



Einsatzmöglichkeit von Bussen mit alternativen Antrieben in Wismar

Machbarkeitsstudie – Stadt- und Regionalverkehr

Kooperationspartner

NAHBUS Nordwestmecklenburg GmbH
Jörg Lettau | Geschäftsführer
Wismarsche Straße 155 | 23936 Grevesmühlen

Auftragnehmer

EMCEL GmbH
Marcel Corneille | Geschäftsführer
Am Wassermann 28 | 50829 Köln

Zusammenfassung

Angesichts der bevorstehenden Einführung von emissionsfreien Bussen, bedingt durch die Beschaffungsquoten der Clean Vehicle Directive, wurden in der vorliegenden Studie die Randbedingungen zum Einsatz von elektrisch angetriebenen Bussen für den Linienbetrieb der NAHBUS Nordwestmecklenburg GmbH untersucht sowie potenzielle Umstellungspfade erarbeitet.

Aus der Studie gehen die folgenden Erkenntnisse hervor:

Regionalverkehr

- › Für den Einsatz von E-Bussen im Regionalverkehr in Nordwestmecklenburg bietet sich sowohl die Batterietechnologie mit Depotladung als auch die Brennstoffzellentechnologie mit Wasserstoff an.
- › Bei der Einführung von Depotladern können – insbesondere bei der kurzfristigen Linienumstellungen - zusätzliche Maßnahmen erforderlich sein, wie beispielsweise eine (Schnell-)Ladeinfrastruktur an Endhaltestellen oder zusätzliche Fahrzeuge. Durch die zu erwartende Weiterentwicklung der Batterietechnologie können zukünftig alle weiteren Linien ohne Anpassungen im Betrieb und zusätzlichen Fahrzeugbedarf bedient werden.
- › An den verschiedenen Betriebshöfen kann die erforderliche Ladeinfrastruktur errichtet werden. Allerdings wird es in Grevesmühlen und Gadebusch langfristig zu Engpässen in der Flächenkapazität kommen, wodurch möglicherweise weniger Fahrzeuge als bisher abgestellt werden können.
- › Brennstoffzellenbusse können bereits heute alle Linien ohne Anpassungen im Betrieb und zusätzlichen Fahrzeugbedarf bedienen. Aufgrund der notwendigen Betankungsinfrastruktur ist jedoch die Einstiegshürde

höher. Eine Betriebshoftankstelle ist nicht realisierbar, da es an ausreichenden Flächen mangelt. Alternativ wäre die Errichtung einer Tankstelle durch einen Betreiber im Einsatzgebiet möglich. Der Standort Nordwestmecklenburg bietet günstige Voraussetzungen für eine attraktive Wasserstoffversorgung. Derzeit sind in der Region keine konkreten Maßnahmen für den Bau einer Wasserstofftankstelle oder die Produktion von Wasserstoff geplant.

Stadtverkehr

- › Auch im Stadtgebiet Wismar bieten sich für eine Umstellung des ÖPNV auf emissionsfreie Antriebe sowohl die Batterietechnologie mit Depotladung als auch die Brennstoffzellentechnologie mit Wasserstoff an. Die Einführung von Batteriebusen mit Gelegenheits- oder Oberleitungsladung ist aufgrund hoher Planungs-, Infrastruktur- und Betriebsaufwände nicht geeignet.
- › Während die Brennstoffzellenbusse alle Linien eins-zu-eins bedienen können, erfordert der Einsatz von Depotladern einen Fahrzeugmehrbedarf oder Schnellladungen auf der Strecke.
- › Die Elektrifizierung des Stadtverkehrs soll mit dem Neubau eines Betriebshofes (ca. 2030) im Gewerbegebiet Hornstorf erfolgen. Die erforderliche Lade- bzw. Betankungsinfrastruktur kann im Rahmen des Neubauvorhabens integriert werden. Zudem kann der neue Standort andere Betriebshöfe flächentechnisch entlasten.

Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsanalyse wurden Umstellungsszenarien auf 100 % emissionsfreie Antriebe (Depotladung und Brennstoffzelle im Regionalverkehr sowie Depotladung, Gelegenheitsladung, Oberleitung und Brennstoffzelle im Stadtverkehr) miteinander verglichen.

Im Regionalverkehr liegen Depotladung und Brennstoffzellentechnologie in einem vergleichbaren Rahmen. Die jährlichen Mehrkosten gegenüber dem heutigen Betrieb liegen je nach Standort zwischen +25 % und +35 %. Eine Förderung von Fahrzeugen und Infrastruktur kann die Mehrkosten kurz- bis mittelfristig auf ca. +10 % bis +15 % reduzieren.

Im Stadtverkehr erweist sich die Brennstoffzellentechnologie als die kostengünstigste Variante. Je nach Förderung liegen die jährlichen Mehrkosten gegenüber der Referenztechnologie zwischen +10 % und +25 %. Für die Batterietechnologien Depotladung und Gelegenheitsladung ergeben sich Mehrkosten von ca. +30 % bis +50 % pro Jahr. Aufgrund des Aufbaus der Oberleitungsinfrastruktur liegen die jährlichen Mehrkosten für Oberleitungsbusse weit über bei +80 %.

Basierend auf den Ergebnissen der Untersuchung wurde im Rahmen der Studie die folgende Umstellungsstrategie erarbeitet:

Mischflottenkonzept

Umstellung des Regionalverkehrs auf 100 % Batterietechnik und Umstellung des Stadtverkehrs auf 100 % Brennstoffzellentechnik:

- › Die Elektrifizierung der NAHBUS-Flotte beginnt im Regionalverkehr mit der Einführung von Depotladern. Zur Minimierung des Infrastrukturaufwands erfolgt eine standortbezogene Umstellung der Betriebshöfe Schönberg, Gadebusch und Grevesmühlen. Im Rahmen der Busbeschaffung werden die Standorte alle zwei Jahre nacheinander umgestellt.
- › Die Umstellung des Stadtverkehrs erfolgt mit der Inbetriebnahme des neuen Betriebshofes ab ca. 2030. Dieser zeitliche Vorlauf soll genutzt werden, um die Entwicklung des Marktes, der Technologien, der Energiepreise sowie der lokalen Wasserstoffaktivitäten zu beobachten. Dies bietet die

Möglichkeit, vorerst keine endgültige Entscheidung bezüglich der Technologie für den Stadtverkehr zu treffen, sondern in etwa 2-3 Jahren.

- › Durch die Beschaffung von ca. 15 bis 25 Elektrobussen alle zwei Jahre (durchschnittlich 10 Busse/Jahr) kann die Gesamtflotte bis 2037 auf emissionsfreie Antriebe umgestellt werden. Dabei werden die gesetzlichen Vorgaben der Clean Vehicle Directive eingehalten.
- › Für das Umsetzungskonzept sind Investitionskosten von ca. 105 Mio. € bis 2037 erforderlich (ohne Förderung). Im Vergleich zur Referenztechnologie Diesel sind bis 2048 Mehrkosten von ca. 68 Mio. € zu erwarten (unter Berücksichtigung einer Nutzungsdauer von 12 Jahren pro Bus). Dies entspricht durchschnittlichen jährlichen Mehrkosten von 2,80 Mio. € (ohne Förderung).
- › Wesentliche Kostentreiber sind die Anschaffungskosten für die Fahrzeuge sowie die erforderliche Infrastruktur.

Inhalt

Zusammenfassung	2
1 Einleitung	9
2 Warum E-ÖPNV?	11
2.1 E-Busse reduzieren globale Emissionen	11
2.2 E-Busse reduzieren lokale Emissionen	12
2.3 E-Busse erhöhen die Akzeptanz im ÖPNV	13
2.4 E-Busse fördern die lokale Wertschöpfung	14
2.5 Die neue Richtlinie: „Clean Vehicle Directive“	15
3 Informationen zur E-Bustechnologie	17
3.1 Depotlader (Volllader, Nachtlader)	18
3.2 Gelegenheitslader (Teillader)	19
3.3 Oberleitungsbus	21
3.4 Brennstoffzelle	22
3.5 Entwicklung der E-Bus-Technologie	24
3.6 Allgemeine Informationen zu Komponenten und Infrastruktur	25
3.7 Vergleich der Elektrobustechnologien	38
4 Technische Analyse	42
4.1 Ausgangslage	43
4.2 Regionalverkehr	46
4.3 Stadtverkehr	56
4.4 Energiebereitstellung	65

5	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	68
5.1	Annahmen	68
5.2	Jährliche Mehrkosten	72
6	Bewertung (technisch und wirtschaftlich)	78
6.1	Regionalverkehr	78
6.2	Stadtverkehr	82
7	Umsetzung	85
7.1	Umsetzungspfad: Einführung einer Mischflotte	85
7.2	Umsetzungs- / Beschaffungsplan	86
7.3	Kosten über die Zeit	87
7.4	Nächste Schritte für die Umstellung	90
A.	Anhang	93
A.1.	Anmerkungen	93
A.2.	Umsetzungspfad	94
A.3.	Werkstatt und Schulung	97
A.4.	Hilfreiche Dokumente	104
A.5.	Übersicht der E-Bushersteller	105
A.6.	Standortspezifische technische Analyse	107
A.7.	Subunternehmer	117

A.8. Abbildungsverzeichnis	118
-----------------------------------	------------

A.9. Tabellenverzeichnis	122
---------------------------------	------------

1 Einleitung

Vor dem Hintergrund der Reduktionsziele für CO₂ und lokale Emissionen im Verkehr wird das Thema der Elektrifizierung des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) immer aktueller. So legte die EU im Frühjahr 2019 neue Richtlinien für die Neubeschaffungen von Bussen fest, welche ab dem Jahr 2021 zu erfüllen sind (siehe Kapitel 2.5). Um auf die Zukunft und die damit verbundenen Umstellungen vorbereitet zu sein, ist es sinnvoll, sich vermehrt mit dem Thema der Elektromobilität auseinanderzusetzen.

Die NAHBUS Nordwestmecklenburg GmbH (NAHBUS) ist der Mobilitätsdienstleister des Landkreises Nordwestmecklenburg und bedient jährlich ein Einsatzgebiet von ca. 2.100 km² mit einer Gesamtfahrleistung von über 6 Mio. Kilometern. Durch den Einsatz von alternativen Antriebstechnologien in der Busflotte der NAHBUS können die lokalen und globalen Emissionen des Verkehrs, insbesondere des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV), deutlich reduziert und somit aktive Maßnahmen zum Klimaschutz umgesetzt werden.

Die NAHBUS verfolgt mit zukünftig 28 Erdgas-Bussen im Bestand bereits seit längerer Zeit die Emissionsreduzierung im regionalen ÖPNV. Mit der weiteren Umstellung auf alternative Antriebe kann die NAHBUS sowohl die gesetzlichen Vorgaben erfüllen als auch das Image des Landkreises Nordwestmecklenburg, der eine bedeutsame Fremdenverkehrs- und Freizeitregion in Deutschland ist, in Bezug auf einen umweltfreundlichen und nachhaltigen Tourismus weiter stärken.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie werden unter Berücksichtigung der Clean Vehicle Directive (CVD) Umsetzungspfade und -schritte zur Umstellung der Fahrzeugflotte auf elektrische Antriebe erarbeitet. Außerdem wird eine Analyse des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) in der Region Nordwestmecklenburg, einschließlich des Stadtgebietes von Wismar, durchgeführt, um den finanziellen Aufwand für die Einführung und den Betrieb von Elektrobussen zu ermitteln und darzustellen. Es werden dabei folgende Punkte herausgestellt:

- › Einführung zum Thema Elektrobustechnologie
- › Übersicht der Rahmenbedingungen
- › Analyse der technischen Randbedingungen (u.a. Liniennetz, Fahrpläne, lokale Gegebenheiten)
- › Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Total-Cost-of-Ownership (TCO)
- › Bewertung der technischen und wirtschaftlichen Umsetzbarkeit
- › Umsetzungskonzept mit Handlungsempfehlungen

2 Warum E-ÖPNV?

In diesem Abschnitt werden die wesentlichen Gründe dargestellt, weshalb der Einsatz von Elektrobussen (E-Bussen) im ÖPNV schon heute wichtig und sinnvoll ist. Sie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- › Reduktion von globalen Treibhausemissionen
- › Reduktion von lokalen Emissionen (z.B. Feinstaub und NO_x)
- › Erhöhung der Akzeptanz des ÖPNV
- › Erhöhung der lokalen Wertschöpfungskette bei regionaler Energieerzeugung

2.1 E-Busse reduzieren globale Emissionen

Angesichts der zunehmenden Erderwärmung wächst der Druck auf Politik und Wirtschaft, die Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Infolgedessen hat die Bundesregierung einen Klimaschutzplan erstellt, in dem die Ziele zur Reduktion der globalen Emissionen im Verkehr festgelegt sind. Das Deutsche Klimaschutzgesetz gibt nach Leitbild der Pariser Klimarahmenkonvention eine Emissionsminderung bis 2030 um 65 % (gegenüber 1990) vor. Emissions-Zielpfade wurden für die einzelnen Sektoren festgelegt: für den Verkehrssektor gilt eine Minderung von 48 % gegenüber dem Stand von 1990. Abbildung 2-1 zeigt den Verlauf der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen in Deutschland von 1990 bis heute.

Aus dem Diagramm wird ersichtlich, dass die Emissionen aus dem Verkehrssektor seit 1990 zwar leicht schwanken, im Wesentlichen aber konstant geblieben sind. Um das Ziel „48 % Emissionsreduzierung gegenüber 1990“ bis 2030 noch erreichen zu können, muss der CO₂-Ausstoß erheblich verringert werden. Zur Erreichung der Klimaziele können E-Busse einen wichtigen Beitrag leisten.

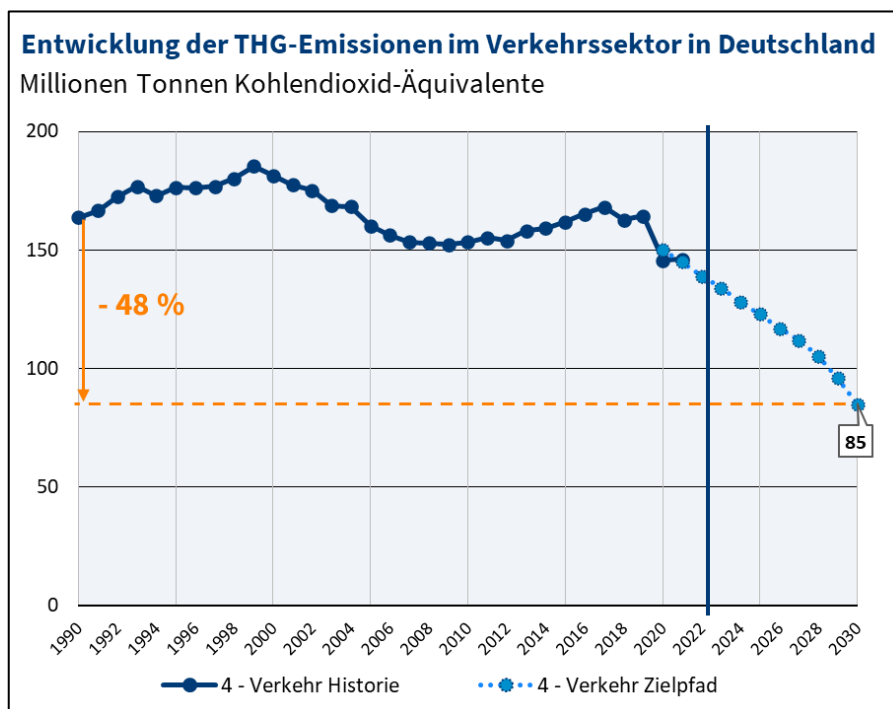


Abbildung 2-1 Geplante CO₂-Reduktion im Verkehr bis 2030

2.2 E-Busse reduzieren lokale Emissionen

Ein weiterer wesentlicher Grund für den Einsatz von E-Bussen ist die Reduzierung von lokalen Emissionen wie Feinstaub und Stickoxiden (NO_x). Besonders in den Ballungszentren ist das heute der stärkste Treiber für den Einsatz von E-Bussen. Für diese Emissionen sind zum großen Teil Dieselfahrzeuge verantwortlich. Seit 2018 werden immer mehr Dieselfahrverbote in deutschen Städten verhängt. Die derzeitigen Maßnahmen und Fahrverbote zeigen, dass möglicherweise in wenigen Jahren kein Handlungsspielraum mehr für die Beschaffung von Dieselfahrzeugen besteht, weil der Einsatz von E-Bussen zwingend vorgeschrieben wird. Aus dieser Perspektive scheint es wichtig, sich schon heute mit den E-Bustechnologien intensiv zu beschäftigen und entsprechende Fahrzeuge einzusetzen.

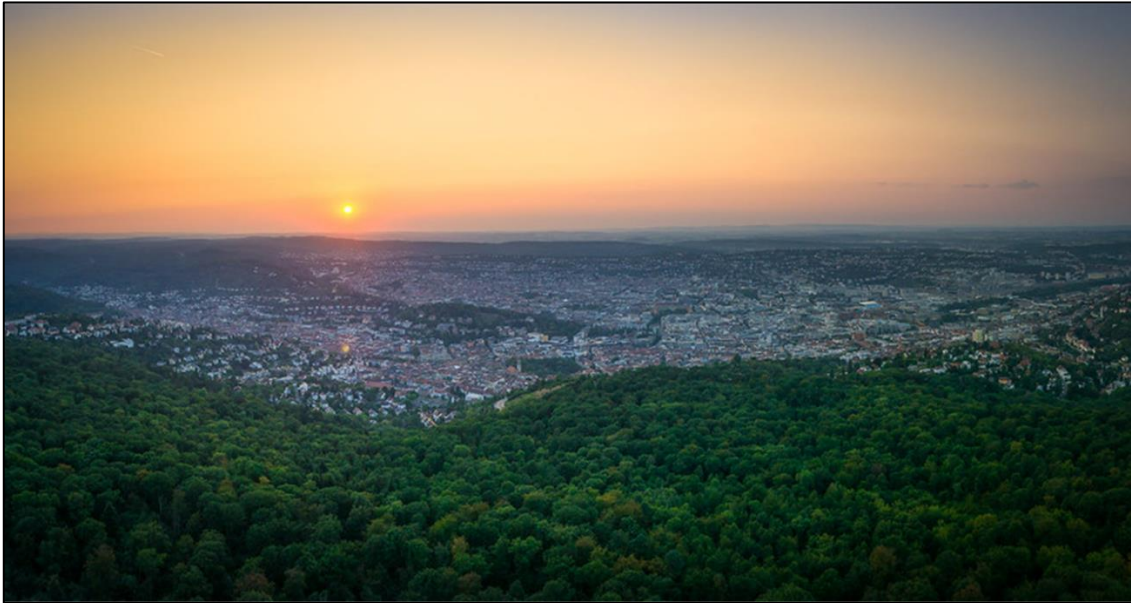


Abbildung 2-2: Städte wie Stuttgart, Hamburg Frankfurt a.M. überschreiten regelmäßig die zulässigen NO_x -Grenzwerte¹.

2.3 E-Busse erhöhen die Akzeptanz im ÖPNV

Elektrobusse bieten aufgrund ihres leisen und vibrationsarmen Betriebs mehr Komfort als Dieselmotoren. Der Elektromotor erfordert kein Schaltgetriebe und gewährleistet eine gleichmäßige Beschleunigung. Auch im Stillstand und beim Beschleunigen sind Elektrobusse signifikant leiser. Beispielsweise sind die Geräuschemissionen beim Anfahren von E-Bussen in etwa um den Faktor 2,5 geringer als bei modernen Euro-6-Dieselmotoren.

Dieser Komfortgewinn wird in Umfragen unter Fahrgästen und Anwohnern immer wieder bestätigt. Auch die Busfahrerinnen und Busfahrer empfinden ihre Arbeit als angenehmer, weil die Geräusch- und Vibrationsbelastungen während der Fahrt deutlich geringer sind. Und schließlich sind auch die Geruchs- und sonstigen Schadstoffbelastungen für das Werkstattpersonal signifikant geringer. In Abbildung 2-3 wird exemplarisch ein E-Bus in Betrieb gezeigt.

¹ Bild-Quelle: Pixel.fabian, www.flickr.com



Abbildung 2-3 Ein E-Bus beim Laden mittels Pantografen

2.4 E-Busse fördern die lokale Wertschöpfung

Bei heutigen Dieselnissen werden erhebliche finanzielle Mittel für den Treibstoffbezug ausgegeben. Diese Mittel fließen zu 100 % aus der Region ab. Dies wird in Abbildung 2-4 veranschaulicht. Die Nutzung von regenerativ erzeugter elektrischer Energie für Elektrobusse kann die regionale Wertschöpfung hingegen deutlich erhöhen. Wenn der „Kraftstoff“ regenerativer Strom regional erzeugt, verteilt und versteuert wird, kann der Mittelabfluss um bis zu 50 % reduziert werden (siehe Abbildung 2-4, grün und grün schraffiert hinterlegte Felder). Auf diese Weise wird der positive Effekt des E-ÖPNV für die Region langfristig auch in finanzieller Hinsicht erheblich gesteigert.

Als Beispiel: Ein Busunternehmen mit 100 ÖPNV-Bussen gibt jährlich ca. 2 bis 2,5 Mio.€ für Dieselmotorkraftstoff aus. Dieser Betrag fließt vollständig aus der Region ab. Im Gegensatz dazu können bei einer vergleichbaren Batteriebusflotte bis zu 50 % dieser Kosten in der Region gehalten werden, wenn der Strom lokal erzeugt wird.

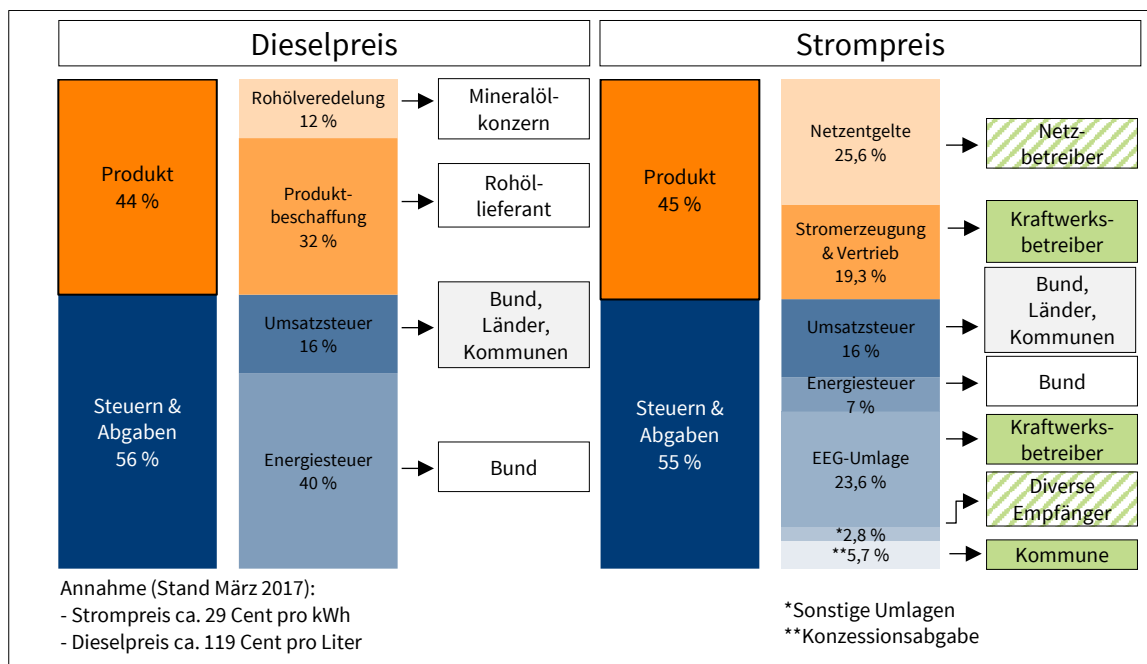


Abbildung 2-4: Regionale Wertschöpfung Diesel- vs. Strompreis

2.5 Die neue Richtlinie: „Clean Vehicle Directive“

Im Frühjahr 2019 beschloss das EU-Parlament die Änderung der Richtlinie 2009/33/EC über die Förderung sauberer Fahrzeuge im ÖPNV. Der Beschluss bezieht sich auf einzuhaltende Quoten für die Neubeschaffung von Bussen. Die Einwilligung des EU-Rates wurde gegeben und die Richtlinie im Amtsblatt der Europäischen Union am 12. Juli 2019 veröffentlicht. Die Richtlinie trat am 2. August 2019 in Kraft. Im Mai 2021 hat nun der Deutsche Bundestag einen Gesetzesentwurf zur Umsetzung der Richtlinie in deutsches Recht beschlossen. Die neue Richtlinie verpflichtet die EU-Mitgliedstaaten, bestimmte Quoten bei der Neubeschaffung von Bussen im öffentlichen Personennahverkehr zu erfüllen. So sollen im Zeitraum 2021 bis 2025 in Deutschland 45 % der neu beschafften Busse sogenannte „saubere Busse“ sein, und im Zeitraum von 2026 bis 2030 sind 65 % zu erfüllen. Darüber hinaus sollen 50 % dieser „sauberen Busse“ (lokal) emissionsfrei betrieben werden.

Die EU definiert „saubere Busse“ in der Richtlinie 2014/94/EU als Busse, die mit „alternativen Kraftstoffen“ angetrieben werden. Diese Kraftstoffe dienen zur Reduzierung der CO₂-Emissionen. Hierzu zählt die EU folgende Energieträger:

- › Elektrizität
- › Wasserstoff
- › Biokraftstoffe (i. S. d. Richtlinie 2009/28/EG)
- › Synthetische und paraffinhaltige Kraftstoffe
- › Erdgas, einschließlich Biomethan CNG und LNG
- › Flüssiggas (LPG)

Des Weiteren werden die Nullemissionsbusse als Fahrzeuge definiert, die mit den oben aufgelisteten Kraftstoffen betrieben werden und darüber hinaus entweder keinen Verbrennungsmotor nutzen oder einen Verbrauch von weniger als 1 g CO₂/kWh bzw. von 1 g CO₂/km vorweisen können. Diese Werte erreichen derzeit ausschließlich die Energieträger Elektrizität und Wasserstoff.

Die Abbildung 2-5 veranschaulicht die festgelegten Quoten der EU für Deutschland.

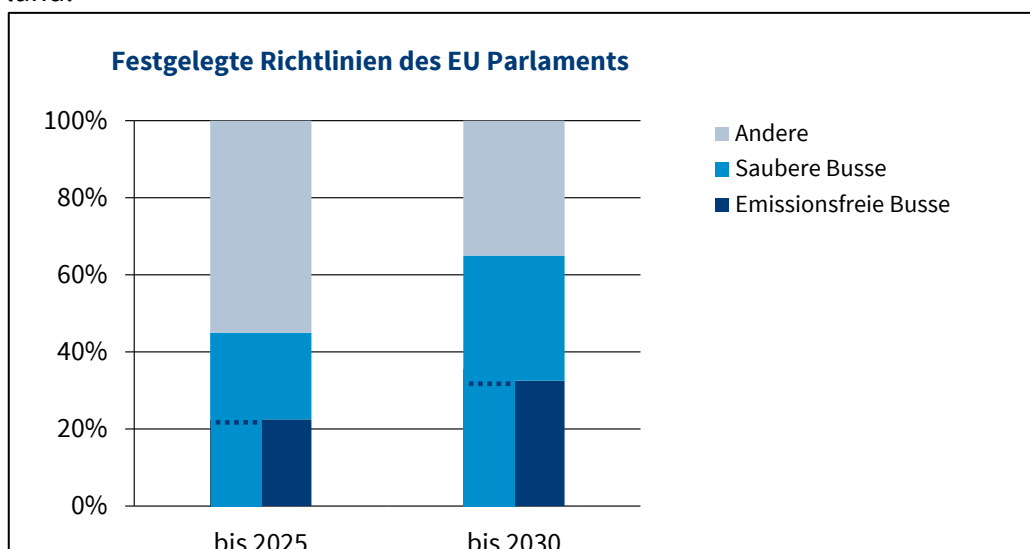


Abbildung 2-5 Festgelegte Quoten für die Neubeschaffung von ÖPNV-Bussen in Deutschland

3 Informationen zur E-Bustechnologie

E-Busse fahren leise, vibrationsarm und lokal emissionsfrei.² Damit tragen sie erheblich zur Verringerung der Lärm- und Abgasbelastung bei. Der primäre Antrieb der E-Busse ist ein Elektromotor, welcher von einer Hochvoltbatterie mit Strom versorgt wird. Die Verschaltung der Antriebstechnik ist vereinfacht in Abbildung 3-1 dargestellt.

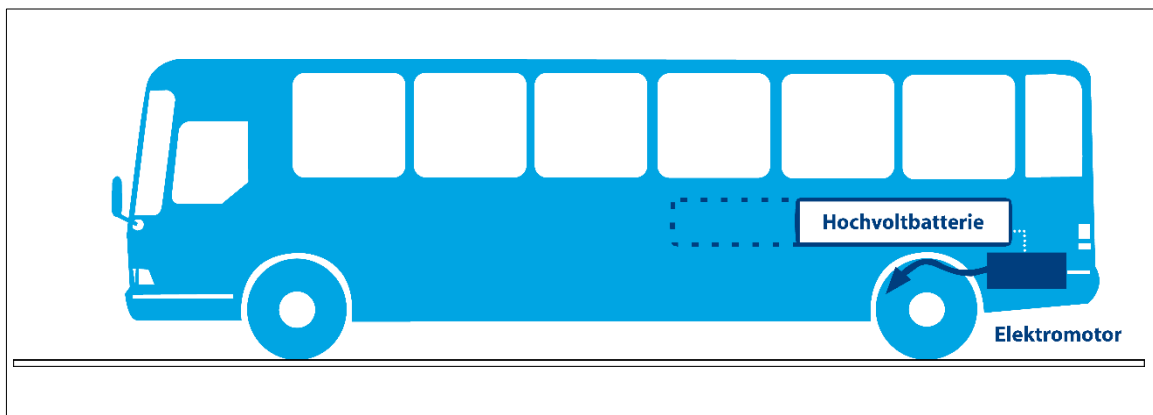


Abbildung 3-1: Darstellung eines E-Bus-Antriebs

Das Laden der Hochvoltbatterie kann mit unterschiedlichen Ladestrategien realisiert werden. In diesem Bericht werden folgende Arten von E-Bussen unterschieden:

1. Batteriebusse mit Depotladung (auch Vollader bzw. Nachtlader genannt)
2. Batteriebusse mit Gelegenheitsladung (auch Teillader genannt)
3. Batteriebusse verbunden mit dem Oberleitungsnetz
4. Brennstoffzellenbusse (BZ-Busse)

² In diesem Bericht werden die Begriffe „emissionsfrei“ und „Nullemission“ synonym verwendet. Eine Definition dazu ist im Anhang zu finden.

3.1 Depotlader (Vollader, Nachtlader)

Der Batteriebus als Depotlader ist ein rein elektrisch angetriebenes Fahrzeug. Die Antriebsleistung erfolgt über einen Elektromotor, z.B. einen Radnabenmotor. Die dafür notwendige Energie wird aus einer Batterie mit einer Speicherkapazität von etwa 300 – 600 kWh bereitgestellt, was eine sichere Reichweite von ganzjährig bis zu 250 km ermöglicht. Die Ladung der Batterien erfolgt in der Regel konduktiv auf 100 % („voll“) mittels Depot- bzw. Nachtladung. Dadurch ist der Bus im Rahmen seiner Reichweite flexibel auf unterschiedlichen Linien einsetzbar.

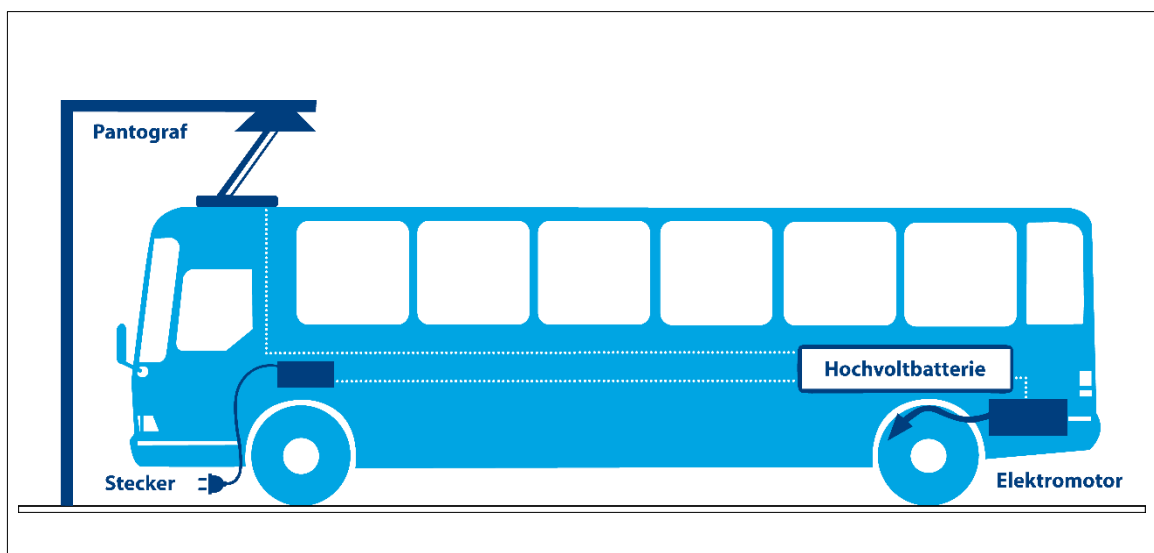


Abbildung 3-2: Funktion des Depotladers

Abbildung 3-2 veranschaulicht die Versorgung des E-Motors an der Antriebsachse mit Strom durch eine Hochvoltbatterie. Die Wiederaufladung der Batterie erfolgt in der Praxis meist über einen Stecker oder einen Pantografen (Stromabnehmer, mit dessen Hilfe sich das Laden im Depot weitgehend automatisieren und damit wesentlich vereinfachen lässt). Der Ladevorgang dauert, abhängig von der freien elektrischen Anschlussleistung im Depot, vier bis acht Stunden. Für diese Ladestrategie ist der Aufbau einer entsprechenden

Ladeinfrastruktur im Depot notwendig. Die Vor- und Nachteile lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- + Niedrige Einstiegshürde
- + Flexibel einsetzbar im Rahmen der Reichweite
- Sichere Reichweite rein elektrisch ca. 250 km
- Ggf. geringere Beförderungskapazität im Vergleich zur Dieseltechnik (bis zu 20 % geringer)

Depotlader bieten die geringste Einstiegshürde aller Nullemissionsantriebe. Dies liegt vor allem an der einfachen Ladeinfrastruktur (per Stecker im Depot). Die Nachteile der Technologie liegen im Wesentlichen an der begrenzten Reichweite der Busse und dem Mehraufwand bei der weiteren Flottenumstellung, da eine ausreichende Ladeleistung im Depot zur Verfügung stehen muss. Aufgrund des Batteriegewichts kann die Beförderungskapazität im Vergleich zur Dieseltechnik geringer sein. In Abhängigkeit des Fahrzeugherstellers und -modells können die Abweichungen bis zu -20 % liegen. Dies und die geringe Reichweite kann gegebenenfalls den Einsatz von Mehrfahrzeugen und dementsprechend zusätzlichen Fahrerinnen und Fahrern erfordern.

