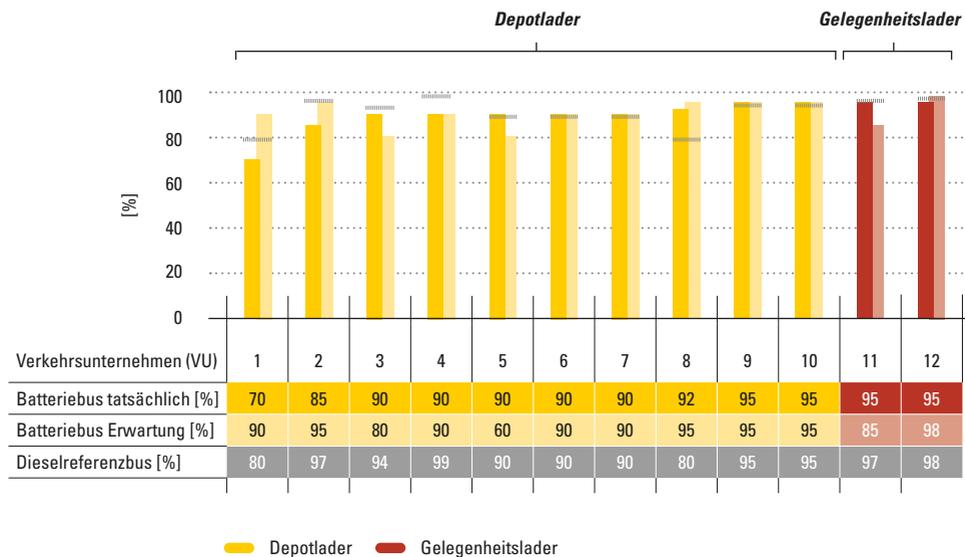


Die Verfügbarkeit liegt damit noch nicht auf dem Niveau der etablierten Dieselantriebstechnologie. Wenn man aber bedenkt, dass die Batteriebusstechnologie erst seit ca. 5 Jahren, je nach Hersteller auch deutlich kürzer, in relevantem Umfang am Markt verfügbar ist, so ist die bisher erreichte mittlere Verfügbarkeit von nahe 90 % durchaus zufriedenstellend. Wichtig ist hier vor allem, inwieweit die Technologie die Erwartungen der einzelnen Verkehrsunternehmen hinsichtlich Verfügbarkeit erfüllt. Auf Basis der Daten von 12 Verkehrsunternehmen lag die Verfügbarkeitsersparnis im Schnitt bei 89 %, wobei 70 % der Verkehrsbetriebe eine Verfügbarkeit von mindestens 90 % fordern und mehr als die Hälfte (58 %) der VUs eine mit der eingesetzten Referenztechnologie vergleichbare Verfügbarkeit erwarten (siehe Abbildung 34).

Dies dokumentiert eine durchaus hohe Erwartungshaltung der Verkehrsbetriebe an die Einsatzverfügbarkeit der Fahrzeuge mit einer Antriebstechnologie, die wie zuvor genannt, so erst seit relativ kurzer Zeit am Markt verfügbar ist. Dem sollte bei der Formulierung der Erwartung an die Einsatzverfügbarkeit in Zusammenspiel mit der Einsatzstrategie Rechnung getragen werden, gerade wenn die Antriebstechnologie erstmalig bei einem Verkehrsunternehmen zum Einsatz kommt.

Insofern ist positiv zu vermerken, dass in der überwiegenden Mehrheit der Fälle (75 %) die erwartete Verfügbarkeit erreicht oder übererfüllt werden konnte. Zum Vergleich: der Mittelwert für die Verfügbarkeit von Dieselnbussen als Referenztechnologie liegt bei 93 %.

ABBILDUNG 34 Erwartete und bisher erzielte Verfügbarkeiten der Batteriebusse mit Vergleich zur Referenztechnologie



¹⁵ Laut VDE betrug in Deutschland die durchschnittliche Strom-Unterbrechungsdauer pro Kunde in 2019 12 Minuten. (<https://www.vde.com/de/fnn/arbeitsgebiete/versorgungsqualitaet/versorgungszuverlaessigkeit/versorgungszuverlaessigkeit2019>, letzter Zugriff 23.7.2021)

Bei vier Verkehrsunternehmen zeigen die Batteriebusse eine niedrigere Einsatzverfügbarkeit als gefordert. Dies kann einerseits vom Hersteller abhängen, andererseits auch von den Einschränkungen durch die COVID-19 Pandemie und dem damit verbundenen teilweise reduzierten Werkstattbetrieb in Kombination mit den wiederholt aufgetretenen Lieferverzögerungen bei Ersatzteilen. Zum Beispiel sah ein Verkehrsbetrieb Unterschiede in der Einsatzverfügbarkeit bei Bussen je Hersteller, nannte aber auch die Corona-Einschränkungen als Grund für die niedrigeren Zahlen. Die dargestellten Verfügbarkeiten wurden von den Verkehrsunternehmen einzeln erhoben, die Art der Erhebung kann bei den Verkehrsunternehmen durchaus verschieden sein.

Für 14 weitere Verkehrsunternehmen lagen Daten zum Thema Fahrzeugverfügbarkeit vor. Diese wurden aber nicht in Abbildung 34 mitaufgenommen, da entweder nur Daten zur tatsächlichen Verfügbarkeit (6 VUs) oder nur Daten zur erwarteten Verfügbarkeit (8 VUs) vorlagen.

Verfügbarkeit Ladeinfrastruktur

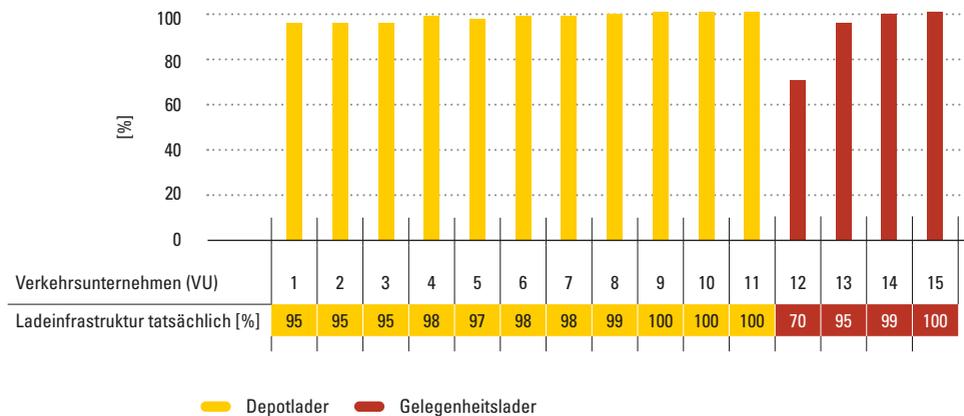
Gerade mit Blick auf den Einsatz der Batteriebusse kommt einer zuverlässig funktionierenden Energieversorgungsinfrastruktur eine zentrale Bedeutung zu. Während bei der etablierten Dieselantriebstechnologie die Versorgung und Betankung mit Dieselmotoren über entweder unter- oder oberirdisch aufgestellte Dieseltanks mit mehreren 10.000 l Dieselmotoren und einer Bevorratung für häufig mehrere Wochen Stand der Technik ist, stellt sich die Situation bei Batterie- und Brennstoffzellenbussen anders dar.

Im Fall der Batteriebusse kann der Stromversorgung in Deutschland generell eine sehr gute Verfügbarkeit attestiert werden¹⁵, trotzdem kann es beispielsweise bei Unwettern wie Stürmen und Überflutungen lokal auch zu länger andauernden Stromausfällen kommen. Hierfür sind Notfallkonzepte zu entwickeln. Neben der Frage der Stromversorgung im Notfall spielt für die betriebliche Praxis die Verfügbarkeit der benötigten Ladeleistung auf dem Betriebshof bzw. dessen Anbindung an das lokale Stromverteilnetz die zentrale Rolle. Es kann nicht ohne weiteres davon ausgegangen werden, dass die benötigte Ladeleistung kurzfristig verfügbar ist. Hier bedarf es stets einer möglichst frühzeitigen Einzelfallprüfung durch den Verteilnetzbetreiber, um zu klären, wieviel Leistung ohne zusätzliche Netzverstärkungsmaßnahmen, d. h. kurzfristig, bereitgestellt werden kann. Sind Netzertüchtigungsmaßnahmen erforderlich, benötigen diese einen nicht unerheblichen zeitlichen Vorlauf, der mindestens mit 6 Monaten, häufig aber auch mit einem Jahr oder mehr zu veranschlagen ist, speziell wenn es Anpassungen in der vorgelagerten Netzebene bedarf.

Im Gegensatz zu Diesel ist eine Bevorratung von elektrischer Energie für den Betrieb einer Batteriebusflotte, z. B. über Batteriespeicher nur sehr eingeschränkt möglich und mit hohen Kosten verbunden, gerade bei größeren Fahrzeugflotten. Eine andere Alternative ist die Vorhaltung von (Diesel-) Notstromaggregaten, um die benötigte Ladeleistung, vollumfänglich oder zumindest teilweise für den Fall eines Netzausfalls vorzuhalten. Diese Alternative stellt allerdings unter Klimaschutzgesichtspunkten eine absolute Notfalllösung dar und sollte nicht als Standard-Bevorratung gewählt bzw. genutzt werden.

Eine hohe, idealerweise bei nahe 100 % liegende Einsatzverfügbarkeit der Ladeinfrastruktur ist essentiell für den zuverlässigen Betrieb der Batteriebusse. Aktuell kann der Ladeinfrastruktur mit einer durchschnittlichen Verfügbarkeit von 96 % eine hohe Verfügbarkeit bescheinigt werden (siehe Abbildung 35).

ABBILDUNG 35 Erzielte Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur

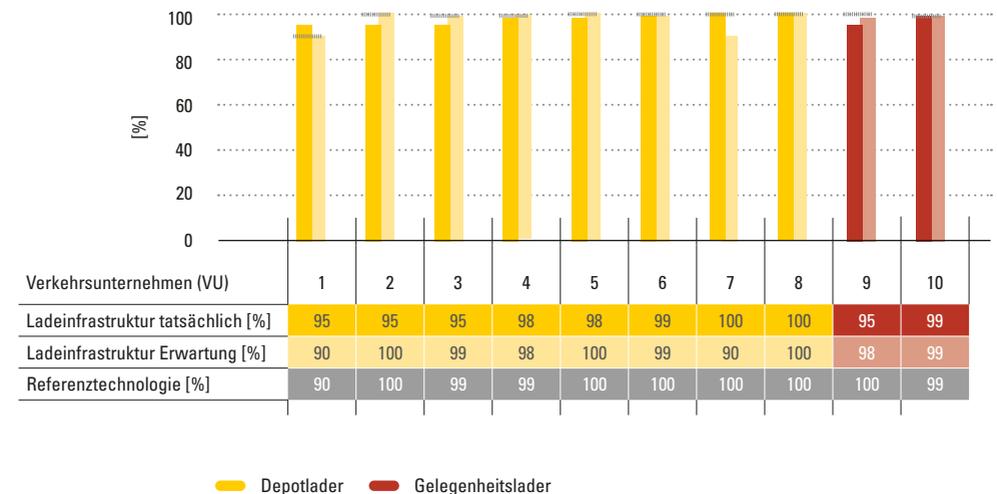


Für die Depotlader liegt die Verfügbarkeit im Bereich von 95 bis 100 %, bei einer mittleren Verfügbarkeit von 98 %. Für die vier Verkehrsunternehmen mit Gelegenheitsladern liegt sie bei 81 %, was primär an der niedrigen Verfügbarkeit eines VUs liegt. Hier wurde die Anbindung der Ladeinfrastruktur an ein Unterwerk der Straßenbahn realisiert, bei dem es zu einem in Summe sechs- bis siebenmonatigen Ausfall kam. Grund für das Problem, welches inzwischen behoben ist, war die Inkompatibilität der Ladestationen mit den im Unterwerk auftretenden Eingangsspannungs-

schwankungen. Die restlichen drei Verkehrsunternehmen geben die Verfügbarkeit analog zu den Depotladern in Bereichen 95 bis 100 % an. In Summe liegt nur bei einem Verkehrsunternehmen die Ladeinfrastrukturverfügbarkeit bei unter 90 %. In Bezug auf die Erwartungshaltung der Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur wird diese, Stand heute, mehrheitlich erfüllt (siehe Abbildung 36). Die erwartete Verfügbarkeit lag im Mittel bei 97 %, bei den Depotladern wurde sie mit 98 % erfüllt, bei den Gelegenheitsladern liegt sie, bezogen auf den Mittelwert mit 81 %, aus den zuvor genannten Gründen unter dem Erwartungswert, wobei 2021 eine deutlich verbesserte Verfügbarkeit festzuhalten ist. Insgesamt wird bei 60 % der betrachteten VU's die Verfügbarkeit erfüllt oder übertroffen (siehe Abbildung 36).

Für die bei allen Verkehrsunternehmen eingesetzte Referenzinfrastruktur, sprich die Betankung mit Dieseldieselkraftstoff, wird eine mittlere Einsatzverfügbarkeit von 98 % angegeben. Insofern geht die Hälfte von einer zunächst geringeren Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur aus. Insgesamt zeigt sich aber, dass eine ähnlich hohe Verfügbarkeit erwartet wird, was aus betrieblicher Sicht nachvollziehbar ist. Es wird erwartet, dass die Busse schlicht zu jeder Zeit fahrplangemäß ausrücken können. Eine Energieversorgungsinfrastruktur, die bei nahe 100 % liegt, ist dafür Grundvoraussetzung und wird von der betrachteten Ladeinfrastruktur auch bereits weitestgehend erfüllt.

ABBILDUNG 36 Erwartete und bisher erzielte Verfügbarkeiten der Ladeinfrastruktur mit Vergleich zur Referenztechnologie



Brennstoffzellenbusse

Im Falle der Brennstoffzellenbusse liegen detaillierte Daten zur Verfügbarkeit in Abbildung 37 von einem VU für bis zu 35 Solobusse für den Zeitraum Januar 2020 bis April 2021 vor, die anhand der Ausfallzeiten berechnet wurden. Mit einer mittleren Verfügbarkeit von aktuell 78 % für die Brennstoffzellenbusse liegt sie damit aktuell noch deutlich unter der Einsatzverfügbarkeit der Dieselsebusse als Referenz, die vom Verkehrsunternehmen mit 90 % angegeben wird. Die mittlere Verfügbarkeit schwankt zwischen den eingesetzten Bussen zwischen 53 % und 91 %. In einzelnen Monaten erreichte die Verfügbarkeit für einzelne Fahrzeuge auch bereits Werte von bis zu 97 %. Vor allem bei der Inbetriebnahme von neuen Bussen verringert sich zunächst die Verfügbarkeit der gesamten Flotte. Ausfallzeiten der BZ-Busse verlängern sich hier auch durch lange Lieferzeiten von fehlenden Ersatzteilen. Die Probleme bestehen laut Verkehrsunternehmen allerdings vorwiegend bei Ersatzteilen für den konventionellen Teil des Busses (siehe Abbildung 38).

¹⁶ Siehe <http://newbusfuel.eu/publications>

ABBILDUNG 37 Durchschnittliche Verfügbarkeit je Bus – Brennstoffzellenbusse*

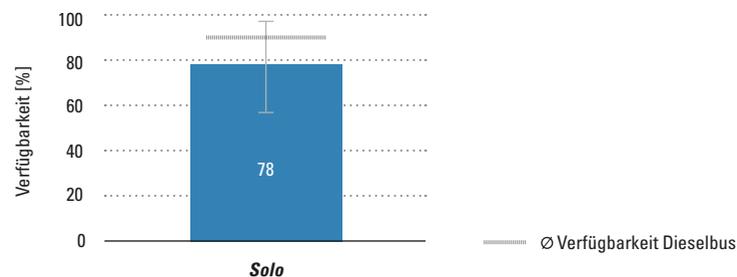
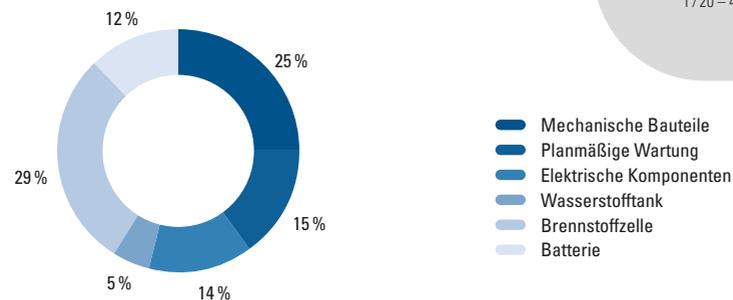


ABBILDUNG 38 Ausfallgründe – Brennstoffzellenbusse*



* Anzahl Brennstoffzellenbusse
5–35 (1 VU)
Zeitraum Brennstoffzellenbusse
1/20 – 4/21

Verfügbarkeit H₂-Tankinfrastruktur

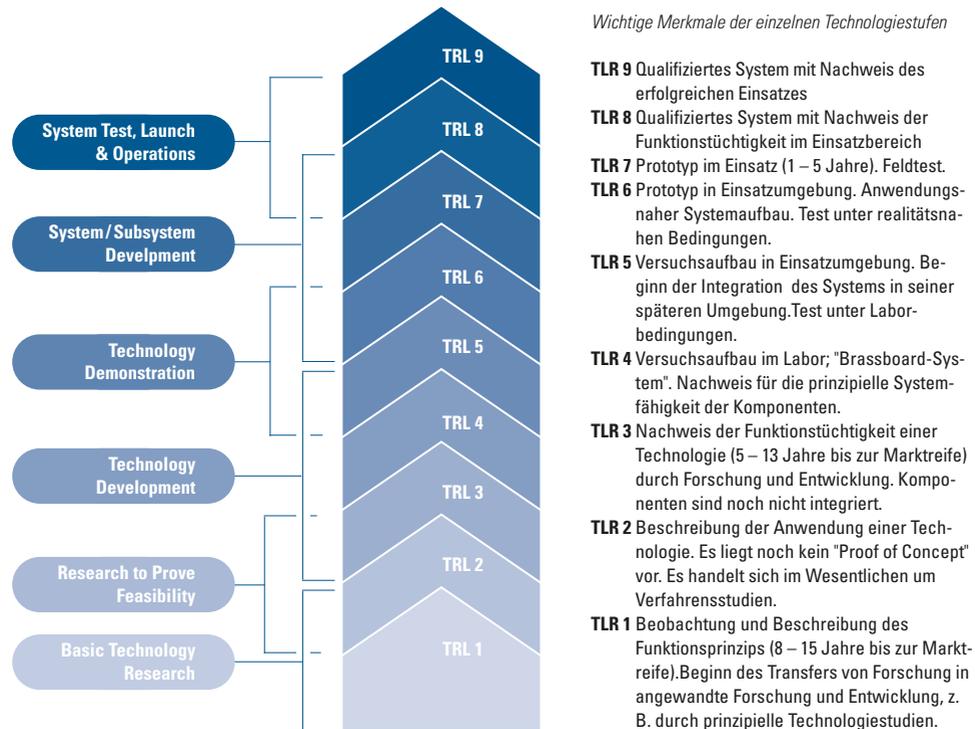
Während bei Batteriebussen die Leistung der Energieversorgung von wesentlicher Bedeutung ist, geht es bei Brennstoffzellenbussen um die Gewährleistung der Energieversorgung im Sinne der Bevorratung an Wasserstoff. Hier haben detaillierte Analysen, z. B. im Rahmen des europäischen, vom FCH JU ko-geförderten NewBus-Fuel Projekt¹⁶ gezeigt, dass aus heutiger Sicht eine Bevorratung in der Größenordnung von 2–3 Tagen einen sinnvollen Kompromiss zwischen Platzbedarf und Kosten des Speichers sowie der Versorgungssicherheit darstellt. Die daraus resultierende Kraftstoffbevorratung fällt im Fall des Wasserstoffes mengenmäßig also deutlich geringer aus, als dies bei der Referenztechnologie Diesel der Fall ist.

Bezüglich der H₂ Betankungsinfrastruktur gilt es, die zuverlässige Verfügbarkeit durch ein entsprechendes Redundanzkonzept bei den relevanten und im Vergleich zur Dieseltankungstechnologie deutlich kapitalintensiveren Komponenten wie Kompressor, Speicher und Zapfsäule zu gewährleisten.

Zur Einsatzverfügbarkeit liegen die Daten eines Verkehrsbetriebes und einer Tankstelle vor. Eine redundante Auslegung zahlreicher Komponenten ermöglicht es, kleinere Störungen und Defekte gut zu überbrücken. Es ergibt sich daher eine Einsatzverfügbarkeit von 93 %.

2.2.3. Einsatzreife / Technology Readiness Level

Ein weiterer Parameter der sich zur Messung der Einsatzreife der eingesetzten innovativen Antriebstechnologien eignet, ist der „Technology Readiness Level“, auch TRL abgekürzt. Ursprünglich von der NASA in den 1970er Jahren für Technologien zur Erforschung des Weltraums entwickelt, misst der TRL den Reifegrad einer Technologie während ihrer Forschungs-, Entwicklungs- und Einsatzphasen (siehe Abbildung 39). TRLs basieren auf einer Skala von 1 bis 9, wobei 9 die höchste Technologiereife darstellt und mit deren Abschluss die Serienreife eines Produktes oder Verfahrens erreicht ist. Die Vergabe von Technology Readiness Levels ist eine Methode zum Verständnis der technischen Reife einer Technologie während ihrer Entwicklungsphase, mit dem Ziel einen möglichst konsistenten Bezugspunkt für das Verständnis der Technologieentwicklung zu haben.

ABBILDUNG 39 Definition der Technologiereifegrade in Anlehnung an die TRL-Definition der NASA¹⁷

¹⁷ Ornetzeder M. et al.: Monitoring urbaner Technologien, auf Basis FZ Jülich. Berichte aus Energie- und Umweltforschung, 18/2016. Wien, 2016

Zur Bewertung der Einsatzreife der Technologie und der Erwartungshaltung der Verkehrsunternehmen an die Einsatzreife der eingesetzten E-Bustechnologien wurden die Verkehrsunternehmen vor Inbetriebnahme der Technologie befragt, welchen Reifegrad (TRL) sie zu Beginn des Betriebes der Fahrzeuge erwarten und welchen nach einem Jahr Betrieb. Zur Überprüfung, inwieweit diese Erwartungen erfüllt wurden, erfolgte im Juni 2021 eine erneute Befragung. Es lagen Rückmeldungen von insgesamt 21 Verkehrsunternehmen vor.

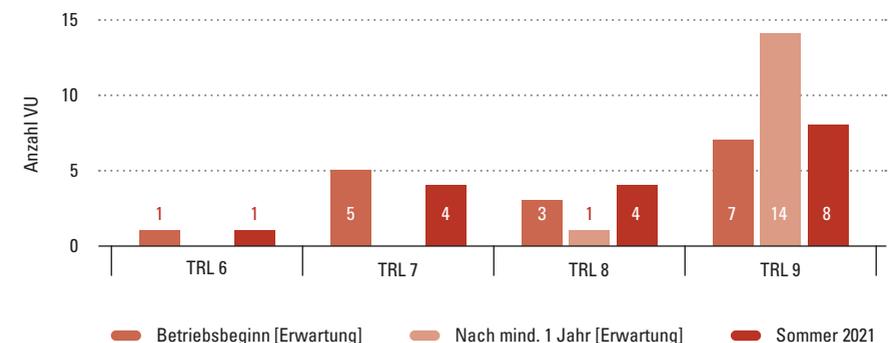
Batteriebusse

In Abbildung 40 wird ersichtlich, dass zu Betriebsbeginn bereits 44 % der Befragten die Erwartungshaltung hatten, ein voll ausgereiftes Serienprodukt (TRL 9) zu erhalten. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass über die Hälfte der Verkehrsunternehmen sich bewusst war, eine junge, noch nicht voll ausgereifte Technologie zu erhalten. 19 % hatten die Erwartungshaltung, nahe an der Serienreife befindliche Fahrzeuge (TRL 8) zu erhalten, während 31 % sich auf „gereifte“ Prototypen (TRL 7) vorbereiteten und 6 % der Verkehrsunternehmen den Reifegrad eines Prototypen (TRL 6) erwarteten.

Mit Blick auf den erwartenden Reifegrad nach 1 Jahr Betrieb der Batteriebusse zeigt sich, dass die überwiegende Mehrheit der Verkehrsunternehmen eine deutliche Steigerung der Einsatzreife erwartete. So formulierten 93 % der antwortenden Verkehrsunternehmen die Erwartungshaltung, dass die eingesetzten E-Bussysteme nach einem 1 Jahr zuverlässig, einem serienreifen Produkt entsprechend (TRL 9), einsetzbar sind.

Mit Stand Sommer 2021 zeigt sich, dass der aktuell erreichte Stand der Einsatzreife noch nicht vollumfänglich der formulierten Erwartungshaltung entspricht. Allerdings kann diese mit Blick auf die erst kurze Marktverfügbarkeit der verschiedenen eingesetzten Batteriebusmodelle, die im Bereich <1 bis maximal 5 Jahre liegt, als durchaus anspruchsvoll beschrieben werden. 47 % der rückmeldenden Verkehrsunternehmen beschreiben die aktuelle Einsatzreife der Technologie als „serienreif“ (TRL 9), während jeweils 24 % die Technologie als nahe an der Serienreife (TRL 8) bzw. als „gereifte“ Prototypen (TRL 7) beschreiben. 6 % sehen noch deutliche Verbesserungspotenziale bezüglich der Einsatzreife und bewerten diese mit Prototypenstatus (TRL 6).

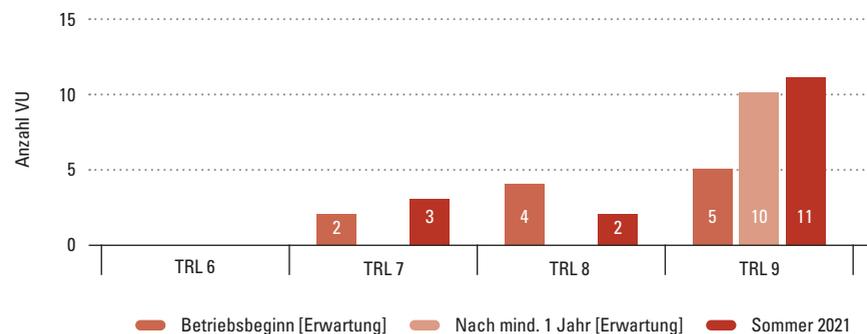
ABBILDUNG 40 Einsatzreife zu Beginn des Betriebes und nach einem Jahr Betrieb – Batteriebusse



Ladeinfrastruktur

Der technologische Reifegrad der Ladeinfrastruktur für Elektrobusse wird generell als hoch eingeschätzt, nicht zuletzt auch vor dem Hintergrund, dass die Ladeinfrastruktur wenig völlig neue Komponenten oder Konzepte beinhaltet. So formulierten 45 % der Verkehrsunternehmen die Erwartungshaltung, dass die Ladeinfrastruktur von Beginn an „serienreif“ (TRL 9) sein sollte, weitere 36 % gaben einen nahe an der Serienreife (TRL 8) liegenden Reifegrad an (siehe Abbildung 41). Nach einem Jahr gingen alle antwortenden VUs von einer ausgereiften Technologie aus. Knapp 70 % der Verkehrsunternehmen bestätigen zudem, dass dies aktuell (Stand Juni 2021) auch der Fall ist. 12,5 % bescheinigen der Ladeinfrastruktur einen fast Serienreife entsprechenden Reifegrad (TRL 8). Immerhin 19 % der Verkehrsunternehmen sehen aber noch weiteres Verbesserungspotenzial (TRL 7). Insgesamt schätzt nur ein Verkehrsunternehmen den TRL aktuell niedriger ein als zu Beginn gefordert.

ABBILDUNG 41 Technologischer Reifegrad der Ladeinfrastruktur



Brennstoffzellenbusse

Die Verkehrsunternehmen mit Brennstoffzellenbussen forderten mindestens einen TRL 7 zu Beginn des Einsatzes und nach einem Jahr einen TRL 8. Aktuell werden die Brennstoffzellenbusse im Bereich von TRL 7 bis 8 eingeordnet. Das heißt, die Brennstoffzellenbusse erfüllen die an den technologischen Reifegrad der Fahrzeuge gestellten Anforderungen aktuell noch nicht in Gänze. Generell ist hier zu beachten,

dass nur 2 Verkehrsunternehmen aktuell Brennstoffzellenbusse im Einsatz haben und insgesamt aufgrund der derzeit noch geringen Marktdurchdringung von einer etwas geringeren Technologiereife auszugehen ist. Als ein Indiz für diese Einschätzung kann die formulierte Erwartungshaltung eines VUs herangezogen werden. Durch das einzige VU, das plant, beide Antriebstechnologien einzusetzen, wurde der zu Betriebsbeginn erwartete Reifegrad für die BZ-Busse mit TRL 7 und für die BEV-Busse mit TRL 9 eingestuft, wobei es sich hier erst einmal um eine Einzelbetrachtung handelt.

Für ein VU war der Abgleich der erwarteten Technologiereife mit den tatsächlichen Erfahrungen nach mehr als einem Jahr Betrieb möglich. Die zu Beginn und nach einem Jahr Betrieb erwartete Technologiereife von TRL 8 sieht der VU so weit als erfüllt an und beschreibt den aktuellen Reifegrad der Technologie ebenfalls als „serienreif“ (TRL 8).

H₂-Tankinfrastruktur

Auch für die H₂-Tankinfrastruktur forderten die Verkehrsunternehmen in einer ersten Befragung mindestens einen TRL 8 zu Beginn des Betriebs und nach einem Jahr TRL 9. Die Tankstellen erreichen derzeit einen TRL von 4–8. Ein Verkehrsunternehmen nutzt mehrere Tankstellenkonzepte mit Forschungscharakter, weshalb die TRL-Erwartung hier niedriger liegt: Zu Beginn bei TRL 3 (Nachweis der Funktionsfähigkeit der Technologie) und derzeit bei TRL 5 (Versuchsaufbau in vereinfachter Einsatzumgebung) für eine Tankstelle und TRL 4 (Versuchsaufbau im Labor) für eine weitere Tankstelle.

Die Planungsdauer für die Errichtung der H₂-Tankinfrastruktur ist mit 24 Monaten im Vergleich zur Ladeinfrastruktur höher anzusetzen. Auch die Errichtung kann bis zu einem Jahr beanspruchen. Für die Verkehrsunternehmen mit Brennstoffzellenbussen ist ein angepasstes Zeitfenster für den Betankungsvorgang vertretbar: Dies kann entweder eine Verlängerung des Betankungsfensters sein oder eine gleichmäßigere Verteilung der Tankvorgänge über den Tag. Die Verlängerung des Betankungszeitfensters ergibt aufgrund etwas längerer Betankungszeiten von 10–15 Minuten je Bus gegenüber Dieseln, abhängig von der zu tankenden H₂ Menge im Falle einer konzertierten Betankung abends bzw. nachts durch dezidiertes Busversorgungspersonal. Die Verteilung der Tankvorgänge führt dazu, dass der Druckspeicher insgesamt kleiner dimensioniert werden kann, da er nicht auf den (abendlichen) Spitzenbedarf ausgelegt werden muss, der sich aus der Anzahl direkt hintereinander zu befüllender Busse, der sogenannte „Back-to-Back“ Kapazität, ergibt.

2.2.4. Zusammenfassung der Ergebnisse zu Praxistauglichkeit und Einsatzreife:

Batteriebusse

- Der Begleitforschung liegen für den Zeitraum Februar 2019 bis April 2021 Betriebsdaten für bis zu 131 Batteriebusse vor. Davon sind 117 Depotlader (112 Solobusse, 5 Gelenkbusse) und 14 Gelegenheitslader (4 Midibusse, 9 Solobusse, 1 Gelenkbus).
- Die durchschnittliche monatliche Laufleistung liegt bei den Depotladern mit 21 Betriebstagen / Monat bei über 2.900 km und bei den Gelegenheitsladern mit 17 Betriebstagen / Monat bei 2.350 km / Monat. Wobei hier zwischen den Gefäßgrößen zu differenzieren ist. Die Solobusse mit Gelegenheitsladung kommen trotz lediglich 16 Betriebstagen / Monat auf eine Laufleistung von knapp 3.300 km / Monat, die Gelenkbusse mit Gelegenheitsladung erreichen aktuell ca. 2.200 km / Monat und die Midibusse 1.400 km / Monat, bei den Midibussen bedingt durch den Einsatz in der Altstadt mit niedrigen Reisegeschwindigkeiten. Die Solo- und Gelenkbusse mit Gelegenheitsladung weisen damit im Vergleich zu ihren Pendants mit Depotladung bei derzeit noch weniger Betriebstagen / Monat höhere mittlere monatliche Laufleistungen auf.
- Die eingesetzten Batteriebusse weisen im Betrachtungszeitraum eine mittlere Verfügbarkeit von ca. 87 % auf (Depotlader 87 %, Gelegenheitslader 88 %). Dies ist eine deutliche Steigerung im Vergleich zum letzten Statusbericht der AG Bus (2016), in welchem die Depotlader eine Verfügbarkeit von 72 % und die Gelegenheitslader eine Verfügbarkeit von 76 % aufwiesen.
- Aktuell kann der Ladeinfrastruktur mit durchschnittlich 96 % eine hohe Verfügbarkeit bescheinigt werden. Für die Depotlader liegt die Verfügbarkeit im Bereich von 95 bis 100 %, bei einer mittleren Verfügbarkeit von 98 %. Für die vier Verkehrsunternehmen mit Gelegenheitsladern liegt sie bei 81 %. Dies liegt primär an der niedrigen Verfügbarkeit während des ersten halben Jahres im Einsatz der LIS eines VU's. Die restlichen drei Verkehrsbetriebe geben die Verfügbarkeit mit 95–100 % an.
- Der technische Reifegrad („Technology Readiness Level“ -TRL) der Busse wird von 47 % der befragten VU's als serienreif (TRL 9) betrachtet. Je 24 % stufen den TRL als „nahe an der Serienreife“ (TRL 8) und als „gereifte Prototypen“ (TRL 7) ein. Etwa 6 % stufen die Busse auf Grund von Verbesserungspotenzialen als „Prototyp“ (TRL 6) ein.

- Die Ladeinfrastruktur wird von 68,5 % der befragten VU's als serienreif (TRL 9) und von 12,5 % als nahe an der Serienreife (TRL 8) eingestuft. Die übrigen 19 % sehen noch weiteres Verbesserungspotenzial und stufen den technischen Reifegrad daher als TRL 7 ein.

Brennstoffzellenbusse

- Die aktuelle Begleitforschung analysiert gegenüber früheren Begleitforschungsaktivitäten als weiteres Bussystem auch Brennstoffzellenbusse. Insgesamt sind die untersuchten Brennstoffzellenbusse im Betrachtungszeitraum 801.314 km gefahren.
- Die Brennstoffzellenbusse wurden abhängig von der Einsatzplanung durchschnittlich an 14 Tagen/Monat mit einer mittleren Laufleistung von mehr als 1.900 km / Monat eingesetzt.
- Die Verfügbarkeit der Brennstoffzellenbusse liegt im Mittel derzeit bei rund 78 % und liegt damit 12 Prozentpunkte unter dem betrachteten Referenzsystem. Als Grund für den Ausfall der Brennstoffzellenbusse sind hauptsächlich die Brennstoffzelle und mechanische Komponenten anzugeben.
- Dabei weisen die Brennstoffzellenbusse nach Einschätzungen der Verkehrsunternehmen einen TRL von mindestens 7 im Sommer 2021 auf.
- Die Einsatzreife der Wasserstofftankstellen weist aktuell noch eine größere Bandbreite und liegt zwischen 4–8. Der TRL ist dabei abhängig vom realisierten Konzept, teilweise wurden bewusst Anlagenkonzepte mit einem niedrigeren Reifegrad umgesetzt, gerade mit dem Ziel den TRL über die betrieblichen Erfahrungen zu steigern. Gleichzeitig sind aber auch Tankstellen im Betrieb die vom jeweils nutzenden VU aktuell bereits mit einem TRL von 8 bewertet werden.
- In Summe zeigen die Verfügbarkeiten und der Einsatz der Brennstoffzellenbusse noch Optimierungsbedarf auf.

2.3. Energieeffizienz und Energieverbrauch

Die Analyse des Energieverbrauchs der geförderten Batterie- und Brennstoffzellenbusse stellt einen wesentlichen Untersuchungsgegenstand der Begleitforschung dar. Dabei geht es um die Analyse der fahrzeugeitig ermittelten Energieverbräuche und um die Analyse des Einflusses der Parameter Außentemperatur und mittlere Reisegeschwindigkeit auf dieselben. Zudem wurde auch der Energieverbrauch der Ladeinfrastruktur inkl. Zusatzverbräuche für das Batteriebalancing und die Fahrzeugvorkonditionierung untersucht.

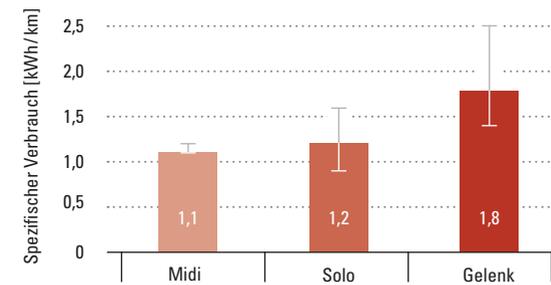
2.3.1. Energieverbrauch Fahrzeug

Batteriebusse

Abbildung 42 stellt den durchschnittlichen Energieverbrauch der Batteriebusse über den gesamten Betrachtungszeitraum dar. Wie zu erkennen ist, weisen die Midi-busse einen mittleren fahrzeugeitigen Verbrauch von 1,1 kWh/km auf. Bei allen Midibusen handelt es sich um Busse mit einem vollelektrischen Heizungskonzept. Die angegebenen Bandbreiten beziehen sich auf den minimalen bzw. maximalen mittleren Energiebedarf der einzelnen erfassten Busse. Innerhalb des Jahresverlaufs kommt es gerade bei Bussen mit rein elektrischen Heizungskonzept Außentemperatur bedingt zu relevanten Schwankungen beim Energiebedarf. Detaillierte Analysen zur Auswirkung der klimatischen Bedingungen finden sich im nachfolgenden Kapitel 2.3.2. Weitere Erklärungsansätze für den im Vergleich zu den Solobussen recht hohen durchschnittlichen Energieverbrauch der Midibusse ergeben sich aus den niedrigen Durchschnittsgeschwindigkeiten der bedienten Altstadtlinie und dem Reifegrad der eingesetzten Fahrzeuge. Er entspricht dem Entwicklungsstand von 2017, wird dementsprechend seitens des Verkehrsunternehmens mit TRL 7 bewertet und liegt damit im Vergleich zu den betrachteten Solobussen niedriger.

Die Solobusse liegen bei einem mittleren Verbrauch von 1,2 kWh/km und die Gelenkbusse entsprechend ihres Mehrgewichts bei durchschnittlich 1,8 kWh/km. Die Bandbreiten ergeben sich hier analog aus den mittleren Verbräuchen einzelner Busse innerhalb der einzelnen Fahrzeuggrößenkategorien über den Datenerfassungszeitraum.

ABBILDUNG 42 Durchschnittlicher Verbrauch der Batteriebusse*

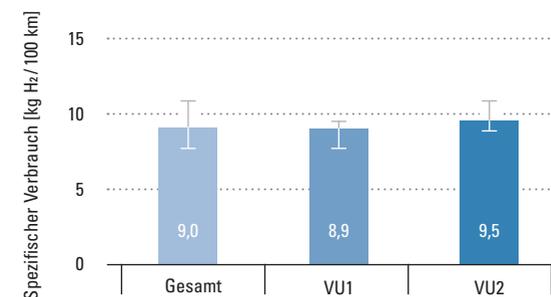


* Anzahl Busse
 BEV (Ø 69 | 9 – 101 / Mon.)
 Midi (Ø 4 | 2 – 4 / Mon.)
 Solo (Ø 64 | 9 – 92 / Mon.)
 Gelenk (Ø 4 | 3 – 6 / Mon.)

