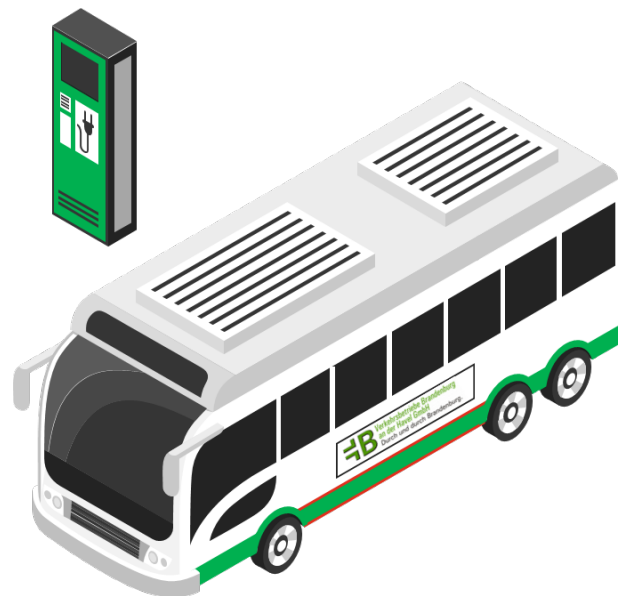


Bericht – zur Veröffentlichung

Verkehrsbetriebe Brandenburg an der Havel GmbH
Brandenburg an der Havel

Machbarkeitsstudie zur Einführung von alternativen Antrieben für
die Omnibusse bei den Verkehrsbetrieben Brandenburg an der Havel
GmbH



Auftrag: DEE00130897.1.1



Beauftragt durch:



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

Vergabe und Projektbegleitung durch:



Inhaltsverzeichnis	Seite
A. Hintergrund und Zielsetzung.....	5
I. Ausgangslage	5
II. Rechtliche Vorgaben für die Beschaffung sauberer und emissionsfreier Busse	5
1. Betroffene Fahrzeugklassen der Clean Vehicles Directive	6
2. Anwendungsbereich der Clean Vehicles Directive	7
3. Beschaffungsrelevante Vorgaben der Clean Vehicles Directive	7
III. Zielsetzung.....	10
B. Technologievergleich	12
I. Wirkungsgradkette.....	12
II. Wirtschaftlichkeit	13
III. Umweltbewertung	14
C. Untersuchungsgegenstand.....	16
I. Analyse des aktuellen Fuhrparks der VBB.....	16
II. Ableitung Beschaffungsplanung bis 2040 für die VBB.....	18
D. Verkehrlich-technische Betrachtung	19
I. Methodik Einsatz- und Infrastrukturanalyse	19
1. Umlaufuntersuchung	19
2. Umlaufverkettung.....	19
II. Einsatzanalyse.....	20
a) Einzelumlaufanalyse – Zusammenfassung.....	20
2. Einsatzpotenziale im Direktersatz	21
3. Aufwand für perspektivische Vollumstellung (erforderliche Optimierungsmaßnahmen).....	23
4. Bestimmung der neuen Fuhrparkgröße.....	23
5. Weiteres Verbesserungspotenzial.....	23
6. Technische Technologieempfehlung	24
III. Infrastrukturanalyse.....	25
1. Elektrische Ladeinfrastruktur	25
a) Lastgangoptimierung und Transformator dimensionierung.....	25

Inhaltsverzeichnis	Seite
b) Konzeptentwurf modulares Ladesystem	26
2. H ₂ -Tankinfrastruktur	31
3. Jahresenergiebedarf.....	32
4. Betriebshofintegration	33
a) Allgemeines.....	33
b) Betriebshofintegration – elektrische Ladeinfrastruktur	38
c) Betriebshofintegration – Wasserstofftankinfrastruktur	43
d) Zwischenfazit Betriebshofintegration	45
IV. Migrationspfade im Kontext unterschiedlicher Umstellungsszenarien für die VBBR.....	47
1. Umstellungsszenario 1: Vollumstellung ab 2031	48
2. Umstellungsszenario 2: Vollumstellung ab 2033	51
3. Umstellungsszenario 3: Vollumstellung ab 2029	53
E. Ökonomische Betrachtung.....	56
I. Übersicht bestehender relevanter Förderprogramme.....	56
1. Förderprogramme auf Bundesebene	56
2. Förderprogramme EU-Ebene.....	58
3. Förderung auf Landesebene	58
II. Kaufmännische Bewertung der Dekarbonisierung der Flotte der VBBR.....	58
1. Kostenbetrachtungen für eine Umstellung mit Batteriebusen.....	58
2. Kostenbetrachtungen für eine Umstellung mit Brennstoffzellenbussen	62
3. Gegenüberstellung der Antriebsarten.....	64
F. Ökologische Betrachtung.....	67
G. Betriebs- und Einsatzkonzept.....	70
I. Zusammenfassung	70
II. Umsetzungskonzept	71
III. Empfehlung für die VBBR	72

Aus rechentechnischen Gründen können in den Tabellen
Rundungsdifferenzen in Höhe von \pm einer Einheit (€, % usw.) auftreten.

A. Hintergrund und Zielsetzung

I. Ausgangslage

Die VBBR ist das führende Verkehrsunternehmen in Brandenburg an der Havel und befördert jährlich etwa 8,7 Millionen Fahrgäste. Aktuell betreibt die VBBR hauptsächlich den öffentlichen Nahverkehr in der Stadt mit zwei Straßenbahn- und 14 Buslinien. Zur Erbringung der Verkehre stehen der VBBR mit ihren rund 160 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern 22 Standardbusse und 11 Gelenkbusse zur Verfügung. Alle Busse sind dieseltrieben, wobei der Großteil der Busse (28 Fahrzeuge), die Abgasnorm EURO VI erfüllt. Die Busse legen jährlich etwa 1,9 Millionen Kilometer zurück und weisen ein Durchschnittsalter von aktuell 7,89 Jahren auf.

Die VBBR strebt danach, als innovatives Unternehmen aktiv zur Verkehrswende beizutragen, insbesondere durch den Einsatz emissionsfreier Fahrzeuge.

II. Rechtliche Vorgaben für die Beschaffung sauberer und emissionsfreier Busse

Mit der Richtlinie zur Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge (2009/33/EG) verfolgt die EU seit dem Jahr 2009 das Ziel, den Beitrag des Verkehrssektors zur Erreichung von Umwelt- und Klimazielen zu verbessern. Nach erfolgter Umsetzung in nationales Recht wurden der Bund, die Länder und Kommunen sowie öffentliche Unternehmen dazu angehalten, bei EU-weiten Vergabeverfahren zum Kauf von Fahrzeugen, die CO₂- und andere Schadstoffemissionen sowie den Kraftstoffverbrauch miteinzubeziehen.¹ Die ex-post Evaluation der Richtlinie 2009/33/EG zeigte allerdings auf, dass dieser Ansatz durch die entsprechenden Beschaffungsstellen nicht konsequent umgesetzt wurde.² Im Rahmen ihres zweiten Mobilitätspaketes legte die EU-Kommission im November 2017 einen Richtlinienvorschlag zur Überarbeitung der „Clean Vehicles Directive“ (2009/33/EG) vor, der am 18. April 2019 vom Europäischen Parlament und am 12. Juni 2019 schließlich vom Europäischen Rat verabschiedet wurde. Die aktualisierte Clean Vehicles Directive (CVD) definiert neue, verbindliche Ziele für die Beschaffung von „sauberen“ Fahrzeugen durch öffentliche Behörden und Unternehmen. Die Umsetzung der CVD erfolgte in Deutschland mit der Einführung des Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetzes (SaubFahrzeug-BeschG), welches ab dem 2. August 2021 die folgenden Aspekte der CVD geltend macht.

Hinweis: im Folgenden wird aufgrund der verbreiteten Verwendung weiterhin der Begriff Clean

¹ Vgl. Graef: Fahrzeugbeschaffungen im Anwendungsbereich der neuen Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge, S. 1.

² European Commission, Ex-post Evaluation of Directive 2009/33/EC on the promotion of clean and energy efficient road transport vehicles (2015), S. 84 ff.

Vehicles Directive verwendet. Dieser ist mit Blick auf die nationale Umsetzung in Deutschland synonym zum SaubFahrzeugBeschG zu verstehen.

1. Betroffene Fahrzeugklassen der Clean Vehicles Directive

Die neue Clean Vehicles Richtlinie gilt insgesamt für die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge der öffentlichen Hand und unterscheidet dabei verschiedene Fahrzeugklassen¹, die sich wie folgt kategorisieren lassen:

- *Fahrzeug-Kategorie 1:* leichte Nutzfahrzeuge für den Personen- und Güterverkehr der Klassen M₁ und M₂ oder N₁²,
- *Fahrzeug-Kategorie 2:* Schwere Nutzfahrzeuge für den Güterverkehr der Klassen N₂ und N₃,
- *Fahrzeug-Kategorie 3:* Schwere Nutzfahrzeuge zur Personenbeförderung (Busse) der Klasse M₃, als Fahrzeuge mit einer zulässigen Personenzahl von mehr als 22 Personen ohne den Fahrer, die so konstruiert sind, dass Bereiche für Stehplätze vorgesehen werden, um ein häufiges Ein- und Aussteigen der Fahrgäste zu ermöglichen. Hierunter fallen nur Stadtbusse (M₃ Klasse I) mit vielen Stehplätzen, wohingegen Reisebusse bzw. Überlandbusse (M₃ Klasse II) mit geringer Stehfläche nicht in den Anwendungsbereich der Clean Vehicles Richtlinie fallen. Darüber hinaus werden Fahrzeuge der M₃ Klasse A mit einer zulässigen Personenzahl von maximal 22 Personen ohne den Fahrer ebenfalls von der CVD ausgeschlossen.

Für die Busflotte der Verkehrsunternehmen ist folglich insbesondere die dritte Fahrzeug-Kategorie relevant.

¹ Grundlage ist die Verordnung (EU) 2018/858 Artikel 4 Abs. 1 lit. a) und b).

² Die Klasse M₁ umfasst Kraftfahrzeuge (Personenbeförderung) mit höchstens acht Sitzplätzen zusätzlich zum Fahrersitz und ohne Stehplätze. Zur Klasse M₂ gehören Kraftfahrzeuge (Personenbeförderung) mit mehr als acht Sitzplätzen zusätzlich zum Fahrersitz und mit einer zulässigen Gesamtmasse von maximal fünf Tonnen. Die Klasse N₁ umfasst Kraftfahrzeuge für den Güterverkehr mit einer maximalen Gesamtmasse von 3,5 Tonnen.

2. Anwendungsbereich der Clean Vehicles Directive

Der Anwendungsbereich der Richtlinie erstreckt sich auf die Beschaffung im Wege von:

- a) Verträgen über den Kauf, das Leasing, die Anmietung oder den Ratenkauf, die durch öffentliche Auftraggeber od. Auftraggeber vergeben werden, soweit sie zur Anwendung der Richtlinien 2014/24/EU und 2014/25/EU verpflichtet sind;
- b) öffentlichen Dienstleistungsaufträgen im Sinne der Verordnung (EG) Nr. 1370/2007, die die Erbringung von Personenverkehrsdienstleistungen auf der Straße über einen von den Mitgliedstaaten festzulegenden Schwellenwert hinaus zum Gegenstand haben, der den in Artikel 5 Absatz 4 jener Verordnung festgelegten Schwellenwert (geschätzter Jahresdurchschnittswert von weniger als 1.000.000 € oder eine jährliche öffentliche Personenverkehrsleistung von weniger als 300.000 km) nicht übersteigt;
- c) Dienstleistungsaufträgen über Verkehrsdienste (hierunter fallen: straßengebundener öffentlicher Verkehr, straßengebundene Personensonderbeförderung, Bedarfspersonenbeförderung, Abholung von Siedlungsabfällen sowie Post- und Paketbeförderung bzw. -zustellung), soweit die öffentlichen Auftraggeber bzw. Auftraggeber zur Anwendung der Vergabeverfahren nach den Richtlinien 2014/24/EU und 2014/25/EU verpflichtet sind.

Als öffentliche Auftraggeber gelten hierbei die Länder, Kreise, Kommunen, Zweckverbände oder AöR. Diese sind zur Anwendung der Richtlinie verpflichtet. Auch Auftraggeber, die keine öffentlichen Auftraggeber oder keine öffentlichen Unternehmen sind, aber Verkehrsleistungen auf der Grundlage von besonderen oder ausschließlichen Rechten ausüben, werden an die CVD gebunden. Konkret bedeutet dies für den Busverkehr, dass hierunter nur der Linien- und Schülerverkehr als Verkehrsleistung fällt. Klar ausgenommen sind indessen Unternehmen, die im Reise- und Fernbusverkehr tätig sind.

3. Beschaffungsrelevante Vorgaben der Clean Vehicles Directive

Mit der CVD gibt die EU-Kommission feste, länderspezifische Beschaffungsquoten vor und macht zudem Vorgaben für die einzusetzenden Antriebsarten von Bussen im straßengebundenen ÖPNV. Die bisherige Technologieoffenheit wird mit der Aktualisierung aufgegeben. Die Erfüllung der auf nationaler Ebene definierten Beschaffungsquoten bildet den Kern der CVD. Hierbei sind die jeweils gültigen Zielperioden zu berücksichtigen. Die erste Periode bezieht sich auf den Zeitraum zwischen dem Inkrafttreten der Richtlinie am 2. August 2021 bis zum 31. Dezember 2025. Die zweite Periode beginnt mit dem 1. Januar 2026 und endet mit dem 31. Dezember 2030. Es ist vorgesehen, dass innerhalb der ersten Periode in Deutschland 45 % und in der zweiten Periode mindes-

tens 65 % der Fahrzeug-Neubeschaffungen den von der EU-Kommission vorgegebenen „sauberen“ Antriebskonzepten entsprechen.

„Saubere“ ist dabei ein Bus, der mit alternativen Kraftstoffen im Sinne der Richtlinie 2014/94/EU Art. 2 Nr. 1 und 2 betrieben wird. Diese Richtlinie definiert Kraftstoffe oder Energiequellen als „alternativ“, die zumindest teilweise als Ersatz für Erdöl als Energieträger für den Verkehrssektor dienen, die zur Reduzierung der CO₂-Emissionen beitragen und die die Umweltverträglichkeit des Verkehrssektors erhöhen können. Hierzu zählen insbesondere die in der folgenden Abbildung dargestellten Energieträger.

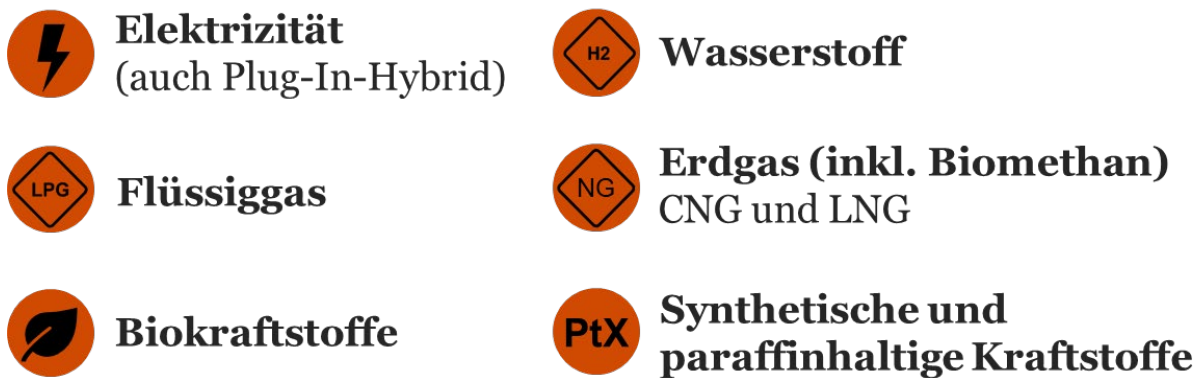


Abbildung 1: Übersicht der als „sauber“ definierten Energieträger für den Antrieb eines Busses

Nach derzeitiger Auslegung gelten insofern auch Plug-In-Hybrid-Busse (PHEV) als „sauber“, da elektrische Energie von außerhalb des Fahrzeuges zugeführt wird und die Fahrzeuge zumindest teilweise elektrisch angetrieben werden.

Die Quoten für saubere Fahrzeuge beinhalten darüber hinaus auch Vorgaben für einen Anteil von emissionsfreien Fahrzeugen hinsichtlich der Fahrzeug-Neubeschaffungen. In der ersten Periode liegt dieser Anteil bei mindestens 22,5 %. In der zweiten Periode erhöht sich die Teil-Beschaffungsquote für emissionsfreie Busse dann auf mindestens 32,5 %.

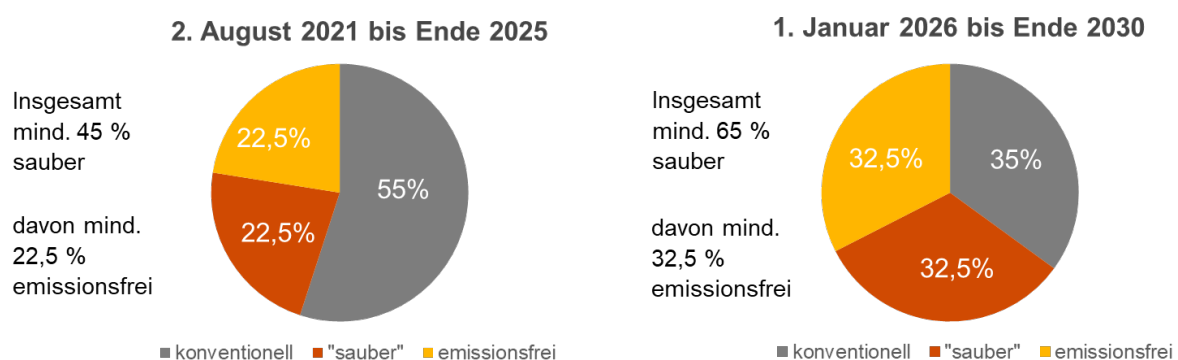


Abbildung 2: Beschaffungsquoten der CVD in den Referenzperioden

Als emissionsfrei gelten dabei Fahrzeuge ohne konventionellen Verbrennungsmotor oder mit Verbrennungsmotor, der weniger als 1 g CO₂/kWh bzw. 1 g CO₂/km emittiert. Von praktischer Bedeutung werden in diesem Sinne vor allem Busse mit batteriebetriebenen Elektromotor oder mit einem Brennstoffzellenantrieb sein. Auch Trolleybusse mit vollelektrischem Notfahr aggregat gelten als emissionsfrei, Hybrid-Busse fallen hier jedoch klar heraus. Für die Erfüllung der Quote können neben Neubeschaffungen auch Fahrzeuge in ein sauberes oder emissionsfreies Fahrzeug umgerüstet werden. Hier gilt es jedoch, die Wirtschaftlichkeit der Nachrüstung zu bewerten.