3.2 Gelegenheitslader (Teillader)

Wesentliche Unterschiede beim Batteriebus als Gelegenheitslader liegen in der Batteriekapazität und der Aufladung. Die Batterie hat eine typische Kapazität von 90 bis 150 kWh (am Beispiel eines 12 m Busses) und ist somit kleiner und leichter als die des Depotladers. Die Aufladung der Batterie erfolgt auf der Strecke (z.B. an den Endhaltestellen) über einen Pantographen oder ein induktives Ladesystem. In Abbildung 3-3 wird das Prinzip eines Gelegenheitsladers veranschaulicht. Dank der regelmäßigen Zwischenladung (z.B. an den Endhaltestellen) kann der Umlauf theoretisch beliebig lang sein. An den Ladepunkten ist

eine Ladezeit von typischerweise 10 Minuten notwendig. Der Gelegenheitslader ist wegen der festgelegten Ladepunkte jedoch nur eingeschränkt auf anderen Strecken einsetzbar.

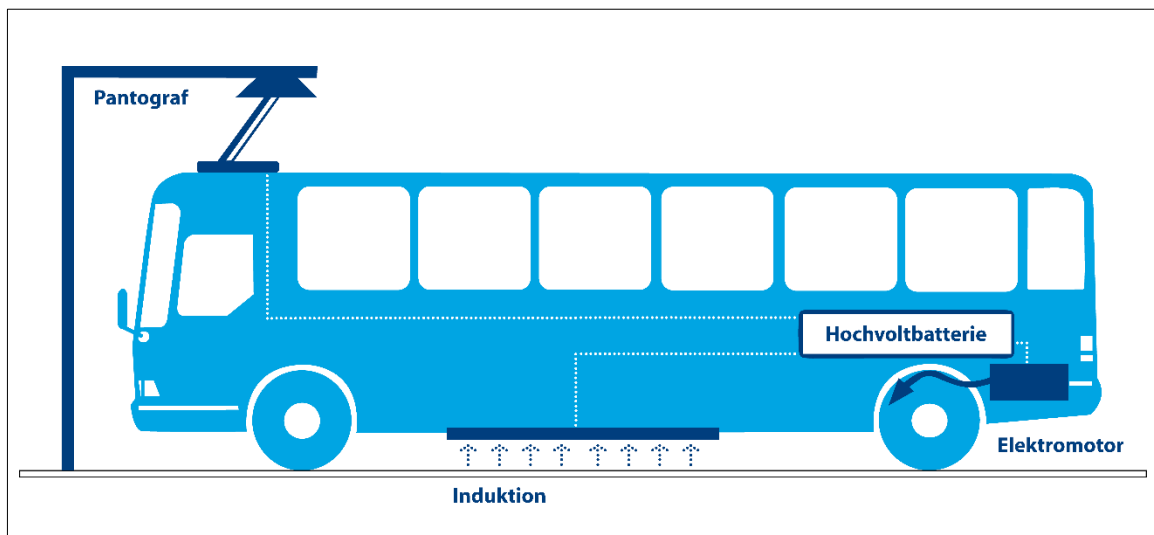


Abbildung 3-3 Funktion eines Gelegenheitsladers

Die Vor- und Nachteile von Gelegenheitsladern sind:

- + Theoretisch unbegrenzte Reichweite auf der Linie
- + Geringere Batteriekapazität als beim Depotlader
- Begrenzte Einsetzbarkeit auf anderen Strecken
- Erhöhter planerischer Aufwand beim Einrichten der Linie

Bei den Gelegenheitsladern stehen dem hohen Reichweitenpotenzial der hohe Aufwand der betrieblichen Neuplanung sowie die eingeschränkte Flexibilität der Busse beim Einsatz auf anderen Linien gegenüber. Je nach Batteriegröße können Gelegenheitslader auch eine geringere Beförderungskapazität (von 0 bis -10 %) im Vergleich zur Dieselseltechnik aufweisen. Dies kann gegebenenfalls den Einsatz von Mehrfahrzeugen und dementsprechend zusätzlichen Fahrerinnen und Fahrern erfordern.

3.3 Oberleitungsbus

Der Oberleitungsbus ist mit dem Oberleitungsnetz verbunden. Die elektrische Energie für den Bus wird über die Oberleitung bereitgestellt. Somit besteht keine Einschränkung bzgl. der Reichweite des Busses. Die Energieübertragung erfolgt durch eine dynamisch-konduktive Verbindung zwischen der Oberleitung und der Verbindung zum Bus. Diese wird zumeist mit einem Stromabnehmer realisiert, welcher über den Bus hinausragt und dank seiner elastischen Ausführung flexibel einsetzbar ist. Das vereinfachte Wirkprinzip wird in Abbildung 3-4 dargestellt.

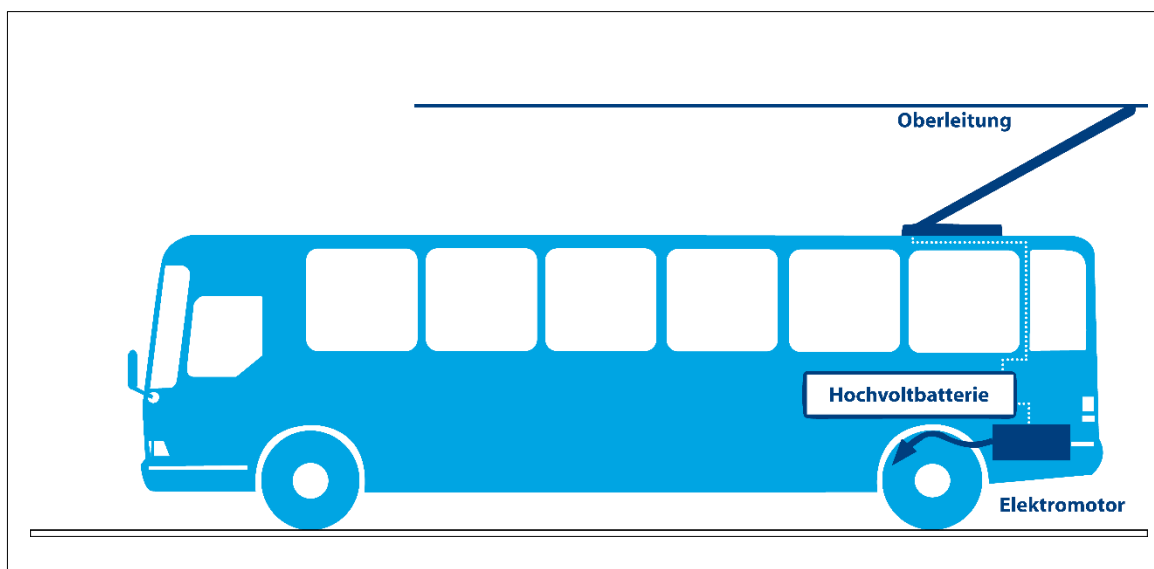


Abbildung 3-4: Funktion des Oberleitungsbusses

Man unterscheidet allgemein zwischen zwei Arten des Oberleitungsbusses:

1. Konventioneller Oberleitungsbus:

Die elektrische Energie, welche von der Oberleitung bereitgestellt wird, wird direkt von dem Elektromotor für den Antrieb genutzt. Der Bus verfügt über keine eingebaute Hochvoltbatterie und muss daher

permanent Kontakt mit der Oberleitung halten. Die Reichweite ist daher auf das Oberleitungsnetz begrenzt.

2. Oberleitungsbus mit integrierter Hochvoltbatterie (Batterieoberleitungsbus):

Die Hochvoltbatterie ist der Stromversorgung und dem Elektromotor zwischengeschaltet. Damit ist es möglich, den Bus für eine bestimmte Fahrstrecke von der Oberleitung zu entkoppeln und autark zu betreiben.

Für die Umsetzung eines ÖPNV, der vollständig mit Hilfe von Oberleitungsbusen betrieben wird, muss entweder ein intaktes Oberleitungsnetz vorliegen, oder dieses muss errichtet werden. Für die Realisation eines solchen Netzes ist mit einem sehr hohen planerischen wie wirtschaftlichen Aufwand zu rechnen. Die Vor- und Nachteile von Oberleitungsbusen sind:

- + Theoretisch unbegrenzte Reichweite auf der Linie
- + Keine Wartezeiten bzgl. der Aufladung
- Nur Betrieb auf Strecken mit Oberleitung möglich
- Hoher planerischer Aufwand beim Einrichten der Linie

3.4 Brennstoffzelle

Der BZ-Bus wandelt in einer Brennstoffzelle den Energieträger Wasserstoff in elektrische Energie um. Der erzeugte Strom treibt wiederum den elektrischen Fahrmotor des Busses an. Die im Vergleich zu Batterien von Voll- bzw. Gelegenheitsladern sehr kleine Batterie (typischerweise 20 bis 60 kWh) dient in erster Linie zur Regelung der unterschiedlich abgerufenen Leistungen und zur Rückgewinnung der Bremsenergie (Rekuperation). Übliche Reichweiten für einen Brennstoffzellenbus sind etwa 400 km. Die Betankung erfolgt über eine

Wasserstofftankstelle (ähnlich einer Erdgas- oder Dieseltankstelle) und dauert ca. 10 Minuten. Abbildung 3-5 zeigt das Funktionsprinzip eines BZ-Busses (mit dem Wasserstofftank auf dem Dach des BZ-Busses).

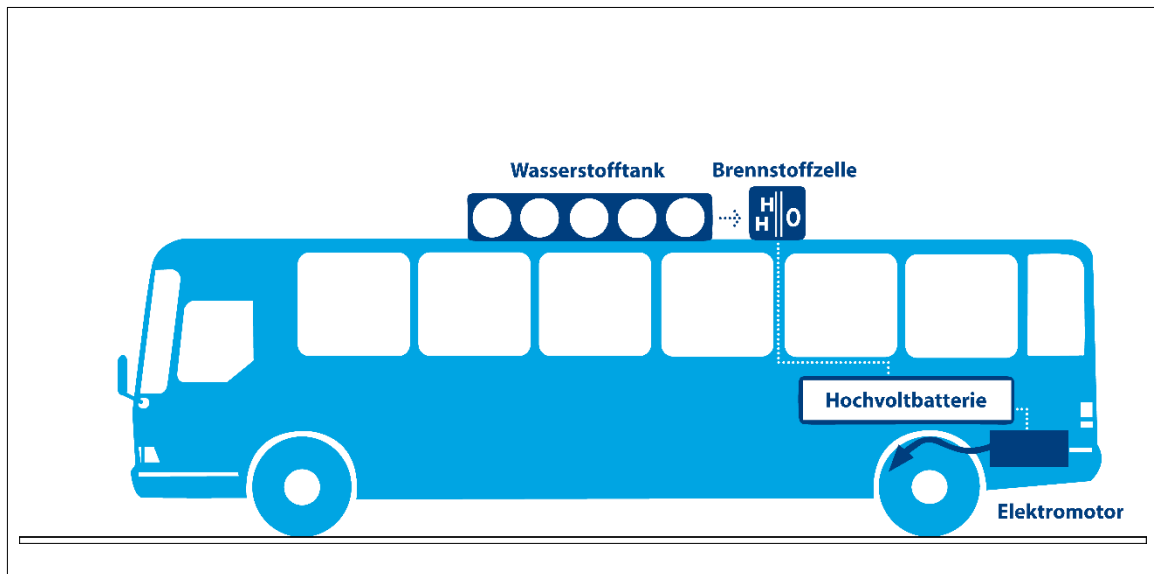


Abbildung 3-5: Funktion des BZ-Busses

Die Vor- und Nachteile von BZ-Bussen sind:

- + Reichweiten bis ca. 400 km
- + Flexibel einsetzbar (wie Diesel- oder Erdgasbus)
- Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur erforderlich

Den hohen Reichweiten dieser Nullemissionstechnologie stehen die Investition in eine Wasserstoffinfrastruktur gegenüber. Jedoch bietet die BZ-Technologie im Vergleich zu Batteriebusen eine erleichterte Umstellung der Gesamtflotte auf Elektromobilität. Aufgrund der Reichweiten und Flexibilität von BZ-Bussen können Dieselbusse betrieblich praktisch eins zu eins ersetzt werden. Zudem verfügen BZ-Busse im Vergleich zur Batterietechnik über weniger schwere Energiespeicher und weisen dementsprechend tendenziell höhere

Beförderungskapazitäten als Batteriebusse auf. Nach heutigem Stand der Technik ist jedoch auch bei BZ-Bussen mit einer geringeren Beförderungskapazität von 0 bis -10 % (in Abhängigkeit des Herstellers und des Fahrzeugmodells) im Vergleich zu Dieselnissen zu rechnen.

3.5 Entwicklung der E-Bus-Technologie

Seit 2018 hat sich die E-Bus-Technologie stetig weiterentwickelt. Die nachfolgende Abbildung 3-6 zeigt eine kurze Zusammenfassung hinsichtlich der technologischen Fortschritte in Bezug auf einen 12-m-Solobus.

		2018		2023	
E-BUS	Stand der Technik	Prototypen, Einzelbusse	↗	Serienproduktion, Umstellung gr. Flotten	
BEV-BUS	Max. Batteriekapazität Depotlader	ca. 350 kWh	71 % ↗	bis zu 600 kWh (350 kWh heute typisch)	
	Sichere Tagesfahrleistung Depotlader über alle Jahreszeiten	ca. 150 km	66 % ↗	ca. 250 km*	
	Kostenentwicklung Depotlader	ca. 600.000 €/Bus	0 - 8 % =↘	ca. 550.000 €/Bus	
BZ-BUS	Kostenentwicklung BZ-Bus	ca. 700.000 €/Bus	19 % ↘	ca. 570.000 €/Bus	

* Von OEM heute typischerweise über die Lebensdauer eines Busses (10 Jahre) garantiert. Gelenkbusse: (18 m) 200 km

Abbildung 3-6: Entwicklung der E-Bus-Technologie 2018 bis 2022

Während 2018 die ersten Prototypen auf den Markt gekommen sind und im Rahmen von ersten Elektrifizierungsmaßnahmen einzelne Busse umgestellt worden sind, befinden sich die E-Busse (Batterie- und Brennstoffzellenbusse) heute in Serienproduktion. Busbetreiber gehen die Umstellung von großen Flotten an. Emissionsfreie Antriebstechnologien haben sich als Alternative zur Diesertechnologie etabliert.

Die heute typischerweise zum Einsatz kommenden 350 kWh Batterien stellten 2018 noch die maximale am Markt verfügbare Kapazität für Batteriebusse dar. Bushersteller bieten derzeit schon bis zu 600 kWh Batteriekapazitäten an. Einhergehend mit der Kapazitätsentwicklung haben sich auch die Reichweiten der Depotlader verbessert. Heutzutage sind über alle Jahreszeiten hinweg sichere Reichweiten von ca. 250 km (im Vergleich zu 150 km in 2018) realisierbar.

Die Kosten für Depotlader hingegen sind in den letzten Jahren annähernd konstant geblieben (0 bis - 8 %). Wesentliche Faktoren hierfür sind erhöhten Batteriekapazitäten bei gleichzeitig reduzierten Produktionskosten.

Eine starke Senkung der Produktionskosten konnte hingegen bei den BZ-Bussen erzielt werden, sodass sich die Preise für die BZ-Busse um ca. 20 % seit 2018 reduziert haben. Die Reichweite und Performance von Brennstoffzellenbussen sind dabei konstant geblieben (bis ca. 400 km sichere Reichweite, ca. 10 Minuten für eine Betankung).

3.6 Allgemeine Informationen zu Komponenten und Infrastruktur

Im Folgenden wird auf verschiedene Merkmale der einzelnen Komponenten und der Infrastruktur eingegangen. Hierbei werden vor allem die Besonderheiten der Batterietechnologie sowie der Lade- und Betankungsinfrastruktur betrachtet.

Energieverbrauch

Der Energieverbrauch von Elektrobussen hängt von unterschiedlichen Faktoren ab:

- › Bedienung durch den Fahrer

- › Anzahl der Haltestellen
- › Stau/Verkehr
- › Außentemperatur/Witterung
- › Anzahl der Fahrgäste
- › Höhenprofil der Fahrstrecke
- › Gewicht des Fahrzeugs

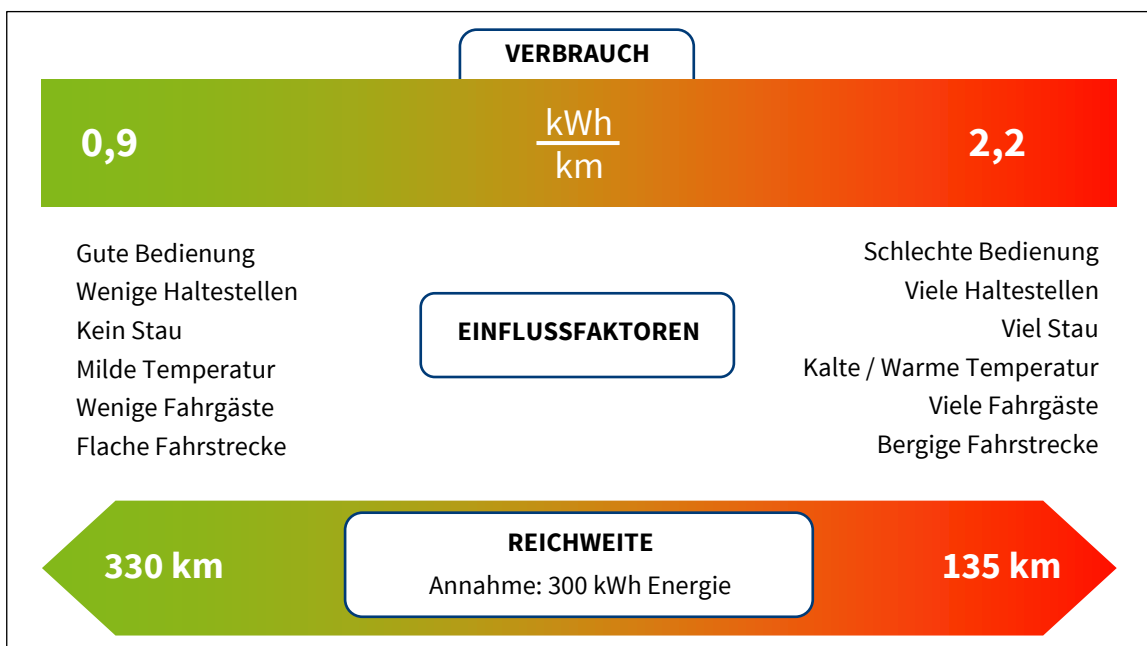


Abbildung 3-7: Beispielhafte Verbräuche und Reichweiten für einen 12-m-Batteriebus

Für einen 12-m-Standardbus schwankt der Verbrauch etwa zwischen 0,9 kWh/km (günstige Bedingungen) und 2,2 kWh/km (ungünstige Bedingungen). Abbildung 3-7 verdeutlicht beispielhaft die Spanne des Energieverbrauchs bei unterschiedlichen Bedingungen.

Als Richtwert für den Energieverbrauch kann ein Durchschnitt von ca. 1,5 kWh/km angenommen werden. Die Nutzung von Heizung und Klimaanlage hat einen starken Einfluss auf die Energiebilanz des Fahrzeugs. Aus dem hohen Wirkungsgrad des elektrischen Antriebsstrangs resultiert, dass – im

Gegensatz zum Verbrennungsmotor – während des Betriebs nur wenig Abwärme erzeugt wird, die zum Heizen des Fahrzeuges herangezogen werden kann (vgl. Abbildung 3-8).

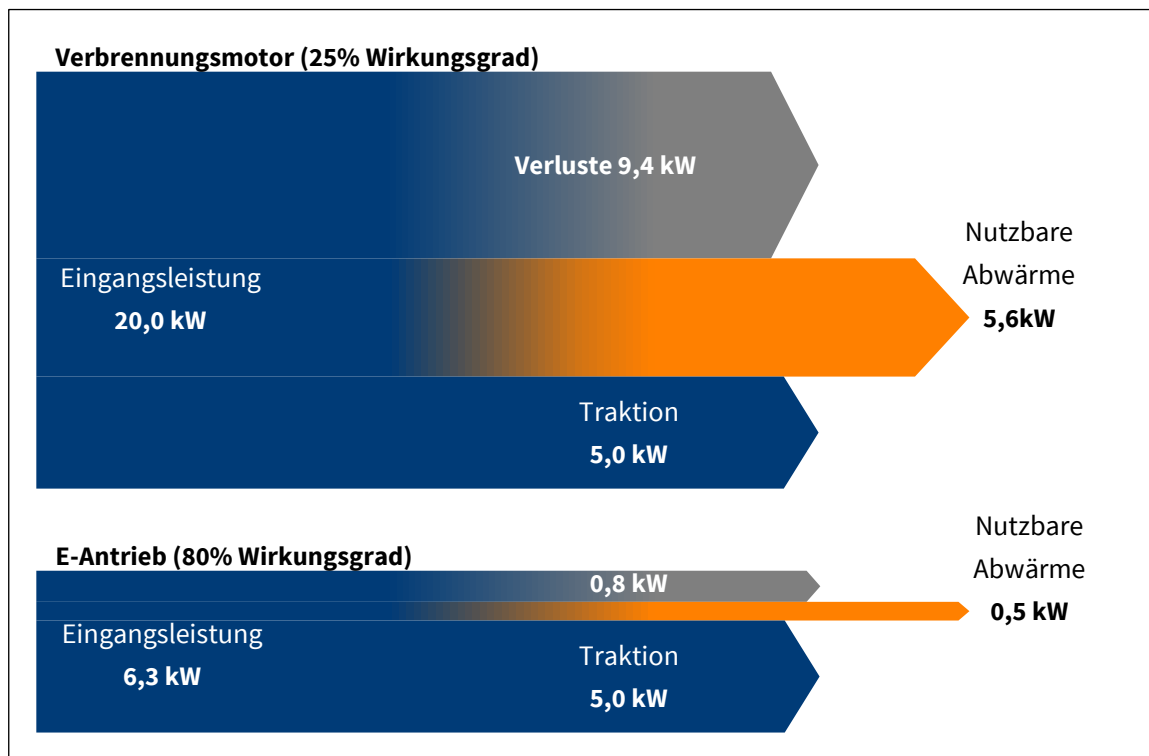


Abbildung 3-8 Vergleich der nutzbaren Abwärme, Verbrennungsmotor vs. E-Antrieb (Beispiel PKW)

Ein Großteil der notwendigen Energie für die Heizung des Fahrgastraums muss aus diesem Grund ebenfalls aus der Antriebsbatterie entnommen werden. Dies erhöht den Gesamtverbrauch im Vergleich zum unbeheizten Betrieb erheblich. Im Gegensatz zu batterieelektrischen Bussen erzeugen BZ-Busse im Zuge der chemischen Reaktion jedoch Abwärme, welche für die Beheizung des Innenraumes genutzt werden kann. Daher bleibt die Reichweite in diesem Fall über alle Jahreszeiten nahezu unverändert.

Für Batteriebusse ist der Einsatz einer mit fossilen Brennstoffen betriebenen Zusatzheizung (typischerweise Dieselheizung) denkbar. Die Reichweite des

Batteriebusse ist entsprechend größer, da die Energie für die Innenraumheizung in diesem Fall nicht aus der Batterie, sondern aus der Zusatzheizung entnommen wird. Der Einsatz einer solchen nichtelektrischen Zusatzheizung hat jedoch zur Folge, dass im Winter weiterhin lokale Emissionen ausgestoßen werden. Derzeit sind auch moderne Heizsysteme, die nach dem Prinzip der Wärmepumpe (Kreisprozess) arbeiten, in elektrisch betriebenen Fahrzeugen vermehrt eingesetzt. Diese Systeme sind energetisch günstiger und beeinflussen daher die Reichweite nicht so stark. Für die Klimatisierung der Busse an heißen Tagen wird eine elektrisch betriebene Klimaanlage eingesetzt. Da es sich bei der Kühlung um einen Kreisprozess handelt, benötigt sie, verglichen mit einer elektrischen Heizung, deutlich weniger elektrische Energie.

Batteriekapazität

Die Batterie eines Elektrofahrzeugs wird in der Praxis nie ganz leergefahren, da die Entladung durch das Batteriemanagement begrenzt wird. Dies hat neben technischen auch ökonomische Gründe, denn die Batterielebensdauer würde durch das Leerfahren stark beeinflusst. Infolgedessen ist der Unterschied zwischen Batterie/Nennkapazität und nutzbarer Energie zu beachten. Typische Nutzungsgrade für Lithium-Traktionsbatterien liegen bei bis zu 80 %.

Die Lade- und Entladevorgänge einer Batterie sind verlustbehaftet. Die Ladeverluste entstehen durch externe oder interne Ladeeinrichtungen während des Ladevorgangs und betragen etwa 5 bis 10 %. Die Höhe der Ladeverluste steht in Abhängigkeit zu der verwendeten Ladetechnologie (Ladesäule, Pantograf, Induktion etc.) und der Batterie. Entladeverluste sind Verluste, die bei der Nutzung der elektrischen Energie bis hin zum Rad auftreten. Hierbei sind ebenfalls Verluste zwischen 5 und 10 % anzunehmen. Dabei sind die Batterieart, die Leistungselektronik und der E-Motor entscheidend. Die Energiebilanz einer Batterie ist schematisch in Abbildung 3-9 dargestellt.

Insgesamt können von der (vom Ladegerät) bereitgestellten Energie etwa 80 bis 90 % im E-Motor umgesetzt werden.

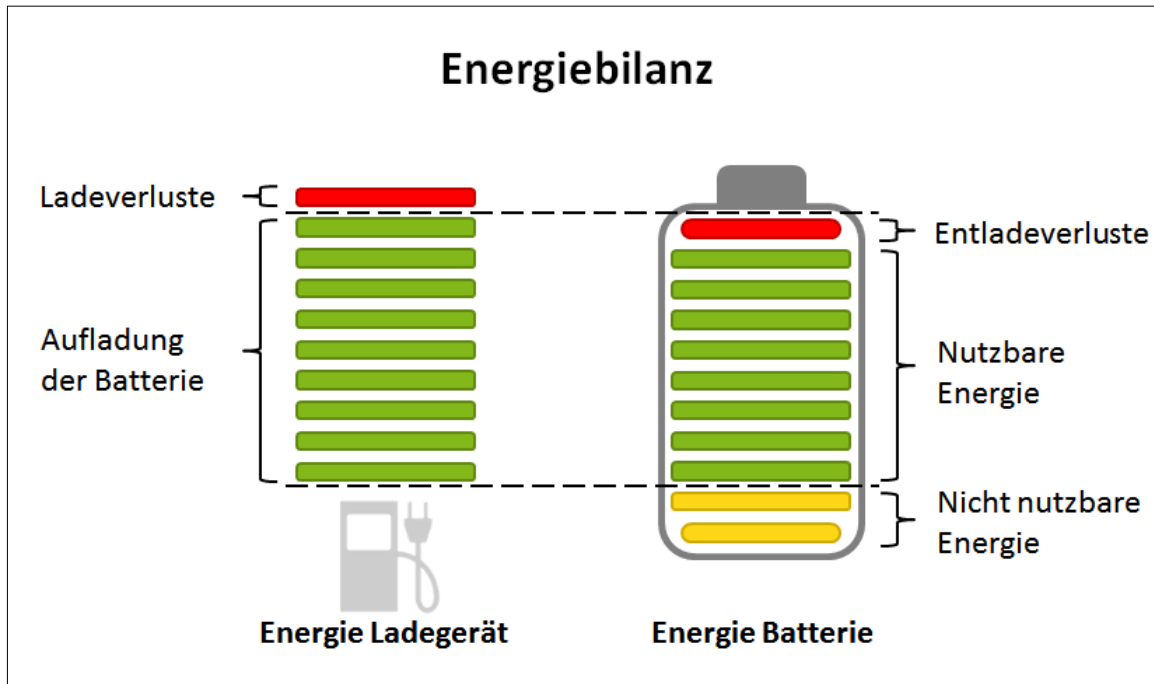


Abbildung 3-9 Energiebilanz beim Laden und Entladen der Batterie

Ladeinfrastruktur für Depotladung

Die benötigten Ladegeräte für die Depotladung haben üblicherweise eine Ladeleistung von 40 bis 80 kW. Die Ladeleistung ist abhängig von der Batteriegröße und der Anzahl der Busse, die geladen werden sollen. Außerdem ist die Ladezeit zu berücksichtigen, die für die Aufladung der Batterie zur Verfügung steht. Das Laden der Batterien dauert je nach Typ und Ladekapazität etwa vier bis acht Stunden. Der Zusammenhang zwischen Ladedauer, Batteriegröße und erforderlicher Ladeleistung ist in Abbildung 3-10 dargestellt.

Preise für handelsübliche Ladegeräte liegen bei 20.000 € bis 40.000 €. Bei der Ladung mittels Pantografen entstehen höhere Kosten, da hierfür Ladehauben und eine entsprechende Kabelführung zu den Ladestationen erforderlich sind.

Im Allgemeinen sind die Kosten für die Ladeinfrastruktur von der Leistung und der Anschlussart abhängig.

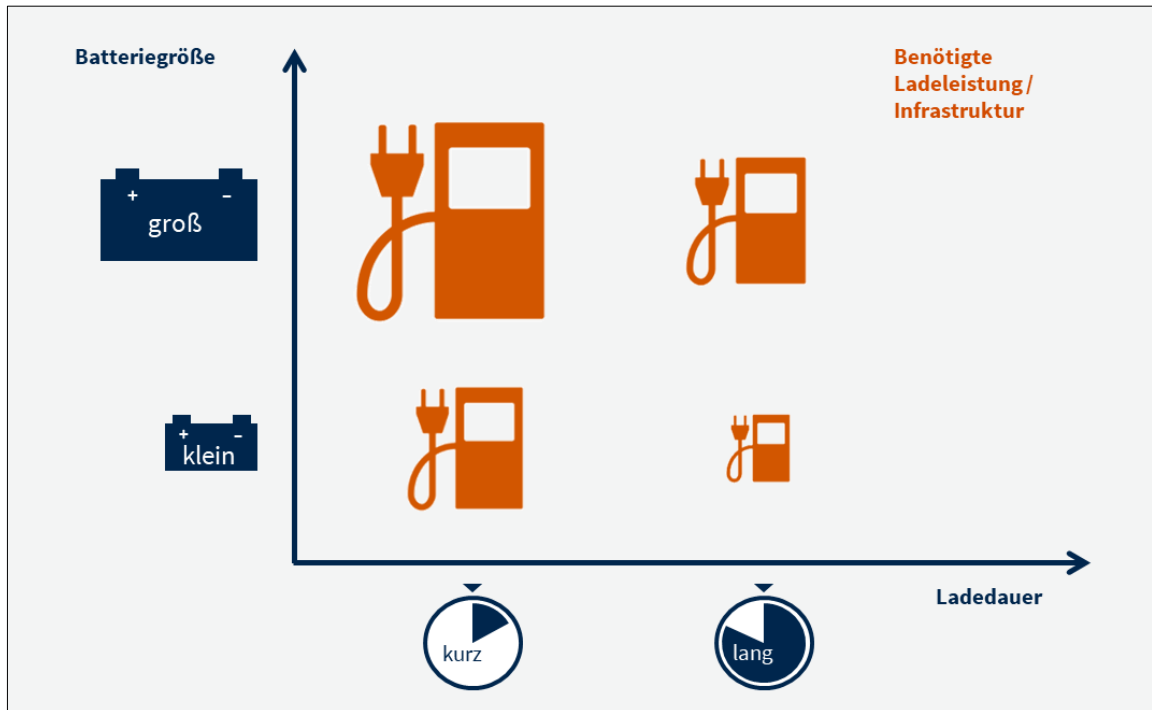


Abbildung 3-10 Abhängigkeit der Ladeleistung von Batteriegröße und Ladedauer

Grundsätzlich gilt: Wird eine kurze Ladedauer gewünscht, ist eine hohe Ladeleistung erforderlich. Auch eine größere Batteriekapazität bedingt die Notwendigkeit einer höheren Ladeleistung (bei konstanter Ladedauer). Die Dimensionierung der Ladeinfrastruktur hängt von der Batteriegröße und von der Ladedauer ab. Bei zunehmender Anzahl von Batteriebusen ist gegebenenfalls ein detailliertes Lademanagement einzuführen, um die Maximallast zu begrenzen oder zu optimieren. Dies kann bedeuten, dass nicht alle Busse zur gleichen Zeit an einem Standort geladen werden, sondern die Ladevorgänge über den Tag verteilt sind. Abbildung 3-11 zeigt schematisch eine zeitliche Verschiebung der Ladevorgänge zur Reduzierung der Maximallast. Eine solche Verteilung der Lasten kann durch ein Lademanagement gewährleistet werden.

Für die optimale Ausnutzung der Infrastruktur (und ggf. eine vergünstigte Stromabnahme) ist die Abstimmung mit den örtlichen Energieversorgern und Verteilnetzbetreibern zu empfehlen.

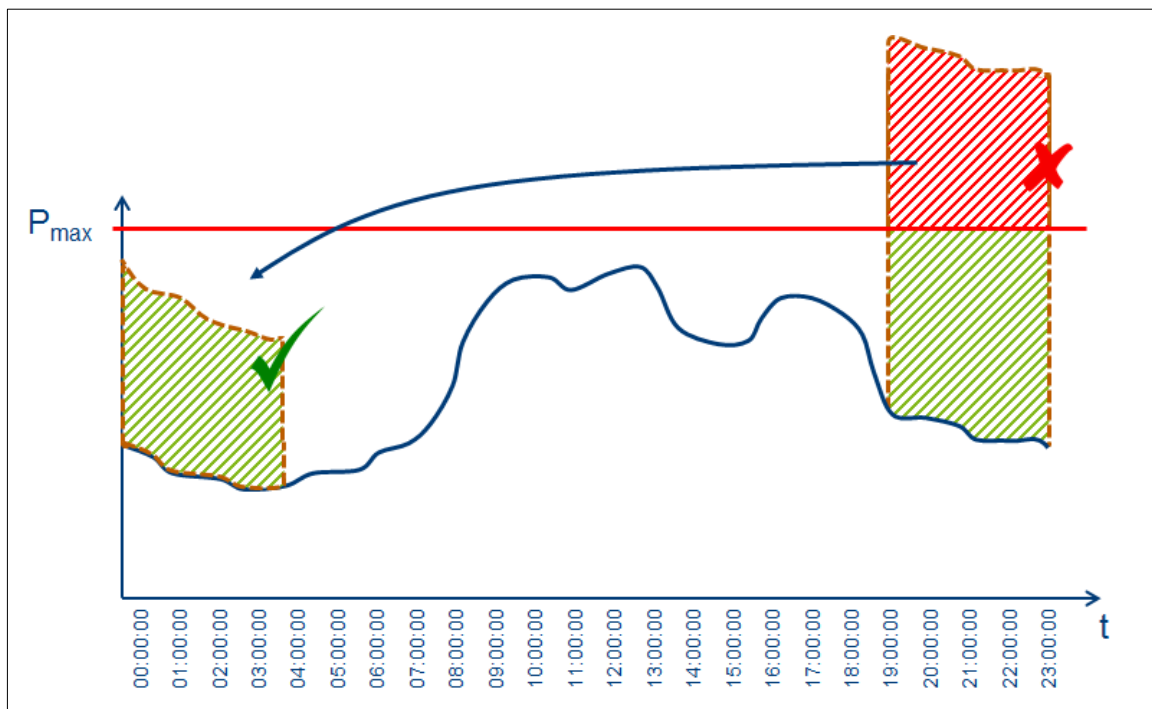


Abbildung 3-11 Lademanagement zur Verteilung ungünstiger Lasten

Ladeinfrastruktur für Gelegenheitslader

Bei der Ladestrategie der Gelegenheitsladung befindet sich die benötigte Ladeinfrastruktur typischerweise auf der jeweiligen Buslinie. Als Leistungsübertragungstechnologie für die Ladeinfrastruktur kommt sowohl die induktive als auch die konduktive Ladung in Betracht:

› Induktive Ladung:

Bei der induktiven Ladung wird die Batterie des Fahrzeugs berührungslos über elektromagnetische Wechselwirkungen zwischen zwei Platten mit integrierten Spulen geladen. Eine dieser Platten wird in den Boden des Fahrzeugs eingebaut (auch „Pick-Up“ genannt), die andere wird in

den Boden des Ladeplatzes (z.B. Straße/Haltestelle) integriert. Dadurch sind die optischen Eingriffe in das Straßenbild sehr gering. Der Ladevorgang erfolgt automatisch und schnell.