Brennstoffzellenbusse

Der Wasserstoffverbrauch der Brennstoffzellenbusse liegt im Mittel bei 9 kg H₂ / 100 km (vgl. Abbildung 43). Mit Blick auf die Verbrauchswerte je VU (8,9 bzw. 9,5 kg H₂ / 100 km) korrespondieren diese im Verhältnis zu den seitens der VUs ermittelten Dieserverbräuche, die bei 38,5 bzw. 43,2 l / 100 km liegen.

ABBILDUNG 43 Durchschnittlicher Wasserstoffverbrauch der Brennstoffzellenbusse**



** Anzahl Busse
 BZ (45)
 ** Zeitraum
 (1 / 20 – 4 / 21)

2.3.2. Einfluss klimatischer Bedingungen auf den Energieverbrauch

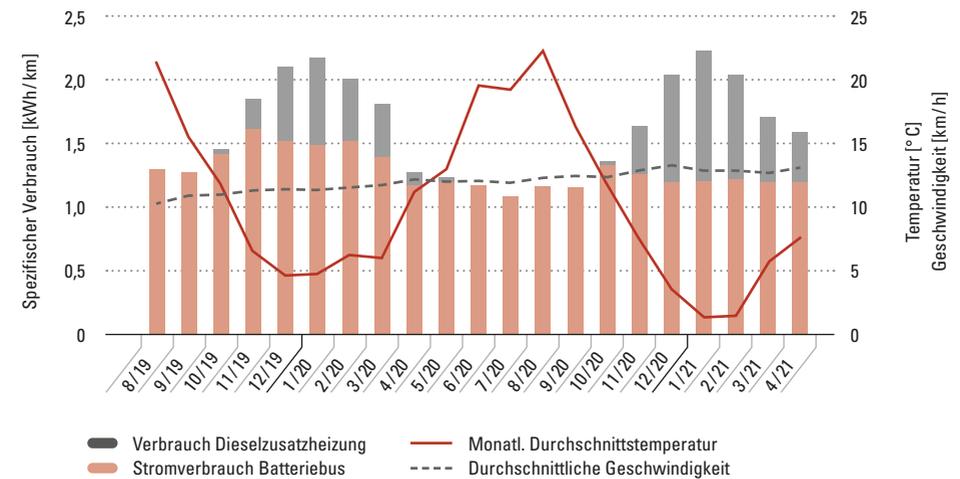
Batteriebusse

Für die Batteriebusse stellt gerade die Heizung des Fahrgastraums in den kalten Jahresmonaten eine Herausforderung im Sinne eines relevanten Mehrenergiebedarfs dar. Grundsätzlich gibt es hier zwei Optionen. Entweder wird die zur Beheizung des Fahrerarbeitsplatzes und des Fahrgastraums benötigte Heizenergie rein elektrisch bereitgestellt (z. B. über eine Wärmepumpe in Kombination mit einer elektrischen Widerstandsheizung) oder mittels einer brennerbasierten Zusatzheizung (z. B. unter Einsatz von (Bio-) Diesel oder (Bio-)Ethanol). Die brennerbasierte Zusatzheizung ist bei rund 40 % der Busse mit einer elektrisch betriebenen Wärmepumpe kombiniert. Die rein elektrische Heizung hat den Vorteil, dass der so ausgerüstete Bus lokal einen gänzlich emissionsfreien Betrieb ermöglicht, während ein mit brennerbasierter Zusatzheizung ausgestatteter E-Bus im Heizbetrieb entsprechend Klima- und Schadstoffemissionen (CO₂ fossilen oder biogenen Ursprungs je nach eingesetztem Energieträger), Stickoxid (NO_x), Partikel etc. aufweist. Gleichzeitig bedeutet dies für den rein elektrisch beheizten E-Bus an kalten Tagen eine deutliche Reichweitenminderung erfährt, während der mit Zusatzheizung ausgestattete Bus keine bzw. im Falle des kombinierten Einsatzes mit einer Wärmepumpe nur eine geringfügige Reichweitenreduktion erfährt.

Brennstoffbetriebene Zusatzheizung

Beispielhaft erfolgt in Abbildung 44 zunächst die Betrachtung des Energieverbrauchs der 12-m-Batteriebusse eines Verkehrsunternehmens unterteilt in elektrischen Energiebedarf und den Energiebedarf der Zusatzheizung in Form von Dieseldieselkraftstoff. Hierbei ist die Hälfte der betrachteten Busse neben der Zusatzheizung mit einer Wärmepumpe ausgestattet, welche je nach Hersteller bis zu einer Außentemperatur von 5 °C bis 8 °C die Beheizung des Fahrgastraums übernimmt. Die andere Hälfte ist neben der Dieseldieselzusatzheizung mit einer elektrischen Widerstandsheizung ausgestattet.

ABBILDUNG 44 Batteriebusse mit Dieseldieselzusatzheizung – Energieverbrauch für Fahrtrieb und Heizung



* Anzahl Busse
BEV (15–30 | 1 VU)

Während die durchschnittliche Außentemperatur im Winter 2019/20 auf bis zu unter 5 °C sank, stiegen der spezifische elektrische Energiebedarf für den Betrieb des Busses (ca. 1,5 kWh/km) und der Dieseldieselverbrauch (ca. 0,7 kWh mit einer Umrechnung von 10 kWh je Liter Diesel) für die Heizung an. Ein ähnliches Bild zeichnete sich im Winter 2020/21 ab, in welchem die durchschnittliche Außentemperatur zeitweise bei 1 °C lag. Hier stieg der Dieseldieselverbrauch bedingt durch die niedrigeren Außentemperaturen im Vergleich zum Vorjahr auf bis zu 1 kWh/km an. Ein Erklärungsansatz für den um ca. 0,2 bis 0,3 kWh/km niedrigeren Energiebedarf der Busse im Winter 2020/21 bei niedrigeren Außentemperaturen im Vergleich zum Winter 2019/20 findet sich in der etwas höheren durchschnittlichen Geschwindigkeit der Busse. Im Mittel lag der benötigte Energieverbrauch der Dieseldieselzusatzheizung über den gesamten Betrachtungszeitraum bei knapp 20 % bezogen auf den Gesamtenergieverbrauch. Dies stellt eine spürbare Reduktion gegenüber dem 37 %-Anteil an Heizenergie dar, der im Rahmen der vorherigen Begleitforschung aus den Jahren 2013 bis 2016 für ein anderes Verkehrsunternehmen ermittelt wurde. Der Wert aus der vorherigen Begleitforschung ergab sich für Fahrzeuge, bei denen die gesamte Heizenergie über die Dieseldieselzusatzheizung bereitgestellt wurde und damit entsprechend höher lag. Fortschritte in Bezug auf das Energiemanagement, gerade für die Heizung und

Klimatisierung der elektrischen Busse sind also erkennbar. Der Einsatz energieeffizienter Wärmepumpen leistet hier beispielsweise einen Beitrag. Im Jahresmittel liegt der Energiebedarf der betrachteten Batteriebusse mit Zusatzheizung bei 1,3 kWh/km elektrischer Energie und 0,34 kWh bzw. 0,04 l Diesel/km¹⁸.

18 3,5 l Diesel/100 km

Für die drei Gelenkbusse mit Zusatzheizung kann aktuell noch keine Detailanalyse des Verbrauchs erstellt werden, da die Busse erst im Dezember 2020 bzw. Januar 2021 in Betrieb gingen und zudem zwei der drei Busse kurz nach Inbetriebnahme einen Monat ausgefallen sind. Dennoch konnte man anhand der wenigen Monate erkennen, dass, wie bereits bei den Solobussen, nur ein geringer Mehrverbrauch an Elektroenergie für den Antrieb im Winter anfällt.

Rein elektrische Heizung

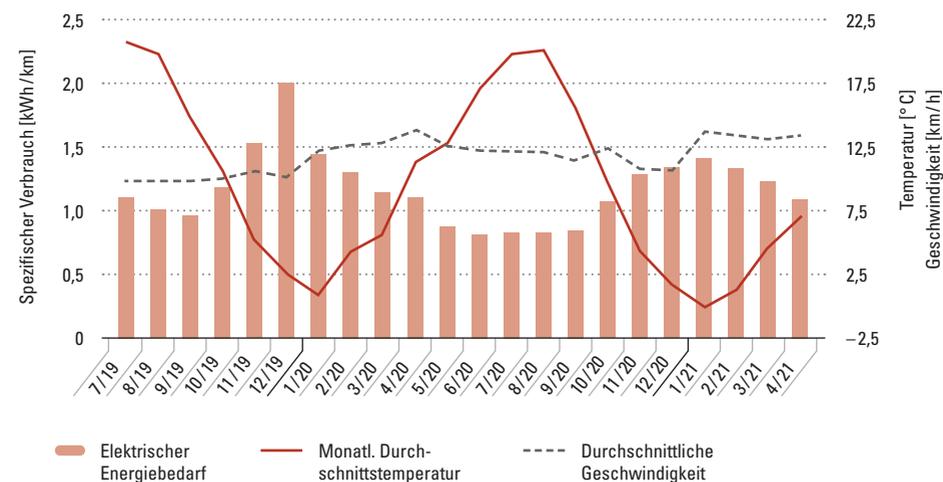
Abbildung 45 und Abbildung 46 verdeutlichen den Einfluss der Temperatur auf den Energiebedarf, gerade bei Batteriebussen mit rein elektrischer Heizung. Bei niedrigen Temperaturen und dem damit entstehenden Heizungsbedarf steigt der Energiebedarf je nach Gefäßgröße bis zu ca. 66 % im Vergleich zum Jahresdurchschnitt an (Verbrauch der Midibusse im Dezember 2019 ausgenommen).

Wie bei den Midibussen (vgl. Abbildung 45) gut zu erkennen ist, steigt der Energieverbrauch in der kalten Jahreszeit deutlich stärker an als bei den zuvor betrachteten Bussen mit Zusatzheizung. Durch die erhöhte durchschnittliche Geschwindigkeit von knapp 10 km/h im Juli 2019 auf bis zu 13,6 km/h im Januar 2021 lässt sich der etwas gedämpfte Energieverbrauch im Winter 2020/21 trotz ähnlicher Temperaturen wie im Winter zuvor erklären. Die teilweise sehr hohen Energieverbräuche im Winter 2019/20, sind nach Angaben des Verkehrsunternehmens auf anfängliche technische Probleme mit der Heizung der Busse zurückzuführen. Dies spiegelt sich auch in den Angaben zum TRL der Busse (TRL 7) wider. Der mittlere Energiebedarf über das Jahr liegt bei 1,1 kWh/km.



Quelle: Stadtverkehr Lübeck 2021

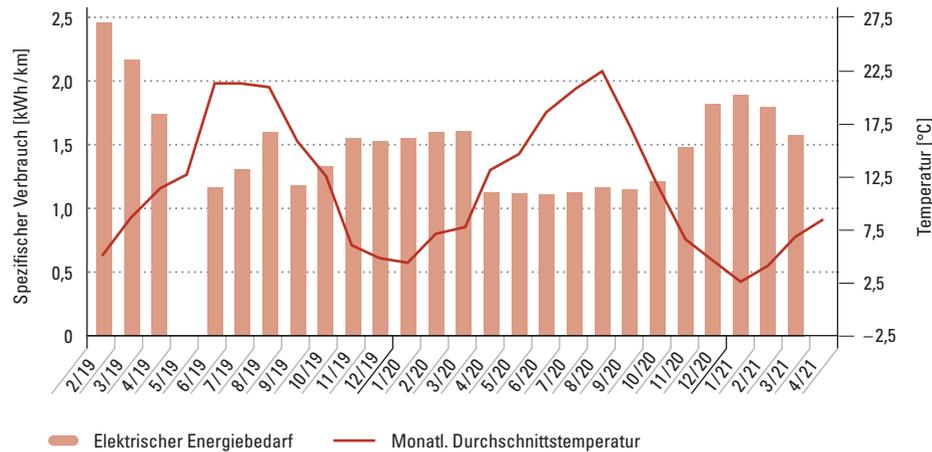
ABBILDUNG 45 Energiebedarf der Midi-Batteriebusse mit rein elektrischer Heizung*



*Anzahl Busse
BEV (4 | 1 VU)

Die Energieverbräuche der rein elektrisch beheizten Solobusse werden anhand eines Verkehrsbetriebs mit bis zu 6 Bussen im Einsatz betrachtet. Aufgrund einer betrieblichen Umstellung liegen für den Mai 2019 keine Betriebsdaten vor. Dennoch waren die Busse dieses VU's am längsten und regelmäßigsten im Betrieb, wodurch es sich am geeignetsten für diese Auswertung erweist. Wie bereits bei den zuvor betrachteten Midibussen ist an kalten Tagen ein deutlicher Anstieg des Energieverbrauchs – hier von 20 % bis 66 % – gegenüber dem Jahresdurchschnitt von 1,5 kWh/km zu verzeichnen. Eine Analyse hinsichtlich der durchschnittlich gefahrenen Geschwindigkeit der Busse ist auf Grund fehlender Daten nicht möglich.

ABBILDUNG 46 Energiebedarf der Solo-Batteriebusse mit rein elektrischer Heizung*

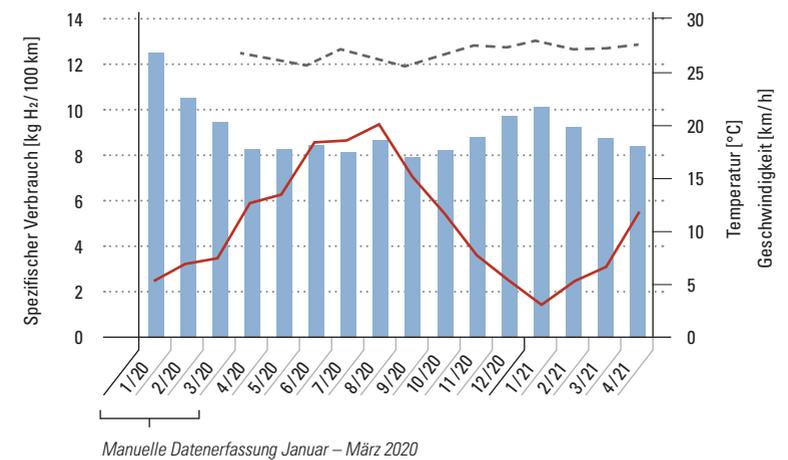


* Anzahl Busse
Solo (3–6 | 1 VU)

Aufgrund der aktuell noch sehr geringen Datenlage (Daten von 1–3 Bussen bei 2 VU über 3 bzw. 5 Monate) und auch teilweise fehlenden Informationen bei den Gelenk-Batteriebussen (Energiebedarfe jeweils ohne Heizenergiebedarf) konnte bis dato noch keine sinnvolle Betrachtung für diese Fahrzeugklasse durchgeführt werden.

Brennstoffzellenbusse

Abbildung 47 zeigt im zeitlichen Verlauf den mittleren Verbrauch der Brennstoffzellenbusse in Korrelation mit den mittleren Tagestemperaturen sowie der erzielten Durchschnittsgeschwindigkeit. Der Verbrauch der Brennstoffzellenbusse ist insbesondere zu Beginn am höchsten. Dies kann einerseits mit kälteren Temperaturen, mit einer Lernkurve des Fahrpersonals bei der Einführung der Busse in den Regelbetrieb und andererseits mit der Art der Datenerfassung zu Beginn des Betriebes begründet werden. In den ersten drei Monaten wurden die Daten aus Betriebsplanungs- und Tankstellendaten kombiniert. Danach lagen die Daten aus busseitig installierten Datenloggern vor, denen eine höhere Aussagekraft beigemessen wird. Weiterhin zeigt sich, dass auch bei BZ-Bussen der Energieverbrauch bei sinkenden Temperaturen steigt.

ABBILDUNG 47 Entwicklung des H₂-Verbrauchs der Brennstoffzellenbusse im zeitlichen Verlauf*

* Anzahl Busse
45 BZ (Ø 26 |
5 – 45 / Mon.)

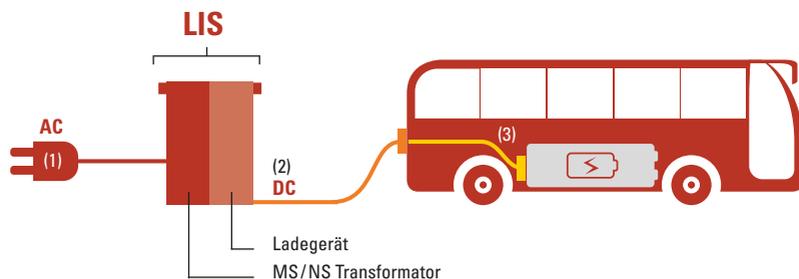
Manuelle Datenerfassung Januar – März 2020

2.3.3. Energieverbrauch Ladeinfrastruktur

Sämtliche zuvor gezeigten Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf den fahrzeugseitigen Energieverbrauch. Aus wirtschaftlicher Sicht sind für Verkehrsunternehmen die zu bezahlenden Energiekosten relevanter und diese werden infrastrukturseitig am Hausanschluss gemessen, d. h. inklusive von Verlusten der Ladeinfrastruktur und zusätzlicher Energieverbräuche. Letztere ergeben sich u. a. aus dem Batteriebalancing und der Fahrzeugvorkonditionierung, im Wesentlichen aus dem Vorheizen des Fahrzeuges und zum Teil auch der HV-Batterie in der kälteren Jahreszeit. Im Folgenden wird daher genauer auf den LIS-seitigen Energieverbrauch von Depotladern eingegangen. Zunächst wird anhand eines einfachen Ladeschemas der Ladevorgang mit sämtlichen Verlusten erläutert. Im nächsten Schritt wird genauer auf die einzelnen Verluste eingegangen. Die Daten für diese Analyse stammen dabei von bis zu 3 unterschiedlichen Herstellern von Ladegeräten im Zusammenspiel mit 2 verschiedenen Fahrzeug-OEMs.

In Abbildung 48 ist ein Ladeschema mit den wichtigsten Messpunkten (1) bis (3) dargestellt, anhand dessen die Ladung mit den anfallenden Ladeverlusten und Energieverbräuchen beschrieben wird. Zunächst ist die Ladeinfrastruktur an das Stromnetz (1) angeschlossen. Üblicherweise muss der Anschluss aufgrund der benötigten Leistung an das Mittelspannungsnetz erfolgen. Da für die Ladung eines Batteriebusses Gleichstrom (DC) (2) benötigt wird, muss der vom Netzanschluss stammende Wechselstrom (AC) zunächst auf das erforderliche Spannungsniveau (Niederspannung) und in Gleichstrom umgewandelt werden. Dies geschieht über zur Ladeinfrastruktur gehörende Transformatoren und Gleichrichter, die in den Ladegeräten verbaut sind. Bei diesem Umwandlungsvorgang fallen Verluste an. Nach der Umwandlung in Gleichstrom wird der Strom in den Bus bzw. dessen HV-Batterie (3) weitergeleitet. Hierbei fallen sog. Einspeicherverluste bei der Ladung der HV-Batterie an. Nicht vernachlässigt werden sollten weiterhin Leitungsverluste, insb. dann, wenn zwischen den Transformatoren und den Ladegeräten große Abstände überwunden werden müssen.

ABBILDUNG 48 Ladungsschema Batteriebus



Neben diesen Verlusten fällt im Zusammenhang mit der Batterieladung ein weiterer Mehrverbrauch an, und zwar in Zusammenhang mit dem Batteriebalancing. Um die Batterie zu schonen, werden die Zellblöcke in der Batterie auf einen einheitlichen Ladezustand gebracht. Dieser „Balancing“ genannte Vorgang ist mit einem zusätzlichen Energiebedarf verbunden.

Einen weiteren Mehrverbrauch stellt die Vorkonditionierung des Busses dar, welche vor allem in den Wintermonaten zum Tragen kommt. Aus Komfortgründen für Fahrer und Fahrgäste wird das Fahrzeug mit entsprechendem zeitlichem Vorlauf vor Betriebsbeginn vorgeheizt. Außerdem würde gerade bei den rein elektrisch beheizten Batteriebussen eine fehlende Vorkonditionierung der Fahrzeuge die bereits beschriebenen Reichweitennachteile noch weiter erhöhen. Durch die Vorkonditionierung, die über die Ladeinfrastruktur gespeist wird, kann sichergestellt werden, dass ein Fahrzeug den Betrieb vorgewärmt und mit vollgeladener HV-Batterie beginnen kann.

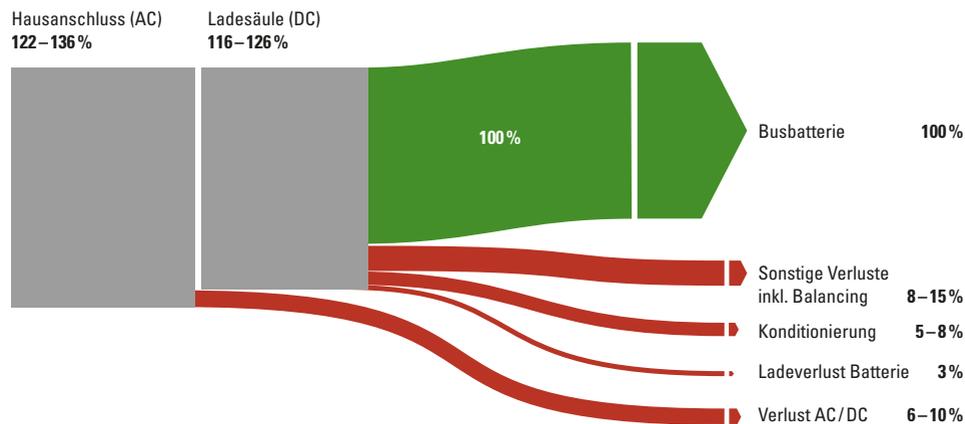
Abbildung 49 veranschaulicht, wie sich die unterschiedlichen Verluste und Mehrverbräuche aufteilen. Dabei wird die in die HV-Batterie eingespeicherte Energie (Punkt (4) in Abbildung 48) als Bezugspunkt (=100 %) gewählt. Die Verluste bei der Umwandlung liegen je nach Ladesäulenhersteller zwischen ca. 6 % und 10 %. Für die Auswertung dieser AC/DC-Verluste liegen Daten von zwei unterschiedlichen Herstellern zugrunde. Für die Ladesäulen des dritten Herstellers lagen keine gesondert gemessenen AC-Zählerstände des Verkehrsunternehmens vor.

Der Ladeverlust bei der Einspeisung in die HV-Batterie wird nicht separat gemessen und wurde anhand der vorliegenden Daten rechnerisch ermittelt, er liegt bei ca. 3 %.

Der ermittelte Energiemehrbedarf für die Vorkonditionierung liegt im Bereich von 5–8 % und ist entsprechend abhängig von der jeweiligen Außentemperatur und der Vorgabe der zu erreichenden Innentemperatur des Fahrzeuges. Dadurch, dass die benötigte Energiemenge zur Vorkonditionierung über die Ladeinfrastruktur aus dem Netz bereitgestellt wird, braucht sie nicht der Batterie entnommen werden und dient damit entsprechend der Reichweitensteigerung.

Daraus ergibt sich über eine Differenzbetrachtung ein weiterer Energiebedarf der Ladeinfrastruktur bzw. der Fahrzeugladung der unter anderem den Energiebedarf für das oben beschriebene Balancing zur gleichmäßigen Ladung der HV-Batterie mitbeinhalten. Eine genauere Unterteilung dieses Mehrbedarfs von ca. 8 % bis 15 % Mehrverbrauch war auf Basis der vorhandenen Daten nicht möglich. Die unterschiedlichen Mehrverbräuche sind dabei sowohl an den unterschiedlichen Ladesäulenherstellern als auch an den unterschiedlichen OEMs auszumachen.

ABBILDUNG 49 Sankey-Diagramm Ladeverluste und Mehrverbräuche Batteriebus



Mit Blick auf die Fahrzeuge ist zu erkennen, dass sich zwischen den Fahrzeugtypen Bandbreiten ergeben: Während ein Bus-OEM an den Ladesystemen zweier unterschiedlicher LIS Hersteller einen Ladeenergiemehrbedarf im Bereich $\pm 1\%$ aufweist, lässt sich aus den Daten für den zweiten in Kombination mit drei unterschiedlichen LIS Herstellern deutlich größere Schwankungsbreiten im Bereich $\pm 8\%$ Punkte und ein insgesamt höherer Energiebedarf beobachten. Dies veranschaulicht, dass hier im Bereich der Ladesteuerung im Zusammenspiel aus Ladeinfrastruktur und Fahrzeug noch Optimierungspotenzial steckt.

Insgesamt ergibt sich gegenüber den fahrzeugseitig gemessenen Verbräuchen damit ein um 25–40 % höherer Energiebedarf, einhergehend mit dem gerade über die Energiekosten relevanten Aspekt für die Wirtschaftlichkeit.

Brennstoffzellenbusse

- Derzeit liegt der durchschnittliche Verbrauch der Solo-Brennstoffzellenbusse bei rund 9 kg H₂/100 km.
- Der Wasserstoffverbrauch steigt mit niedrigen Außentemperatur und liegt entsprechend den verfügbaren Daten bei mittleren Tagestemperatur von knapp über 0 °C im Bereich von etwa 1 kg H₂/100 km über dem Jahresmittelverbrauch.

2.3.4. Zusammenfassung der Ergebnisse zu Energieeffizienz und Energieverbrauch

Batteriebusse

- Der durchschnittliche Energieverbrauch liegt bei den Midibussen bei 1,1 kWh/km, bei den Solobussen bei 1,2 kWh/km und bei den Gelenkbussen bei 1,6 kWh/km.
- Die Außentemperatur und das damit benötigte bzw. verbundene Heizungskonzept spielt hinsichtlich des Energiebedarfs eine entscheidende Rolle. Unterschieden wird dabei zwischen rein elektrischen Heizungskonzepten und Konzepten mit einer brennerbasierten Zusatzheizung. Bei Bussen mit einem rein elektrischen Heizungskonzept fallen lokal keinerlei Emissionen an, allerdings steigt der elektrische Energiebedarf je nach Außentemperatur und Gefäßgröße an kalten Tagen um 20 % bis 66 % im Vergleich zum Jahresdurchschnitt an. Bei den Bussen mit Zusatzheizung wird diese zusätzlich benötigte Energie zum Beheizen über den jeweiligen Brennstoff bezogen.
- Die Ladeinfrastruktur spielt aufgrund anfallender Ladeverluste und Mehrverbräuche nicht nur energetisch, sondern auch kostentechnisch eine entscheidende Rolle für die Verkehrsunternehmen. Je nach Ladesäulenhersteller fallen bei der Umwandlung von dem aus dem Hausanschluss stammenden Wechselstrom (AC) in Gleichstrom (DC) Verluste zwischen 6 und 10 % an. Weitere 3 % Ladeverlust fallen direkt an der HV-Batterie bei der Einspeicherung an. Je nach Kombination von Bus- und Ladesäulenhersteller fallen zudem noch Mehrverbräuche für die Fahrzeugvorkonditionierung und u. a. das Batteriebalancing an. Bei der Vorkonditionierung, also dem Vorheizen des Fahrzeugs und in der kälteren Jahreszeit zum Teil auch der Batterie, fällt je nach Außentemperatur ein zusätzlicher Verbrauch von 5–8 % an. Der darüber hinaus gehende energetische Mehrbedarf beim Laden von 8–15 % ergibt sich u. a. aus dem Batteriebalancing, das der Gewährleistung eines einheitlichen Ladezustands der einzelnen Zellen bzw. Zellblöcke dient und damit zur Lebensdauerverlängerung der HV-Batterie beiträgt. Addiert man sämtliche Verluste und zusätzliche Verbräuche auf, ergibt sich ein zusätzlicher Energiebedarf von 22–36 %, bezogen auf die im Fahrzeug bzw. in der HV-Batterie gespeicherte Energiemenge.

2.4. Ökologie

Dieser Abschnitt wurde in leicht abgewandelter Form in Der Nahverkehr 7/8 2021 veröffentlicht.

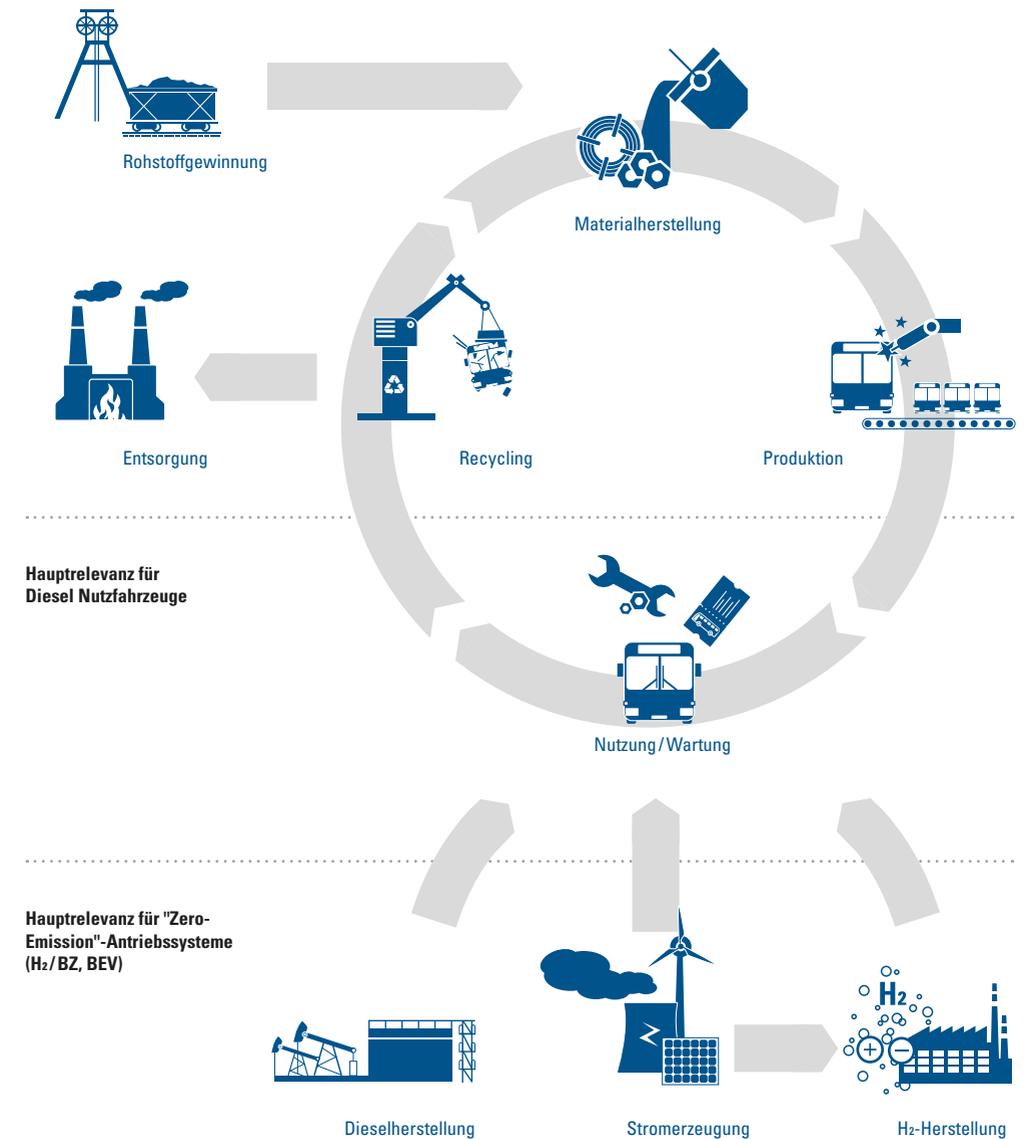
Für die ökologische Bewertung von Batterie- und BZ-Bussen wurde eine Methodik in Anlehnung an die Ökobilanz nach EN ISO Norm 14040/44¹⁹ verwendet. Die Ökobilanz betrachtet den gesamten Lebenszyklus eines Produktes oder einer Dienstleistung. Dabei wird die benötigte Extraktion von Rohstoffen, die Herstellung von Halbzeugen, die Herstellung und Nutzungsphase der Busse und auch die Entsorgung betrachtet (siehe Abbildung 50).

Für die Ökobilanz werden die Ressourcenverbräuche und Emissionen entlang des Lebenszyklus der einzelnen Busse erfasst, addiert und in der Wirkungsabschätzung als Umweltindikatoren (z. B. Klimawandel bzw. Treibhausgase) ausgedrückt. Ziel der Bewertung ist es, ökologische Unterschiede über den Lebenszyklus aufzuzeigen, die sich aus der Verwendung der emissionsfreien Antriebssysteme für die Busse gegenüber konventionellen Dieselnissen ergeben. Während beim Dieselnissen gerade im Betrieb der Fahrzeuge klima- und gesundheitsschädliche Emissionen durch die verbrennungsmotorische Umwandlung des Diesels entstehen, verlagern sich diese Umweltwirkungen bei den im Betrieb lokal emissionsfreien E-Antrieben auf die Bereitstellung des eingesetzten Energieträgers Strom bzw. Wasserstoff.



Quelle: Südwestdeutsche Landesverkehrs-AG, 2021

ABBILDUNG 50 Übersicht Lebenszyklus eines Stadtbusses



2.4.1. Untersuchungsrahmen

Tabelle 3 fasst den Untersuchungsrahmen der Bewertung zusammen.

TABELLE 3 Untersuchungsrahmen der Bewertung

Thema	Festlegung
Produkt	12-m- und 18-m-Stadtbusse für den ÖPNV mit unterschiedlichen Antriebskonzepten und voll-elektrischem Heizkonzept. Konfigurationen basieren auf aktuellen Produkten europäischer Produzenten. Siehe Tabelle 4 für die betrachteten Busspezifikationen.
Funktionelle Einheit	12-m- oder 18-m-Stadtbus, 12 Jahre Lebensdauer, jährliche Laufleistung 60.000 km. Aufgrund der aktuell geringeren Reichweiten der Batteriebusse (siehe angenommene Batteriekapazität, Tabelle 4) sowie betrieblicher Aspekte (z. B. sind beim Gelegenheitslader bei kurzen fahrplanbedingten Wendezeiten z. T. überschlagene Wenden zur Verlängerung der Ladezeit erforderlich) wird zur Realisierung der Tagesumläufe gegenüber den Diesel- oder Brennstoffzellenbussen ein Mehrbedarf an Bussen von 35 % für Depotlader und 10 % für Gelegenheitslader berücksichtigt. Dieser Wert ist abhängig vom Einsatzkontext und abgeleitet aus verschiedenen von den Autoren durchgeführten Untersuchungen zur Vollumstellung von Bestandsflotten bzw. bestehenden Umlaufplänen. Bei einer Teilumstellung der Flotte oder auch einer Anpassung des Umlaufplanes wird dieser Wert voraussichtlich niedriger ausfallen, da zunächst die kürzeren Umläufe mit den Batteriebussen bedient werden können und der Fahrzeugmehrbedarf sich für die längeren und energetisch anspruchsvolleren Umläufe ergibt. Weiterhin spielt das gewählte Heizkonzept eine wesentliche Rolle aufgrund der im Winter gegebenen Reichweithematik. Zur Analyse der Relevanz dieses Parameters auf die Umweltwirkungen wird er als einer von mehreren Parametern im Rahmen der Sensitivitätsanalyse nochmals genauer untersucht (siehe Kapitel 2.4.2)
Systemgrenzen	Die ökologische Bewertung bezieht sich auf das Fahrzeug und umfasst den gesamten Lebenszyklus inklusive Busherstellung, Nutzung, Wartung und Entsorgung. Reparatur und allgemeine Aufwendungen für Werkstatt/Depot oder Betriebssteuerung sowie die Herstellung & Wartung der Ladeinfrastruktur für die Batteriebusse sind nicht berücksichtigt ²⁰ . Für die Elektroenergie- und Wasserstoffherzeugung (inklusive Transport und Betankung/Ladung) ist die Infrastruktur (Anlagen, Leitungen, Trailer etc.) berücksichtigt. Einzige Ausnahme ist die Anlage zur Dampfreformierung von Erdgas. Gutschriften für die aus der Entsorgung zurückgewonnenen Materialien oder Energie bei der Busverwertung am Lebensende wurden, analog gängigem Vorgehen bei Ökobilanzen, in der Automobilindustrie, nicht berücksichtigt.
Zeitliche / geografische / technische Referenz	Verwendete Ökobilanzdatensätze aus GaBi Datenbanksystem für Energie- und Materialbereitstellung ²¹ beziehen sich auf 2017, die Strom- und H ₂ -Bereitstellungsdatensätze beziehen sich auf 2020. Aktuelle Buskonfigurationen europäischer Hersteller wurden verwendet. Einsatzort ist Deutschland, daher sind auch sämtliche Energiebezüge auf Daten aus Deutschland basiert. Die verwendeten Verbrauchsdaten der Busse sind mit Messdaten aus der Betriebsdatenerfassung der Bus-Begleitforschung für den Zeitraum Jan 2019 – Jan 2021 abgeglichen. Die Verbrauchs- und Emissionsdaten für den 12-m und 18-m-Dieselsbus wurden dem Handbuch Emissionsfaktoren entnommen. Die E-Busse werden im Sinne eines vollständig emissionsfreien Betriebes rein elektrisch beheizt bzw. klimatisiert (unter allen betrachteten Bussen der Begleitforschung werden 36 % der Batteriebusse rein elektrisch beheizt).
Umweltkategorien	Klimawandel (nach Environmental Footprint 3.0 ²² ausgedrückt in CO ₂ -Äquivalenten, zusätzlich werden die Stickoxidemissionen stellvertretend als Indikator für die Auswirkung auf die Luftqualität im urbanen Raum betrachtet).
Ökobilanzdatenbank	Sachbilanzinventare (Emissionen und Ressourcenentnahmen) für die Bereitstellung von Material und Energie wurden der aktuellen Datenbank der Ökobilanzsoftware GaBi 10 ²² entnommen.

²⁰ In der Wirtschaftlichkeitsanalyse (siehe Kapitel 2.5.3) wird die Ladeinfrastruktur berücksichtigt.

²¹ Fazio, S. Biganzioli, F. De Laurentiis, V., Zampori, L., Sala, S. Diaconu, E. Supporting information to the characterisation factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment methods, version 2, from ILCD to EF 3.0. EUR 29600 EN, European Commission, Ispra, 2018

²² Sphera Solutions GmbH: GaBi Software System und Datenbanken für Life Cycle Engineering, Version 10, Update Februar 2021

²³ KBA: Statistische Mitteilungen des Kraftfahrt-Bundesamtes FZ 25, 1. Januar 2021

Als Batteriebusse wurden jeweils für 12-m-Busse und 18-m-Busse eine Konfiguration als Depotlader und eine als Gelegenheitslader, für BZ-Busse jeweils eine Konfiguration als reiner BZ-Bus mit kleiner HV-Batterie als Puffer und eine als BZ-Range Extender (BZ-REX) berücksichtigt. Midi-Busse werden auf Grund ihrer im Vergleich zu 12 und 18 m deutlich geringeren Verbreitung in der im Rahmen der Begleitforschung betrachteten Flotte (2 %, siehe Abbildung 3) und auch Deutschlands ÖPNV Busflotten (11 % Anteil ≤ 12 t zGG an Kraftomnibusbestand²³) nicht näher untersucht. Die ermittelten Ergebnisse, gerade die relativen Veränderungen zwischen den untersuchten Antriebstechnologien, sind aber grundsätzlich auf Midi-Busse übertragbar. Die in Tabelle 4 dargestellten Spezifikationen der ausgewählten Antriebskonzepte basieren im Wesentlichen auf aktuellen Produktkatalogen europäischer Hersteller und Zulieferer sowie Annahmen der Autoren. Die Leergewichte wurden auf Basis von Angaben einzelner Hersteller sowie basierend auf Gewichten spezifischer Komponenten (Lithiumionenbatterie, Brennstoffzelle, Wasserstoffdruckspeicher etc.) für die jeweiligen BEV- / BZ- / BZ-REX-Konfigurationen berechnet und sollen eine möglichst repräsentative Fahrzeugkonfiguration darstellen, Daten einzelner Modelle werden hiervon naturgemäß abweichen. Für alle betrachteten Lithiumionenbatterien (NMC (Kathode: Lithiumnickelmangancobaltoxid) oder LTO (Anode: Lithiumtitanatoxid)) wurde eine Lebensdauer von sechs Jahren und somit ein Austausch während des Lebenszyklus des Busses angenommen. Für die Brennstoffzelle wurde ebenfalls ein Austausch des Stacks nach sechs Jahren festgelegt. Diese Annahmen bezüglich Komponentenlebensdauer stellen bewusst eher konservative Annahmen dar.