Zum 18. April 2026 und danach alle drei Jahre wird die Kommission die Umsetzung der Richtlinie überprüfen. Ein branchenweites Register auf nationaler Ebene wäre hier denkbar, welches die Beschaffungen ab Beginn der ersten Referenzperiode erfasst und abbildet. Die Mitgliedsstaaten müssen hierfür einen Bericht vorlegen, der insbesondere Informationen über die Anzahl und die Klassen der entsprechenden Fahrzeuge enthält. Bis zum 31. Dezember 2027 sieht die Kommission eine erneute Überprüfung der Richtlinie 2009/33/EG vor, die dann gegebenenfalls einen Gesetzgebungsvorschlag für eine erneute Änderung der Richtlinie für den Zeitraum nach dem Jahr 2030 bewirken wird. Hier könnte dann mit noch ehrgeizigeren Zielvorgaben zu rechnen sein.

Dennoch verbleiben Unklarheiten bei der Anwendung der CVD, die juristisch aufgeklärt werden sollten. Dies betrifft beispielsweise die unterschiedlichen Betrachtungsebenen „Aufgabenträger/öffentlicher Dienstleistungsauftrag“ und „Verkehrsunternehmen/Sektoren-auftraggeber“. Gemäß § 6 (4) SaubFahrzeugBeschG ist für die Quotenfestlegung jeweils das Datum der Bezuschlagung des jeweiligen Beschaffungsvorgangs maßgeblich. Dies ist insofern einerseits auf der Ebene „Aufgabenträger“ die Vergabe des öffentlichen Dienstleistungsauftrages, auf der Ebene des Verkehrsunternehmens (als Sektorenauftraggeber) jedoch der jeweilige Abschluss eines Beschaffungsvertrages für die jeweiligen Fahrzeuge. Zudem fällt auf dieser Ebene auch die Vergabe von Dienstleistungsaufträgen in den Regelungsbereich. Während die Betrachtung der Quotenerfüllung bei der Fahrzeugbeschaffung durch das Verkehrsunternehmen klar auf die jeweiligen Anteile der sauberen Fahrzeuge an den insgesamt beschafften Fahrzeugen in den relevanten Klassen abstellt, ist dies bei der Vergabe von (öffentlichen) Dienstleistungsaufträgen nicht eindeutig geregelt. Gemäß § 6 (6) wird für die Beurteilung der Einhaltung der Mindestziele für die Vergabe öffentlicher Aufträge die Anzahl der Straßenfahrzeuge berücksichtigt, die für die Erbringung der Dienstleistung im Rahmen des betreffenden Auftrags eingesetzt werden sollen. Hier stellt sich die Frage, wie in der Praxis eine Berechnung zu erfolgen hat, z. B. als gewichteter Durchschnitt über den gesamten Zeitraum, bereits zu Beginn oder erst am Ende der Periode. Auch stellt sich die Frage, ob die bei Bezuschlagung eines (öffentlichen) Dienstleistungsauftrages geltenden Mindestziele zumindest auf dieser Betrachtungsebene auch für die gesamte Vertragsdauer gelten. Weiterhin ist zu klären, ob die Mindestquoten durch jeden einzelnen Subunternehmervertrag, sofern dieser nach Inkrafttreten des Gesetzes geschlossen wurde, eingehalten werden müssen, oder ob eine „Verrechnung“ auf Ebene des beauftragenden Unternehmens erfolgen kann. Diese und weitere unge-

klärte bzw. strittige Praxisfragen zur CVD bedürfen noch einer abschließenden juristischen Klärung.

III. Zielsetzung

Die VBBr möchte sich als innovatives Unternehmen für die Zukunft rüsten und die Umstellung der Busflotte auf emissionsfreie, elektrifizierte Antriebe hinsichtlich des technologischen, betrieblichen und wirtschaftlichen Potenzials überprüfen.

Wie dargestellt, sind zur Einhaltung der CVD bzw. des SaubFahrzeugBeschG die öffentlichen Auftraggeber (Gemeinde, Kreis, Zweckverband, AöR) sowie die Sektorenauftraggeber (konzessionierte Verkehrsunternehmen – eigenwirtschaftlich und gemeinwirtschaftlich) verpflichtet. Subunternehmer sind mittelbar über den jeweiligen Verkehrsvertrag/öDA verpflichtet. Hierbei kommt es dann auf das konkrete Geltungsdatum des Vertrages an, also ob dieser in den Zeitraum der CVD fällt. Im Vorfeld der Veröffentlichung der Vorabkennzeichnung ist daher sowohl eine Entscheidung über den Umfang der zu erbringenden Verkehrsleistungen als auch eine Systementscheidung hinsichtlich der zukünftigen Antriebstechnologie zu treffen.

Die vorliegende Machbarkeitsstudie mit der Darstellung potenzieller Technologie- und Antriebsvarianten wurde mit der Zielsetzung entwickelt, eine fundierte und belastbare Diskussionsgrundlage für die anstehenden Systementscheidungen der VBBr zu erstellen. Dabei wird unter Berücksichtigung technischer, betrieblicher und wirtschaftlicher Aspekte eine geeignete Vorzugstechnologie bzw. ein geeigneter Technologiemix für den Untersuchungsraum identifiziert und ein technisches Grobkonzept erarbeitet. Dieses kann im Anschluss an eine zu treffende Systementscheidung, für die dann favorisierte Antriebstechnologie, umsetzungsfähig erweitert werden. Aus technischer Perspektive ist es die Zielsetzung des Projekts, aus der Vielzahl von Ausführungsvarianten eine passende Lösung vor dem Hintergrund der Ziele der VBBr zu ermitteln. Dies betrifft sowohl die Fahrzeugausführung als auch die erforderliche Infrastruktur (Betriebshof/Lade- bzw. Betankungsinfrastruktur) und etwaige erforderliche Anpassungen des Betriebskonzeptes. Da eine solch weitreichende Entscheidung große Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit eines ÖPNV-Unternehmens hat, werden hierbei zudem die damit zusammenhängenden wirtschaftlichen Auswirkungen (Investitions- und Betriebskosten) genau betrachtet. Diese wurden insbesondere auch im Vergleich zu den heutigen und zukünftigen Kostenstrukturen beim Betrieb von Dieselnissen analysiert (z. B. Anstieg der Treibstoffkosten durch CO₂-Besteuerung).

Zusammengefasst werden mit der Machbarkeitsstudie folgende Ziele adressiert:

- **Wirtschaftlichkeit:** Die finanziellen Auswirkungen der Dekarbonisierung der Busflotte sind für die verschiedenen Antriebsformen und Quotenszenarien belastbar und transparent zu ermitteln. So können diese in den Wirtschaftsplan der VBB eingearbeitet werden (insbesondere zusätzlicher Zuschuss- und Finanzierungsbedarf).
- **Migrationspfad Flotte und Infrastruktur:** Die infrastrukturellen Anpassungserfordernisse der jeweiligen Antriebstechnologien sind ausführlich darzustellen und zu beschreiben. Hierbei werden sinnvolle Empfehlungen für mögliche Ausbaustufen in Abhängigkeit des Migrationspfades gegeben. Dies steht in engem Zusammenhang mit einer entsprechend zielführend angepassten Busbeschaffungsplanung.
- **Förderkulisse:** Die für die jeweiligen Antriebsformen zur Verfügung stehenden Förderquellen auf den verschiedenen Ebenen (Bund, Land und ggf. weitere) werden ermittelt und aufbereitet.
- **Transparente Entscheidungsgrundlagen:** Die Ergebnisse der Machbarkeitsstudie sind in zielgruppengerechte und aussagekräftige Informations- und Entscheidungsvorlagen überführt worden.

Die Ergebnisse der Machbarkeitsstudie werden nachfolgend strukturiert nach den folgenden Kapiteln dargestellt:

- A. Hintergrund und Zielsetzung
- B. Technologische Grundlagen
- C. Energiezuführung
- D. Technologievergleich
- E. Untersuchungsgegenstand
- F. Verkehrlich-technische Betrachtung
- G. Ökonomische Betrachtung
- H. Ökologische Betrachtung
- I. Betriebs- und Einsatzkonzept

sowie um eine Zusammenfassung und einen Ausblick auf die nächsten Schritte ergänzt.

B. Technologievergleich

I. Wirkungsgradkette

Wasserstoff als Energieträger für Mobilität wird unter Fachleuten stellenweise gemischt betrachtet, da der Gesamtwirkungsgrad relativ klein ist. Die Herstellung von Wasserstoff wird derzeit mit einem energetischen Wirkungsgrad von ca. 70 % beziffert. Bei Berücksichtigung der Wirkungsgrade für Transport, Brennstoffzelle, Antrieb und ähnliches, ergibt sich ein Gesamtwirkungsgrad von 24 bis 29 % (Basis ist sog. grüner Strom). Dem gegenüber steht ein Gesamtwirkungsgrad für batterieelektrische Fahrzeuge von 57 bis 63 %.

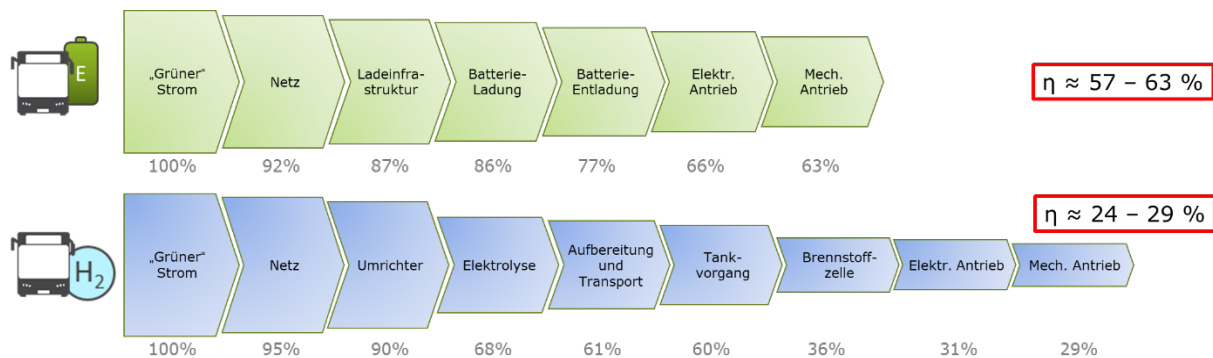


Abbildung 3: Wirkungsgradverkettung Batterie- und Brennstoffzellenbus

Eine wirtschaftliche Produktion von Wasserstoff setzt in diesem Kontext einen Überschuss an elektrischer Energie voraus. Eine mögliche Anwendung ist die Wasserstoffproduktion für erneuerbare Energiekraftwerke, wenn die erzeugte Energie nicht ins Verteilnetz eingespeist werden kann. Dies hat zusätzlich den Vorteil, dass der Wasserstoff emissionsfrei gewonnen wird.

Darüber hinaus entsteht Wasserstoff als Nebenprodukt in der chemischen Industrie (bspw. Chlorid-Produktion). Dieser wird in diversen Anwendungen bereits als Energieträger für Mobilitätsanwendungen genutzt, wie beispielsweise im Großraum Hürth bei Köln. Jedoch sind die Mengen an Wasserstoff als Überschussprodukt nicht ausreichend, um einen flächendeckenden Einsatz von H₂-Bussen zu bedienen.

Häufig werden sehr optimistische Kostenprognosen für Wasserstoff als Kraftstoff beobachtet. Diese Werte sind im Kontext der Produktionsmöglichkeiten kritisch zu hinterfragen. Viele Kostenmodelle basieren auf einem sehr günstigen Strombezug (Überschussmengen aus erneuerbarer Energieerzeugung). Es ist zu hinterfragen, ob diese Überschussmengen mit Hinblick auf bessere

und günstigere Batteriespeicher (Regelenergiespeicher) und einer besseren Energieverteilung tatsächlich existent sein werden.

II. Wirtschaftlichkeit

Zwischen den betrachteten Technologien existieren signifikante Abweichungen zwischen

- den Anschaffungskosten für Fahrzeuge,
- den Kosten für Lade- und Betankungsinfrastruktur und
- den Energiekosten und weiteren Betriebskosten.

Die Anschaffungskosten für Fahrzeuge unterscheiden sich insbesondere im Vergleich zum Dieselszenario signifikant. Die damit einhergehenden höheren Abschreibungen steigern die laufenden Kosten signifikant.

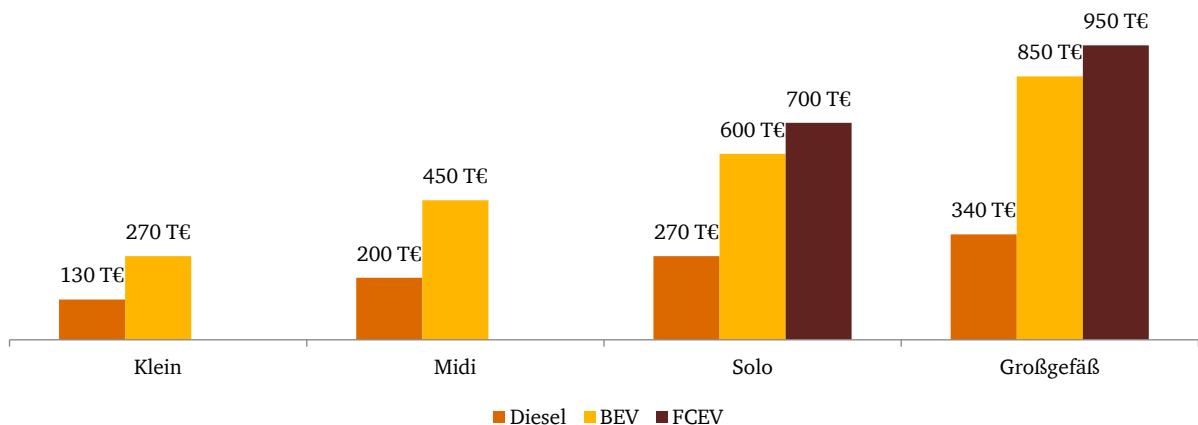


Abbildung 4: Anschaffungskosten für Fahrzeuge im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Investitionskosten für Lade- und Betankungsinfrastruktur stellen einen weiteren Kostentreiber dar. Diese fallen exklusiv bei dem BEV- und dem FCEV-Szenario an.

Bei der Ladeinfrastruktur wird von durchschnittlichen Kosten von 85.000 € für die Anschaffung und 8.500 € für die Bauplanung und Begleitung je Ladepunkt ausgegangen. Ergänzend werden Kosten i. H. v. 15.000 € p.a. für Wartung in Instandhaltung der Ladeinfrastruktur angesetzt.

Die Betankungsinfrastruktur wird mit 3,8 Mio. € je Wasserstofftankstelle angesetzt. Diese kann im Durchschnitt 20 bis 30 Fahrzeuge versorgen. Daher kann in Bezug auf die Umstellung der Versorgungsinfrastruktur bei BEV-Szenario ein genauerer Ansatz verfolgt werden, wohingegen bei der Umstellung auf FCEV direkt eine signifikante Investition in die Infrastruktur vorgenommen werden müsste.

Um eine wirtschaftliche Umstellung im BEV- oder FCEV-Szenario realisieren zu können, müssten die Kosten für Treibkraft die Investitionsmehrkosten durch die Anschaffungskosten für Fahrzeuge und Lade- und Betankungsinfrastruktur mittelfristig kompensieren. Hierbei wurde für das Jahr 2025 nachfolgende Treibkraftkosten angesetzt:

- Diesel: 1,25 €/l
- Strom: 0,26 €/l
- Wasserstoff: 8,22 €/kg

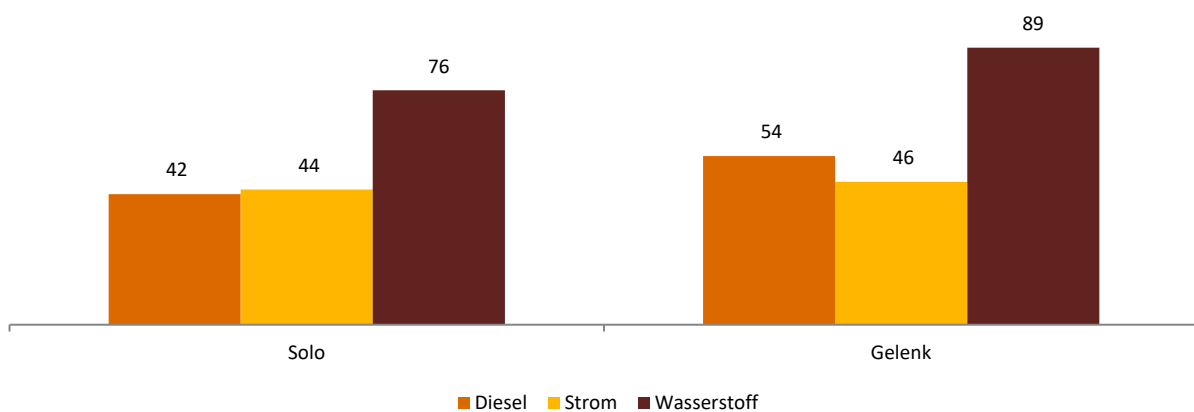


Abbildung 5: Treibkraftkosten auf 100 km je Szenario in Euro

Die Auswertung zeigt, dass lediglich das BEV-Szenario in Bezug auf die Treibkraft kostengünstiger ausfällt.

III. Umweltbewertung

Die Umweltbewertung erfolgt nachfolgend auf Grundlage des CO₂-Ausstoßes pro 100 km eines Solobusses mit der jeweiligen Antriebsart. Für Diesel wird ein CO₂-Ausstoß von 2,65 kg CO₂/l angesetzt. Bei einem durchschnittlichen Verbrauch von 33,8 l/100 km ergibt sich ein CO₂-Ausstoß von 89,6 kg CO₂ je 100 km.

Der Strommix hat einen erheblichen Einfluss auf den CO₂-Fußabdruck von BEV sowohl bei der Herstellung als auch während der Nutzung. Aktuell verursacht der deutsche Strommix Emissionen von etwa 363 g CO₂/kWh, was bei einem Verbrauch von 145 kWh/100 km pro Solobus etwa 52,6 kg CO₂ pro 100 km entspricht. Zukünftig soll die CO₂-Intensität des Strommixes sinken, um Klimaziele zu erreichen. Prognosen wie aus dem Ariadne-Projekt sehen für 2030 eine CO₂-Intensität von 30-75 g CO₂/kWh vor. Unter der Annahme von 75 g CO₂/kWh für 2030, würden die Emissionen auf 10,9 kg CO₂ pro 100 km reduziert werden.