› **Konduktive Ladung:**

Bei der konduktiven Ladung wird das Fahrzeug an eine Schnellladevorrichtung angeschlossen. Neben der klassischen Variante mit Ladesäule und Ladekabel kommen für Batteriebusse in den letzten Jahren vermehrt automatisierte Lösungen mit Pantografen zum Einsatz. Bei dieser Variante können die Busse in kürzester Zeit nachgeladen werden, ohne dass der Fahrer das Fahrzeug zum Laden verlassen muss.

In der Regel stellt die Ladung mit Hilfe eines Pantografen gegenüber der induktiven Ladung eine deutlich günstigere Variante dar. Für induktive Ladeeinrichtungen sind 30 bis 50 % höhere Investitionskosten als für konduktive Ladeeinrichtungen zu erwarten. Neben den höheren Investitionskosten schneiden auch die Ladeleistungen im Vergleich zu den konduktiven Ladestationen schlechter ab. Aktuell sind Leistungen bis maximal 200 kW am Markt erhältlich. Ladestationen mit Pantografen können hingegen im Alltagsbetrieb schon erfolgreich bis zu 500 kW und mehr laden. Die Induktionsladung scheint zudem im Alltagseinsatz momentan noch fehleranfälliger als die konduktive Ladeinfrastruktur zu sein. Nicht zuletzt ist die unterirdisch zu bauende Ladetechnik planungsseitig aufwendiger zu realisieren. Aus diesen Gründen wird die induktive Ladung hier nicht weiter beschrieben.

Konduktive Ladung über einen Pantografen

Es ist grundsätzlich zwischen zwei Varianten von Pantografen (Stromabnehmer) zu unterscheiden:

1. **Top-down:** Der Pantograf ist in den Lademast integriert und fährt bei der Anfahrt des Busses herunter. Auf dem Busdach befindet sich eine

entsprechende Kontaktschiene für die Ankopplung des Pantografen (vgl. Abbildung 3-12).



Abbildung 3-12 Top-Down-Pantograf

2. **Bottom-Up:** Der Pantograf befindet sich auf dem Busdach. Der Lademast trägt in diesem Fall nur den Kollektor (in der Ladehaube). Wird der Ladevorgang gestartet, fährt der Pantograf vom Bus hoch und dockt am Kollektor an (vgl. Abbildung 3-13).



Abbildung 3-13 Bottom-Up-Pantograf

Beide Varianten sind technisch ausgereift. Bezüglich der Positionierung des Masts hat sich die Installation auf der Höhe der ersten Achse technisch und betrieblich als sinnvoll erwiesen. Für die korrekte Positionierung des Busses stehen dem Fahrer zahlreiche Hilfsmittel zur Verfügung, beispielweise farbige Streifen am Bordstein auf der Höhe der vorderen Tür oder eine kleine Straßenschwelle/-senke.

Die wesentlichen Vor- und Nachteile der zwei Varianten sind in Tabelle 3-1 zusammengefasst.

Tabelle 3-1 Vor- und Nachteile der Top-Down- und Bottom-Up-Pantografen-Variante

	Vorteile	Nachteile
Top Down	<ul style="list-style-type: none"> + Leichteres Fahrzeug + Günstigeres Fahrzeug (bietet sich für große Flotten an) + Keine beweglichen Teile auf dem Busdach + Bessere Wetterbeständigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> - Ausfall des Pantografen bedeutet Ausfall der gesamten Flotte (ggf. Redundanzlösung nötig) - Nicht flexibel für automatisierte Ladung im Depot - Teurere Infrastruktur

Bottom-Up	+ Ausfall des Pantografen bedeutet Ausfall eines Busses	- Mehr Gewicht auf dem Bus (ca. 1 Fahrgast weniger)
	+ Bietet sich für automatisierte Ladelösungen im Depot an („Ladeschiene“)	- Teureres Fahrzeug (bietet sich für kleine Flotte an)
	+ Günstigere Infrastruktur	- Bewegliche Teile auf dem Busdach

Wasserstoff-Betankungsinfrastruktur

Für die Treibstoffversorgung von Brennstoffzellenfahrzeugen wird eine H₂-Tankstelle benötigt. Die Betankung verläuft nach einem ähnlichen Prinzip wie bei CNG- oder Diesel-Bussen. Sie wird beispielhaft in Abbildung 3-14 gezeigt.



Abbildung 3-14 Betankung eines BZ-Busses

Der Wasserstoff kann auf drei verschiedene Arten an der Tankstelle bereitgestellt werden. So kann der Transport entweder per LKW oder über eine Pipeline erfolgen. Darüber hinaus ist es möglich, den Wasserstoff mit Hilfe eines Elektrolyseurs direkt an der Tankstelle zu produzieren. In Abbildung 3-15 ist die

Anlieferung durch LKW dargestellt. Die wesentlichen Komponenten und Arbeitsschritte einer Tankstelle mit Wasserstoffanlieferung sind:

- › Anlieferung des H₂ mittels LKW
- › Lagerung des H₂ im Pufferspeicher an der Tankstelle
- › Verdichtung des H₂ auf Nenndruck (350 bar für Busse und 700 bar für PKW)
- › Lagerung des Wasserstoffs im Hochdruckspeicher
- › Kraftstoffabgabe über die Zapfsäule

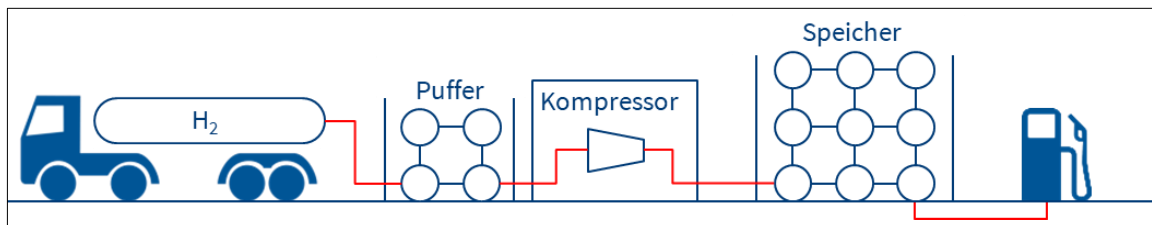


Abbildung 3-15 H₂-Tankstelle mit Wasserstoffanlieferung mittels LKW

Alternativ zur Anlieferung per LKW besteht die Möglichkeit, den Wasserstoff mittels Pipeline zu transportieren. Die dafür benötigten Komponenten und Arbeitsschritte sind wie folgt:

- › Anlieferung des H₂ mittels Pipeline
- › Lagerung des H₂ im Pufferspeicher an der Tankstelle
- › Verdichtung des H₂ auf Nenndruck (350 bar für Busse und 700 bar für PKW)
- › Lagerung des Wasserstoffs im Hochdruckspeicher
- › Kraftstoffabgabe über die Zapfsäule

Es ist auch möglich, den Wasserstoff direkt vor Ort durch ein Elektrolysemodul zu erzeugen (vgl. Abbildung 3-16). Die Komponenten und Arbeitsschritte einer Tankstelle mit Wasserstoffherzeugung sind:

- › Erzeugung des H₂ mittels elektrischer Energie und Wasser (im Elektrolyseur)
- › Lagerung des H₂ im Pufferspeicher an der Tankstelle
- › Verdichtung des H₂ auf Nenndruck (350 bar für Busse und 700 bar für PKW)
- › Lagerung des Wasserstoffs im Hochdruckspeicher
- › Kraftstoffabgabe über die Zapfsäule

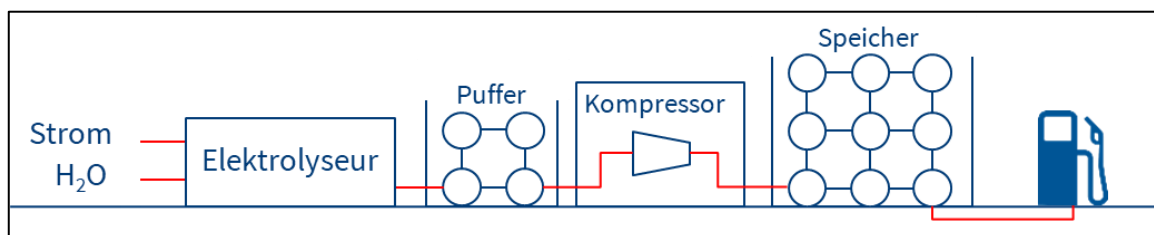


Abbildung 3-16 H₂-Tankstelle mit Wasserstoffherzeugung vor Ort

Zur Bereitstellung des Wasserstoffs bieten zunehmend mehr Unternehmen Dienstleistungen wie das Betreibermodell an. Hierbei kümmert sich ein externer Betreiber um Bau und Betrieb sowie die Wasserstoffversorgung der Tankstelle und bietet den Wasserstoff zu einem festgesetzten Preis an. Für die Busunternehmen sinken dadurch die Investitionsrisiken. Zudem sind die Treibstoffkosten transparent kalkulierbar.

3.7 Vergleich der Elektrobustechologien

In diesem Abschnitt werden die E-Bustechnologien einander gegenübergestellt und untereinander sowie mit der Dieseltechnologie verglichen. Aus den erläuterten Einflussfaktoren (auf Energieverbrauch und Batteriekapazität) lassen sich die Vor- und Nachteile der Technologien ableiten.

Vergleich mit Dieseltechnologie

In Abbildung 3-17 sind die bereits genannten Vor- und Nachteile der jeweiligen Technologie grafisch dargestellt. Zusätzlich sind im innersten Kreis die Anschaffungskosten für ein Fahrzeug der jeweiligen Technologie farblich dargestellt. Die betrachteten Kriterien sind Reichweite, Streckenplanung, Geräuschemissionen und die lokale Nullemission.

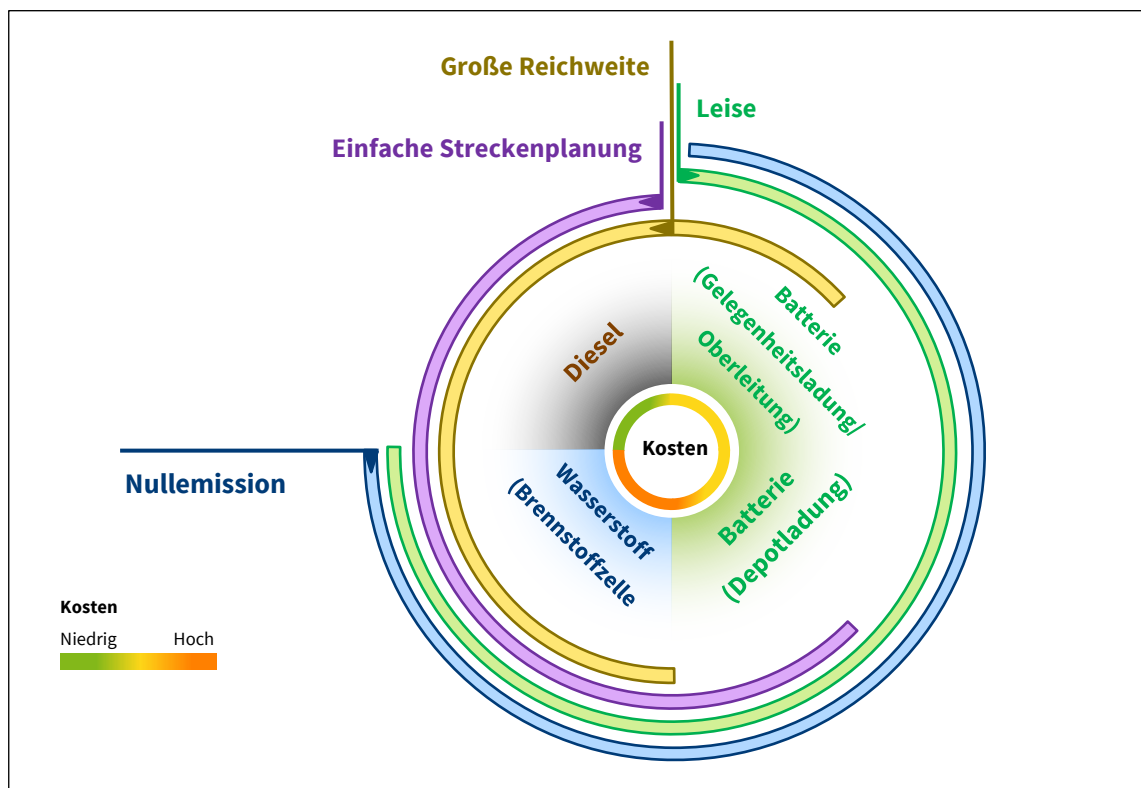


Abbildung 3-17: Vorteile von Diesel- und E-Bussen

Vergleich der E-Bustechnologien bzgl. spezifischer Eigenschaften

Tabelle 3-2 stellt die spezifischen Eigenschaften der drei untersuchten Bustechnologien gegenüber. Die betrachteten Kriterien sind Reichweite, Ladedauer, Streckenplanung und lokale Emissionen.

Tabelle 3-2 Übersicht der Eigenschaften von Elektrobussen

	Depotladung	Gelegenheitsladung	Oberleitung	Brennstoffzelle
Reichweite	bis 250 km ¹	Unbegrenzt ²	Unbegrenzt ³	bis 400 km
Ladedauer	mehrere Stunden	bis 10 Minuten typischerweise	(während der Fahrt, wenn Batterie vorhanden)	ca. 10 Minuten
Streckenplanung	wie Diesel ⁴	aufwendig	aufwendig	wie Diesel
Lokale Emissionen	Null ⁵ Ja ²	Null	Null	Null (Wasserdampf)

¹ sichere, rein elektrische Reichweite zu allen Jahreszeiten

² je nach Ladeinfrastruktur

⁴ im Rahmen der Reichweite

⁵ 100 % elektrisch inklusive Heizung und Klimaanlage

Vor einer Entscheidung zugunsten einer bestimmten E-Bustechnologie ist eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung empfehlenswert, da die Kosten sehr stark von den linienspezifischen Rahmenbedingungen (Umläufe, Infrastruktur etc.) abhängen. Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung gilt es unter anderem, die Lebenszykluskosten (TCO) zu vergleichen.

Vergleich der Batteriegrößen

Wie in Kapitel 3.6 aufgezeigt, ist die Größe der Batterie (Batteriekapazität) abhängig von der jeweiligen Antriebstechnologie. Werden die unterschiedlichen

Batteriekonzepte hinsichtlich der Batteriegröße miteinander verglichen, wird ersichtlich, dass die Batterie des Depotladers 6- bis 10-mal und die Batterie des Gelegenheitsladers etwa 3- bis 6-mal so groß wie die des Brennstoffzellenbusses ist (vgl. Abbildung 3-18).

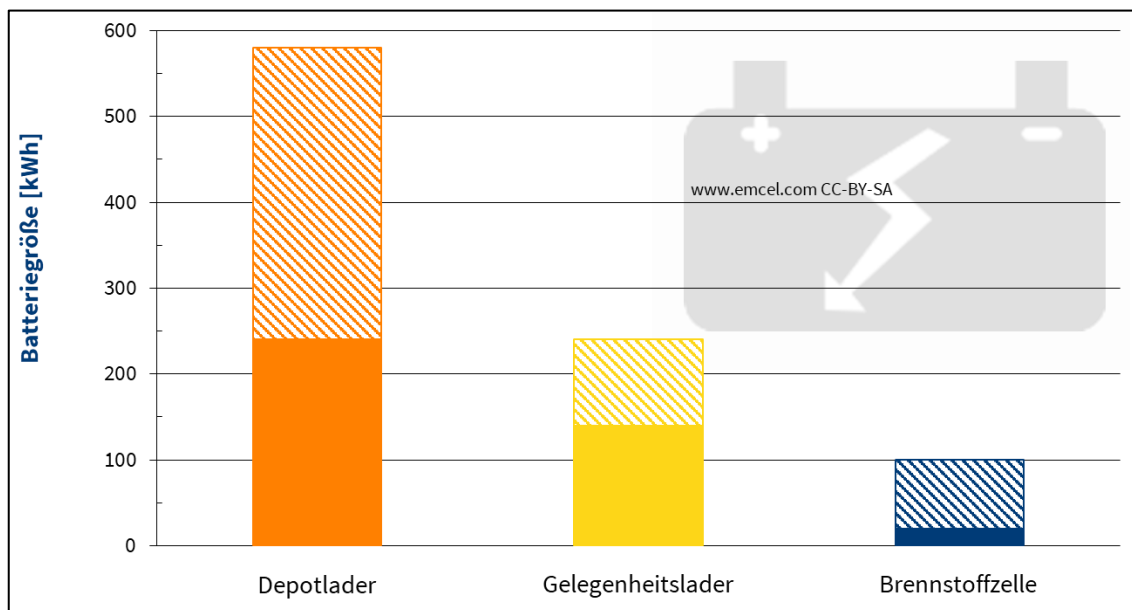


Abbildung 3-18: Typische Batteriegrößen bzw. -kapazitäten der E-Bustechnologien

Umsetzungsaufwand der Technologien

Aufgrund der Unterschiede in der benötigten Infrastruktur der einzelnen Technologien ist der Aufwand für eine Umstellung der Flotte durchaus unterschiedlich einzustufen. In Abbildung 3-19 werden die verschiedenen Hürden für den Einstieg sowie für die gesamte Flottenumstellung in Bezug auf die einzelnen Technologiealternativen illustriert.

Depotlader sind aktuell weit verbreitet, da der Einstieg in die Technologie relativ einfach zu realisieren ist. Daher wird sie in vielen Verkehrsbetrieben für den Einstieg in die Elektromobilität bevorzugt. Die weitere Umstellung der Flotte auf Busse mit Depotladung ist jedoch mit Hindernissen verbunden. In

Anbetracht der hohen Ladeleistung, die bei einer Vielzahl von Bussen bereitzustellen ist, muss das Depot in der Regel umfassend umgebaut und erweitert werden.

Der Einstieg in die Elektromobilität mittels Gelegenheitsladung und Brennstoffzellen stellt die Betreiber vor eine große Hürde. Für beide Technologien muss zu Beginn eine deutlich komplexere Infrastruktur als beim Depotlader bereitgestellt werden. Bei der Gelegenheitsladungstechnologie handelt es sich um Ladesäulen, die auf der Strecke errichtet werden müssen. Für die Brennstoffzellenbusse ist das Vorhandensein einer Wasserstofftankstelle notwendig.

Für die weitere Umstellung der Flotte kann die Ladeinfrastruktur für die Gelegenheitsladung schrittweise erweitert werden, was zwar mit einem hohen planerischen Aufwand verbunden ist, aber als „bekannte Hürde“ betrachtet werden kann und damit eine einfache Umsetzung erwarten lässt.

Die bereits errichtete H₂-Tankstelle kann modular erweitert werden. Dies kommt in einem weitaus geringeren Aufwand zum Ausdruck.







	Einstiegs-/Pilotprojekt	Flottenausbau
Volllader	 <p>Kleine Hürde: Geringer Aufwand bei Test weniger E-Busse</p>	 <p>Hohe Hürde: Hoher Aufwand bei gesamter Flottenumstellung (Umbau Depot)</p>
Teillader	 <p>Hohe Hürde: Hoher Aufwand aufgrund der Ladeinfrastruktur (Stadtplaner) auch bei wenig E-Bussen</p>	 <p>Viele mittlere Hürden: Jede neue Linienumstellung ergibt eine neue Hürde</p>
Brennstoffzelle	 <p>Hohe Hürde: Hoher Aufwand aufgrund der Errichtung der Tankstelle</p>	 <p>Keine bis mittlere Hürde:</p> <ul style="list-style-type: none"> Keine weitere Tankstelle nötig Bestehende Tankstelle wird nur erweitert

Abbildung 3-19: Einstiegshürden der Batterie- und BZ-Bustechnologien

4 Technische Analyse

In diesem Kapitel wird die technische Machbarkeit einer Umstellung auf emissionsfreie Antriebe in Nordwestmecklenburg sowie der Stadt Wismar betrachtet. Dabei werden die E-Bus-Technologien Depotlader, Gelegenheitslader sowie Oberleitung und Brennstoffzelle hinsichtlich der Technologieeignung miteinander verglichen.

Unter Berücksichtigung einer langfristigen Umstellung und der damit verbundenen erforderlichen Flexibilitäten im Betriebseinsatz der Busse erfolgt die Analyse anhand verschiedener Szenarien. Es wird zwischen Regionalverkehr und Stadtverkehr unterschieden und die Umstellung entsprechend separat dafür betrachtet.

Regionalverkehr

- › Umstellung auf 100 % Depotladung (DL – sicherere Reichweite 250 km)
- › Umstellung auf 100 % Depotladung (DL – sicherere Reichweite 300 km)³
- › Umstellung auf 100 % Brennstoffzellentechnik (BZ)

Stadtverkehr

- › Umstellung auf 100 % Depotladung (DL – sicherere Reichweite 250 km)
- › Umstellung auf 100 % Depotladung (DL – sicherere Reichweite 300 km)³
- › Umstellung auf 100 % Gelegenheitsladung (GL)
- › Umstellung auf 100 % Oberleitungsbusse (OL)
- › Umstellung auf 100 % Brennstoffzellentechnik (BZ)

³ Mögliche Entwicklung der Technik sowohl für Solo- als auch Gelenkbusse

4.1 Ausgangslage

Die Untersuchung basiert auf dem aktuell gültigen Nahverkehrsplan (NVP) bzw. auf dessen bereits feststehenden zukünftigen Erweiterungen unter Berücksichtigung der aktuellen Umläufe und Linieneigenschaften.

Charakteristik des Nahverkehrsplan

Der derzeit gültige Nahverkehrsplan (NVP) umfasst insgesamt 180 Fahrpläne, die auf 59 Buslinien in der Stadt Wismar und der Region Nordwestmecklenburg verteilt sind. Davon dienen 53 Strecken dem Regional- bzw. Überlandverkehr. Die dort momentan eingesetzten 103 Busse, einschließlich Reservebusse, bedienen sowohl den Linien- als auch Schulverkehr. Die durchschnittliche Strecke eines Busses im Regionalverkehr beträgt etwa 15 km. Es müssen jedoch auch Abschnitte bewältigt werden, die bis zu ca. 60 km lang sind. Die Busse werden nicht in einem linienreinen Betrieb eingesetzt. Einzelne Fahrleistungen sind an Subunternehmer weitervergeben.

Der Stadtverkehr wird von sechs verschiedenen Linien bedient. Die insgesamt 24 Busse inkl. Reservebusse werden überwiegend liniengebunden eingesetzt. Eine typische Fahrstrecke beträgt etwa 10 Kilometer, jedoch sind auch längere Strecken bis zu 30 Kilometer möglich.

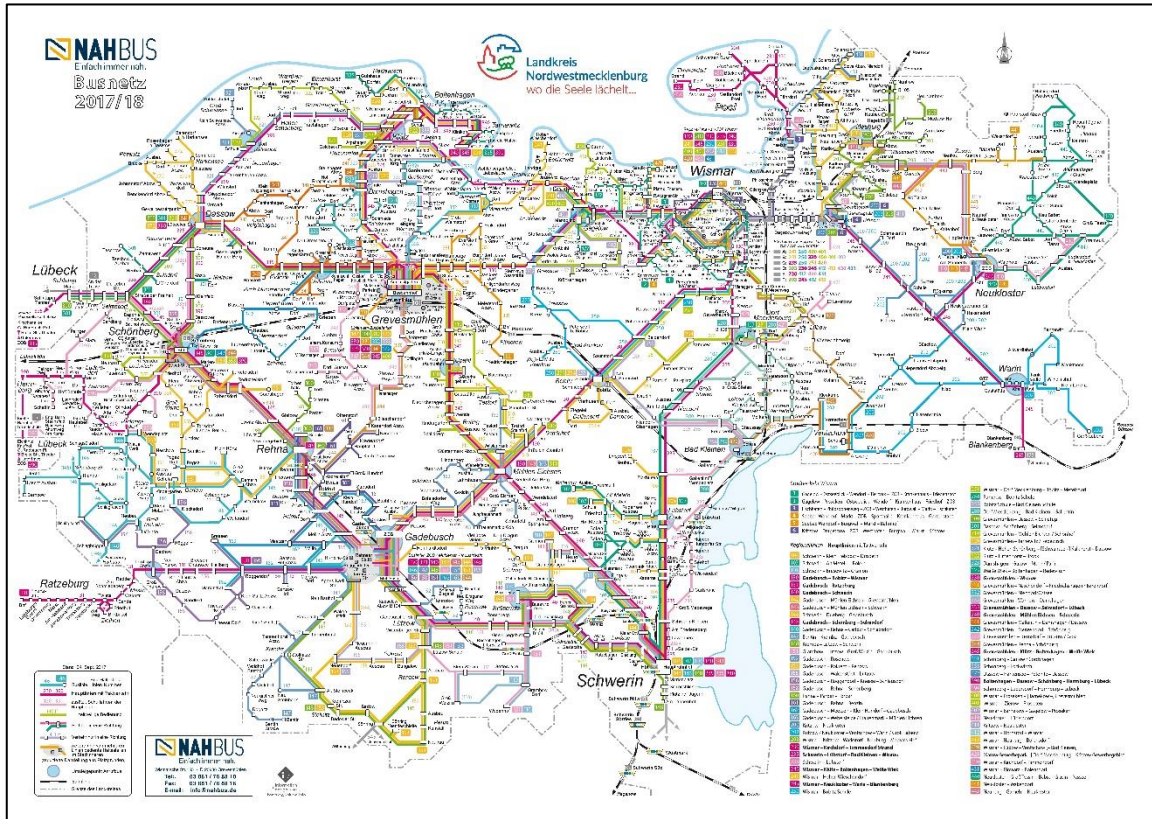


Abbildung 4-1 Gesamtnetzverkehrsplan der NAHBUS Nordwestmecklenburg GmbH

Charakteristik des Betriebshofs

Die NAHBUS Nordwestmecklenburg GmbH betreibt derzeit drei Hauptstandorte in Wismar, Grevesmühlen und Gadebusch. An diesen Standorten befinden sich jeweils Unterstell- und Wartungshallen sowie ein Werkstattbereich. Weitere Fahrzeuge sind auf kleineren Abstellflächen in Schönberg oder im Umland von Wismar untergebracht. In Zukunft ist geplant, einen neuen, eigenen Betriebshof im Gewerbegebiet Hornstorf/Wismar zu errichten. Dieser soll den Stadtverkehr in Wismar sowie den Regionalverkehr im Umland von Wismar bedienen. Des Weiteren wird derzeit eine neue Fläche für die Abstellung der Fahrzeuge in Schönberg gesucht.

Zunächst wird eine standortspezifische technische Analyse durchgeführt, bei der die Standorte Gadebusch, Grevesmühlen sowie die neue Abstellfläche in Schönberg und der neue Betriebshof in Wismar berücksichtigt werden.

Allgemeine Randbedingungen

Die Untersuchung erfolgt an Szenarien, die eine vollständige Umstellung des ÖPNV ermöglichen und nachhaltig den Fahrzeug- und Personalmehrbedarf minimieren. Es werden Konzepte mit möglichst geringen Änderungen der aktuellen Betriebsabläufe entwickelt sowie die Anzahl an Technologien eingegrenzt, um Komplexität (und Kosten) bei der Umstellung zu reduzieren.

Vor diesem Hintergrund werden die folgenden Szenarien im Regionalverkehr in der Studie nicht untersucht:

- › Umstellung auf 100 % Gelegenheitsladung
 - Erhöhte Anzahl an Buslinien (65 Stk.), mit verteilten Endhaltestellen (Pausenorten)
 - Nicht linienreiner Betrieb – komplexe Anpassung der Umlaufplanung erforderlich
 - Streckenabschnitte im Durchschnitt 10 – 40 km, vereinzelt auch 60 – 70 km – hohe Batteriekapazität notwendig

- › Umstellung auf 100 % Oberleitungsbusse
 - Erhöhte Anzahl an Buslinien (65 Stk.)
 - Großes Streckennetz (vereinzelte Streckenabschnitte 60 – 70 km)
 - Nicht linienreiner Betrieb

4.2 Regionalverkehr

In diesem Kapitel wird zunächst die technische Machbarkeit der Umstellung des Regionalverkehrs analysiert. Die Betrachtung erfolgt aggregiert für den gesamten Regionalverkehr. In Anhang A.6 findet sich die technische Analyse getrennt nach Standorten.

4.2.1 Umstellung auf Depotladung

Im Folgenden werden sowohl die Längen der Umläufe als auch der Energie- und Flächenbedarf für eine Umstellung auf Depotladung analysiert.

Analyse der Umlauflängen

Eine Übersicht über die heutigen Umlauflängen im Regionalverkehr gibt Abbildung 4-2.

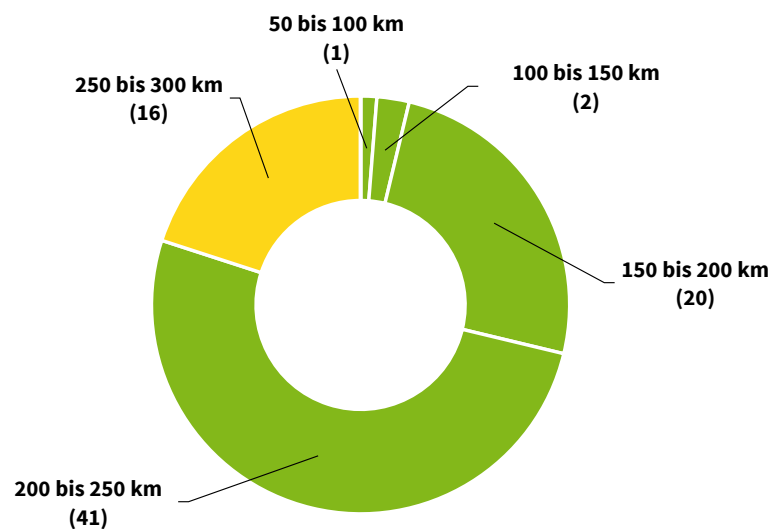


Abbildung 4-2: Umlauflängen in [km/Tag] - Regionalverkehr

Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass ein Großteil (ca. 80 %) der heutigen Umläufe zwischen 50 und 250 km liegen. Diese Umläufe können schon heute von Depotladern (100 % elektrisch – sichere Reichweite 250 km) bedient werden. Dies sind zum Beispiel Fahrten im Schülerverkehr.

Umlauflängen von 250 km und mehr pro Tag (ca. 20 %) sind nach aktuellem Stand der Technik nicht ideal durch Depotlader zu ersetzen. Mögliche Lösungen sind die Trennung der heutigen Umläufe und der Einsatz von ca. 4 bis 7 Zusatzfahrzeugen. Das bedeutet zum einen den Einsatz weiteren Fahrpersonals und einen zusätzlichen Platzbedarf für die Abstellung der Zusatzfahrzeuge, sowie die Errichtung der benötigten Ladeinfrastruktur. Durch eine Zwischenladung während des Tages, entweder im Depot oder auf der Strecke, kann auf zusätzliche Fahrzeuge verzichtet werden. Dies erfordert eine Anpassung der Betriebsplanung.

Angesichts der fortschreitenden technologischen Entwicklung von E-Bussen und Batteriekapazitäten wird erwartet, dass mittel- bis langfristig Umläufe bis 300 km mit Depotladern (100% elektrisch - sichere Reichweite 300 km) ohne zusätzliche Maßnahmen bedient werden können.

Batteriebusse verfügen aktuell aufgrund des Batteriegewichtes über geringere Fahrgastkapazitäten im Vergleich zu Dieselfahrzeugen. Bei zukünftiger Weiterentwicklung der Batteriekapazitäten wird eine weitere Reduzierung dieses Defizites erwartet. Für die Studie sind folgende Annahmen getroffen worden:

- › Depotlader, max. 250 km: ca. 5 – 10 % geringere Fahrgastkapazität
- › Depotlader, max. 300 km: ca. 10 – 15 % geringere Fahrgastkapazität

Den Engpässen in der Fahrgastkapazität wird im Rahmen der Studie durch eine Ersatzbeschaffung von Gelenkbussen statt Solobussen vorgebeugt. Hierdurch kann auf weitere Zusatzfahrzeuge verzichtet werden.

Bedingt durch die Einschränkung der Fahrgastkapazität sind nach aktuellem Stand der Technik (max. 250 km Reichweite) ca. 4 – 11 Gelenkbusse im gesamten Regionalverkehr erforderlich. Unter Annahme zukünftiger Batterieentwicklungen (max. 300 km Reichweite) werden ca. 8 – 15 Gelenkbusse notwendig.

Analyse des Energiebedarfs

Tabelle 4-1 zeigt die Dimensionierung der Netzanschlüsse je Standort bei vollständiger Umstellung der Flotte auf Depotladung. Es wird von Batteriekapazitäten zwischen 450 kWh (Stand der Technik) und 600 kWh (zukünftig zu erwartende Batteriekapazitäten) und erforderlichen Ladeleistungen zwischen 50 kW und 100 kW ausgegangen. Zur Reduzierung der maximalen Anschlussleistung bietet sich ein intelligentes Lademanagement an, welches Ladeleistungen und Ladevorgänge in Abhängigkeit des Fahrplans steuert.