Quelle: Regionalverkehr Köln GmbH, 2021

TABELLE 4 Busspezifikationen für ökologische Bewertung

	Länge	Ladeinfrastruktur	Leergewicht [t]	Batterie			Brennstoffzelle		H ₂ Speicher	Anzahl Antriebsachse (mit 2 radnahen E-motoren à 125 kW max.)
				Typ	Kapazität [kWh]	Austausch	Leistung [kW]	Austausch		
Batterie	12 m	Depotlader	14,2	NMC	396	einmal				1
	12 m	Gelegenheitslader	12,7	LTO	110	einmal				1
	18 m	Depotlader	20,4	NMC	495	einmal				2
	18 m	Gelegenheitslader	18,7	LTO	150	einmal				2
BZ	12 m		12,7	LTO	36	einmal	70	einmal	38/5	1
	18 m		18,9	LTO	54	einmal	100	einmal	46/6	2
BZ REX	12 m	Depotlader	13,8	NMC	252	einmal	45	einmal	19/4	1
	18 m	Depotlader	19,8	NMC	300	einmal	60	einmal	28/6	2
Diesel Euro VI	12 m		11,1							
	18 m		16,1							

Die verwendeten Verbrauchswerte sämtlicher Busse sowie die berücksichtigten Verbrennungs-emissionen der Dieselsebusse sind in Tabelle 5 dokumentiert. Für den Diesel ergibt sich nach DIN EN 16258 bei einer Beimischung von 5,8 Vol. % Biokraftstoffen ein Emissionsfaktor von 2,52 kg CO₂-Äq./l Diesel gegenüber 2,67 kg CO₂/l bei rein fossilem Diesel. Die Elektroenergieverbräuche für die Batteriebusse sowie den BZ-REX sind fahrzeugseitig angegeben. Die Verbräuche der Elektrobusse beinhalten den Verbrauch der elektrisch betriebenen Heizung bzw. Klimatisierung im Sinne eines mittleren Jahresverbrauchs, gemittelt über alle Jahreszeiten. Zur Abschätzung des effektiven Stromverbrauchs wird für die Ladeinfrastruktur (Anschluss Mittelspannung, Wandlung Wechsel- auf Gleichstrom, Laden und Entladen der Batterie) eine Effizienz von insgesamt ca. 88 % angenommen. Zusätzlich wird angenommen, dass sich für Batteriebalancing und Fahrzeugvorkonditionierung ein zusätzlicher Elektroenergiebedarf von ca. 10 % ergibt. Aus dem spezifischen elektrischen Energiebedarf von 160 kWh/100km für den 12-m-Gelegenheitslader ergibt sich so netzanschlussseitig ein effektiver (und auch zu bezahlender) Energiebedarf von 201 kWh/100km, für den 18-m-Gelegenheitslader ergeben sich 251 kWh/100km.

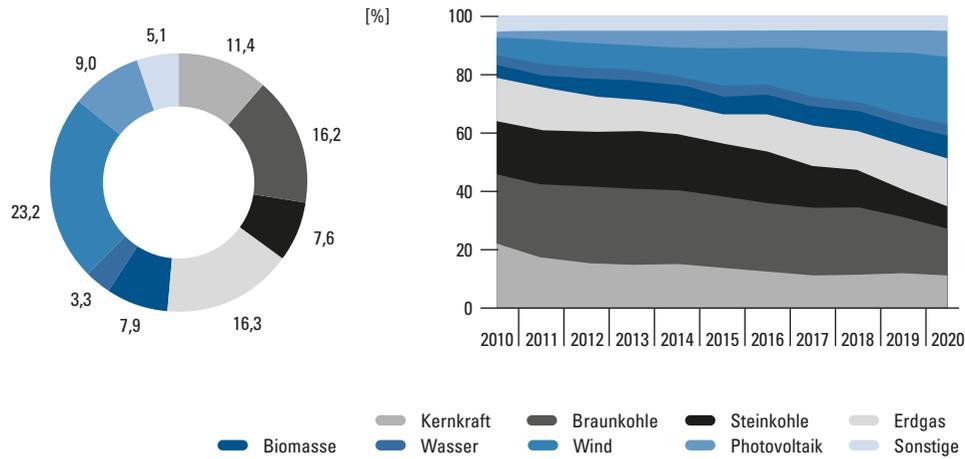
TABELLE 5 Verbrauchs- und Emissionswerte der Busse (SORT 2, mittlere Topographie)

		Diesel		Batterie				BZ		BZ REX	
				Depot		Gelegenheitslader					
		12 m	18 m	12 m	18 m	12 m	18 m	12 m	18 m	12 m	18 m
Energiebedarf [10]	Diesel [l/100 km]	43,7	57,2								
	Wasserstoff [kg/100 km]							8,5	11,3	5,7	8
	Strom [kWh/100 km] (fahrzeugseitig)			160	200	150	190			47	62
	Strom [kWh/100 km] (netzseitig)			201	251	189	239			59	78
Emissionen im Betrieb [10]	NO_x [g/km]	0,874	0,734	Lokal emissionsfreier Betrieb							
	PM_{2.5} [g/km]	0,0068	0,0077								
	CO₂ [g/km]	1.100	1.440								

Energiebereitstellung

Abbildung 51 zeigt zunächst den deutschen Strommix nach Energiequellen für 2020 sowie die Entwicklung zwischen 2010 und 2020. Bei den erneuerbaren Energien zeigt sich ein kontinuierlicher Anstieg des Anteils am Strommix, der im Wesentlichen von wachsender Stromerzeugung aus Windkraft und Photovoltaik geprägt ist. Die Anteile von Strom aus Biomasse und Wasserkraft stagnieren weitestgehend aufgrund der derzeitigen Rahmenbedingungen bzw. weil die Ausbaupkapazitäten weitgehend erschöpft sind. Für die direkte Verwendung von Strom in Batteriebusen, als auch für die Wasserstoffproduktion via Elektrolyse wird als Basisszenario ein erneuerbarer Strommix aus Windkraft und Photovoltaik mit den aktuellen Verhältnissen (2020: 72 % Wind / 28 % PV) festgelegt. Im weiteren Verlauf der Analyse werden Sensitivitäten dargestellt, beispielsweise mit dem aktuellen deutschen Strommix bzw. Wasserstoff via Dampfreformierung von Erdgas.

ABBILDUNG 51 Strommix Deutschland 2020 & 2010–2020²⁵

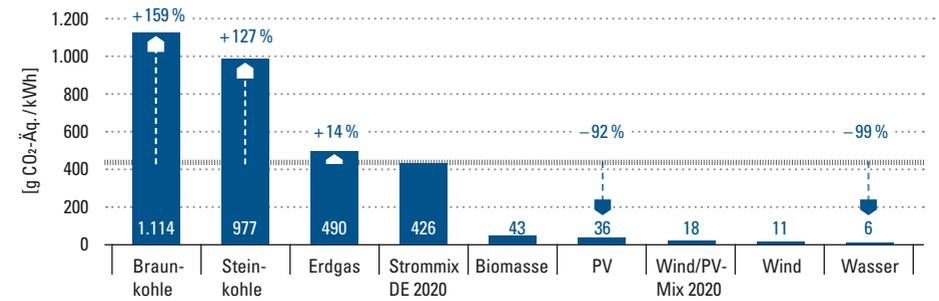


²⁵ AG Energiebilanzen: Stromerzeugung nach Energieträgern 1990–2020 (Stand Februar 2021, vorläufige Daten für 2020), <https://www.ag-energiebilanzen.de>, letzter Zugriff 08.06.2021

Abbildung 52 und Abbildung 53 verdeutlichen, dass die eingesetzten Energieträger für die Erzeugung von Elektroenergie und Wasserstoff einen entscheidenden Einfluss auf die Treibhausgasemissionen (THG) der Energiebereitstellung haben. Die gezeigten Treibhausgasemissionen für die Strom- und Wasserstoffbereitstellung enthalten die Bereitstellung genutzter Energieträger, die Konversion sowie weitestgehend die Infrastruktur. Annahmen für die Bereitstellung der einzelnen Energieträger (Strom, Wasserstoff und Diesel) werden nachfolgend erörtert.

Abbildung 52 gibt einen Überblick zur Treibhausgasintensität der Stromerzeugung aus verschiedenen fossilen und erneuerbaren Energieträgern. Referenzfall ist der deutsche Strommix 2020 mit 426 g CO₂-Äq./kWh. Darin sind die Vorketten für die Energieträgerbereitstellung sowie die Aufwendungen für die Stromerzeugungsanlagen und Netzverluste berücksichtigt. Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Ressourcen in Deutschland führt gegenüber dem Strommix Deutschland zu THG-Einsparungen von mindestens 90 %.

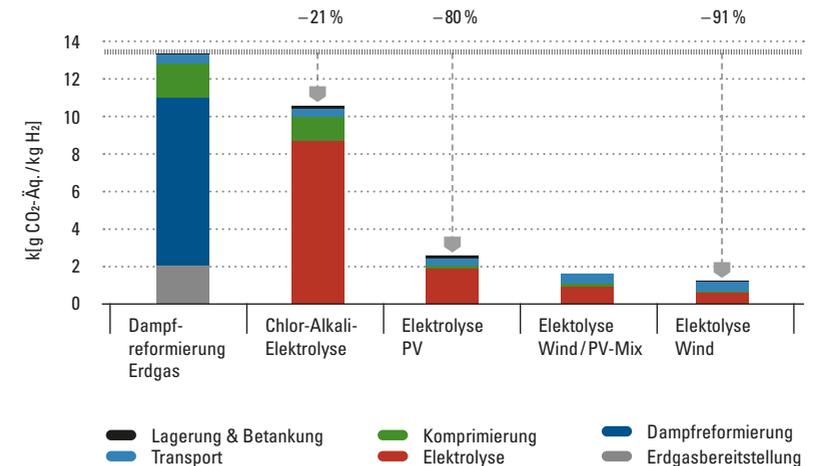
ABBILDUNG 52 Treibhausgasintensitäten der Strombereitstellung in Deutschland in 2020



Die in Abbildung 53 gezeigten Treibhausgasemissionen für spezifische Wasserstoffpfade beinhalten neben der eigentlichen Produktion auch einen Transport von 50 km, mittels 200 bar Transporttrailer, die Komprimierung sowie Lagerung an der Tankstelle und die Betankung selbst. Die Dampfreformierung beinhaltet die Treibhausgasemissionen aus der Reformierung von Erdgas zu Wasserstoff sowie das aus der Bereitstellung der benötigten Wärme und Dampf entstehende Kohlendioxid. Die Treibhausgase, die sich aus der Bereitstellung des Erdgases für die Dampfreformierung ergeben, sind extra ausgewiesen.

ABBILDUNG 53 Treibhausgasintensitäten der Wasserstoffbereitstellung in Deutschland²⁶

²⁶ AG Energiebilanzen: Stromerzeugung nach Energieträgern 1990–2020 (Stand Februar 2021, vorläufige Daten für 2020), <https://www.ag-energiebilanzen.de>, 08.06 um 17:10



27 CertifHy ist ein im Auftrag der Clean Hydrogen Partnership unter Koordination von Hünico erarbeitetes Zertifizierungssystem für Herkunft- und THG-Intensitätsnachweis von Wasserstoff, siehe www.certifhy.eu.

Für die Produktion von Wasserstoff als Beiprodukt wurde hier der aus ökologischer Sicht konservativere Fall abgebildet und der aktuelle deutsche Strom Mix eingesetzt. Weiterhin wurde entsprechend des CertifHy-Zertifizierungssystem²⁷ eine Allokation entsprechend des Marktwertes vorgenommen, d. h. die Umweltwirkungen werden auf die drei Produkte Chlor, Natronlauge und Wasserstoff entsprechend ihres Marktwertes verteilt. Für die Dampfreformierung als auch für die Chlor-Alkali-Elektrolyse wurde für Komprimierung und Betankung jeweils der aktuelle Strommix verwendet. Bei der Elektrolyse wurde für Komprimierung und Betankung jeweils die gleiche Stromversorgung wie bei der Elektrolyse angenommen. Würde für Dampfreformierung oder die Chlor-Alkali-Elektrolyse z. B. Windstrom für Komprimierung und Betankung eingesetzt, ließen sich ca. 1,4 kg CO₂-Äq./kg H₂ einsparen.

Für die konventionellen Dieselsebusse wurde Diesel mit einer aktuellen Beimischung von 5,8 Vol. % Biokraftstoffen für die Bewertung berücksichtigt. Die mit der Bereitstellung von Diesel in Deutschland verbundenen Treibhausgasemission liegen bei 473 g CO₂-Äq./l Diesel.

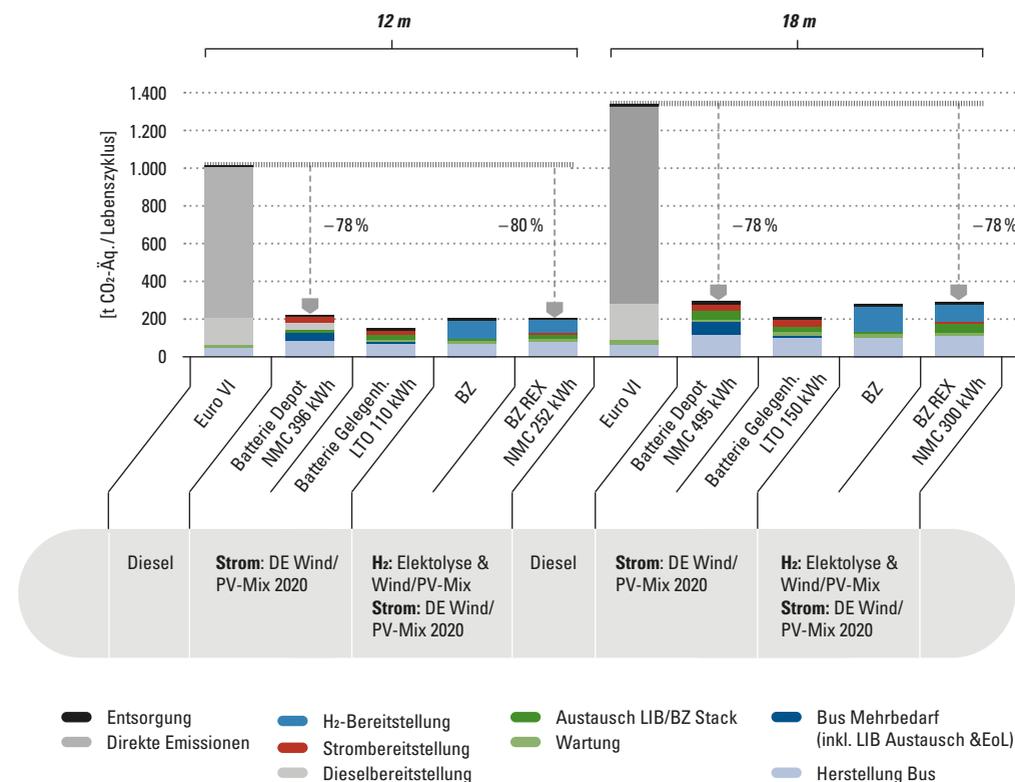
2.4.2. Ergebnisse

Treibhausgase

Abbildung 54 zeigt die Ergebnisse unter Verwendung des Basisszenarios. Der Einfluss der unterschiedlichen Energieträgerbereitstellungspfade werden im Rahmen der Sensitivitätsanalyse im nachfolgenden Abschnitt dargestellt.

Die Ergebnisse der Treibhausgasemissionen (THG) in Kohlendioxidäquivalenten (CO₂-Äq.) zeigen zunächst deutlich höhere Werte für die Fertigung der Busse mit innovativen Antrieben. Für die Herstellung eines 12-m-Diesel-Busses wurden 46 t CO₂-Äq. (18 m: 66 t CO₂-Äq.) ermittelt, während die betrachteten Batterie- und BZ-Busse zwischen 70 und 86 t CO₂-Äq. (18 m: 98 – 118 t CO₂-Äq.) verursachen. Hinzu kommen die Aufwendungen für den im Lebenszyklus jeweils einmalig angenommenen Tausch der Lithiumionenbatterie (LIB) oder des BZ-Stacks, d. h. der Tausch erfolgt jeweils nach 6 Jahren. Insbesondere die Herstellung der LIB trägt in Abhängigkeit ihrer Kapazität zu den Mehrmissionen bei (38 t CO₂-Äq. für 396 kWh NMC / 24 t CO₂-Äq. für 110 kWh LTO). Für die Batteriebusse besteht aktuell zur Realisierung der Tagesumläufe gegenüber den Diesel- oder BZ-Bussen aufgrund der geringeren Reichweite ein Mehrbedarf an Bussen. Dieser wird mit 35 % für Depotlader und 10 % für Gelegenheitslader angenommen. Die für die Herstellung dieses Mehrbedarfes resultierenden Treibhausgasemissionen in Abbildung 54 sind inklusive des Austausches der LIB und der Aufwendungen für die Entsorgung angegeben.

ABBILDUNG 54 Treibhausgasemissionen Lebenszyklus 12-m- & 18-m-Busse

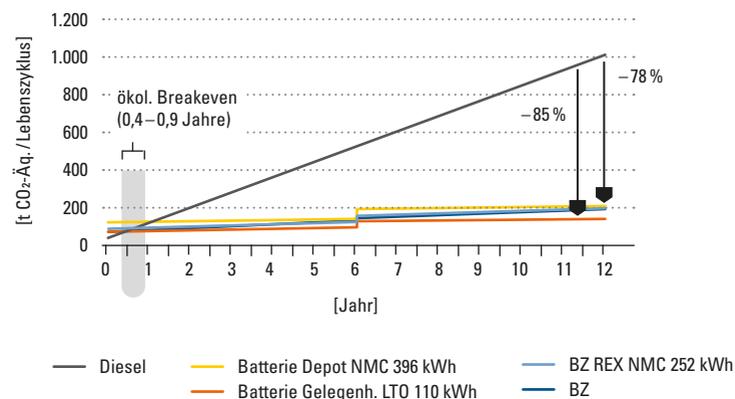


Bei den BZ-Bussen tragen neben den LIB vor allem die Wasserstoffdruckspeicher mit hohen Kohlefaseranteilen (ca. 13 t CO₂-Äq. für 38 kg Speicher) und die Brennstoffzelle (3,4 t CO₂-Äq. für 70 kW) zu den Treibhausgasemissionen der Herstellung bei. Für die Brennstoffzelle wurde eine Platinbeladung von 0,7 g/kW angenommen. Gleichzeitig zeigt die ökologische Lebenszyklusbetrachtung, dass die höheren Treibhausgasemissionen aus der Herstellung der E-Busse bei der direkten Verwendung von erneuerbarem Strom aus Wind und Photovoltaik im Batteriebus / BZ-REX oder zur Elektrolyse von Wasser zu Wasserstoff mit anschließender Verwendung im BZ-Bus gegenüber den Dieselsebussen deutlich kompensiert werden. Der Batteriebus (12 m) mit großer NMC Batterie und Depotladung kann gegenüber Diesel 78 % der Treibhausgasemissionen über den Lebenszyklus einsparen, beim Gelegenheitslader

sind es aufgrund der kleineren Batterie und seines infolge des geringeren Fahrzeuggewichtes niedrigeren Energieverbrauches in der Nutzungsphase 85 % Einsparung. Bei den Wasserstoffbussen (BZ und BZ-REX 12 m) werden die höheren Konversionsverluste bei Elektrolyse und Brennstoffzelle gegenüber den Batteriebussen aufgrund des nicht benötigten Mehrbedarfs an Buskapazität kompensiert, sodass die Einsparungen mit 80 % gegenüber dem Dieselbus vergleichbar sind. Die Einsparungen für die 18-m-BEV- und BZ-Busse fallen gegenüber den 18-m-Dieselbussen in etwa gleich aus. Bezogen auf den gefahrenen Kilometer ergeben sich für einen 12-m-Dieselbus 1.412 g CO₂-Äq./km, für Depotlader und den BZ-Bus liegen die THG-Emissionen bei 311 bzw. 285 g CO₂-Äq./km bei Einsatz von Strom entsprechend dem aktuellen Wind / PV-Mix im deutschen Strommix.

Abbildung 55 illustriert die ökologischen Amortisierungszeiten oder den Breakeven, ab wann bzw. ab welcher Laufleistung die höheren Treibhausgasemissionen für die Herstellung der Busse (12 m) mit emissionsfreiem Antriebskonzept kompensiert sind. Wie bereits in Abbildung 54 wurde für den Gelegenheitslader ein Mehrbedarf an Buskapazität von 10 % und für den Depotlader 35 % berücksichtigt. Unter Verwendung des Wind/PV-Mix für die direkte Nutzung bzw. für die Elektrolyse sind die höheren Aufwendungen für BEV- und BZ-Busse nach 0,4–0,9 Jahren bzw. ca. 25.000–55.000 km Fahrleistung bereits kompensiert. Ab diesem Zeitpunkt ergeben sich „Netto“-THG-Einsparungen, die über den gesamten Lebenszyklus bei 78–85 % bzw. ca. 800–850 t CO₂-Äq. liegen.

ABBILDUNG 55 Breakeven der Treibhausgasemissionen – Lebenszyklus 12-m-Busse



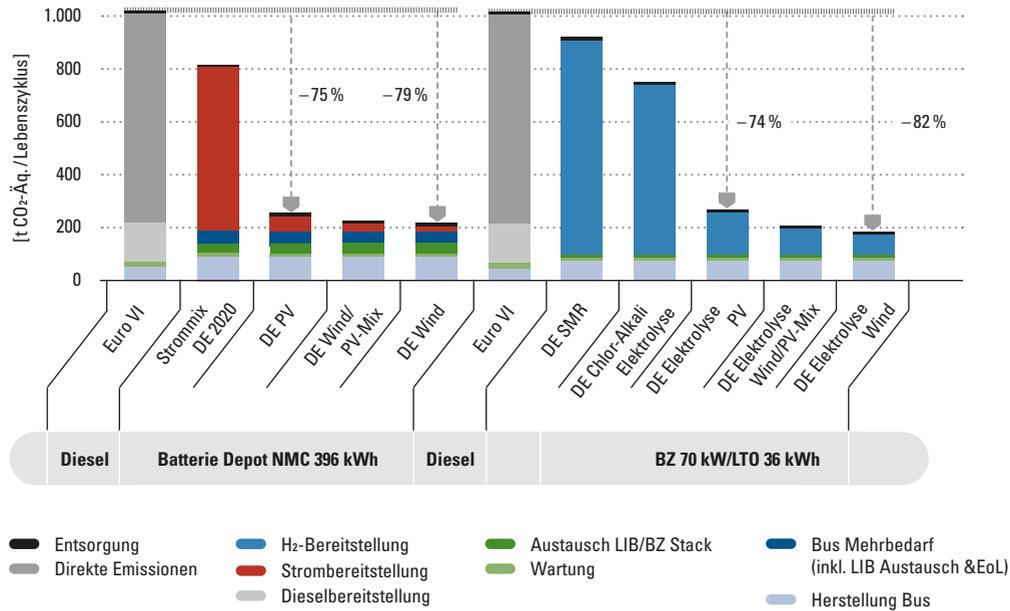
Sensitivitätsanalyse

Nachfolgend wird in Abbildung 56 am Beispiel des Depotladers (12-m-Bus, 396 kWh NMC Batterie) der Einfluss der Strombereitstellung für die Nutzungsphase dargestellt. Beim Batteriebus führt bereits die Verwendung des Strommix von 2020 zu einer Treibhausgaseinsparung von ~20 % (Breakeven nach ca. 2,6 Jahren, bei 60.000 km jährlicher Laufleistung). Bei der Verwendung von PV-Strom, können gegenüber dem Dieselbus 75 % der Treibhausgase eingespart werden, bei reinem Windstrom sind es 79 %. Analog wird in Abbildung 56 im rechten Diagramm der Einfluss des Wasserstoffbereitstellungspfades auf den Lebenszyklus des BZ-Busses (12-m-Bus, 36 kWh LTO) dargestellt. Beim BZ-Bus würde eine Versorgung mit Wasserstoff mittels Erdgasreformierung (SMR) zu ca. 9 % geringeren Treibhausgasen gegenüber der Verwendung eines Dieselbusses führen. Bei Verwendung von Wasserstoff aus der Chlor-Alkali-Elektrolyse, die mit Strom aus dem deutschen Netz betrieben wird, ergibt sich unter Verwendung des (vorläufigen) Allokationsansatzes nach CertifHy zur Verteilung der Treibhausgase auf die drei Koppelprodukte eine Reduktion von 26 % gegenüber Dieselbussen. Bei der Wasserstoffversorgung mittels Elektrolyse mit einem Wirkungsgrad von 65 % (bezogen auf Heizwert) ergibt sich für PV-Strom eine Reduktion von 74 %, bei Windstrom von 82 %, gegenüber Diesel. Die Verwendung des Strommix zur Erzeugung von Wasserstoff führt aktuell aufgrund der Konversionsverluste zu deutlich höheren Treibhausgasen als beim Dieselbus (im Diagramm nicht dargestellt). Erst bei einer Treibhausgasintensität von ca. 260 g CO₂-Äq./kWh (ca. 40 % THG Reduktion gegenüber aktuellem deutschem Strommix) würde die Nutzung von Wasserstoff aus Elektrolyse mit durchschnittlichem Netzstrom die gleichen Treibhausgase wie die Verwendung von Diesel erzeugen.

Für die in Abbildung 56 dargestellten Treibhausgasemissionen des Batteriebusses (Depotlader), unter der Verwendung des deutschen Strommix aus dem Jahr 2020, ist vereinfacht angenommen, dass der Strommix 2020 für die gesamte Lebensdauer von 12 Jahren (2020–2031) verwendet wird.

Abgeleitet von den Reduktionszielen Deutschlands, die im Klimaschutzplan 2050 und Klimaschutzprogramm 2030 formuliert sind, wurden von verschiedenen Institutionen mögliche Szenarien zur Entwicklung der Stromproduktion bis 2050 unter der Prämisse erarbeitet, die Reduktionsziele einhalten zu können.

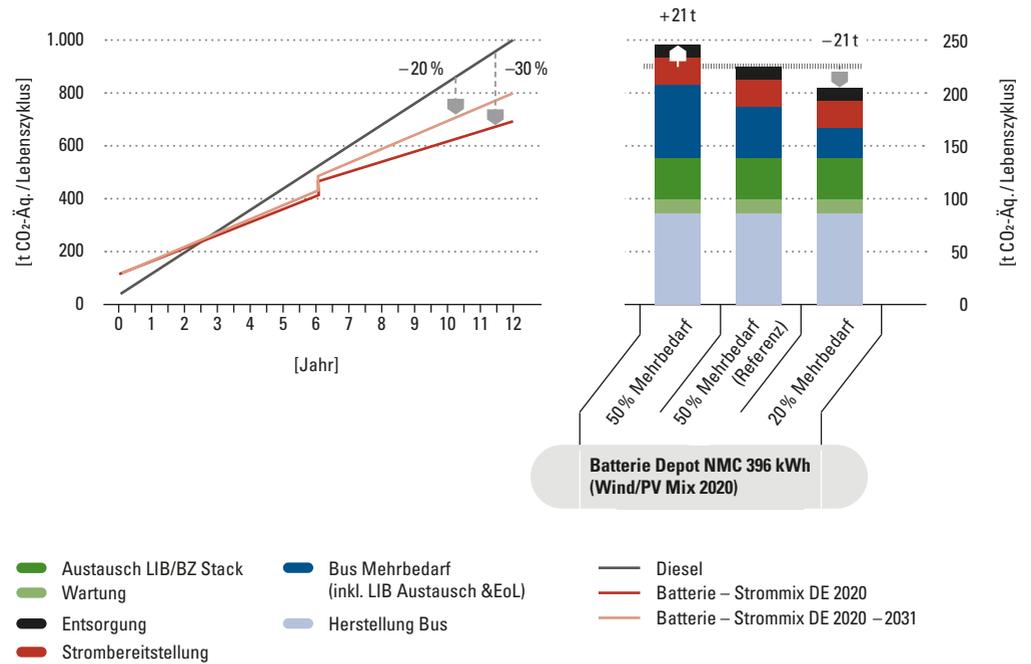
ABBILDUNG 56 Einfluss der Strom- & Wasserstoffbereitstellung auf THG Emissionen über den gesamten Lebenszyklus 12-m-Busse



Das linke Diagramm in Abbildung 57 stellt das zusätzliche Reduktionspotenzial dar, wenn die Entwicklung der Stromerzeugung nach Berechnungen der Netzbetreiber²⁸ in Deutschland im Zeitraum 2020–2031 berücksichtigt wird. Spart der 12-m-Batteriebus (Depotlader) gegenüber Diesel ca. 20 % THG ein, wenn für die gesamte Lebenszeit mit dem Strommix 2020 gerechnet wird, sind es bereits 30 %, wenn man eine mögliche Entwicklung des Strommix, abgeleitet von den Minderungszielen, annimmt. Dieses Ergebnis muss als Projektion verstanden werden, zeigt aber das Potenzial, welches sich aus der Entwicklung des Energieträgermix für die Stromerzeugung während der Nutzungsphase des Busses ergeben kann.

²⁸ 50Hertz, Amprion, TenneT TSO, TransnetBW: Netzentwicklungsplan Strom 2035, Version 2021 Erster Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber, 2021, NEP_2035_V2021_1_Entwurf_Teil1.pdf (netzentwicklungsplan.de), 14.06. um 16:30

ABBILDUNG 57 Einfluss Entwicklung des Strommix und Mehrbedarf für Depotlader 12-m-Busse auf THG Emissionen

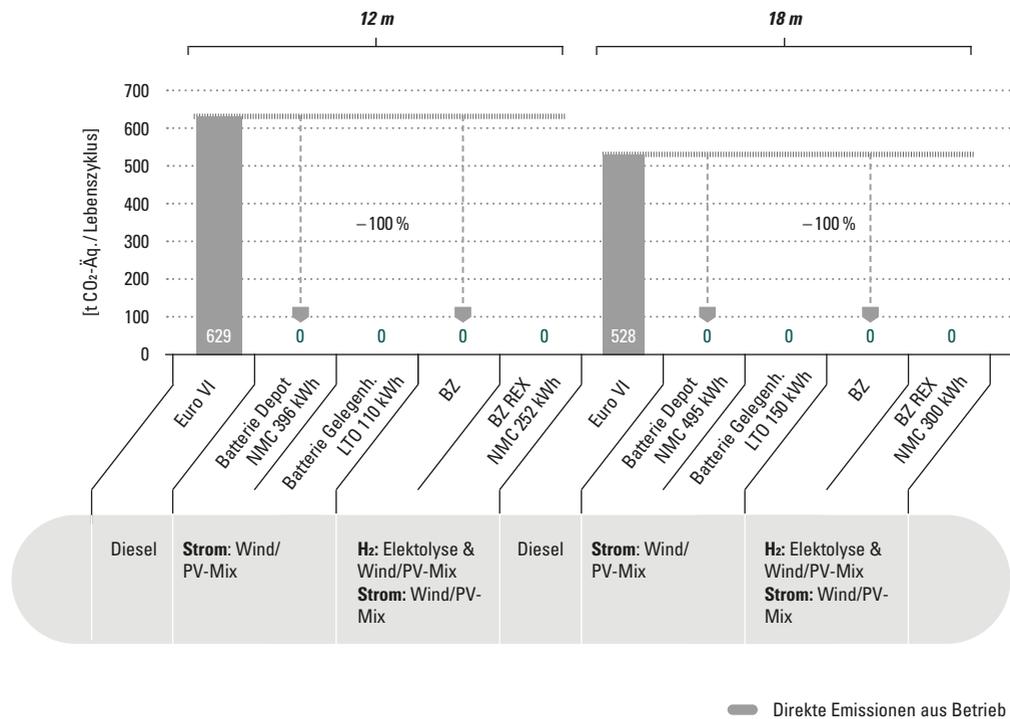


Das rechte Diagramm in Abbildung 57 zeigt den Einfluss des angenommenen Mehrbedarfs an Batteriebusen für den Depotlader, der sich aus der geringeren Reichweite ergibt. Als Referenzfall wurde ein Mehrbedarf von 35 % für den Depotlader angenommen. Eine Reduktion oder Erhöhung um jeweils 15 Prozentpunkte, führt zu ca. 21 t höheren bzw. niedrigeren Treibhausgasemissionen über den Lebenszyklus. Bezogen auf einen Depotlader, der mit einem Strommix aus Wind/PV betrieben wird, ergeben sich ca. 9 % höhere bzw. geringere Treibhausgasemissionen. Wobei eine Reduktion des Mehrbedarfs den relevanteren Betrachtungsfall darstellt. So kann je nach betrieblichen Einsatzkontext und gewählten Heizungskonzept durch eine Anpassung des Umlaufplanes der Mehrbedarf an Fahrzeugen weiter reduziert werden.

Stickoxide

In Bezug auf Stickoxidemissionen als Beispiel für gesundheitsschädliche Emissionen des motorisierten Verkehrs ist für die weiteren Betrachtungen zu berücksichtigen, dass diese lokal wirken. Das heißt, dass im Gegensatz zum global wirkenden CO₂ und den weiteren Triebhausgasen, der Ort der Emission für die Umweltwirkung relevant ist.

ABBILDUNG 58 NO_x-Emissionen Busbetrieb 12-m- & 18-m-Busse

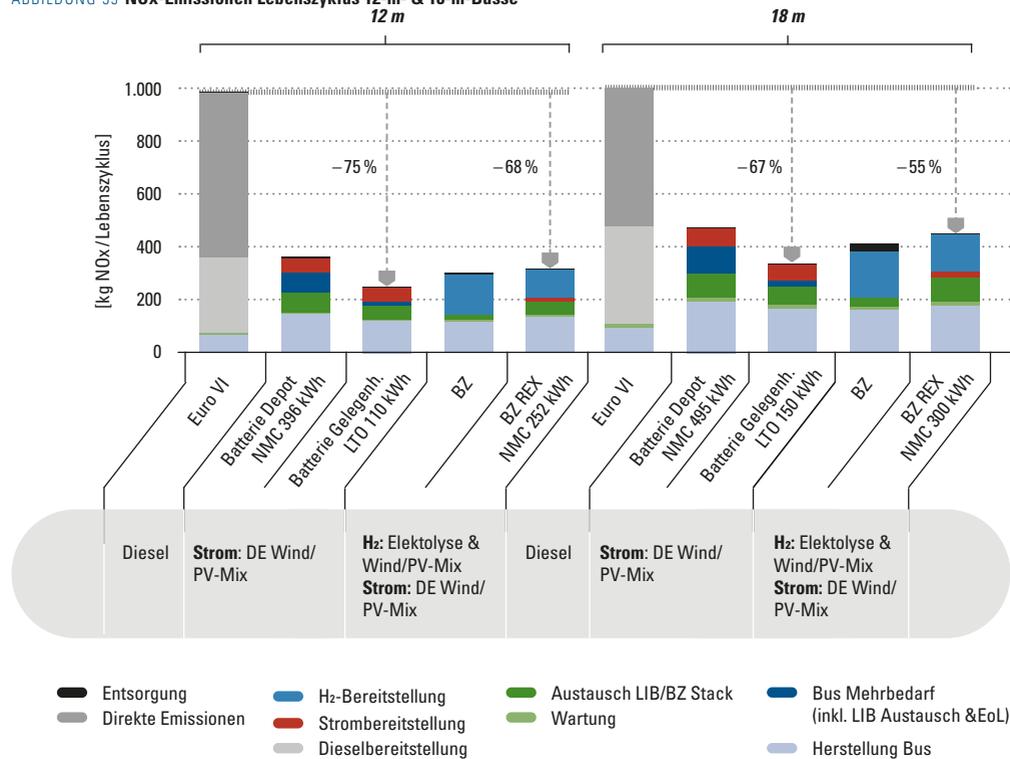


Entsprechend sind im Fall des Dieselmotors als Vertreter der verbrennungsmotorisch angetriebenen Busse insbesondere die NO_x-Emissionen der Nutzungsphase, sprich seines Betriebes, von Relevanz, da diese üblicherweise in urbanen Gebieten mit hoher Bevölkerungsdichte und in niedriger Höhe im Straßenraum emittiert werden (siehe Abbildung 58). Hingegen werden NO_x Emissionen beim Rohstoffabbau, bei der Materialfertigung (Busherstellung aber auch Infrastruktur für die Stromerzeugung wie Windkraftanlagen und Photovoltaikmodule) oder bei der Verbrennung von Kohle und Gas in Kraftwerken meist außerhalb von Städten, d. h. in Gebieten mit deutlich niedrigerer Bevölkerungsdichte und über Kamine in höheren Luftschichten freigesetzt. Dementsprechend spielen die E-Busse ihre Vorteile im täglichen Linienbetrieb in Städten und Gemeinden, d. h. Siedlungsräumen mit hohen Bevölkerungsdichten, aus, da sie eben mit ihrem E-Antrieb lokal emissionsfrei fahren und damit die direkten Abgasemissionen an NO_x, aber auch Feinstaub, Kohlenmonoxid etc. vollständig vermieden werden.

Während im Betrieb entlang einer Buslinie also eine 100 % Einsparung an NO_x Emissionen erzielt wird, ergeben sich über den Lebenszyklus die in Abbildung 59 dargestellten Mengen an NO_x-Emissionen. Ähnlich wie bei den Treibhausgasen, führt die Herstellung der Batterie- und BZ-Busse (111 – 143 kg NO_x für 12 m) gegenüber Dieselmotoren (63 kg NO_x für 12 m) zu deutlich höheren Emissionen. Zusätzlich ergeben sich für den Mehrbedarf an Buskapazitäten bei den Batteriebusen 50 kg NO_x für den Depotlader und 12 kg NO_x für den Gelegenheitslader (jeweils für den 12-m-Bus).

In Summe reduzieren die Batteriebusse die Stickoxidemissionen über den gesamten Lebenszyklus gegenüber Diesel um ca. 50 – 75 % (Depot- bzw. Gelegenheitslader), für die BZ-Busse liegen die Einsparungen bei ca. 55 – 70 %. Zu beachten ist weiterhin, dass die Stickoxidemissionen beim 18-m-Bus etwas geringer sind als beim 12-m-Bus (siehe Tabelle 5), weshalb sich für die 18-m-Busse im Vergleich zu den 12-m-Bussen geringere Einsparungen gegenüber Diesel ergeben.

ABBILDUNG 59 NOx-Emissionen Lebenszyklus 12-m- & 18-m-Busse



Bei Verwendung eines erneuerbaren Strommix aus Wind und PV werden die Mehremissionen aus der Herstellung der Batteriebusse nach ca. 1,0–2,4 Jahren Nutzung aufgrund der Verbrennungsemissionen des Dieselsebusses sowie der Emissionen bei der Dieselsebereitung kompensiert.

Wird für die Strombereitstellung für Batteriebusse der deutsche Strommix eingesetzt, ergibt sich zumindest noch eine leichte Einsparung von 3%. Wird im Falle des BZ-Busses der eingesetzte Wasserstoff aus der Dampfreformierung von Erdgas gewonnen, liegt die Einsparung über die Lebenszeit des Busses bei 35% gegenüber Dieselsebussen. Wird deutscher Strommix für die elektrolytische Erzeugung von Wasserstoff verwendet, ergeben sich höhere NOx-Emissionen. Das bestätigt nochmals, dass die Grundvoraussetzung für die angestrebten ökologischen Verbesserungen durch den Einsatz von E-Bussen der Einsatz erneuerbarer Energieträger ist.