Die Emissionen von Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV) hängen stark vom Wasserstoffverbrauch und dem CO₂-Fußabdruck des verwendeten Wasserstoffs ab. Der Verbrauch aktueller wasserstoffbetriebener Solobusse liegt bei etwa 8 kg Wasserstoff pro 100 km. Grauer Wasserstoff aus Erdgas hat hohe CO₂-Emissionen und wird nicht weiter betrachtet. Blauer Wasserstoff, ebenfalls aus Erdgas, verwendet CO₂-Abscheidung, hat aber immer noch signifikante Emissionen und erhöhten Erdgasverbrauch. Grüner Wasserstoff wird durch Elektrolyse mittels Strom erzeugt, wobei die Emissionen stark von der CO₂-Intensität des Strommixes abhängen. Der Transport von Wasserstoff, ob per Schiff oder Pipeline, verursacht zusätzliche Energieverluste. Für Import-Wasserstoff wird eine CO₂-Intensität von 75 g CO₂/kWh für 2030 angenommen. Der Wasserstoff muss zudem gespeichert und verteilt werden, was zusätzlichen Energiebedarf und Emissionen verursacht. Insgesamt ist die Speicherung und Verteilung von Wasserstoff energieintensiv, was bei der Bewertung der Klimafreundlichkeit von FCEV berücksichtigt werden muss.

Zusammengefasst benötigt ein Brennstoffzellenfahrzeug etwa 8 kg Wasserstoff für 100 km, was 266,7 kWh entspricht. Für die Speicherung, Distribution und Betankung fallen zusätzliche 12 % Hilfsenergiebedarf an, also 4 kWh Strom pro kg Wasserstoff. Bei Nutzung von grünem Strom im Produktionsland und einem deutschen Strommix von 75 g CO₂/kWh für die Hilfsenergie, entstehen Betriebsemissionen von 20,0 kg CO₂ pro 100 km. Wenn der Wasserstoff in Deutschland erzeugt wird, entfallen die Transportverluste und es werden 54,8 kWh Strom pro kg Wasserstoff benötigt, was zu Emissionen von 32,9 kg CO₂ pro 100 km führt.

C. Untersuchungsgegenstand

I. Analyse des aktuellen Fuhrparks der VBB

Anzahl Fahrzeuge und Fahrzeuggrößen

Der Fuhrpark der VBB besteht zum Zeitpunkt der Erhebung Ende des Jahres 2023 ausschließlich aus Bussen mit konventionellem Diesel-Antrieb. Dabei ist der Großteil der Flotte der Fahrzeugbauart Solo (22 Fahrzeuge) zu zuordnen. Daneben befinden sich 11 Gelenkbusse bei der VBB im Einsatz. Die Erarbeitung verschiedener Migrationspfade erfolgt somit insgesamt für 33 Solo- und Gelenkbusse.¹ Die folgende Abbildung zeigt den VBB-Fuhrpark in seiner Struktur nach Fahrzeuggrößen.

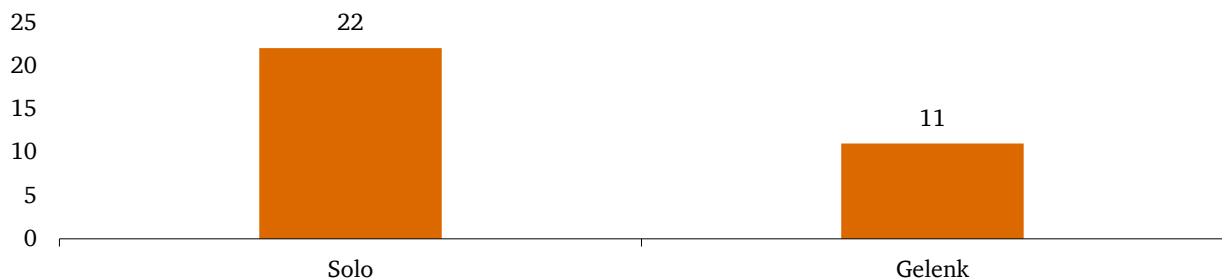


Abbildung 6: Fuhrparkstruktur: Anzahl Fahrzeuge nach Fahrzeuggrößen der VBB

Altersstruktur und Fahrleistungen

Der Fuhrpark der VBB ist durch eine über die Nutzungsdauer gleichmäßig verteilte Altersstruktur geprägt. Das Durchschnittsalter aller Fahrzeuge liegt bei 7,89 Jahren. 3 Fahrzeuge sind zum Stand der Erhebung Ende des Jahres 2023 dabei bereits zwölf Jahre oder länger im Einsatz.

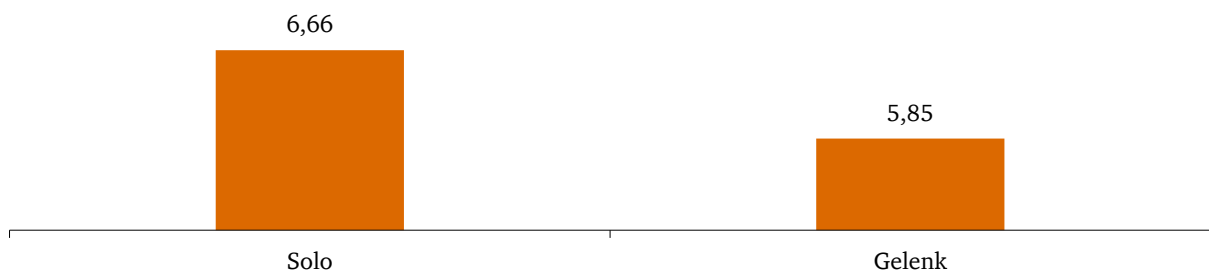


Abbildung 7: Fuhrparkstruktur: Durchschnittsalter der Fahrzeugklassen der VBB

¹ Bei der Analyse wurde der zu diesem Zeitpunkt vorgehaltene Fuhrpark der VBB zugrunde gelegt.

Pro Jahr legen die Solobusse bei der VBB ca. 63.470 km zurück, wohingegen die Gelenkbusse eine Fahrleistung von ca. 49.946 km erreichen.

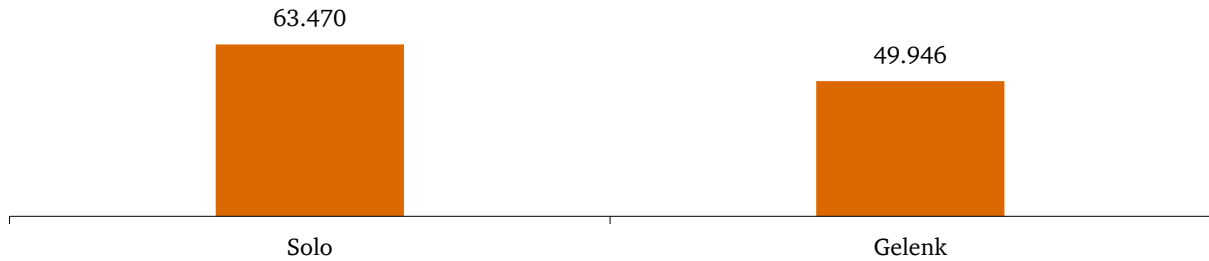


Abbildung 8: Fuhrparkstruktur: Durchschnittliche Fahrleistung der Fahrzeugklassen der VBB

Emissionsklassen

Alle Fahrzeuge der Flotte der VBB weisen die Emissionsklasse EURO III, EURO IV, EURO V oder EURO VI auf. Seit 2014 wurden ausschließlich Fahrzeuge der Emissionsklasse EURO VI beschafft. Knapp 85 % der Flotte der VBB hat aktuell die Emissionsklasse EURO VI.

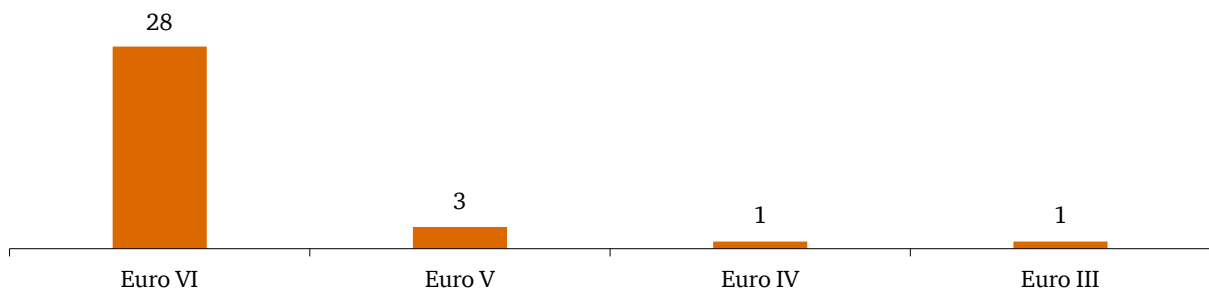


Abbildung 9: Fuhrparkstruktur: Emissionsklassen im Fuhrpark der VBB

Die heutige Fuhrparkstruktur wird im Folgenden als Grundlage zur Ableitung einer Beschaffungsplanung bis zum Jahr 2040 angenommen.

II. Ableitung Beschaffungsplanung bis 2040 für die VBB

Die Beschaffungsplanung der VBB für die Jahre 2024 bis 2040 ist wesentlich für die Erstellung eines Migrationspfades der Flottentransformation mit emissionsfreien Bussen. Daher wurden zunächst die Planungen der VBB für Ersatzbeschaffungen in der Busflotte erhoben. Darüber hinaus wurden für die Ableitung der Beschaffungsplanung in Abstimmung und Zusammenarbeit mit der VBB folgende Prämissen zugrunde gelegt:

- die Fuhrparkstruktur mit 22 Solo- und 11 Gelenkbussen soll beibehalten werden,
- Neuanschaffungen dienen damit dem Ersatz von Altfahrzeugen,
- ab 2025 werden Fahrzeuge nach 12 Jahren ersetzt.

Auf Grundlage der Fuhrparkstruktur und unter Berücksichtigung der dargestellten Prämissen wurde gemeinsam mit der VBB der in der folgenden Abbildung dargestellte Beschaffungsplan bis zum Jahr 2040 abgeleitet.

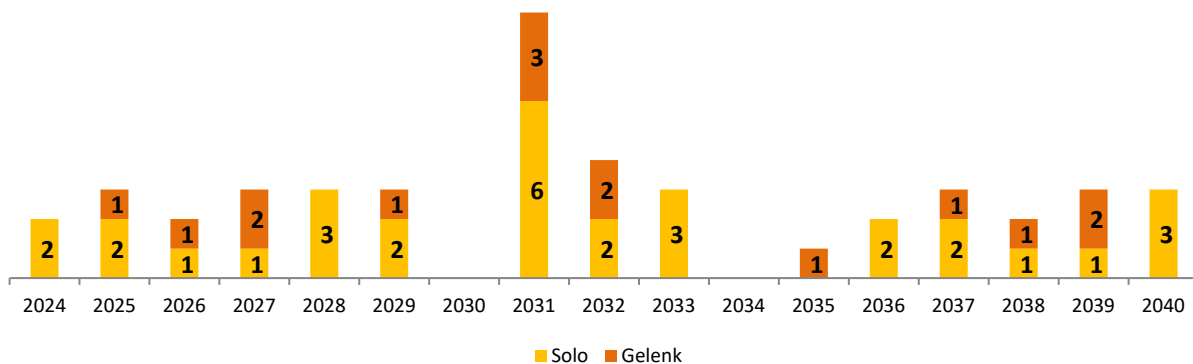


Abbildung 10: Beschaffungsplanung der VBB bis zum Jahr 2040: Anzahl Fahrzeuge nach Bauart

Über das Jahr 2040 hinaus können die Beschaffungen im 12-Jahres-Rhythmus fortgeschrieben werden. In Abhängigkeit des gewählten Migrationspfades ist der betrieblich notwendige Fahrzeugmehrbedarf zu beachten, der die Beschaffung in einzelnen Jahren erhöhen kann.

D. Verkehrlich-technische Betrachtung

I. Methodik Einsatz- und Infrastrukturanalyse

1. Umlaufuntersuchung

Für die Umlaufuntersuchung wird das Softwaretool route analyzer eingesetzt. Die Eigenentwicklung von eebc berechnet den Energiebedarf von Buseinsätzen im ÖPNV auf Basis der realen Umlauflisten. Das Tool unterscheidet zwischen weg- und zeitabhängigen Verbrauchsparametern, um Traktionsenergie und Nebenverbraucherenergie individuell zu berechnen. Damit kann die von Umgebungsbedingungen abhängige Nebenverbraucherenergie (primär beeinflusst von der Fahrzeugklimatisierung) beispielsweise im Worst-Case für Machbarkeitsaussagen oder als Jahresdurchschnittswert für jährliche Energieverbrauchsprognosen berechnet werden. Darüber hinaus können ortsabhängige, linienspezifische Verbrauchswerte berücksichtigt werden, wenn das Liniennetz beispielsweise durch eine wechselhafte Topografie charakterisiert ist.

Das Softwaretool kann für verschiedene Antriebstopologien parametrisiert werden, so dass eine technologieoffene Bewertung auf derselben Berechnungsbasis möglich ist. Selbstverständlich ermöglicht das Tool die Berücksichtigung von (Schnell-) Ladepunkten, die Fahrzeugabschaltung bei langen Wartezeiten oder systemspezifische Parametrisierungen wie verschiedene Ladeleistungen abhängig von den zu berücksichtigenden elektrischen Schnittstellen am Fahrzeug.

2. Umlaufverkettung

Die erste Berechnungsgrundlage für die Untersuchung sind Einzelumläufe. Einzelumläufe sind dabei Fahrstrecken, die sowohl am Betriebshof starten als auch am Betriebshof enden. Bei mehreren Betriebshöfen oder Fahrzeugdepots muss ein Umlauf nicht zwingend in demselben Betriebshof starten und enden.

Für die Machbarkeitsbewertung auf Fahrzeugebene werden Einzelumläufe zu Fahrzeugtagesumläufen verkettet. Ein Fahrzeugtagesumlauf kann als machbar bewertet werden, wenn alle Teilstrecken (Einzelumläufe) als machbar bewertet werden. Aufenthaltsdauern zwischen den Einzelumläufen an Standorten mit Lade- oder Tankinfrastruktur (i.d.R. Betriebshof) werden als Nachlade- oder Nachtankintervall berücksichtigt, wenn die Verweildauern ausreichen.

Aufgrund der gegenüber Dieseln, oder anderen konventionellen Antriebskonzepten, eingeschränkten Reichweite von emissionsfreien Antrieben kann ein abweichender Verkettungsansatz als im aktuellen Betrieb erforderlich sein. Üblicherweise ist dies abhängig von der notwendigen Energiezuführung zwischen den Einzelumläufen.

Um mögliche Fahrzeugmehrbedarfe auf emissionsfreie Antriebe als Auslöser isolieren zu können, wird die Umlaufverkettung als Vergleichswert auch für Dieselsebusse ausgeführt. Hierbei wird angesetzt, dass keine Energiezuführung erforderlich ist und ein einrückendes Fahrzeug unmittelbar für potenzielle Folgeumläufe zur Verfügung steht.

Die Umlaufverkettung erfolgt spezifisch pro Fahrzeugtyp. Vielfach ergibt sich die Verkettung nach dem FIFO-Prinzip (First-In-First-Out). Von dieser Struktur kann jedoch abgewichen werden, wenn dies Vorteile birgt.

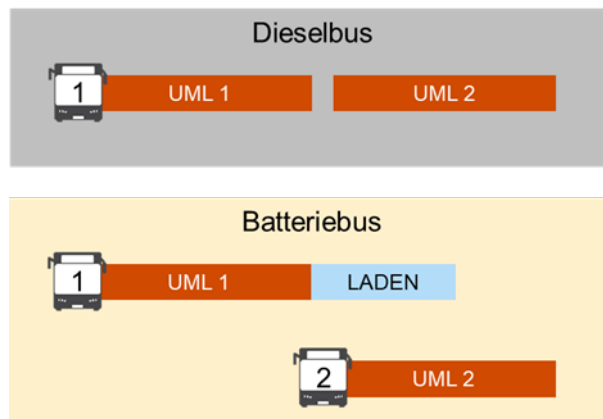


Abbildung 11: Schema Umlaufverknüpfung

II. Einsatzanalyse

a) Einzelumlaufanalyse – Zusammenfassung

		Anzahl machbarer / langfristig kritischer Umläufe im Vergleich									
Fahrzeugtyp	Technik	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solobus (38 Umläufe)	BEV	38	100%	38	100%	38	100%	38	100%	0	0%
	FCEV	38	100%	38	100%	38	100%	38	100%	0	0%
Gelenkbus (19 Umläufe)	BEV	19	100%	19	100%	19	100%	19	100%	0	0%
	FCEV	19	100%	19	100%	19	100%	19	100%	0	0%

Tabelle 1: Übersicht Einzelumlaufanalyse Freitag_Schule (BEV und FCEV)

In Summe zeigt sich für die Einsatzprofile der VBBr zunächst ein maximal positives Bewertungsbild. Sämtliche Einzelumläufe sind technologieunabhängig nach Stand der Technik bereits heute dekarbonisierbar. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Fahrzeuge grundsätzlich mehrere Einzelum-

läufe hintereinander absolvieren können, was sich auf die Machbarkeit auswirken kann. Entsprechende Untersuchungen folgen in den weiteren Unterkapiteln der Energieverbrauchsanalyse.

2. Einsatzpotenziale im Direktersatz

Um die Einsatzpotenziale im Direktersatz zu ermitteln, werden die Einzelumläufe zu Fahrzeugtagessummläufen verkettet. Im Fahrzeugtageseinsatz müssen teilweise mehrere Einzelumläufe nacheinander absolviert werden, wobei für BEV Aufenthaltsdauern im Depot als potenzielle Ladezeit zur Verfügung stehen. Für die Erfüllung von Fahrzeugtageseinsätzen kann ein größerer Batteriespeicher erforderlich sein als für die Erfüllung jedes enthaltenen Einzelumlaufs (abhängig von den erforderlichen Energiemengen und Nachladepotenzialen). Als Referenzwert wird die Umlaufverkettung auch für ein Dieselbusmodell (ohne Nachladeintervalle und Reichweitenbegrenzung) ausgeführt, um die Ergebnisse mit einem belastbaren Wert für den Status quo zu vergleichen.

Grundsätzlich können sich drei Auswirkungen ergeben:

- Keine Auswirkung auf die Machbarkeit.
- Verschiebung der Machbarkeit auf der Zeitachse, wenn für die Erfüllung der Fahrzeugtagessummläufe in Summe größere Speicherkapazitäten erforderlich sind als heute am Markt verfügbar.
- Vergrößerung der erforderlichen Fahrzeugflotte (Fahrzeugmehrbedarf), wenn für die Erfüllung der Fahrzeugtagessummläufe (teilweise) Speicherkapazitäten erforderlich sind, die im Rahmen der Entwicklungsprognose auch langfristig kritisch bewertet werden.