Tabelle 4-1: Erforderliche Netzanschlussleistung - Je Standort

Standort	Anschlussleistung* [MVA]
Gadebusch	0,5 - 0,9**
Grevesmühlen	1,0 - 1,4**
Schönberg	0,25 - 0,44
Wismar (Regionalverkehr)***	0,9 - 1,4**

* Einschließlich Leistungsreduzierung durch intelligentes Lademanagementsystem

- › Möglichkeit zur Reduzierung der max. Anschlussleistung – bis zu 30 %
- › Ladeleistung und Ladevorgänge in Abhängigkeit vom Fahrplan gesteuert

** In Abhängigkeit von der Zwischenladung über den Tag

*** Synergie mit Wismar (Stadtverkehr) zu berücksichtigen

Es wurde ermittelt, dass sich der benötigte Netzanschluss in Abhängigkeit des Standortes zwischen 0,25 MW und 1,4 MW bewegt. Die Ladeleistungen stellen das Minimum für die Gewährleistung des Betriebs dar. Steigen die Anforderungen an die Performance der Busse (z.B. Ausbau Nahverkehrsplan), dann sollte

die Ladeinfrastruktur entsprechend so dimensioniert werden, dass im Fall von Ausfällen oder ungeplanten Sondereinsätzen eine hohe Verfügbarkeit der Fahrzeuge möglich ist.

Derzeit sind die Transformatorleistungen in Grevesmühlen und Gadebusch fast vollständig ausgeschöpft. Bei der Umstellung der Flotten sollten frühzeitig Gespräche mit den örtlichen Netzbetreibern geführt werden, um zu klären, welche Leistungen zur Verfügung stehen und welche Erweiterungen möglich sind.

Bei Zwischenladungen auf der Strecke, beispielsweise als Alternative zu Zusatzfahrzeugen, wird an der Haltestelle eine entsprechende Anschlussleistung benötigt. Diese hängt von den Ladeleistungen (typischerweise zwischen 200 kW und 450 kW) und der Ladezeit ab (abhängig vom Umlaufplan).

Um die Netzanschlussleistung zu reduzieren, können Batteriespeicher am Betriebshof eingesetzt werden. Diese werden tagsüber bei niedriger Last geladen, sodass nach der Dienstzeit der Busse teilweise Energie aus den Speichern anstelle des Netzes genutzt werden kann. Für die Implementierung von Batteriespeichern gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten:

- › Einsatz neuer Batterien
- › Einsatz von Second-Life-Batterien

Während der Einsatz neuer Batterien mit hohen wirtschaftlichen Investitionskosten verbunden ist, können „Second-Life“-Batterien in ihrer Leistungsfähigkeit eingeschränkt sein oder einen erhöhten Wartungs- und Serviceaufwand erfordern.

Unabhängig vom Batterietyp ist für die Errichtung eines Batteriespeichers ein gewisser Platzbedarf erforderlich. Dieser kann in der Größenordnung von mindestens einem Pkw-Stellplatz liegen. Dementsprechend kann das Potenzial für

eine Batteriespeicherlösung bereits durch fehlende Flächenkapazitäten auf Betriebshöfen eingeschränkt sein (siehe nachfolgender Abschnitt).

Analyse des Flächenbedarfs

Im Zuge der Technologieumstellung entsteht ein zusätzlicher Flächenbedarf auf dem Betriebshof. Nachfolgend wird dieser Bedarf für die Umstellung auf Depotladung im Vergleich zur heutigen Situation ermittelt. Hierzu wird sich auf die heute genutzte Fläche sowie auf potenziell zur Verfügung stehende Mehrflächen für die Ladeinfrastruktur auf den jeweiligen Betriebshöfen bezogen.

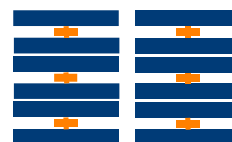
Je nach Aufstellungskonzept und Ladestrategie kann ein zusätzlicher Platzbedarf von 15 % bis 20 % für die Aufstellung von Ladegeräten, -säulen, -masten (bei Pantografen), Kabelführung sowie Verteiler- und Sicherungskästen entstehen. Die folgende Abbildung 4-3 zeigt die beiden potenziellen Aufstellungskonzepte für einen Pantografen und eine Ladesäule bei Blockaufstellung.

Beispiel: Pantograf bei Blockaufstellung



→ 1/6 Fläche notwendig (16,6%)

Beispiel: Ladesäule bei Blockaufstellung



→ 1/5 Fläche notwendig (20%)

Abbildung 4-3: Aufstellungskonzepte für einen Pantografen und eine Ladesäule bei Blockaufstellung

Bei einer Umstellung des Regionalverkehrs auf die Depotladung sind für den Betrieb standortübergreifend etwa 4 bis 7 zusätzliche Busse aus technischer Sicht erforderlich (ohne Maßnahmen zur Zwischenladung). Jeder dieser Busse erfordert eine Abstellfläche von etwa 50 m² bis 60 m² pro Bus⁴. Zusätzlich ist zu

⁴ Basierend auf der VDV 822 – Richtlinie für den Bau von Omnibus-Betriebshöfen. Reine Abstellfläche inkl. Abständen zu weiteren Bussen, ohne Berücksichtigung von Fahrstraßen, Schleppkurven, etc. Faktor 1,3 für Gelenkbusse.

beachten, dass aufgrund von Kapazitätsengpässen im Fahrgastverkehr immer mehr Gelenkbusse angeschafft werden.

Die Ladeinfrastruktur muss sowohl für die bestehende Busse als auch für die zusätzlichen Busse errichtet werden. Die benötigten zusätzlichen Flächen sind in Abbildung 4-4 dargestellt.

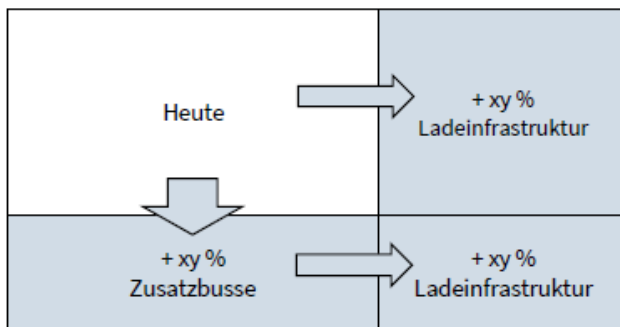


Abbildung 4-4: Mehrflächenbedarf für Zusatzbusse und Ladeinfrastruktur

In der nachfolgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Analyse des Flächenbedarfes für die einzelnen Standorte zusammengefasst. Für weitere Informationen wird auf den Anhang A.6 verwiesen.

Tabelle 4-2: Eignung der Standorte – Flächenbedarfe (Zusammenfassung Depotladung)

Standort	Eignung - 100 % Batterieelektrisch
Gadebusch	Elektrifizierung der ersten Fahrzeuge möglich. Langfristig (100 % Umstellung) neuer Flächenbedarf durch Ladeinfrastruktur und zusätzliche Busse erforderlich. Elektrifizierung von ca. 15 Fahrzeugen am Standort möglich. Reduzierung des Flächenbedarfs durch Installation der Ladeinfrastruktur im Einsatzgebiet (z.B. an Haltestellen) denkbar.
Grevesmühlen	Elektrifizierung der ersten Fahrzeuge möglich. Langfristig (100 % Umstellung) neuer Flächenbedarf durch Ladeinfrastruktur und zusätzliche Busse erforderlich. Elektrifizierung von ca. 25 Fahrzeugen am Standort möglich. Reduzierung des Flächenbedarfs durch Installation der Ladeinfrastruktur im Einsatzgebiet (z.B. an Haltestellen) denkbar.
Schönberg	Bei der Neuplanung des Geländes kann der erforderliche Platzbedarf berücksichtigt werden.
Wismar (Regionalverkehr)*	Geplanter Neubau stellt ausreichend Fläche für Umstellung zur Verfügung. Standort kann zukünftig andere Standorte entlasten (unter Berücksichtigung erhöhter Leerfahrten).

*Synergie zu Wismar (Stadtverkehr) zu berücksichtigen

4.2.2 Umstellung auf Brennstoffzellentechnik

Im Folgenden werden sowohl die Umlauflängen als auch der Energie- und Flächenbedarf für eine Umstellung auf Brennstoffzellentechnik analysiert.

Analyse der Umlauflängen

Eine Übersicht über die heutigen Umlauflängen im Regionalverkehr mit Bezug auf die Umstellung der Busflotte auf Brennstoffzellentechnik gibt Abbildung 4-2. BZ-Busse können heute eine Mindestreichweite über alle Jahreszeiten von bis zu 400 km gewährleisten. Der BZ-Bus ermöglicht somit eine 1-zu-1 Umstellung des gesamten Fuhrparks ohne Bedarf an Zusatzfahrzeugen.

Die schnellen Betankungszeiten (10 bis 15 Minuten pro Bus) ermöglichen eine einfache Integration der Fahrzeuge in die aktuellen Betriebsabläufe

(Betankungszeit Dieselbus: 5 bis 10 Minuten pro Bus, Betankungszeit Erdgas-Bus: 10 Minuten pro Bus).

Auch Brennstoffzellenbusse verfügen aktuell über geringere Fahrgastkapazitäten im Vergleich zu Dieselfahrzeugen. Für die Studie sind folgende Annahmen getroffen worden:

- › Brennstoffzelle: ca. 5 – 10 % geringere Fahrgastkapazität

Den Engpässen in der Fahrgastkapazität wird im Rahmen der Studie durch eine Ersatzbeschaffung von Gelenkbussen statt Solobussen vorgebeugt. Hierdurch kann auf weitere Zusatzfahrzeuge verzichtet werden.

Analyse des Energiebedarfs

Für die Einführung der BZ-Busse ist der Aufbau einer Wasserstofftankstelle erforderlich. Diese erfordert ebenfalls eine Stromversorgung in Abhängigkeit der Größe der Tankstelle, die es zu berücksichtigen gilt. Wesentliche Stromverbraucher an der Tankstelle sind der Kompressor sowie die Kühleinheit.

In der nachfolgenden Tabelle 4-3 sind die Wasserstoffbedarfe pro Standort aufgeführt, einschließlich der benötigten Anschlussleistung für die Wasserstofftankstelle. Aufgrund der geringen Anzahl von Bussen am Standort Schönberg ist der Betrieb einer eigenen Tankstelle an diesen Standorten nicht zu empfehlen. Stattdessen werden die dortigen Busse als Abnehmer von Wasserstoff am Standort Grevesmühlen berücksichtigt.

Tabelle 4-3: Täglicher Wasserstoffbedarf und Netzanschlussleistung Wasserstofftankstelle pro Standort

Standort	Täglicher Wasserstoffbedarf [kg]	Erforderliche Anschlussleistung [MVA]
Gadebusch	ca. 250 – 300	0,2 – 0,4
Grevesmühlen	ca. 500 – 600	0,3 – 0,6
Schönberg	Bei Grevesmühlen integriert	-
Wismar (Regionalverkehr)*	ca. 450 – 550	0,3 – 0,6

*Synergie mit Wismar (Stadtverkehr) zu berücksichtigen

Wenn die Tankstelle über eine eigene Wasserstoffproduktion verfügt, steigen die Leistungen signifikant an. Die dargestellten Anschlussleistungen in der Tabelle beziehen sich auf eine Wasserstofftankstelle, die mit Wasserstofftrailern beliefert wird.

Auch bei einer Umstellung der Flotten auf Brennstoffzellentechnologie ist ein frühzeitiger Austausch mit den Netzbetreibern hinsichtlich des Netzanschlusses sinnvoll.

Analyse des Flächenbedarfs

Die Errichtung einer Wasserstofftankstelle erfordert ebenfalls einen Flächenbedarf auf dem Betriebsgelände. Dieser ist zum einen von der Dimensionierung der Tankstelle und zum anderen vom Flächenlayout abhängig. Das Flächenlayout einer Tankstelle kann individuell angepasst werden, um Schutz- und Sicherheitsabstände zu reduzieren, z.B. durch den Einsatz von Brandschutzwänden. Auch eine Stapelung von Container-Komponenten kann zu einem effizienten Layout beitragen. Die erforderlichen Flächenbedarfe an den einzelnen Standorten sind in der Tabelle unten aufgeführt. Darüber hinaus werden die Ergebnisse der Flächenanalyse zusammengefasst dargestellt. Es ist zu beachten, dass bei der Analyse des Flächenbedarfs keine Rangierflächen oder Trailer-Anfahrten berücksichtigt wurden.

Alternativ zur eigenen Betriebshoftankstelle bieten zunehmend mehr Unternehmen Dienstleistungen wie das Betreibermodell an. In diesem Fall ist eine Errichtung der Wasserstofftankstelle im Einsatzgebiet der Busse denkbar, so dass kein zusätzlicher Flächenbedarf auf dem Betriebshof erforderlich wird.

Tabelle 4-4: Eignung der Standorte – Flächenbedarfe (Zusammenfassung Brennstoffzelle)

Standort	Erforderliche Fläche H ₂ -Tankstelle [m ²]	Eignung - 100 % Brennstoffzelle
Gadebusch	ca. 375 – 500 m ²	Eigene Tankstelle vor Ort nicht realisierbar. Bei vorhandener H ₂ -Infrastruktur im Einsatzgebiet ist eine Umstellung auf BZ-Busse ohne wesentlichen zusätzlichen Flächenbedarf möglich.
Grevesmühlen	ca. 450 – 650 m ²	Eigene Tankstelle vor Ort nicht realisierbar. Bei vorhandener H ₂ -Infrastruktur im Einsatzgebiet ist eine Umstellung auf BZ-Busse ohne wesentlichen zusätzlichen Flächenbedarf möglich.
Schönberg	Bei Grevesmühlen integriert	Eigene Tankstelle aufgrund geringer Fahrzeugzahlen nicht empfehlenswert. Bei vorhandener H ₂ -Infrastruktur im Einsatzgebiet ist eine Umstellung auf BZ-Busse ohne zusätzlichen Flächenbedarf möglich.
Wismar (Regionalverkehr)*	ca. 375 – 500 m ²	Geplanter Neubau stellt ausreichend Fläche für Umstellung zur Verfügung. Standort kann zukünftig andere Standorte entlasten (unter Berücksichtigung erhöhter Leerfahrten).

*Synergie mit Wismar (Stadtverkehr) zu berücksichtigen

4.3 Stadtverkehr

In diesem Kapitel wird die technische Machbarkeit der Umstellung des Stadtverkehrs analysiert. Es werden die Technologien Depotladung, Gelegenheitsladung, Oberleitung sowie Brennstoffzelle betrachtet.

4.3.1 Umstellung auf Depotladung

Im weiteren Verlauf werden die Umlauflängen sowie der Energie- und Flächenbedarf für eine Umstellung auf Depotladung untersucht.

Analyse der Umlauflängen

Eine Übersicht über die heutigen Umlauflängen im Stadtverkehr gibt Abbildung 4-5.

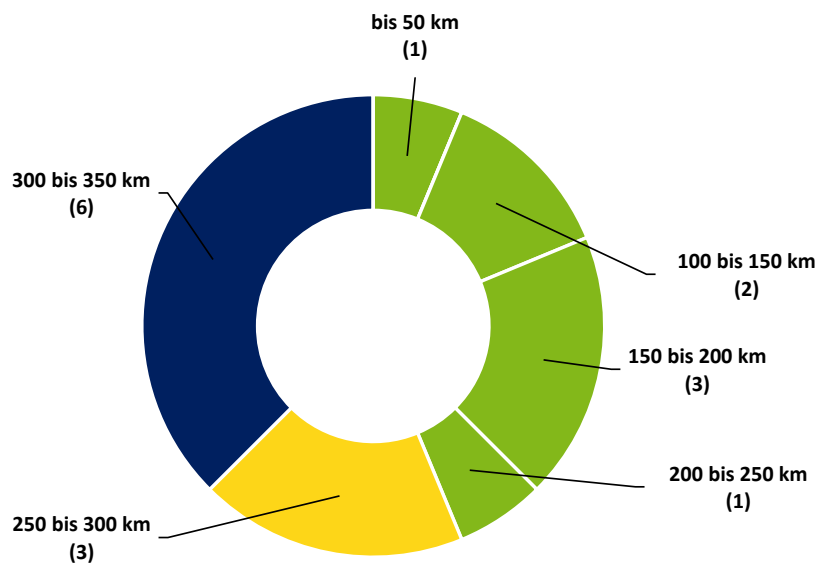


Abbildung 4-5: Umlauflängen in [km/Tag] – Stadtverkehr

Aus der Abbildung ist erkennbar, dass weniger als die Hälfte (ca. 45 %) der aktuellen Umläufe zwischen 50 und 250 km liegen. Diese Strecken können bereits heute von Depotladern (100 % elektrisch - sichere Reichweite von 250 km) abgedeckt werden.

Umlauflängen von 250 km und mehr pro Tag (ca. 55 %) sind nach aktuellem Stand der Technik nicht ideal durch Depotlader zu ersetzen. Mögliche Lösungen sind die Trennung der heutigen Umläufe und der Einsatz von ca. 5 bis 6 Zusatzfahrzeugen. Durch eine Zwischenladung während des Tages auf der Strecke kann auf zusätzliche Fahrzeuge verzichtet werden. Dies erfordert sowohl eine Anpassung der Betriebsplanung, beispielsweise hinsichtlich ausreichender Standzeit, als auch den Aufbau von Schnellladeinfrastruktur an entsprechenden Haltestellen.

Unter Berücksichtigung der zukünftigen sicheren Reichweiten von 300 km können mittel- bis langfristig etwa zwei Drittel der Umläufe (ca. 63 %) mit Depotladern bedient werden. Die restlichen Umläufe (ca. 37 %) erfordern zusätzliche Maßnahmen, wie z.B. den Einsatz von 3 - 4 Zusatzfahrzeugen oder die Nutzung von Schnellladeinfrastruktur an den Haltestellen, um sicherzustellen, dass diese Umläufe durchgeführt werden können.

Bedingt durch die Einschränkungen in der Fahrgastkapazität müssen bis zu 4 Gelenkbusse zusätzlich eingesetzt werden.

Analyse des Energiebedarfs

Als Mindestleistung zur Gewährleistung des Betriebs des Stadtverkehrs wird eine Ladeleistung von 50 kW pro Ladepunkt angesetzt. Unter Berücksichtigung der benötigten Zusatzfahrzeuge sowie eines intelligenten Lademanagementsystems wird nach aktuellem Stand der Technik (100 % elektrifiziert - 250 km sichere Reichweite) eine Leistung von etwa 0,55 MVA bei reiner Nachtladung benötigt. Durch Zwischenladen über den Tag im Depot ist eine Reduzierung der Anschlussleistung auf etwa 0,4 MVA möglich. In Zukunft werden aufgrund der höheren Batteriekapazitäten voraussichtlich etwa 0,65 MVA benötigt, um eine sichere Reichweite von 300 km zu gewährleisten. Der Bedarf kann durch Zwischenladungen im Depot während des Tages auf 0,3 MVA reduziert werden.

Der Bedarf an Anschlussleistung erhöht sich entsprechend, wenn zum Beispiel höhere Ladeleistungen zur Flexibilisierung des Betriebs installiert werden.

Analyse des Flächenbedarfs

Zukünftig soll der Stadtverkehr Wismar gemeinsam mit dem Regionalverkehr für das Umland Wismar von einem neu geplanten Betriebshof aus bedient werden. Derzeit wird ein Neubau im Gewerbegebiet Hornstorf/Wismar angestrebt. Abbildung 4-6 zeigt die potenzielle Fläche des neuen Standorts.

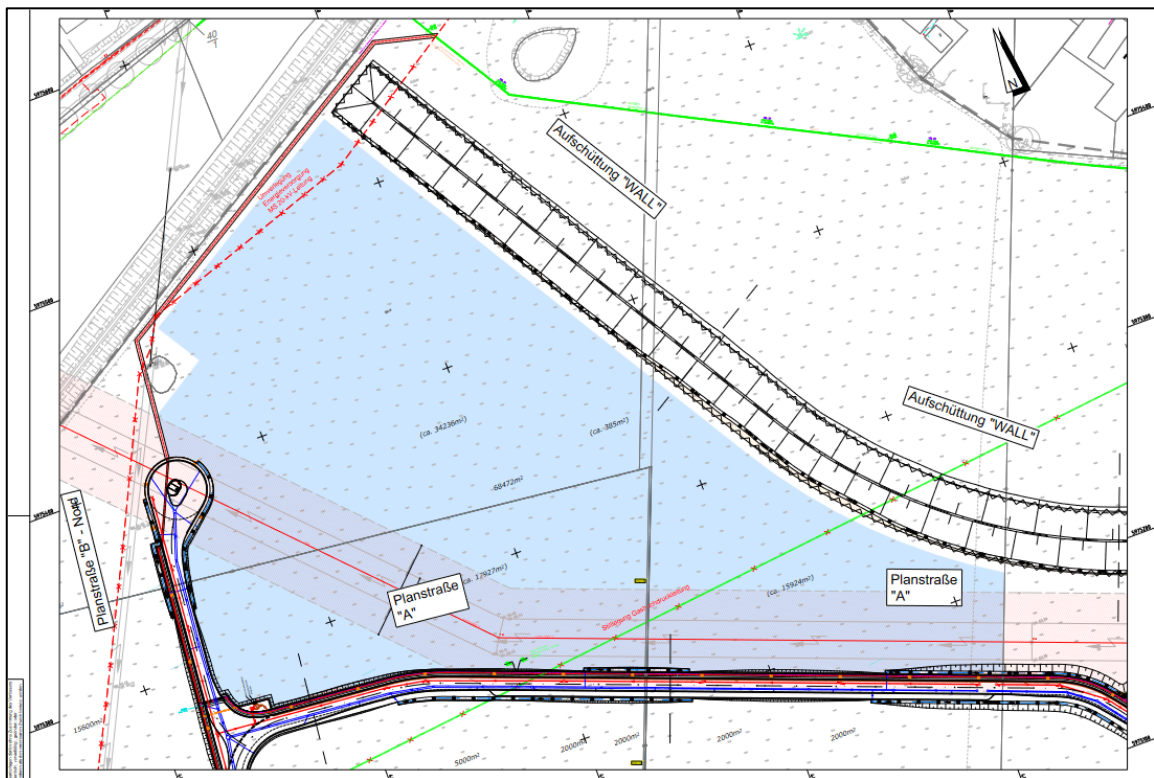


Abbildung 4-6: Geplanter Betriebshof - Gewerbegebiet Hornstorf / Wismar

Zur Untersuchung der Fläche bezüglich einer Elektrifizierung der Flotte wird die VDV-Schrift 822 „Richtlinie für den Bau von Omnibus-Betriebshöfen“ herangezogen (siehe Tabelle 4-5).

Tabelle 4-5: Flächenanalyse - neuer Betriebshof Wismar

Parameter	
Aktuelle Flottengröße mit Einsatzgebiet Wismar (Stadt- & Regionalverkehr)	64 Busse (59 Solobusse / 7 Gelenkbusse)
Notwendiger Flächenbedarf für aktuelle Flottengröße gemäß VDV 822	Ca. 15.000 m ²
Vorhandene Fläche Gewerbegebiet Hornstorf / Wismar	Ca. 86.500 m ²
Potenzielle Flottengröße für vorhanden Fläche gemäß VDV 822	Ca. 300 Busse ⁵

Die Tabelle zeigt, dass der vorgesehene Standort genügend Platz für die Abstellfläche von Bussen bietet, einschließlich technologiebedingter Zusatzfahrzeuge, Gelenkbusse mit erhöhter Fahrgastkapazität und erforderlicher Ladeinfrastruktur.⁶

4.3.2 Umstellung auf Gelegenheitsladung

Für eine vollständige Umstellung des Stadtverkehrs auf Gelegenheitsladung ist gemäß dem aktuellen Betrieb und Fahrplan eine Schnellladeinfrastruktur an acht zentralen Haltestellen erforderlich. Dies erfordert einen erheblichen Planungs-, Koordinations- und Umsetzungsaufwand. Aufgrund einiger längerer Streckenabschnitte zwischen Endhaltestellen von bis zu 30 km sowie kurzen Pausen- und Wendezeiten sind zudem hohe Ladeleistungen und große Batteriekapazitäten erforderlich. Um den Betrieb von zwei Linien zu gewährleisten, müssen auf einigen Linien Zusatzfahrzeuge als Verstärkung bereitgestellt werden, da die aktuellen Ladezeiten sehr kurz sind. Nachfolgende Tabelle fasst die Ergebnisse der Analyse je Linie zusammen.

⁵ Annahme: 90 % SL, 10 % GL. Dieser Wert kann bei dichter Bebauung unterschritten werden, bei umfangreicher Grünflächenanforderung aber nicht ausreichend sein.

⁶ Flächenbedarf für die Ladeinfrastruktur von ca. 70 Bussen (inkl. Zusatzfahrzeuge & 4 zusätzlichen Gelenkbussen: ca. 500 – 1.000 m² in Abhängigkeit der Aufstellung und Ausführung

Tabelle 4-6: Zusammenfassung - Analyse der Gelegenheitsladung

Linie	Typische Wendezeit	Erforderliche Fahrstrecke	Benötigte Ladeleistung ⁷	Anzahl Pantographen	Haltestellen
12	25	120 km	Mind. 400 kW	Mind. 1	Gängelow Garden Hotel
13	10	Umlaufplanung und ca. 2 – 4 Zusatzbusse erforderlich			
14	10				
15	25	25 km	Mind. 90 kW	Mind. 2	Seebad Wendorf
16	20	80 km	Mind. 350 kW	Mind. 2	Hornstorf Kirche, Lübow Schule
18	12	40 km	Mind. 300 kW	Mind. 1	Barnekow

Die Linien 13 und 14 sind aufgrund der kurzen Halte- und Wendezeiten sowie der hohen Fahrleistungen nur mit einer neuen Umlaufplanung und dem Einsatz von Zusatzbussen für den Gelegenheitsladung geeignet.

Eine Umstellung der Linie 12 ist bei hohen Ladeleistungen möglich, aber bei gewünschter Erhöhung der Betriebssicherheit (mehr Fahrten ohne Zwischenladung) schwer umsetzbar. Eine Umstellung der Linie 18 ist aufgrund der geringen Pausenzeiten ebenfalls nicht optimal.

Die Linien 15 und 16 sind für Gelegenheitsladung mit hohen Ladeleistungen geeignet, allerdings haben einige Umläufe der Linie 15 weniger als 200 km Tagesfahrleistung und sind daher auch für reine Depotlader geeignet.

Es wurde ermittelt, dass für die Umstellung auf Gelegenheitsladung etwa ein bis zwei Pantographen an den jeweiligen Endhaltestellen der Linien erforderlich sind. Für die Installation der Lademöglichkeiten inkl. Trafostation, Ladegeräte, Kabelverlegung etc. werden ca. 20 m² bis 40 m² pro Endhaltestelle

⁷ Streckenabschnitt ohne Pause (> 10 Minuten) inkl. Puffer (= Ausfall mind. einer Ladung aufgrund von Verzögerungen im Betriebsablauf)

benötigt. Je nach Ladeleistung und Anzahl der Pantographen ist eine Anschlussleistung an den Haltestellen von bis zu 0,9 MVA erforderlich. Die Realisierung einer solchen Stromversorgung an allen zentralen Haltestellen ist mit einem erheblichen Mehraufwand verbunden.

4.3.3 Umstellung auf Oberleitungsbusse

Für eine Elektrifizierung des Stadtverkehrs bieten sich Oberleitungsbusse mit integrierter Hochvoltbatterie an. Diese können für bestimmte Fahrstrecken entkoppelt und autark betrieben werden. Im Batteriemodus variiert die Reichweite dieser Busse zwischen 7 und 30 km, je nach Batteriegröße. Dies ermöglicht es beispielsweise, die Leerfahrten (ca. 5 – 10 km) von der Strecke hin zum Busdepot ohne Oberleitung zu erbringen. Der linienreine Einsatz der Busse vereinfacht eine Einführung von Oberleitungsbussen.

Aktuell liegt in der Stadt Wismar kein intaktes Oberleitungsnetz vor. Entsprechend muss dieses neu errichtet werden. Unter der Annahme, dass der Stadtverkehr vollständig (100 %) auf Oberleitungsbusse umgestellt wird, wird ein Oberleitungsnetz von ca. 120 km erforderlich. Die benötigte elektrische Infrastruktur zum Laden der Batterien auf der Strecke sowie im Depot setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen. Tabelle 4-7 gibt eine Übersicht der erforderlichen Infrastrukturmaßnahmen.

Tabelle 4-7: Benötigte Infrastrukturmaßnahmen für die Errichtung eines Oberleitungsnetzes

Infrastrukturmaßnahme	Funktion	Häufigkeit im Streckennetzgebiet⁸
Masten	Aufhängung der Fahrleitung/Befestigung der Quertragseile	1x pro ca. 37,5 m
Fundamente	Bauliche Struktur für den Mast	1x pro ca. 37,5 m
Fahrleitungstrenner (Diodentrenner)	Elektrische Trennung der einzelnen Speiseabschnitte	1x pro ca. 2 km
Eindrahteinrichtungen	Gewährleistet, dass die Stromabnehmerköpfe beim Eindrahten zuverlässig in die Oberleitungen einfädeln	1x pro ca. 1,85 km
Gleichrichterunterwerke	Passt die Energie aus dem Stromnetz an die notwendigen Bedingungen des Verkehrsmittels an	1x pro ca. 4 km
Leistungsschalter	Abschaltung der Energieversorgung	1x pro ca. 1,85 km
Masttrennschalter	Abschaltung der Energieversorgung	1x pro ca. 1,85 km
Ladeeinrichtungen Endhaltestellen	Stationäre Ladeeinrichtungen für Fahrzeuge mit Batteriespeicher (im Stillstand)	abhängig von Verkehrsnetz, Wendezeiten, Anzahl an Bussen, etc.
Ladeeinrichtungen im Depot	Stationäre Ladeeinrichtungen für Fahrzeuge mit Batteriespeicher (im Stillstand)	abhängig von Anzahl an Bussen, Ladeleistung, etc.

Für die Umsetzung eines Oberleitungsnetzes im Stadtverkehr ist mit einem hohen planerischen und wirtschaftlichen Aufwand zu rechnen. Die Kosten für die Installation eines Kilometers Oberleitungsstrecke liegen zwischen ca. 600.000 € und 1.000.000 €. Es sollte außerdem beachtet werden, dass die Errichtung des Netzes eine Veränderung des Stadtbildes mit sich bringt.

⁸ Auf Basis von: Fraunhofer ISI; IFB; PTV Transport Consult; TU Dresden (2019): „Machbarkeit eines Hybridoberleitungsbusbetriebs – Berlin-Spandau“

Es besteht die Möglichkeit, eine Kombination aus Oberleitung und Depotladern zu realisieren. In diesem Fall wird die Fahrleitungsinfrastruktur nur auf einzelnen Streckenabschnitten errichtet, auf denen die Busse zwischengeladen werden. Bezogen auf den gesamten Stadtverkehr kann die erforderliche Oberleitungsstrecke auf voraussichtlich ein Drittel reduziert werden. Gleichzeitig werden jedoch größere Batteriekapazitäten für die Busse und damit höhere Anschaffungskosten notwendig.

Eine weitere Möglichkeit ist die Umstellung einzelner Linien mit einzelnen elektrifizierten Streckenabschnitten. Dabei geht jedoch die Flexibilität beim Einsatz der Fahrzeuge verloren, da diese nur streckenbezogen eingesetzt werden können. Dies wiederum erhöht die Komplexität des Betriebs. Im gesamten Stadtverkehr werden unterschiedliche Technologien eingesetzt, für die Reservefahrzeuge vorgehalten und Wartungsinfrastrukturen aufgebaut werden müssen. Zudem bleibt der wirtschaftliche Aufwand für die Errichtung einer Oberleitung bestehen und ist im Vergleich zu z.B. Schnellladestationen an Endhaltestellen deutlich höher.

4.3.4 Umstellung auf Brennstoffzellentechnik

Im weiteren Verlauf werden die Umlauflängen sowie der Energie- und Flächenbedarf für eine Umstellung auf Brennstoffzellentechnik untersucht.

Analyse der Umlauflängen

Eine Übersicht über die heutigen Umlauflängen im Stadtverkehr mit Bezug auf die Umstellung der Busflotte auf Brennstoffzellentechnik gibt Abbildung 4-5. Reichweitenbedingt ermöglicht der BZ-Bus eine 1-zu-1 Umstellung der gesamten Flotte für den Stadtverkehr ohne Bedarf an Zusatzfahrzeugen.

Des Weiteren wird den Engpässen in der Fahrgastkapazität im Rahmen der Studie durch eine Ersatzbeschaffung von Gelenkbussen statt Solobussen vorgebeugt. Durch die Beschaffung von bis zu zwei Gelenkbussen kann auf Zusatzfahrzeuge verzichtet werden.

Analyse des Energiebedarfs

In der nachfolgenden Tabelle 4-8 ist der potenzielle Wasserstoffbedarf für den Stadtverkehr aufgeführt, einschließlich der benötigten Anschlussleistung für eine entsprechende Wasserstofftankstelle am Betriebshof.

Tabelle 4-8: Täglicher Wasserstoffbedarf und Netzanschlussleistung Wasserstofftankstelle - Stadtverkehr

Standort	Täglicher Wasserstoffbedarf [kg]	Erforderliche Anschlussleistung [MVA]
Wismar (Stadtverkehr)*	ca. 250 - 300	0,3 – 0,6

*Synergie mit Wismar (Regionalverkehr) zu berücksichtigen

Die in der Tabelle dargestellten Anschlussleistungen beziehen sich auf eine Wasserstofftankstelle, die von Wasserstofftrailern beliefert wird. Verfügt die Tankstelle über eine eigene Wasserstofferzeugung, erhöhen sich die Leistungen deutlich.

Analyse des Flächenbedarfs

In der Tabelle 4-5 ist die vorhandene Fläche des neu geplanten Standortes in Wismar gegenüber der erforderlichen Fläche dargestellt. Es wird deutlich, dass genügend Fläche für die Abstellung von Bussen und entsprechender Wasserstoffinfrastruktur vorhanden ist. Eine Tankstelle für die Betankung von ca. 20 BZ-Bussen für den Stadtverkehr Wismar erfordert ca. 375 m² - 500 m² Fläche (ohne eigene Vor-Ort-Produktion).

Abbildung 4-7 zeigt einen Vergleich zwischen den internen Erfahrungswerten von EMCEL und Daten aus wissenschaftlichen Studien bezüglich des beispielhaften Flächenbedarfs einer H₂-Tankstelle für etwa 20 BZ-Busse.