2.4.3. Zusammenfassung der Ergebnisse zur Ökologie und Klimaschutz

Fazit

- Durch die Verwendung von Wind- und PV-Strom lassen sich höhere THG- und NOx-Emissionen in der Herstellung der E-Busse meistens bereits innerhalb des ersten Betriebsjahres kompensieren.
- Bei den Treibhausgasemissionen sind über den gesamten Lebenszyklus Einsparungen von 75–85% möglich, bei NOx-Emissionen von 50–75%.
- Bei Batteriebussen führt bereits die Nutzung des aktuellen Strommix bzw. bei den BZ-Bussen die Verwendung von Wasserstoff aus der Dampfreformierung von Erdgas zu THG-Reduktionen ggü. Diesel, bei gleichzeitigem vollständigem Wegfall der Verbrennungsemissionen entlang der Buslinien im urbanen Raum.
- Während die Verwendung von Wasserstoff als Beiprodukt aus einer mit aktuellem deutschem Netzstrom betriebenen Chloralkalie-Elektrolyse in Brennstoffzellenbussen bereits zu einer ca. 26% Reduktion der THG-Emissionen gegenüber dem Betrieb von konventionellen Dieselsebussen führt, würde der Einsatz von Wasserstoff, der via Elektrolyse von Wasser unter Einsatz von deutschem Netzstrom produziert wird, aufgrund der Konversionsverluste zu deutlich höheren THG-Emissionen im Vergleich zu Dieselsebussen führen.
- Durch zunehmende Anteile von erneuerbaren Energien (in Deutschland und auch international voraussichtlich im Wesentlichen Wind und PV) am Strommix sinken nicht nur die spezifischen Emissionen pro kWh Elektroenergie, sondern auch die Emissionen aus der Herstellung der Fahrzeuge oder zum Beispiel der Photovoltaikmodule. Des Weiteren können die Emissionen der Batterieherstellung durch Weiterentwicklung der Technologien (Erhöhung der Energiedichte, Substitution kritischer Metalle etc.) ebenfalls weiter sinken.

2.5. Wirtschaftlichkeit

Die mit den betrachteten Antriebstechnologien verbundenen (Mehr-)Kosten und ihre zukünftige Entwicklung sind ein wesentlicher Faktor für den erfolgreichen Markthochlauf dieser Technologien.

Für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit sind die Investitions- und Betriebskosten des gesamten Bussystems möglichst vollständig im Sinne einer Gesamtbetriebskosten- (Total Cost of Ownership, TCO) Rechnung zu ermitteln. Sie setzt sich aus Fahrzeug, Energieversorgungsinfrastruktur auf dem Betriebshof und/oder im öffentlichen Straßenraum, Schulungskosten, den erforderlichen Anpassungen auf dem Betriebshof sowie den Betriebskosten zusammen. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt kann dies realistischerweise nur näherungsweise erfolgen, da sich aufgrund des Neuigkeitsgrades der Technologien die Wissens- und Erfahrungsbasis noch im Aufbau befindet. Gerade hierzu leisten geförderte Vorhaben inklusive der Begleitforschung Bus einen relevanten Beitrag.

Die Ermittlung der Gesamtbetriebskosten für die betrachteten Antriebstechnologien erfolgt auf Basis eines Anwendungsszenarios, jeweils im Vergleich zur Referenztechnologie (Dieselbusse, Euro VI Norm).

Zunächst war das Anwendungsszenario zu definieren. Hierfür wurden festgelegt:

- Flottengröße und -zusammensetzung
- Annahmen zu betrieblichen Parametern (z. B. Verbrauch, Laufleistung),
- technische Spezifikationen der Fahrzeuge und der Energieversorgungsinfrastruktur (Energiespeichergöße, Heizungskonzept, Lebensdauer kritischer Komponenten wie HV-Batterie und Brennstoffzelle, Ladeleistung etc.).

Eine wesentliche Kostenkomponente bei den Betriebskosten sind die Energiekosten und die in den Kosten enthaltenen bzw. perspektivisch enthaltenen Abgaben wie z. B. EEG-Umlage, Netzentgelte bei Strom und Wasserstoff oder die CO₂-Bepreisung bei Diesel, siehe Kapitel 2.5.2.

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbewertung finden sich in Kapitel 2.5.3 wieder. Die Ermittlung der Kosten je Antriebstechnologie ist dabei von einer Reihe von Parametern und Annahmen abhängig. Sie können von Verkehrsunternehmen zu Verkehrsunternehmen aufgrund ihrer spezifischen Randbedingungen variieren, wie z. B. Energieverbrauch der Fahrzeuge aufgrund der Beschaffenheit des bedienten

Netzes (Durchschnittliche Reisegeschwindigkeit, Topographie, Haltestellenabstände, Fahrgastaufkommen) oder ggf. notwendiger Fahrzeugmehrbedarf aufgrund der zu bedienenden Umlaufpläne. Bezüglich verschiedener Eingangsgrößen der Kostenberechnung sind aufgrund des Neuigkeitsgrades der Technologien noch Annahmen zu treffen (z. B. Lebensdauer kostenintensiver Komponenten wie die HV-Batterie oder die Brennstoffzelle). Bei der im Rahmen der Begleitforschung durchgeführten Gesamtkostenbetrachtung geht es weniger um die Ermittlung der konkreten absoluten Kosten des Betriebes der einzelnen Technologien, ausgedrückt in €/km, und deren Vergleich untereinander. Es handelt sich vielmehr um die Ermittlung der wesentlichen Einflussparameter auf die Kosten und die Auswirkung auf die Gesamtkosten, hervorgerufen durch eine Veränderung des jeweiligen Parameters. Diese Betrachtung wurde in Form einer Sensitivitätsanalyse für verschiedene, als relevant ermittelte Parameter durchgeführt, deren Ergebnisse in Kapitel 2.5.3 zusammengefasst sind.

2.5.1. Referenzszenarien

Die betrachtete Flottengröße umfasst 50 Fahrzeuge. In Anlehnung an die gemäß VDV aktuelle Flottenzusammensetzung im Stadtbusbereich wurde der Anteil an 12-m- und 18-m-Bussen, wie in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich, ausgelegt (siehe Tabelle 6).

TABELLE 6 Zusammensetzung der betrachteten Musterflotte

Gefäßgröße	Anteil	Anzahl
12-m-Standardbusse	53 %	27
18-m-Gelenkbusse	47 %	23
Gesamtflotte	100 %	50

Betrachtet wurden die folgenden Antriebstechnologien:

- Dieselbus (Referenztechnologie)
- Batteriebus
 - Depotlader
 - Gelegenheitslader
- Brennstoffzellenbus
 - BZ-REX-Bus (BZ als Range Extender)
 - BZ-Bus (BZ als Hauptenergiequelle)

Des Weiteren wurden die zugehörigen Versorgungsinfrastrukturen für elektrisch angetriebene Busse, wie in Tabelle 7 ersichtlich, betrachtet.

Für jeden Technologiepfad erfolgte die Auslegung der technischen Spezifikation der Fahrzeuge und Versorgungsinfrastrukturen (siehe Tabelle 8 und 9). Induktiv-Ladesystem für Batteriebusse bzw. Oberleitungsinfrastruktur für (Hybrid-)OBusse wurden aufgrund ihres Fehlens in der im Rahmen der Begleitforschung betrachteten Busflotte bzw. aufgrund ihres auf kurz- bis mittelfristige Sicht noch als gering einzuschätzenden Marktanteils hier nicht näher untersucht. Sollten sich für diese Technologien zukünftig eine größere Relevanz abzeichnen, bietet sich eine genauere Untersuchung im Rahmen zukünftiger Begleitforschungsaktivitäten an.

TABELLE 7 Betrachtete Energieversorgungsinfrastruktur

Versorgungsinfrastruktur	zugehörige Antriebstechnologie	
Ladeinfrastruktur		
Automatisierte Kontaktsysteme (z. B. Pantographen)	Batteriebus	
	Depotlader	Gelegenheitslader
Plug-In-System	Batteriebus	
	Depotlader	Gelegenheitslader
	Brennstoffzellenbus	
	BZ-REX-Bus	
Wasserstoffversorgung		
Anlieferung/Vor-Ort-Erzeugung	Brennstoffzellenbus	
	BZ-REX-Bus	BZ-Bus

TABELLE 8 Auslegung Fahrzeuge

*Annahme: SORT 2 (19 km/h), Durchschnittliche Topographie HBEFA

Fahrzeugkategorie	Fahrzeugkonzept	Gefäßgröße	Energiespeicher (HV-Batterie)			Brennstoffzelle		Wasserstoffspeicherung		Verbrauch*		
			Batterietyp	Energieinhalt	Batterietausch	Leistung	Tausch	Typ IV Flaschen	Wasserstofftank	Diesel	Strom	Wasserstoff
		[m]	[Text]	[kWh]	[Anzahl]	[kW]	[Anzahl]	[Anzahl]	[kg]	[l/100km]	[kWh/km]	[kg/100 km]
Dieselbus		12	–	–	–	–	–	–	–	43,7	–	–
		18	–	–	–	–	–	–	–	57,2	–	–
Batteriebus	Depotlader	12	NMC	396	1x	1x	–	–	–	–	1,60	–
		18	NMC	495	1x	1x	–	–	–	–	2,00	–
	Gelegenheitslader	12	LTO	110	1x	1x	–	–	–	–	1,50	–
		18	LTO	150	1x	1x	–	–	–	–	1,90	–
BZ-REX-Bus	Anlieferung + LIS	12	NMC	252	1x	45	1x	4	18,8	–	0,47	5,7
		18	NMC	300	1x	60	1x	6	28,2	–	0,62	8
	Vor-Ort-Erzeugung + LIS	12	NMC	525	1x	45	1x	4	18,8	–	0,47	5,7
		18	NMC	300	1x	60	1x	6	28,2	–	0,62	8
BZ-Bus	Anlieferung	12	LTO	36	1x	70	1x	5	38	–	–	8,5
		18	LTO	36	1x	100	1x	6	45	–	–	11,3
	Vor-Ort-Erzeugung	12	LTO	36	1x	70	1x	5	38	–	–	8,5
		18	LTO	36	1x	100	1x	6	45	–	–	11,3

TABELLE 9 Auslegung Versorgungsinfrastrukturen

Fahrzeugkategorie	Fahrzeugkonzept	Ladeinfrastruktur Betriebs Hof						Ladeinfrastruktur Strecke				Elektrolyse			Wasserstofftankstelle		Anlieferung H ₂	
		Anzahl Transformatoren	Leistungsklasse Transformatoren	Benötigte Anschlussleistung	Anzahl der Ladepunkte	Art des Ladepunktes	Ladeleistung pro Ladepunkt	Anzahl Transformatoren	Leistung Transformatoren	Anzahl der Ladepunkte	Ladeleistung pro Ladepunkt	Leistungsaufnahme des Elektrolyseurs	Netzanschluss	Anzahl Kompressoren	Kapazität Druckspeicher	Anzahl Module	Anzahl Zapfstellen	Anzahl Trailer-Docks
		[Stück]	[kVA]	[kVA]	[Stück]	[Text]	[kW]	[Stück]	[kVA]	[Stück]	[kW]	[kW]	[kW]	[Stück]	[kg]	[Stück]	[Stück]	[Stück]
Batteriebus	Depotlader	2	1.600	2.100	50	CCS	75	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	Gelegenheitslader	2	630	800	50	Pantograph	35	8	630	8	300	–	–	–	–	–	–	–
BZ-REX-Bus	Anlieferung + LIS	2	800	1.100	50	CCS	40	–	–	–	–	–	–	–	3	3	4	
	Vor-Ort-Erzeugung + LIS	2	800	1.100	50	CCS	40	–	–	–	–	3.000	3.600	2	1.250	3	3	–
BZ-Bus	Anlieferung	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	3	3	4	
	Vor-Ort-Erzeugung	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	4.000	4.800	2	1.820	3	3	–

2.5.2. Energieträger

Die Energiekosten stellen gemeinsam mit den Fahrpersonal-, Wartungs- und Instandhaltungskosten für die Fahrzeuge die relevanten Eingangsgrößen für die Betriebskosten dar.

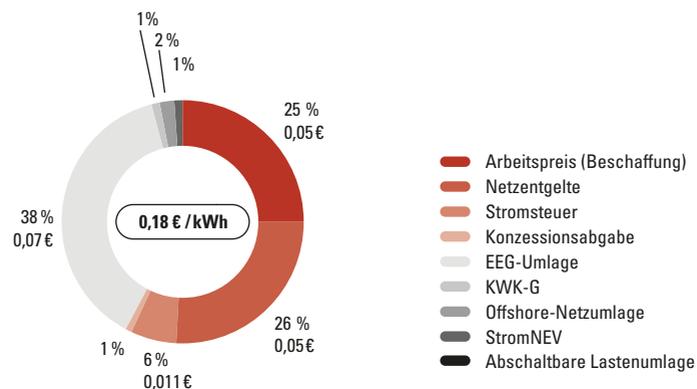
Neben den eigentlichen Erzeugungskosten bestimmen die gesetzlichen Abgaben maßgeblich die jeweiligen Kosten für Strom und Wasserstoff. Nachfolgend werden die Kosten für Strom, Wasserstoff und Diesel sowie ihre Zusammensetzung dargestellt.

Strom

Die eigentlichen Strombeschaffungskosten, die die Stromerzeugung inkl. CO₂-Kosten, Vertriebskosten und Marge beinhalten, machen für das Bezugsjahr 2020 nur ein Viertel des Strompreises aus. Für die nachfolgende Wirtschaftlichkeitsanalyse (siehe Kapitel 2.5.3) wurden im Falle der Batteriebusse Strombezugskosten in Höhe von 18 ct/kWh ermittelt. Dieser Wert deckt sich auch gut mit den Angaben der Verkehrsunternehmen zu ihren Strombezugskosten. Sie lagen im Mittel bei 19 ct/kWh mit einer Bandbreite von 11–30 ct/kWh. Die Mehrkosten für den Bezug von Grünstrom, z. B. über einen bilateralen Stromliefervertrag, ein sogenanntes PPA (Power Purchase Agreement), können als vernachlässigbar angenommen werden. Zur Orientierung kann hier der vom EID²⁹ veröffentlichte Wert von 0,15 ct/kWh für Herkunftsnachweise bei Abschluss von 5-jährigen Lieferverträgen für Strom aus erneuerbaren Energien (Wind- (on- oder offshore) oder PV-Anlagen) genannt werden. Bereits 76 % der VUs werden mit Grünstrom beliefert oder planen den Einsatz von Grünstrom für den Betrieb der E-Busse.

²⁹ Energieinformationsdienst, EID: PPA-Monitor, unter www.eid-aktuell.de. Letzter Zugriff Juli 2021.

ABBILDUNG 60 Kostenbestandteile für Strom (Bezugsjahr 2020)



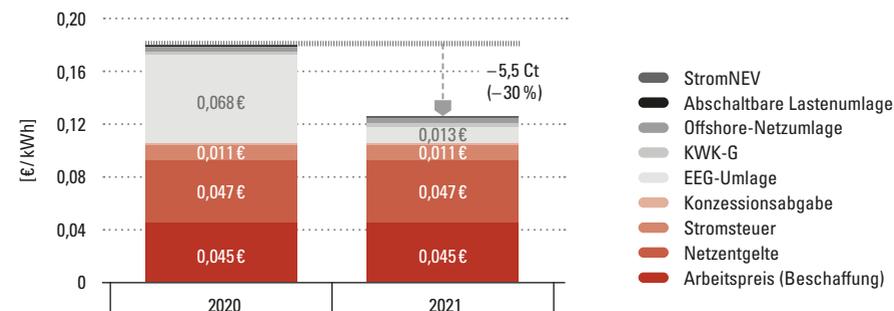
Reduktion EEG Umlage ab 2021

Während im Jahr 2020 die Reduktion der Stromsteuer für den Betrieb von E-Bussen von 2,05 auf 1,142 ct/kWh die einzige Abgabenermäßigung darstellte, wurde mit der Verabschiedung des Erneuerbaren-Energien-Gesetz 2021 eine Reduktion der EEG-Umlage um 80 % entsprechend § 65a ermöglicht. Diese ist beim Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) für das Folgejahr zu beantragen³⁰. Voraussetzung hierfür ist, dass ein jährlicher Mindestverbrauch von 100 MWh rein für den Fahrbetrieb anfällt. Dies trifft beispielsweise bereits zu bei einem Einsatz von zwei 12-m-Bussen bei einem durchschnittlichen Verbrauch von 1,2 kWh/km im Jahresmittel (ohne elektrische Heizung) und unter 50.000 km jährlicher Laufleistung je Bus. Abbildung 61 veranschaulicht die Auswirkungen der Reduktion der EEG-Umlage ab 2021, die einer Reduktion der Abgaben um 5,5 ct/kWh Strom entspricht. Bei einem beispielhaften mittleren spezifischen Energieverbrauch von 1,2 kWh/km für einen 12-m-Bus und einer angenommenen Jahreslaufleistung von 60.000 km entspricht diese Absenkung einer Betriebskostenreduktion von ca. 4.000 € je Bus und Jahr.

Die Kostenkomponenten für Arbeitspreis und Netzentgelte wurden in Abbildung 61 im Sinne einer direkten Vergleichbarkeit für 2021 gegenüber 2020 als konstant angenommen. Die anderen Abgaben entsprechen dem Stand 2021, wobei sich die Änderungen der übrigen Abgaben im Ergebnis nur minimal auswirken. Für die Strombeschaffungskosten und Netzentgelte lässt sich jedoch im Jahresverlauf 2021 (Stand Sommer 2021) ein Anstieg in einer Größenordnung von in Summe 1–2 Ct/kWh³¹ beobachten.

ABBILDUNG 61 Reduktion der EEG-Umlage auf 20 % gemäß EEG 2021 § 65

(Jahresverbrauch >100 MWh, Bezugsjahr für Arbeitspreis und Netzentgelte: 2020)



Netzentgelte

Ein Faktor, der einen gewissen Einfluss auf die Stromkosten hat, sind die Nutzungsstunden der beim Netzbetreiber angemeldeten Netzanschlusskapazität und die sich hierfür ergebenden Netzentgelte. Berechnet werden die sogenannten Jahresnutzungsstunden über das Verhältnis von jährlich verbrauchter Strommenge zu Anschlussleistung. Wie Tabelle 10 entnommen werden kann, fällt im Falle einer Jahresnutzungsdauer von mehr als 2.500 h, ein höherer Leistungspreis an, der auf jährlicher Basis je kW angemeldeter Anschlussleistung erhoben wird, während der Arbeitspreis, der je verbrauchter kWh Strom zu entrichten ist, niedriger ausfällt. Liegen die Jahresnutzungsstunden unter 2.500 h, wird im Verhältnis zur verbrauchten Strommenge eine höhere Anschlussleistung in Anspruch genommen. Dadurch fallen niedrigere Leistungspreise, dafür aber spürbar höhere Arbeitspreise an. Im Ergebnis führt eine Jahresnutzungsdauer von < 2.500h üblicherweise zu höheren Netzentgelten, die umgelegt auf die verbrauchte kWh Strom, in der Größenordnung von ca. 1 ct / kWh liegt. Der Einsatz eines Lademanagements, das für die Verstetigung der Ladeleistung und damit für eine Vermeidung von Lastspitzen beim Nachladen der Batteriebusse sorgt, trägt dementsprechend zu einer Reduktion der Energiekosten bei. Dieses sogenannte „Peak Shaving“ lässt sich z. B. durch die Reduktion der Ladeleistung je Bus bei entsprechender Verlängerung der Ladedauer oder durch das zeitlich gestaffelte Laden der Busse im Laufe der Nacht erreichen. Die in Abbildung 60 und Abbildung 61 dargestellten Netzentgelte entsprechen einer Jahresnutzungsdauer von > 2.500 Stunden.

³⁰ Beantragung EEG-Reduktion für elektrische betriebene Busse unter https://www.bafa.de/DE/Energie/Besondere_Ausgleichsregelung/Antragsverfahren/antragsverfahren_node.html, letzter Zugriff 30.7.2021.

³¹ BDEW-Strompreisanalyse 2021 | BDEW, letzter Zugriff 30.7.2021.

TABELLE 10 Mittlere Netzentgelte in 20 deutschen Städten in 2020

Bezugsjahr 2020	Messtellenbetrieb	Leistungspreis		Arbeitspreis	
		< 2500 h	> 2500 h	< 2500 h	> 2500 h
	[EUR/a]	[EUR/kW*a]	[EUR/kW*a]	< 2500 h	[ct/kWh]
Mittelwert aus dt. 20 Städten	626,66	13,06	92,61	4,06	0,88

Netzanschlusskosten und -dauer

Ein weiterer Kostenblock, der im Zuge der Errichtung der für Batteriebusse benötigten Ladeinfrastruktur anfällt, ist die Herstellung des Netzanschlusses. Generell gilt im Rahmen der Planung zur Einführung von E-Bussen so früh wie möglich den Kontakt zum Stromnetzbetreiber zu suchen, um die aktuelle Stromversorgungssituation des Betriebshofes zu klären. Noch wesentlich wichtiger ist es, die Möglichkeiten zur Erweiterung des Netzanschlusses auf die voraussichtlich erforderliche Ladeleistung in Erfahrung zu bringen. Hierzu braucht der Netzbetreiber eine erste Einschätzung zur gewünschten Anschlussleistung. Grundsätzlich muss der Netzbetreiber eine Einzelfallprüfung vornehmen, da die Netzsituation mit Blick auf verfügbare Kapazitäten innerhalb einer Stadt bzw. Kommune bereits von einer Straße zur nächsten unterschiedlich sein kann. Je nach Ergebnis der Netzprüfung kann der Netzbetreiber auf dessen Basis eine erste Einschätzung zu den Kosten und der zeitlichen Dauer für die Herstellung des Netzanschlusses mit der benötigten Leistung abgeben.

Die zeitliche Dauer (siehe auch Kapitel 2.1.2) ist dabei abhängig von der Netzsituation, den ggf. erforderlichen Netzertüchtigungsmaßnahmen, ggf. auch in vorgelagerten, höheren Spannungsebenen und den Planungskapazitäten des Netzbetreibers. Es muss in Erfahrung gebracht werden, wie viele Netzanschlüsse der Netzbetreiber jeweils in seinem Versorgungsgebiet aktuell schon zu errichten hat. Insofern kann ein Netzanschluss im besten Fall innerhalb einiger Monate hergestellt werden, in ungünstigeren Fällen kann die Herstellungsdauer aber auch durchaus bei 1–2 Jahren liegen. Generell ist der Netzbetreiber, von zu begründenden Ausnahmefällen abgesehen, verpflichtet den Netzanschluss herzustellen.

Aus technischer Sicht ist zu berücksichtigen, dass üblicherweise die maximal aus dem bestehenden Niederspannungsnetz beziehbare Leistung 250 kW beträgt. Wird mehr Leistung benötigt, ist für die Versorgung eine eigene, vom Verkehrsunternehmen zu errichtende Trafostation erforderlich, welche vom Netzbetreiber an das Mittelspannungsnetz anzubinden ist.

Bei der Errichtung einer Trafostation mit einer beispielhaften Ausgangsleistung von 500 kW ist mit Anschaffungskosten in Höhe von überschlägig etwa 40.000 € zu rechnen. Hinzu kommt der Anschluss an das 10/20 kV-Mittelspannungsnetz mit mehreren tausend Euro. Gerade die Kosten für die Anbindung an die Verteilertafelstation sind stark von den örtlichen Randbedingungen abhängig. Einflussfaktoren sind z. B. die Entfernung, der Anteil versiegelter Flächen, die bei einer ggf. erforderlichen Kabelverlegung wiederherzustellen sind, etc. Schließlich ist noch ein Baukostenzuschuss an den Netzbetreiber zu entrichten, der je kW beantragter Anschlussleistung berechnet wird. Entsprechend der Vorgabe der Bundesnetzagentur kann dieser Baukostenzuschuss maximal dem Leistungspreis für eine Jahresnutzungsdauer von > 2.500 h in der jeweiligen Spannungsebene des zuständigen Netzbetreibers entsprechen. Im Falle der in Tabelle 10 dargestellten beispielhaften Auswertung von über 20 deutschen Städten liegt dieser Wert bei gerundet 93 €/kW. Dem Netzbetreiber steht es frei bei der Festlegung des Baukostenzuschusses Abschläge zu gewähren.

Wasserstoff (H₂)

Grundvoraussetzung für einen reibungslosen Betrieb mit H₂-angetriebenen Bussen ist die Verfügbarkeit der Wasserstofftankstelle und die zuverlässige Versorgung mit Wasserstoff. Die Kosten für die Tankstelle zur Versorgung der untersuchten Musterflotte mit 50 BZ Bussen belaufen sich dabei auf rund 1,8 Mio. €. Diese Kosten beziehen sich rein auf H₂-Tankstelle, d. h. berücksichtigt keine Anlagen zur H₂-Produktion, z. B. Elektrolyseur. Es bestehen grundsätzlich folgende Optionen für die Versorgung der Wasserstofftankstelle mit Wasserstoff:

- Anlieferung von Wasserstoff
- Vor-Ort Erzeugung, üblicherweise mittels Elektrolyse von Wasser

Anlieferung von Wasserstoff

Wasserstoff wird üblicherweise in gasförmiger Form, verdichtet auf 200–300 bar per Lkw-Trailer angeliefert. In der Regel wird der Trailer im Wechsel getauscht (siehe Kapitel 1.3), d. h. die Tankstelle verfügt über 2 Trailer-Stellplätze, von denen im Normalbetrieb ein Stellplatz mit einem H₂-Trailer belegt ist, der die Tankstelle mit Wasserstoff versorgt (siehe Abbildung 62).

ABBILDUNG 62 Beispiel für eine Wasserstofftankstelle mit H₂-Anlieferung über Trailer³²



³² Stuttgarter Straßenbahnen, 2020

Werden größere Wasserstoffmengen benötigt, stellt die Trailerbelieferung mit flüssigem Wasserstoff eine Option dar. Während gasförmig bis zu 1 t H₂ je Trailer geliefert wird, werden bei der Versorgung mit flüssigem Wasserstoff die ca. 3,5- bis 4-fache Menge Wasserstoff mit einer Lkw-Lieferung bereitgestellt. Weiterhin ist die H₂-Lieferung über eine Pipeline möglich. Dies macht allerdings aus wirtschaftlichen Gründen meist nur dann Sinn, wenn die H₂-Pipeline bereits an ein bestehendes H₂-Pipelinesystem mit der geforderten H₂-Reinheit angebunden werden kann oder sich die Wasserstoffproduktion (beispielsweise chemische Industrie oder Elektrolyseur) in unmittelbarer Nähe des Depots bzw. der H₂-Tankstelle befindet.

Die Lieferkosten für Wasserstoff sind grundsätzlich abhängig von einer Reihe von Faktoren. Diese sind unter anderem die Herkunft des Wasserstoffs (aus erneuerbaren / nicht erneuerbaren Ressourcen), die Abnahmemenge, die Transportdistanz, Vereinbarungen zur Liefertreue etc. Dementsprechend ergibt sich eine relativ große Bandbreite für die Kosten für Lieferwasserstoff, die aktuell im Bereich 4,50–9 Euro netto je kg Wasserstoff für die von der Musterflotte abgenommen Mengen abgeschätzt wird.

Wesentlicher Kostenfaktor bei der H₂ Anlieferung ist die Logistik inklusive der Transportentfernung zur H₂-Tankstelle. Aufgrund der erhöhten Reinheitsanforderungen für Brennstoffzellenbusse ergeben sich für Wasserstoff zum Teil, je nach Lage der Trailer-Abfüllanlage, an der die geforderte H₂-Reinheit bereitgestellt werden kann, derzeit durchaus noch Transportdistanzen von 200 km und mehr (siehe Abbildung 63).

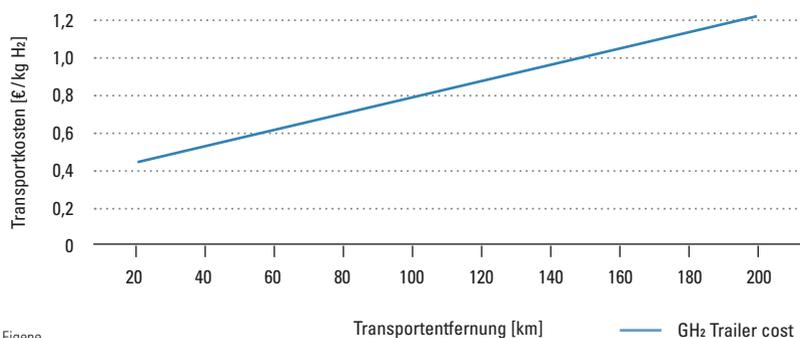
ABBILDUNG 63 Wasserstoffbezugsmöglichkeiten in Deutschland³³

³³ VDV: Emissionsfreie Energie- und Antriebskonzepte für Stadtbusse zur Umsetzung der europäischen Clean Vehicles Directive, 2020 (<https://www.vdv.de/emissionsfreie-energie-und-antriebskonzepte-fuer-stadtbusse.pdf>)



Abbildung 64 veranschaulicht den Einfluss der Transportdistanz auf die H₂-Logistikkosten. Derzeit gibt es umfangreiche Bestrebungen in Deutschland (z. B. im Rahmen der deutschen Wasserstoffstrategie) sowie in Europa die Erzeugungskapazitäten für Wasserstoff aus Elektrolyseanlagen signifikant zu erweitern. Unter anderem sollen mehrere großtechnische Anlagen mit 100 MW Elektrolyseleistung und mehr (> 40 t H₂/d) in den kommenden Jahren in Deutschland errichtet werden. Hierfür ist der Einsatz von Strom aus erneuerbaren Quellen vorzusehen, um den gewünschten Beitrag zu Klima- und Umweltschutz zu leisten (siehe auch Kapitel 2.4).

ABBILDUNG 64 Einfluss Transportdistanz auf die H₂-Transportkosten am Beispiel eines 300 bar-Trailers mit ~ 1.000 kg H₂ Kapazität³⁴



³⁴ Sphera: Eigene Berechnungen zu H₂-Transportkosten, 2020

Der Betrieb von Elektrischen Bussen mit Brennstoffzelle stellt hohe Anforderungen an die H₂-Reinheit. Dadurch reduziert sich die Anzahl der möglichen Quellen, da die erforderlichen Anlagen zur Aufreinigung auf die erforderliche H₂-Qualität derzeit nicht an allen H₂-Erzeugungsstandorten verfügbar sind. Dies stellt im Übrigen einen prinzipiellen Vorteil des wasserstoffbetriebenen Verbrennungsmotors dar, da dieser keine so hohen Anforderungen an die H₂-Reinheit³⁵ stellt. Sobald an einer H₂-Tankstelle aber auch brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge versorgt werden sollen, ist Wasserstoff mit zweierlei Reinheiten vorzuhalten inkl. separaten Speicher, Verdichtung und Abgabestellen einschließlich der damit verbunden Investitionskostenseite, die den Kostenvorteilen für den bezogenen Wasserstoff gegenüberstehen.

³⁵ Vereinfacht gesprochen benötigt ein H₂-Verbrennungsmotor eine H₂-Reinheit > 99,9 % H₂, während eine Brennstoffzelle eine Reinheitsanforderung im Bereich > 99,999 % H₂ aufweist.

Vor-Ort Erzeugung von Wasserstoff

Ein Vorteil der räumlichen Nähe ist der Entfall der H₂-Logistik und der damit verbundenen Kosten. Ein Nachteil ist der zusätzliche Platzbedarf für die Elektrolyseanlage mit vor- und nachgelagerten Prozessen zur Wasseraufbereitung und Produktgasreinigung (üblicherweise Trocknung und Sauerstoffabtrennung).

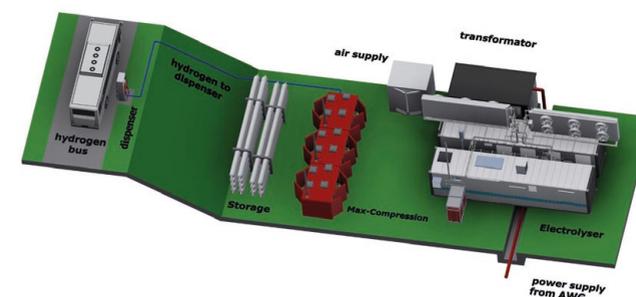
Ob die Vor-Ort-Erzeugung wirtschaftlich wettbewerbsfähig ist, hängt zum einen von den Anlagen- und Betriebskosten für den Elektrolyseur und zum anderen von den H₂-Lieferkosten entsprechend den spezifischen Randbedingungen des jeweiligen Verkehrsunternehmens ab.

Mit Blick auf die Betriebskosten stellen die Elektroenergiekosten die zentrale Einflussgröße dar. Abbildung 65 vermittelt einen Eindruck der Relevanz der Elektroenergiekosten. Der Capex beschreibt dabei die Investitionen und der Opex die Betriebsausgaben. Generell bestehen für den Betrieb einer Elektrolyseanlage verschiedene Abgabenbefreiungs- bzw. Reduktionsmöglichkeiten. So kann mit der Verabschiedung des EEG 2021 von Unternehmen, die der Branche „Herstellung von Industriegasen“³⁶ zuzuordnen sind und bei denen die elektrochemische Herstellung von Wasserstoff den größten Beitrag zur gesamten Wertschöpfung des Unternehmens leistet, eine Reduktion der EEG-Umlage um 85 % in Anspruch genommen werden. Wird für die H₂-Erzeugung ausschließlich Elektroenergie aus erneuerbaren Quelle gemäß EEG („Grünstrom“) eingesetzt, entfällt die EEG-Umlage komplett³⁷. Weiterhin ist eine Elektrolyseanlage auf 20 Jahre von den Netzentgelten³⁸ befreit und es bestehen Reduktionsmöglichkeiten bei den anderen Abgaben (siehe hierzu Detailbericht zu Energieträgerkosten im Starterset Elektromobilität). In Summe kann davon ausgegangen werden, dass Strombezugspreise von unter 7 ct/kWh für Wasserstoffelektrolyse möglich sind. Generell bedarf die Entgeltbefreiung genauso wie die Wirtschaftlichkeitsanalyse der Vor-Ort Erzeugung von Wasserstoff einer Einzelfallprüfung (siehe folgendes Kapitel 2.5.3).

³⁶ entsprechend laufender Nummer 78 nach Anlage 4 EEG

³⁷ Grüner Wasserstoff im Sinn der gesetzlichen Befreiung von der Zahlung der EEG-Umlage nach § 69b des Erneuerbare-Energien-Gesetzes ist Wasserstoff, der elektrochemisch durch den ausschließlichen Verbrauch von Strom aus Anlagen zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien hergestellt worden ist. Weiterhin gilt nur der Wasserstoff als grün, der innerhalb der ersten 5.000 Volllaststunden der Anlage innerhalb des Kalenderjahres erzeugt wird. Siehe BMWi Verordnung zur Umsetzung EEG 2021, Mai 2021

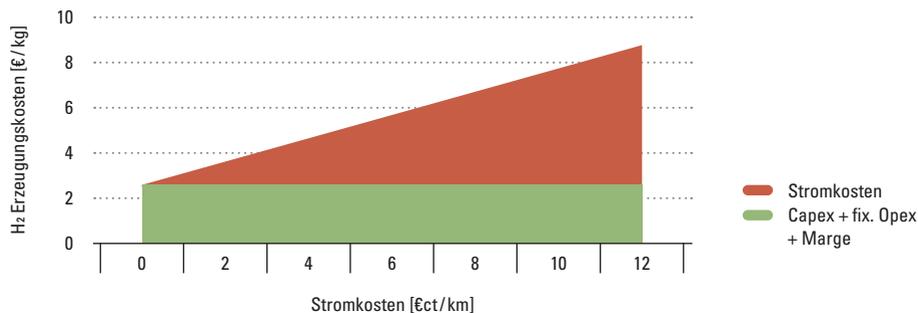
³⁸ § 118 Absatz 6 Satz 7 EnWG



Wasserstoffherstellung und -tankstelle in Wuppertal
Quelle: Abfallwirtschaftsgesellschaft mbH Wuppertal

ABBILDUNG 65 Abhängigkeit der H₂-Erzeugungskosten von Stromkosten

(vereinfachte Darstellung für 4 MW Elektrolyseur @ 4.000 Volllaststunden)³⁹



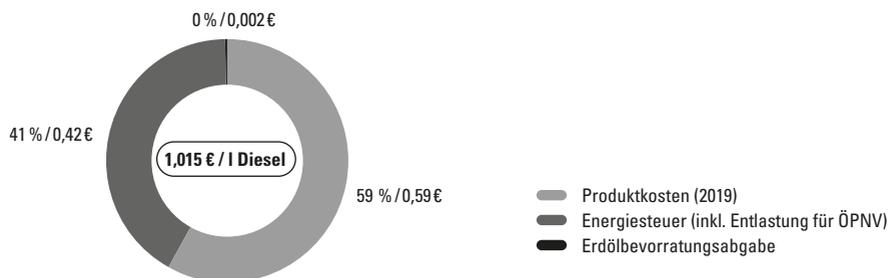
³⁹ Sphera: Eigene Berechnungen zu Transportkosten, 2020

Diesel

Diesel ist Stand heute der vorherrschende Energieträger im busbasierten ÖPNV und dient daher als Referenz für die nachfolgende Wirtschaftlichkeitsanalyse in Kapitel 2.5.3. Für die Dieseldaten wird der mittlere Großverbraucherpreis⁴⁰ für das Bezugsjahr 2019 als Basiswert für die Berechnungen verwendet. Dieser liegt bei 1,015 €/l Diesel. Das Jahr 2020 wurde bewusst nicht gewählt, da aufgrund der COVID-19-Pandemie ein signifikanter Preisrückgang bei Diesel zu beobachten war und dieser Sondereffekt vom Projektconsortium als nicht repräsentativer Einmaleffekt angesehen wurde.

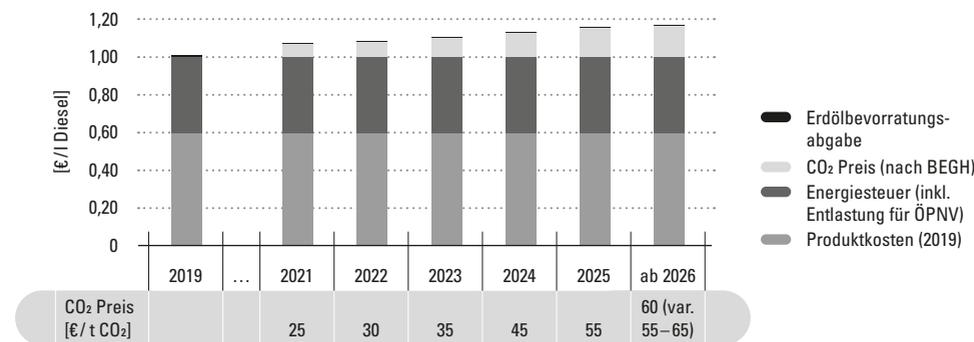
Die Hauptkostenbestandteile für das Bezugsjahr 2019 sind die eigentlichen Produktkosten, d. h. Erdölgewinnung, Verarbeitung, Lieferung und Marge mit 59 % und die Energiesteuer mit 41 % (siehe Abbildung 66).

ABBILDUNG 66 Kostenbestandteile für Diesel (Bezugsjahr 2019)



Ab dem Jahr 2021 wird zusätzlich auf Diesel eine staatliche Abgabe in Form eines CO₂-Zertifikatpreises nach Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) erhoben. Dieser ist bis 2025 gesetzlich festgelegt und wird auf alle fossilen Energieträger für die Anwendungsbereiche Verkehr und Wärmezeugung erhoben. Abbildung 67 gibt die derzeit festgelegten CO₂-Preise und ihren Einfluss auf die Dieseldaten wieder. Für die Abbildung wurden die übrigen Kostenkomponenten entsprechend dem Bezugsjahr 2019 konstant beibehalten.