Im Anwendungsfall der VBBR liegt kein Fahrzeugmehrbedarf vor, wenn das Einsatzpotenzial für den Direktersatz ausreichend für die sukzessive Flottenumstellung ist. Sofern die berechneten Fahrzeugmengen (pro Zeitslot) ausreichen, um den Beschaffungsplan zu erfüllen, sind keine Umlaufanpassungen oder ähnlichen Maßnahmen erforderlich, die einen Fahrzeugmehrbedarf auslösen können. Das Einsatzpotenzial für den Direktersatz stellt über der Zeitachse dar, wann wie viele Busse ohne Sondermaßnahmen auf Batterie- oder Brennstoffzellentechnik umgestellt werden können. Sondermaßnahmen sind in diesem Kontext üblicherweise Umlaufanpassungen oder technische Maßnahmen (z.B. Schnellladen an Wendestellen), um die Machbarkeit beziehungsweise Einsatzreichweite der Fahrzeuge zu steigern.

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, über Sondermaßnahmen das Einsatzpotenzial im Direktersatz zu steigern. Beispielweise kann mittels einer Umlaufanpassung zu jedem Zeitpunkt die Anzahl machbarer Einsätze gesteigert werden. Entsprechende Maßnahmen sollten nur bei Notwendigkeit ergriffen werden, da Zusatzaufwendungen ausgelöst werden. Üblicherweise fallen durch eine Umlaufanpassung zusätzliche Transferwege an (zusätzlicher Personaleinsatz). In ungünstigen Fällen

kann auch der Einsatz von zusätzlichen Fahrzeugen erforderlich sein. Für die VBBr sollten die vorhandenen Einsatzpotenziale jedoch ausreichen, um die Flottentransformation ohne Sondermaßnahmen zu realisieren.

Nach Umlaufverkettung ergibt sich das folgende Einsatzpotenzial im Direktersatz über der Zeitachse.

			Anzahl umstellbarer Fahrzeuge im Direktersatz									
Fahrzeugtyp	Einsatzflotte heute	Technik	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solobus (38 Umläufe)	19	BEV	16	84%	19	100%	19	100%	19	100%	0	0%
		FCEV	19	100%	19	100%	19	100%	19	100%	0	0%
Gelenkbus (19 Umläufe)	10	BEV	6	60%	8	80%	10	100%	10	100%	0	0%
		FCEV	10	100%	10	100%	10	100%	10	100%	0	0%

Tabelle 2: Übersicht Einsatzpotenziale im Direktersatz Freitag_Schule (BEV und FCEV)

Im Gegensatz zur Betrachtung der Einzelumläufe sind hier nicht alle Tages-Einsätze mit aktueller BEV-Technik machbar. Die Machbarkeit verschiebt sich hier über der Zeitachse. Dabei gilt, dass mit spätestens ab 2028 antizipierter Technik sämtliche Solobus-Tageseinsätze als machbar bewertet werden. Für Gelenkbusse gilt dies mit ab 2033 antizipierter Technik, wobei ab 2028 bereits 80 % aller Tageseinsätze als machbar eingeschätzt werden. Mit aktueller Technik sind bereits 16 von 19 Solobuseinsätze sowie 6 von 10 Gelenkbuseinsätzen machbar, so dass theoretisch bereits über 75 % der gesamten Einsatzflotte mit BEV dekarbonisierbar sind. Damit sind sämtliche CVD-Quoten problemlos mit BEV-Technik erfüllbar. Mithilfe von Sondermaßnahmen (Umlaufanpassung) ist eine weitere Steigerung der Machbarkeit denkbar.

Mit FCEV-Technik kann bereits heute die gesamte Flotte auf emissionsfreie Antriebe umgestellt werden. Vielfach liegt die Aufenthaltsdauer zwischen zwei Einzelumläufen unter 30 Minuten, so dass ein Nachtanken von Wasserstoffbussen nicht zwingend gewährleistet werden kann. Jedoch sind Nachbetankungen zwischen Einzelumläufen für FCEV-Busse hier nicht erforderlich.

Anmerkung: Die Berechnungen und Zahlenwerte beziehen sich auf die Einsatzflotte, die für die Erfüllung aller Fahrzeugeinsätze erforderlich ist. Die zusätzlich vorgehaltene Fahrzeugreserve muss keine zusätzlichen Reichweitenanforderungen erfüllen, da die Reservefahrzeuge ersatzweise für Busse aus der Einsatzflotte eingesetzt werden.

Der Vollständigkeit halber sind hier auch die Ergebnisse für die Bewertung des Wochenendeinsatzes aufgeführt. Die Ergebnisse sind mit denen von Freitag_Schule vergleichbar. Erleichternd kommt hinzu, dass am Wochenende nur ein Teil der Solobusflotte eingesetzt wird. Damit besteht

die Möglichkeit, anstatt ein Fahrzeug zwischen Einzelumläufen vollzuladen, auf ein ungenutztes (bereits vollgeladenes) Fahrzeug zurückzugreifen und die Machbarkeit gegenüber der folgenden Tabelle weiter zu erhöhen.

Fahrzeugtyp	Einsatzflotte heute	Technik	Anzahl umstellbarer Fahrzeuge im Direktersatz								Langfristig kritisch	
			Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038			
Samstag Solobus (19 Umläufe)	12	BEV	8	67%	12	100%	12	100%	12	100%	0	0%
		FCEV	12	100%	12	100%	12	100%	12	100%	0	0%
Sonntag Solobus (14 Umläufe)	8	BEV	6	75%	8	100%	8	100%	8	100%	0	0%
		FCEV	8	100%	8	100%	8	100%	8	100%	0	0%

Tabelle 3: Übersicht Einsatzpotenziale im Direktersatz Samstag und Sonntag (BEV und FCEV)

3. Aufwand für perspektivische Vollumstellung (erforderliche Optimierungsmaßnahmen)

Mit ab 2033 antizipierter technischer Entwicklung ist eine vollständige Flottendekarbonisierung sowohl mit BEV- als auch mit FCEV-Technik ohne jegliche Sondermaßnahmen möglich. Eine frühere Flottenvollumstellung wird nicht als notwendig erachtet. Entsprechend sind auch perspektivisch keine größeren Anpassungsmaßnahmen erforderlich, wenn eine vollständige Flottenumstellung erforderlich ist.

4. Bestimmung der neuen Fuhrparkgröße

Gegenüber der heutigen Dieselbusflotte sind keine Änderungen in der Flottenstruktur oder Fuhrparkgröße zu erwarten. Bei sukzessiver Flottenumstellung kann die Umstellung im Direktersatz erfolgen, wobei ein Dieselbus ohne Sondermaßnahmen durch einen Brennstoffzellen- oder Batteriebus ausgetauscht wird. Erforderlich ist lediglich die dazugehörige Lade- oder Tankinfrastruktur.

5. Weiteres Verbesserungspotenzial

Die oben beschriebenen Einsatzpotenziale im Direktersatz beziehen sich auf einen „Eins-zu-Eins“ Ersatz der Fahrzeuge, ohne Änderungen in der Umlaufstruktur. Emissionsfreie Busse übernehmen die Dieselbusumläufe unverändert. Sofern eine entsprechende Ladeinfrastruktur im Betriebshof verfügbar ist, sind keine weiteren Anpassungen erforderlich. Die Ergebnisse sind dabei insgesamt sehr positiv zu bewerten. Die Einsatzpotenziale werden bereits ohne weitere betriebsplanerische Änderungen als gut ausreichend für eine schrittweise Systemumstellung auf emissionsfreie Antriebe eingeschätzt.

6. Technische Technologieempfehlung

Aus technischer Perspektive sind BEV und FCEV gleichwertig. Mit beiden technologischen Ansätzen kann die vollständige Flottentransformation abgebildet werden. Erwartungsgemäß zeigen sich bei aktueller Technik Reichweitenvorteile für die FCEV-Technik gegenüber BEV. Dennoch sind die Mengen direkt umstellbarer Busse auf BEV mehr als ausreichend, um die CVD-Quoten über zu erfüllen. Vereinfacht formuliert sind die aktuellen Reichweitenvorteile von FCEV für die Dekarbonisierung der VBBR-Flotte nicht erforderlich. Die abschließende Auswahl einer Vorzugstechnologie kann vollständig auf Basis kommerzieller Aspekte erfolgen.

III. Infrastrukturanalyse

1. Elektrische Ladeinfrastruktur

a) Lastgangoptimierung und Transformatordimensionierung

Lastgangoptimierung

Vor Lastgangoptimierung ergibt sich ein Lastverlauf mit einer ausgeprägten Lastspitze am späten Abend (Peak-Wert ca. 1.878 kVA).

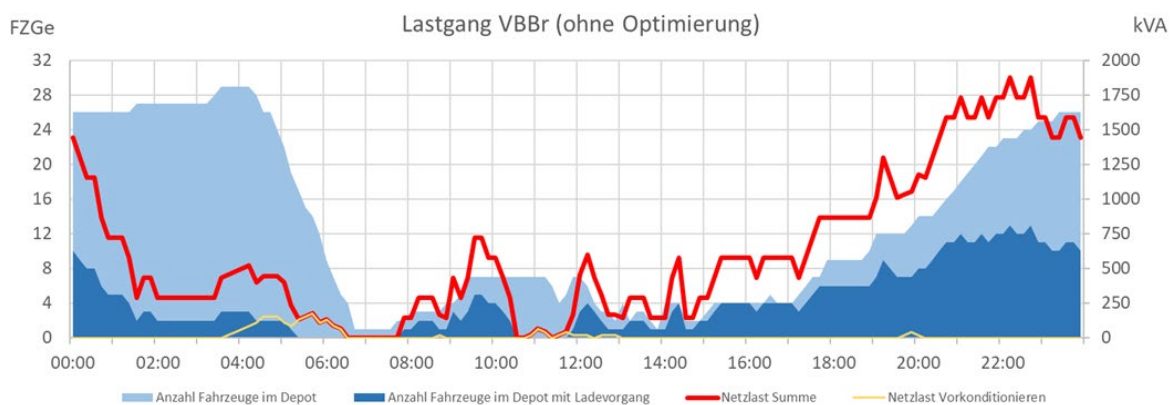


Abbildung 12: Lastgang ohne Optimierung für BEV-Flotte

Ohne Lastgangoptimierung fällt der Lastverlauf etwa ab Mitternacht stark ab und pendelt sich auf einem geringen Niveau ein. Gleichzeitig ist im Graph erkennbar, dass die Fahrzeugflotte etwa zwischen 04:30 und 06:30 Uhr ausrückt (abnehmende hellblaue ausgefüllte Kurve).

Im Rahmen der Lastgangoptimierung wird insbesondere dieses Zeitintervall ausgenutzt, indem die Ladung der Flotte in Summe über einen breiteren Zeitraum ausgedehnt wird. Mithilfe der Lastgangoptimierung kann der Peak-Wert um ca. -45 % auf ca. 1.033 kVA reduziert werden. Ab ca. 18 Uhr werden Lastwerte erreicht, die bis etwa 4 Uhr am Folgetag weitestgehend konstant auf Niveau des Maximalwertes rangieren.

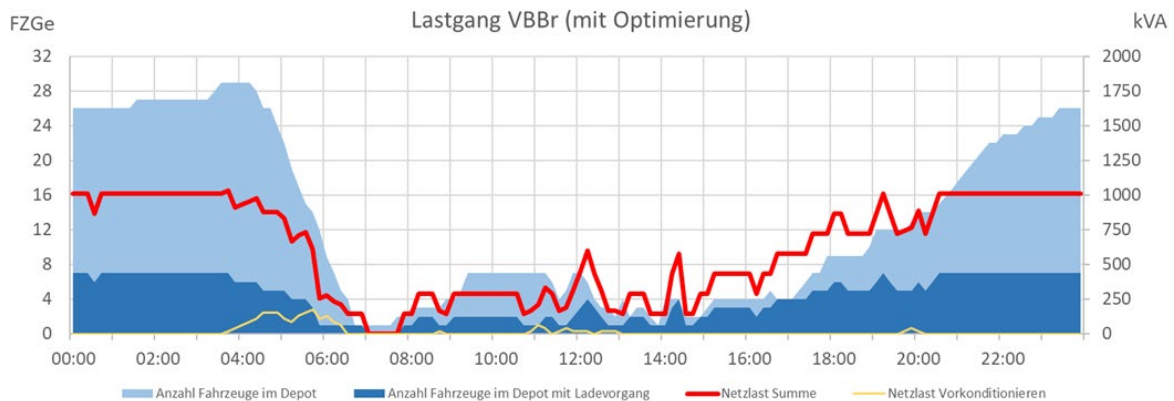


Abbildung 13: Lastgang mit Optimierung für BEV-Flotte

Netzanschlusskapazität

Ohne Verzögerungen im Betriebsablauf und Ähnliches (Idealfall) wird auf Basis des Status quos eine Lastspitze in Höhe von 1.033 kVA erwartet. Dies entspricht maximal sieben parallel ausgeführten Ladevorgängen, wobei parallel Vorkonditionierungen erfolgen können.

Um hier ausreichende Reserven vorzusehen, wird eine Leistungsreserve empfohlen. Angesetzt werden hier zwei zusätzliche Ladevorgänge parallel zum Peak-Wert. Inklusive Reserve sollte der Netzanschluss eine Netzlast von ca. 1.350 kVA ermöglichen.

MS/NS Transformator

Der Mittel- zu Niederspannungstransformator wird auf den Netzlastbezug inklusive Leistungsreserve (1.350 kVA) ausgelegt. Dabei wird der Transformator so dimensioniert, dass der maximale Arbeitspunkt bei ca. 70 % der Nennleistung liegt, um einen maximalen Wirkungsgrad zu erzielen.

Rechnerisch ergibt sich eine Transformatorengröße von 1.930 kVA, weshalb ein 2.000 kVA Transformator für den Mittelspannungsanschluss abgeschätzt wird. Eine Aufteilung in beispielsweise zwei 1.000 kVA Transformatoren kann sinnvoll sein, um Redundanzvorteile zu schaffen und einen schrittweisen Systemausbau zu vereinfachen.

b) Konzeptentwurf modulares Ladesystem

Allgemeine Struktur Matrix-Ladesystem

Für den Konzeptentwurf elektrischer Ladeinfrastruktur werden sogenannte Matrix-Ladesysteme nach Stand der Technik geplant. Gegenüber sogenannten Stand-Alone Systemen, bei denen sämtliche Elektronik und Komponenten im Gehäuse der Ladesäule integriert sind, ermöglichen Matrix-Systeme eine dezentrale Betriebshofintegration.



Abbildung 14: Elektronikgehäuse für 600 kW Matrix-Ladesystem (C-Series, Fa. Kempower)

Grundsätzlich sollte der Leistungswert pro Leistungsmodul möglichst klein sein. Da pro Ladepunkt nur ein ganzzahliges Vielfaches der Modulleistung ‚bereitgestellt‘ werden kann, ermöglichen kleine Leistungswerte eine feingliedrigere Aufteilung der Systemleistung an die Ladepunkte.

Konzeptentwurf elektrische Ladeinfrastruktur

Für die Nachladung einer vollelektrischen Fahrzeugflotte nach Status quo sind in Summe 33 Ladeplätze erforderlich (22 Solo- und 11 Gelenkbusse, inklusive Reserve). Um alle Ladeplätze an ein Matrix-Ladesystem anzubinden, wird ein Konzeptansatz mit insgesamt 5 Ladesystemen vorgeschlagen. Dabei sind 4 Systeme in einer identischen Variante ausgeführt. Das fünfte Ladesystem ist in einer leicht abweichenden Variante ausgeführt, um die Anzahl der Ladepunkte nicht zu überdimensionieren. Eine identische Ausführung zu den vier anderen Systemen wäre jedoch unproblematisch möglich.

Erste Systemvariante

- Anzahl: 4 Systeme
- Systemleistung: 400 kW
- Anzahl Ladepunkte: 8 Ladepunkte pro System
- Modulgröße: Max. 50 kW, bevorzugt 25 kW pro Leistungsmodul

Zweite Systemvariante

- Anzahl: 1 System
- Systemleistung: 400 kW
- Anzahl Ladepunkte: 4 Ladepunkte pro System
- Modulgröße: Max. 50 kW, bevorzugt 25 kW pro Leistungsmodul

Managementsysteme

Auch wenn eine Vielzahl möglicher Managementsysteme am Markt verfügbar sind, kann für den hier betrachteten Anwendungsfall angenommen werden, dass keine aufwendigen/komplexen IT-Strukturen neu geschaffen werden müssen. Die vergleichsweise kleinen Fahrzeugmengen pro Depot können in vielen Bereichen durch einfache Strukturen und Betriebsanweisungen manuell organisiert werden, so dass die Software hier nur als ausführendes Organ eingesetzt wird. Die Einführung eines Lademanagementsystems wird bereits für kleine Flotten als sinnvoll eingeschätzt, um mit der hier ausgeführten Lastgangoptimierung vergleichbare Ergebnisse in der Praxis zu gewährleisten.

Lademanagementsysteme

Wie anhand der dargestellten Lastgangoptimierungen ersichtlich ist, sind entsprechende Managementsysteme für den Anwendungsfall der VBBR sinnvoll und sollten für eine Ladeinfrastruktur vorgesehen werden.

Das Lademanagementsystem steht über die Ladeschnittstelle auf einer physikalischen Ebene in Verbindung mit den angebotenen Fahrzeugen. Am Beispiel der CCS-Schnittstelle erfolgt dies über den Control-Pilot-Kontakt (CP). Über die Schnittstelle können Informationen ausgetauscht und Anforderungen als Telegramm übertragen werden. Die Schnittstelle ist international als ISO 15118 Standard normiert. Vom Kommunikationsstandard sind beispielsweise auch Anforderungen für den Start eines Ladevorgangs oder eines Vorkonditionierungsvorgangs abgedeckt. Leistungsbegrenzungen oder die Sperrung eines Ladepunktes erfolgen direkt innerhalb der Ladeinfrastruktur, ohne Informationsübertragung zu den Fahrzeugen.



Auf der Informationsebene steht das Lademanagementsystem in direkter Verbindung zu allen Instanzen der Ladeinfrastruktur und damit (indirekt) auch mit allen Sub-Systemen und angeschlossenen Fahrzeugen. Darüber hinaus kann das Managementsystem an weitere IT-Systeme angebunden werden, um das Gesamtsystem im Sinne eines Betriebshofmanagementsystems auszubauen oder andere Funktionen, wie ein übergeordnetes Energiemanagement oder Abrechnungsmanagement, abzudecken.