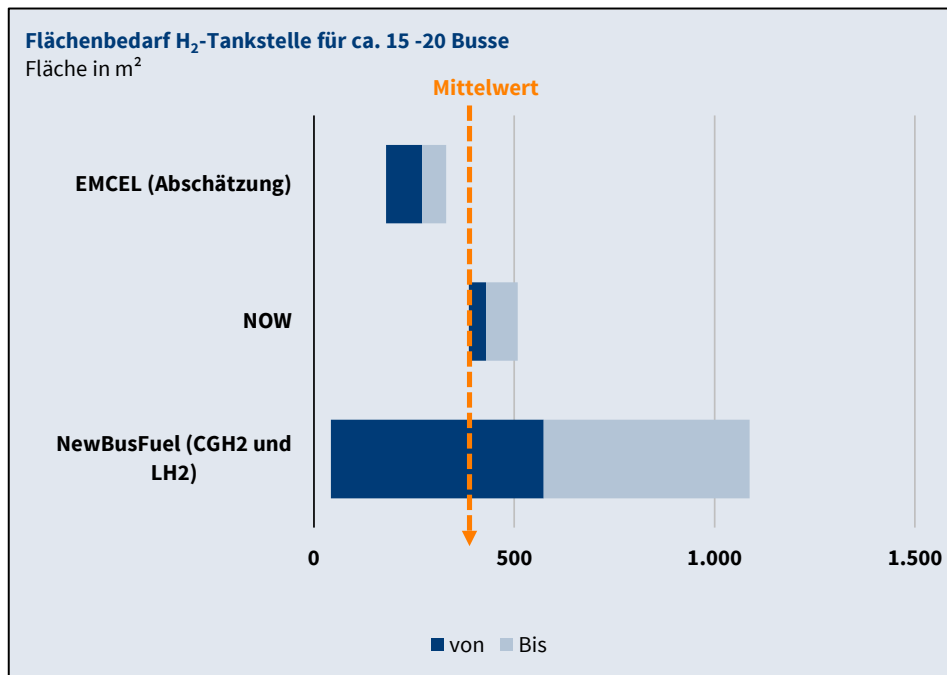


Abbildung 4-7: Vergleich interner Erfahrungswerte mit Daten wissenschaftlicher Studien

4.4 Energiebereitstellung

In diesem Abschnitt werden die Energiebereitstellung bezüglich der Anschlussleistung der verschiedenen Standorte sowie die Potenziale zur lokalen Stromerzeugung und für die regionale Wasserstoffwirtschaft betrachtet.

Potenziale zur lokalen Stromversorgung

Mecklenburg-Vorpommern bietet sehr gute Voraussetzungen für die Stromerzeugung aus Windenergie. Dies ermöglicht die lokale Energiebereitstellung für die erforderlichen Ladeleistungen der Busse.

So ist die UKA Umweltgerechte Kraftanlagen GmbH & Co. KG beispielsweise ein Energiepark-Entwickler, der eine Vielzahl von Windenergieparks in Mecklenburg-Vorpommern betreibt. Die UKA zeigt insbesondere Interesse an Großabnehmern, sodass eine Kombination von NAHBUS mit anderen Abnehmern (z.B. Großkunden) denkbar ist.

Für die Stromversorgung des neuen Standortes Wismar/Hornstorf könnte ein möglicher Partner ein in Kalsow ansässiger Betreiber von Windkraftanlagen sein. Es wird empfohlen, die Gespräche im weiteren Planungsprozess zu intensivieren.

Darüber hinaus kann der regionale Strom perspektivisch für die Eigenproduktion von Wasserstoff genutzt werden.

Auf den Betriebshöfen selbst besteht die Möglichkeit der Eigenstromerzeugung durch Photovoltaikanlagen auf den Dächern der Abstell- oder Wartungshallen. Typischerweise können durch eine solche Maßnahme aufgrund der zur Verfügung stehenden Dachflächen jedoch nur ca. 10 % der benötigten Energie für die Busse bereitgestellt werden. Zudem steht diese Energie witterungsbedingt nicht ganzjährig zur Verfügung, sodass dennoch entsprechende Netzanschlusskapazitäten vorgehalten werden müssen.

Für Busse, die betriebsbedingt tagsüber im Depot stehen, z.B. Fahrzeuge aus dem Schülerverkehr, können sich PV-Anlagen zur Zwischenladung einzelner Busse dennoch anbieten. Insbesondere beim Neubau einer PV-Anlage ist der Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit jedoch im Detail zu prüfen.

Potenziale für eine regionale Wasserstoffwirtschaft

Die Stadtwerke Wismar haben bereits in der Vergangenheit eine Potenzialstudie zur Wasserstoffnutzung in Wismar (HYStarter – Wasserstoffregion Wismar) durchgeführt. Im Rahmen dieser wurde das Potenzial zur lokalen Produktion von Wasserstoff identifiziert, welcher für den Einsatz im städtischen ÖPNV

genutzt werden kann. Der Austausch mit den Stadtwerken sollte weiter vertieft werden, um ggf. potenzielle Abnahmen zu konkretisieren.

Der Standort Nordwestmecklenburg bietet günstige Voraussetzungen für eine attraktive Wasserstoffversorgung, sei es als reine Belieferung einer eigenen Wasserstofftankstelle oder als Betreibermodell im Einsatzbereich Busse. Sowohl in den nördlichen Regionen Deutschlands als auch in Skandinavien sind bereits zahlreiche groß angelegte Wasserstoffproduktionsanlagen in Betrieb oder geplant. Die Firma Everfuel betreibt derzeit in Dänemark eine Anlage mit einer Leistung von 20 MW, während APEX in Rostock plant, die vorhandene 2-MW-Anlage bis 2027 auf 100 MW auszubauen.

Die Autobahn A20, die das Einsatzgebiet von NAHBUS kreuzt, gehört zum Europäischen TEN-Verkehrsnetz (TEN-V). Die EU plant, alle 200 km entlang dieses Verkehrsnetzes eine öffentliche H₂-Tankstelle zu errichten.

Im April 2023 wurde ein erster Förderaufruf für den Aufbau dieser öffentlichen H₂-Tankstellen gestartet. Insbesondere die Fördermaßnahmen für die transeuropäischen Verkehrsnetze eröffnen Nutzungspotenziale für die Standorte Wismar, Grevesmühlen und Schönberg (siehe Abbildung 4-8).

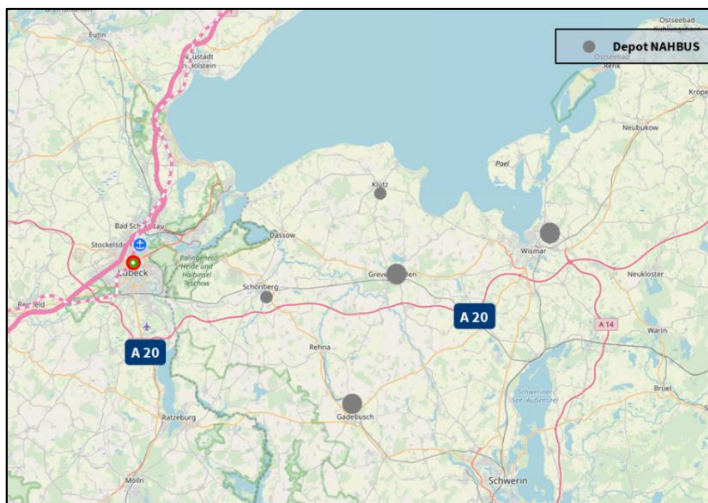


Abbildung 4-8 Europäisches TEN-Verkehrsnetz (Quelle: <https://ec.europa.eu/transport/infrastructure/tentec/tentec-portal/map/maps.html>)

5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Für die Einführung von emissionsfreien Bussen wurde eine Wirtschaftlichkeitsberechnung durchgeführt. Dabei wurden die Kosten in Investitions- und Betriebskosten unterteilt und für die jeweiligen Szenarien sowie standortspezifisch ermittelt. Die Betrachtung erfolgt anhand von Referenzwerten von EMCEL wie auch Input seitens der NAHBUS.

5.1 Annahmen

In diesem Kapitel sind Annahmen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unterteilt nach Regional- und Stadtverkehr aufgeführt.

Regionalverkehr

Nachfolgend sind in Tabelle 5-1 die standortunabhängigen und in Tabelle 5-2 die standortspezifischen Annahmen für den Regionalverkehr dargestellt.

Tabelle 5-1: Standortunabhängige Annahmen - Regionalverkehr

Parameter	Szenario 1.1 (100 % Bat., 250 km)	Szenario 1.2 (100 % Bat., 300 km)	Szenario 2 (100 % BZ)	Diesel (Referenz)
Laufzeit der Busse	12			
Preis pro Bus [€]	SL: 750.000 GL: 1.000.000	SL: 800.000 GL: 1.200.000	SL: 750.000 GL: 1.000.000	SL: 250.000 GL: 350.000
Kraftstoffkosten [€/kWh; €/kg _{H2} ; €/l]	0,20 (0,30 bei Schnell- ladung)	0,20 (0,30 bei Schnell- ladung)	9	1,70
Instandhaltungskosten Bus [€/km]	0,26	0,26	0,26	0,30

Tabelle 5-2: Standortspezifische Annahmen - Regionalverkehr

Parameter / Szenario		Gadebusch	Grevesmühlen	Schönberg ⁹	Wismar
Busanzahl inklusive Zusatzfahrzeuge	Szenario 1.1 (Bat. 250 km)	SL: 17; GL: 4	SL: 28; GL: 3	SL: 2; GL: 8	SL: 31 ; GL: 8
	Szenario 1.2 (Bat. 300 km)	SL: 14; GL: 5	SL: 25; GL: 4	SL: 2; GL: 8	SL: 29 ; GL: 9
	Szenario 2 (BZ)	SL: 16; GL: 3	SL: 27; GL: 2	SL: 2; GL: 8	SL: 31 ; GL: 7
	Referenz	SL: 17; GL: 2	SL: 28; GL: 1	SL: 2; GL: 8	SL: 33 ; GL: 5
Infrastrukturkosten Depot [€]	Szenario 1.1 (Bat. 250 km)	40.000/Ladepunkt + 900.000 (Trafo, etc.)	40.000/Ladepunkt + 1.350.000 (Trafo, etc.)	80.000/Ladepunkt + 1.455.000 € (Trafo, etc.)	40.000/Ladepunkt + 1.350.000 (Trafo, etc.)
	Szenario 1.2 (Bat. 300 km)	40.000/Ladepunkt + 800.000 (Trafo, etc.)	40.000/Ladepunkt + 1.250.000 (Trafo, etc.)	80.000/Ladepunkt + 1.455.000 € (Trafoetc.)	40.000/Ladepunkt + 1.250.000 (Trafo, etc.)
	Szenario 2 (BZ)	Betreibermodell (über H ₂ -Preis abgedeckt)			
Werkstatt- / Depotanpassung [€]	Szenario 1.1 (Bat. 250 km)	310.000	460.000	Keine Werkstatt	610.000
	Szenario 1.2 (Bat. 300 km)	310.000	460.000		610.000
	Szenario 2 (BZ)	460.000	700.000		850.000
Personalschulung Werkstatt / Fahrer¹⁰ [€]	Szenario 1.1 (Bat. 250 km)	30.000	45.000	6.500	60.000
	Szenario 1.2 (Bat. 300 km)	30.000	45.000	6.500	60.000
	Szenario 2 (BZ)	50.000	75.000	6.500	100.000

⁹ Zzgl. Infrastrukturkosten auf der Strecke von 5.417.000 € (Szenario 1.1 und 1.2)

¹⁰ Keine Werkstatt sowie entsprechendes Personal am Standort Klütz und Schönberg; lediglich Fahrerschulungen.

Stadtverkehr

Folgende Annahmen gelten für die Wirtschaftlichkeitsberechnung im Stadtverkehr und sind in Tabelle 5-3 aufgeführt.

Tabelle 5-3: Annahmen - Stadtverkehr

Parameter	Szenario 3.1 (100 % Bat., 250 km)	Szenario 3.2 (100 % Bat., 300 km)	Szenario 4 (100 % GL)	Szenario 5 (100 % Oberleitung)	Szenario 6 (100 % BZ)	Diesel (Referenz)
Busanzahl inkl. Zusatzfahrzeuge	Solo: 21 Gelenk: 2	Solo: 19 Gelenk: 3	Solo: 20 Gelenk: 1	Solo: 17 Gelenk: 1	Solo: 17 Gelenk: 1	Solo: 18
Laufzeit der Busse	12 Jahre					
Preis pro Bus [€]	Solo: 750.000 Gelenk: 1.000.000	Solo: 800.000 Gelenk: 1.200.000	Solo: 690.000 Gelenk: 940.000	Solo: 500.000 Gelenk: 760.000	Solo: 750.000 Gelenk: 1.000.000	Solo: 250.000 Gelenk: 350.000
Kraftstoffkosten [€/kWh; €/kg_{H2}; €/l]	0,20	0,20	0,30	0,20	7	1,70
Infrastrukturkosten Depot [€]	60.000/Ladepunkt + 900.000 (Trafo, etc.)	40.000/Ladepunkt + 600.000 (Trafo, etc.)	40.000/Ladepunkt + 600.000 (Trafo, etc.)	40.000/Ladepunkt + 600.000 (Trafo, etc.)	4.500.000	-
Infrastrukturkosten Strecke [€]	-	-	6.300.000	100.000.000	-	-
Werkstatt/Depot-Anpassung [€]	460.000	460.000	460.000	900.000	700.000	-
Instandhaltungskosten Bus [€/km]	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,30
Personalschulung Werkstatt / Fahrer [€]	45.000	45.000	45.000	45.000	75.000	-

Die Preise für die zukünftige Beschaffung der emissionsfreien Busse stellen einen konservativen Durchschnittswert über die betrachtete Zeit dar und wurden unter Berücksichtigung aktueller Herstellerpreise, Inflationsraten, Lieferengpässen sowie generellen Kostenentwicklungen festgelegt. Bei den batteriebetriebenen Bussen wird ein Batteriewechsel über die Lebensdauer berücksichtigt.

Auch die Kosten der Energieverbräuche für den Busbetrieb und die Wartung sind als Mittelwerte über den Betrachtungszeitraum zu verstehen. Ebenfalls werden bei den angenommenen durchschnittlichen Kraftstoffpreisen für Wasserstoff und Diesel erwartete Preissteigerungen bzw. -senkungen mitberücksichtigt.

Der angenommene Wasserstoffpreis von 9 €/kg im Regionalverkehr (Annahme: Betreibermodelle der Wasserstofftankstellen) stellt auch einen Durchschnittswert über den Betrachtungszeitraum dar. Aktuell kann dieser Preis ggf. höher ausfallen; durch den zukünftigen Markthochlauf von Brennstoffzellenfahrzeugen, durch Erlöse aus THG-Quoten oder durch die Vermarktung von erneuerbarem Wasserstoff (RED II) sind günstigere Preise möglich bzw. zu erwarten. Gleiches gilt für den Lieferpreis von reinem Wasserstoff von 7 €/kg im Stadtverkehr (Annahme: Eigene Betriebshoftankstelle). Für den Dieselpreis ist dagegen perspektivisch eine höhere CO₂-Bepreisung zu erwarten.

Eine Reduzierung der Investitionskosten ist durch eine Förderung möglich, entsprechend wurden Berechnungen mit und ohne Förderung durchgeführt. Für die Kalkulation mit Förderung wurden „fiktive“ Förderquoten angenommen. Diese sind teilweise an die aktuellen Förderbedingungen des Förderprogrammes des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) angelehnt.

Fördermodell 1

- > Bis zu 80 % der Mehrkosten für Batterie- bzw. Brennstoffzellenbusse
- > Bis zu 80 % der Mehrkosten für die Lade- bzw. Tankstelleninfrastruktur, inkl. Maßnahmen für Depot und Werkstatt

Fördermodell 2

- > Bis zu 40 % der Mehrkosten für Batterie- bzw. Brennstoffzellenbusse
- > Bis zu 40 % der Mehrkosten für die Lade- bzw. Tankstelleninfrastruktur, inkl. Maßnahmen für Depot und Werkstatt

5.2 Jährliche Mehrkosten

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Berechnungen. Dargestellt sind die jährlichen Mehrkosten in Prozent [%] und in absoluten Beträgen [€] für die Umstellung des Stadt- und Regionalverkehrs auf emissionsfreie Antriebe im Vergleich zur Referenztechnologie. Für den Regionalverkehr sind die standortspezifischen Ergebnisse dargestellt.

Regionalverkehr

Gadebusch

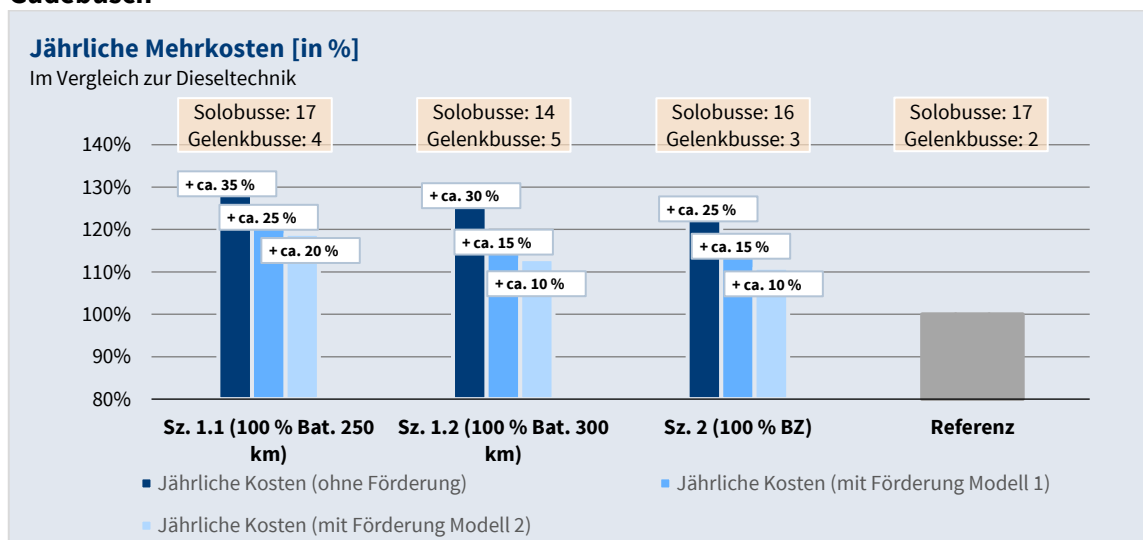


Abbildung 5-1: Gadebusch - prozentuale Mehrkosten im Jahr zur Referenztechnologie Diesel/Erdgas

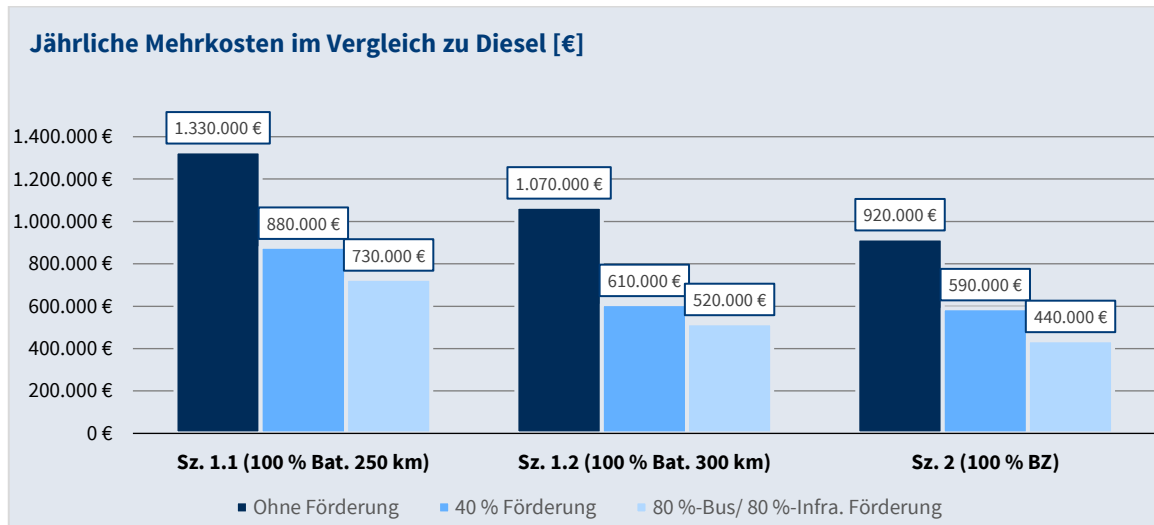


Abbildung 5-2: Gadebusch - absolute Mehrkosten im Jahr zur Referenztechnologie Diesel/Erdgas

Grevesmühlen

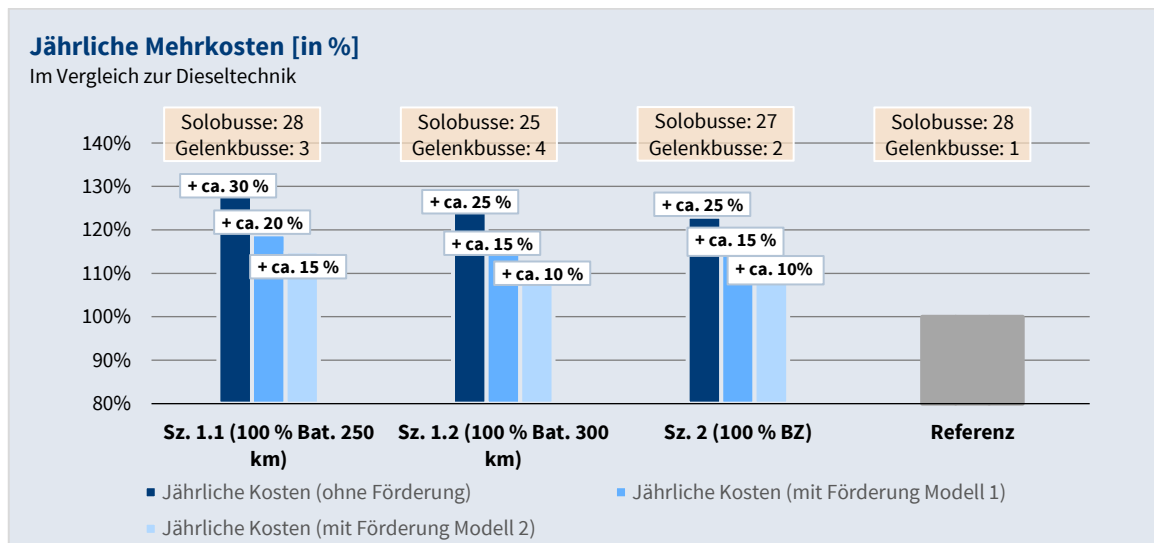


Abbildung 5-3: Grevesmühlen - prozentuale Mehrkosten im Jahr zur Referenztechnologie Diesel/Erdgas

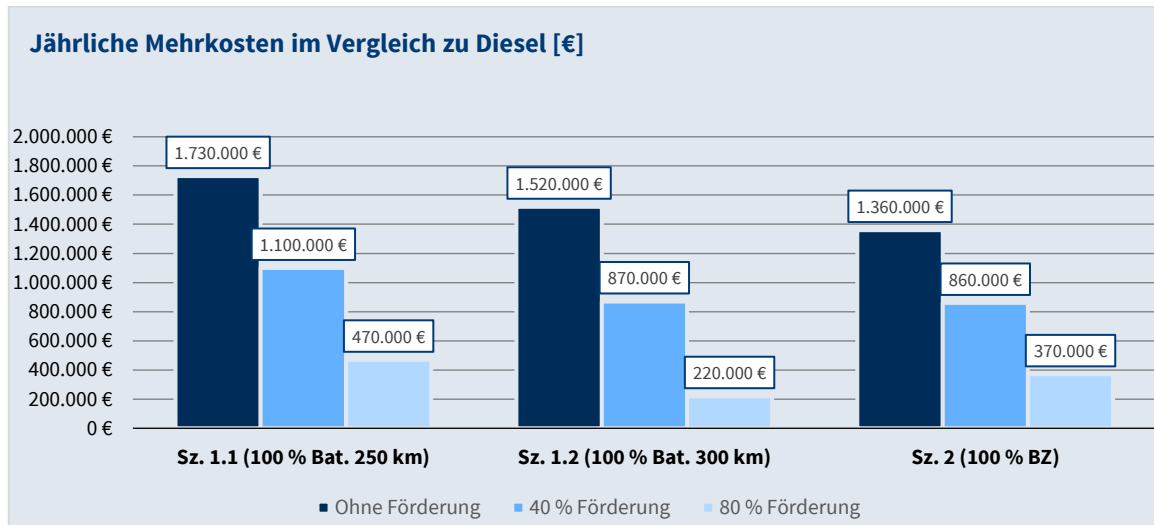


Abbildung 5-4: Grevesmühlen - absolute Mehrkosten im Jahr zur Referenztechnologie Diesel/Erdgas

Schönberg

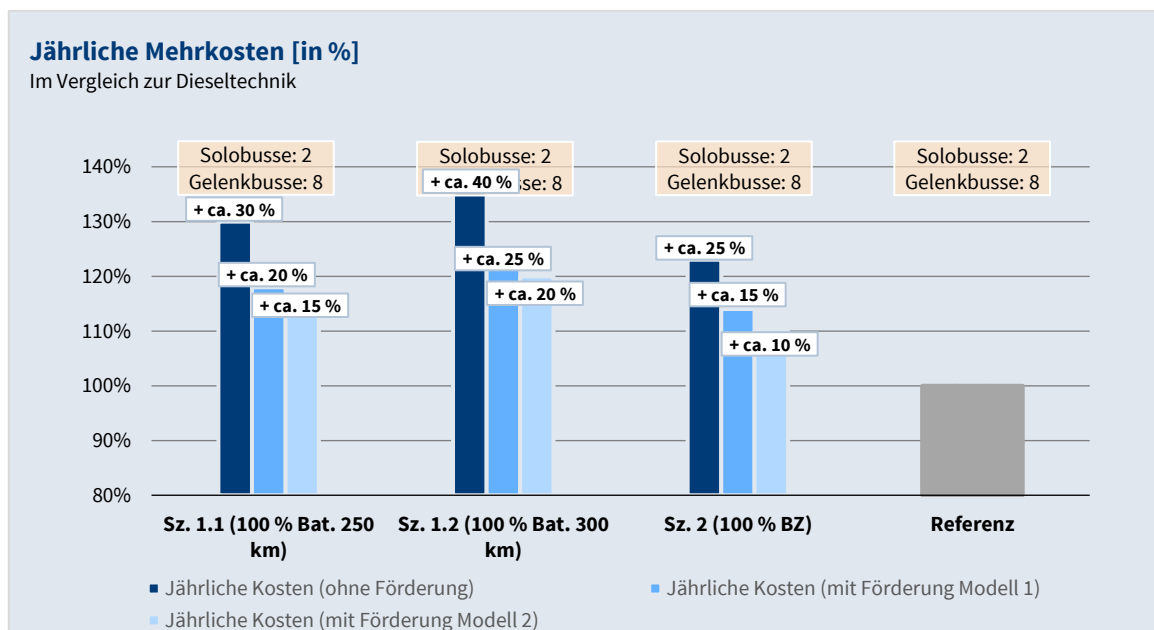


Abbildung 5-5: Schönberg - prozentuale Mehrkosten im Jahr zur Referenztechnologie Diesel/Erdgas

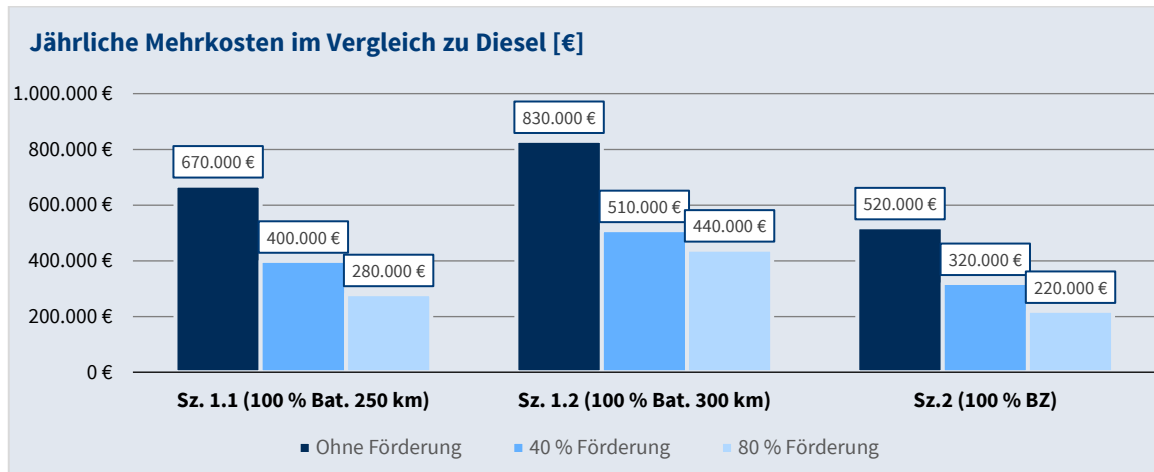


Abbildung 5-6: Schönberg - absolute Mehrkosten im Jahr zur Referenztechnologie Diesel/Erdgas

Wismar (Regionalverkehr)

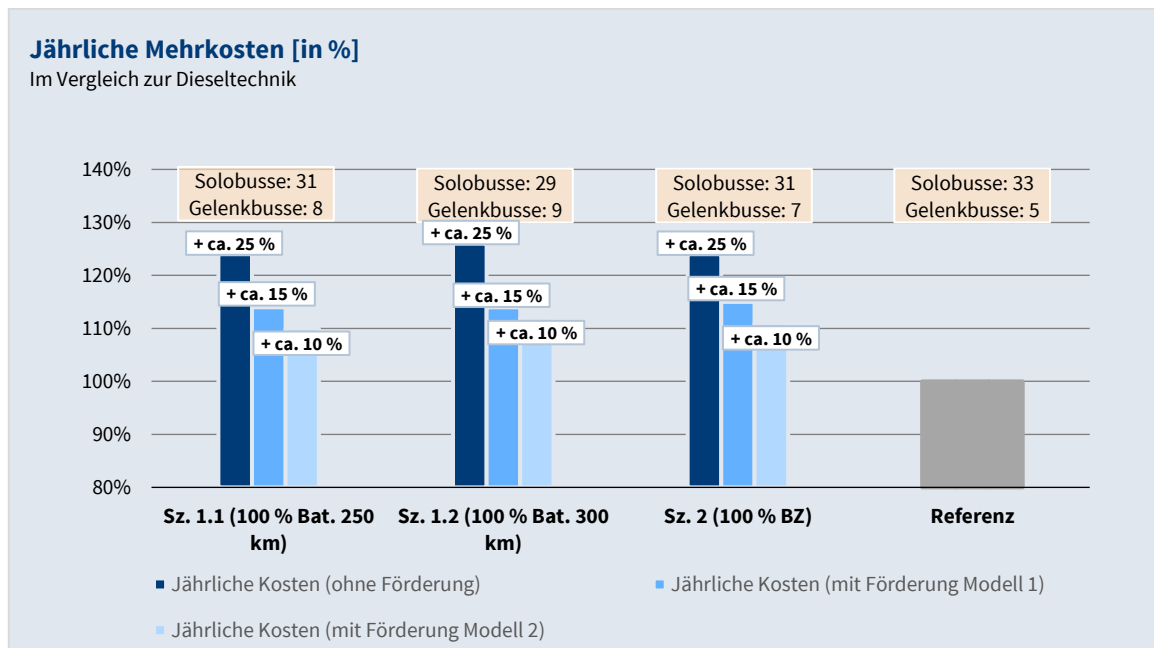


Abbildung 5-7: Wismar (Regionalverkehr) - prozentuale Mehrkosten im Jahr zur Referenztechnologie Diesel/Erdgas

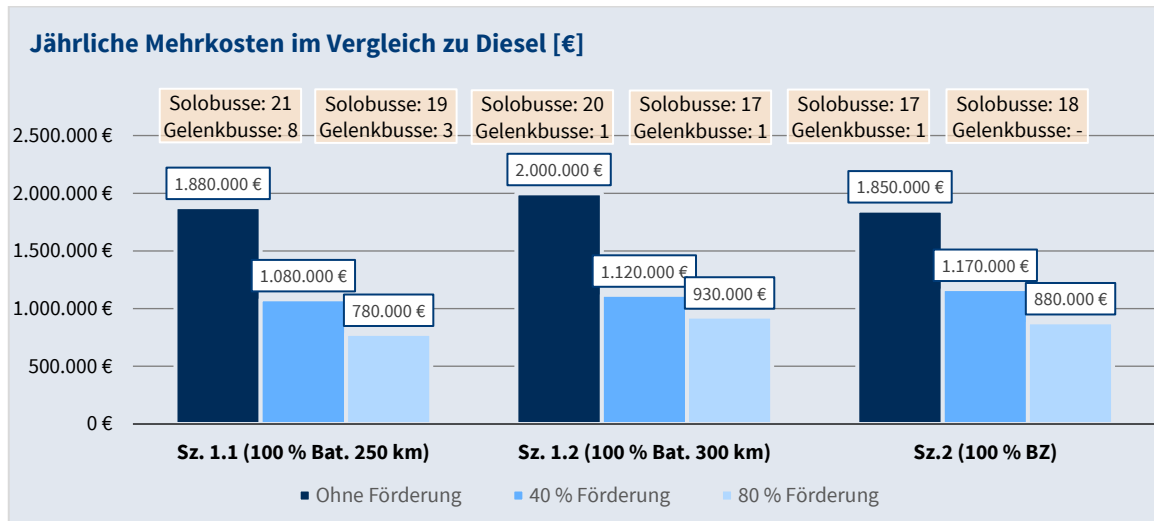


Abbildung 5-8: Wismar (Regionalverkehr) - absolute Mehrkosten im Jahr zur Referenztechnologie Diesel/Erdgas

Stadtverkehr

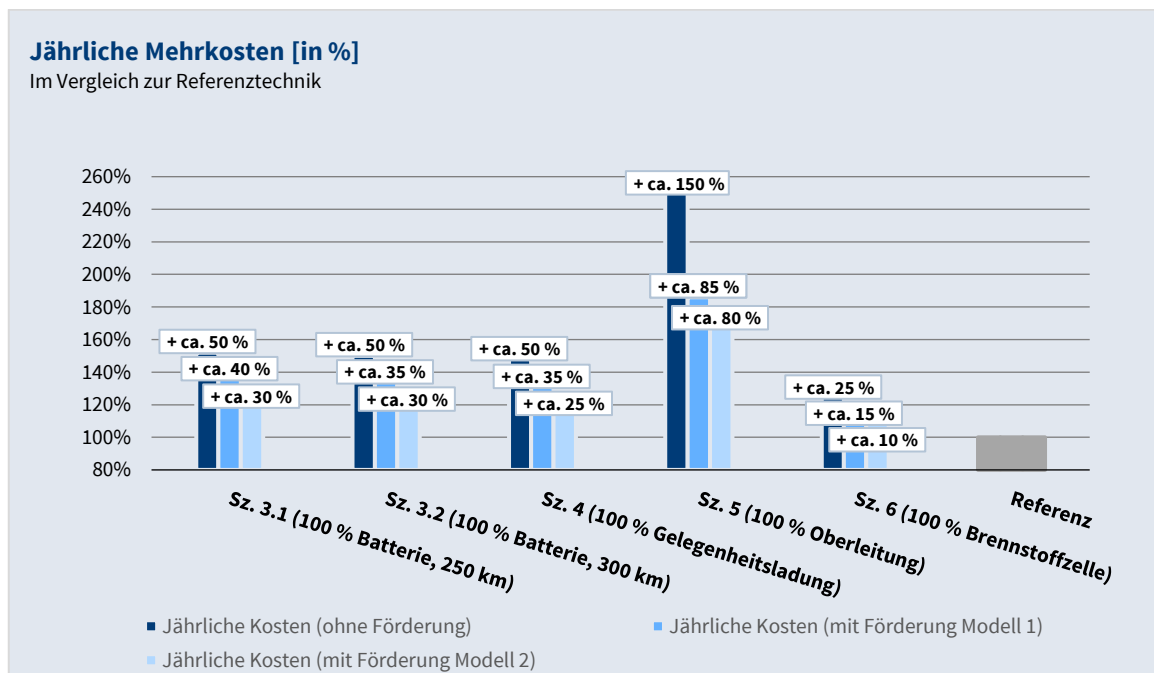


Abbildung 5-9: Wismar (Stadtverkehr) - prozentuale Mehrkosten im Jahr zur Referenztechnologie Diesel/Erdgas¹¹

¹¹ Es wird davon ausgegangen, dass eine Oberleitungsinfrastruktur (Sz. 5) nicht mit 80 % vollständig gefördert wird, daher wurde die Förderquote für die Infrastruktur im Fördermodell 2 auf 40 % reduziert.