ABBILDUNG 67 Entwicklung der Dieseldaten in Abhängigkeit des gesetzlichen CO₂-Preises (auf Basis 2019)



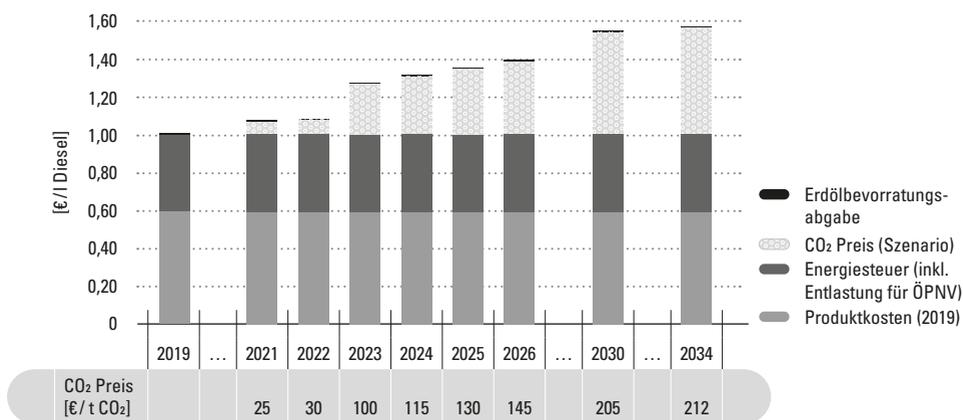
⁴¹ European Green Deal: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/IP_21_3541 Juli 2021

⁴² Umweltbundesamt zu Klimaschutz: "Der CO₂-Preis wird steigen müssen" | tagesschau.de, 12. Juni 2021

⁴³ Umweltbundesamt, Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten – Kostensätze, 2019

Darüber hinaus wird aktuell im Kontext der Diskussion um eine weitere Verschärfung der Klimaziele auf EU-Ebene⁴¹, aber auch zur Förderung der alternativen Antriebe eine weitere Anhebung des CO₂-Preises⁴² diskutiert. In Anlehnung an die vom Umweltbundesamt ermittelten Kosten für Klimafolgeschäden für 2030⁴³ (205 €/t CO₂) wurde ein CO₂-Preisszenario entwickelt, das im nachfolgenden Kapitel für eine Sensitivitätsanalyse verwendet wird. Ziel dieser Sensitivitätsanalyse ist die Ermittlung der wirtschaftlichen Auswirkungen, die eine solche CO₂-Preissteigerung auf die Mehr- / Minderkosten der innovativen Antriebe gegenüber Diesel hat. Abbildung 68 veranschaulicht den Effekt dieser angenommenen CO₂-Preissteigerung auf die Entwicklung der Dieseldaten unter der Annahme, dass die übrigen Kostenkomponenten gegenüber dem Basisjahr 2019 unverändert bleiben.

ABBILDUNG 68 Szenario zur Entwicklung der Dieseldkosten in Abhängigkeit steigender CO₂-Preise (auf Basis 2019)



2.5.3. Wirtschaftlichkeitsanalyse

Im Rahmen der Begleitforschung Bus wurde eine Wirtschaftlichkeitsanalyse für vier verschiedene E-Busantriebsformen durchgeführt. Diese sind in batterieelektrischer Depotlader (BEV DL), batterieelektrischer Gelegenheitslader (BEV GL), Brennstoffzellen-Range-Extender (BZ-REX) und Brennstoffzellenbus (BZ-Bus) unterteilt. Der für die beiden Brennstoffzellen-(BZ)-basierten Antriebskonzepte benötigte Wasserstoff wird entweder angeliefert oder vor Ort (mittels Elektrolyse) erzeugt. Beide Versorgungsoptionen werden betrachtet.

Im Sinne einer Gesamtkostenanalyse erfolgt die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung als Total Cost of Ownership (TCO)-Betrachtung über den Lebenszyklus, d. h. sie beinhaltet neben den Investitionskosten auch die Betriebskosten für einen Betrachtungszeitraum von 12 Jahren.

Die Kostenanalyse wird für jede E-Bus-Antriebstechnologie im Vergleich zu einer Musterflotte, bestehend aus 50 Dieseln als Referenztechnologie durchgeführt. Die Diesel-Referenzflotte gibt dabei die benötigte Laufleistung vor, wobei die Anzahl der benötigten alternativ angetriebenen Busse zur Erbringung der gleichen Laufleistung zwischen den betrachteten Antriebstechnologien variieren kann.

Der vollständige Bericht zur Wirtschaftlichkeitsanalyse findet sich im Starterset Elektromobilität. Dort werden zunächst die sich entsprechend der definierten Eingangsdaten ergebenden Investitionskosten mit und ohne Förderung inkl. der Angabe der für die jeweilige Kostenposition zugrunde gelegten Förderquote für die jeweils untersuchte Antriebstechnologie dargestellt. Die Investitionskosten werden sowohl als Gesamtkosten als auch je Fahrzeug ausgewiesen, unterteilt in die Kostenkategorien „Fahrzeugkosten“, „Infrastrukturkosten“ und „sonstige Kosten“ für Werkstatt-ausrüstung, Schulung und weitere Kosten. Die Unterkategorie „weitere Kosten“ beinhaltet Projektkosten, Sachkosten, Planungskosten sowie Baukostenzuschüsse für den Netzanschluss.

Die Ergebnisse werden zusammenfassend in einer Mehr- / bzw. Minderkostenbetrachtung im Vergleich zum Dieselbus dargestellt. Als Ergebnisgrößen dienen dabei der absolute Differenzkostenbetrag in Euro über 12 Jahre und die Angabe der TCO-Kosten in € pro km, jeweils mit und ohne Berücksichtigung von 3 % Kapitalverzinsung auf die Anschaffungsmehrkosten sowie mit und ohne angenommene Förderung. Die in diesem Abschnitt vorgestellten Ergebnisse beinhalten durchgängig die 3 % Kapitalverzinsung. Die Ergebnisse ohne die Kapitalverzinsung finden sich im zuvor erwähnten Detailbericht zur Wirtschaftlichkeitsanalyse.⁴⁴

⁴⁴ Siehe www.starterset-elektromobilität.de/Bausteine/OEPNV

⁴⁵ Mit Stand Juli 2021 stand die mit dem EEG 2021 verabschiedete 80 % Reduktion der EEG-Umlage für elektrisch betriebene Busse noch unter beihilferechtlichem Prüfungsvorbehalt durch die EU Kommission.

Grundlage der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung stellt die Ermittlung der Gesamtbetriebskosten in €/km entsprechend den gewählten Eingangsdaten dar. Allerdings stehen bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung weniger die absoluten €/km-Werte für die untersuchten Technologien im Vordergrund. Vielmehr ist das Hauptziel der Betrachtung, den Stakeholdern konkrete Hinweise zu geben, welchen Einfluss verschiedene Eingangsparameter auf die Gesamtkosten je Technologie haben. Damit soll es den Stakeholdern (Verkehrsunternehmen und Aufgabenträger) ermöglicht werden, besser abschätzen zu können, welche Kosten für die verschiedenen Antriebstechnologien unter den eigenen spezifischen Randbedingungen zu erwarten sind.

Um dies zu ermöglichen, wurden für jede Antriebstechnologie Sensitivitäten berechnet, um die größten Hebel für die Wirtschaftlichkeit zu identifizieren. Die ceteris paribus untersuchten Parameter sind z. B. der angenommene Fahrzeugmehrbedarf im Falle des Depotladers (BEV DL), die Entwicklung des CO₂ Preises für Diesel, erwartete Minderkosten bei den innovativen Antrieben aufgrund technischer Weiterentwicklungen und Skaleneffekte durch höhere Stückzahlen, die Verminderung der EEG-Umlage um 80 % für elektrisch betriebene Busse, die im Rahmen des EEG 2021⁴⁵ eingeführt wurden sowie Veränderungen der Strom- und Wasserstoffbezugskosten.

Wesentliche Eingangsgrößen und ermittelte Gesamtbetriebskosten

Zunächst werden nachfolgend die wesentlichen Eingangsgrößen (siehe Tabelle 11) und die sich daraus ergebenden Gesamtbetriebskosten (TCO-Kosten) je km (siehe Tabelle 12) dargestellt, um eine Bezugsgrundlage für die Sensitivitätsanalysen zu ermitteln.

46 Flottenzusammensetzung Solo-/Gelenk-Busse lt. VDV (53 % 12-m und 47 % 18-m-Busse)

Die Referenzflotte⁴⁶ umfasst 50 Dieselbusse (Euro VI), davon 27 Standardbusse und 23 Gelenkbusse. Es wurde eine Jahreslaufleistung von 60.000 km angenommen, die an 300 Einsatztagen im Jahr im mittleren Stadtverkehr (SORT 2⁴⁷) erbracht wird, was einer durchschnittlichen Tagesfahrleistung von 200 km pro Bus entspricht. Der Bezugszeitpunkt wurde so gewählt, dass ein fiktives Verkehrsunternehmen in den Jahren 2020/21 mit der Planung und Vorbereitung des Betriebes der Flotte beginnt, sodass diese inkl. Beschaffung und Errichtung der Energieversorgungsinfrastruktur ab 2023 in Betrieb gehen kann.

47 SORT (Standardised On-road Test cycle) 2: mittelschwerer Stadtverkehr mit einer mittleren Reisegeschwindigkeit von 18 km/h

Für die Fahrzeugbeschaffungskosten wurden die in Tabelle 11 aufgeführten Werte verwendet. So wurde für die 12-m-Fahrzeuge 240.000 € für den Dieselbus, und für die elektrisch angetriebenen eine Bandbreite die von 468.000 € für den Gelegenheitslader (BEV GL mit 110 kWh Batteriekapazität) bis hin zu 625.000 € für den BZ-REX und BZ-Bus angesetzt. Die Beschaffungskosten für die elektrisch angetriebenen 12-m-Busse liegen also im Vergleich zum Dieselbus mehr als doppelt so hoch. Für die Gelenkbusse verhält es sich ähnlich.

Der Fahrzeugmehrbedarf für Depotlader wurde aufgrund der Annahme einer vollelektrischen Heizung zur Gewährleistung eines rein elektrischen Betriebes mit 35 % angenommen. Für die Gelegenheitslader wurde ein Mehrbedarf von 10 % unterstellt. Gerade diese Annahme bezüglich des Fahrzeugmehrbedarfs hat einen relevanten Einfluss auf die Gesamtkosten speziell der Depotlader (siehe nachfolgende Sensitivitätsanalyse) und kann von Verkehrsunternehmen zu Verkehrsunternehmen in Abhängigkeit von den Umlaufplänen stark variieren. Den Autoren sind jeweils mehrere konkrete Beispiele für einen geringeren, aber auch höheren Fahrzeugmehrbedarf bekannt.

TABELLE 11 Wesentliche Eingangsdaten Wirtschaftlichkeitsanalyse⁴⁸

Solobusse (12 m)	Diesel	BEV DL (12 18 m: 396 kWh / 495 kWh)	BEV GL (12 18 m: 110 kWh 150 kWh)	BZ REX		BZ	
				H ₂ -Anlieferung (A)	H ₂ -Vor-Ort-Erzeugung (VO)	H ₂ -Anlieferung (A)	H ₂ -Vor-Ort-Erzeugung (VO)
Fahrzeugbeschaffungskosten	12 18 m: 240.000 € 350.000 €	12 18 m: 613.200 € 842.000 €	12 18 m: 468.000 € 675.500 €	12 18 m: 625.000 € 825.000 €		12 18 m: 625.000 € 825.000 €	
Fahrzeugmehrbedarf	–	35 %	10 %	–		–	
Energieverbrauch (Jahresmittel)	12 18 m: 43,7 57,2 l / 100 km	12 18 m: 1,6 2,0 kWh / km ⁴⁹ (fzg.seitig)	12 18 m: 1,5 / 1,9 kWh / km ⁴⁷ (fzg.seitig)	12 m: 5,7 kg H ₂ / 100 km 0,5 kWh / km 18 m: 8,0 kg H ₂ / 100 km 0,6 kWh / km		12 18 m: 8,5 11,3 kg H ₂ / 100 km	
Energiekosten	1,02 € / l Diesel	0,18 € / kWh	0,19 € / kWh	5,7 € / kg H ₂	6,4 € / kg H ₂	5,5 € / kg H ₂	5,7 € / kg H ₂
CO₂ Preis (€ / t CO₂)	2023: 35 € Ab 2026: 60 €	–	–	–	–	–	–
Steigerung Energiekosten p. a.	2 %	2 %	2 %	2 %		2 %	
Wartungskosten	0,52 € / km	0,39 € / km	0,49 € / km	0,49 € / km		0,49 € / km	
Steigerung Wartungskosten p. a.	1 %	1 %	1 %	1 %		1 %	
Lebensdauer HV Batterie / Brennstoffzelle	–	HV-Batterie: 6 Jahre	HV-Batterie: 6 Jahre	HV-Batterie: 6 Jahre BZ: 10 Jahre		HV-Batterie: 6 Jahre BZ: 8 Jahre	
Kosten HV Batterie / Brennstoffzelle	–	700 € / kWh NMC	1.200 € / kWh LTO	1.000 € / kWh BZ 700 € / kWh NMC		1.000 € / kWh BZ 1.200 € / kWh NMC	
Kosten-degression p. a.	–	9 %	9 %	9 %		9 %	
Kosten Fahrpersonal	25 € / h	25 € / h	25 € / h	25 € / h		25 € / h	
Steigerung Fahrpersonal-kosten p. a.	1,5 %	1,5 %	1,5 %	1,5 %		1,5 %	

48 weiterführende Informationen zu Annahmen und Quellen für die Kostenrechnung finden sich im Detailbericht zur Wirtschaftlichkeitsanalyse im Starterset Elektromobilität

49 Rein elektrische Heizung

Die Energiekosten, die sich aus den Energieverbräuchen, welche für einen Einsatzkontext mit hügeliger Topographie und einer mittleren Durchschnittsgeschwindigkeit von 19 km/h (SORT 2) ermittelt wurden, und den spezifischen Energieträgerkosten ergeben, stellen einen wesentlichen Beitrag zu den TCO Kosten dar. Für Dieselkraftstoff wurden mit 1,015 €/l⁵⁰ Diesel angesetzt (siehe auch Kapitel 2.5.2). Weiterhin wurden die ab 2021 anfallenden CO₂ Zertifikatskosten entsprechend der gesetzlichen Vorgaben nach BEHG berücksichtigt. Für Strom und Wasserstoff wurden Bezugskosten von 0,18 und 0,19 €/ kWh bzw. von 5,48–6,36 €/kg/Hz angenommen. Die Kosten für die Energieversorgungsinfrastruktur inklusive deren Betrieb und Wartung⁵¹ sind darin jeweils nicht enthalten. Die Bandbreite bei Wasserstoff ergibt sich zum einen aus der Berücksichtigung von zwei Versorgungsoptionen (Anlieferung über 100 km und Vor-Ort-Erzeugung) und zum anderen aus dem unterschiedlichen Wasserstoffbedarf für BZ-REX und BZ Busse. Letztere weisen systembedingt einen höheren Wasserstoffbedarf auf, sodass aufgrund der größeren Abnahmemenge etwas niedrigere H₂-Bezugskosten angesetzt wurden.

Die km-bezogenen Wartungskosten wurden für die Batteriebusse aufgrund der geringeren Komplexität des elektrischen Antriebsstranges und der insgesamt niedrigeren Wartungsaufwände, z. B. Entfall Ölwechsel für Motor und Getriebe sowie weniger mechanische Bauteile, gegenüber dem Dieselbus um 25 % geringer eingeschätzt, (0,39 €/ km statt 0,52 €/ km). Für die BZ-basierten Fahrzeugkonzepte werden aufgrund der zusätzlichen gasführenden Komponenten (Brennstoffzelle, H₂-Speicher) im Vergleich zum Dieselbus annähernd gleiche Wartungskosten (0,49 €/ km) angesetzt. Für die kostenintensiven Antriebskomponenten HV-Batterie und Brennstoffzelle wurden Lebensdauern von 6 bzw. 8–10 Jahre angesetzt sowie eine jährliche Kosten Degression von 9 % veranschlagt, die sich primär aus technischen Weiterentwicklungen und steigenden Stückzahlen ergeben.

Für die Energie-, Wartungs- und Fahrpersonalkosten wurde eine jährliche Preissteigerungsrate im Bereich von 1–2 % angenommen.

Basierend auf den beschriebenen Eingangsgrößen ergeben sich die in der nachfolgenden Tabelle dargestellten Gesamtbetriebskosten, die je Antriebstechnologie für die untersuchte Flotte aus 12- und 18-m-Bussen ermittelt wurden. Während die Depotlader (BEV DL) aufgrund der hohen Fahrzeuganschaffungskosten und des angenommenen Fahrzeugmehrbedarfs die höchsten Mehrkosten gegenüber Dieselbussen ausweisen, ergeben sich für die Gelegenheitslader (BEV GL) die niedrigsten Mehrkosten. Die Brennstoffzellenbusse (BZ-Bus) weisen gegenüber den BZ-REX Bussen niedrigere Mehrkosten auf, wobei der Unterschied der TCO Kosten zwischen

diesen beiden Antriebstechnologien in der Größenordnung von 5 % liegt und damit als vergleichbar eingestuft werden kann. Insgesamt ordnen sich die brennstoffzellenbasierten Antriebe hinsichtlich der Mehrkosten zwischen den beiden Batteriebusvarianten ein.

TABELLE 12 Überblick Gesamtbetriebs-(TCO)kosten je Antriebstechnologie

Musterflotte (inkl. 3 % Kapitalverzinsung)	Diesel	BEV DL	BEV GL	BZ REX		BZ	
				H ₂ -Anlieferung (A)	H ₂ -Vor-Ort-Erzeugung (VO)	H ₂ -Anlieferung (A)	H ₂ -Vor-Ort-Erzeugung (VO)
Ohne Förderung							
Gesamtbetriebskosten [€/km]	3,39	4,68	3,94	4,46	4,49	4,25	4,26
Mehr-/Minderkosten		1,29	0,55	1,07	1,10	0,86	0,87
Mit Förderung							
Gesamtbetriebskosten	3,39	3,83	3,41	3,75	3,74	3,57	3,52
Mehr-/Minderkosten		0,44	0,02	0,36	0,35	0,18	0,13

Unter zusätzlicher Berücksichtigung der bestehenden Fördermöglichkeiten von 80 % auf die förderfähigen Fahrzeugmehrkosten und 40 % auf die Infrastruktur- und sonstige Kosten reduzieren sich die TCO Mehrkosten deutlich um mindestens 66 %. Für den Gelegenheitslader herrscht mit der angenommenen Förderung nahezu Kostenparität, während der geförderte Depotlader bei 0,44 €/ km Mehrkosten liegt und damit noch Mehrkosten von 13 % gegenüber dem Dieselantrieb aufweist. Die TCO-Mehrkosten für die BZ-basierten Busflotten belaufen sich auf 0,13 bis 0,36 €/ km und liegen damit 4–11 % über den Diesel-TCO Kosten. Die beiden betrachteten Wasserstoffversorgungsoptionen sind unter den hier getroffenen Annahmen aus wirtschaftlicher Sicht weitestgehend vergleichbar, wobei gerade beim angelieferten Wasserstoff der Ort der Wasserstoffproduktion und damit die Transportdistanz eine wesentliche Rolle für die Transportkosten spielt. Gerade bei einem Bezug von Wasserstoff aus erneuerbaren Ressourcen, also grünem Wasserstoff, können sich aktuell noch größere Transportdistanzen ergeben.

⁵⁰ Aktueller Netto-Einkaufspreis (2019) beim Unternehmen (Rückvergütung Steuer 4 Ct/l bereits berücksichtigt sowie 1 Ct für Abnahme größerer Mengen); (Preis für 2019 wegen Corona-Krise)

⁵¹ Betriebs- und Wartungskosten für die Ladeinfrastruktur bzw. H₂-Tankstelle wurden mit 2 % bzw. 4 % der Investitionskosten p. a. berücksichtigt.

Grundsätzlich gilt es die Förderung als Unterstützung des Markthochlaufs zu betrachten, bis sich ein selbsttragender Markt entwickelt hat. Dementsprechend besteht seitens der einzelnen Fördermittelgeber die Anforderung an die Anbieter von Fahrzeugen und zugehöriger Infrastruktur, die Kosten in Zukunft deutlich zu senken (z. B. durch Skaleneffekte und weitere Verbesserung und Optimierung der eingesetzten Komponenten bzw. der Technologie insgesamt) damit die aktuell hohe Förderintensität perspektivisch zurückgefahren werden kann. Die finanziellen Auswirkungen einer Reduktion der Investitionskosten wird im Rahmen der nachfolgenden Sensitivitätsanalyse näher untersucht.

Bevor nun aber einzig auf Basis der Wirtschaftlichkeitsanalyse einzelne Technologien favorisiert werden, sei an dieser Stelle nochmals auf die Erforderlichkeit einer Prüfung der betrieblichen und baulichen Umsetzbarkeit der jeweiligen Energieversorgungsinfrastruktur für die betrachteten lokal emissionsfreien Antriebskonzepte hingewiesen. Gerade beim Gelegenheitslader ist die betriebliche Umsetzbarkeit jeweils im Einzelfall konkret zu prüfen, d. h. erlaubt einerseits die Umlaufplanung mit den darin vorgesehenen Wendezeiten eine zuverlässige Nachladung der Busse auf Strecke und andererseits ist es jeweils an diesen Punkten im Streckennetz räumlich, baulich und stromnetztechnisch möglich eine oder ggf. auch mehrere Ladepunkte für die regelmäßige Nachladung der Gelegenheitslader zu implementieren. Weiterhin sind die jeweiligen Mehrkosten der einzelnen Antriebstechnologien abhängig von verschiedenen betrieblichen (z. B. Fahrzeugmehrbedarf), regulatorischen (z. B. Reduktion EEG-Umlage) und wirtschaftlichen (z. B. Fahrzeugpreis, Energiebezugskosten) Faktoren, wie die nachfolgende Sensitivitätsanalyse verdeutlicht.

Sensitivitätsanalyse

Wie bereits erwähnt, ist die wesentliche Zielsetzung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nicht, konkrete €/km Werte für die untersuchten Technologien zu bestimmen, sondern den Stakeholdern konkrete Hinweise zu geben, welchen Einfluss verschiedene Eingangsparameter auf die Gesamtkosten je Antriebstechnologie haben.

Im Folgenden werden daher verschiedene Eingangsparameter ceteris paribus analysiert, um ihre Auswirkungen auf die Gesamtkosten zu quantifizieren. Die Parameter im Einzelnen sind:

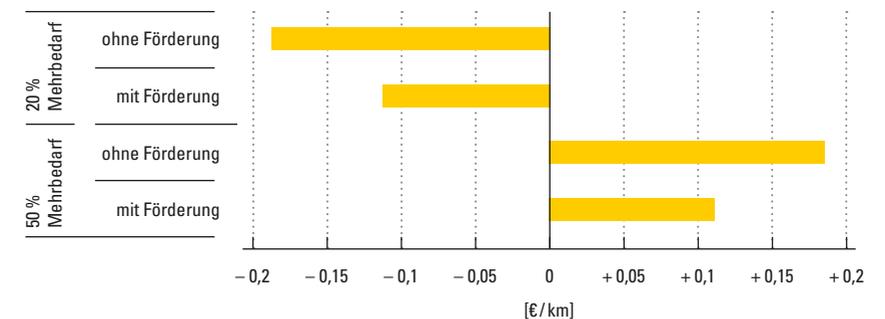
- Fahrzeugmehrbedarf
- CO₂ Preis
- Fahrzeug- bzw. Fahrzeugkomponentenkosten
- EEG-Umlage
- Anlieferungspreis Wasserstoff und Wirkungsgrad Elektrolyse
- Strombeschaffungskosten (Strompreis)

Die Ergebnisse werden unter Berücksichtigung einer 3 % Kapitalverzinsung dargestellt.

Fahrzeugmehrbedarf

Um die Anforderung an die Laufleistung von 3 Millionen Kilometer pro Jahr zu erfüllen, wird mit Blick auf die derzeit verfügbaren Batteriekapazitäten für eine Depotladerflotte im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ein Fahrzeugmehrbedarf von rund 35 % angenommen. Dies entspricht 18 zusätzlichen Busse gegenüber der Referenzflotte, davon 10 Solo und 8 Gelenkbusse. Die Variation des Fahrzeugmehrbedarfs hat für den Depotlader (BEV DL) von allen untersuchten Parametern die größte Wirkung auf die Gesamtbetriebskosten und damit die Mehr- / Minderkosten pro Kilometer. Eine Verminderung um 15 % Punkte, auf insgesamt 20 % Fahrzeugmehrbedarf, würde die durchschnittlichen Mehrkosten um 0,19 €/km auf 1,10 €/km senken. Eine Erhöhung um 15 % Punkte auf einen Fahrzeugmehrbedarf von insgesamt 50 % führt analog zu Mehrkosten von 0,19 €/km (siehe Abbildung 69). Die Ergebnisdarstellung erfolgt dabei bezogen auf die in der Ausgangsrechnung jeweils ermittelten Mehrkosten (siehe Tabelle 12), d. h. 0 €/km entspricht im Fall von Abbildung 69 ohne Förderung Mehrkosten von 1,29 €/km bzw. mit Förderung Mehrkosten von 0,44 €/km.

ABBILDUNG 69 Sensitivität Fahrzeugmehrbedarf Depotlader



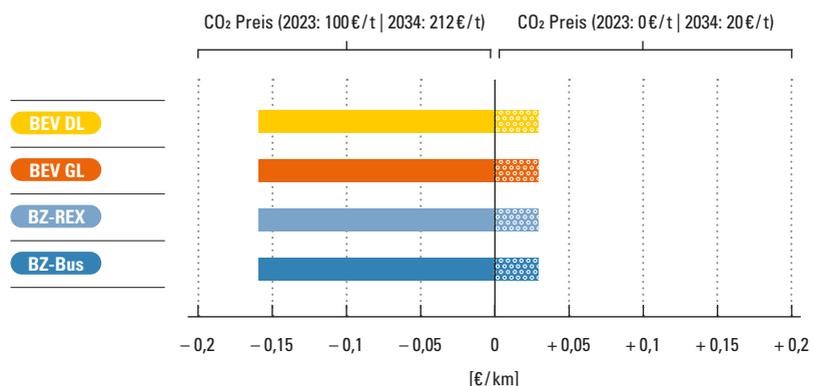
CO₂ Preis Diesel

Eine Erhöhung des CO₂-Preises hat gleichermaßen eine signifikante Auswirkung auf die Mehrkosten aller Bussysteme, da sie sich auf die Gesamtbetriebskosten der Dieselflotte als Bezugsgröße auswirkt. Bei einem erhöhten CO₂ Preis von 100 €/t CO₂ im Jahr 2023 und einem Anstieg auf 212 €/t CO₂ bis 2034 in Anlehnung an die vom Umweltbundesamt ermittelten Schadenskosten für CO₂⁵², statt der im Basis-szenario zugrunde gelegten 35 €/t CO₂ in 2023 und 60 €/t CO₂ ab 2026⁵³, sinken die durchschnittlichen Mehrkosten aller E-Busse um 0,16 €/km. Wird hingegen keinerlei CO₂-Preis für Diesel angesetzt, erhöhen sich die Mehrkosten durchgängig um 0,03 €/km (siehe Abbildung 70).

52 UBA Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten. Kostensätze, Februar 2019.

53 Entsprechend Brennstoffemissionshandelsgesetz, 2020. Letzter Zugriff 06.08.2021

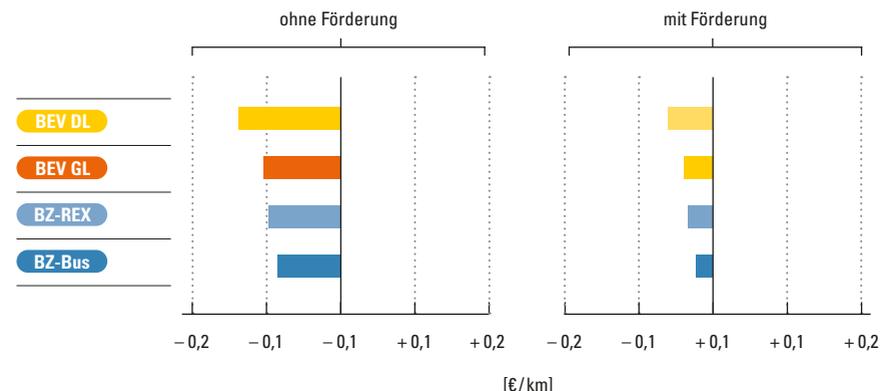
ABBDUNG 70 Sensitivität CO₂-Preis



Kostenminderung Buskosten

Grundsätzlich wird bei den E-Bussen eine Reduktion der Anschaffungskosten erwartet, aufgrund steigender Stückzahlen sowie der weiteren technologischen Entwicklung, gerade bei den Hauptantriebskomponenten wie HV-Batterie, Brennstoffzelle, H₂ Speichertanks, E-Motor etc. Unter der Annahme, dass sich Anschaffungskosten des jeweiligen Fahrzeuges um 50.000 € reduziert, ergibt sich der in Abbildung 71 ersichtliche Rückgang der Mehrkosten je Antriebstechnologie.

ABBDUNG 71 Sensitivität – 50.000 € Verringerung der Fahrzeuganschaffungskosten



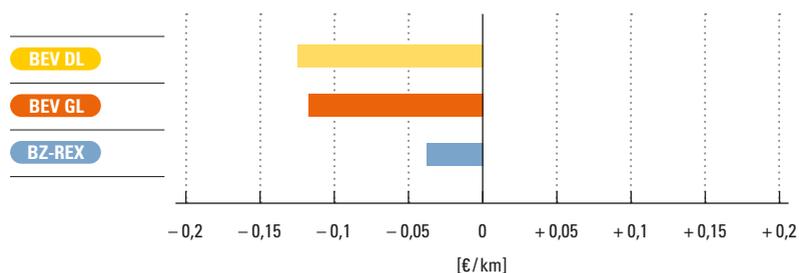
Dabei wurde die Kostenreduktion jeweils linear auf die verschiedenen Antriebskomponenten verteilt. Die so ermittelte angenommene Kostenreduktion für die Antriebskomponenten HV-Batterie und Brennstoffzelle wurde anteilig auch für die Tauschkomponenten (HV-Batterie und Brennstoffzelle) mitberücksichtigt, d. h. wurden die spezifischen Kosten der HV Batterie um 10 % gesenkt, sanken sie auch um 10 % für die nach 6 Jahren erforderliche Tauschbatterie. Die Kosten des Grundfahrzeuges wurden je Antriebstechnologie konstant gehalten. Bedingt durch den angenommenen Fahrzeugmehrbedarf bei den Depotladern, verzeichnet dieses Bussystem die größte Verringerung der Mehrkosten um 0,14 €/km ohne Förderung und um 0,06 €/km mit Förderung.

Reduktion EEG Umlage

Mit dem EEG 2021 kann ab einem jährlichen Fahrstrombedarf von 100 MWh nach § 65a⁵⁴ eine Reduktion der EEG-Umlage um 80 % vom Verkehrsunternehmen bei der BAFA beantragt werden. Die Auswirkungen dieser Reduktion betreffen folglich die Batterie- sowie die BZ-REX-Busse. Aus Abbildung 72 wird ersichtlich, dass sich die Mehrkosten für Depotlader aufgrund des höchsten Energieverbrauches am stärksten, konkret um 0,12 €/km reduzieren. Für Gelegenheitslader ergibt sich eine Reduktion um 0,10 €/km und für die Brennstoffzellenbusse mit Range Extender um 0,04 €/km. Hier wirkt sich der relativ niedrige Stromverbrauch entsprechend aus. Für den benötigten Wasserstoff wurde bereits eine weitgehende EEG-Befreiung unterstellt, so dass die EEG-Reduktion keinen Einfluss auf die Mehrkosten von BZ-Bussen hat.

54 Erneuerbares Energien Gesetz 2021, § 65a. Letzter Zugriff: 30.7.2021. Noch unter EU beihilferechtlichem Prüfungsvorbehalt.

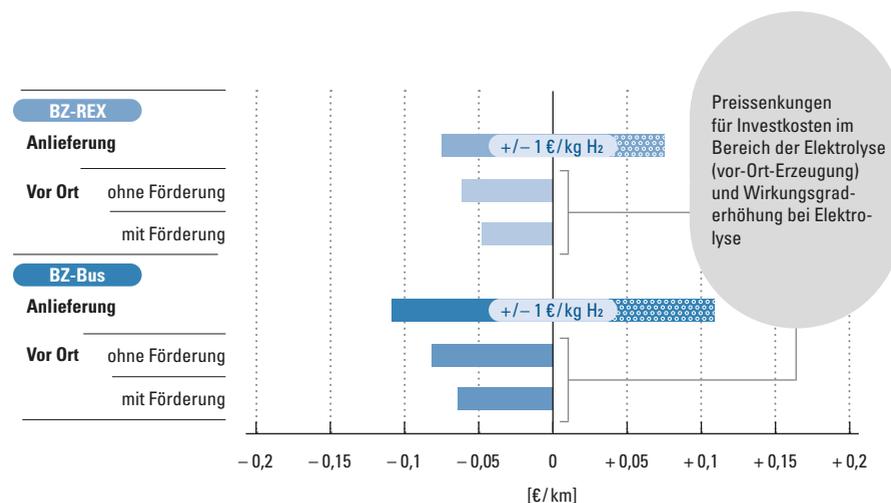
ABBILDUNG 72 Sensitivität – 80 % EEG



H₂ Bezugskosten und Optimierung Elektrolyseur

Änderungen in den Kosten der Wasserstoffbereitstellung haben aufgrund des höheren Wasserstoffverbrauchs größere Auswirkungen auf die reinen BZ-Busse als auf die BZ REX (siehe Abbildung 73). Eine Reduktion der Bezugskosten von Lieferwasserstoff um 1 €/kg (von 5,48 €/kg auf 4,48 €/kg) vermindert die Mehrkosten für Anlieferungskonzepte um 11 Cent auf 0,75 €/km für die reinen BZ-Busse und um 8 Cent auf 0,99 €/km für die BZ-REX. Eine Verteuerung des Wasserstoffs führt analog zu Mehrkosten von 0,11 bzw. 0,08 €/km.

Weiterhin werden für die bei der Vor-Ort-Erzeugung eingesetzte Wasserelektrolysetechnologie im Zuge des angestrebten Markthochlaufs eine Reduktion der Investitionskosten für Elektrolyseure erwartet. Parallel dazu wird auch eine weitere Steigerung der Energieeffizienz aufgrund technologischer Fortschritte prognostiziert. Für die Sensitivitätsanalyse wurde dementsprechend eine Reduktion der Anschaffungskosten für die Elektrolyse auf 400 €/kW und eine relative Wirkungsgradsteigerung um 10 % angesetzt. Dies führt zu einer Minderung der Mehrkosten für die Vor-Ort-Erzeugung um 6 Cent auf 1,04 €/km für die BZ-REX und um 0,08 €/km auf 0,78 €/km für die BZ-Busse.

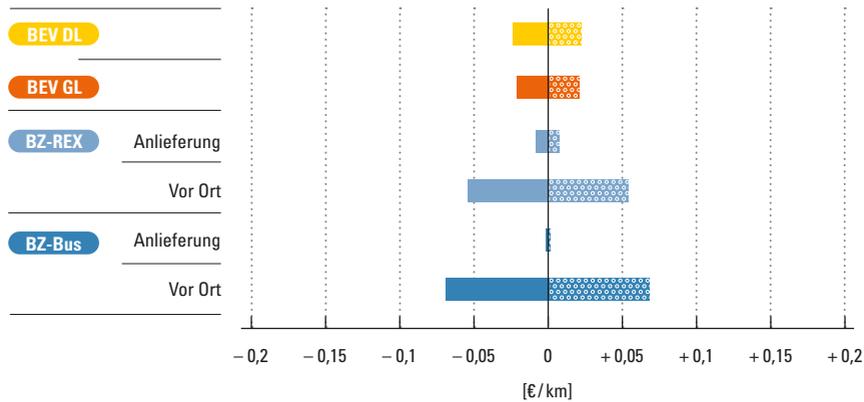
ABBILDUNG 73 Sensitivität H₂-Preis und Wirkungsgrad Elektrolyse

Strompreis

Eine Variation der Strombezugskosten um ± 1 ct/kWh beeinflusst die Mehrkosten von Depotlader- und Gelegenheitssystem in Abhängigkeit des Energieverbrauchs der Batteriebusse jeweils um $\pm 0,02$ €/km (siehe Abbildung 74).

Beim BZ-REX wirkt sich die Variation des Strompreises um ± 1 ct/kWh im Anlieferungsfall aufgrund des relativ geringen Bedarfs an elektrischer Energie mit ± 1 ct/km überschaubar auf die Mehrkosten aus, da der angelieferte Wasserstoff davon nicht betroffen ist. Betrachtet man hingegen die Vor-Ort-Erzeugung, hat die Variation der Strombezugskosten einen deutlich wahrnehmbaren Einfluss. In diesem Fall ändern sich die Mehrkosten für den BZ-REX um $\pm 0,05$ €/km, im Falle des BZ-Busses aufgrund des höheren Wasserstoffverbrauchs um $\pm 0,07$ €/km. Im Falle einer Versorgung der BZ-Busse mit angeliefertem H₂ führt die Variation der Stromkosten zu einer minimalen Änderung der Mehrkosten von $\pm 0,001$ €/km, da sich diese nur auf die für die Verdichtung des Wasserstoffs benötigte Strommenge auswirkt.

ABBILDUNG 74 Sensitivität Preis Elektroenergie



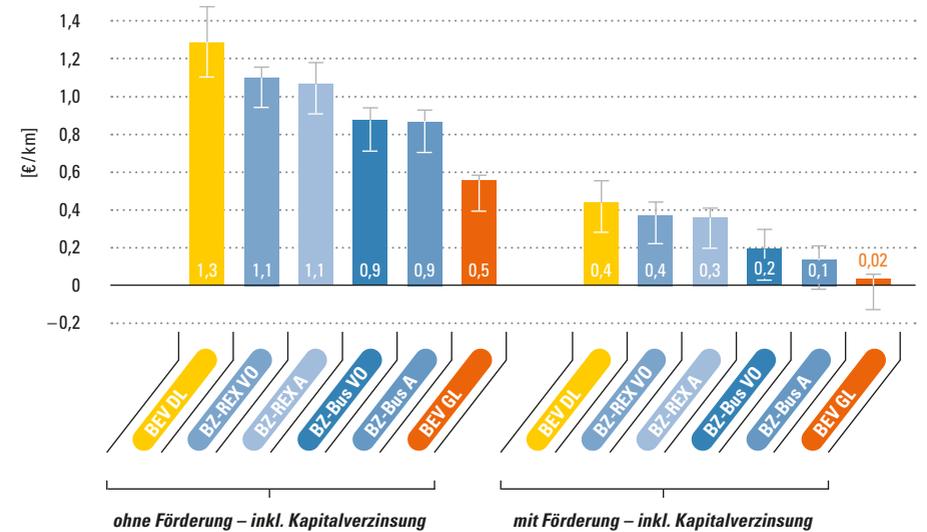
Gesamtbetrachtung

Abbildung 75 zeigt nochmals die Mehrkosten der betrachteten E-Bussysteme einschließlich der ermittelten Bandbreiten, die sich über die Variation der einzelnen untersuchten Parameter im Rahmen der Sensitivitätsanalyse ergeben haben.

Dabei wird als Bandbreitenbalken auf die in der Ausgangsrechnung ermittelten Mehrkosten je Technologie (siehe Tabelle 12) die Steigerung bzw. Verringerung der Mehrkosten desjenigen Parameters dargestellt, der im Rahmen der Sensitivitätsanalyse mit den gewählten Parameterwerten den größten Einfluss auf die Mehrkosten der jeweiligen Technologie aufgewiesen hat. Die noch bestehende Lücke zur TCO-Parität mit der Dieselreferenzflotte kann also bei der angenommenen Förderung teilweise schon durch das Eintreten dieser oder auch anteilig mehrerer Parameterveränderungen entsprechend der Sensitivitätsanalyse geschlossen werden.

Zusätzlich zu den im Kontext zu Tabelle 12 gemachten Ausführungen zum Thema Auswahl einer einzelnen Antriebstechnologie ist anzumerken, dass die Mehrkosten der einzelnen Technologien maßgeblich von den spezifischen Einsatz- und Betriebsbedingungen vor-Ort, der weiteren Marktentwicklung zu Fahrzeugen und Energieversorgungsinfrastruktur und den regulatorischen Rahmenbedingungen wie z. B. CO₂ Preise auf Diesel oder Umlagebefreiungen für Strom und Wasserstoff abhängen.