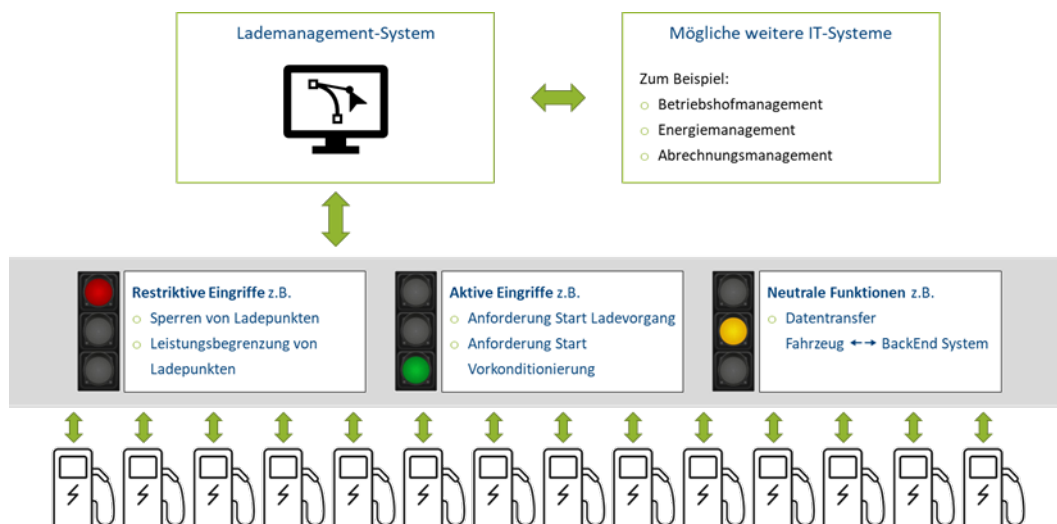


Abbildung 15: Lademanagementsystem Informationsebene

Lademanagementsysteme können diverse Funktionen übernehmen, die für den Anwendungsfall nicht relevant sind. Der Übergang von Lade- zu Betriebshofmanagementsystemen ist fließend und

nicht klar definiert. Lademanagementsysteme sind vielfach Teil des Lieferumfangs von Ladeinfrastruktur oder können als optionaler Bestandteil vom Hersteller eingekauft werden. Der Funktionsumfang entsprechender Systeme ist üblicherweise ausreichend für Anwendungsfälle wie in Brandenburg.

Inwiefern eine eigenständige Softwarelösung oder eine Lösung über den Ladeinfrastrukturlieferanten umgesetzt wird, ist aus technischer Perspektive unerheblich. Tendenziell stellen eigenständige Softwarelösungen höhere Anforderungen an die Systemimplementierung und Systemadministration. Dafür ist der Funktionsumfang vielfach größer als bei Systemen, die vom Hersteller der Ladeinfrastruktur stammen und die Einbindung weiterer Ladeinfrastrukturen von Dritten Herstellern ist in der Regel unkritisch.

Auch wenn Managementsysteme von Ladeinfrastrukturherstellern in der Regel nicht typoffen sind, scheint ein derartiges System die sinnvollste Alternative für Betreiber mit Flottengrößen wie im Betrachtungsfall. Aus Wartungsgründen sollte die Installation von Ladeinfrastrukturen verschiedener Hersteller vermieden werden, weshalb eine typoffene Softwarelösung schlicht nicht notwendig ist. Ähnliches gilt für die Funktionsumfänge eigenständiger Softwarelösungen. Sofern nicht die Einführung eines komplexeren Betriebshofmanagementsystems angestrebt wird, ist der übliche Funktionsumfang herstellereigener Managementsysteme für den Anwendungsfall ausreichend. Darüber hinaus sind herstellereigene Softwarelösungen dediziert für die gelieferten Systeme entworfen, was einen reibungslosen Betrieb nach überschaubarem Implementierungsaufwand verspricht.

Es wird empfohlen, mindestens die folgenden Funktionsbestandteile zu realisieren:

- Begrenzung der Ladeleistung (zeitabhängig) pro Systemeinheit (LIS-Einheit) und pro Ladepunkt
- Sperren und Freischalten von Ladepunkten (zeitabhängig)
- Priorisierung von Ladepunkten oder Fahrzeugen
- Auswertung oder Einlesen von Betriebs- und Fahrzeugdaten (z.B. Fahrzeugkennung, momentane Ladeleistung und Ladestatus)

2. H₂-Tankinfrastruktur

Wasserstofftankinfrastruktur kann in verschiedenen Varianten ausgeführt werden. Für Nutzfahrzeuge mit 350 bar Systemen werden üblicherweise die oberen drei Alternativen des folgenden Schaubilds eingesetzt. Im Gegensatz zur untersten dargestellten Alternative werden keine Flüssiggasspeicher benötigt, die für die im Pkw-Sektor verfolgte 900 bar Technik vielfach eingesetzt werden.

Die drei Alternativen für den Nutzfahrzeugsektor unterscheiden sich im Speicher- und Verdichterkonzept. Weit verbreitet ist die oberste Alternative mit Niederdruck-Hauptspeicher (< 350 bar). Die Schnittstelle zum Fahrzeug wird über eine Speicherkaskade auf mehreren Druckniveaus gebildet. Mit steigender Wasserstoffmenge im Fahrzeug steigt der Gegendruck und höhere Druckniveaus der Speicherkaskade werden hinzugeschaltet. In der zweiten Variante wird auf eine Speicherkaskade verzichtet. Der Ladespeicher ist als Konstantdruckspeicher ausgeführt, wobei das Druckniveau immer über dem maximalen Gegendruck des Fahrzeugs liegen muss. In der dritten Variante ist der Haupttank als Hochdruckspeicher mit über 350 bar ausgelegt. Bei Bedarf wird das Druckniveau im Tankvorgang über eine nachgeschaltete Kryopumpe erhöht.

Der Platzbedarf einer Wasserstofftankstelle geht auf die zu versorgende Fahrzeuganzahl zurück. Aufgrund des Aufbauprinzips müssen die Bauflächen zusammenhängend ausgeführt sein. Die Grundfläche der erforderlichen Speicher- und Steuerungskomponenten liegt bei grob 10 x 30 m für mittlere Flotten, die wiederum um Zapfstellen (Tankplätze mit Dispenser) sowie Anlieferungspunkte für H₂-Trailer ergänzt werden müssen.

Der erforderliche Platzbedarf kann gut aus der Studie „Einführung von Wasserstoffbussen“ der NOW GmbH entnommen werden.

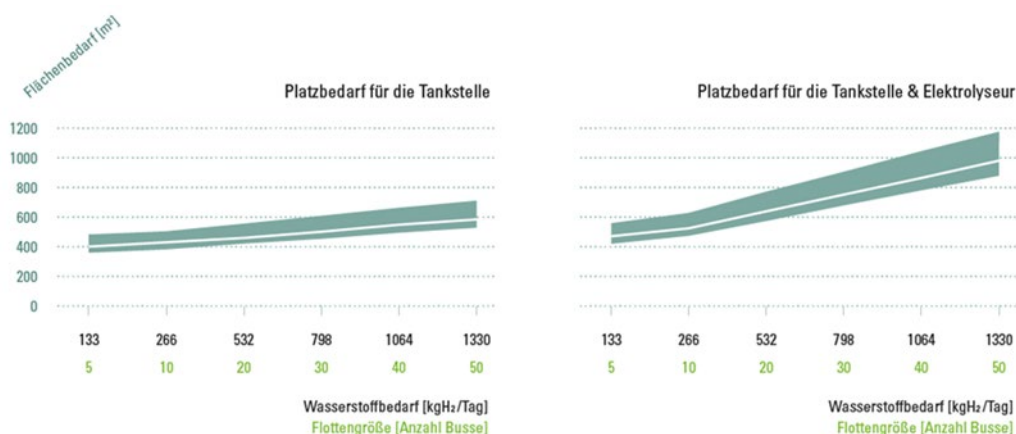


Abbildung 16: Platzbedarf Wasserstoff-Tankstelle im ÖPNV [aus NOW GmbH (2018) „Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV“]

3. Jahresenergiebedarf

Für eine vollständige Umstellung der aktuellen Fahrzeugflotte auf Batterie- oder Brennstoffzellenbusse werden die folgend aufgelisteten Energiemengen beziehungsweise Energieträgermengen abgeschätzt. Da der tatsächliche Energiebedarf abhängig von diversen Einflussfaktoren abhängt, wie der Umgebungstemperatur, kann hier nur eine grobe Berechnung erfolgen.

Zeitraum	Elektrische Energie (BEV-Flotte)			Wasserstoff (FCEV-Flotte)		
	Solo- busse	Gelenkbusse	Flotte	Solo- busse	Gelenkbusse	Flotte
Schulwoche	37,0 MWh	21,0 MWh	58,0 MWh	2,33 t H ₂	1,32 t H ₂	3,65 t H ₂
Ferienwoche	36,5 MWh	20,8 MWh	57,3 MWh	2,30 t H ₂	1,30 t H ₂	3,60 t H ₂
Jahr	1.918 MWh	1.089 MWh	3.007 MWh	121 t H ₂	69 t H ₂	189 t H ₂

Tabelle 4: Jahresenergiebedarf BEV und FCEV (bei vollständiger Flottenumstellung)

Aufgrund der relativ großen Fahrzeugflotte sind erwartungsgemäß große Energiemengen für den Flottenbetrieb erforderlich. Die für Batteriebusse erforderliche elektrische Energiemenge von ca. 3,0 GWh pro Jahr entspricht ungefähr dem Energiebedarf von 750 Vierpersonenhaushalten (4.000 kWh pro Jahr im Einfamilienhaus). Dabei darf nicht unterschätzt werden, dass auch die Wasserstoffmenge sehr groß ausfällt. Ein Bedarf von 189 t Wasserstoff pro Jahr entspricht im Durchschnitt einer Tagesmenge von ca. 0,52 t H₂. Bei marktüblichen Trailer-Kapazitäten von ca. 500 kg Wasserstoff entspricht dies etwas mehr als einer Trailer-Anlieferung pro Kalendertag. Perspektivisch kann eine Trailer-Kapazität von ca. 1.000 kg Wasserstoff angenommen werden, was einer mittleren Anlieferfrequenz eines Trailers pro zweitem Kalendertag entspricht.

4. Betriebshofintegration

a) Allgemeines

Elektrische Ladeinfrastruktur

Zugrunde gelegt werden sogenannte Matrix-Ladeinfrastrukturen, die auf einem kooperativen Betrieb interner Leistungsmodule basieren. Dabei wird ein Schnittstellenkonzept verfolgt, das auf CCS-Typ 2 Ladesteckern basiert. Neben einer Kosteneinsparung ist der Vorteil gegenüber Pantographensystemen, dass die marktverfügbaren Batteriekapazitäten fahrzeugseitig voll abgerufen werden können. Bei Fahrzeugen mit Pantographen wirkt sich die dachseitige Installation der Schnittstelle auf die mögliche Batteriekapazität aus, da beide Komponenten um denselben Bau- raum konkurrieren.

Um dennoch eine möglichst platzeffiziente Fahrzeugabstellung zu ermöglichen, wird eine Kabelzuführung von oben über entsprechende Abrollsysteme vorausgesetzt. Die Installation erfolgt über Tragkonstruktionen, die in Abstellhallen eingezogen werden, wenn die bestehende Substanz nicht ausreichend tragfähig sein sollte. Entsprechende Detailfragen gehen jedoch über den Umfang einer Machbarkeitsstudie hinaus und sind der Detailplanung zuzuordnen.

Aktuell wird vielfach das Thema autonomes Fahren diskutiert, das ebenfalls autonome Ladeschnittstellen erfordert. Aktuell sind Pantographen die einzige autonom ausführbare Schnittstellenalternative. Dennoch gibt es aktuell keine geltenden Standards, die eine entsprechende voreilende Ausrichtung der Ladeinfrastruktur rechtfertigen würden. Es ist schlicht unklar, wie zukünftig autonome Ladeschnittstellen gestaltet werden.

Wichtig ist in diesem Kontext die Umrüstbarkeit des Ladesystems auf einen abweichenden Schnittstellenansatz, wenn langfristig autonome Prozesse in den Betriebsalltag Einzug erhalten. Üblicherweise ist eine entsprechende Umrüstung unkritisch, indem an den verbauten Anschlussboxen (siehe Bild rechts) eine neue Schnittstelle aufgelegt wird und das Ladesystem entsprechend softwareseitig parametrierbar wird.



Abbildung 17: CCS Anschlussbox mit Seilzug-Abrollsystem



Bild: CarMedialab GmbH

Abbildung 18: Praxisbeispiel Depotladung mit Steckerzuführung von oben

Stellplatzspuren an den Hallenwänden können abweichend mit Wallboxen versorgt werden, die den aus dem Pkw-Sektor bekannten Ladepunkten vergleichbar sind. Im Freibereich wird Ladeinfrastruktur zwischen zwei Stellplätzen geplant, wenn keine Zuführung von oben möglich oder sinnvoll ist. Im folgenden Bild ist aus Visualisierungsgründen eine vergleichsweise bauraumintensive Lösung dargestellt. Üblicherweise können die Ladepunkte deutlich kleiner ausfallen, wenn diese als Ladesatelliten an ein Matrix-System angebunden werden (Baufläche kleiner als 0,5 m²).

Bild: CarMedialab GmbH



Bild: MAN Truck & Bus (über n fz-messe.com)

Abbildung 19: Praxisbeispiel Depotladung im Freibereich

Nach aktuellem Marktstandard sind die Ladeschnittstellen fahrzeugseitig auf Höhe der Vorderachse platziert, wobei eine beidseitige Schnittstellenausführung für eine platzeffiziente Aufstellung vorausgesetzt wird. Entsprechende Lösungen sind üblicherweise unkritisch fahrzeugseitig umzusetzen, jedoch nicht zwingend Teil der Standardausführung. Ein entsprechendes Muss-Kriterium sollte in der Ausschreibung der Fahrzeuge definiert werden.



Abbildung 20: Praxisbeispiel mit beidseitigen Ladeschnittstellen auf Höhe der Vorderachse

Im Rahmen der Konzeptentwicklung werden in den Grundstücken Mittel-/Niederspannungstransformatoren zur Anbindung an das Versorgungsnetz sowie Gehäuseeinheiten für Ladesysteme verplant. Für beide Komponenten werden Realkomponenten zugrunde gelegt, die mit einer leicht erhöhten Baufläche veranschlagt werden. Konkret betrifft dies Kompakt-Trafostationen der ca. 2.000 kVA Leistungsklasse (veranschlagt mit 2,5 m x 3,5 m) sowie Infrastruktureinheiten in Dreifachgehäusen (veranschlagt mit 2 x 1 m).

Wasserstoff Tankinfrastruktur

Mit ca. 30 Fahrzeugen in der Busflotte, beziehungsweise einem durchschnittlichen Durchsatz von etwa 520 kg H₂ pro Tag, entspricht die Flottengröße der aktuellen Größenordnung im Betrieb befindlicher Wasserstoffbusflotten (i.d.R. < 30 Fahrzeuge). Eine voll auf FCEV umgestellte Flotte könnte sowohl mit gasförmiger (GH₂) als auch mit flüssiger (LH₂) Wasserstoffanlieferung realisiert werden. LH₂ ist aufgrund der energieintensiveren Herstellung (Verdichtung) in einem höheren Preissegment angesiedelt, bietet jedoch den Vorteil, dass die Anlieferfrequenz reduziert werden kann. Gasförmig können aktuell bis zu 1,25 t H₂ pro Trailer angeliefert werden, während in flüssiger Form nahezu die dreifache Menge (ca. 3,3 t) pro Lieferung umgesetzt werden kann.

Für die Betriebshofintegration werden beide Tankstellenausführungen betrachtet, um sicherzustellen, dass beide Varianten grundsätzlich baulich realisierbar sind. Die Bemessung erfolgt angelehnt an Praxiswerte, wobei analog zur elektrischen Ladeinfrastruktur stets eine leicht erhöhte Baufläche angenommen wird.

Konkret werden folgende Grundflächen in der Konzeptionierung angesetzt:

- Wärmeübertrager: 8,5 m x 10 m
- LH₂ Speicher (stehend): 5 m x 5 m
- Kryopumpen und Steuerung: 18,5 m x 10 m (Außenmaß der L-Form)
- Zapfstelle: 1,3 m x 2,3 m

Für GH₂ Tankanlagen werden die folgenden Komponenten berücksichtigt.

- Trailerplätze: 2 x 5 m x 14 m
- Speicherbänke in 20 Fuß Containern: 2 x 6 m x 2,5 m
- Verdichter im 40 Fuß Container: 13 m x 2,5 m
- Zapfstelle: 1,3 m x 2,3 m

Im Verlauf werden für die Betankung sechs Zapfstellen berücksichtigt, was letztlich darauf zurückgeht, dass die verfügbaren Bauräume mit möglichst vielen Zapfstellen besetzt werden. In der Praxis kann angenommen werden, dass für 30 Fahrzeuge eine deutlich geringere Menge Zapfpunkte ausreicht. In Anbetracht der Flottengröße sind zwei Zapfpunkte realistisch, ohne jedoch Redundanzen vorzusehen.

Havarieflächen

Die in Batterie- und Brennstoffzellenbussen verbauten Lithium-Ionen-Batterien können nach Unfällen ein Brandrisiko darstellen. In Extremfällen können mechanische Verformungen elektrochemische Prozesse einleiten, die nach mehreren Stunden zum Brand führen. Aus Sicherheitsgründen wird Betreibern von entsprechenden Fahrzeugflotten die Vorhaltung eines sogenannten Havarieplatzes empfohlen.

Dieser kann als sicherer Beobachtungsplatz verstanden werden, von dem aus ein Brandübergreif auf weitere Güter im Brandfall vermieden werden kann. Aktuell existieren keine verpflichtenden Vorgaben an Havarieflächen. Die Brandausbreitung wird üblicherweise durch großzügige Freiflächen um den Beobachtungsplatz gewährleistet, wobei auch bauliche Lösungen mit umgebenden Brandschutzwänden realisiert werden, die zum Beispiel notfalls teilgeflutet werden können.

Einschränkungen Konzeptionierung gegenüber Detailplanung

Die hier im Rahmen einer Machbarkeitsstudie ausgeführte Betriebshofintegration ist auf Konzeptebene angesiedelt, ohne den Anspruch eine Detailplanung im Sinne einer Architektenleistung zu ersetzen. Zielstellung ist die Abschätzung, inwiefern batterie- oder brennstoffzellenelektrische Fahrzeugflotten in einem Abstellkonzept dargestellt werden können.

Auf Konzeptebene erfolgen keine Baugrunduntersuchungen, Statikanalysen oder sonstige Detailplanungen. Insbesondere Brandschutzeinrichtungen werden hier zwar auf Konzeptebene betrachtet, müssen jedoch zwingend über dedizierte Brandschutzgutachten verifiziert werden.