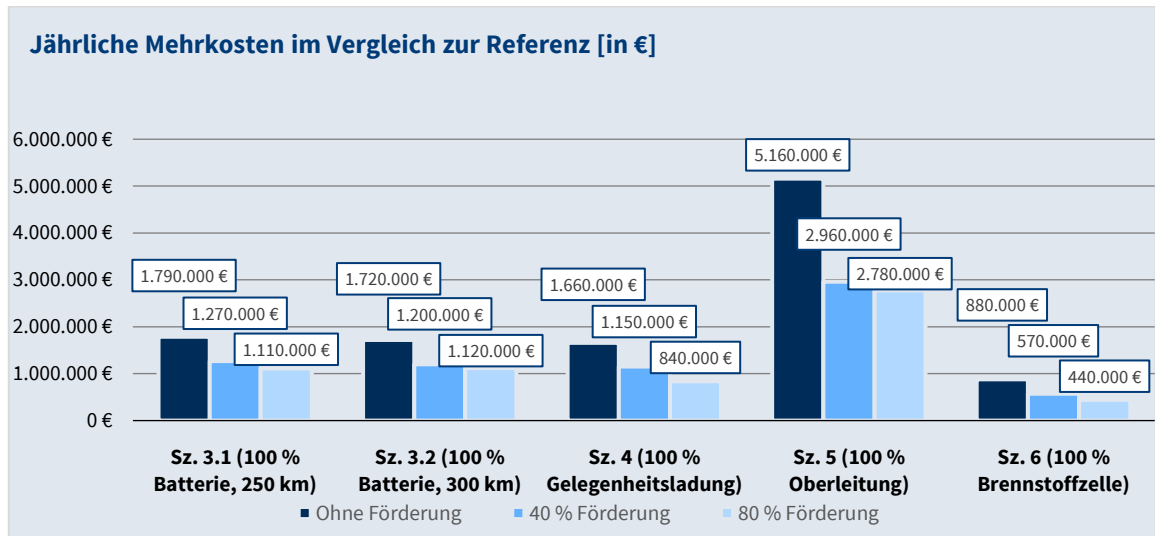


Abbildung 5-10: Wismar (Stadtverkehr) - absolute Mehrkosten im Jahr zur Referenztechnologie Diesel/Erdgas¹¹

6 Bewertung (technisch und wirtschaftlich)

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurden unterschiedliche Technologien zur Umstellung der Busflotte der NAHBUS analysiert. In diesem Abschnitt erfolgt eine Zusammenfassung und Auswertung der technischen und wirtschaftlichen Bewertung.

6.1 Regionalverkehr

In Tabelle 6-1 sind die wichtigsten technischen und wirtschaftlichen Ergebnisse für die Technologien Depotladung, sowohl der aktuelle als auch der zukünftige Technologiestand, und Brennstoffzellentechnik für den Regionalverkehr zusammengefasst und werden im Folgenden kurz erläutert. Als Referenz für die Bewertung dient die derzeitige Erdgas- bzw. Diesel-Technologie.

Tabelle 6-1: Bewertungsmatrix (Regionalverkehr – gesamt)

	Referenz	Szenario 1.1 (100 % Bat., 250 km)	Szenario 1.2 (100 % Bat., 300 km)	Szenario 2 (Brennstoffzelle)
Aufwand Betriebsumstellung	Referenz	Zusatzbusse, Zusatzfahrer*innen, Zwischenladung im Betrieb	Kaum Zusatzaufwand	Kaum Zusatzaufwand
Aufwand Infrastruktur	Referenz	Anschlussleistung im Depot und auf der Strecke, Mehrflächenbedarf, „Re-Positionierung“ der Fahrzeuge zwischen den Standorten oder neue Flächen zum Ausgleich des Mehrflächenbedarfes (insb. GDB und GVM)	Anschlussleistung im Depot, Mehrflächenbedarf, „Re-Positionierung“ der Fahrzeuge zwischen den Standorten oder neue Flächen zum Ausgleich des Mehrflächenbedarfes (insb. GDB und GVM)	Mehrflächenbedarf (keine Fläche in GDB und GVM zur Verfügung) oder Betreiber tankstelle im Einsatzgebiet, Bedarf an kostengünstigen Wasserstoffquellen
Emissionen	NO _x - und Feinstaubemissionen	Keine lokalen Emissionen	Keine lokalen Emissionen	Keine lokalen Emissionen
Kosten	Referenz	Jährliche Mehrkosten in Abhängigkeit von der Förderung und des Standortes bei + 10 % bis + 35 %	Jährliche Mehrkosten in Abhängigkeit von der Förderung und des Standortes bei + 10 % bis + 40 %	Jährliche Mehrkosten in Abhängigkeit von der Förderung und des Standortes bei + 10 % bis + 35 %

Für den Regionalverkehr sind nach derzeitigem Stand der Technik für die Depotladung noch zusätzliche Busse und Fahrer notwendig. Durch Zwischenladungen der Fahrzeuge über den Tag, entweder im Depot oder an Endhaltestellen, kann die Anzahl an Zusatzfahrzeugen reduziert werden. Dies erfordert mindestens eine Anpassung der Dienste sowie die Einplanung zusätzlicher Zeit im Fahrplan, um einen reibungslosen Betrieb aufrecht zu erhalten. Zukünftig zu erwartende Entwicklungen in den Batteriekapazitäten ermöglichen mittel- bis langfristig eine Umstellung ohne wesentliche Anpassungen im Betrieb. Eine Umstellung auf Brennstoffzellenbusse verursacht ebenfalls keinen wesentlich höheren Aufwand bei der Betriebsumstellung im Vergleich zum Status Quo.

Bei einer Analyse der technischen Infrastrukturaspekte ist der Aufwand für die Umstellung bei beiden Technologien vergleichbar.

Durch den zusätzlichen Flächenbedarf der Ladeinfrastruktur für die Depots und ggf. zusätzliche Fahrzeuge kommt es insbesondere an den Standorten Grevesmühlen und Gadebusch zu Flächenengpässen. Um diesen zusätzlichen Flächenbedarf zu kompensieren, müssen andere Standorte (z.B. langfristig der neue Standort in Wismar) genutzt oder neue Flächen erworben werden.

Darüber hinaus stellt die erforderliche Anschlussleistung eine Herausforderung für die Standorte dar. Hier ist ein frühzeitiger Austausch mit den regionalen Netzbetreibern erforderlich.

Eine eigene Betriebshof-Wasserstofftankstelle ist ebenfalls aufgrund der fehlenden Flächenkapazitäten nicht an den zentralen Standorten Grevesmühlen und Gadebusch umzusetzen. Eine Möglichkeit bei der Einführung von BZ-Bussen kann eine Betreiberstation im Einsatzgebiet der Fahrzeuge sein.

Im Vergleich zur Erdgas- bzw. Diesel-Technologie handelt es sich bei den beiden alternativen Technologien um Antriebsmöglichkeiten, welche nach der Clean Vehicle Directive als "emissionsfreie Busse" definiert sind. Während die Fahrzeuge beim Erdgas- bzw. Dieselantrieb NO_x - und Feinstaubemissionen

ausstoßen, werden bei der Depotladung sowie der Brennstoffzellentechnik lokale Emissionen vermieden. Bei Nutzung von erneuerbarem Strom bzw. grünem Wasserstoff reduzieren sich die Emissionen nicht nur lokal, sondern auch global.

Bei der Umstellung auf Depotlader müssen in Abhängigkeit vom betrachteten Standort prozentuale jährliche Mehrkosten von etwa 35 % bis 40 % ohne Förderung eingeplant werden. Als Vergleichsmaßstab gelten hierbei die Kosten, die bei der aktuellen Flotte (Referenztechnologie) entstehen. Bei einer Förderung von bis zu 80 % der Mehrkosten für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge sowie einer Förderung von bis zu 80 % der Mehrkosten für die Lade- bzw. Tankinfrastruktur können die prozentualen Mehrkosten auf 10 % pro Jahr gesenkt werden.

Vor allem die für den Linienbetrieb notwendigen zusätzlichen Busse sowie die dadurch erforderliche zusätzliche Ladeinfrastruktur führen bei der Depotladung zu höheren Kosten.

Die Kosten für eine vollständige Umstellung auf BZ-Busse liegen je nach Fördermodell und Standort zwischen + 10 % und 35 % pro Jahr. Damit sind die Mehrkosten vergleichbar mit denen der Depotladung. Wesentlicher Kostentreiber im Vergleich zur Depotladung sind die erhöhten Energiekosten. Eine Voraussetzung für den Einsatz der Brennstoffzellentechnologie ist, dass in der Region langfristig kostengünstige Quellen für grünen Wasserstoff zur Verfügung stehen.

Insgesamt hat die technische und wirtschaftliche Analyse gezeigt, dass sich für eine langfristige Umstellung des Regionalverkehrs sowohl die Depotladung als auch die Brennstoffzellentechnologie eignet. Die Elektrifizierung per Depotladung kann mit der Umstellung kürzerer Umläufe (z.B. Schülerverkehr) oder

durch zusätzliche Maßnahmen, wie z.B. Zwischenladungen im Tagesverlauf, beginnen. Mittel- bis langfristig ist der Mehraufwand gegenüber der Erdgas- bzw. Diesel-Technologie für die betriebliche Umsetzung überschaubar. BZ-Busse können bereits heute alle Tagesleistungen ohne zusätzlichen Fahrzeugbedarf bedienen, jedoch ist der Einstieg im Vergleich zur Batterietechnologie mit Depotbeladung mit erhöhtem Infrastrukturaufwand verbunden. Aufgrund fehlender Flächen auf eigenen Betriebshöfen ist eine Betankungsmöglichkeit im Einsatzgebiet erforderlich. Darüber hinaus besteht ein Bedarf an kostengünstigem grünem Wasserstoff, so dass der Einsatz der Brennstoffzellentechnologie im Regionalverkehr auch von den regionalen Wasserstoffaktivitäten abhängt.

6.2 Stadtverkehr

In Tabelle 6-2 sind die wichtigsten technischen und wirtschaftlichen Ergebnisse für die Technologien Depotladung, Gelegenheitsladung, Oberleitung und Brennstoffzellentechnik im Stadtverkehr aufgeführt.

Tabelle 6-2: Bewertungsmatrix (Stadtverkehr – gesamt)

	Referenz	Szenario 2.1 (100 % Bat., 250 km)	Szenario 2.2 (100 % Bat., 300 km)	Szenario 3 (100 % GL)	Szenario 4 (100 % OL)	Szenario 5 (Brennstoffzelle)
Aufwand Betriebsumstellung	Referenz	Zusatzbusse, Zusatzfahrer*innen, Zwischenladung im Betrieb	Zusatzbusse, Zusatzfahrer*innen, Zwischenladung im Betrieb	Umlaufneuplanung, Zusatzbusse, hohe Batteriekapazitäten	Kaum Zusatzaufwand	Kaum Zusatzaufwand
Aufwand Infrastruktur	Referenz	Flächenbedarf auf neuem Betriebshof gegeben, Anschlussleistung am Depot Ggf. (Schnell-) Ladeinfrastruktur auf der Strecke (Platz, Anschlussleistung, Zuständigkeit, etc.)	Flächenbedarf auf neuem Betriebshof gegeben, Anschlussleistung am Depot Ggf. (Schnell-) Ladeinfrastruktur auf der Strecke (Platz, Anschlussleistung, Zuständigkeit, etc.)	Hohe Anzahl an Pantographen erforderlich (8 zentrale Haltestellen mit 1-2 Pantographen je Haltestelle) Anschlussleistung auf der Strecke und im Depot Hoher Planungs-, Abstimmungs- und Umsetzungsaufwand	OL-Infrastruktur im gesamten Streckennetz erforderlich Hoher Planungs-, Abstimmungs- und Umsetzungsaufwand	H ₂ -Tankstelle notwendig, Betriebshoftankstelle oder Betreibermodell Bedarf an kostengünstigen Wasserstoffquellen (Synergien mit lokalen und regionalen Wasserstoffaktoren)
Emissionen	NO _x - und Feinstaubemissionen	Keine lokalen Emissionen	Keine lokalen Emissionen	Keine lokalen Emissionen	Keine lokalen Emissionen	Keine lokalen Emissionen
Kosten	Referenz	Jährliche Mehrkosten in Abhängigkeit von der Förderung bei + 30 % bis + 50 %	Jährliche Mehrkosten in Abhängigkeit von der Förderung bei + 30 % bis + 50 %	Jährliche Mehrkosten in Abhängigkeit von der Förderung bei + 25 % bis + 50 %	Jährliche Mehrkosten in Abhängigkeit von der Förderung bei + 80 % bis + 150 %	Jährliche Mehrkosten in Abhängigkeit von der Förderung bei + 10 % bis + 25 %

Aufgrund der erhöhten Tagesfahrkilometer im Stadtverkehr ist eine Umstellung auf Depotlader sowohl heute als auch langfristig mit zusätzlichen Bussen und Fahrern verbunden. Durch eine Schnellladung an Endhaltestellen kann die

Anzahl der zusätzlichen Busse reduziert werden. Dies erfordert eine Anpassung der Umläufe und die Einplanung von zusätzlichen Halte- und Wendezeiten, um den Betrieb aufrechterhalten zu können. Auch eine vollständige Elektrifizierung des Stadtverkehrs durch Gelegenheitslader erfordert entsprechende Umpfanungen sowie zusätzliche Busse und Fahrer.

Oberleitungsbusse und auch Brennstoffzellenbusse erfordern aus technischer und betrieblicher Sicht keine zusätzlichen Fahrzeuge gegenüber der heutigen Referenztechnologie.

Angesichts des geplanten neuen Betriebshofs ist der Infrastrukturaufwand für die Depotladung und Brennstoffzellentechnologie begrenzt. Flächenbedarfe und Anschlussleistungen können rechtzeitig berücksichtigt werden. Wenn an einzelnen Haltestellen Schnelllademöglichkeiten zur Unterstützung der Depotlader installiert werden sollten, erhöht sich der Aufwand entsprechend. Auch die Einführung von Gelegenheitsladern ist, aufgrund der hohen Anzahl an zu ertüchtigenden Endhaltestellen, mit einem erhöhten Planungs-, Abstimmungs- und Umsetzungsaufwand verbunden. Die Umsetzung eines Oberleitungsnetzes in Wismar erfordert einen beträchtlichen Aufwand und bringt erhebliche Investitionskosten mit sich. Auch bei Teilabschnitten des Netzes bleibt dieser hohe Aufwand bestehen.

Bei der Umstellung auf die Depotladung müssen jährliche Mehrkosten von etwa 1,8 Mio. € ohne Förderung mitberücksichtigt werden. Durch entsprechende Fördermittel können diese Kosten auf bis zu ca. 1,1 Mio. € reduziert werden. Für die Gelegenheitsladung sind ca. 1,7 Mio. € Mehrkosten pro Jahr ohne Förderung und ca. 0,85 Mio. € mit potenziellen Förderungen zu erwarten. Vor allem die für die Depotladung notwendigen zusätzlichen Busse sowie die dadurch erforderliche zusätzliche Ladeinfrastruktur führen zu höheren Kosten gegenüber der Gelegenheitsladung. Eine monetäre Abschätzung des

Planungsaufwands für die Umsetzung des Gelegenheitsladens ist jedoch nicht mitberücksichtigt.

Die Kosten für die Einführung von Oberleitungsbussen liegen, insbesondere aufgrund der Investitionen für die Infrastruktur zwischen 2,8 Mio. € (mit Förderung) und 5,2 Mio. € (ohne Förderung) pro Jahr.

Bei einer vollständigen Umstellung auf Wasserstoff entfallen die Kosten für zusätzliche Fahrzeuge und Fahrer. Alle Umläufe im Stadtverkehr können ohne zusätzliche Fahrzeuge bedient werden. Die jährlichen Mehrkosten belaufen sich im nicht geförderten Fall auf ca. 0,88 Mio. €. Durch die o.g. maximalen Fördersätze können diese Mehrkosten auf ca. 0,45 Mio. € reduziert werden. Eine Voraussetzung hierfür ist, dass in der Region langfristig kostengünstige Quellen für grünen Wasserstoff zur Verfügung stehen.

Unter Berücksichtigung der technischen und wirtschaftlichen Aufwände kann die Elektrifizierung des Stadtverkehrs sowohl durch die Depotladung als auch durch die Brennstoffzellentechnologie erfolgen. Während für die Depotladung voraussichtlich zusätzliche Maßnahmen, wie z.B. Zusatzbusse oder Schnellladungen an Haltestellen, notwendig werden, bietet die Brennstoffzellentechnologie eine erhöhte Flexibilität. Gleichzeitig besteht der Bedarf an regionalen Wasserstoffaktivitäten, um die Attraktivität der Einführung von Brennstoffzellenbussen zu steigern.

7 Umsetzung

In diesem Kapitel wird ein potenzieller Umsetzungspfad auf Basis der Ergebnisse der technisch-wirtschaftlichen Analyse für die Elektrifizierung des ÖPNV in Nordwestmecklenburg-Vorpommern vorgeschlagen. Anhand eines möglichen Busbeschaffungsplans werden die Investitionsausgaben sowie die jährlichen Mehrkosten im Vergleich zur Referenztechnologie aufgeführt.

7.1 Umsetzungspfad: Einführung einer Mischflotte

Für die Elektrifizierung der NAHBUS-Busflotte wird die Einführung einer gemischten Flotte vorgeschlagen. Dabei soll der Regionalverkehr vollständig auf die Batterietechnologie mit Depotladung umgestellt werden, während der Stadtverkehr komplett von Brennstoffzellenbussen (BZ-Busse) bedient wird. Das hat den Vorteil, dass die Technologien in ihren jeweiligen Einsatzbereichen nach aktuellem Stand der Technik ideale Einsatzbedingungen aufweisen, während der Fahrzeugbedarf der gesamten Flotte minimiert wird. Darüber hinaus kann die Abhängigkeit von einem Energieträger durch eine Mischflotte reduziert und so eine Redundanz in der Flotte geschaffen werden.

Dem steht jedoch ein erhöhter Aufwand gegenüber, wenn es um die Einführung und den Betrieb von zwei Technologien geht (z.B. Personalschulung, Werkstattausrüstung, Infrastruktur).

Da die Elektrifizierung des Stadtverkehrs allerdings erst mit der Einführung des neuen Standortes erfolgt und dies voraussichtlich nicht vor 2030 geschehen wird, bietet der Umsetzungspfad die Möglichkeit, Entwicklungen im Markt und in der Technologie sowie die Preise verschiedener Energieträger (H₂, Strom, Diesel, Gas) und lokale Wasserstoffaktivitäten zu verfolgen. Falls zum Beispiel attraktive regionale Wasserstoffproduktionen ausbleiben oder die Batterieentwicklung die Möglichkeit bietet, den gesamten Stadtverkehr mit Depotladern

ohne zusätzliche Maßnahmen zu bedienen, kann dies bei der zukünftigen Umstellungsstrategie berücksichtigt werden. Währenddessen kann die Elektrifizierung im Regionalverkehr mit der Depotladung begonnen werden.

7.2 Umsetzungs- / Beschaffungsplan

Heute beschafft die NAHBUS in der Regel zehn (10) neue Busse pro Jahr, verteilt auf alle Standorte. Im Rahmen einer Elektrifizierung der Busflotte ist es sinnvoll, diese schrittweise an den einzelnen Standorten durchzuführen, vor allem um den Aufwand für die Infrastruktur so gering wie möglich zu halten. Aus diesem Grund wird davon ausgegangen, dass die Busbeschaffung zukünftig in Blöcken von ca. 15 - 25 E-Bussen alle zwei Jahre erfolgt. Dies entspricht weiterhin einer durchschnittlichen Beschaffungsrate von 10 Bussen pro Jahr. Die Beschaffungsblöcke ermöglichen es, einzelne Standorte der NAHBUS in einer Beschaffungsphase vollständig zu elektrifizieren und bieten gleichzeitig ausreichend Zeit, die Standorte entsprechend auf die neue Technologie vorzubereiten. Tabelle 7-1 listet die Fahrzeugneubeschaffungen der NAHBUS im Zeitraum 2025 bis 2037 an den verschiedenen Standorten auf. Jahre ohne geplante Neubeschaffung sind nicht aufgeführt. In Anhang A.2 wird der Beschaffungsplan des Umsetzungspfades grafisch dargestellt.

Tabelle 7-1: Beschaffungsplan der E-Busse im Zeitraum 2025 bis 2037

Jahr	Schönberg	Gadebusch	Grevesmühlen (inkl. Klütz)	Wismar
2025	10 Depotlader			
2027		15 Depotlader		
2029			25 Depotlader	
2031				20 BZ-Busse
2033				20 Depotlader
2035				20 Depotlader
2037				12 Depotlader

Mit der angestrebten Beschaffungsquote von E-Bussen ist es möglich, die gesamte Busflotte bis 2037 zu elektrifizieren. Dadurch werden alle gesetzlichen Anforderungen der Clean Vehicle Directive erfüllt. Während des Elektrifizierungsprozesses des Regionalverkehrs müssen aufgrund des höheren Platzbedarfs einige konventionelle Busse an andere Standorte oder Abstellflächen verschoben werden. Ab 2030 werden die anderen Standorte durch den neu errichteten Standort Wismar entlastet.

Durch den veränderten Beschaffungsrhythmus müssen konventionelle Busse teilweise länger als üblich betrieben werden. Um die Modernität der Flotte zu erhalten, werden die E-Busse zwar standortspezifisch eingeführt, ersetzen aber jeweils die ältesten Busse der Gesamtflotte.

Dies erfordert ein „Verschieben“ einzelner Busse zwischen den verschiedenen Standorten.

7.3 Kosten über die Zeit

Die Abbildung 7-1 zeigt die Investitionskosten für den betrachteten Umsetzungspfad über den Lauf der Zeit. Die Kosten werden je nach Technologie und Kostenarten (z.B. Fahrzeugbeschaffung, Infrastruktur, etc.) unterschieden. In Anhang A.2 sind die jährlichen Investitionen als absolute Kosten angegeben.

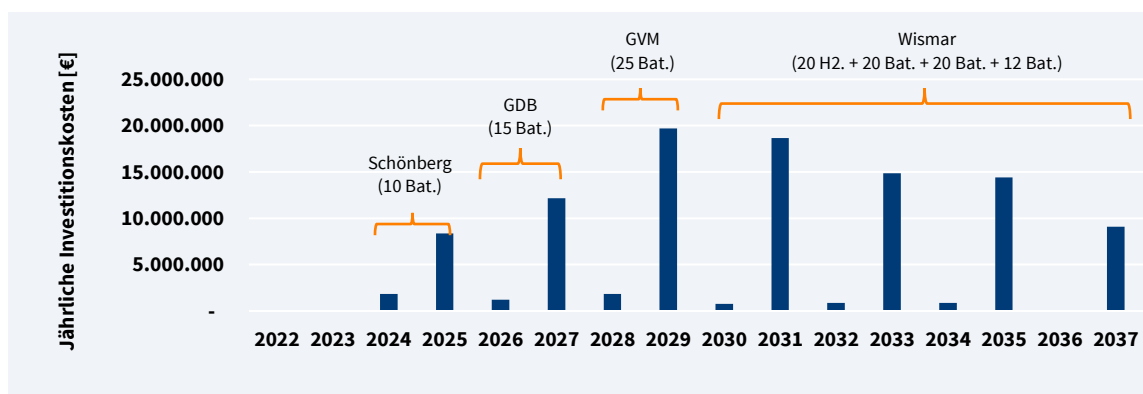


Abbildung 7-1: Jährliche Investitionskosten über die Zeit – Mischflotte

Die hier dargestellten Kosten basieren auf den in Kapitel 5 angenommenen Kostenparametern¹². Es zeigt sich, dass die größten Investitionen im Bereich der Fahrzeugbeschaffung liegen. Diese fallen alle zwei Jahre an. Insgesamt fallen Investitionskosten von ungefähr 105 Mio. € während der gesamten Umstellung bis 2037 an. Diese Summe kann durch die Inanspruchnahme von Fördermitteln reduziert werden. Die Kosten für den Bau des Wismarer Standorts oder den Kauf zusätzlicher Abstellflächen wurden nicht berücksichtigt.

In Abbildung 7-2 werden die jährlichen Kosten für die Einführung von E-Bussen im Vergleich zur Referenztechnologie Diesel dargestellt. Die Kosten setzen sich aus den abzuschreibenden Investitionskosten und den Betriebskosten zusammen. Die Betriebszeit der Busse wird auf 12 Jahre angenommen, die Kosten werden entsprechend bis 2048 gezeigt.

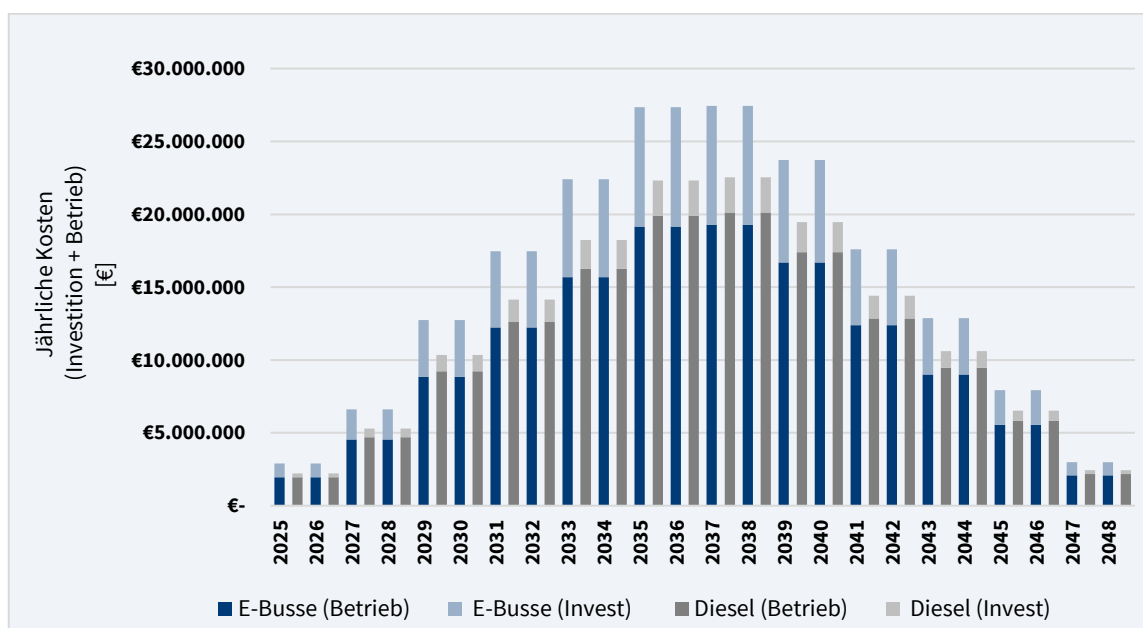


Abbildung 7-2: Jährliche Kosten - Vergleich E-Busse vs. Diesel

¹² Für die Kosten der Batterie-Technologie wurden die Kosten der Szenarien 1.1 und 3.1 als konservativer Ansatz herangezogen. Für die Fahrzeuginvestitionskosten wurde eine Reduzierung der Kosten um ca. 1,5 % pro Jahr angenommen.

Im Vergleich zur Diesel-Referenztechnologie entstehen bei der Elektrifizierung der Busflotte bis zum Jahr 2048 Mehrkosten von ca. 68 Mio. € (ohne Förderung). Im Durchschnitt fallen pro Jahr Mehrkosten von 2,8 Mio. € (ohne Förderung) an. Die Kosten berücksichtigen noch nicht eine mögliche zweite Beschaffungsrunde der E-Busse nach 12 Jahren sowie potenzielle Zusatzkosten durch längere Betriebszeiten der Dieselbusse. Zudem sind keine Kapitalkosten oder sonstigen Finanzierungskosten mit abgebildet.

Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass die Kosten für den Betrieb der Fahrzeuge einen wesentlichen Anteil der jährlichen Kosten ausmachen. Es lässt sich feststellen, dass der Betrieb von E-Bussen vergleichbare oder sogar niedrigere Kosten im Vergleich zur Referenztechnologie aufweisen kann. Im Gegensatz dazu machen die abgeschriebenen Anschaffungskosten lediglich einen geringen Anteil der jährlichen Kosten aus. Die Abbildung zeigt, dass sie dennoch der Haupttreiber für die Mehrkosten der E-Busse gegenüber den Dieselbussen sind.

Der Berechnung der Gesamtreferenzkosten liegt ein durchschnittlicher Dieselpreis von 1,70 € über den betrachteten Zeitraum zugrunde. In Zukunft ist mit einer Kostensteigerung des Dieselpreises aufgrund von Maßnahmen wie weiteren CO₂-Bepreisungen oder verstärkter Besteuerung zu rechnen. Abbildung 7-3 zeigt die aufsummierten Gesamtkosten für Investitionen und Betrieb bis 2048. Es werden die Gesamtreferenzkosten unter Berücksichtigung unterschiedlicher Dieselpreise im Vergleich zu den Gesamtkosten der Flottenumstellung auf E-Busse dargestellt.

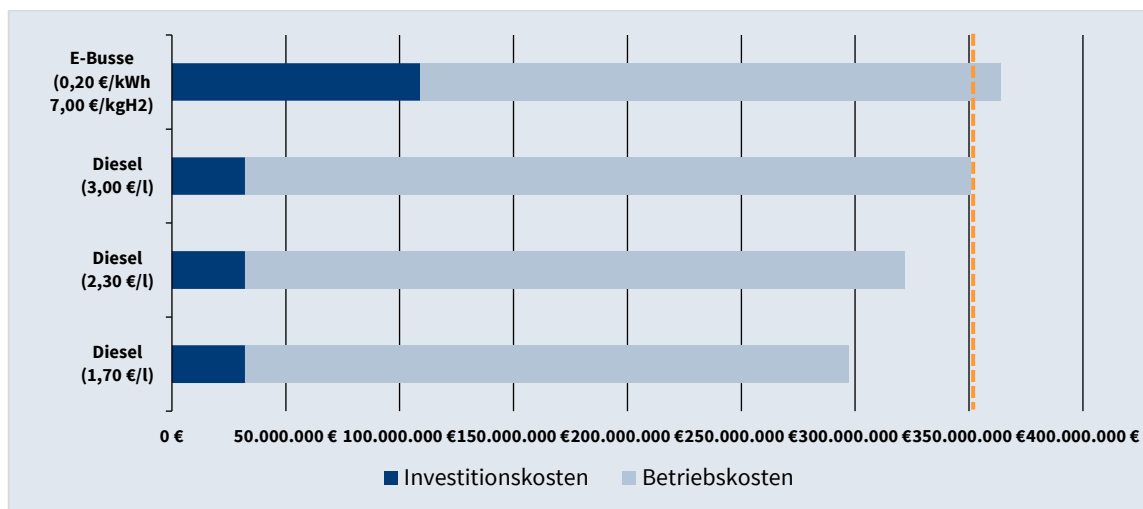


Abbildung 7-3: Gesamtkostenvergleich bis 2048 - Sensitivitätsanalyse Dieselpreis

Die Sensitivitätsbetrachtung des Dieselpreises verdeutlicht den Einfluss der Investitionskosten der E-Busse sowie der entsprechenden Infrastrukturen auf die Mehrkosten einer Elektrifizierung. Selbst bei signifikant erhöhten Betriebskosten durch die Steigerung des Dieselpreises kann keine Kostenparität erreicht werden. Es ist zu beachten, dass neben dem Preis für Dieselkraftstoff weitere Einflussfaktoren bei der Betrachtung der Kosten eine Rolle spielen, wie beispielsweise die Preise für Strom und Wasserstoff sowie für Fahrzeuge etc.

7.4 Nächste Schritte für die Umstellung

Durch die Vorbereitung der Einführung der ersten Batteriebusse am Standort Schönberg hat der Einstieg in einen emissionsfreien ÖPNV bereits begonnen. Mit der Einführung können wichtige Erfahrungen und Erkenntnisse für die zukünftige Elektrifizierung gewonnen werden. Zur weiteren Umsetzung sind im Folgenden die nächsten Schritte aufgeführt.

- Klärung des Standortes zur Abstellung der Fahrzeuge, Vorbereitung des Standortes
- Abstimmung mit den Städten und Kommunen zum Aufbau der geplanten Schnellladeinfrastruktur an Endhaltestellen

- Abstimmung mit den regionalen Netzbetreibern und Energieversorgern
- Ausschreibung und Anschaffung der Fahrzeuge
- Ausschreibung und Anschaffung der Ladeinfrastruktur (ggf. in Verbindung mit den Fahrzeugen)
- Klärung der Rahmenbedingungen für Wartung und Instandhaltung der Fahrzeuge sowie Anpassung/Ertüchtigung und Werkstatt
- Schulung des Personals
- Betriebsstart der Batteriebusse in Schönberg

Wie in Kapitel 7.2 beschrieben, empfiehlt sich das standortspezifische Vortreiben der Elektrifizierung, um die Infrastrukturaufwände zu minimieren. Entsprechend sind frühzeitig die Rahmenbedingungen für die Umstellung an den jeweiligen Betriebshöfen zu klären:

- Klärung der Einsatzbedingungen für die E-Busse (ggf. Schnellladung auf der Strecke, Umlaufneuplanung, etc.)
- Abstimmung mit den regionalen Netzbetreibern und Energieversorgern
- Kontinuierliches Fördermittelmonitoring
- Beschaffung der Fahrzeuge und Infrastruktur
- Ggf. Klärung der „Verschiebung“ von Bussen zwischen einzelnen Standorten
- Klärung der Rahmenbedingungen für Wartung und Instandhaltung der Fahrzeuge sowie Anpassung/Ertüchtigung und Werkstatt
- Schulung des Personals

In Anhang A.2 ist ein möglicher Zeitplan zur Anpassung der Betriebshöfe, mit Planungs-, Umsetzungs- und Ausbauphasen dargestellt.

Einbindung von Subunternehmern

Derzeit hat die NAHBUS verschiedene Leistungen im Regionalverkehr an insgesamt sechs Subunternehmer vergeben. Diese Subunternehmerleistungen bieten aktuell das Potenzial für eine Umstellung auf die Depotladung, ggf. mit einzelnen zusätzlichen Fahrzeugen, oder auch auf die Brennstoffzellentechnologie. Eine Zusammenfassung der Analyse der Subunternehmer ist in Anhang A.5 aufgeführt.