ABBILDUNG 75 Übersicht Mehr-/Minderkosten je E-Bus-Antriebsform gegenüber einer Dieselbusflotte



2.5.4. Zusammenfassung der Ergebnisse zur Wirtschaftlichkeit

Fazit

- Die Energieträgerkosten stellen gemeinsam mit den Fahrpersonal-, Wartungs- und Instandhaltungskosten für die Fahrzeuge die relevanten Eingangsgrößen für die Betriebskosten dar.
- Dabei machen die eigentlichen Strombeschaffungskosten, die die Stromerzeugung inkl. CO₂-Kosten, Vertriebskosten und Marge beinhalten, für das Bezugsjahr 2020 nur ein Viertel des Strompreises aus.
- Es wurden Strombezugskosten in Höhe von 18 ct/kWh ermittelt und für die Berechnungen zugrunde gelegt.
- Mit der Verabschiedung des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes 2021 wurde entsprechend § 65a eine Reduktion der EEG für elektrisch angetriebene Busse um 80 % ab einem Mindestverbrauch von 100 MWh/a ermöglicht.

- Die Netzentgelte werden in Abhängigkeit von den Nutzungsstunden der beim Netzbetreiber angemeldeten Netzanschlussleistung erhoben. Der Einsatz eines Lademanagements, das für die Verstetigung der Ladeleistung und damit für eine Vermeidung von Lastspitzen beim Nachladen der Batterie- und BZ-REX-Busse sorgt, trägt dementsprechend zu einer Reduktion der Energiekosten bei.
- Die Kosten für Lieferwasserstoff liegen aktuell im Bereich 4,50–9 Euro netto je kg Wasserstoff.
- Unter Berücksichtigung einer Kapitalverzinsung von 3 % ergeben sich Mehrkosten für den Einsatz von Depotladern von 1,29 €/km und bei Gelegenheitsladern von 0,55 €/km. Durch die Nutzung der aktuell verfügbaren Fördermöglichkeiten sinken diese Kosten für Depotladern auf 0,44 €/km und für Gelegenheitsladern auf 0,02 €/km.
- Die derzeit bereitgestellte Förderung ist neben der Klimazielssetzung gedacht, um den Markthochlauf für ZEV Busse zu unterstützen. Sobald sich ein selbsttragender Markt etabliert hat, gilt es aus Sicht der Fördermittelgeber die Förderintensität zukünftig spürbar zu reduzieren. Dies bedarf erheblicher Anstrengungen seitens der Bus- und Infrastrukturhersteller, um die dafür benötigten Kostenreduktionen zu realisieren.
- Bei der Anlieferung von Wasserstoff liegen die Mehrkosten gegenüber einer Dieselbusflotte bei 1,07 €/km für BZ-REX und 0,86 €/km für BZ-Busse. Die Mehrkosten bei einer Vor-Ort-Erzeugung liegen für BZ-REX bei 1,10 €/km und für BZ-Busse bei 0,87 €/km. Die Kosten bei der Anlieferung von Wasserstoff verringern sich bei der Nutzung von Fördermöglichkeiten bei BZ-REX auf 0,36 €/km und bei BZ-Busse auf 0,18 €/km. Wird der Wasserstoff vor Ort erzeugt, sinken die Mehrkosten unter Zuhilfenahme von Fördermöglichkeiten für BZ-REX auf 0,35 €/km und für BZ-Busse auf 0,13 €/km.
- Zu beachten ist dabei, dass die berechneten Mehrkosten von dem betrieblichen Einsatzkontext, der Marktentwicklung der Fahrzeuge und den regulatorischen Rahmenbedingungen abhängen.
- Die noch bestehende Lücke zur TCO-Parität mit einer Dieselreferenzflotte kann bei der angenommenen Förderung teilweise schon durch das Eintreten einer oder auch anteilig mehrerer Parameterveränderungen, wie etwa CO₂-Preis und Änderung der Investitionskosten, entsprechend der Sensitivitätsanalyse geschlossen werden.

2.6. Leitfaden und Entscheidungstool

Unter dem Motto "Wissen ist die beste Basis für Entscheidungen" wurde für die Erstinformation von Verkehrsunternehmen, der Politik aber auch der allgemeinen Öffentlichkeit ein Leitfaden erarbeitet, der in kompakter Form Wissen über emissionsfreie Busantriebe, deren notwendige Infrastruktur sowie die mit der Beschaffung und dem Betrieb verbundenen Kosten enthält.

In dem als Broschüre⁵⁵ und als Website⁵⁶ verfügbaren Leitfaden werden

- Batteriebusse (Volllader, Gelegenheitslader),
- Brennstoffzellenbusse (mit und ohne Range-Extender-Funktion) sowie
- (Hybrid-)Oberleitungsbusse

näher beschrieben (siehe Abbildung 76).

⁵⁵ Die Broschüre ist im Starterset Elektromobilität verfügbar.

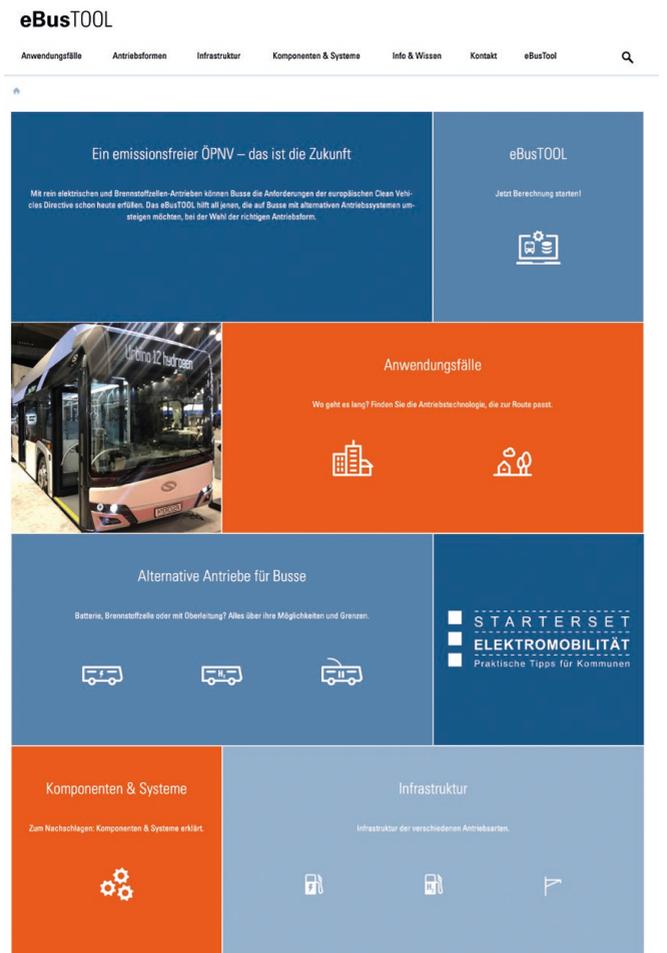
⁵⁶ Die interaktive Onlineversion des Leitfadens ist verfügbar unter www.ebustool.de.

ABBILDUNG 76 Deckblatt und Inhaltsverzeichnis der gedruckten Variante des Leitfadens



Die Online-Variante des Leitfadens (siehe www.ebustool.de) ermöglicht verschiedene Einstiegsmöglichkeiten, um sich über die betrachteten Antriebsformen zu informieren. Neben einem Einstieg über die Anwendungsfelder (Stadt- vs. Regionalverkehr) kann auch direkt auf Informationen über die einzelnen Antriebsformen zurückgegriffen werden (siehe Abbildung 77).

ABBILDUNG 77 Startseite der Online-Version des Leitfadens



⁵⁷ Das Online-Entscheidungs-
werkzeug ist
ebenfalls verfügbar unter
www.ebustool.de.

Der Leitfaden stellt alle wesentlichen Informationen und Daten zu den betrachteten Antriebsformen zur Verfügung. Nutzerinnen und Nutzer werden in die Lage versetzt, sich ein Bild über die Antriebsformen zu machen, um auf fehlendem Wissen basierende Vorfestlegungen zu vermeiden.

Die Einführung von Bussen mit alternativen Antrieben ist jedoch ein sehr komplexer Planungs- und Entscheidungsprozess, der nicht zuletzt von den jeweiligen Rahmenbedingungen in jedem Verkehrsunternehmen geprägt ist. Weder der Leitfaden noch das darauf aufbauende Online-Entscheidungswerkzeug haben daher den Anspruch, einem Verkehrsunternehmen die Entscheidung abzunehmen.

Auch das Online-Entscheidungswerkzeug⁵⁷ liefert nur Informationen zur Entscheidungshilfe. Es gibt jedoch Verkehrsunternehmen die Möglichkeit, anhand ihrer Betriebsabläufe auf ihre Randbedingungen zugeschnittene Informationen über

- Zusatzbedarfe hinsichtlich der Fahrzeuge, der Fahrpersonalstunden sowie der Leerkilometer und
- der damit verbundenen Zusatzkosten im Kontext der Gesamtkosten

zu generieren. Als Basis dienen die für Dieselbusse optimierten Umlaufpläne, anhand derer die Antriebsformen

- Batteriebusse als Voll- bzw. Gelegenheitslader sowie
- Brennstoffzellenbusse

miteinander verglichen werden.

Die verwendeten Algorithmen beruhen im Wesentlichen auf den über etwa ein Jahrzehnt hinweg entwickelten Fraunhofer-Inhouse-Tool *IVInet*. *IVInet* basiert auf einer sog. Energiebilanzierung und ermöglicht die Bewertung ganzer Netze auf der Basis von Umlaufplänen. In den Algorithmen werden berücksichtigt:

- die planmäßigen Betriebsabläufe in Form von Umlaufplänen
- über einen Tagesverlauf hinweg variierte Verspätungen
- Reisegeschwindigkeiten
- Besetzungsgrade
- Höhenprofile
- Betriebshofregime (Verfügbarkeit von sog. Kurzläufers) für Ersatzfahrten zur Sicherstellung von Lademöglichkeiten über den Tag hinweg

Grundsätzlich ist der Zugang zu der Website offen, jedoch zielt das Entscheidungswerkzeug in erster Linie auf Verkehrsunternehmen ab, die über die notwendigen Detailinformationen, z. B. bzgl. der Betriebsabläufe verfügen.

Durch die Nutzerin oder den Nutzer kann ein eigenes Nutzerkonto angelegt werden, auf welchem selbst zu benennende Einsatzfälle definiert und die zugehörigen Daten hochgeladen werden können. Unabhängig davon, dass sich ein Verkehrsunternehmen nicht unter seinem Klarnamen anmelden muss, ist der Zugang zu den hochgeladenen Daten nur dem Verkehrsunternehmen selbst und dem Administrator möglich.

Der Nutzerin oder dem Nutzer werden je Antriebsform durch das Programm Empfehlungen zu Reichweiten, Batteriegrößen und spezifischen Energieverbräuchen unterbreitet, die in vorgegebenen Grenzen variiert werden können. Die Nutzerin oder der Nutzer kann darüber hinaus die Form der Heizung sowie der Klimatisierung wählen.

Hinsichtlich der anzusetzenden Kostensätze werden ebenfalls Empfehlungen unterbreitet, die wiederum in vorgegebenen Grenzen geändert werden können.



Quelle: SWM/MVG, 2021

3 Zusammenfassung

Mit jährlich rund 10 Milliarden beförderten Fahrgästen in Deutschland ist der ÖPNV bereits heute sowohl in Ballungsgebieten als auch im ländlichen Raum ein unerlässlicher Baustein zur Gewährleistung der individuellen Mobilität der Bevölkerung. Unter Klimaschutz Gesichtspunkten gilt es, den Umstieg von Dieseln auf emissionsfreie, effiziente und leise Busse mit alternativen Antrieben zu realisieren, um gerade den busbasierten ÖPNV klima- und umweltfreundlicher und damit zukunftsfähiger zu gestalten. Aufbauend auf der Erprobung von Hybridbussen stellt die Vollelektrifizierung des Antriebsstranges den aktuell am intensivsten verfolgten Technologieansatz für emissionsfreie Antriebssysteme von Nahverkehrsbusen dar. Entsprechend verfolgt die Bundesregierung als Teil des jüngst überarbeiteten Klimaschutzprogrammes das konkrete Ziel, dass 2030 die Hälfte der Stadtbusse elektrisch fährt. So soll eine Halbierung der Emissionen aus dem ÖPNV bis 2045 gegenüber 2019 umgesetzt werden.

Diese Zielsetzung wird u. a. durch die Clean Vehicles Directive (CVD) unterstützt. Mit Inkrafttreten der CVD bzw. dem Saubere-Fahrzeuge-BeschaffungsGesetz – (Saubere-FahrzeugBeschG), das die Umsetzung der europäischen Clean Vehicles Directive in nationales Recht regelt, ergibt sich nun eine eindeutige gesetzliche Vorgabe zur Beschaffung und zum Betrieb im Sinne des Gesetzes „emissionsfreier“ Busse. Die Kategorie der Klasse-I-Stadtbusse ist damit die erste Fahrzeugkategorie, für die ein solch verbindliches Beschaffungsziel für emissionsfreie Antriebe eingeführt wurde. Eine weitere Verschärfung des Anteils emissionsfreier Busse im Rahmen des europäischen Grünen Deals erscheint nicht ausgeschlossen. Auf Basis der aktuellen

Vorgaben der CVD ergibt sich für Busse mit alternativen Antrieben allein in Deutschland bereits kurzfristig bis Ende 2025 ein Marktpotenzial in der Größenordnung von jährlich 2.000 Fahrzeugen für „saubere“ Busse bzw. von jährlich 1.000 Fahrzeugen für „emissionsfreie“ Busse. Bis 2030 steigert sich dieses Potenzial aufgrund der 2. Stufe von CVD Richtlinie weiter auf 3.000 saubere bzw. 1.500 emissionsfreie Busse.

Die Einführung und anschließende (Teil-) Umstellung auf emissionsfreie Busse mit vergleichsweise neuartigen Antriebskomponenten wie Hochvoltbatterien oder Brennstoffzellen samt Wasserstoffdrucktanks, inklusive der Errichtung der jeweils benötigten Energieversorgungsinfrastruktur für Strom und/oder Wasserstoff, stellt die Verkehrsunternehmen vor sowohl technisch-betriebliche als auch vor wirtschaftliche Herausforderungen. Um die Verkehrsunternehmen bei der Bewältigung dieser Herausforderungen zu unterstützen, haben die Bundesregierung, wie auch die Bundesländer und die europäische Union, verschiedene Förderprogramme zur Marktinitiierung und zum Markthochlauf aufgelegt. Das BMDV fördert zur Investitionsunterstützung die Anschaffung von alternativ angetriebenen Bussen und der zugehörigen Lade- bzw. Tankinfrastruktur. Auch das BMUV fördert die Anschaffung von Batteriebussen und der erforderlichen Ladeinfrastruktur im ÖPNV. Zusätzlich fördert das BMDV über die beiden genannten Programme sowie die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS) Forschungs- und Entwicklungsprojekte (F&E) zur weiteren Unterstützung der Marktvorbereitung und des Markthochlaufs für Elektromobilitätsanwendungen.

Mit dem Ziel, die Einzelergebnisse der im Rahmen der verschiedenen Förderprogramme kofinanzierten Projekte zur Einführung von emissionsfreien Nahverkehrsbussen zusammenzuführen, wurde seitens des BMDV eine programmatische Begleitforschung initiiert. Diese bündelt und führt im Sinne einer Gesamtschau die Erkenntnisse und Erfahrungen der einzelnen Projekte aus den drei Förderbereichen Fahrzeugbeschaffung, Elektromobilitätskonzepte und F&E-Projekte zusammen und bewertet diese.

Im Fokus dieser im Rahmen der Begleitforschung Bus durchgeführten Technologieanalyse und -bewertung der eingesetzten emissionsfreien Antriebssysteme stehen die Bewertungskategorien

- Praxistauglichkeit und Einsatzreife
- Energieeffizienz
- Umweltwirkungen
- Wirtschaftlichkeit

Die wesentlichen Ergebnisse werden im Anschluss an diesen Abschnitt dargestellt.

Die Bewertung erfolgte unter Berücksichtigung der jeweiligen Einsatzbedingungen und der von den Verkehrsunternehmen formulierten Anforderungen an die Technologie, z. B. hinsichtlich Reichweite, Verfügbarkeit oder möglichst minimaler Mehrkosten.

Im Ergebnis verfolgt die Begleitforschung Bus das Ziel, insbesondere bei den Verkehrsunternehmen und kommunalen Aufgabenträgern als wesentliche Akteure für die Planung und Umsetzung eines möglichst attraktiven ÖPNV-Angebots, ein besseres Verständnis für die technische bzw. betriebliche Eignung der einzelnen emissionsfreien Antriebstechnologien im Kontext der eigenen spezifischen Einsatzbedingungen und für die damit verbundenen ökonomischen Auswirkungen zu schaffen.

Aufbauend auf den Ergebnissen und Erkenntnissen der durchgeführten Technologiebewertung erfolgt die Aufbereitung und Bereitstellung von Informationen und Handreichungen zur Unterstützung der Verkehrsunternehmen und Aufgabenträger bei der Systemauswahl. Dies wird in unterschiedlichen Formen und Formaten erbracht, um eine gute, zielgruppengerechte Zugänglichkeit der bereitgestellten Informationen und Ergebnisse zu gewährleisten.

Die vom BMDV und BMUV 2012 initiierte Arbeitsgruppe „Innovative Antriebe Bus“ (AG Bus) dient in diesem Zusammenhang als Plattform für den direkten Informations- und Erfahrungsaustausch zwischen den verschiedenen Akteuren, Es handelt sich dabei um Verkehrsunternehmen, Industrie (Bus- und Komponentenhersteller), Forschungsinstitutionen, Fördermittelgeber (Bundesministerien und teilweise Landesministerien) und um das Begleitforschungsteam. Im Rahmen der regelmäßig stattfindenden Treffen wurden die Ergebnisse der Begleitforschung direkt den teilnehmenden Akteuren kommuniziert und zur Verfügung gestellt, ganz im Sinne der Zielsetzungen der AG Bus:

- technologieoffene Ergebnisse aus den einzelnen Fördervorhaben zusammenzuführen
- teilnehmende Unternehmen und Organisationen zu vernetzen, einen regen Austausch untereinander zu fördern, Wissen zu vertiefen
- neue Akteure zu befähigen, in das Thema Elektromobilität einzusteigen
- Identifikation weiterer Handlungsfelder und gegebenenfalls erforderlicher F&E Bedarfe

Nicht zuletzt die stetig zunehmende Anzahl an Teilnehmern der AG-Bus-Treffen dokumentiert das Interesse der verschiedenen Stakeholder an den Ergebnissen.

Neben der direkten Kommunikation innerhalb der AG Bus wurden die vielfältigen Ergebnisse der Begleitforschung Bus über Vorträge auf Fachveranstaltungen (z. B. BMDV-Fachkonferenz „Elektromobilität vor-Ort“, VDV E-Buskonferenz, Electric Vehicle Symposium), Veröffentlichungen in Fachliteratur (z. B. „Der Nahverkehr“) und über das Starterset Elektromobilität einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

So wurde zur Erstinformation über emissionsfreie Bussen und der dazugehörigen Infrastruktur ein Leitfaden für Busse mit alternativen Antrieben entwickelt, welcher sowohl als Printpublikation als auch in interaktiver Form unter <http://www.ebustool.de> verfügbar ist. Darauf aufbauend wurde ein Online-Entscheidungswerkzeug entwickelt, das Verkehrsunternehmen anhand der von ihnen bereitgestellten Eingangsdaten zu ihren eigenen, spezifischen betrieblichen Abläufen vor Ort (z. B. Umlaufpläne und optionalen Kostendaten) indikative Informationen liefert. Sie betreffen die zu erwartenden Zusatzbedarfe hinsichtlich der Fahrzeuge, der Fahrpersonalstunden sowie der Leerkilometer und der damit verbundenen Zusatzkosten im Kontext der Gesamtkosten.

Mit Blick auf die Komplexität der erforderlichen Planungs- und Entscheidungsprozesse für die Einführung von Bussen mit alternativen Antrieben, die nicht zuletzt von den jeweiligen Rahmenbedingungen in jedem Verkehrsunternehmen geprägt sind, ist es wichtig anzumerken, dass weder der Leitfaden noch das Online-Entscheidungswerkzeug einem Verkehrsunternehmen die Entscheidung abnehmen kann. Wichtig ist eine technologieoffene Herangehensweise, um das geeignetste Antriebssystem für den eigenen Betrieb zu identifizieren und um ggf. auf fehlendem oder punktuell Wissen basierende Vorfestlegungen zu vermeiden.

Darüber hinaus wurde eine Reihe von Veröffentlichungen zu verschiedenen Themen erstellt. So wurde neben dem vorliegenden Abschlussbericht eine Förderprojektübersicht, eine Analyse der mit BMDV-Förderung erstellten E-Mobilitätskonzepte mit ÖPNV-Bezug und eine Gesetzeskarte Elektromobilität im ÖPNV erarbeitet. Zusammen mit den hier im Bericht in den verschiedenen Kapiteln referenzierten Detailberichten zu einzelnen Bewertungskriterien sind diese im Starterset Elektromobilität⁵⁸ unter dem Baustein ÖPNV zu finden und stellen ein umfassendes Informationsangebot für Verkehrsunternehmen und kommunale Aufgabenträger dar.

Nachfolgend werden die wesentlichen Ergebnisse der Begleitforschung Bus zu den vier Bewertungskategorien Praxistauglichkeit, Energieeffizienz, Ökologie und Wirtschaftlichkeit präsentiert. Die an der Begleitforschung beteiligten Verkehrsunternehmen haben durch die Bereitstellung von Betriebsdaten und ihre Erfahrungen aus der Praxis diese Bewertung überhaupt erst ermöglicht.

Praxistauglichkeit und Energieeffizienz

Batteriebusse

Für Batteriebusse liegen die Betriebsdaten von mehr als 130 Bussen von 8 verschiedenen Herstellern vor, zum Teil über einen Zeitraum von mehr als zwei Jahren. Davon sind 117 Depotlader (112 Solobusse, 5 Gelenkbusse) und 14 Gelegenheitslader (4 Midibusse, 9 Solobusse, 1 Gelenkbus). Diese wesentlich umfangreichere Datenbasis im Vergleich zum letzten Statusbericht der AG Bus aus dem Jahr 2016 (Faktor 8 mehr Fahrzeuge und Faktor 27 höhere Laufleistung) ermöglicht eine belastbare Bewertung vor allem der 12-m-Batteriebusse.

Die eingesetzten Batteriebusse weisen im Betrachtungszeitraum eine Verfügbarkeit von insgesamt ca. 87 % (Depotlader 87 %, Gelegenheitslader 88 %) auf. Dies ist eine deutliche Steigerung im Vergleich zum letzten Statusbericht der AG Bus (2016), in welchem die Depotlader eine Verfügbarkeit von 72 % und die Gelegenheitslader eine Verfügbarkeit von 76 % aufwiesen. Dabei machen die Instandsetzungsmaßnahmen am E-Antriebsstrang mit 28 % den deutlich kleineren Teil aus, während 60 % der Ausfälle auf allgemeine Instandhaltungs- und Reparaturmaßnahmen am konventionellen Fahrzeugteil zurückzuführen sind. Um einen reibungslosen Betriebsablauf zu gewährleisten, wird eine Ladeinfrastruktur mit idealerweise 100 % Verfügbarkeit benötigt. Aktuell kann der Ladeinfrastruktur mit einer durchschnittlichen Verfügbarkeit von 96 % bereits eine hohe Verfügbarkeit bescheinigt werden.

Die mittlere tägliche Laufleistung der Solobusse lag für die Depotlader bei 133 km und bei den Gelegenheitsladern bei 179 km. Die höhere Laufleistung bei den Gelegenheitsladern, entspricht den Erwartungen an das Gelegenheitsladungskonzept, da durch das regelmäßige untertägige Nachladen auf der Linie, zumindest in der Theorie, keine Reichweitenlimitierung besteht. Als Bezugspunkt kann die mittlere Tagesfahrleistung der Dieselsebusse herangezogen werden, die bei gut 220 km liegt.

Vergleicht man die bisher erzielten Tagesfahrleistungen mit den Reichweitenanforderungen der Verkehrsunternehmen, so zeigt sich, dass dies derzeit eine der zentralen Herausforderungen für den Einsatz von Batteriebussen ist. Mit knapp 80 % fordert die überwiegende Mehrheit der mehr als 30 teilnehmenden Verkehrsunternehmen eine tägliche Reichweite von mindestens 200 km, 20 % sieht sogar eine tägliche Reichweite von mehr als 350 km als erforderlich an.

⁵⁸ Siehe <https://www.starterset-elektromobilitaet.de/Bausteine/OEPNV>

Die beiden relevanten Faktoren für die Reichweite sind der spezifische Energieverbrauch je km und die installierte Batteriekapazität. Die mittlere installierte Batteriespeicherkapazität liegt bei den Solofahrzeugen mit Depotladung bei knapp 300 kWh und bei den Gelegenheitsladern bei 230 kWh. Bezüglich des Energiebedarfs spielt das gewählte Heizungskonzept die entscheidende Rolle. Wenn im Sinne eines vollständig emissionsfreien Betriebes rein elektrisch geheizt wird, reduzieren sich die aktuell erzielbaren Reichweiten gerade in den Wintermonaten auf bis zu 50 % und liegen somit weit unter den geforderten Reichweiten. Bei Gelenkbussen verstärken sich diese Auswirkungen, da die mittlere installierte Batteriekapazität mit 410 kWh für die Depotlader zwar größer ausfällt, aber aufgrund der gesteigerten Fahrzeuggröße der Energiebedarf sowohl für den Fahrantrieb als auch die Fahrgastraumheizung und -klimatisierung entsprechend höher ausfällt.

Demgegenüber hat sich mit fast 90 % der geförderten Verkehrsunternehmen die überwiegende Mehrheit für das Depotladungskonzept entschieden. Der primäre Grund hierfür ist, dass eine Depotladung in einem ersten Schritt zur Technologieeinführung aus Planungssicht einfacher zu realisieren ist. Dies ist damit zu begründen, dass die benötigte Ladeinfrastruktur auf dem eigenen Betriebshof errichtet wird und somit für eine Ladeinfrastruktur im öffentlichen Raum, z. B. an Endhaltestellen, kein Bedarf besteht. Zudem steht gerade bei der Einführung einer neuen Antriebstechnologie die Sammlung von Erfahrungen hinsichtlich Betriebsplanung und -durchführung im Vordergrund. So können die Batteriebusse zunächst auf den vorhandenen kürzeren Umläufen zum Einsatz kommen, ohne dass ein Fahrzeugmehrbedarf erforderlich ist. Das heißt, bei einem anfänglich noch überschaubaren Anteil von Batteriebussen an der Fahrzeugflotte ist ihre verringerte Reichweite, gerade beim Depotladungskonzept, akzeptabel. Mit steigendem Anteil an der Flotte sind aber Konzepte erforderlich, welche die zuverlässige Versorgung des Liniennetzes oder zumindest Teile desselben mit einem möglichst geringen Fahrzeugmehrbedarf gewährleisten. Schließlich birgt dieser Mehrbedarf Herausforderungen, nicht nur aus wirtschaftlicher Sicht aufgrund der verursachten Mehrkosten, z. B. in der Beschaffung, sondern gerade auch aus betrieblicher Sicht, z. B. aufgrund des größeren Platzbedarfs für die Fahrzeugabstellung und der durch die zusätzlichen Ein- und Ausrückfahrten erhöhten Leerkilometerzahl. Es ergeben sich verschiedene Optionen, diese Reichweitenlücke zu adressieren:

- Vergrößerung der Energiespeicherkapazität, entsprechende Ankündigungen von den Herstellern sind erfolgt bzw. wurden bereits eingeführt. Auch wenn hier noch relevante Potenziale vorhanden sind, lässt sich die Batteriekapazität mit Blick auf die Energiedichte und die physikalischen Eigenschaften nicht beliebig erweitern (siehe dazu auch Kapitel 4.2)
- Prüfung, inwiefern Gelegenheitsladung untertäglich auf zumindest einigen Linien möglich ist

- Verminderung des Energieverbrauchs durch Leichtbau sowie durch eine Verbesserung des Energiemanagements, gerade was die Fahrzeugheizung und -klimatisierung betrifft
- Ökologische Optimierung des Einsatzes von brennstoffbasierten Zusatzheizungen, z. B. durch Einsatz von Brennstoffen aus erneuerbaren Energien wie Biodiesel oder Bioethanol zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen sowie eine Minimierung der entstehenden Schadstoffemissionen
- Prüfung des Einsatzes von Brennstoffzellenbussen, die eine höhere Reichweite aufweisen
- Anpassung der Umlaufpläne, sodass den geringeren Fahrzeugreichweiten bei der Bedienung des Liniennetzes Rechnung getragen wird. Der erforderliche Mehrbedarf hängt von der jeweiligen Situation vor Ort ab und kann über eine Änderung der Umlaufpläne weiter reduziert werden (siehe Tabelle 3). Eine Reduktion des Mehrbedarfs hat entsprechend positive Auswirkungen auf die Umweltwirkungen und die Kosten (siehe Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse des Mehrbedarfs auf Ökologie (2.4.2) und Wirtschaftlichkeit (2.5.3))

In Bezug, auf den sich ergebenden und damit zu bezahlenden Energieverbrauch sind neben dem unmittelbar fahrzeugseitig ermittelten Energiebedarf noch weitere zusätzliche Energiebedarfe zu berücksichtigen, die sowohl Fahrzeug als auch Ladeinfrastruktur bedingt sind. Diese ergeben sich zum einen aus dem regelmäßig erforderlichen Batteriebalancing zur Anpassung des Ladungsniveaus der einzelnen Batteriezellen und den Ladungsverlusten der Batterie, zum anderen aus dem Vorkonditionieren des Fahrzeuges sowie den Wandlungsverlusten, die bei der Umspannung des Wechselstroms von Mittel- auf Niederspannung und bei der Umrichtung auf Gleichstrom auftreten. In Summe ist zusätzlich zum fahrzeugseitig ermittelten Energiebedarf nochmals mit einem zusätzlichen Energiebedarf in der Größenordnung von 25–30 %, bezogen auf den fahrzeugseitigen Energiebedarf zu rechnen, der ebenfalls über die Ladeinfrastruktur und den vorgelagerten Netzanschluss bereitzustellen ist.

Die Bewertung des derzeitigen technischen Reifegrades der Batteriebusse durch die Verkehrsunternehmen fällt überwiegend positiv aus. So schätzt knapp die Hälfte der Verkehrsunternehmen die Busse nach ersten Betriebserfahrungen als serienreif (TRL 9) und ein weiteres Viertel als nah an der Serienreife (TRL 8) ein. Die zu Beginn des Betriebes formulierte Erwartungshaltung von mehr als 90 % der Verkehrsunternehmen, dass die Batteriebusse nach einem Jahr serienreif sein sollten, wird damit noch nicht in Gänze erfüllt. Bezüglich der Ladeinfrastruktur schätzen zwei Drittel der Verkehrsunternehmen die Technologie bereits als serienreif und nochmal knapp 15 % als nah an der Serienreife ein, sodass knapp 80 % der Verkehrsunternehmen das Batteriebusssystem als serienreif bzw. seriennah bewerten. Ein ähnliches Bild bietet sich bei der Verfügbarkeit. Die von den Verkehrsunternehmen zu Beginn des

Einsatzes der neuen Antriebstechnologien formulierte Erwartungshaltung bezüglich der Verfügbarkeit wurde in der überwiegenden Mehrheit der Fälle (75 %) erreicht. Im Betrieb erreichen die Batteriebusse nahezu 90 % Verfügbarkeit. Dieser Wert liegt nur geringfügig unter den Verfügbarkeiten der Dieselsebusse (durchschnittlich 93 %) als Referenztechnologie. Generell ist zu beobachten, dass die Verkehrsunternehmen an die Batteriebusstechnologie, die erst seit deutlich weniger als 10 Jahren in der Breite am Markt eingeführt wurde, bereits durchaus hohe Erwartungen hinsichtlich Verfügbarkeit und Einsatzreife haben, die von der Technologie auch bereits weitgehend erfüllt werden kann.

Brennstoffzellenbusse

Brennstoffzellenbusse konnten erstmalig in die Bewertungsaktivitäten der Begleitforschung aufgenommen werden. So liegen Daten von 45 Brennstoffzellenbussen vor, die bei zwei Verkehrsunternehmen eingesetzt werden und einen Zeitraum von bis zu 16 Monaten abdecken. Dabei handelt es sich ausschließlich um Solobusse eines Herstellers. Damit können Einschätzungen zum Brennstoffzellenbussystem gegeben werden. Diese sind aber mit Blick auf die aktuell noch überschaubare Datenbasis von 800.000 gefahrenen Kilometern im Vergleich zu 5,6 Mio. km bei den Batteriebussen noch nicht vollumfänglich belastbar.

Die Verfügbarkeit der Brennstoffzellenbusse liegt derzeit im Mittel bei rund 78 % und weist damit noch Optimierungsbedarf auf. Hauptausfallursachen sind das Brennstoffzellensystem und auch die konventionellen nicht antriebsbezogenen mechanischen Komponenten. Gerade die Ersatzteilverfügbarkeit ist hier als Grund für die verlängerten Standzeiten zu nennen. Bezüglich der Tankstellenverfügbarkeit liegen derzeit erste Daten für eine der vier genutzten Tankstellen über einen Zeitraum von 15 Monaten vor, da die übrigen sich noch im Probetrieb befinden bzw. noch nicht an die Verkehrsunternehmen übergeben sind. Für diese Tankstelle liegt die Verfügbarkeit im Betrachtungszeitraum bei aktuell gut 93 %, wobei sich die Verfügbarkeit in den letzten 6 Monaten mit Verfügbarkeitswerten > 97 % positiv entwickelt hat.

Der Verbrauch liegt im Mittel bei ca. 9 kg Hz/100 km. Analog zu den Batteriebussen steigt bei niedrigen Temperaturen der Energieverbrauch der BZ-Busse ebenfalls an, allerdings in geringerem Umfang. So stieg der Verbrauch in den Wintermonaten um ca. 1 kg Hz/100 km gegenüber dem Jahresmittelverbrauch an. Damit zeigen die Busse Reichweiten von mindestens 300 km auch in den Wintermonaten und erfüllen damit die Erwartungen der Verkehrsunternehmen.

Mit Blick auf die derzeit noch relativ geringen mittleren täglichen Laufleistungen zeigt sich die Relevanz der effizienten betrieblichen Integration der Fahrzeugbetankung in die täglichen Fahrzeugversorgungsprozesse. So kann eine dezentrale Lage der Wasserstofftankstelle erhebliche personelle Mehraufwendungen nach sich ziehen. Ein Lösungsansatz wäre die Reorganisation der betrieblichen Abläufe. So könnte beispielsweise die Betankung durch Fahrpersonal über die Integration in die Ein- oder Aussetzfahrt des Fahrzeuges integriert werden, statt dass sie durch Werkstattpersonal durchgeführt werden. Die Tankdauer liegt im Mittel bei 10–12 Minuten und erfüllt damit die Betreibererwartungen.

Insgesamt wird der technische Reifegrad der Busse von den Verkehrsunternehmen aktuell im Bereich Prototyp im Feldtest (TRL 7) bis seriennah (TRL 8) bewertet und entspricht damit weitestgehend der zu Beginn des Einsatzes formulierten Erwartungshaltung. Es zeigt sich, dass die Brennstoffzellenbusse vom Reifegrad her noch nicht das Niveau von Batteriebussen erreicht haben. Dies entspricht aber mit Blick auf den Entwicklungsstand bzw. auf den erst noch anstehenden Markthochlauf den Erwartungen an die Technologie. Die Erwartungshaltung für die Einsatzreife der Wasserstofftankstellen weist eine größere Bandbreite auf. So wurden in einem Projekt bewusst mehrere Tankstellenkonzepte errichtet, die noch Forschungscharakter aufweisen. Es ergab sich eine Erwartungshaltung vom Nachweis der Funktionsfähigkeit (TRL 3) bis hin zur Serienreife (TRL 9). Diese Erwartungen werden im Fall der „Forschungstankstellen“ erfüllt und derzeit im Versuchsbetrieb in vereinfachter Einsatzumgebung (TRL 5) bewertet. Bei einer weiteren Tankstelle wird die Erwartung der Serienreife (TRL 9) mit der Einschätzung eines seriennahen Reifegrades (TRL 8) annähernd erfüllt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Praxistauglichkeit und Einsatzreife der elektrischen Busse sich weiter verbessert hat, diese aber auch noch weiter zu steigern sind. Bildet beim Batteriebus gerade die Reichweite ein Schwerpunktthema für weitere Optimierungen, so geht es beim BZ-Bussystem vor allem darum, die Verfügbarkeit sowohl der Fahrzeuge als auch der Wasserstofftankstellen zu steigern. Grundsätzlich gilt es bei der Umstellung der Antriebstechnologie vom konventionellen Verbrennungsmotor auf elektrische Antriebe eine Reihe technischer und betrieblicher Aspekte zu berücksichtigen. Deren Relevanz kann zum Teil mit weiteren technischen Entwicklungen weiter reduziert werden. Zum Teil lassen sich diese aber auch aller Voraussicht nach nicht in Gänze rein technisch kompensieren, sondern sind zusätzlich durch Anpassungen in der Betriebsplanung zu adressieren, wie z. B. das Reichenweitenthema betreffend.

Ökologie

Durch die Verlagerung der Umweltwirkungen vom eigentlichen Busbetrieb auf die Energieträgerbereitstellung und auch auf die Fahrzeugherstellung, ist es erforderlich, den gesamten Lebenszyklus elektrisch angetriebener Bussysteme zu betrachten. Nur so ist es möglich, eine Bewertung der ökologischen Auswirkungen des Einsatzes von Nahverkehrsbussen gerade für elektrisch angetriebene Bussysteme vornehmen zu können. Bei Betrachtung des gesamten Lebenszyklus zeigt sich, dass für eine Realisierung der Emissionsminderungspotenziale in relevantem Umfang der Einsatz erneuerbarer Energieträger eine unabdingbare Grundvoraussetzung ist. So lassen sich durch den Einsatz von Strom aus den erneuerbaren Quellen Wind und PV Einsparungen von 75–85 % bei den Treibhausgasen (THG) und 50–75 % bei den Stickoxidemissionen (NOx) erzielen. Dies gilt sowohl für den direkten Betrieb der Batteriebusse als auch für die Wasserstoffherzeugung zum Betrieb der BZ-Busse gegenüber dem Dieselbus mit Euro-VI-Norm über den gesamten Lebenszyklus.

Die Umweltlasten der Herstellung (hier THG und NOx) fallen im Vergleich zu Dieselbussen mit den gewählten Fahrzeugkonfigurationen bei Batteriebussen in etwa doppelt so hoch und bei BZ-Bussen ca. 1,5-mal so hoch aus. Dabei ist die Hochvoltbatterie aus ökologischer Sicht die relevanteste Komponente. Somit führt die angestrebte Kapazitätssteigerung zur Reichweitenerhöhung prinzipiell zu höheren Umweltlasten in der Busherstellung. Allerdings ist davon auszugehen, dass die prognostizierten zunehmenden Anteile an erneuerbaren Energien im Strom- bzw. Energiemix in Deutschland und auch international dem entgegenwirken. So sinken nicht nur die spezifischen Emissionen pro kWh Elektroenergie und damit die Emissionen aus der Nutzungsphase, sondern auch die Emissionen aus der Herstellung der Komponenten und damit der Fahrzeuge oder zum Beispiel der Photovoltaikmodule. Des Weiteren ist absehbar, dass u. a. die Emissionen, die mit der Batterieherstellung oder auch mit anderen relevanten Antriebskomponenten wie H₂-Speicher oder Brennstoffzelle verbunden sind, zukünftig weiter sinken werden. Dies ergibt sich aus der kontinuierlichen Weiterentwicklung der Technologien (veränderte Zellchemie (z. B. Festkörperbatterie)), Erhöhung der Energiedichte, Substitution kritischer Metalle, Verlängerung der Lebensdauer durch höhere Zyklenzahl etc.) sowie durch die zunehmende Industrialisierung der Komponentenfertigung und die damit einhergehenden Effizienzgewinne hinsichtlich Ressourcen und Energiebedarf. Gerade durch die Verwendung von Wind- und PV-Strom lassen sich höhere THG- und NOx-Emissionen in der Herstellung der E-Busse meistens bereits innerhalb des ersten Betriebsjahrs kompensieren. Weiterhin bestehen für Hochvoltbatterien, als eine der Schlüsselkomponenten, nach ihrem ersten Lebenszyklus im Batteriebus Nachnutzungskonzepte z. B. als stationärer Energiespeicher oder auch zur Wiederaufbereitung, an, die sich ebenfalls positiv auf die Gesamtumweltbilanz auswirken.