Auf Konzeptebene gilt ebenfalls, dass die Komponentenplatzierung als Vorschlag zu verstehen ist. Der Versatz um wenige Meter im näheren Umfeld ist grundsätzlich unkritisch, wenn dies aus baulichen oder sonstigen Gründen sinnvoll ist.

Abschließend wird an dieser Stelle auf die VDV-Empfehlung 825 verwiesen, die Sicherheitsradien für verschiedene Anwendungen von Wasserstoff aus dem 12. BImSchV referenziert.

Anwendung	Sicherheitsradien
H ₂ Produktion	25 m
H ₂ Busbetankung Tank/Trailer	45 m
H ₂ 200 bar Anlieferung	60 m
H ₂ 500 bar Anlieferung	90 m
Liquid H ₂ Anlieferung	160 m

Tabelle 5: VDV Empfehlung zu Sicherheitsradien für verschiedene Anwendungen von Wasserstoff

Die Sicherheitsradien sind dabei als Abstände zu schutzbedürftigen Objekten (Wohnbebauung, Bahntrassen, Straßen mit 10.000 Fahrzeugen pro Tag) definiert. Ausgehend von den umliegenden schutzbedürftigen Objekten am Standort können unkritische Bauflächen grafisch abgeleitet werden. Inwiefern eine Reduktion der Sicherheitsradien durch bauliche Schutzmaßnahmen möglich ist, muss im Rahmen einer Detailprüfung erhoben werden, wenn dies für die Realisierungsphase relevant sein sollte.

Wie aus **Abbildung 21** hervorgeht begrenzen die westliche gelegene Bundesstraße B102 sowie die östlich gelegene Wohnbebauung die möglichen Installationsorte. Aufgrund der abweichenden Sicherheitsradien für GH₂ (90 m) und LH₂ (160 m) stehen für GH₂ Tankanlagen mehr Bauflächen zur Verfügung als für LH₂. Für GH₂ müssen die orange markierten Sperrflächen eingehalten werden, während für LH₂ ebenfalls die rot markierte Fläche nicht als Installationsort genutzt werden

können. Praktisch steht für LH₂ lediglich die aktuelle Abstellhalle als Installationsort zur Verfügung, wenn durch bauliche Maßnahmen die Sicherheitsradien nicht verkleinert werden können.

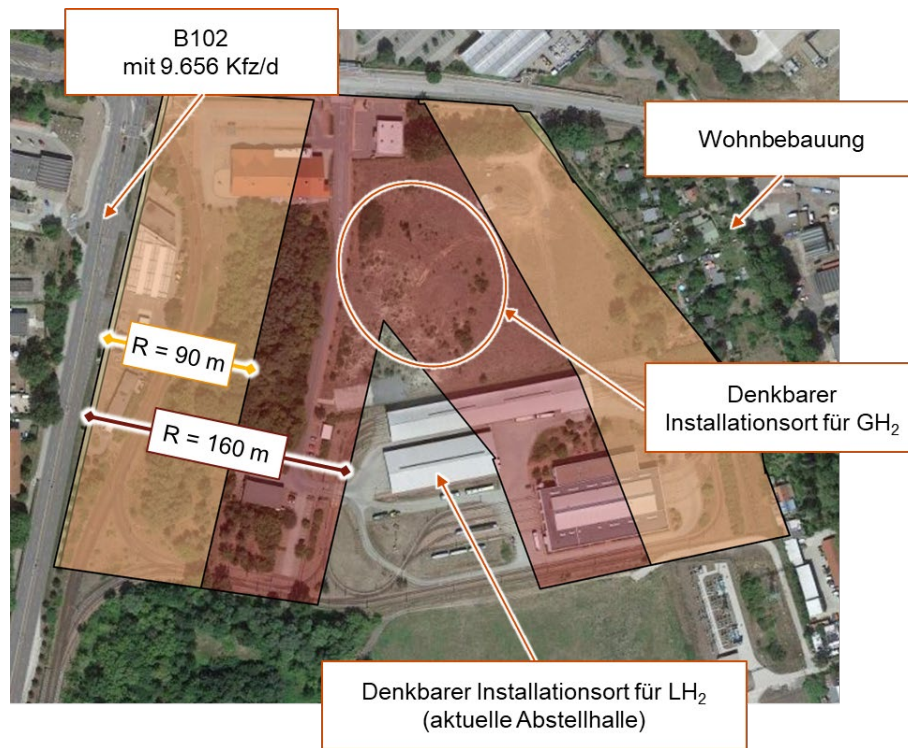


Abbildung 21: Sicherheitsradien für LH₂ Anlieferung an denkbaren Anlieferstellen

Während LH₂ Tankanlagen auf Basis der Sicherheitsradien nur am Ort der aktuellen Abstellhalle installiert werden können (parallele Fahrzeugabstellung in der Halle nicht oder nur im geringen Maß möglich), können GH₂ Anlagen auch auf der Erweiterungsfläche vorgesehen werden. Sofern dort die Fahrzeugabstellung erfolgt, kann die GH₂ Tankanlage im direkten Umfeld der Fahrzeugabstellung erfolgen, was kürzere Fahrwege zwischen Einrücken, Tanken und Abstellung erlaubt.

b) Betriebshofintegration – elektrische Ladeinfrastruktur

Integrationsoptionen im Bestand (BEV)

Um Ladepunkte im Bestand zu integrieren, steht die aktuelle Abstellhalle sowie der unmittelbar umgebende Bereich zur Debatte. Darüber hinaus sind keine permanenten Stellplätze auf dem bestehenden Betriebshofgelände realisierbar, ohne die aktuellen Fahrwege für Busse und Straßenbahnen zu stören. Die Spurbreite der aktuellen Abstellhalle liegt bei ca. 3,4 m, wobei die Nachrüstung von Ladeinfrastruktur grundsätzlich denkbar ist. Diverse neu gebaute (bzw. dahingehend umgebaute) Fahrzeugabstellungen für Batteriebusse weisen eine Spurbreite von 3,5 m auf. Aufgrund seitlich herausstehender Ladestecker (im Ladevorgang) werden die aktuellen Durchgangswerten jedoch reduziert, weshalb diese Lösung zwar denkbar, jedoch nicht als ideal betrachtet wird.

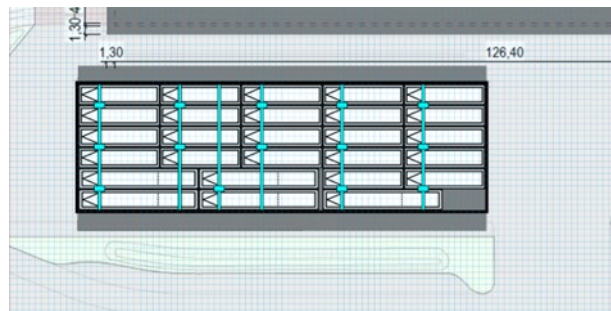


Abbildung 22: Planausschnitt Abstellhalle für BEV mit sechs Spuren

Unabhängig von aktuell geltenden rechtlichen Vorschriften wird die Wahrscheinlichkeit als hoch eingeschätzt, dass seitens der Versicherer verschärfte Anforderungen an die Abstellung von Elektrobusflotten gestellt werden. Nachrüstlösungen, ohne weitere Brandschutzmaßnahmen, sind technisch zwar darstellbar, jedoch ist davon auszugehen, dass die Versicherer auf kleinen Brandabschnitten bestehen werden, um die Verlustmenge im Brandfall zu limitieren. Im Zweifel wird eine Abstimmung mit dem Versicherer empfohlen. Für die Bewertung wird angenommen, dass auf Brandschutzmaßnahmen sinnigerweise nicht verzichtet wird.

Sofern Brandschutzmaßnahmen nachgerüstet werden sollen, wird eine Reduktion der Spurzahl als unvermeidlich betrachtet. In Fahrtrichtung nachgezogene Brandschutzwände konkurrieren mit den Fahrzeugen um die ohnehin knappen Stellflächen. Nach Vorgabe der VBB sollen bei Nachrüstung von Brandschutzwänden maximal vier Spuren in der aktuellen Abstellhalle vorgesehen werden, was ausreichende Bauräume für die mittige Schutzwand, aber auch für breitere Abstellspuren, ermöglicht. Grundsätzlich wäre auch die Vorsehung einer fünften Abstellspur außerhalb der Halle denkbar, wobei die Fahrzeuge jedoch nur teilweise unter der Dachfläche (Überstand) stehen können.

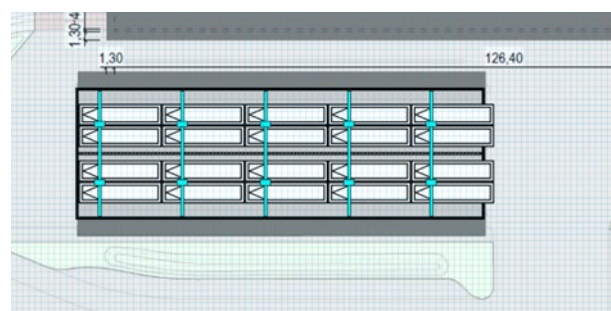


Abbildung 23: Planausschnitt Abstellhalle für BEV mit vier Spuren und Brandschutzwand

Die Darstellung mit vier Stellplatzspuren ist hier beispielhaft zu verstehen, da die Nachrüstung von Brandschutzmaßnahmen unabhängig von der tatsächlichen Spurenzahl pro Brandschutzeinheit kritisch eingeschätzt wird. Die Platzverhältnisse würden die Ausführung von vier Einzelspuren mit zwischenliegenden Brandschutzwänden grundsätzlich hergeben. Die Grundfläche der Abstellhalle scheint für Vierspurenkonzepte mit Brandschutzwänden unkritisch. Jedoch wirft die Bauweise der

Abstellhalle Folgefragen auf, die über ein entsprechendes Bau- und Brandschutzgutachten zu klären sind.



Abbildung 24: Herausforderungen für Brandschutznachrüstung

Einerseits ist in die Dachkonstruktion ein Lichtband eingezogen, was die bauliche Nachrüstung einer mittigen Brandschutzwand erschwert. Darüber hinaus kann im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie nicht bewertet werden, inwiefern die Bauweise thermische Problemstellungen nach sich zieht, insbesondere wenn die Lichtbänder im Brandfall zerstört werden könnten.

Andererseits wird die Abstellhalle durch durchgehende Stahlquerträger getragen, was vorbehaltlich eines Brandschutzgutachtens hier als kritisch eingeschätzt wird. Es ist fraglich, ob im Brandfall die Hallenstatik im ausreichenden Maß erhalten bleibt. Insgesamt wird die Nachrüstbarkeit von Brandschutzmaßnahmen in der offenen Abstellhalle als kritisch eingeschätzt.

Eine mögliche Alternative kann darüber hinaus ein Hallenabriss mit anschließendem Neubau darstellen. Grundsätzlich sind hierbei diverse Gestaltungsmöglichkeiten offen. Sofern die teilweise Beeinträchtigung aktueller Fahrwege östlich der heutigen Halle einen gangbaren Weg für die VBB darstellt, kann beispielsweise eine Schrägaufstellung realisiert werden, wenn einzelne Grünflächen (südlich der aktuellen Halle) versiegelt werden.

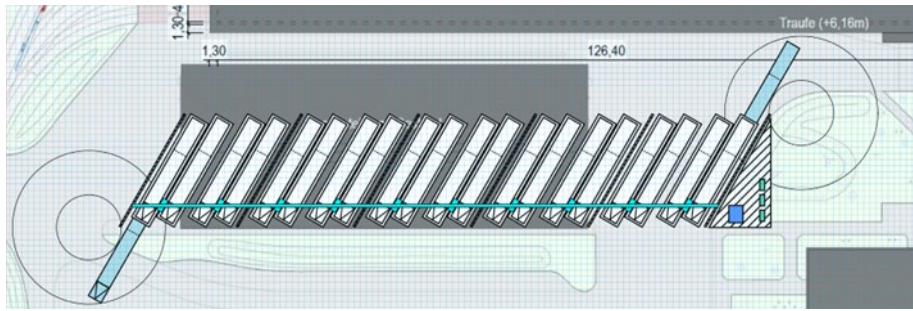


Abbildung 25: Planausschnitt Neubau Abstellhalle für BEV in Schrägaufstellung

Alternativ können Hallen mit Block-Abstellkonzepten angedacht werden, die ähnlich der heutigen Halle ausgeführt sind, wobei eine „Verlängerung“ der Abmessungen nach Osten grundsätzlich realistisch erscheint. Für Neubualternativen ist die Vorsehung von Brandschutzwänden generell unproblematisch, da diese bereits im Baukonzept vorgesehen werden können und nicht durch den Entfall von Stellspuren zunächst Bauräume geschaffen werden müssen.

Auch wenn Nachrüstlösungen auf technischer Basis denkbar sind und möglicherweise „auf den ersten Blick“ attraktiv und aufwandsarm erscheinen, birgt die elektrische Antriebstechnik diverse Neuerungen, die sich auf die Fahrzeugabstellung auswirken. Einerseits liegen physische Zusatzanforderungen an den Platzbedarf vor (herausragende Ladestecker), andererseits sind zusätzliche Platzanforderungen aufgrund des Brandschutzes zu erwarten. Die belastbarste Alternative auf den aktuellen Grundstücksflächen ist die Neubauvariante auf der aktuellen Stellplatzfläche. Aufgrund der Ausweichalternative in die nördliche Erweiterungsfläche erscheint es jedoch sinnvoll, die dort vorhandenen Bauflächen für Neubaumaßnahmen zu nutzen und einen Neubau im aktuellen Betriebshof zu vermeiden. Dieser Ansatz bietet den zusätzlichen Vorteil, Baumaßnahmen getrennt vom aktuellen Betriebsablauf auszuführen.

Integrationsoptionen in nördlicher Erweiterungsfläche

An den aktuellen Betriebshof grenzt im nördlichen Bereich eine nutzbare Erweiterungsfläche an. In Anbetracht der Fahrzeugflotte fallen die Grundflächen sehr großzügig aus, so dass auf maximal platzeffiziente Abstellungen (Blockabstellung) verzichtet werden kann. In Abstimmung mit der VBB sollen vielmehr Schrägaufstellungen untersucht werden, die eine maximale Fahrzeugeinsatzflexibilität bieten, da jeder Stellplatz jederzeit erreichbar ist. Im Kontext abweichender Ladezeiten pro Fahrzeug kann diese Flexibilität den Aufwand für die Fahrzeugdisposition merklich reduzieren.

Wie in der folgenden Plandarstellung ersichtlich wird, sind die geplanten Stellplätze nicht auf die aktuelle Fahrzeugflotte begrenzt. Vielmehr werden in ost-westlicher Richtung durchgehende Abstellblöcke vorgesehen. Aufgrund der Platzverhältnisse ist eine derartige Überdimensionierung der Stellplatzzahlen in der Erweiterungsfläche unkritisch. Im Konzept dargestellt sind 52 Stellplätze,

die entweder für Gelenk- oder für Solobusse nutzbar sind, wobei das Grundstück noch nicht maximal ausgenutzt ist. Eine Reduktion der Stellplatzkapazitäten ist problemlos möglich, wenn die Abstellungen entsprechend verkleinert werden.

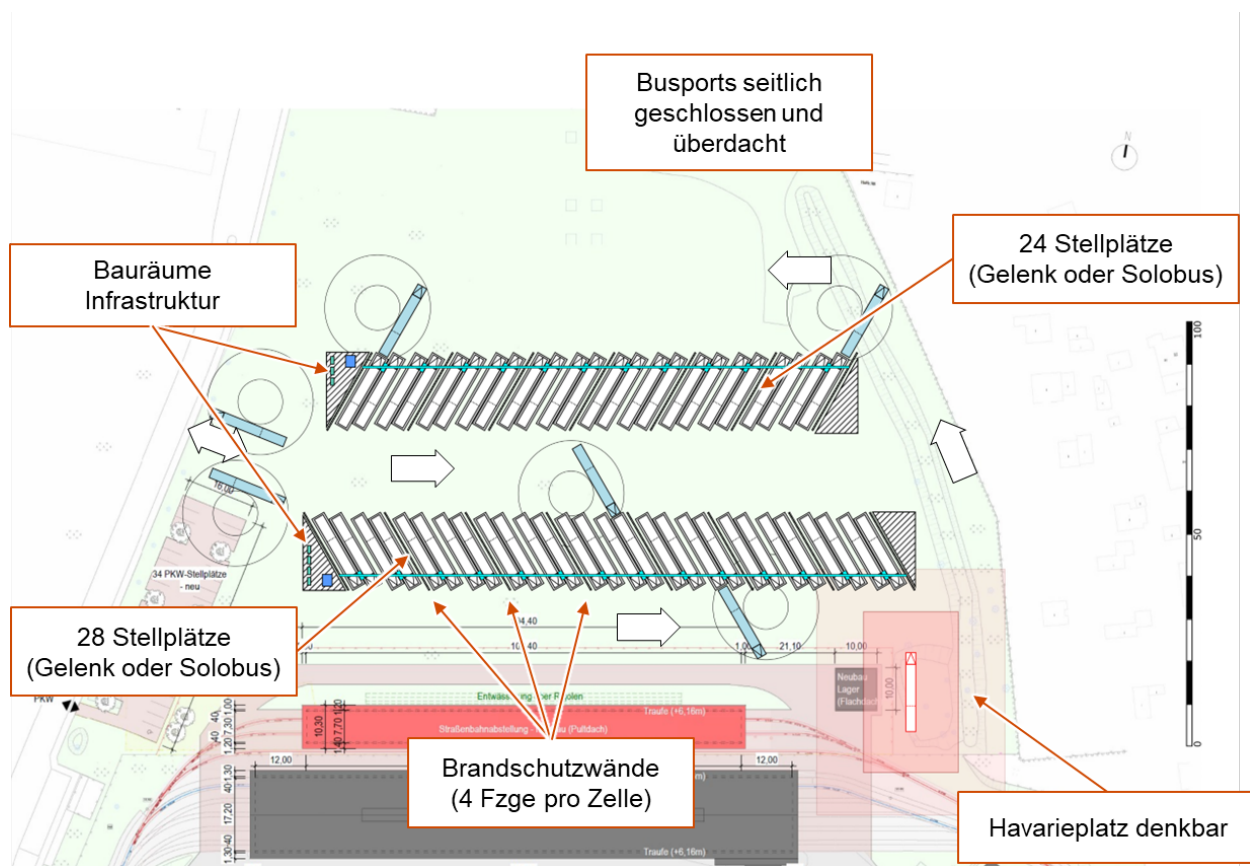


Abbildung 26: Integrationskonzept BEV auf Erweiterungsfläche

Im Konzept sind überdachte Busports vorgesehen, die an den Stirnseiten geschlossen sind, um Bauräume für die Infrastrukturkomponenten zu schaffen. Dabei sind jeweils vier Stellplätze in eine durch Brandschotts getrennt Brandschutzzelle zusammengefasst. Eine Verkleinerung der Brandschutzzellen auf weniger als vier Fahrzeuge wird nicht als sinnvoll eingeschätzt. Größere Brandschutzzellen mit mehr als vier Fahrzeugen sind ebenfalls unproblematisch. Der Havarieplatz ist hier exemplarisch platziert und kann unproblematisch auch in den nördlichen Grundstücksbereich verlagert werden.