Es ist empfehlenswert, die Subunternehmer in das Umsetzungskonzept einzubinden. Perspektivisch kann NAHBUS die Lade- bzw. Betankungsinfrastruktur zur Nutzung zur Verfügung stellen. Auf diese Weise können lokale kleine und mittelständische Unternehmen beim Elektrifizierungsprozess unterstützt werden.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, durch vermehrte Fremdvergabe von Leistungen die Anzahl der benötigten Fahrzeuge zu reduzieren, um Flächenengpässe an einzelnen Standorten zu vermeiden.

A. Anhang

A.1. Anmerkungen

In diesem Bericht wird mit den Begriffen „emissionsfrei“ und „Nullemission“ das Fehlen der Emission von Luftschadstoffen beim Betrieb von E-Bussen bezeichnet. Die Begriffe beziehen sich dementsprechend nur auf den Betrieb des elektrischen Antriebsstrangs des Fahrzeugs (Tank-to-Wheel). Folglich werden keine Emissionen erfasst, die durch den Betrieb (Brems- und Reifenabrieb, Geräuschemissionen etc.) und die Produktion der Busse entstehen. In diesem Sinne sind Elektrobusse lokal emissionsfrei, da kein Abgas und somit auch keine Luftschadstoffe ausgestoßen werden.

Alle Preise sind als Richtpreise zu verstehen. Die Preise sind derzeit am Markt üblich. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass den angegebenen Preisen keine spezifischen Angebote mit einem detaillierten Lastenheft zugrunde liegen. (Stand September 2023)

A.2. Umsetzungspfad

A.2.1. Beschaffungsplan über die Zeit

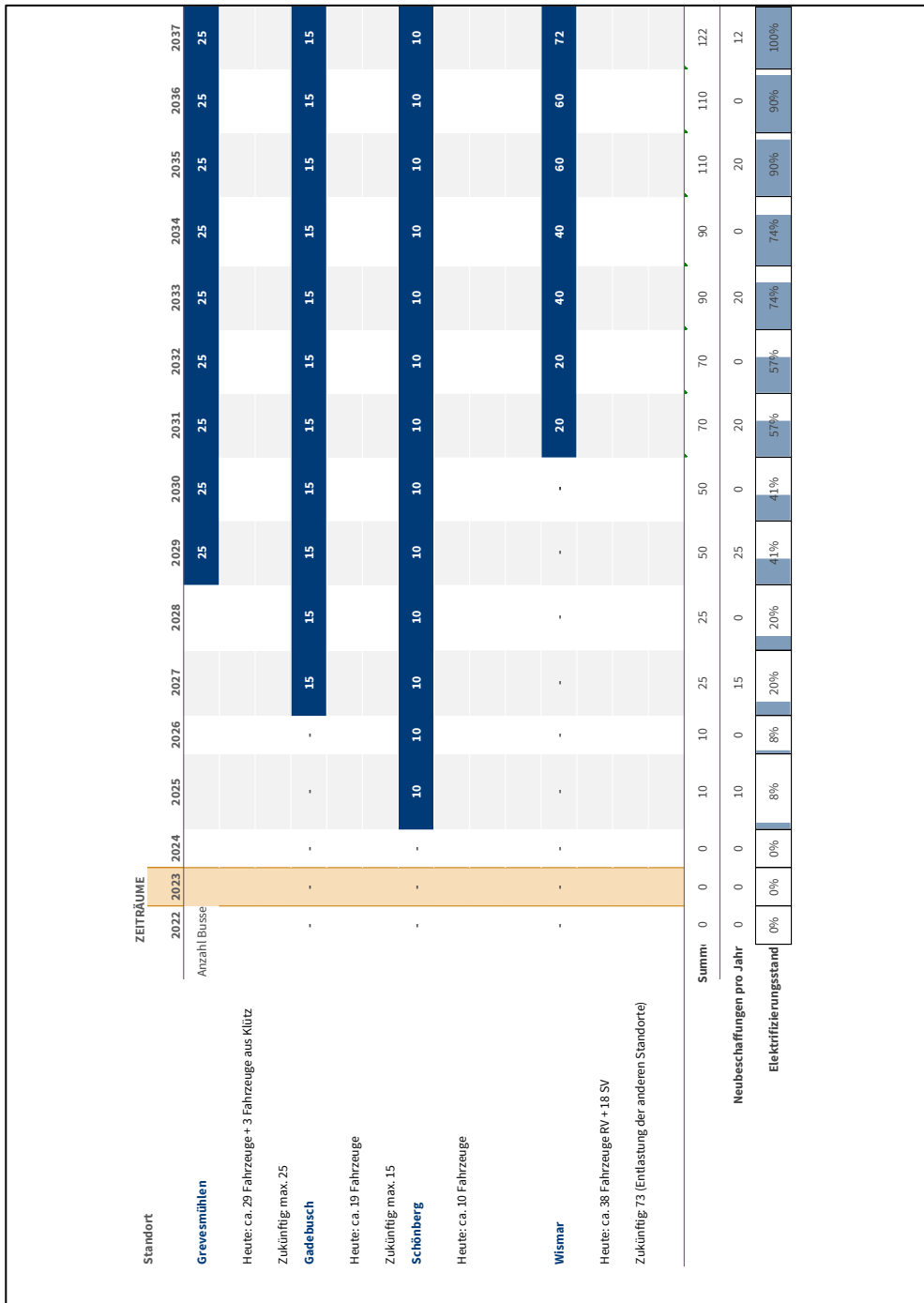


Abbildung 7-4: Umsetzungspfad (Mischflotte) – Beschaffungsplan

A.2.2. Investitionskosten (absolut in t€) über die Zeit

Tabelle 7-2: Jährliche Investitionskosten über die Zeit (absolut in T€) – Mischflotte

Jahr	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
Batterie	Fahrzeugbeschaffung		7.760		11.300		18.250			13.755		13.350		7.770
	Ladeinfrastruktur		600		885		1.450			1.100		1.085		640
	Netzanschluss / Trafo	1.450		900		1.350			675		675			
	Werkstatt / Schulung	380		335		490			185		185			
Brennstoffzelle	Fahrzeugbeschaffung							14.200						
	Ladeinfrastruktur							4.500						
	Netzanschluss / Trafo							inkl. H2-TS						
	Werkstatt / Schulung						765							
Summe	1.830	8.360	1.235	12.185	1.840	19.700	765	18.700	860	14.855	860	14.435		8.410

A.2.3. Planungs-, Umsetzungs- und Ausbauphasen

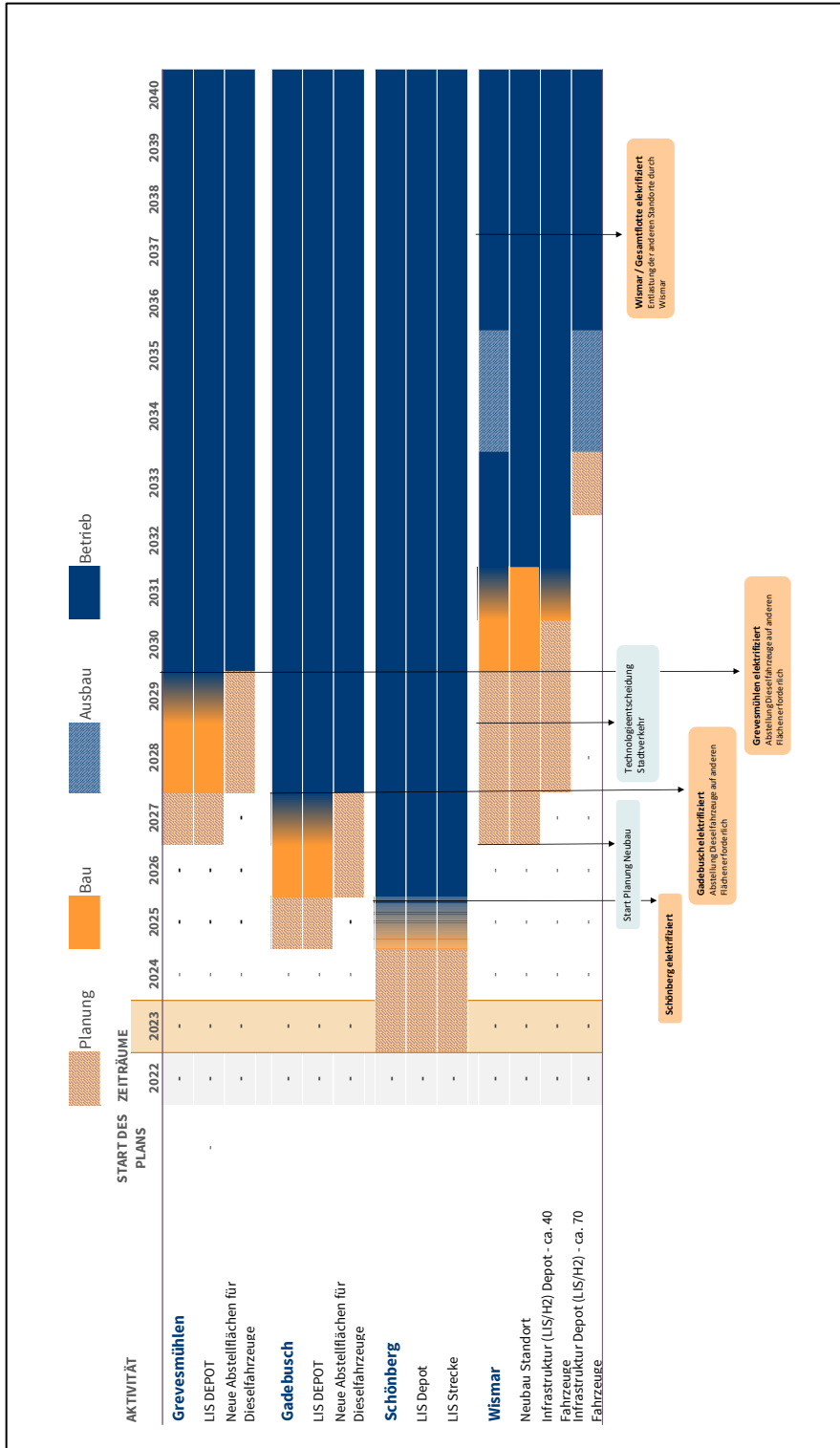


Abbildung 7-5: Umsetzungsplan - NAHBUS

A.3. Werkstatt und Schulung

Im folgenden Kapitel wird auf die Anpassungen von Werkstatt und Schulung eingegangen, die mit der Umstellung einer Busflotte notwendigerweise einhergehen. Beim Einsatz von BZ-Bussen sind neben der Fahrzeugbeschaffung und dem Ausbau der Infrastruktur zwei weitere Aspekte zu beachten. Das sind die Themen Hochvolt (HV) und Wasserstoff (H₂) Abbildung 7-.

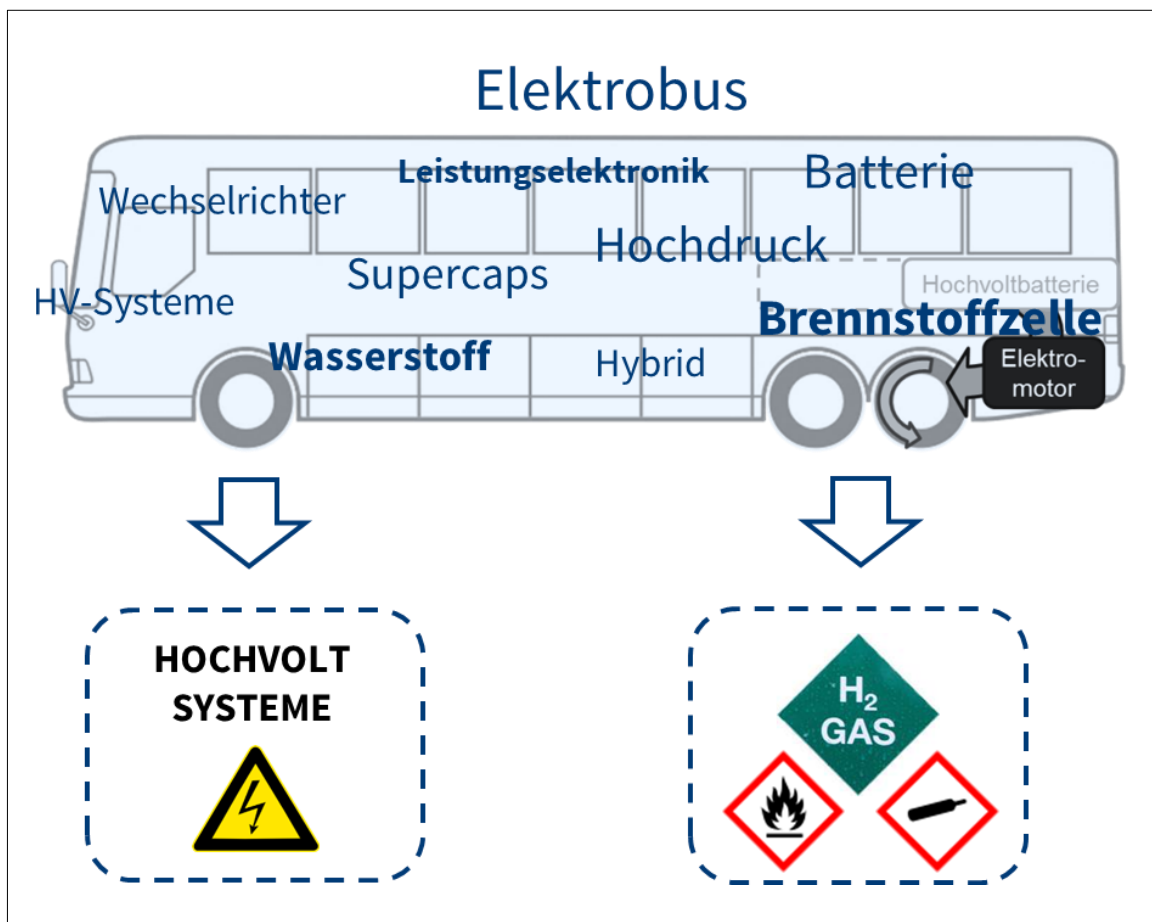


Abbildung 7-1 Signifikante Themenfelder der neuen Technologien

Im ÖPNV-Bereich arbeiten alle elektrischen Fahrzeuge mit Spannungen von einigen hundert Volt. Bei Brennstoffzellenbussen wird außerdem Wasserstoff als Energieträger eingesetzt. Beide Themenfelder sind heute üblicherweise im konventionellen Busbereich nicht bekannt. Daher sind sie beim Einsatz von BZ-

Bussen besonders im Bereich der Werkstatt und bei der Personalschulung mitzubetrachten. Wie auch bei Arbeiten an konventionellen Bussen ist vor Beginn der Arbeiten eine Gefährdungsbeurteilung durchzuführen und entsprechend umzusetzen.

A.3.1. Personalqualifikation

Generell sind Arbeiten an BZ-Bussen vergleichbar mit denen an konventionellen Bussen. Um den potenziellen Gefahren von Hochvolt und Wasserstoff zu begegnen, sind für Arbeiten an HV-Komponenten oder am Wasserstoffsystem angemessene Sicherheitsvorkehrungen zu treffen. Hierfür müssen die Mitarbeiter qualifiziert sein oder entsprechend geschult werden.

Der Schulungsumfang richtet sich nach den persönlichen Vorkenntnissen und dem jeweiligen Arbeitsbereich der Fachkräfte. Schulungen sind mit relativ geringen Kosten verbunden und stellen keine besondere Hürde auf dem Weg zu einer Elektrobusflotte dar. Tabelle 7-3 sowie Tabelle 7-4 veranschaulichen den anfallenden Zeit- bzw. Kostenaufwand für die benötigten Schulungen.

Tabelle 7-3 Schulungsumfang für Arbeiten am HV-System



Schulungsumfang für Arbeiten am HV-System 			
Quelle: www.emcel.com CC-BY-SA			
Tätigkeit	Zeit (Je nach Aufgabe und Vorkenntnissen)	Kosten (pro Person)	Mögliche Anbieter
S Bedienen: Sensibilisierung im Umgang von Fahrzeugen mit E-Antrieb, z.B. Fahren, Reinigen	0,1 bis 0,2 Tage	ca. 100 €	Interne Schulung oder Sachverständige
1S Allgemeine Arbeiten: konventionelle Arbeiten, z.B. Rädertausch, mechanische Tätigkeiten, 24V-System	0,5 bis 1 Tag	100 - 300 €	Interne Schulung, Hersteller oder Sachverständige
2S Arbeiten an HV-Systemen: Arbeiten im spannungsfreien Zustand, z.B. „Orange Komponenten“ tauschen	2 bis 12 Tage	500 - 4.000 €	Innungen, Hersteller oder Sachverständige
3S Arbeiten unter Spannung: im spannungsführenden Zustand, z.B. Fehlerdiagnose, offene HV-Batterie	3 bis 15 Tage	1.000 - 6.000 €	Innungen, Hersteller oder Sachverständige

Tabelle 7-4 Schulungsarbeiten für Arbeiten am H₂-System

Schulungsumfang für Arbeiten am H ₂ -System 			
Quelle: www.emcel.com CC-BY-SA			
Tätigkeit	Zeit (Je nach Aufgabe und Vorkenntnissen)	Kosten	Mögliche Anbieter
S Bedienen: Sensibilisierung im Umgang von Fahrzeugen mit Gas-Antrieb, z.B. Fahren, Reinigen	0,1 bis 0,2 Tage	ca. 100 €	Interne Schulung, oder Sachverständige
1S Allgemeine Arbeiten: konventionelle Arbeiten, z.B. Rädertausch, mechanische Tätigkeiten, 24V-System	0,25 bis 1 Tag	500 - 3.000 €	Interne Schulung, Hersteller oder Sachverständige
2S Arbeiten am Gassystem: (GAP) Arbeiten am bestehenden Gassystem z.B. gasführende Komponenten tauschen	1 bis 5 Tage	500 - 3.000 €	Innungen, Hersteller oder Sachverständige
3S Nachrüsten von Gassystemen: (GSP) Verändern des Gassystems, z.B. Einbau von Gasanlagen oder anderen Komponenten	4 bis 10 Tage	1.300 - 6.000 €	Innungen, Hersteller oder Sachverständige


A.3.2. Werkstatt

Aufgrund der Unterschiede der Technologien verglichen mit konventionellen Fahrzeugen ist üblicherweise eine Anpassung der Werkstatt nötig. Diese Anpassung ist abhängig von den bereits vorhandenen Randbedingungen, von der gewählten Technologie sowie vom Umfang der Arbeiten, die an den Fahrzeugen durchgeführt werden sollen.

Anpassungsbedarf bei HV-Komponenten

Für die Arbeiten an HV-Komponenten ist es sinnvoll, einen gesonderten Arbeitsbereich einzurichten. In diesem Bereich können die Fehlerdiagnose und die Reparatur der Komponenten durch qualifiziertes Personal stattfinden. Die anfallenden Investitionskosten variieren mit dem Umfang der Aufgaben, welche von der Werkstatt durchgeführt werden sollen. Tabelle 7-5 veranschaulicht die möglichen Anpassungen mit den daraus resultierenden Mehrkosten.

Tabelle 7-5 Anpassungsbedarf der Werkstatt für Hochvolt-Arbeiten

Anpassungsbedarf Werkstatt Depot für Hochvolt 			
Tätigkeit	Bereich	Anpassung	Kosten
A > Reinigung > Allgemeine mechanische und elektrische (24V-System) Arbeiten am Nicht-HV-System	Konventionelle Werkstatt	Keine Anpassung notwendig	> 0 t€
B > Wartung und Reparatur am HV-System Fahrzeug	HV-Werkstatt	> ggf. Kran > ggf. Hocharbeitsplatz	> 5 bis 100 t€ > 10 bis 150 t€
C > Wartung und Reparatur an HV-Komponenten	HV-Komponenten Werkstatt/Bereich	> ggf. Kran	> 5 bis 30 t€

Quelle: www.emcel.com CC-BY-SA

Anpassungsbedarf bei Wasserstoffsystemen

Auch im Bereich Wasserstoff wird nach den durchzuführenden Arbeiten unterschieden. Werden Arbeiten am konventionellen Fahrzeugteil durchgeführt, brauchen gegebenenfalls keine besonderen technischen Maßnahmen umgesetzt zu werden. Für Arbeiten am Wasserstoffsystem werden üblicherweise Arbeitsbereiche für Wasserstoff ertüchtigt. Zur Ermittlung der spezifischen Maßnahmen ist eine Gefährdungsbeurteilung durchzuführen. Eine Übersicht über die Tätigkeiten und entsprechenden Kosten der Anpassungen ist in Tabelle 7-6 dargestellt.

Tabelle 7-6 Anpassungsbedarf der Werkstatt für BZ-Busse

Anpassungsbedarf Werkstatt Depot für Wasserstoff			
<small>Quelle: www.emcel.com CC-BY-SA</small>			
Tätigkeit	Bereich	Anpassung	Kosten
A <ul style="list-style-type: none"> > Reinigung > Allgemeine mechanische und elektrische (24V-System) Arbeiten am Nicht-H2-System > Abstellen 	<ul style="list-style-type: none"> > Konventionelle Werkstatt > Abstellbereich 	<ul style="list-style-type: none"> > Keine Anpassung notwendig > ggf. H2-Sensoren 	<ul style="list-style-type: none"> > 0 t€ > 5 bis 20 t€
B <ul style="list-style-type: none"> > Wartung und Reparatur am Wasserstoffsystem: Tanksystem und Brennstoffzelle 	<ul style="list-style-type: none"> H2-Werkstatt 	<ul style="list-style-type: none"> > H2 Sensoren gekoppelt mit Lüftungssystem > ggf. Abblaseleitung, > ggf. Potentialausgleich > ggf. Hocharbeitsplatz 	<ul style="list-style-type: none"> > 5 bis 40 t€ > 5 bis 15 t€ > 1 bis 5 t€ > 10 bis 150 t€
C <ul style="list-style-type: none"> > ggf. Wasserstofftanks spülen 	<ul style="list-style-type: none"> H2-Werkstatt / Außenbereich 	<ul style="list-style-type: none"> > Abblaseeinrichtung 	<ul style="list-style-type: none"> > 5 bis 10 t€

Werkstattausrüstung und Werkzeug

Zur Ermöglichung eines sicheren Betriebs sind neben Schulungen weitere Ertüchtigungsmaßnahmen zu ergreifen, z.B. die vollständige Ausrüstung der Werkstatt und die Bereitstellung funktionstüchtiger Werkzeuge. Zur Ertüchtigung der Werkstatt gehören zu einer sicherheitstechnischen Maßnahmen wie die Installation einer zuverlässigen Lüftungsanlage und Wasserstoffdetektoren, zum anderen müssen Werkzeug und sonstige Ausrüstung verfügbar sein. Die Grundausstattung einer konventionellen Buswerkstatt bietet eine gute Basis, muss allerdings adäquat erweitert werden. Tendenziell befinden sich bei Brennstoffzellenbussen mehr Komponenten auf dem Busdach als bei Dieselfahrzeugen. Daher sind entsprechende Hocharbeitsplätze oder dergleichen hilfreich, wenn nicht erforderlich. Darüber hinaus müssen besondere Vorkehrungen getroffen werden, um die Sicherheit bei Arbeiten am Hochvoltsystem zu gewährleisten. Für die Arbeit am HV- und H₂-System sind geeignete Spezialwerkzeuge notwendig. Wegen der Gefahren, die von den Arbeiten an Hochvolt- und Wasserstoffsystemen ausgehen können, ist eine vollständige Ausstattung von großer Bedeutung. In Tabelle 7-7 ist eine Übersicht über das benötigte Werkzeug aufgelistet. Darüber hinaus ist die Erfassung der bestehenden Werkzeuge wichtig, um mögliche Gefahrenquellen frühzeitig identifizieren und minimieren zu können.

Als zusätzliche Orientierung empfiehlt sich der Austausch mit den Busherstellern, den Komponenten- und Systemherstellern und mit anderen Werkstätten, die bereits Erfahrungen in diesen Bereichen gemacht haben.

Tabelle 7-7 Benötigte Werkstattausstattung

Werkzeugart	Beschreibung
Ortsfeste Betriebsmittel	Dacharbeitsstand
	Hebevorrichtung
	Potenzialausgleichskabel
	Abgasabsauganlage
	H ₂ -Sensoren
	Sicherheitssystem zur Minimierung der Explosionsgefahr
Nicht ortsfeste Betriebsmittel	Isolierte HV-Werkzeuge
	HV-Messgerät
	Spezielle Handwerkzeuge (nach Herstellervorgabe)
	Angemessene Sicherheitskleidung

A.4. Hilfreiche Dokumente

A.4.1. Spezielle Dokumente über HV- und Wasserstoff-Fahrzeuge:

„Fahrzeug-Instandhaltung“ (BGR 157)

„Wasserstoffsicherheit in Werkstätten“ (DGUV Information 209-072)

„Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltssystemen“ (BGI/GUV-I 8686)

A.4.2. Allgemeine Dokumente zum Arbeitsschutz:

Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV)

Technische Regeln für Betriebssicherheit (TRBS)

Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO)

„Elektrische Anlagen und Betriebsmittel“ (BGV/GUV-V A3)

„Grundsätze der Prävention“ (BGV/GUV-V A1)

A.4.3. EU-Richtlinien

Richtlinie 2009/33/EG des Europäischen Parlaments und des Rates

Richtlinie 2014/94/EU des Europäischen Parlaments und des Rates

A.5. Übersicht der E-Bushersteller

A.5.1. Übersicht Batteriebusse

Tabelle 7-8: Batterie-Bushersteller – 12 m Solobus

Hersteller E-Bus	Batteriekapazität [kWh]	Reichweite [km]	Gesamt (Sitz-/Stehplatz)	Bestellbar ab
BYD	ca. 500	> 600	ca. 91 (31/60)	sofort
Ceetano	ca. 422	> 350	87 (39/-)	sofort
Daimler Buses	ca. 588	> 320	88 (-/-)	sofort
Ebusco	ca. 500	> 700	ca. 95 (-/-)	sofort
IVECO	ca. 458	> 400	ca. 95 (-/-)	sofort
MAN	ca. 480	> 350	ca. 88 (37/51)	sofort
Quantron AG	ca. 422	> 450	ca. 95 (36/59)	sofort
Wrightbus	ca. 567	> 500	ca. 88 (45/43)	sofort

Tabelle 7-9: Batterie-Bushersteller – 18 m Gelenkbus

Hersteller E-Bus	Batteriekapazität [kWh]	Reichweite [km]	Gesamt (Sitz-/Stehplatz)	Bestellbar ab
BYD	ca. 511	> 420	ca. 140 (-/-)	sofort
Daimler/EvoBus	ca. 686	> 320	ca. 146 (-/-)	sofort
Ebusco	ca. 525	> 350	ca. 130 (55/75)	sofort
MAN	ca. 640	> 350	ca. 120 (60/60)	sofort
Solaris	ca. 800	> 600	ca. 139 (57/82)	sofort
VDL	ca. 674	k.A.	ca. 153 (-/-)	sofort
Volvo	ca. 470	k.A.	ca. 150 (50/100)	sofort

A.5.2. Übersicht BZ-Bushersteller

Tabelle 7-10: BZ-Bushersteller – 12 m Solobus

Hersteller BZ-Bus	Tankkapazität [kg]	Reichweite* [km]	Gesamt (Sitz-/Stehplatz)	Bestellbar ab
Arthur Bus	37,5	>325	ca. 78 (32/46)	Sofort
Caetano Bus	37,5	> 325	ca. 87 (37/39)	Sofort
Daimler/EvoBus	35	>300	ca. 76 (26/50)	Sofort
Iveco	31,2	>325	- (-/-)	2024
Safra	35	>325	- (33/-)	Sofort
Solaris	36,8	>325	ca. 74-78 (37+4/40)	Sofort
Van Hool	38,5	> 325	ca. 82 (34/48)	Sofort
Wrightbus	32, 40 oder 50	>325	ca. 88 (/)	Sofort

Tabelle 7-11: BZ-Bushersteller – 18 m Gelenkbus

Hersteller BZ-Bus	Tankkapazität [kg]	Reichweite* [km]	Gesamt (Sitzplatz/ Stehplatz)	Bestellbar ab
Caetano	-	>325	ca. 120	ab 2024
Daimler/EvoBus	25	>300	ca. 126 (-/-)	sofort
Solaris	51,2	>325	ca. 140 (38/102)	sofort
Van Hool	48	> 350	-	ab 2025

Lieferzeit BZ-Bus: 12-18 Monate (Dieselbus 8-12 Monate)

*Sicher Reichweite über alle Jahreszeiten

A.6. Standortsspezifische technische Analyse

Im folgenden Abschnitt findet sich die technische Analyse für den Regionalverkehr, getrennt nach Standorten. Es werden dabei jeweils die standortspezifischen Analysen der Umlauflängen und des Flächenbedarfs sowie die wichtigsten technischen und wirtschaftlichen Ergebnisse in Form einer Bewertungsmatrix zusammengefasst.

A.6.1. Grevesmühlen

Analyse der Umlauflängen

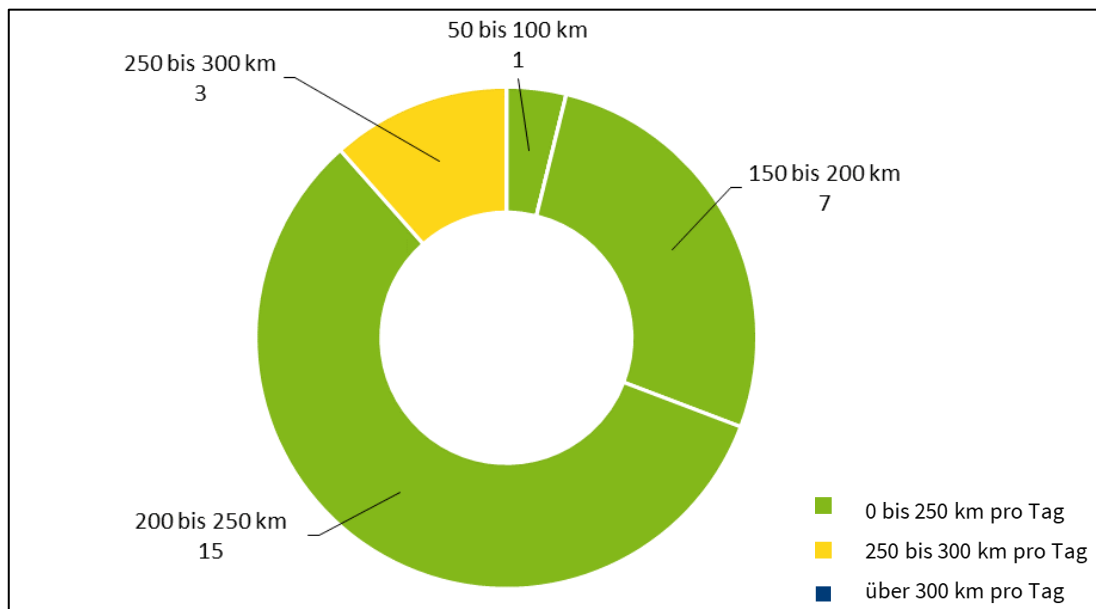


Abbildung 7-6: Analyse der Umlauflängen im Standort Grevesmühlen

Analyse des Flächenbedarfs

Tabelle 7-12: Analyse des Flächenbedarfs im Standort Grevesmühlen

	Szenario 1.1 (100 % Depotladung, 250 km)	Szenario 1.2 (100 % Depotladung, 300 km)	Szenario 2 (100 % Brennstoffzelle)
Flächenbedarf Infrastruktur	170 – 340 m ²	170 – 340 m ²	450 – 650 m ²
Flächenbedarf Zusatzfahrzeuge	50 – 360 m ²	100 – 240 m ²	0 – 120 m ²
Flächenbedarf Infrastruktur für Zusatzfahrzeuge	5 – 75 m ²	10 – 50 m ²	-
Summe Flächenbedarf	225 – 775 m²	280 – 620 m²	450 – 770 m²
Potenzielle Zusatzflächen			
Bewertung Fläche (bezogen auf 100 %)	Fläche nicht ausreichend	Fläche nicht ausreichend	Fläche nicht ausreichend

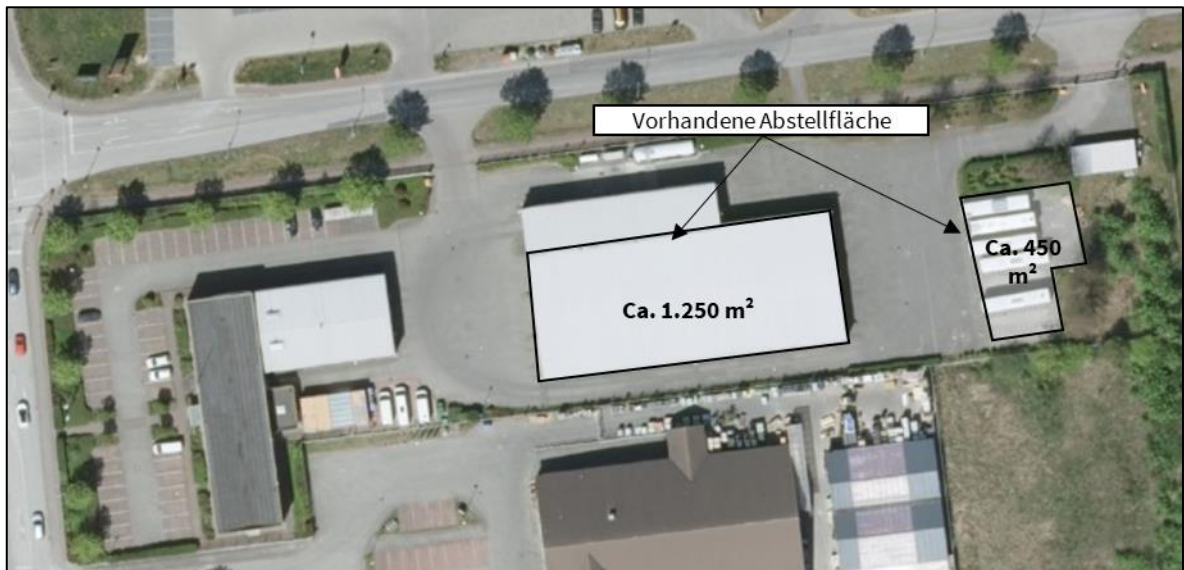


Abbildung 7-7: Kartenausschnitt der vorhandenen Abstellflächen am Standort Grevesmühlen

Für die ersten batterieelektrischen Fahrzeuge ist das Betriebshofgelände in Grevesmühlen ausreichend. Langfristig ist jedoch davon auszugehen, dass für eine vollständige Umstellung neue Flächen, wie z.B. benachbarte Brachflächen, benötigt werden. Die Errichtung einer H₂-Tankstelle auf dem Betriebshof ist nicht realisierbar. Eine mögliche Lösung wäre die Nutzung einer

Betriebstankstelle im Einsatzgebiet. Eine Umstellung auf BZ-Busse wäre ohne zusätzliche Anmietung von Flächen möglich, jedoch nur unter der Voraussetzung, dass eine separate und keine eigene H₂-Infrastruktur vorhanden ist.