59 siehe AG Bus: Statusbericht 2015/16 Hybrid und Elektrobusprojekte in Deutschland (Link)

Neben dem lokal emissionsfreien Betrieb der E-Busse sind auch noch die reduzierten Lärmemissionen im Betrieb als Vorteil zu benennen. Hier zeigten die im letzten Statusbericht der AG Bus⁵⁹ vorgestellten Ergebnisse der vom IKA der RWTH Aachen durchgeführten Lärmemissionsmessungen bereits ein Reduktionspotenzial der linear skalierten Lautheit der Busse mit elektrischem Antriebsstrang um ca. 2/3 in allen Betriebsmodi (An-/Abfahrt, beschleunigte Vorbeifahrt).

Wirtschaftlichkeit

Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsanalyse wurden die E-Bussysteme Batteriebus mit Depotladung und mit Gelegenheitsladung sowie BZ-Bus und BZ-REX untersucht. Die durchgeführte Wirtschaftlichkeitsanalyse zur Ermittlung der Gesamtbetriebskosten der unterschiedlichen E-Bussysteme im Sinne einer TCO-Kostenermittlung verdeutlicht, dass der Einsatz von E-Bussen kurz- bis mittelfristig mit Mehrkosten verbunden ist. Diese liegen ohne Förderung bei 0,5–1,3 €/km bzw. 16–38 %. Dabei haben eine Reihe von Parametern einen relevanten Einfluss auf die Mehrkosten. So ist für den Batteriebus mit Depotladung der sich in Anhängigkeit der Umlaufplanung ergebende Fahrzeugmehrbedarf eine entscheidende Größe für die Mehrkosten. Besteht die Möglichkeit die Umlaufplanung unter Berücksichtigung der technisch-betrieblichen Leistungsfähigkeit, d. h. Reichweite des Batteriebusse im jeweiligen Einsatzkontext, anzupassen, kann der Fahrzeugmehrbedarf so gering wie möglich gehalten werden. Die H₂-Bereitstellungskosten spielen gerade beim BZ-Bus, aber auch beim BZ-REX eine wesentliche Rolle. Auf der anderen Seite lässt sich durch einen steigenden CO₂-Preis für fossilen Diesel die Kostenlücke für alle E-Bussysteme gleichermaßen reduzieren.



Quelle: Mainzer Mobilität 2021

Batteriebus- wie Brennstoffzellenbussysteme können derzeit nur unter Nutzung von Förderungen und unter bestimmten Bedingungen annähernd wirtschaftlich bzw. mit Mehrkosten im Bereich von < 15 % eingesetzt werden. Hier sind zusätzliche Anstrengungen erforderlich, sei es durch weitere technische Entwicklungen oder auch durch Skaleneffekte, um die Mehrkosten für den Einsatz der E-Busse zu verringern, gerade auch vor dem Hintergrund der Anforderung der Fördermittelgeber, die aktuell hohe Förderintensität perspektivisch zurückfahren zu können sobald sich ein selbsttragender Markt entwickelt hat.

Der Batteriebus mit Gelegenheitsladung stellte sich unter den für die Wirtschaftlichkeitsanalyse der Musterflotte getroffenen Annahmen als günstigste Technologieoption dar. Bevor nun aber einzig auf Basis der Wirtschaftlichkeitsanalyse einzelne Technologien favorisiert werden, sei an dieser Stelle nochmals auf die Erforderlichkeit einer Prüfung der betrieblichen und baulichen Umsetzbarkeit der jeweiligen Energieversorgungsinfrastruktur für die betrachteten lokal emissionsfreien Antriebskonzepte hingewiesen. Gerade beim Gelegenheitslader ist die betriebliche Umsetzbarkeit jeweils im Einzelfall konkret zu prüfen. Es ist zu klären, ob die Umlaufplanung mit den darin vorgesehenen Wendezeiten eine zuverlässige Nachladung der Busse auf Strecke erlaubt. Zum anderen muss festgestellt werden, ob es jeweils an diesen Punkten im Streckennetz räumlich, baulich und stromnetztechnisch möglich ist, eine oder ggf. auch mehrere Ladepunkte für die regelmäßige Nachladung der Gelegenheitslader zu implementieren. Weiterhin verdeutlicht die durchgeführte Sensitivitätsanalyse nochmals anschaulich, dass die jeweiligen Mehrkosten der einzelnen Antriebstechnologien unter den jeweils spezifischen Einsatzrandbedingungen, wie bereits zuvor skizziert, von verschiedenen Faktoren abhängen. Hier sind betriebliche (z. B. Fahrzeugmehrbedarf), regulatorische (z. B. Reduktion EEG-Umlage) und wirtschaftliche (z. B. Fahrzeugpreis, Energiebezugskosten) Faktoren zu nennen.

Im Ergebnis kann für die untersuchten E-Bussysteme eine Indikation zu den wirtschaftlichen Auswirkungen auf die künftigen Haushalts- und Ressortplanungen für den straßengebunden ÖPNV gegeben werden.

4 Ausblick

Was werden die Treiber der weiteren Entwicklung und Verbreitung emissionsfreier Antriebe im ÖPNV sein?

Um das angestrebte Ziel einer möglichst weitreichenden Umstellung des busbasierten ÖPNV auf alternative Antriebe als Beitrag zum Klima- und Umweltschutz zu erreichen, gilt es den erkennbar begonnenen Markthochlauf für lokal emissionsfreie Busse zu stabilisieren und weiter zu intensivieren. Hierzu bedarf es der fortgesetzten nachhaltigen Stärkung der Innovationskraft der Akteure auf breiter Front hinsichtlich weiterer technischer Entwicklung und der fortlaufenden Optimierung der betrieblichen Abläufe und Infrastruktur.

Kurzfristig gilt es, die Rahmenbedingungen weiter so anzupassen, dass regulatorische Hürden reduziert werden. Langwierige Planungs- und Genehmigungsprozesse müssen vereinfacht und Investitionssicherheit sichergestellt werden. Wer heute die Umstellung auf alternativ angetriebene Fahrzeuge angeht, muss langfristige Sicherheit haben, dass sich die Grundlagen seiner Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nicht durch kurzfristig veränderte Förderregime und unklare Befreiungstatbestände bei gesetzlichen Abgaben (z. B. EEG-Umlage) während der Laufzeit verschlechtern. Die temporäre Befreiung von Netzentgelten und anderen Umlagen sind Beispiele für entsprechende politische Handlungsfelder, die im Detailbericht zu Förderprogrammen und politische Rahmenbedingungen, verfügbar auf dem Starterset Elektromobilität⁶⁰, ausführlich beschrieben werden. Es gilt die begonnene Entwicklung eines sich selbsttragenden Marktes konstruktiv unterstützend zu begleiten.

⁶⁰ Verfügbar unter <https://www.starterset-elektromobilität.de/Bausteine/OEPNV>

Konkrete Vorschläge für politische Handlungsfelder, um den Hochlauf der emissionsarmen Antriebsformen zu unterstützen, werden in Kapitel 4.1 „Handlungsoptionen“ vorgestellt. Dabei gilt es zusätzlich zu einer dem angestrebten Markthochlauf dienlichen Ausgestaltung der gesetzlichen Vorgaben, auch die Akzeptanz für die alternativen Antriebstechnologien bei den Verkehrsunternehmen und deren Kunden weiter zu verbessern.

Auf Basis der Analyse der betrieblichen Anforderungen sowie ergänzender Daten wird im Kapitel 4.2 „Technische Weiterentwicklung Komponenten“ eine Perspektive für die Entwicklung von Energiespeichersystemen dargestellt und Optionen zur Minimierung des Energiebedarfs aufgezeigt. Weiterhin werden die Möglichkeiten von Synergien durch die Mitnutzung von vorhandenen Bahninfrastrukturen durch Batterie- und Oberleitungsbusse bewertet und der Einfluss von Standardisierungsaktivitäten auf die Verbreitung emissionsfreier Antriebe betrachtet.

In Kapitel 4.3 „Marktpotenzial“ wird die Frage erörtert, wie sich die Marktpotenziale für erneuerbare Antriebe technologiespezifisch mittelfristig entwickeln werden. Eine abschließende Prognose kann hier heute noch nicht erfolgen. Wie die Analyse im Kapitel 4.2 zeigt, betragen annähernd 20 % der Umläufe bei den VUs mehr als 300 km. Brennstoffzellenbusse können diese Anforderung zwar heute schon erfüllen, weisen zum Teil jedoch noch höhere Mehrkosten auf als Batteriebusse, die diese Reichweite jedoch nicht erfüllen können. Eine technologieoffene Förderung von Batterie- und Brennstoffzellenbussen ist also weiterhin notwendig.

Schließlich wird in Kapitel 4.4 „Sektorkopplung“ die langfristige Bedeutung emissionsfreier Antriebe im Kontext der Energiewende betrachtet. So stellen die Batterien von Bussen, als mobile oder im „zweiten Leben“ auch als stationäre, elektrochemische Speicher eine kurzfristige Speicheroption für die fluktuierende Erzeugung erneuerbarer Energien dar. Technisch ist das bereits heute möglich, doch auch hier sind noch eine Reihe regulatorischer Hürden zu bewältigen (siehe Kapitel 4.1).

Bei Brennstoffzellenbussen führt die Transformation der volatilen erneuerbaren Energie in Wasserstoff zu einer zeitlichen Entkopplung von Strombezug für die Elektrolyse des Wasserstoffs und Betankung der Busse. Durch die Nutzung von Strommengen, die z. B. in windstarken Zeiten von großen Wasserstoffproduktionsanlagen absorbiert werden, kann damit auch die Gesamteffizienz eines auf erneuerbare Energien ausgerichteten Energiesystems gesteigert werden, obwohl die Wirkungsgradverluste des einzelnen Brennstoffzellenbusses zusammen mit den Effizienzverlusten der H₂-Erzeugung höher sind als die des Batteriebusses.

4.1. Handlungsoptionen

Auf Grundlage der im Rahmen der Begleitforschung Bus ermittelten Ergebnisse und Erkenntnisse ergeben sich verschiedene Handlungsoptionen für die weitere Verbreitung emissionsfreier Antriebe für die Politik. Diese können sowohl auf Bundesebene als auch auf Landesebene umgesetzt werden.

Folgende Handlungsfelder wurden im Bereich der Elektromobilität im ÖPNV bezüglich der weiteren Etablierung eines sich selbst tragenden Marktes identifiziert:

- **Fördermöglichkeiten:** Schaffung von finanziellen Anreizen zur Beschaffung von emissionsfreien Bussystemen (Fahrzeuge und Infrastruktur), Studien/Konzepte, F&E Vorhaben etc.
- **Umwelt, Regularien & Prozesse:** Mindestvorgaben für den Einsatz von Bussen im ÖPNV definieren, die wiederum Eingang in Regularien finden (z. B. CVD), Steuerung von Beschaffungsprozessen über gesetzliche und regulatorische Vorgaben (z. B. CVD), Vereinfachung der Prozesse für die Fördermittelbeantragung zur Beschaffung von Fahrzeugen und Energieversorgungsinfrastruktur
- **Wissensvermittlung und Akzeptanz:** Aufbau und Verbreitung von Wissen bzgl. alternativer Antriebstechnologien und Infrastruktursystemen von Elektrobussystemen zur Steigerung der Akzeptanz der Technologien bei Verkehrsunternehmen, Aufgabenträgern und Fahrgästen

Förderung Fahrzeuge und Energieinfrastruktur

Förderung Fahrzeugbeschaffung

In Bezug auf die finanzielle Unterstützung von Verkehrsunternehmen durch staatliche Förderung gilt es, die Marktentwicklung bzw. den Markthochlauf zu stärken bzw. zu verstetigen. Wie in der Wirtschaftlichkeitsanalyse aufgezeigt wurde, ist aufgrund der derzeitigen und auch in näherer Zukunft zu erwartenden Mehrkosten des Einsatzes der emissionsfreien Antriebstechnologien eine Förderung der erforderlichen Investitionen in Fahrzeuge und Infrastruktur (Energieversorgung, Werkstätten, ggf. Mehrbedarf an Abstellflächen) weiterhin notwendig. So kann neben der Förderung der Anschaffungsmehrkosten von emissionsfreien und sauberen Bussen auch die Förderung von verlängerten Garantieleistungen auf Schlüsselkomponenten eine Rolle spielen. In Bezug auf die Fahrzeuge sollte eine Förderung der Anschaffungsmehrkosten für emissionsfreie und saubere Busse als Investitionskostenzuschuss fortgeführt und ausgeweitet werden. Eine entsprechende Förderrichtlinie seitens des BMDV wurde

im 3. Quartal 2021 veröffentlicht. Zudem existiert seit 2018 eine Förderung durch das BMUV. Gerade auch mit Blick auf den Einfluss der derzeitigen Pandemielage befindet sich der ÖPNV aufgrund von Lockdowns und Kontaktbeschränkungen in einer unsicheren Lage, was langfristige Investitionsentscheidungen zusätzlich erschwert. Daher ist die möglichst umfassende und längerfristig fortgesetzte Bereitstellung von Fördermitteln notwendig, um den Umstieg auf emissionsfreie Antriebstechnologien dauerhaft sicherzustellen und die Etablierung eines sich selbst tragenden Marktes gelungen ist. Gleichzeitig besteht die Forderung seitens der Fördermittelgeber nach Auslaufen aktueller Förderprogramme mit zum Teil sehr hoher Förderintensität, die Förderquoten zukünftig zurückfahren zu können. Dies bedingt die anspruchsvolle Aufgabe, dass die Anbieter von emissionsfreien Bussen und zugehöriger Ladeinfrastruktur (siehe nächster Abschnitt) mittel- bis langfristig relevante Kostenreduktionen zu realisieren haben.

Förderung Infrastrukturbeschaffung

Neben der Fahrzeugförderung ist jedoch auch die Förderung der Infrastruktur, z. B. für Anschaffungskosten zu berücksichtigen. Hier sollte ein besonderes Augenmerk daraufgelegt werden, die Kopplung der Infrastrukturförderung von der Förderung der Fahrzeuge zu trennen, um bei der Planung der Infrastruktur bereits einen breiteren über den ÖPNV hinausgehenden zukünftigen Nachfragehochlauf berücksichtigen zu können. So wird es als zielführend angesehen, im Fall von Wasserstoff lokale und (über-)regionale Synergien durch den möglichst breiten Einsatz von Wasserstoff und der zugehörigen Versorgungsinfrastruktur (Pipelines, H₂-Tankstellen etc.) zu suchen bzw. zu schaffen, da über solche Skaleneffekte die H₂-Versorgung bezahlbar wird. So gilt es die H₂-Versorgung für andere Bereiche neben dem ÖPNV parallel anzugehen, z. B. zur Versorgung weiterer Mobilitätsanwendungen (Pkw, leichte und schwere Nutzfahrzeuge, Schiene etc.) sowie anderer Sektoren wie Industrie, Gewerbe / Handel / Dienstleistungen oder private Haushalte über die bestehende Gasinfrastruktur. Um einer zunehmend komplexer werdenden Wasserstofflogistik Rechnung zu tragen und um frühzeitig auf die möglichen Marktszenarien vorbereitet zu sein, bietet sich die Förderung von Machbarkeitsstudien und ersten Pilotanwendungen an, um die Umsetzung einer solchen H₂ Infrastruktur ökonomisch wie auch technisch zu bewerten.

Was für den größer angelegten Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur gilt, gilt analog für die Ertüchtigung der verschiedenen Stromnetzebenen zur Versorgung von ÖPNV und weiteren Nutzern aus anderen Bereichen und Sektoren mit elektrischer Energie.

Förderung Forschung und Entwicklung

Parallel zur Förderung von Investitionskosten besteht weiterhin ein nicht unerheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf bei Komponenten und ihrer Integration in das Gesamtsystem bestehend aus Fahrzeug und Energieversorgungsinfrastruktur (Lade-/Tankinfrastruktur).

Die technische Weiterentwicklung der Komponenten hinsichtlich Lebensdauer, Bauraum, Gewicht, Produktionskosten etc. und die Optimierung ihrer möglichst effizienten Steuerung und Vernetzung stellen ein zentrales Stellglied in der zukünftigen Entwicklung emissionsfreier Antriebe dar. Ein besonderes Augenmerk bedürfen dabei die Energiespeichersysteme und die Minimierung des Energiebedarfs, sowohl Fahrzeug- als auch Infrastrukturseitig.

Regularien und Prozesse, Umwelt

Clean Vehicles Directive

Die ab August 2021 geltende CVD bewirkt durch verbindliche Mindestbeschaffungsquoten für emissionsfreie Busse (mind. 22,5 % bis Ende 2025, ab 2026 mind. 32,5 %) eine entsprechende Nachfrage für diese Technologien. Durch eine Steigerung des Ambitionsgrades bezüglich des Anteils emissionsfreier Busse im Rahmen der künftigen Vergabe von Verkehrsleistungen durch den lokalen Aufgabenträger können hier weitere Impulse gesetzt werden.

Berücksichtigung gesellschaftliche Vollkosten / CO₂ Preis

Gerade aus Sicht der Aufgabenträger sollten bei der Vergabe von Verkehrsleistungen im Sinne einer gesellschaftlichen Vollkostenrechnung auch die externen Umweltkosten (CO₂, Schadstoffe (NO_x, Feinstaub, Lärm etc.) in der wirtschaftlichen Bewertung der erhaltenen Angebote und damit bei der Vergabe mitberücksichtigt werden. Diese bleiben in einer reinen Betriebskostenbetrachtung bislang außen vor. Mit der Festlegung eines auch tatsächlich zu entrichtenden CO₂-Preises ist hierzu ein erster Schritt seitens der Politik unternommen worden. Allerdings zeigt die Sensitivitätsanalyse der Wirtschaftlichkeitsrechnung, dass das derzeitige Preisniveau noch nicht ausreichend ist, um eine echte Steuerungswirkung zu entfalten.

Vereinfachung und Beschleunigung der Prozesse zur Fördermittelbeantragung

Mit Blick auf die aktuellen Vorlaufzeiten und Prozesse zur Beantragung und Ausschüttung von Fördermitteln ist eine Vereinfachung anzustreben. Der Aufwand und die Zeiträume, die zum Erhalt einer Förderung erforderlich sind, stellen derzeit noch eine Zugangshürde für den verstärkten Einsatz der emissionsfreien Antriebstechnologien dar. Stand heute müssen diese Beantragungsprozesse der üblicherweise durchgeführten Ausschreibung zur Beschaffung von Fahrzeugen und Infrastruktur durch das Verkehrsunternehmen vorgeschaltet sein (siehe auch Kapitel 2.1.2). Hier wäre eine Option, dass Förderantrag und Ausschreibungsprozess zur Beschaffung nicht strikt hintereinander durchzuführen sind, sondern zeitgleich ablaufen können oder sich zumindest teilweise zeitlich überschneiden dürfen. Durch diese „Parallelisierung“ könnte sich ein zeitliches Straffungspotenzial von bis zu 6 Monaten ergeben.

Berücksichtigung erforderliche Vorlaufzeiten bei Vergabe

Weiterhin ist seitens des Aufgabenträger bei der Ausschreibung von Verkehrsleistungen eine Berücksichtigung der erforderlichen Vorlaufzeiten von mindestens 18–24 Monaten für die Fördermittelbeantragung, die Planung und Beschaffung der Fahrzeuge sowie der Errichtung der erforderlichen Energieversorgungsinfrastruktur einzuplanen. Im Kontrast hierzu steht die aktuelle Vergabepaxis von teilweise lediglich 6–9 Monaten Vorlaufzeit bis zur Aufnahme des Linienbetriebs. Hier ist deutlich mehr Vorlauf vorzusehen.

Verlängerung Auftragslaufzeiten für Busverkehrsdienste

Bezüglich der Mehrkosten die sich durch den Einsatz emissionsfreier Antriebe für das Verkehrsunternehmen bzw. den Aufgabenträger als Besteller der Verkehrsleistung ergeben, wäre es wünschenswert die Vergabedauern zu verlängern. Dies ermöglicht dem Verkehrsunternehmen die nicht unerheblichen Investitionen in Fahrzeuge und gerade auch in die erforderliche Energieinfrastruktur über längere Zeiträume als die heute üblichen und auch auf Basis EU-Vorgaben nur möglichen Zeiträume von bis zu 10 Jahre abzuschreiben. Hier könnte beispielsweise analog zum Schienenverkehr von der Möglichkeit nach VO (EG) 1370/2007 Gebrauch gemacht werden die Laufzeit des öffentlichen Dienstleistungsauftrages unter Berücksichtigung der Amortisationsdauer der Wirtschaftsgüter, um höchstens 50 % zu verlängern. Damit ließe sich die Auftragslaufzeit für Busverkehrsdienste auf 15 Jahre verlängern. Hierzu ist es erforderlich auf eine Anhebung der zulässigen Afa Abschreibungsdauern für Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur hinzuwirken.

Anpassung Regulatorik Energieversorgung

Gerade die Regulatorik im Bereich der Energieversorgung bedarf einer weiteren Vereinheitlichung und Anpassung auf die angestrebte möglichst breite Nutzung der Energieträger Strom und Wasserstoff in verschiedenen Anwendungen und Sektoren. Ein Beispiel ist die Mehrfachnutzung von Ladeinfrastruktur durch Busse, Pkw und Stadtbahn. Diese führt Stand heute zu regulatorischen Herausforderungen. Durch die Zugänglichmachung von Bus- und auch Pkw-Ladepunkten für Dritte z. B. Bereitstellung der Schnellladeinfrastruktur am ZOB durch eine Verkehrsunternehmen für die Nutzung durch Gelegenheitslader eines anderen Verkehrsunternehmen. Hierdurch wird das (Verkehrs-) Unternehmen, das die Ladeinfrastruktur betreibt, zum Stromlieferanten mit allen Konsequenzen auf seiner energiewirtschaftlichen und steuerrechtlichen Einordnung. Die energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen reflektieren Stand heute noch nicht die zukünftig notwendigen sektorenkoppelnden Prozesse einer integrierten Energie- und Verkehrswende. Ein Beispiel ist die Nutzung vorhandener DC Strominfrastruktur z. B. einer Straßen- oder U-Bahn für die Nachladung von BEV Bussen. Hier müssen zur Akzeptanz von Mess- und Abrechnungskonzepten für DC-Ladepunkte heute noch eine Vielzahl einzelner Stakeholder (z. B. Bundesnetzagentur, VNB und ÜNB) koordiniert werden, da bis jetzt z. B. noch keine mess- und eichrechtskonformen Zähler für die DC Eingangsseite verfügbar sind.

Ein weiteres Beispiel für die Erfordernis der Vereinheitlichung bzw. Vereinfachung der Regularien ergibt sich aus dem netzdienlichen Betrieb von Energiespeichern, wie er im Projekt G UW+⁶¹ geplant ist. Hier führen die derzeit geltenden, hohen regulatorischen Anforderungen des Stromhandels dazu, dass ein wirtschaftlicher Betrieb eines solchen dezentralen Energiespeichers aktuell nicht möglich ist.

⁶¹ siehe Übersicht zu den Inhalten der vom BMDV geförderten F&E Projekte die als Detailbericht auf dem Starterset Elektromobilität verfügbar ist (<https://www.now-gmbh.de/en/projectfinder/guwplus>).



Quelle: Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein GmbH

Auch müssen aktuelle technologische Entwicklungen und Rahmenbedingungen in Richtlinien und Vorgaben berücksichtigt werden. Als Beispiel seien hier die Genehmigungsvorgaben zur Lagerung von H₂ genannt. Zur Veranschaulichung soll ein fiktives Beispiel dienen. Bereits eine Betriebshof mit 65 Bussen, die über eine mittlere H₂-Tankgröße von 40 kg H₂ verfügen und die gleichzeitig eine Bevorratung des mittleren Tagesbedarfs von 20 kg pro Bus für 2 Tage vorsehen, fallen bereits unter die Störfallverordnung nach 12. BlmschV, die derzeit ab einer Lagermenge von 5 t H₂ anzuwenden ist. Hierzu ist bei der anstehenden Überarbeitung der EU-Richtlinie 2012/18/EU (Seveso-III-Richtlinie) eine entsprechende Anhebung der Grenzen für H₂ Lagermengen anzustreben.

Wissensvermittlung und Akzeptanz

Neben den gesetzlichen Vorgaben und Fördermöglichkeiten, sollte man jedoch auch ein Augenmerk auf die Akzeptanz der Technologien in der Bevölkerung, also bei den Kunden der Verkehrsbetriebe, als auch bei den Verkehrsbetrieben selbst legen. Für den angestrebten zügigen Markthochlauf ist das Thema Wissensvermittlung und -aufbau bei den verschiedenen Akteuren (Verkehrsunternehmen, Aufgabenträger) daher ebenfalls ein nicht zu unterschätzender Erfolgsfaktor.

Dies kann durch zielgruppenorientierte Informationsangebote ebenso wie durch Machbarkeitsstudien im lokalen Kontext unterstützt werden.

Um die Akzeptanz und das Interesse zu stärken, ist auch das Aufklären der umweltlichen Wirkungen des Einsatzes emissionsarmer Busse ein wichtiger Aspekt. So können die positiven Auswirkungen der geringeren Emissionsbelastungen sowohl zu mehr Akzeptanz in der Bevölkerung führen als auch dazu beitragen, dass globale und lokale Klimaziele erreicht werden.

4.2. Technische Weiterentwicklung Komponenten

Um Aussagen zur technischen Weiterentwicklung und zu Marktpotenzialen treffen zu können, sind Analysen betrieblicher Anforderungen notwendig. Ergänzend zu Kapitel 2.1.1 wurden etwa 2.800 in der hausinternen Datenbank *IVIdat* abgespeicherte Umlaufpläne aus 20 verschiedenen Verkehrsunternehmen analysiert. Unterstellt man die Forderung, keine oder nur unwesentliche Änderungen in den Betriebsabläufen zuzulassen, ergeben sich die nachfolgend dargestellten Anforderungen an die Reichweiten.

ABBILDUNG 78 Einteilung von Fahrleistungen in Fahrleistungsklassen – Solobusse (Basis: ca. 2.800 Umlaufpläne)

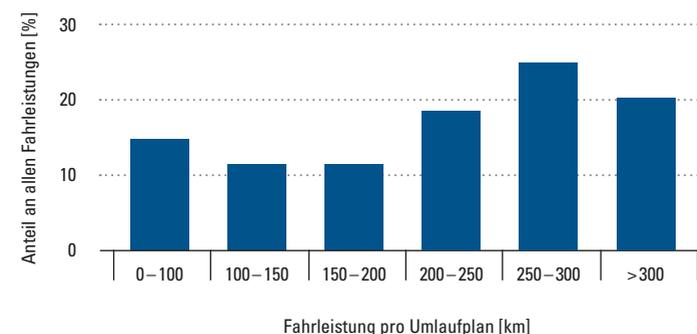
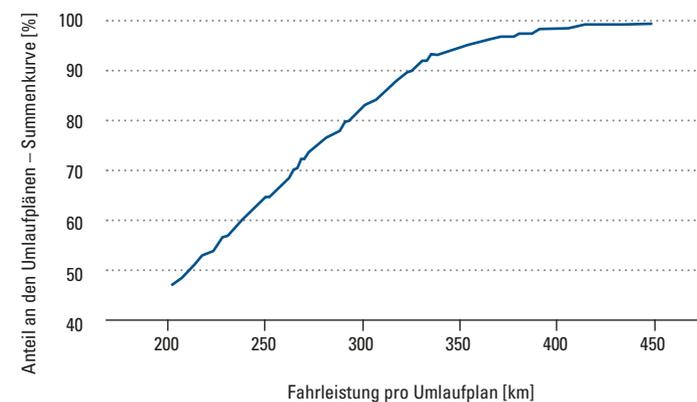


ABBILDUNG 79 Fahrleistungen als Summenkurve (Ausschnitt) – Solobusse (Basis: ca. 2.800 Umlaufpläne)



Umlaufpläne mit einer Länge von mehr als 300 km machen knapp 20 % aller Umlaufpläne aus. Nur etwa 5 % aller Umlaufpläne haben eine extrem lange Fahrleistung von mehr als 350 km (Abbildung 79). Der überwiegende Teil liegt unterhalb dieser Anforderungen.

Aus den betrieblichen Anforderungen sowie der Notwendigkeit, die in der Anschaffung nach wie vor sehr teuren Batterien möglichst lange nutzen zu können, ergeben sich verschiedene Ansätze für Weiterentwicklungen, die sich vordergründig auf die Minimierung des Energiebedarfs sowie das Monitoring von Batterien konzentrieren.

Batterie-, Brennstoffzellen- und Hybridüberleitungsbusse sind aufgrund ihres Aufbaus besonders für den Einsatz intelligenter Energie- und Leistungsmanagementsysteme geeignet. Derartige Betriebsstrategien zielen vordergründig ab auf

- die Reduzierung des Energieverbrauchs durch Nebenaggregate,
- die Verringerung von Leistungsspitzen beim Ein- und Ausspeichern von elektrischer Energie sowie
- die Verringerung des Energiedurchsatzes in den fahrzeugseitigen Batterien.

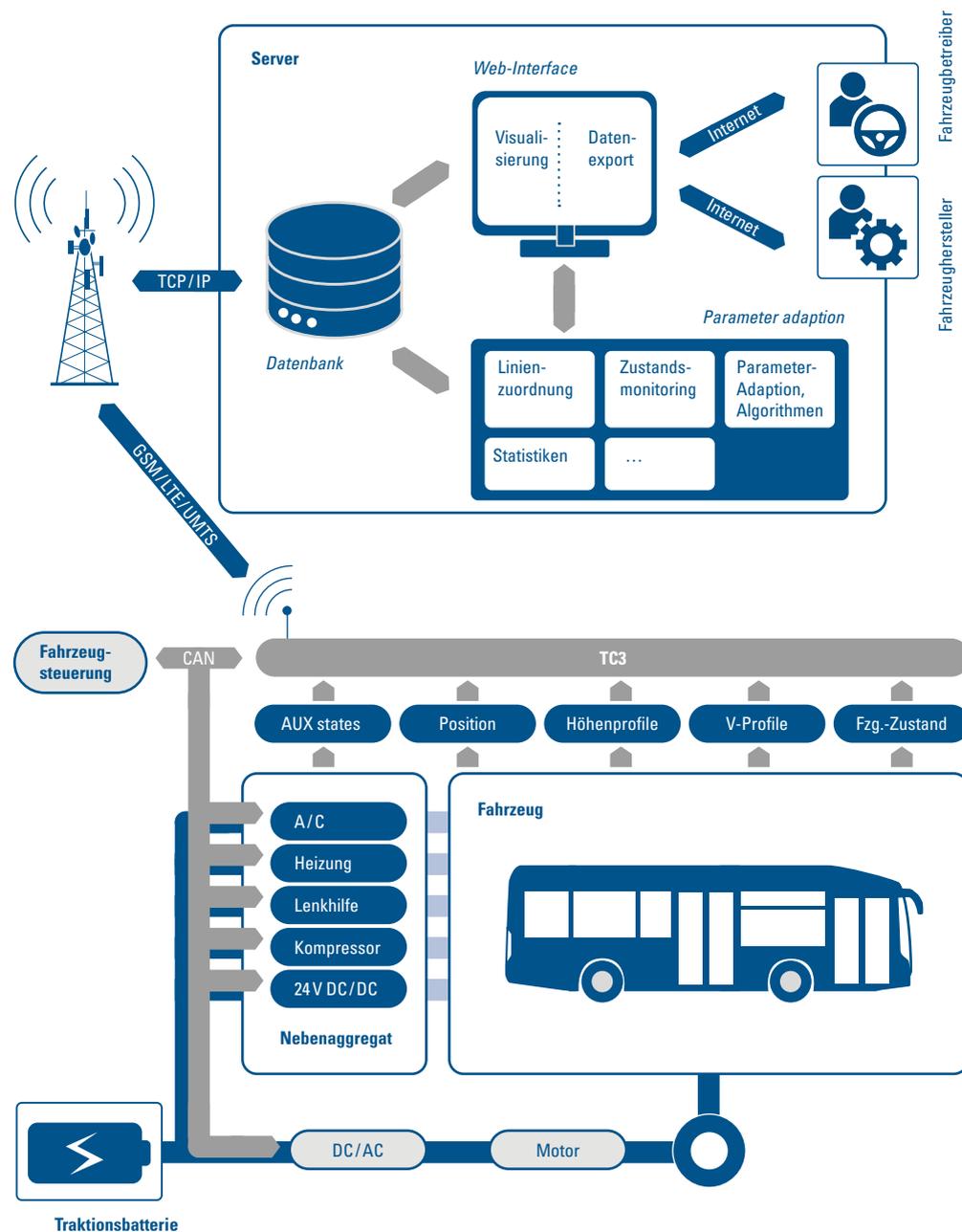
Damit werden erhöhte Reichweiten sowie eine Verlängerung der Nutzungsdauer für Batterien erzielt. Bei Brennstoffzellenbussen stellt zusätzlich die Phlegmatisierung der Brennstoffzelle, also die Vermeidung hochdynamischer Leistungsänderungen, ein Zielkriterium dar, was wiederum deren Nutzungsdauer erhöht.

Hinzu kommen sog. Reichweitensicherungsfunktionen (RSF), die bei einem absehbaren Nichterreichen eines vorgesehenen Umlaufplans entsprechende Maßnahmen zur Verringerung des Energieverbrauchs einleiten.

Den grundsätzlichen Aufbau intelligenter Energie- und Leistungsmanagementsysteme zeigt Abbildung 80. Wichtig für das Verständnis derartiger Systeme ist deren Charakter als sog. Komfort- oder Zusatzfunktion, die der Fahrzeugsteuerung Empfehlungen gibt, jedoch dieser die Hoheit über alle Funktionen überlässt, insb. wenn diese sicherheitsgerichtet sind.

Der Grundansatz beruht auf dem hauptsächlichen Betrieb verschiedener Nebenaggregate bei einem Überschuss an elektrischer Leistung im Fahrzeug (Bremsen, Fahrten bergab). Hierdurch werden Verluste durch das Ein- und Ausspeichern von elektrischer Energie oder deren Umwandlung in Wärme in Bremswiderständen vermieden bzw. minimiert.

ABBILDUNG 80 Grundaufbau eines intelligenten Energie- und Leistungsmanagements

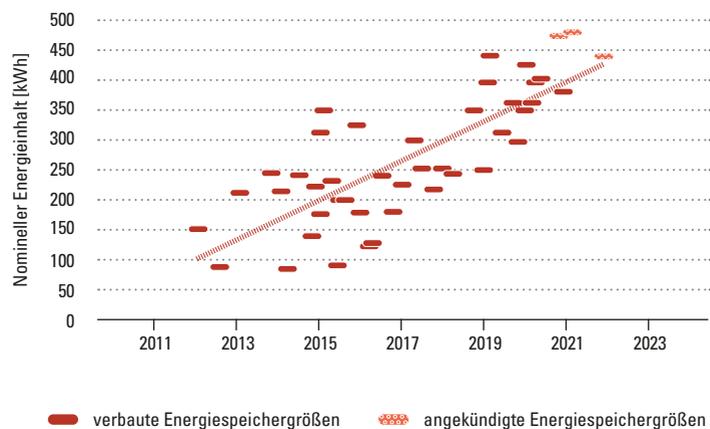


Um einen möglichst energieeffizienten Betrieb der Nebenaggregate erreichen zu können, errechnen Algorithmen geeignete Ein- und Ausschaltpunkte. Das Fahrzeug selbst ist in der Lage, seine Position und die Linie selbst zu ermitteln und passt die Fahrzeugsteuerung entsprechend der optimierten Strategie eigenständig an.

Die nachfolgende Abbildung 81 zeigt die Entwicklung von HV-Batterien in Solobatteriebusen anhand der verbauten bzw. angekündigten Batteriegrößen, ausgedrückt in deren Speichervermögen (kWh).

Aufgrund von Einmaleffekten (z. B. Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichts für Batteriebusse) ist eine Extrapolation der Werte nicht möglich. Unterstellt man aber eine weitergehende, wenn auch weniger dynamische Entwicklung der Batteriezellen auf der Grundlage der heute dominierenden Lithium-Ionen-Technologien, sind für das Jahr 2025 Speichergrößen von bis zu 550 kWh und für das Jahr 2030 Speichergrößen von etwa 650–750 kWh zu erwarten. Kommen neue Zelltechnologien wie z. B. Feststoffbatterien mit noch höheren Energiedichten auf den Markt, ist sogar von noch größeren Energiemengen auszugehen. Deren Marktreife wird jedoch erst für die zweite Hälfte des Jahrzehnts prognostiziert, weshalb sich Fahrzeug- und Einsatzkonzepte vorläufig an einer evolutionären Weiterentwicklung bestehender Zelltechnologien orientieren sollten.

ABBILDUNG 81 Bereits verbaute (rot) und angekündigte (orange) HV-Batteriegrößen in Solobatteriebusen⁶²



⁶² Quelle: IVI dat

HV-Batterien machen etwa zwischen einem Viertel und einem Drittel der Gesamtinvestitionskosten für Batteriebusse aus. Rechnet man eine Ersatzbatterie mit ein, erhöht sich der Investitionskostenanteil auf etwa die Hälfte. Um die Wirtschaftlichkeit zu verbessern und die Umweltwirkungen weiter zu reduzieren, gilt es

- die Nutzungsdauer der HV-Batterien zu erhöhen bzw.
- diese einer Zweitnutzung zuzuführen.

Das Monitoring der HV-Batterien ist notwendig, um Probleme mit einzelnen Zellen frühzeitig zu erkennen und diese ggf. einzeln bzw. in Modulen rechtzeitig auszutauschen.

Gleichzeitig setzt eine Zweitverwertung, z. B. als Pufferspeicher in Ladestationen oder in Betriebshöfen, ein lückenloses Monitoring sowie ein auf die Zelltechnologie abgestimmtes, jedoch verbindliches Bewertungsverfahren voraus, um das Maß der Schädigung bzw. der Alterung während des Gebrauchs in Fahrzeugen bestimmen zu können.

Die Entwicklung von Monitoringsystemen mit standardisierten und verbindlichen Bewertungsgrößen (z. B. Schädigungs- bzw. Abnutzungsindizes) ist daher unabdingbar.

Weitere Betrachtungen, auf die hier nicht näher im Detail eingegangen werden soll, wurden angestellt für:

- Heizungs- und Klimatisierungssysteme (Steigerung der Energieeffizienz)
- Druckluftsysteme (möglichst Eliminierung in elektrisch angetriebenen Bussen)
- Fahrzeugsteuergeräte mit erhöhter Rechenleistung für die Umsetzung rechenintensiver Leistungs- und Energiemanagementsysteme
- Antriebsmotoren (Baukastensysteme)
- Brennstoffzellen (Erhöhung der Nutzungsdauer und Kostenreduktionen)
- Eindrahtsysteme für Hybridüberleitungsbusse (Automatisierung im Stand)

Synergien Bahninfrastruktur

Synergien bei der Mitnutzung von Bahninfrastruktur sind beim Betrieb von Batterie- sowie theoretisch von Oberleitungsbussen möglich.

In deutschen Städten betreiben knapp 60 Unternehmen Straßen- bzw. Stadtbahnnetze mit einem Gleichstromsystem. Hinzu kommen vier Städte mit einem separaten U-Bahn-System, zwei Städte mit einem separaten S-Bahn-System sowie drei Städte mit Oberleitungsbussen. Dabei dominieren 600 und 750 V Gleichstrom als Nominalspannung. Ebenso mit Gleichstrom werden die Wuppertaler Schwebebahn sowie verschiedene Standseilbahnen betrieben.

Die direkte Nutzung einer unregelmäßigen Gleichspannung ist möglich, jedoch ist hierfür eine andere Fahrzeugarchitektur notwendig, die u. a. den vom Batteriemanagementsystem (BMS) geforderten Ladestrom einstellt. Hierbei handelt es sich nicht um eine Standardfahrzeugarchitektur, die auf einer infrastrukturseitigen Ladestromregelung basiert. Gleichwohl existieren Anwendungen, in denen DC-Netze für die Nachladung von Batteriebussen genutzt werden (z. B. in Hannover, Wien oder Prag).