In Summe ist das Erweiterungsgrundstück nahezu ideal, um Stell- und Ladeplätze für Batteriebusse zu installieren. Die Verlagerung der Abstellung aus dem heute genutzten Bereich heraus bietet darüber hinaus den Vorteil, dass keine Ausweichflächen während den Baumaßnahmen erforderlich sind. Sollte Ladeinfrastruktur in den Bestand nachgerüstet werden, muss die Fahrzeugflotte zeitweise ausgelagert werden, um nicht von den Baumaßnahmen beeinträchtigt zu werden.

c) Betriebshofintegration – Wasserstofftankinfrastruktur

Integrationsoptionen im Bestand (FCEV)

Im Gegensatz zur elektrischen Ladeinfrastruktur erfordern Wasserstofftankstellen zusammenhängende Flächen, um die Großkomponenten zu platzieren. Im bestehenden Betriebshof bietet nur die aktuelle Abstellhalle ausreichende Bauflächen, wenn die Abstellung ausgelagert wird. Darüber hinaus sind keine geeigneten zusammenhängenden Bauflächen im Betriebshof verfügbar.

Sofern der aktuelle Betriebshof für die Fahrzeugabstellung genutzt werden soll, gelten auch hier die Aussagen und Platzkapazitäten aus der BEV-Betrachtung. Auch wenn hier keine Ladestecker zwingend erforderlich sind, bleiben die erforderliche Grundflächen und Aussagen zum Brandschutz weiter bestehen. Wenn die Abstellhalle zukünftig zur Abstellung von FCEV genutzt werden soll, müsste die Tankanlage in die nördliche Erweiterungsfläche ausgelagert werden.

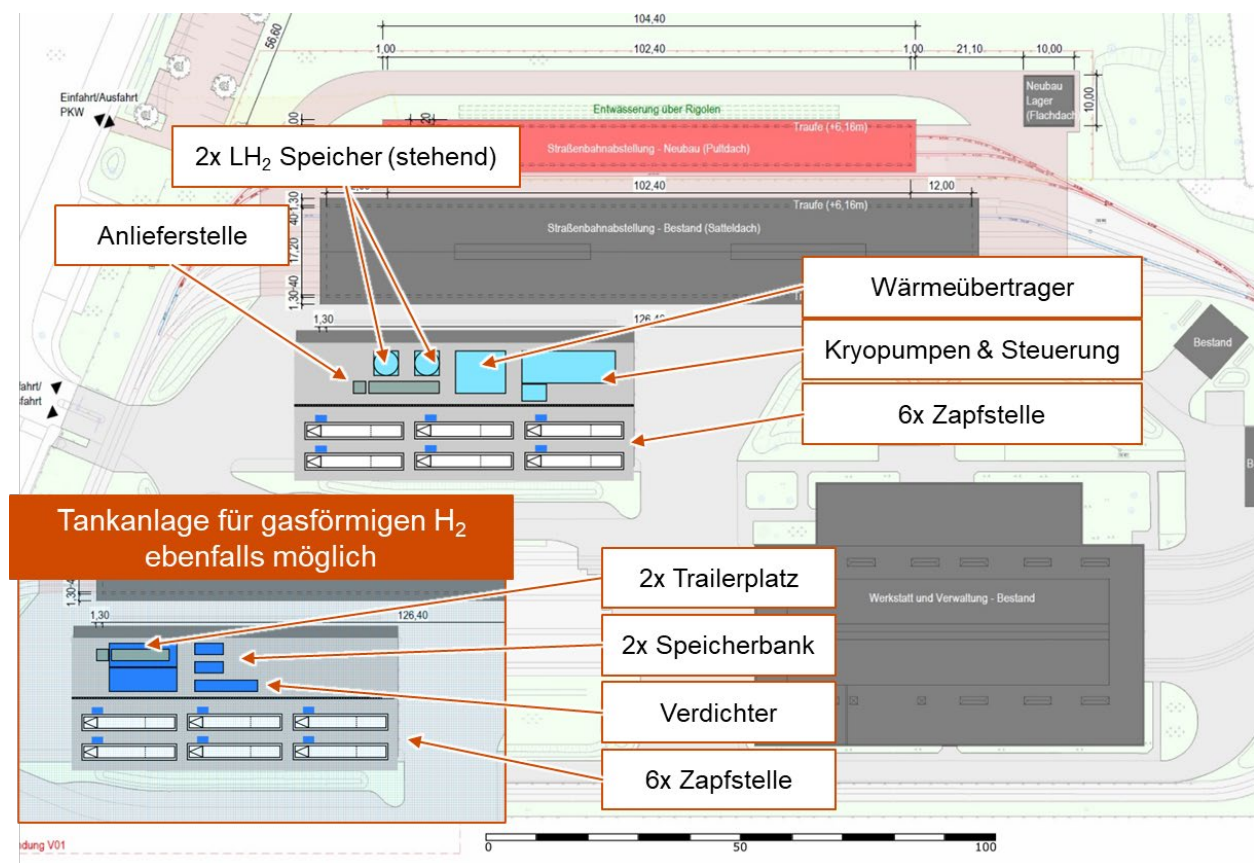


Abbildung 27: Integrationskonzept H₂ Tankanlage auf Bestandsgelände

Sofern eine LH₂ Tankanlage realisiert werden soll, steht aufgrund der Sicherheitsradien (Vgl. Abbildung 27) nur die Fläche der aktuellen Abstellhalle zur Verfügung. Wie folgend dargestellt, wird die Installation an dieser Stelle grundsätzlich als unkritisch eingeschätzt. Gleiches gilt, wenn an dieser Stelle eine GH₂ Tankstelle vorgesehen werden soll. Problematisch fallen in beiden Fällen die

Fahrwege aus, da die Tankplätze nicht in unmittelbarer Nähe zur Abstellung sind, wenn die Stellplätze in die Erweiterungsfläche ausgelagert werden müssen.

Integrationsoptionen in nördlicher Erweiterungsfläche

Aufgrund der großzügigen Platzverhältnisse kann das Abstellkonzept für BEV auch für FCEV realisiert werden. Analog zum BEV-Konzept sind auch hier mit bis zu 52 Gelenkbussen deutlich mehr Fahrzeuge im Abstellkonzept abbildbar als aktuell im Fuhrpark eingesetzt (33 Fahrzeuge).

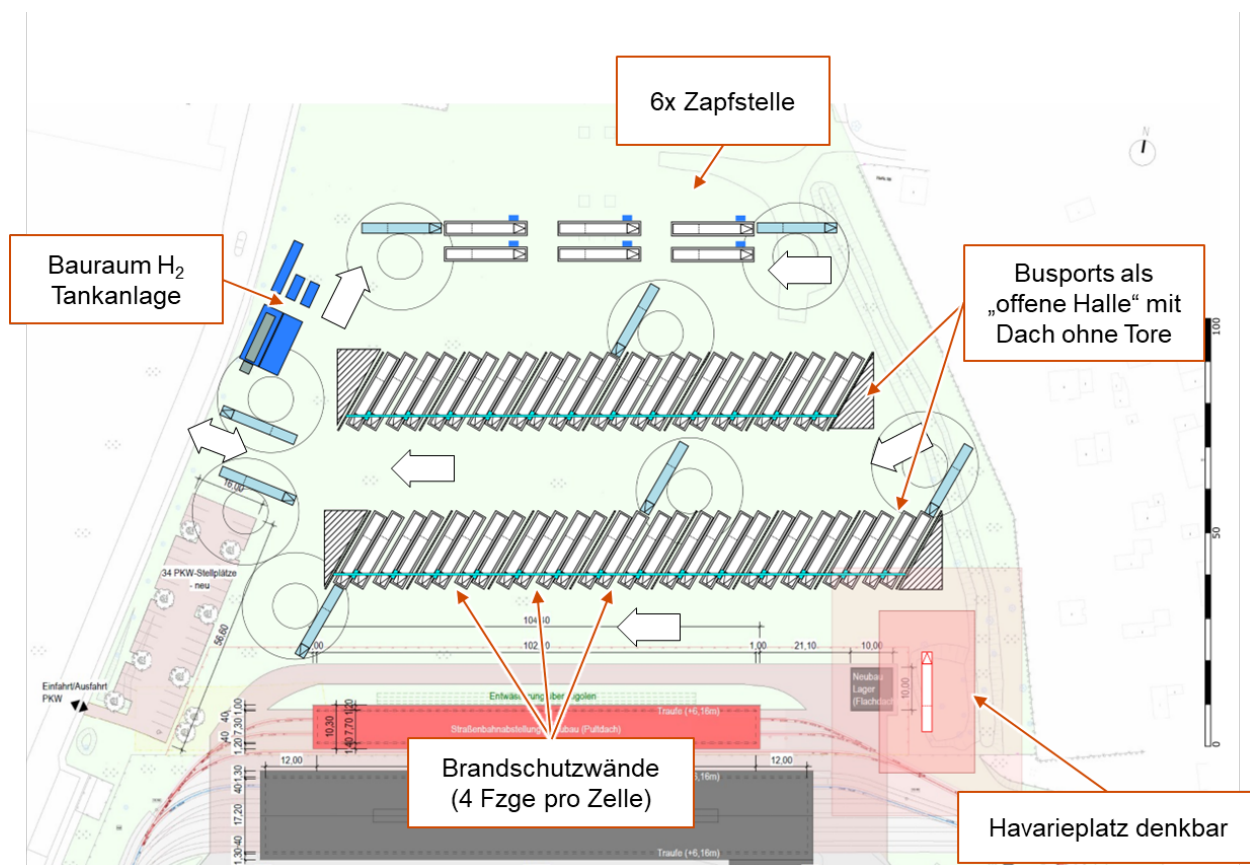


Abbildung 28: Integrationskonzept FCEV auf Erweiterungsfläche

Aufgrund der Sicherheitsabstände zur Bundesstraße im Westen, sowie zur Wohnbebauung im Osten des Grundstücks, kann in der Erweiterungsfläche ohne weitere Maßnahmen nur eine GH₂ Tankanlage realisiert werden. Im Rahmen einer Detailprüfung kann grundsätzlich untersucht werden, ob mithilfe geeigneter baulicher Schutzmaßnahmen auch geringerer Schutzradien angesetzt werden könnten, um den Bau einer LH₂ Tankanlage zu ermöglichen, wenn dieses Ziel verfolgt werden soll.

Die reinen Grundstücksmaße erlauben grundsätzlich, neben der großzügigen Abstellung von bis zu 52 Fahrzeugen, sowohl den Aufbau einer GH₂ als auch einer LH₂ Tankanlage.

d) **Zwischenfazit Betriebshofintegration**

Aufgrund der großzügigen Erweiterungsfläche, nördlich des aktuellen Betriebshofs, werden Neubauplanungen zur Abstellung emissionsfreier Antriebe variantenunabhängig als unkritisch eingeschätzt. Sowohl die Platzverhältnisse als auch der Grundstückszuschnitt sind sehr gut geeignet, um Abstellanlagen für Flotten vorzusehen, die deutlich größer als die aktuelle Flotte sind.

Auch die Installation von Lade- oder Tankinfrastruktur ist auf der Erweiterungsfläche zunächst unkritisch. Vorbehalte liegen hier lediglich aufgrund der einzuhaltenden Sicherheitsradien für Tankanlagen mit Flüssigwasserstoffanlieferung vor. Die erforderlichen Abstände von 160 m zu Wohnbebauungen oder der Bundesstraße können hier nicht gewährleistet werden. Für Tankanlagen mit gasförmiger Energieträgeranlieferung sind geringere Sicherheitsabstände erforderlich, die auf der Erweiterungsfläche eingehalten werden können.

Eine Nachrüstung von elektrischer Ladeinfrastruktur im Bestand erscheint grundsätzlich möglich, auch wenn die Parkabstände zwischen den Fahrzeugen (mit eingestecktem Ladestecker) teilweise knapp ausfallen. Entsprechende Ansätze werden eher als kurzfristige Übergangslösungen betrachtet. Mit Hinblick auf eine Flottenvollumstellung erscheint ein Neubau im Vorteil, insbesondere, da die verfügbare Freifläche hierfür nahezu ideale Voraussetzungen mit sich bringt.

Neubaumaßnahmen (oder umfassende Umbaumaßnahmen) am Ort der aktuellen Abstellhalle für die Fahrzeugabstellung erscheinen ebenfalls als möglich, aber nicht empfehlenswert. Auch hier geht die Begründung auf die verfügbaren Bauflächen im Norden zurück. Aufgrund der großen verfügbaren Bauflächen können hier Fahrwege optimiert und flexible Schrägaufstellungskonzepte verfolgt werden. Die einzige Ausnahme stellt die Installation einer LH2 Tankanlage dar. Die aktuelle Abstellhalle erscheint als einzige Position aus allen verfügbaren Grundflächen, an der die 160 m Sicherheitsradien zu schutzbedürftigen Objekten eingehalten werden können. Entsprechend wären hier Neubaumaßnahmen alternativlos, wenn das Tankstellenkonzept verfolgt werden soll und bauliche Maßnahmen zur Verkleinerung der Sicherheitsabstände nicht möglich sein sollten.

Für Integrationskonzepte auf dem aktuellen Betriebshofgelände muss ebenfalls der Aspekt Brandschutz beachtet werden. Für sämtliche Nachrüstoptionen im Bestand kann die Realisierbarkeit entsprechender Brandschutzmaßnahmen nicht abschließend beantwortet werden (Brandschutzgutachten erforderlich, zum Beispiel unter Berücksichtigung statischer Aspekte im Bestand). Auch wenn die Nachrüstung von Ladeinfrastruktur technisch denkbar ist, sind Zusatzanforderungen seitens der Versicherer sehr wahrscheinlich. Um ausreichend kleine Brandabschnitte zu gewährleisten, muss die Spurzahl verringert werden, wenn eine Brandschutznachrüstung grundsätzlich überhaupt realisierbar ist. Nur im Zuge von Neubauplanungen kann sichergestellt werden, dass der Aspekt Brandschutz reibungslos in den Ausbauplan integriert werden kann.

Sofern möglich wird empfohlen, die Abstellung für emissionsfreie Fahrzeuge in die nördliche Erweiterungsfläche zu verlegen. Als positiver Begleitaspekt kann hierbei vermerkt werden, dass die Baumaßnahmen vorbereitend parallel zum heutigen Dieselbusbetrieb ausgeführt werden können, ohne diesen zu beeinträchtigen. Für Umbaumaßnahmen im laufenden Betrieb wäre zumindest zeitweise eine Ausweichfläche zur Abstellung der Dieselbusflotte während der Baumaßnahmen erforderlich.

Sofern die Nutzung der nördlichen Erweiterungsfläche verfolgt wird, sollte die Planung grundsätzlich mindestens auf die finale Ausbaustufe ausgerichtet werden. Sofern möglich, sollten ebenfalls Reserven offengehalten werden, für Erweiterungen oder sonstiges, das heute nicht absehbar ist.

Der Ausbau der Erweiterungsfläche erfolgt sinnvollerweise schrittweise, wobei die Einzelschritte Teilstücke des final geplanten Ausbaus darstellen. Im schrittweisen Ausbau müssen sinnvolle Teilmengen gebildet werden, um Arbeiten zu bündeln und Synergien zu schaffen, ohne dabei dem Aufbau der emissionsfreien Flotte zu weit vorzueilen.

Maßgeblich ist hierfür der Beschaffungsplan in Korrelation zu im Detail ausgearbeiteten Architektenplänen für die Betriebshoferweiterung nach Norden. Großflächig wirksame Arbeiten, wie Tiefbaumaßnahmen, Netzanbindung und vergleichbares werden nach Möglichkeit vollumfänglich in frühen Projektphasen ausgeführt, um bei späteren Ausbaustufen den laufenden Betrieb auf der Erweiterungsfläche nicht zu stören.

Abhängig vom Beschaffungsplan für emissionsfreie Fahrzeuge können Teilabschnitte nach Bedarf ertüchtigt werden. Im Zuge der Detailplanung müssen dabei Teilflächen definiert werden, die baulich zusammenhängend aufgebaut werden können und gleichzeitig ausreichend Stellflächen für den Ausbauplan bereithalten. Möglicherweise können Busports jeweils vollständig oder „zur Hälfte“ als Teilstufe betrachtet werden. Belastbare Aussagen zu baulich sinnvollen Teilabschnitten überschreiten jedoch den Umfang einer Machbarkeitsstudie und müssen von entsprechenden Experten im Rahmen einer Umsetzungsplanung ausgearbeitet werden.

Elektrische Ladeinfrastruktur kann bei Notwendigkeit gut nachgerüstet werden, wenn ein Neubau entspricht ausgerichtet ist. Sofern auf Leerverrohrungen, vorbereitete Kabel- und Leitungswege, freie Installationsräume und ausreichende Energiezufuhr zugegriffen werden kann, ist der Aufbau mit kurzer Bauzeit möglich. Sofern gewünscht, kann die Erweiterungsfläche auch ohne einen schrittweisen Ausbau vollständig bebaut werden. Die Teilnutzung mit Dieselbussen ist gut darstellbar, wenn die Nachrüstung von Ladeinfrastruktur ohne markante Einflüsse auf die parallelen Betriebsabläufe möglich ist.

Es liegen keine baulichen Einschränkungen vor, die sich auf die technische Empfehlung einer Vorzugstechnologie auswirken.