Bewertungsmatrix

Tabelle 7-13: Bewertungsmatrix des Standorts Grevesmühlen

	Szenario 1.1 (100 % Bat., 250 km)	Szenario 1.2 (100 % Bat., 300 km)	Szenario 2 (Brennstoffzelle)
Aufwand Betriebsumstellung	3 Dienste länger als 250 km Keine Zusatzbusse mit Zwischenladungen im Betriebshof/ 2 – 3 Zusatzbusse ohne Zwischenladung Dienst-/ Umlaufplanung erforderlich Fahrgastkapazität: ca. 1 – 3 GL/ Zusatzbusse erforderlich	keine Zusatzbusse aus technischer / betrieblicher Sicht Fahrgastkapazität: ca. 2 – 4 GL/ Zusatzbusse erforderlich	keine Zusatzbusse aus technischer/ betrieblicher Sicht Fahrgastkapazität: ca. 0 – 2 GL/ Zusatzbusse erforderlich
Aufwand Infrastruktur	Platzbedarf für zusätzliche Busse und Ladeinfrastruktur auf Betriebshof voraussichtlich langfristig nicht gegeben. „Entlastung“ über neuen Standort in Wismar denkbar (Leerfahrten berücksichtigen) Anschlussleistung: max. 1,4 MVA <i>(Netzbetreiber Stadtwerke Grevesmühlen GmbH angefragt – Rückmeldung steht noch aus)</i> Ladeleistung: mind. 50 kW pro Bus	Platzbedarf für zusätzliche Busse und Ladeinfrastruktur auf Betriebshof voraussichtlich langfristig nicht gegeben. „Entlastung“ über neuen Standort in Wismar denkbar (Leerfahrten berücksichtigen) Anschlussleistung max. 1,25 MVA <i>(Netzbetreiber Stadtwerke Grevesmühlen GmbH angefragt – Rückmeldung steht noch aus)</i> Ladeleistung: mind. 50 kW pro Bus	H ₂ -Tankstelle notwendig, Betreiber-tankstelle denkbar. Flächenbedarf für eigene H ₂ -Tankstelle auf dem Betriebshof nicht ausreichend Synergien mit anderen Standorten denkbar Erforderlicher H ₂ -Bedarf: ca. 500 – 600 kg _{H₂} /Tag <i>(in Verbindung mit Klütz und Schönberg)</i> Bedarf an kostengünstigen H ₂ -Quellen
Emissionen	Keine lokalen Emissionen	Keine lokalen Emissionen	Keine lokalen Emissionen
Kosten	Jährliche Mehrkosten in Abhängigkeit von der Förderung bei + 15 % bis + 30 %	Jährliche Mehrkosten in Abhängigkeit von der Förderung bei + 10 % bis + 25 %	Jährliche Mehrkosten in Abhängigkeit von der Förderung bei + 10 % bis + 25 %

A.6.2. Gadebusch

Analyse der Umlauflängen

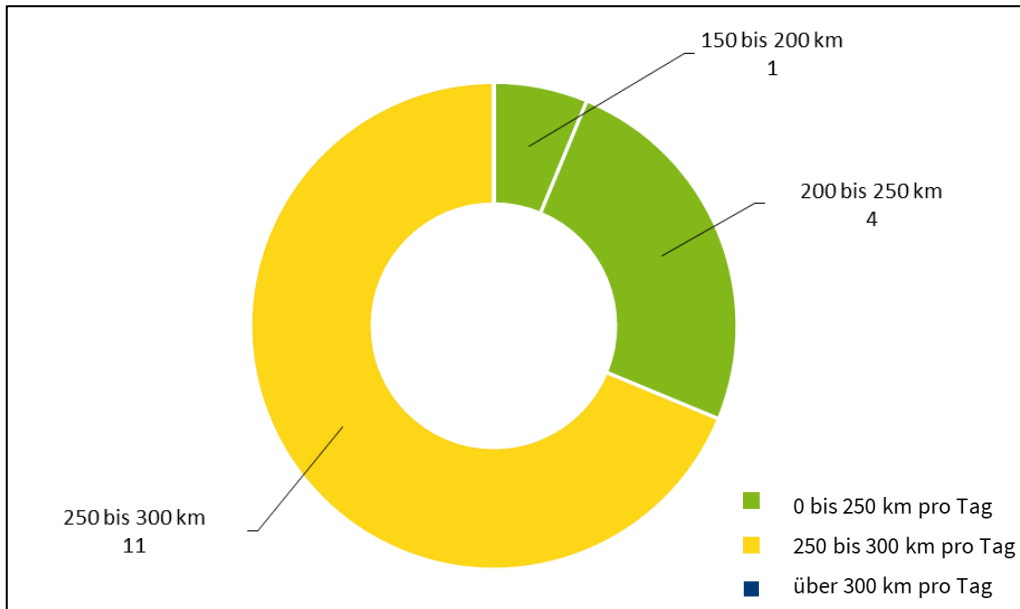


Abbildung 7-8: Analyse der Umlauflängen im Standort Gadebusch

Analyse des Flächenbedarfs

Tabelle 7-14: Analyse des Flächenbedarfs im Standort Gadebusch

	Szenario 1.1 (100 % Depotladung, 250 km)	Szenario 1.2 (100 % Depotladung, 300 km)	Szenario 2 (100 % Brennstoffzelle)
Flächenbedarf Infrastruktur	120 – 240 m ²	120 – 240 m ²	375 – 500 m ²
Flächenbedarf Zusatzfahrzeuge	50 – 360 m ²	100 – 240 m ²	0 – 120 m ²
Flächenbedarf Infrastruktur für Zusatzfahrzeuge	5 – 75 m ²	10 – 50 m ²	-
Summe Flächenbedarf	175 – 675 m²	250 – 520 m²	375 – 620 m²
Potenzielle Zusatzflächen			
Bewertung Fläche (bezogen auf 100 %)	Fläche nicht ausreichend	Fläche nicht ausreichend	Fläche nicht ausreichend



Abbildung 7-9: Kartenausschnitt der vorhandenen Abstellflächen am Standort Gadebusch

Für die Einführung der ersten batterieelektrischen Fahrzeuge ist der Flächenbedarf am Betriebshof Gadebusch ausreichend. Langfristig werden bei einer vollständigen Umstellung voraussichtlich neue Flächen benötigt. Eine Errichtung einer H₂-Tankstelle ist am Betriebshof nicht möglich. Eine mögliche Lösung wäre die Nutzung einer Betreibertankstelle im Einsatzgebiet. Eine Umstellung auf BZ-Busse wäre ohne die Anmietung zusätzlicher Flächen und ohne den Aufbau einer eigenen H₂-Infrastruktur möglich.

Bewertungsmatrix

Tabelle 7-15: Bewertungsmatrix des Standorts Gadebusch

	Szenario 1.1 (100 % Bat., 250 km)	Szenario 1.2 (100 % Bat., 300 km)	Szenario 2 (Brennstoffzelle)
Aufwand Betriebsumstellung	11 Dienste länger als 250 km Keine Zusatzbusse mit Zwischenladung im Betriebshof/ mind. 3 Zusatzbusse ohne Zwischenladung Dienst-/ Umlaufplanung erforderlich Fahrgastkapazität: ca. 1 –3 GL/ Zusatzbusse erforderlich	keine Zusatzbusse aus technischer / betrieblicher Sicht Fahrgastkapazität: ca. 2 – 4 GL/ Zusatzbusse erforderlich	keine Zusatzbusse aus technischer/ betrieblicher Sicht Fahrgastkapazität: ca. 0 – 2 GL/ Zusatzbusse erforderlich
Aufwand Infrastruktur	Platzbedarf für zusätzliche Busse und Ladeinfrastruktur auf Betriebshof voraussichtlich langfristig nicht gegeben. „Entlastung“ über neuen Standort in Wismar denkbar (Leerfahrten berücksichtigen) Anschlussleistung: max. ca. 0,9 MVA (<i>Netzbetreiber WEMAG AG angefragt – Rückmeldung steht noch aus</i>) Ladeleistung mind. 50 kW	Platzbedarf für zusätzliche Busse und Ladeinfrastruktur auf Betriebshof voraussichtlich langfristig nicht gegeben. „Entlastung“ über neuen Standort in Wismar denkbar (Leerfahrten berücksichtigen) Anschlussleistung: max. ca. 0,8 MVA (<i>Netzbetreiber WEMAG AG angefragt – Rückmeldung steht noch aus</i>) Ladeleistung mind. 50 kW	H ₂ -Tankstelle notwendig, Betreiber-tankstelle denkbar. Flächenbedarf für eigene H ₂ -Tankstelle auf dem Betriebshof nicht ausreichend Synergien mit anderen Standorten denkbar Erforderlicher H ₂ -Bedarf: ca. 250 – 300 kg _{H₂} /Tag (in Verbindung mit Klütz und Schönberg) Bedarf an kostengünstigen H ₂ -Quellen
Emissionen	Keine lokalen Emissionen	Keine lokalen Emissionen	Keine lokalen Emissionen
Kosten	Jährliche Mehrkosten in Abhängigkeit von der Förderung bei + 20 % bis + 35 %	Jährliche Mehrkosten in Abhängigkeit von der Förderung bei + 10 % bis + 30 %	Jährliche Mehrkosten in Abhängigkeit von der Förderung bei + 10 % bis + 25 %

A.6.3. Schönberg

Analyse der Umlauflängen

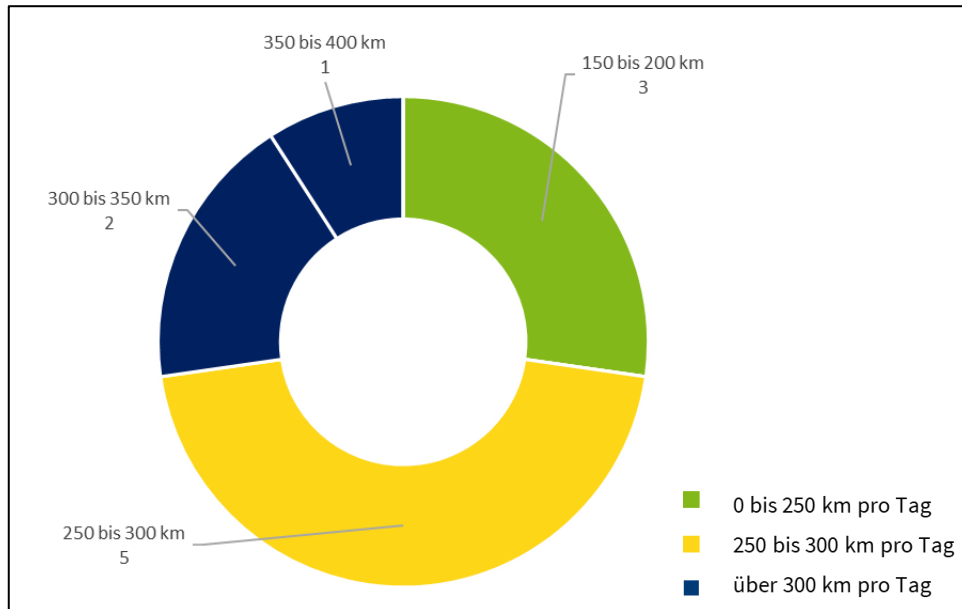


Abbildung 7-10: Analyse der Umlauflängen im Standort Schönberg

Analyse des Flächenbedarfs

Für den Standort Schönberg werden derzeit neue Grundstücksflächen für 10 Busse (2 Solo- und 8 Gelenkbusse) gesucht. Eine eigene H₂-Infrastruktur am Standort ist aufgrund der geringen Fahrzeuganzahl nicht empfehlenswert. Der benötigte Flächenbedarf für das Grundstück beträgt:

- › Ca. 650 – 750 m² für die Aufstellung der Busse (reine Parkfläche) und
- › Ca. 65 – 150 m² für die Ladeinfrastruktur (bei einer Umstellung auf Batteriebusse).

Zusätzlich sind Flächen für Rangier- und Schleppkurven, Fahrstraßen, Ein- und Ausfahrten sowie Büro- und Sozialgebäude etc. erforderlich.

Bei einer Einplanung notwendiger Ladeinfrastrukturen in der Grundstückssuche kann eine batterieelektrische Umstellung erfolgen.

Bewertungsmatrix

Tabelle 7-16: Bewertungsmatrix des Standorts Schönberg

	Szenario 1.1 (100 % Bat., 250 km)	Szenario 1.2 (100 % Bat., 300 km)	Szenario 2 (Brennstoffzelle)
Aufwand Betriebsumstellung	Anpassungen im Betriebsablauf durch Zwischenladen der Busse auf der Strecke (ca. 100 - 450 kW), dadurch keine zusätzlichen Fahrzeuge erforderlich	Anpassungen im Betriebsablauf durch Zwischenladen der Busse auf der Strecke (ca. 100 - 450 kW), dadurch keine zusätzlichen Fahrzeuge erforderlich	keine Zusatzbusse aus technischer/ betrieblicher Sicht
Aufwand Infrastruktur	Anschlussleistung: ca. 0,7 - 2,5 MVA Ladeinfrastruktur an der Strecke erforderlich. Flächenbedarf für Ladeinfrastruktur im Depot kann bei der Planung des neuen Standortes berücksichtigt werden.	Anschlussleistung: ca. 0,7 - 2,5 MVA Ladeinfrastruktur an der Strecke erforderlich. Flächenbedarf für Ladeinfrastruktur im Depot kann bei der Planung des neuen Standortes berücksichtigt werden.	H ₂ -Tankstelle notwendig, Synergien mit Grevesmühlen oder Ihlenberger H ₂ -Hub denkbar (geringe Leerfahrten erforderlich) Bedarf an kostengünstigen H ₂ -Quellen
Emissionen	Keine lokalen Emissionen	Keine lokalen Emissionen	Keine lokalen Emissionen
Kosten	Jährliche Mehrkosten in Abhängigkeit von der Förderung bei + 15 % bis + 30 %	Jährliche Mehrkosten in Abhängigkeit von der Förderung bei + 20 % bis + 40 %	Jährliche Mehrkosten in Abhängigkeit von der Förderung bei + 10 % bis + 25 %

A.6.4. Wismar (Regionalverkehr)

Analyse der Umlauflängen

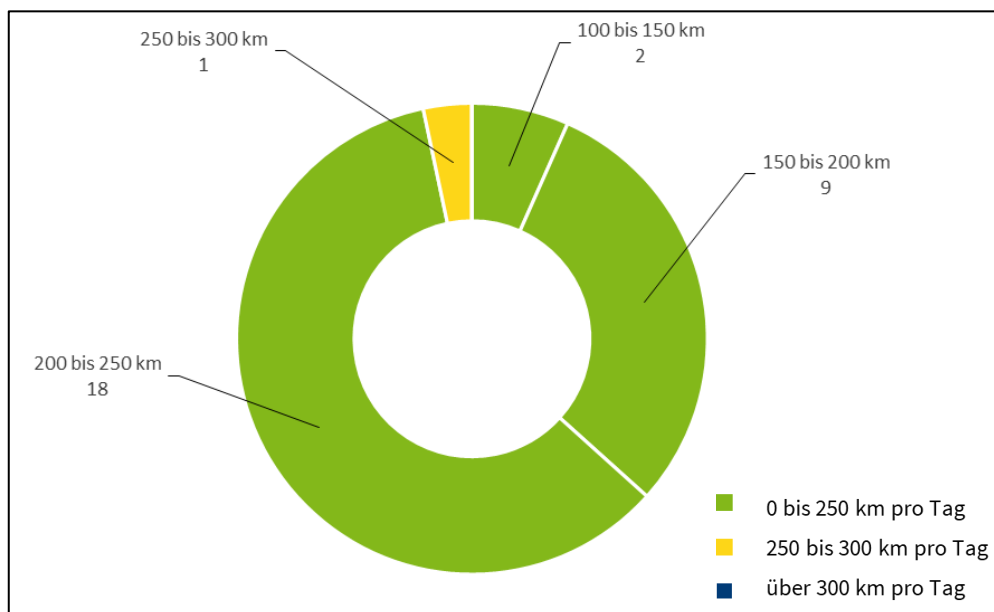


Abbildung 7-11: Analyse der Umlauflängen im Standort Wismar (RV)

Analyse des Flächenbedarfs

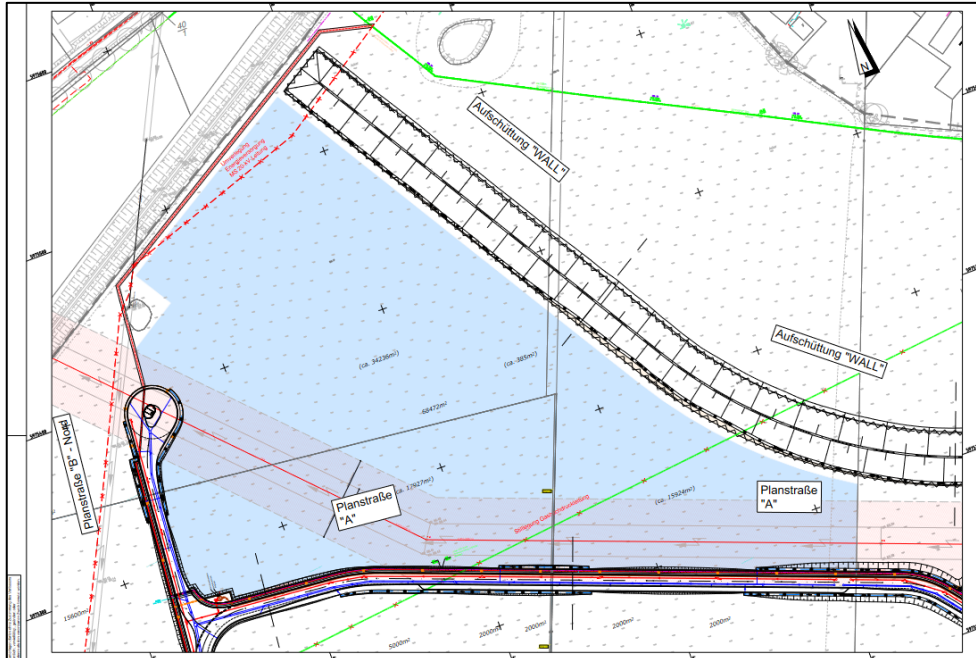


Abbildung 7-12: Kartenausschnitt des geplanten Betriebshofes in Wismar Hornstorf

Geplant ist ein neuer Betriebshof in Wismar Hornstorf mit einer Fläche von rund 68.500 m². Gemäß VDV-Schrift 822, der Richtlinie für Omnibus-Betriebshof-Planung, bietet der neue Standort Potential für mehr als 300 Busse.¹³

Die gegenwärtige Flottengröße, die im Stadt- und Regionalverkehr von Wismar eingesetzt wird, beträgt 64 Busse, darunter 59 Solobusse und 5 Gelenkbusse. Für die Abstellung der derzeitigen Busse beträgt der Flächenbedarf nach VDV ca. 15.000 m². Aus diesem Grund sind die vorhandenen Flächen, einschließlich der notwendigen Lade- oder H₂-Betankungsinfrastrukturen, ausreichend, um bis zu 12 zusätzliche Fahrzeuge (abhängig von der gewählten Technologie) zu parken.¹⁴

¹³ Annahme: 90 % Solobusse und 10 % Gelenkbusse. Dieser Wert kann bei dichter Bebauung unterschritten werden. Bei umfangreicher Grünflächenanordnung kann die Fläche jedoch auch nicht ausreichen.

¹⁴ Fläche für die Ladeinfrastruktur für ca. 80 Busse (inkl. Zusatzfahrzeuge): ca. 500 – 1.000 m². Fläche für die H₂-Tankstelle für ca. 80 Busse (inkl. Zusatzfahrzeuge): ca. 750 – 1.000 m².

Bewertungsmatrix

Tabelle 7-17: Bewertungsmatrix des Standorts Wismar (RV)

	Szenario 1.1 (100 % Bat., 250 km)	Szenario 1.2 (100 % Bat., 300 km)	Szenario 2 (Brennstoffzelle)
Aufwand Betriebsumstellung	<p>1 Dienst länger als 250 km Keine Zusatzbusse mit Zwischenladung im Betriebshof/ Bis zu 1 Zusatzbus ohne Zwischenladung Dienst-/ Umlaufplanung erforderlich</p> <p>Fahrgastkapazität: ca. 1 – 3 GL/ Zusatzbusse erforderlich</p>	<p>keine Zusatzbusse aus technischer/ betrieblicher Sicht</p> <p>Fahrgastkapazität: ca. 3 – 5 GL/ Zusatzbusse erforderlich</p>	<p>keine Zusatzbusse aus technischer/ betrieblicher Sicht</p> <p>Fahrgastkapazität: ca. 1 – 3 GL/ Zusatzbusse erforderlich</p>
Aufwand Infrastruktur	<p>Neubau – erforderliche Fläche für Mehr-/ Gelenkfahrzeuge sowie Ladeinfrastruktur kann bei Planung mitberücksichtigt werden</p> <p>Anschlussleistung: ca. 0,9 – 1,4 MVA in Abhängigkeit der Zwischenladung</p> <p>Ladeleistung mind. 50 kW</p> <p>Synergiepotenzial mit Stadtverkehr Wismar</p>	<p>Neubau – erforderliche Fläche für Mehr-/ Gelenkfahrzeuge sowie Ladeinfrastruktur kann bei Planung mitberücksichtigt werden</p> <p>Anschlussleistung: ca. 0,95 – 1,3 MVA in Abhängigkeit der Zwischenladung</p> <p>Ladeleistung mind. 50 kW</p> <p>Synergiepotenzial mit Stadtverkehr Wismar</p>	<p>H₂-Tankstelle notwendig, Betriebshoftankstelle oder Betreibermodell, ggf. öffentliche Tankstelle am Autobahnkreuz für die Flotte denkbar (Synergiepotenzial mit HyStarter Wismar)</p> <p>Wasserstoffbedarf: ca. 450 – 550 kg_{H₂}/Tag Platzbedarf: ca. 400 – 600 m², erforderliche Anschlussleistung: ca. 0,3– 0,6 MVA</p> <p>Synergiepotenzial zum Stadtverkehr Wismar Bedarf an kostengünstigen H₂-Quellen</p>
Emissionen	Keine lokalen Emissionen	Keine lokalen Emissionen	Keine lokalen Emissionen
Kosten	Jährliche Mehrkosten in Abhängigkeit von der Förderung bei + 10 % bis + 25 %	Jährliche Mehrkosten in Abhängigkeit von der Förderung bei + 10 % bis + 25 %	Jährliche Mehrkosten in Abhängigkeit von der Förderung bei + 10 % bis + 25 %

A.7. Subunternehmer

Tabelle 7-18: Bewertungsmatrix - Subunternehmer

	Szenario 1.1 (100 % Bat., 250 km)		Szenario 1.2 (100 % Bat., 300 km)		Szenario 2 (Brennstoffzelle)	
	Betrieb	Infrastruktur	Betrieb	Infrastruktur	Betrieb	Infrastruktur
Beckerts	keine Zusatzbusse aus technischer / betrieblicher Sicht	ca. 290 – 440 kVA-Anschlussleistung Platzbedarf für LiS	keine Zusatzbusse aus technischer / betrieblicher Sicht	ca. 410 – 610 kVA-Anschlussleistung Platzbedarf für LiS	keine Zusatzbusse aus technischer / betrieblicher Sicht	H ₂ -Tankstelle notwendig Synergien mit NAHBUS denkbar
Flaegel	Vier Dienste länger als 250 km, ca. ein Zusatzfahrzeug erforderlich	ca. 790 – 1.190 kVA-Anschlussleistung Platzbedarf für LiS und Zusatzfahrzeug(e)	keine Zusatzbusse aus technischer / betrieblicher Sicht	ca. 1.110 – 1.660 kVA-Anschlussleistung Platzbedarf für LiS	keine Zusatzbusse aus technischer / betrieblicher Sicht	H ₂ -Tankstelle notwendig Synergien mit NAHBUS denkbar
Krohn	keine Zusatzbusse aus technischer / betrieblicher Sicht	ca. 130 -190 kVA-Anschlussleistung Platzbedarf für LiS	keine Zusatzbusse aus technischer / betrieblicher Sicht	ca. 175 -260 kVA-Anschlussleistung Platzbedarf für LiS	keine Zusatzbusse aus technischer / betrieblicher Sicht	H ₂ -Tankstelle notwendig Synergien mit NAHBUS denkbar
Opperman	Ein Dienst länger als 250 km, ca. ein Zusatzfahrzeug erforderlich	ca. 210 – 310 kVA-Anschlussleistung Platzbedarf für LiS und Zusatzfahrzeug(e), Synergien mit Standort Klütz mögliche	keine Zusatzbusse aus technischer / betrieblicher Sicht	ca. 290 -440 kVA-Anschlussleistung Platzbedarf für LiS, Synergien mit Standort Klütz mögliche	keine Zusatzbusse aus technischer / betrieblicher Sicht	H ₂ -Tankstelle notwendig Synergien mit NAHBUS denkbar
SB-Verkehrsbetriebe	Zwei Dienste länger als 250 km, ca. ein Zusatzfahrzeug erforderlich	ca. 500 – 750 kVA-Anschlussleistung Platzbedarf für LiS und Zusatzfahrzeug(e)	keine Zusatzbusse aus technischer / betrieblicher Sicht	ca. 700 – 1.050 kVA-Anschlussleistung Platzbedarf für LiS	keine Zusatzbusse aus technischer / betrieblicher Sicht	H ₂ -Tankstelle notwendig Synergien mit NAHBUS denkbar
Taft	keine Zusatzbusse aus technischer / betrieblicher Sicht	ca. 40 -60 kVA-Anschlussleistung Platzbedarf für LiS	keine Zusatzbusse aus technischer / betrieblicher Sicht	ca. 60 – 90 kVA-Anschlussleistung Platzbedarf für LiS	keine Zusatzbusse aus technischer / betrieblicher Sicht	H ₂ -Tankstelle notwendig Synergien mit NAHBUS denkbar

A.8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Geplante CO ₂ -Reduktion im Verkehr bis 2030	12
Abbildung 2-2: Städte wie Stuttgart, Hamburg Frankfurt a.M. überschreiten regelmäßig die zulässigen NO _x -Grenzwerte.	13
Abbildung 2-3 Ein E-Bus beim Laden mittels Pantografen	14
Abbildung 2-4: Regionale Wertschöpfung Diesel- vs. Strompreis	15
Abbildung 2-5 Festgelegte Quoten für die Neubeschaffung von ÖPNV-Bussen in Deutschland	16
Abbildung 3-1: Darstellung eines E-Bus-Antriebs	17
Abbildung 3-2: Funktion des Depotladers	18
Abbildung 3-3 Funktion eines Gelegenheitsladers	20
Abbildung 3-4: Funktion des Oberleitungsbusses	21
Abbildung 3-5: Funktion des BZ-Busses	23
Abbildung 3-6: Entwicklung der E-Bus-Technologie 2018 bis 2022	24
Abbildung 3-7: Beispielhafte Verbräuche und Reichweiten für einen 12-m-Batteriebus	26
Abbildung 3-8 Vergleich der nutzbaren Abwärme, Verbrennungsmotor vs. E-Antrieb (Beispiel PKW)	27
Abbildung 3-9 Energiebilanz beim Laden und Entladen der Batterie	29
Abbildung 3-10 Abhängigkeit der Ladeleistung von Batteriegröße und Ladedauer	30
Abbildung 3-11 Lademanagement zur Verteilung ungünstiger Lasten	31
Abbildung 3-12 Top-Down-Pantograf	33
Abbildung 3-13 Bottom-Up-Pantograf	34
Abbildung 3-14 Betankung eines BZ-Busses	35
Abbildung 3-15 H ₂ -Tankstelle mit Wasserstoffanlieferung mittels LKW	36
Abbildung 3-16 H ₂ -Tankstelle mit Wasserstoffherzeugung vor Ort	37

Abbildung 3-17: Vorteile von Diesel- und E-Bussen	38
Abbildung 3-18: Typische Batteriegrößen bzw. -kapazitäten der E-Bustechnologien	40
Abbildung 3-19: Einstiegshürden der Batterie- und BZ-Bustechnologien	41
Abbildung 4-1 Gesamtnetzverkehrsplan der NAHBUS Nordwestmecklenburg GmbH	44
Abbildung 4-2: Umlauflängen in [km/Tag] - Regionalverkehr	46
Abbildung 4-3: Aufstellungskonzepte für einen Pantografen und eine Ladesäule bei Blockaufstellung	50
Abbildung 4-4: Mehrflächenbedarf für Zusatzbusse und Ladeinfrastruktur	51
Abbildung 4-5: Umlauflängen in [km/Tag] – Stadtverkehr	56
Abbildung 4-6: Geplanter Betriebshof - Gewerbegebiet Hornstorf / Wismar	58
Abbildung 4-7: Vergleich interner Erfahrungswerte mit Daten wissenschaftlicher Studien	65
Abbildung 4-8 Europäisches TEN-Verkehrsnetz (Quelle: https://ec.europa.eu/transport/infrastructure/tentec/tentec-portal/map/maps.html)	67
Abbildung 5-1: Gadebusch - prozentuale Mehrkosten im Jahr zur Referenztechnologie Diesel/Erdgas	72
Abbildung 5-2: Gadebusch - absolute Mehrkosten im Jahr zur Referenztechnologie Diesel/Erdgas	73
Abbildung 5-3: Grevesmühlen - prozentuale Mehrkosten im Jahr zur Referenztechnologie Diesel/Erdgas	73
Abbildung 5-4: Grevesmühlen - absolute Mehrkosten im Jahr zur Referenztechnologie Diesel/Erdgas	74
Abbildung 5-7: Schönberg - prozentuale Mehrkosten im Jahr zur Referenztechnologie Diesel/Erdgas	74
Abbildung 5-8: Schönberg - absolute Mehrkosten im Jahr zur Referenztechnologie Diesel/Erdgas	75

Abbildung 5-9: Wismar (Regionalverkehr) - prozentuale Mehrkosten im Jahr zur Referenztechnologie Diesel/Erdgas	75
Abbildung 5-10: Wismar (Regionalverkehr) - absolute Mehrkosten im Jahr zur Referenztechnologie Diesel/Erdgas	76
Abbildung 5-11: Wismar (Stadtverkehr) - prozentuale Mehrkosten im Jahr zur Referenztechnologie Diesel/Erdgas	76
Abbildung 5-12: Wismar (Stadtverkehr) - absolute Mehrkosten im Jahr zur Referenztechnologie Diesel/Erdgas ¹¹	77
Abbildung 7-1: Jährliche Investitionskosten über die Zeit – Mischflotte	87
Abbildung 7-2: Jährliche Kosten - Vergleich E-Busse vs. Diesel	88
Abbildung 7-3: Gesamtkostenvergleich bis 2048 - Sensitivitätsanalyse Dieselpreis	90
Abbildung 7-4: Umsetzungspfad (Mischflotte) – Beschaffungsplan	94
Abbildung 7-5: Umsetzungsplan - NAHBUS	96
Abbildung 7-6: Analyse der Umlauflängen im Standort Grevesmühlen	107
Abbildung 7-7: Kartenausschnitt der vorhandenen Abstellflächen am Standort Grevesmühlen	108
Abbildung 7-8: Analyse der Umlauflängen im Standort Gadebusch	110
Abbildung 7-9: Kartenausschnitt der vorhandenen Abstellflächen am Standort Gadebusch	111
Abbildung 7-12: Analyse der Umlauflängen im Standort Schönberg	113
Abbildung 7-13: Analyse der Umlauflängen im Standort Wismar (RV)	114
Abbildung 7-14: Kartenausschnitt des geplanten Betriebshofes in Wismar Hornstorf	115

Abbildung 7-1 Signifikante Themenfelder der neuen Technologien	97
--	----

A.9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1 Vor- und Nachteile der Top-Down- und Bottom-Up-Pantografen-Variante	34
Tabelle 3-2 Übersicht der Eigenschaften von Elektrobussen	39
Tabelle 4-1: Erforderliche Netzanschlussleistung - Je Standort	48
Tabelle 4-2: Eignung der Standorte – Flächenbedarfe (Zusammenfassung Depotladung)	52
Tabelle 4-3: Täglicher Wasserstoffbedarf und Netzanschlussleistung Wasserstofftankstelle pro Standort	54
Tabelle 4-4: Eignung der Standorte – Flächenbedarfe (Zusammenfassung Brennstoffzelle)	55
Tabelle 4-5: Flächenanalyse - neuer Betriebshof Wismar	59
Tabelle 4-6: Zusammenfassung - Analyse der Gelegenheitsladung	60
Tabelle 4-7: Benötigte Infrastrukturmaßnahmen für die Errichtung eines Oberleitungsnetzes	62
Tabelle 4-8: Täglicher Wasserstoffbedarf und Netzanschlussleistung Wasserstofftankstelle - Stadtverkehr	64
Tabelle 5-1: Standortunabhängige Annahmen - Regionalverkehr	68
Tabelle 5-2: Standortspezifische Annahmen - Regionalverkehr	69
Tabelle 5-3: Annahmen - Stadtverkehr	70
Tabelle 6-1: Bewertungsmatrix (Regionalverkehr – gesamt)	78
Tabelle 6-2: Bewertungsmatrix (Stadtverkehr – gesamt)	82
Tabelle 7-1: Beschaffungsplan der E-Busse im Zeitraum 2025 bis 2037	86
Tabelle 7-2: Jährliche Investitionskosten über die Zeit (absolut in T€) – Mischflotte	95
Tabelle 7-3 Schulungsumfang für Arbeiten am HV-System	99
Tabelle 7-4 Schulungsarbeiten für Arbeiten am H ₂ -System	99
Tabelle 7-5 Anpassungsbedarf der Werkstatt für Hochvolt-Arbeiten	100

Tabelle 7-6 Anpassungsbedarf der Werkstatt für BZ-Busse	101
Tabelle 7-7 Benötigte Werkstattausstattung	103
Tabelle 7-8: Batterie-Bushersteller – 12 m Solobus	105
Tabelle 7-9: Batterie-Bushersteller – 18 m Gelenkbus	105
Tabelle 7-10: BZ-Bushersteller – 12 m Solobus	106
Tabelle 7-11: BZ-Bushersteller – 18 m Gelenkbus	106
Tabelle 7-12: Analyse des Flächenbedarfs im Standort Grevesmühlen	108
Tabelle 7-13: Bewertungsmatrix des Standorts Grevesmühlen	109
Tabelle 7-14: Analyse des Flächenbedarfs im Standort Gadebusch	110
Tabelle 7-15: Bewertungsmatrix des Standorts Gadebusch	112
Tabelle 7-18: Bewertungsmatrix des Standorts Schönberg	114
Tabelle 7-19: Bewertungsmatrix des Standorts Wismar (RV)	116
Tabelle 7-20: Bewertungsmatrix - Subunternehmer	117