Um das Potenzial in Städten mit großen Bahn-DC-Netzen abschätzen zu können, wurden die Netze in Dresden (DVB), Hannover (üstra) und Leipzig (LVB) hinsichtlich der Anbindbarkeit von an relevanten Endhaltestellen zu installierenden Ladestationen an das Bahn-DC-Netz analysiert.

Bei den untersuchten Netzen handelt es sich um Verkehrsbetriebe mit vergleichsweise großem Stadt- bzw. Straßenbahnanteil. Diese wurden bewusst gewählt, um das Potenzial nach oben hin abzugrenzen. Nach unten hin ist das Potenzial in Städten ohne Schienenbahnen mit Gleichstromversorgung ohnehin festgelegt.



Quelle: Reutlinger Stadtverkehrsgesellschaft mbH

Aus den Ergebnissen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Auch in Städten mit einem großen Stadt- oder Straßenbahnnetz können nur auf einem kleinen Teil der Linien alle für die Nachladung der Fahrzeuge notwendigen Ladestationen an die Gleichspannungsversorgung der Stadt- bzw. Straßenbahnen angebunden werden.
- Das Potenzial für anbindbare Ladestationen ist zumindest so hoch, dass Ladestationen mit Gleichspannung auf der Eingangsseite ein Marktpotenzial besitzen.
- Rein auf die direkte Nachladung an unregelmäßigen Gleichspannungsquellen ausgelegte Fahrzeuge haben praktisch keinen Markt, sofern die Fahrzeuge nach dem Prinzip der Gelegenheitsladung betrieben werden.

Standardisierung

Ladeinfrastruktur/Batteriebusse

Auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene ist die Standardisierung, im Speziellen die Normung, in verschiedenen Institutionen verankert. Die im Grunde weit fortgeschrittene Standardisierung der Ladeinfrastruktur für Batteriebusse und Hybridfahrzeuge lässt bezüglich der Marktentwicklung folgende Rückschlüsse zu.

Es wird auf absehbare Zeit einen Mix aus konduktiven Ladesystemen geben, die je nach Betriebskonzept unterschiedliche Anforderungen erfüllen.

Die konduktiven Ladesysteme mittels Plug-In-Systemen (vgl. Abbildung 82) und mittels Docking-Systeme (vgl. Abbildung 83) verfügen mit Ausnahme der noch ausstehenden Standardisierung der verfügbaren Pantographenlösungen (ortsfest und fahrzeugmontiert) über eine durchgehende Normierung. Die stetig steigende Batteriekapazität bei Vollladern wird in Netzen mit ausgedehnten Bedienzeiträumen künftig ebenfalls eine höhere Ladeleistung erfordern, um die Verfügbarkeit der Fahrzeuge zu sichern. Für das Nachladen auf dem Betriebsbahnhof gibt es als Alternative zur Stromübertragung mittels Plug-In oder Pantographensystemen noch die Möglichkeit über ein Unterbodenkontaktsystem die Ladeenergie zuzuführen.

ABBILDUNG 82 Übersicht Standardisierung konduktives Laden über Plug-In-System

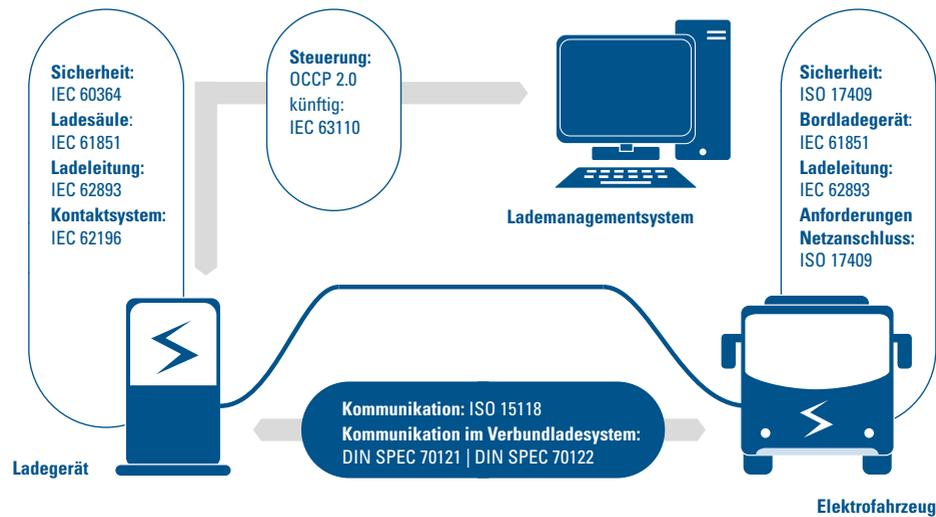
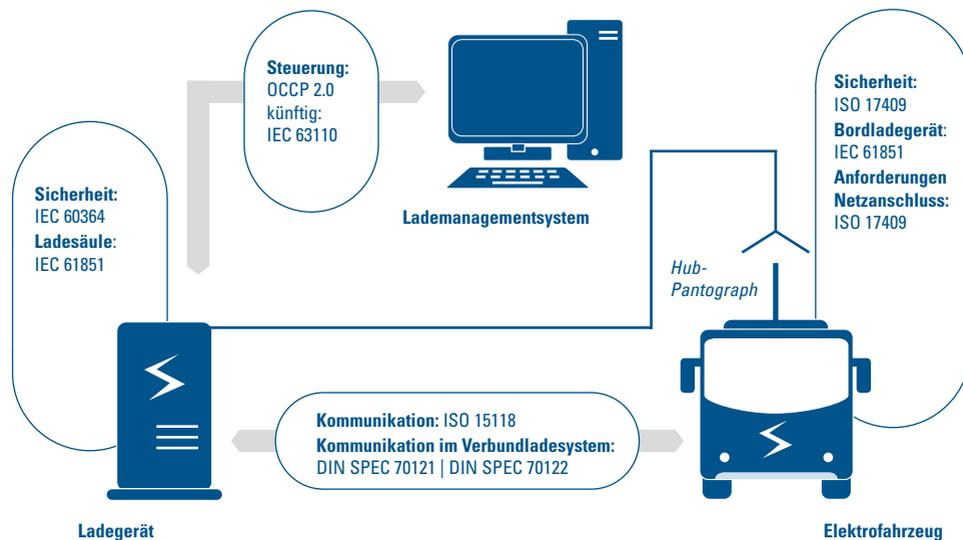


ABBILDUNG 83 Übersicht Standardisierung konduktives Laden über Docking-System



Nähere Informationen finden sich im Detailbericht zur Standardisierung der Energieversorgungsinfrastruktur.

Das Oberleitungskontaktsystem kann momentan noch als Nischenmarkt gelten, wird aber aufgrund der Einführung von Hybridfahrzeugen in diesem Sektor künftig eine gewichtigere Rolle spielen, weswegen über die bestehenden Standardisierungen ggf. noch zusätzliche Standardisierungsbestrebungen erforderlich sind.

Induktives Laden setzte sich nicht durch und wird künftig keine wesentliche Rolle spielen. Weiterführende Informationen zu Oberleitungskontaktsystemen und induktivem Laden finden sich im Detailbericht zur Standardisierung der Energieversorgungsinfrastruktur.

Die derzeit sehr aktive Weiterentwicklung von Depot- und Lademanagementsystemen (BMS) mit einhergehenden Standardisierungsbestrebungen der Schnittstellen zu Ladeinfrastruktur und Fahrzeugen lässt den Schluss zu, dass für die o. g. Ladesysteme künftig einheitliche Funktionsumfänge, unabhängig vom eingesetzten Ladesystem, zu erwarten sind. Für möglicherweise künftig zu automatisierende Vorgänge im Depot (Fahrbewegungen, Ladevorgänge), welche durch das BMS zu steuern wären, ist das Docking-System besser geeignet.



Batteriespeicher Ladeinfrastruktur

Quelle: Heidenheimer Verkehrsgesellschaft HVG
(Transdev GmbH) 2019

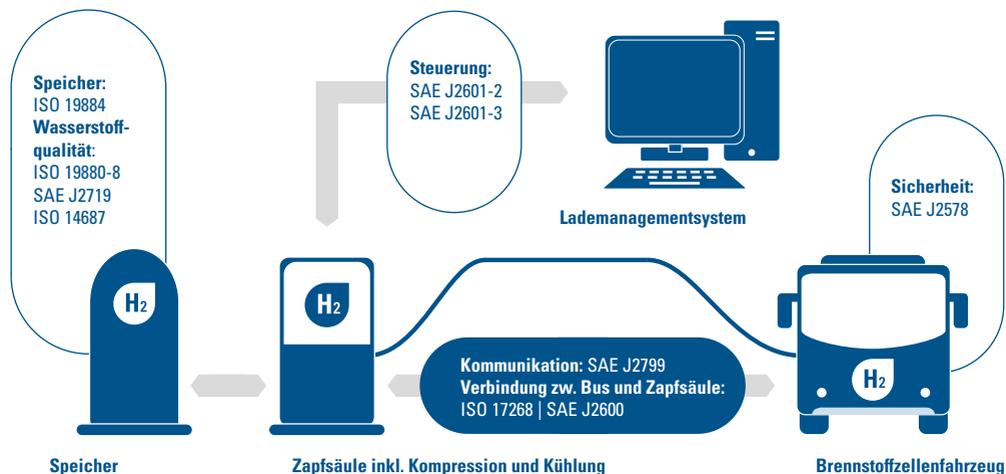
Wasserstoff Tankinfrastruktur / Brennstoffzellenbusse

Die voranschreitende Standardisierung der Wasserstofftechnologie (vgl. Abbildung 84) zur Betankung von Bussen lässt bzgl. der Marktentwicklung folgende Rückschlüsse zu:

- Ein vergleichsweise fortgeschrittener Stand der Standardisierung ermöglicht die normkonforme Planung von Wasserstoffinfrastrukturanlagen.
- Das Vorhandensein technischer Standards ermöglicht die Entwicklung von technologischen Lösungen gemäß technischen Richtlinien und ermöglicht damit mehr Systemlieferanten einen Markteintritt.
- Dokumentationen der Anlagenspezifikationen werden vergleichbarer.
- Der Zugriff auf die Standards reduziert potentiell die Entwicklungskosten und erleichtert die Abstimmung mit den Genehmigungsbehörden.

Die mit der Standardisierung einhergehenden Kostenreduktionseffekte und die damit verbundene Zunahme von Marktteilnehmern bringen die Wasserstofftechnologie zügiger in Richtung akzeptablerer Kostenstrukturen (siehe auch Detailbericht zur Standardisierung der Energieversorgungsinfrastruktur für weiterführende Informationen).

ABBILDUNG 84 Übersicht Standardisierung Wasserstoffbetankung



4.3. Marktpotenzial

Die Marktnachfrage nach emissionsfreien Bussen, insbesondere nach elektrisch angetriebenen Fahrzeugen, erhöht sich durch die steigenden Klimaschutzanforderungen und wird durch die Clean Vehicles Directive und deren inzwischen im nationalen Recht verankerten Beschaffungsvorgaben begleitet. Da viele kleinere und mittelgroße Verkehrsbetriebe bei der Wahl der Antriebsform einen Drittgemisch (z. B. Diesel-, Biogas- und Batteriebusse) scheuen werden, kann ab dem Jahr 2025 mit einer jährlichen Beschaffungsquote von mindestens 50 % für Busse mit emissionsfreien Antrieben gerechnet werden. Wie sich der dabei entstehende Markt auf Batterie-, Brennstoffzellen- und (Hybrid)Oberleitungsbusse verteilen wird, ist nicht zuletzt durch die jeweiligen Kosten definiert. Hierzu wird auf die durchgeführte Wirtschaftlichkeitsanalyse in Kapitel 2.5 verwiesen.

Neben der reinen Kostenbetrachtung sind jedoch auch Zugangshemmnisse seitens der Verkehrsbetriebe zu beobachten. Diese sind zumeist subjektiver Natur und werden neben einer neuen Antriebstechnologie in erster Linie durch die notwendige Infrastruktur hervorgerufen.

Aus Sicht der Autoren wird sich der Markt für emissionsfreie Busse in Deutschland weitgehend auf Batterie- und Brennstoffzellenbusse aufteilen. Die Aufteilung wird neben den jeweiligen Investitionskosten im Wesentlichen durch fünf Faktoren bestimmt sein:

- Kosten für Wasserstoff
- Verfügbarkeit einer für das Verkehrsunternehmen zugänglichen öffentlichen Wasserstofftankinfrastruktur
- Akzeptanz von mit Brennstoffzellen betriebenen Zusatzheizungen in Batteriebusen
- Reichweite von Batteriebusen mit oder ohne rein elektrische Heizung bestimmt durch die Batterieentwicklung
- Möglichkeiten zur Sektorenkopplung (siehe 4.4)

Bei Batteriebusen werden sich mittel- bis langfristig sog. Volllader durchsetzen, die nur auf Betriebshöfen geladen werden. Für Gelegenheitslader wird es eine Übergangsphase geben, die neben der Batterieentwicklung hauptsächlich durch politische Vorgaben hinsichtlich einer rein elektrischen Heizung bestimmt sein wird. Die voranschreitende Batterieentwicklung wird es aller Voraussicht nach ermöglichen, zukünftig auch längere und anspruchsvollere Linien mit Depotladern zu bedienen, möglichst unter Verwendung eines rein elektrischen Heizkonzeptes für den Batteriebus, um in Gänze einen lokal emissionsfreien Betrieb zu ermöglichen.

(Hybrid)Oberleitungsbusse werden in Deutschland aus heutiger Sicht, zumindest kurz- mittelfristig, weiterhin eine Nischenantriebsform bleiben, obwohl es sich dabei um eine robuste und erprobte Technologie handelt. Als Hauptgrund ist die städtebaulich oft nicht akzeptierte und planungsrechtlich aufwendige Fahrleitungsinfrastruktur und die damit verbunden Realisierungszeiträume von mindestens 5–7 Jahren, im Einzelfall auch länger, zu betrachten. Die Möglichkeit durch die Hybridisierung der O-Busse Teilstrecken oberleitungsfrei zu bedienen, bietet hier grundsätzlich neue Chancen für eine breitere Akzeptanz der Technologie.

4.4. Sektorenkopplung

Eine der großen Herausforderung der Energiewende besteht in der Tatsache, dass Wind- und Solarenergie volatil sind. Diese Volatilität muss umso mehr ausgeglichen werden, je höher der Anteil erneuerbarer Energie an der Stromversorgung wird, möglichst ohne fossile Kraftwerke. Damit eine konstante Versorgung gewährleistet werden kann, müssen dann kurzfristige Speicher wie elektrochemische Batterien und langfristige Speicher wie Pumpspeicherkraftwerke und Wasserstoffspeicher Erzeugung und Nachfrage ausbalancieren. Der Schlüssel, diese fluktuierende Stromproduktion von erneuerbaren Energien zu managen, besteht in der Möglichkeit der Sektorenkopplung. Das bedeutet die Nutzung erneuerbaren Stroms außerhalb des Energiesektors, also zum Beispiel zur Dekarbonisierung des Verkehrs oder aber auch der Industrie oder der Wärmeproduktion.

Die Batterien von Bussen als elektrochemische Speicher stellen eine solche kurzfristige Speicheroption dar. Da sie aber primär als Energiespeicher für den Fahrbetrieb gedacht sind, ist das Zeitfenster für netz- und systemdienliche Speicherarbeit auf die Ladezeitfenster begrenzt. Diese müssen hinreichend lang sein, sodass dies nur für Depotlader in Frage kommen wird. Längere Standzeiten, auch tagsüber, können sich für Busse, z. B. im Regionalverkehr, mit ausgeprägten Einsatzpeaks im Schülerverkehr in der Morgen- und Mittagsstunden ergeben, so dass eine Teilnahme am Energiemarkt außerhalb dieser Zeitfenster in Erwägung gezogen werden kann. Grundvoraussetzung hierfür ist eine entsprechend ausgerüstete Ladeinfrastruktur, die eine solche Teilnahme am Energiemarkt ermöglicht (z. B. Bi-Direktionalität, flexible Regelbarkeit). Hierzu sind teilweise noch Standards zu schaffen bzw. weiterzuentwickeln (z. B. Bi-Direktionalität). Diese werden derzeit in den nationalen und internationalen Normungsgremien adressiert.

Dies ist auch einer der Gründe, weshalb bislang in der Praxis ausschließlich positive Ladesteuerung zum Einsatz kommt, obgleich technisch auch eine Rückspeisung aus den Fahrzeugbatterien ins Netz möglich wäre. Grundsätzlich muss das benötigte Last- und Lademanagement in der Lage sein die Ladeleistung und perspektivisch die Einspeiseleistung in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern, wie Fahrzeugdisposition, lokale Netzlast, korrelierende erneuerbare Energieeinspeisung oder Preissignale der Energiemärkte zu steuern.

Die Ladezeitfenster der Gelegenheitslader auf der Strecke hingegen sind bewusst so kurz wie möglich und erlauben daher kein gesteuertes Laden, das die Volatilität der Stromerzeugung mit ausgleichen könnte. Im Gegenteil, wird hier die Energie dann benötigt, wenn die Pausenzeiten der Fahrer eine Nachladung ermöglichen. Dieser Zeitplan kann keine Rücksicht auf Herkunft und Menge des Stroms nehmen, der dann geladen wird. Solange noch nicht der überwiegende Teil der Stromerzeugung auf erneuerbaren Energien beruht, kann dieses Ladeverhalten sogar zu einem höheren Anteil an fossiler Stromerzeugung führen.

In einigen Fällen werden stationäre sogenannte Second-life Speicher aufgebaut. Dabei handelt es sich um Traktionsbatterien, die nicht mehr ausreichende Kapazität für den Fahrbetrieb aufweisen, aber immer noch ausreichend Speicherkapazität für den reinen Speicherbetrieb aufweisen. Der Einsatz von stationären Batterien kann unterstützend wirken, um im Depotbetrieb die Lastspitzen zu kappen. Jedoch sind heute noch deutliche Zusatzinvestitionen nötig, um die ausrangierten Traktionsbatterien der Busse in stationäre Batteriespeichersysteme einzubinden, sodass die Wirtschaftlichkeit einer solchen Lösung momentan noch in Frage steht.

Durch ein gesteuertes Laden der Busse im Depot können Lastspitzen geglättet werden und entsprechend zusätzliche Netzkapazitäten für reine Peakleistungen optimiert werden.

Die Betreiber bieten teilweise im Rahmen des nicht-regulierten Drittgeschäftes ein solches Lastmanagement an, zusammen mit dem Betrieb der Ladeinfrastruktur, wenn dies z. B. in einem Arealnetz nicht durch die Strombinnenmarkttrichtlinien reguliert ist.

Auch ein netzdienlicher Betrieb einer Depot-Ladeinfrastruktur ist technisch bereits heute möglich. Bislang fehlen jedoch die regulatorischen Instrumente, die dem Betreiber der Ladeinfrastruktur zusätzliche Erlöse durch ein netzdienliches Lademanagement ermöglichen. Aus Sicht des Verteilnetzbetreibers besteht hier aber auch mittelfristig noch kein Bedarf. Anders bei den Übertragungsnetzbetreibern (ÜNB), für die es einen entwickelten Regelenergiemarkt gibt.

Batterieelektrische und wasserstoffbasierte Bussysteme unterscheiden sich an dieser Stelle erheblich, da die Flexibilität durch die Betriebsparameter des Batteriebusses und die Ladezeit deutlich stärker determiniert ist als bei einem Brennstoffzellenbus, der von einer netzdienlich betriebenen Elektrolyse versorgt wird. Hier stellt der im Gegensatz zu Strom deutlich besser speicherbare Wasserstoff ein Entkopplungsglied dar.

Grundsätzlich kann die Wasserstoffproduktion mittels Elektrolyse so gesteuert werden, dass sie überwiegend dann produziert, wenn mehr erneuerbarer Strom zur Verfügung steht als im Netz benötigt wird. Diese Strommengen werden bislang „curtailed“, sprich die Betreiber der erneuerbaren Energieanlagen werden dafür kompensiert, dass sie keinen Strom produzieren, sondern ihre Anlagen abschalten. Solange die Wasserstoffproduktionsanlagen direkt an die erneuerbaren Erzeugungsanlagen angeschlossen sind oder sich zumindest auf derselben Seite eines Netzengpassgebietes befinden, kann die Wasserstoffproduktion also zu einer optimierten Ausnutzung der Anlagen und damit einer indirekten volkswirtschaftlichen Kostenreduktion beitragen.

Die Lieferquelle für angelieferten Wasserstoff in der Wirtschaftlichkeitsberechnung geht von einer solchen zentralisierten Wasserstoffproduktion aus, die unmittelbar an entsprechende Wind- und Solarparks angeschlossen ist.

Die Umsetzung der deutschen Wasserstoffstrategie und die aktuell im Rahmen des Europäischen Wasserstoff-IPCEI-Programms eingereichten Vorhaben weisen darauf hin, dass in Deutschland in naher Zukunft eine Vielzahl größerer Wasserstoffproduktionsstandorte entstehen werden.

Für Verkehrsunternehmen wird daher die Lieferkette für grünen Wasserstoff zukünftig deutlich attraktiver werden und die in der Region geplanten Projekte werden ihrerseits auf die Verkehrsunternehmen vermehrt zugehen, da eine hinreichend große Flotte von Brennstoffzellenbussen einen relevanten Wasserstoffbedarf für den wirtschaftlichen Betrieb einer Wasserstoffherzeugungsanlage darstellt. Gerade dort, wo städtische Betriebe sowohl den Betrieb der Verkehrsunternehmen wie auch die erneuerbare Energieproduktion betreiben, können sich sehr interessante Synergien ergeben. Im Rahmen des HyLand- gibt es hierzu unterschiedliche Beratungs- und Förderangebote, die Kommunen und Verkehrsunternehmen für sich prüfen sollten.

5 Anhang

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1	Quotenregelung nach EU Clean Vehicle Directive bzw. SaubFahrzeugBeschG seit 2.8.2021	16
ABBILDUNG 2	Übersicht BMDV geförderte E-Busprojekte	21
ABBILDUNG 3	Aufteilung der geförderten Busse nach Antriebsart und Gefäßgröße, BEV nach Heizungskonzept und Gefäßgröße	24
ABBILDUNG 4	Ladekonzept – Batteriebusse	27
ABBILDUNG 5	Installierte Ladeleistung – Batteriebusse	28
ABBILDUNG 6	Prinzipskizze einer Wasserstofftankstelle inklusive Anlieferung, Verdichtung, Speicherung und Betankung (Kupferschmid & Faltenbacher)	29
ABBILDUNG 7	Datenbasis der Evaluierungsaktivitäten in der Begleitforschung Bus	31
ABBILDUNG 8	Betrachtete E-Busse nach Fahrzeuggröße und Antriebstechnologie	32
ABBILDUNG 9	Erfahrungen / Vorkenntnisse im Bereich Elektromobilität	35

ABBILDUNG 10	Motivation für Elektromobilität	36
ABBILDUNG 11	Hemmnisse der Umstellung auf Elektromobilität	36
ABBILDUNG 12	Dauer der Entscheidung für Elektromobilität	37
ABBILDUNG 13	Umsetzungszeitleiste	38
ABBILDUNG 14	Planungsdauer für die Errichtung der Infrastruktur für Batteriebusse	39
ABBILDUNG 15	Dauer für die Errichtung der Infrastruktur für Batteriebusse	39
ABBILDUNG 16	Gesetzeskarte „Elektromobilität im ÖPNV“	41
ABBILDUNG 17	Gesamtlaufleistung und Laufleistung nach Antriebstechnologie	51
ABBILDUNG 18	Mittlere tägliche Laufleistung der Batteriebusse je Bus	52
ABBILDUNG 19	Mittlere monatliche Betriebstage der Batteriebusse je Bus	54
ABBILDUNG 20	Monatliche Betriebstage der Depotlader über den Betrachtungszeitraum	56
ABBILDUNG 21	Monatliche Betriebstage der Gelegenheitslader über den Betrachtungszeitraum	56
ABBILDUNG 22	Mittlere monatliche Laufleistung der Batteriebusse je Bus	57
ABBILDUNG 23	Reichweitenanforderungen – Batteriebusse	59
ABBILDUNG 24	Reichweitenanforderungen im Vergleich zur Tagesfahrleistung – Batteriebusse mit Depotladung	61
ABBILDUNG 25	Zeitliche Entwicklung der Tagesfahrleistung von Batteriebussen	62
ABBILDUNG 26	Installierte Batteriekapazitäten Depotlader nach Betriebsbeginn und Ausblick	63
ABBILDUNG 27	Mittlere tägliche Laufleistung der Brennstoffzellenbusse je Bus	65
ABBILDUNG 28	Monatliche Betriebstage der Brennstoffzellenbusse je Bus	65
ABBILDUNG 29	Mittlere monatliche Laufleistung der Brennstoffzellenbusse je Bus	65
ABBILDUNG 30	Zeitliche Entwicklung der Tagesfahrleistung – Brennstoffzellenbusse	66
ABBILDUNG 31	Erzielte Verfügbarkeiten der Batteriebusse	67
ABBILDUNG 32	Zeitliche Entwicklung der Verfügbarkeit der Batteriebusse	68
ABBILDUNG 33	Ausfallgründe – Batteriebusse	69
ABBILDUNG 34	Erwartete und bisher erzielte Verfügbarkeiten der Batteriebusse mit Vergleich zur Referenztechnologie	70
ABBILDUNG 35	Erzielte Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur	72
ABBILDUNG 36	Erwartete und bisher erzielte Verfügbarkeiten der Ladeinfrastruktur mit Vergleich zur Referenztechnologie	73
ABBILDUNG 37	Durchschnittliche Verfügbarkeit je Bus – Brennstoffzellenbusse	74
ABBILDUNG 38	Ausfallgründe – Brennstoffzellenbusse	74

ABBILDUNG 39	Definition der Technologiereifegrade in Anlehnung an die TRL-Definition der NASA	76
ABBILDUNG 40	Einsatzreife zu Beginn des Betriebes und nach einem Jahr Betrieb – Batteriebusse	77
ABBILDUNG 41	Technologischer Reifegrad der Ladeinfrastruktur	78
ABBILDUNG 42	Durchschnittlicher Verbrauch der Batteriebusse	83
ABBILDUNG 43	Durchschnittlicher Wasserstoffverbrauch der Brennstoffzellenbusse	83
ABBILDUNG 44	Batteriebusse mit Dieselzusatzheizung – Energieverbrauch für Fahrtrieb und Heizung	85
ABBILDUNG 45	Energiebedarf der Midi-Batteriebusse mit rein elektrischer Heizung	87
ABBILDUNG 46	Energiebedarf der Solo-Batteriebusse mit rein elektrischer Heizung	88
ABBILDUNG 47	Entwicklung des H ₂ Verbrauchs der Brennstoffzellenbusse im zeitlichen Verlauf	89
ABBILDUNG 48	Ladungsschema Batteriebus	90
ABBILDUNG 49	Sankey-Diagramm Ladeverluste und Mehrverbräuche Batteriebus	92
ABBILDUNG 50	Übersicht Lebenszyklus eines Stadtbusses	95
ABBILDUNG 51	Strommix Deutschland 2020 & 2010 – 2020	100
ABBILDUNG 52	Treibhausgasintensitäten der Strombereitstellung in Deutschland	101
ABBILDUNG 53	Treibhausgasintensitäten der Wasserstoffbereitstellung in Deutschland	101
ABBILDUNG 54	Treibhausgasemissionen Lebenszyklus 12-m- & 18-m-Busse	103
ABBILDUNG 55	Breakeven der Treibhausgasemissionen Lebenszyklus 12-m-Busse	104
ABBILDUNG 56	Einfluss der Strom- & Wasserstoffbereitstellung auf THG Emissionen über den gesamten Lebenszyklus 12-m-Busse	106
ABBILDUNG 57	Einfluss Entwicklung des Strommix und Mehrbedarf für Depotlader 12 m-Busse auf THG Emissionen	107
ABBILDUNG 58	NO _x -Emissionen Busbetrieb 12-m- und 18-m-Busse	108
ABBILDUNG 59	NO _x -Emissionen Lebenszyklus 12-m- und 18-m-Busse	110
ABBILDUNG 60	Kostenbestandteile für Strom (Bezugsjahr 2020)	118
ABBILDUNG 61	Reduktion der EEG-Umlage auf 20 % gemäß EEG 2021 § 65	119
ABBILDUNG 62	Beispiel für eine Wasserstofftankstelle mit H ₂ -Anlieferung über Trailer	122

ABBILDUNG 63	Wasserstoffbezugsmöglichkeiten in Deutschland	123
ABBILDUNG 64	Einfluss Transportdistanz auf die H ₂ -Transportkosten am Beispiel eines 300 bar-Trailers mit ~ 1.000 kg H ₂ Kapazität	124
ABBILDUNG 65	Abhängigkeit H ₂ -Erzeugungskosten von Stromkosten (vereinfachte Darstellung für 4 MW Elektrolyseur @ 4.000 Vollaststunden)	126
ABBILDUNG 66	Kostenbestandteile für Diesel (Bezugsjahr 2019)	126
ABBILDUNG 67	Entwicklung der Dieselpreise in Abhängigkeit des gesetzlichen CO ₂ Preises (auf Basis 2019)	127
ABBILDUNG 68	Szenario zur Entwicklung der Dieselpreise in Abhängigkeit steigender CO ₂ Preise (auf Basis 2019)	128
ABBILDUNG 69	Sensitivität Fahrzeugmehrabbedarf Depotlader	135
ABBILDUNG 70	Sensitivität CO ₂ -Preis	136
ABBILDUNG 71	Sensitivität – 50.000 € Verringerung der Fahrzeuganschaffungskosten	137
ABBILDUNG 72	Sensitivität – 80 % EEG	138
ABBILDUNG 73	Sensitivität H ₂ -Preis und Wirkungsgrad Elektrolyse	139
ABBILDUNG 74	Sensitivität Preis Elektroenergie	140
ABBILDUNG 75	Übersicht Mehr- / Minderkosten je E-Bus-Antriebsform gegenüber einer Dieselflote	141
ABBILDUNG 76	Deckblatt und Inhaltsverzeichnis der gedruckten Variante des Leitfadens	143
ABBILDUNG 77	Startseite der Online-Version des Leitfadens	144
ABBILDUNG 78	Einteilung von Fahrleistungen in Fahrleistungsklassen – Solobusse (Basis: ca. 2.800 Umlaufpläne)	167
ABBILDUNG 79	Fahrleistungen als Summenkurve (Ausschnitt) – Solobusse (Basis: ca. 2.800 Umlaufpläne)	167
ABBILDUNG 80	Grundaufbau eines intelligenten Energie- und Leistungsmanagements	169
ABBILDUNG 81	Bereits verbaute (rot) und angekündigte (orange) HV-Batteriegrößen in Solobatteriebusen	170
ABBILDUNG 82	Übersicht Standardisierung induktives Laden über Plug-In-System	174
ABBILDUNG 83	Übersicht Standardisierung induktives Laden über Docking-System	174
ABBILDUNG 84	Übersicht Standardisierung Wasserstoffbetankung	176

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1	Bewertungskategorien und -kriterien der Begleitforschung Bus	19
TABELLE 2	Übersicht betrachteter alternativer Antriebsoptionen für Busse	23
TABELLE 3	Untersuchungsrahmen der Bewertung	96
TABELLE 4	Busspezifikationen für ökologische Bewertung	98
TABELLE 5	Verbrauchs- und Emissionswerte der Busse (SORT 2, mittlere Topographie)	99
TABELLE 6	Zusammensetzung der betrachteten Musterflotte	113
TABELLE 7	Betrachtete Energieversorgungsinfrastruktur	115
TABELLE 8	Auslegung Fahrzeuge	114
TABELLE 9	Auslegung Versorgungsinfrastrukturen	116
TABELLE 10	Mittlere Netzentgelte in 20 deutschen Städten in 2020	120
TABELLE 11	Wesentliche Eingangsdaten Wirtschaftlichkeitsanalyse	131
TABELLE 12	Überblick Gesamtbetriebs-(TCO)kosten je Antriebstechnologie	133

Abkürzungsverzeichnis

A	Anlieferung	KSG	Klimaschutzgesetz
AC	Alternating Current (Wechselstrom)	LH ₂	Flüssiger Wasserstoff (engl. Liquid Hydrogen)
AG	Arbeitsgemeinschaft	LIB	Lithiumionenbatterie
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle	LIS	Ladeinfrastruktur
BattG	Batteriegesetz	LMS	Lademanagementsystem
BeFo	Begleitforschung	LSV	Ladesäulenverordnung
BEV-Bus	Batteriebus	LTO	Lithium-Titanoxid
BEHG	Brennstoffhandelsgesetz	MD	Mitteldruck
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz	MS	Mittelspannung
BMS	Betriebshofmanagementsystem	ND	Niederdruck
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr (ehem. BMVI)	NIP II	Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff II
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (ehemals BMU)	NMC	Nickel-Mangan-Cobalt
BZ	Brennstoffzelle	NOW	Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
BZ-REX	Brennstoffzellen-Range-Extender	NOX	Stickoxid
C	Laderate [kW Ladeleistung / kWh Batteriekapazität]	NS	Niederspannung
CAPEX	Investitionsausgaben (engl. Capital Expenses)	OEM	Original Equipment Manufacturer (Erstausrüster)
CCS	Combined Charging System	OBUS	Oberleitungsbus
CGH ₂	Komprimierter gasförmiger Wasserstoff (engl. Compressed Gaseous Hydrogen)	ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
CNG	Komprimiertes Erdgas (engl. Compressed Natural Gas)	OPEX	Betriebskosten (engl. Operating Expenses)
CVD	Clean Vehicles Directive der Europäischen Kommission	PV	Photovoltaik
DC	Direct Current (Gleichstrom)	PEM	Protonen-Austauschmembran (engl. Proton Exchange Membrane)
DL	Depotlader (der Ladevorgang erfolgt auf dem Betriebshof)	PM	Feinstaub (engl. Particulate Matter)
EEG	Erneuerbare-Energien- Gesetz	RED II	Renewable Energy Directive II der Europäischen Union
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz	SoFi	Webbasiertes Softwaretool von Sphera zur Erfassung und Analyse von Busbetriebsdaten
F&E	Forschungs- und Entwicklung	SORT	Standardised On-Road Test Cycles
FCH JU	Fuel Cell and Hydrogen Undertaking, Public-Private Partnership zwischen der Europäischen Kommission und der Industrie	StromStG	Stromsteuergesetz
FZV	Fahrzeugzulassungsverordnung	StromStV	Stromsteuerverordnung
GL	Gelegenheitslader	TCO	Total Cost of Ownership
GtL	Gas to Liquids	THG	Treibhausgas
H ₂	Wasserstoff	TRL	Technology Readiness Level (Technologischer Reifegrad)
HD	Hochdruck	VDV	Verband deutscher Verkehrsunternehmen e. V.
HRS	Hydrogen Refuelling Station (Wasserstofftankstelle)	VO	Vor-Ort
HPC	High Power Charger (Schnelllader)	VU	Verkehrsunternehmen
HV	Hochvolt		

6 Weiterführende Informationen

Der vorliegende Abschlussbericht sowie die nachfolgend dargestellten Publikationen der Begleitforschung Bus finden sich auf dem Starterset Elektromobilität der NOW unter <https://www.starterset-elektromobilitaet.de/>

Publikationen aus der Begleitforschung Bus und AG Innovative Antriebe Bus



Projektübersicht 2020/2021 zu den von BMDV und BMU geförderten Zero Emission Bussen in Deutschland



Markt-/Förderübersicht Bus 2020/2021



Leitfaden für Busse mit alternativen Antrieben, 2021

<https://www.starterset-elektromobilitaet.de/Bausteine/OEPNV/>



Online-Entscheidungshilfe für Verkehrsunternehmen für die Auswahl von Bussen mit alternativen Antrieben unter Berücksichtigung der konkreten spezifischen Einsatzbedingungen vor Ort

[https:// www.ebustool.de](https://www.ebustool.de)



Kommunale Elektromobilitätskonzepte 2021



Gesetzeskarte Elektromobilität im ÖPNV 2021

Elektrobusprojekte in Deutschland



Projektübersicht des Verbandes Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) zu Elektrobusen:

Verfügbar unter:
www.vdv.de/e-bus-projekt.aspx



Projektübersichtsseite des BMU

<https://www.erneuerbar-mobil.de/projekte>

Weiterführende Informationen und Hilfestellungen für die Einführung von H₂/BZ-Bussen



Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV

<https://www.starterset-elektromobilität.de/Aktuelles/broschuere-einfuehrung-von-wasserstoffbussen-im-oepnv>

Elektrobus-Projekte in Europa

- JIVE und JIVE 2
aktuelle von FCH JU ko-geförderte Demonstrationsprojekte zu H₂/BZ-Bussen



JIVE: <https://www.fuelcellbuses.eu/projects/jive>

JIVE 2: <https://www.fuelcellbuses.eu/projects/jive-2>

- Fuel Cell Bus Europe
Informationen zu H₂/BZ-Busprojekten in Europa inkl. Erläuterungen zu Technologie, Fahrdaten, etc.
<https://www.fuelcellbuses.eu/>
- Clean Bus Europe Plattform
Initiative der Europäischen Kommission zur Unterstützung des Markthochlaufs emissionsfreier Bustechnologien im Rahmen der Clean Bus Deployment Initiative koordiniert von UITP im Rahmen des APOLLO-EU-Projektes



www.cleanbusplatform.eu

- ZeEUS
Demonstrationsprojekt zu BEV-, Trolley- und Plug-In-Hybridbussen, abgeschlossen



<https://zeeus.eu/>

eBus Report #2,
verfügbar unter:
<http://zeeus.eu/uploads/publications/documents/zeeus-ebus-report-2.pdf>

IMPRESSUM**Herausgeber**

Bundesministerium für Digitales und Verkehr
(BMDV)
Invalidenstraße 44, 10115 Berlin
Referat G23 Elektromobilität, Ladeinfrastruktur
E-Mail: Ref-g23@bmdv.bund.de

Koordination

NOW GmbH
Begleitforschung Innovative Antriebe im
straßengebundenen ÖPNV
Oliver Hoch
Fasanenstraße 5, 10623 Berlin
Telefon: 030 / 311 6116-760
E-Mail: Busse@now-gmbh.de
www.now-gmbh.de

Leitung der Begleitforschung**Innovative Antriebe im strassengebundenen ÖPNV**

Sphera (ehemals thinkstep)
Dr. Michael Faltenbacher
Hauptstr. 111-113,
70771 Leinfelden-Echterdingen
Telefon: 0711 / 341 817 29
E-Mail: MFaltenbacher@sphera.com

Gemeinschaftsprojekt im Auftrag des BMDV mit
hySOLUTIONS, VCDB, FhG IVI, Ingenieurgruppe
IVV und SEK Strategy Consulting

Autoren

Sphera Solutions GmbH
(vormals thinkstep AG)
Koordinator
Dr. Michael Faltenbacher, Julian Bopp,
Vanessa Roderer, Dr. Olga Vetter,
Stefan Kupferschmid

hySOLUTIONS GmbH
Heinrich Klingenberg, Dr. Jörg Burkhardt,
Sebastian Staffetius, Dr. Simon Verleger

VCDB VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH
Christine Schwärzel-Lange, Theresa Howaldt,
Matthias Kiepsch, Mareike Otte, Jonas Ramme,
Reinhard Schmidt

*Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und
Infrastruktursysteme IVI*
Dr. Thoralf Knotte, Claudius Jehle

Ingenieurgruppe IVV GmbH & Co. KG
Dr. Stephan Krug, Oliver Krey, Birte Ohm

SEK Strategy Consulting GmbH
Sven-Erik Kratz, Sebastian von Leuckart, Zeki Saraç

Berichtsdatum

13.8.21

Gestaltung

kursiv Kommunikationsdesign Katrin Schek
Peter Frey, Angela Köntje

Copyright

Die Nutzungsrechte liegen – soweit nicht explizit
genannt – bei NOW GmbH und den Autoren.