IV. Migrationspfade im Kontext unterschiedlicher Umstellungsszenarien für die VBB

Im Anschluss an die betriebliche Analyse des Status quo und die technische Grobkonzeptionierung gilt es nun, das Vorhaben der Flottenumstellung auf Fuhrpark-Ebene auszuarbeiten und zu bewerten. Hierbei ist es das übergeordnete Ziel, einen Migrationspfad und damit einen Fahrzeugbeschaffungsplan für die Flottenumstellung bei der VBB mit emissionsfreien Bussen vor dem Hintergrund der aktuellen Fuhrparkstruktur und weiteren Einflussgrößen der Fahrzeugbeschaffung abzuleiten. Die Fahrzeugbeschaffungsplanung wurde zunächst im Rahmen einer Analyse des aktuellen Fuhrparks für die Jahre 2024 bis 2040 im Abschnitt F technologieunabhängig erarbeitet. Diese Planung wird nachfolgend im Kontext der Flottentransformation in verschiedenen Umstellungsszenarien mit unterschiedlichen Elektrifizierungsquoten für die Neubeschaffungen belegt, um Migrationspfade abzuleiten. Diese sind:

- Szenario 1: Vollumstellung ab 2031 unter Beibehaltung der kalkulierten Beschaffungsplanung („Vollumstellung ab 2031“),
- Szenario 2: Vollumstellung ab 2033 durch Verlagerung der geplanten Neubeschaffungen für die Jahre 2031 und 2032 in den Zeitraum ab 2033 („Vollumstellung ab 2033“),
- Szenario 3: Vollumstellung ab 2029 unter Beibehaltung der kalkulierten Beschaffungsplanung („Vollumstellung ab 2029“) sowie

Bei allen Szenarien wird die gemäß Branchenvereinbarung vorgesehene Aussetzung der CVD-Beschaffungsquoten bis einschließlich 2026 berücksichtigt. Aufgrund des Rahmenvertrages zur Beschaffung neuer Dieselsebusse bleibt die Beschaffungsplanung der VBB von den Auswirkungen der CVD-Beschaffungsquoten weitestgehend unberührt. Viel mehr wird die herstellerseitige Umstellung auf E-Busse im Rahmen der Umsetzung der VO (EU) 2024/1610 als limitierender Faktor bei der Beschaffung von Diesel-Bussen angesehen.

Aufgrund der notwendigen Vorlaufzeiten zur Schaffung der Infrastruktur und der langwierigen Beschaffungszyklen der emissionsfreien Fahrzeuge sind die Beschaffungsplanungen in den Szenarien 1 und 3 gleich. Das Szenario 3 bildet ein leicht verzögertes Szenario, was insbesondere die organisatorischen und finanziellen Herausforderungen eines späteren Beginns der Vollumstellung aufzeigen soll.

Die Migrationspfade der drei Szenarien wurden entsprechend der Zielsetzung zusammen mit der VBB diskutiert, bewertet und im Projektverlauf sukzessive überarbeitet. Ergänzend zu den erarbeiteten möglichen Migrationspfaden wird zudem auch das CO₂-Minderungspotenzial für die jeweiligen Szenarien betrachtet.

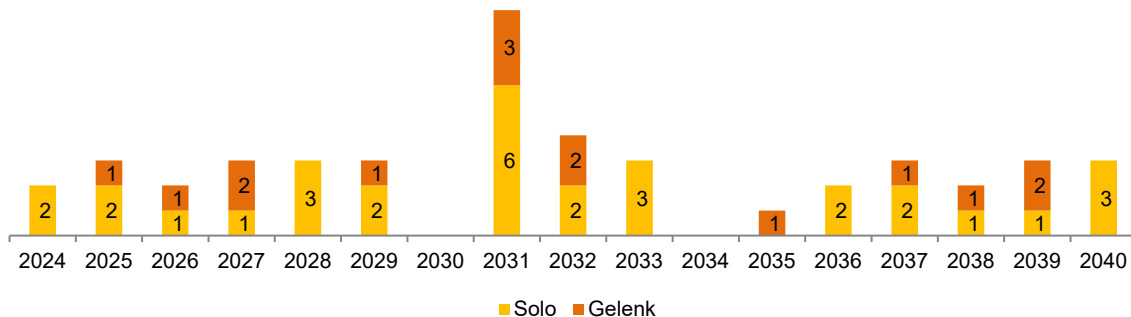


Abbildung 29: Beschaffungsplanung der VBB bis zum Jahr 2040: Anzahl Fahrzeuge nach Bauart

Auf diese Beschaffungsplanung werden nun die unterschiedlichen Umstellungsszenarien der Flotentransformation angewendet. Hierfür werden unterschiedliche Beschaffungsquoten auf die Neubeschaffungen angesetzt. Ziel ist es, die Beschaffungsplanung gemäß Umstellungsszenario für die Jahre 2024 bis 2040 abzuleiten und in einem nächsten Schritt die Auswirkungen auf den Fuhrpark der VBB darzustellen. Bei einem Betrachtungshorizont bis zum Jahr 2040 werden bei keinem Szenario Fahrzeug- oder Fahrerbedarf induziert.

1. Umstellungsszenario 1: Vollumstellung ab 2031

Die Erfüllung der beiden CVD-Teilquoten „sauber“ und „emissionsfrei“ innerhalb der Fahrzeugbeschaffung stellt mit Inkrafttreten des SaubFahrzeugBeschG seit August 2021 die zu erfüllende Mindestanforderung an die Beschaffungsplanung für die entsprechenden Stadtbusse der VBB dar. Bis einschließlich des Jahres 2025 müssen jeweils 22,5 % der beschafften Fahrzeuge als sauber bzw. emissionsfrei gelten. Ab dem Jahr 2026 (und vorerst bis zum Jahr 2030) erhöhen sich die Teilquoten dann auf jeweils 32,5 %. Unter die „saubere“ Teilquote fallen, wie dargestellt, beispielsweise der Antrieb auf Basis von HVO100. Eine praktikable Lösung ist zum derzeitigen Stand die Erfüllung der sauberen CVD-Teilquote mit HVO100-Kraftstoffen, die wie konventioneller Diesel regulär bei Bestandsfahrzeugen, aber auch insbesondere bei neu zu beschaffende Dieseln getankt und genutzt werden können. Die Verwendung von HVO100-Kraftstoffen hat demnach den Vorteil, dass weiterhin konventionelle Dieseln mit Verbrennungsmotor beschafft werden können, die durch die HVO100-Verwendung die saubere CVD-Teilquote erfüllen. Für die „emissionsfreie“ Teilquote sind im Wesentlichen der batterieelektrische Antrieb und der Antrieb mit Brennstoffzelle von Bedeutung.

Bei der Verrechnung der Quoten wird im Ergebnis stets auf ganze Fahrzeuge aufgerundet. Zudem wird zunächst eine möglichst kontinuierliche und nicht gebündelte Beschaffung der Fahrzeuge innerhalb der zweiten CVD-Periode und darüber hinaus vorgesehen, um an der technischen Entwicklung partizipieren und Lerneffekte generieren zu können. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass sich die Verteilung der entsprechenden E-Bus-Beschaffungen gemäß den CVD-

Quoten innerhalb der beiden Referenzperioden frei gestalten lässt. Der erste E-Bus wird in diesem Szenario im Jahr 2031 beschafft. Mit dem im Jahr 2030 auslaufenden Rahmenvertrag fallen die Neubeschaffungen ab 2031 nicht mehr unter die Vorgaben der CVD. Für das Umstellungsszenario „Vollumstellung ab 2031“ ergeben sich somit die nachfolgend dargestellten Beschaffungen bis zum Jahr 2040.

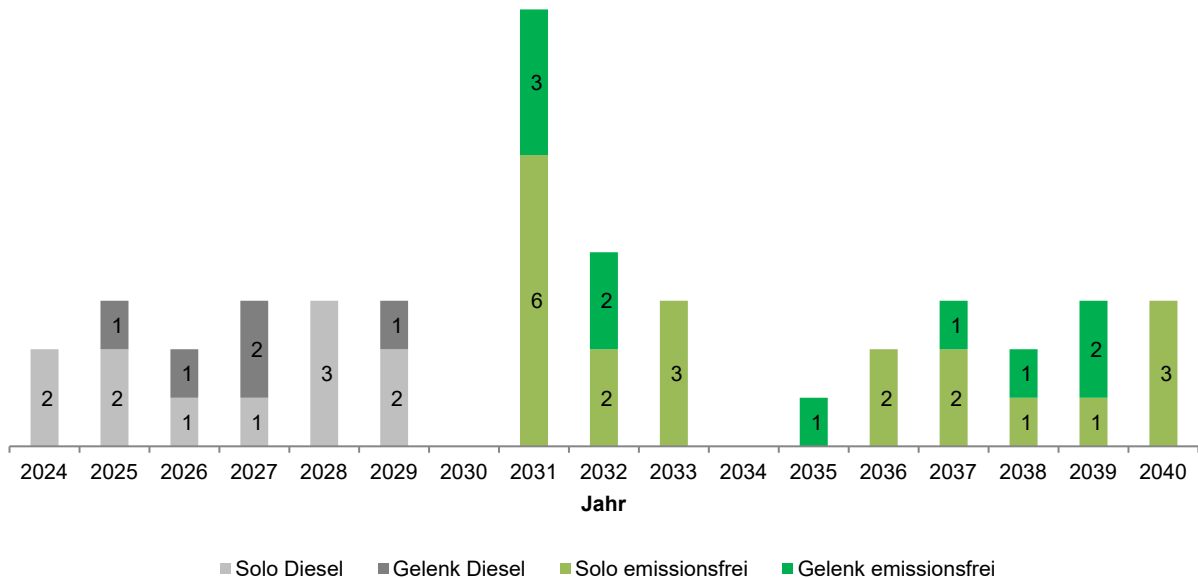


Abbildung 30: Beschaffungen der VBB im Vollumstellungsszenario 2031

Unter der Annahme, dass aufgrund der herstellerseitigen Begrenzung der absetzbaren nicht-emissionsfreien Fahrzeuge ab 2030 nur noch schwer herkömmliche Dieselsebusse erworben werden können, wird davon ausgegangen, dass ab 2030 defacto nur noch emissionsfreie Busse am Markt verfügbar sein werden. Dadurch werden ab 2030 nur noch emissionsfreie Neubeschaffungen im Rahmen der Beschaffungsplanung berücksichtigt. Im Jahr 2035 wäre die Flotte zu gut 51 % elektrifiziert (11 Solobusse, 6 Gelenkbusse). Im Jahr 2040 sind 90 % der Flotte der VBB elektrifiziert, im Jahr 2042 ist dieser dann vollständig auf E-Busse umgestellt. Dieselsebusse bilden in diesem Szenario also noch bis zum Ende des laufenden Jahrzehnts das Rückgrat des VBB-Bus-Fuhrparks. Die folgende Abbildung zeigt die Entwicklung der Zusammensetzung des Fuhrparks bis zum Jahr 2040.

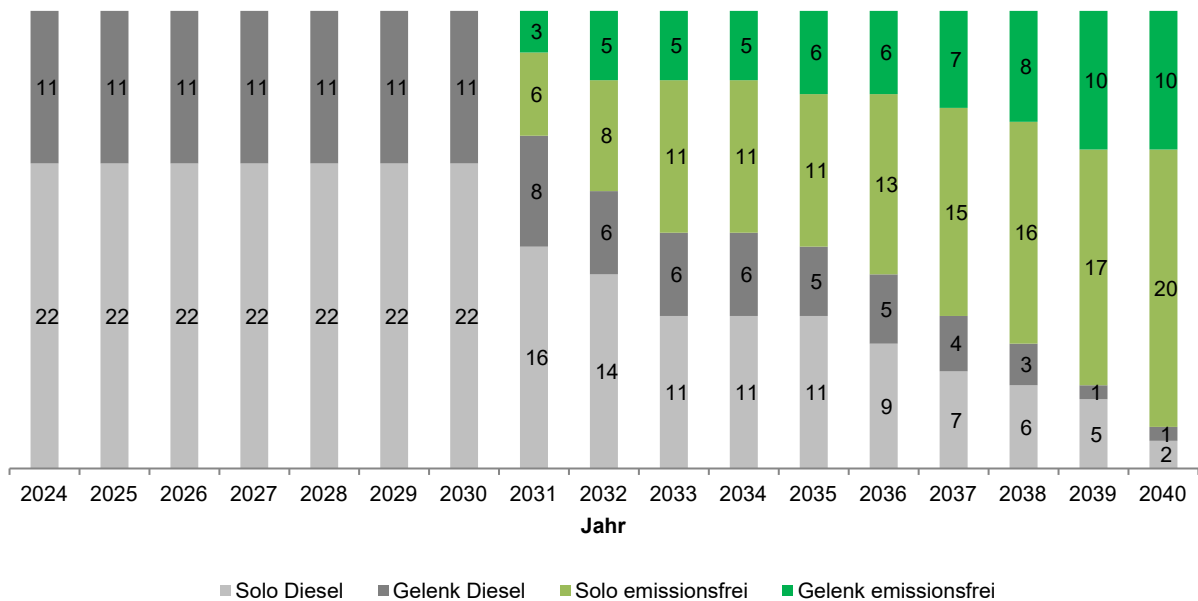


Abbildung 31: Entwicklung der VBB Fuhrparkstruktur bis 2040 im Vollumstellungsszenario 2031

Im Rahmen einer Szenarioanalyse soll zudem geprüft werden, welche Auswirkungen ein Verkauf der E-Busse nach einer Nutzungsdauer von sechs Jahren hat. Dabei wird ein mit dem Auftraggeber abgestimmter Verkaufswert in Höhe von 25 % des Neuanschaffungspreises angenommen. Durch den Verkauf nach sechs Jahren wird der anstehende Batteriewechsel umgangen. Durch die geringere Nutzungsdauer der E-Busse werden mehr Beschaffungsvorgänge angestoßen, wodurch sich insbesondere die Beschaffungsplanung in Vergleich zu der Ausgangsplanung verändert.

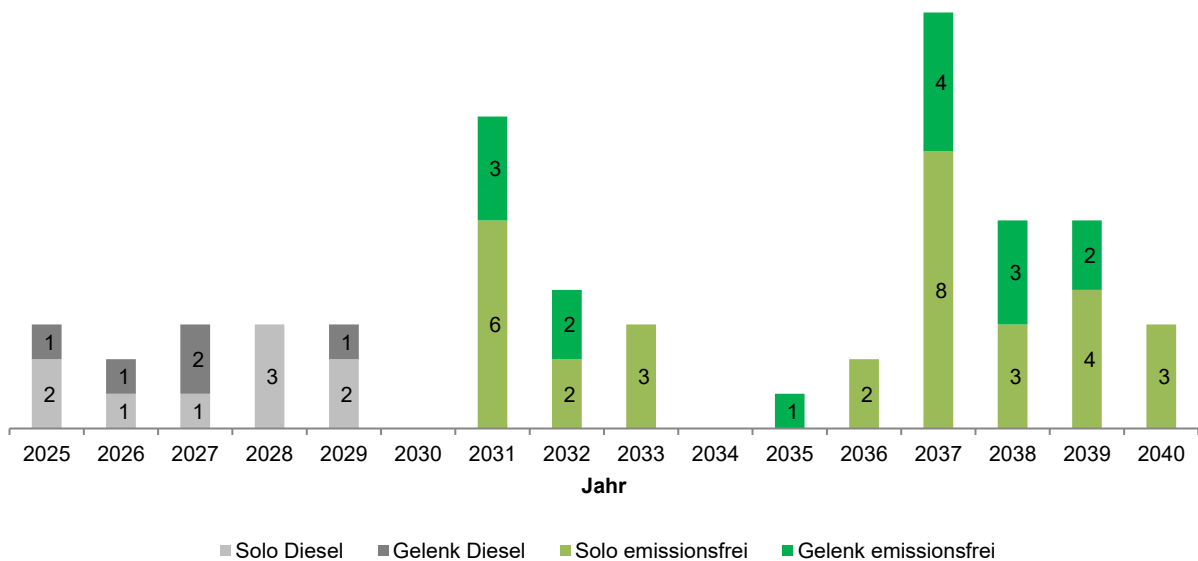


Abbildung 32: Beschaffungen der VBB im Vollumstellungsszenario 2031, Verkauf der E-Busse nach sechs Jahren mit einem Restwert von 25 %

Da bei dem benannten Szenario lediglich Neubeschaffungen von E-Bussen betrachtet werden, kommt es zu keinen Änderungen der Zusammensetzung des Fuhrparks im Vergleich zum Referenzszenario.

2. Umstellungsszenario 2: Vollumstellung ab 2033

Das zweite Umstellungsszenario lässt sich, trotz der gleichen Anzahl zu beschaffender Busse bis 2040, hinsichtlich des Umstellungstempos nach dem vorherigen Szenario einordnen und ist somit anspruchsvoller in Bezug auf Komplexität und Projektorganisation. Bis Ende des Jahres 2030 werden analog zu Szenario 1 aufgrund des laufenden Rahmenvertrags keine Beschaffungen von emissionsfreien Bussen vorgenommen. Abweichend zum vorherigen Szenario werden 2031 und 2032 keine Neubeschaffungen durchgeführt. Dadurch werden im Vergleich zum Szenario 1 die gleichen Beschaffungskapazitäten in einem kürzeren Zeitraum umgesetzt. Dementsprechend werden die bestehenden Dieselbusse nach Ablauf des Rahmenvertrags durchschnittlich länger genutzt als bisher. Dadurch müssen erst ab 2033 die ersten emissionsfreien Busse beschafft werden. Dadurch ergibt sich ab 2033 ein stärkerer Hochlauf der emissionsfreien Anteile im Fuhrpark im Vergleich zu Szenario 1.

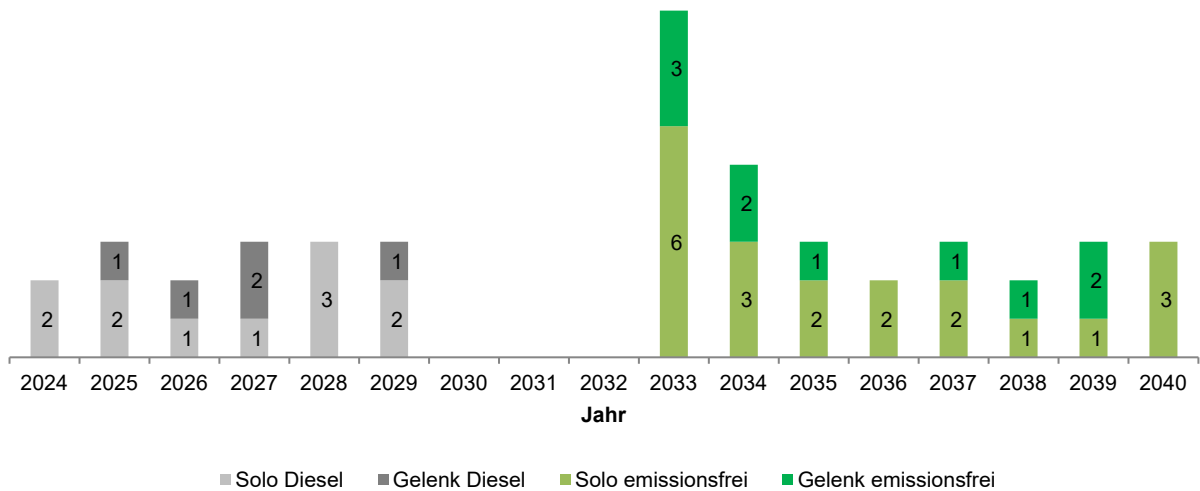


Abbildung 33: Beschaffungen der VBBR im Rahmen des Vollumstellungsszenarios 2033

Im Umstellungsszenario 2 sind somit gut 50 % des Fuhrparks der VBBR bis zum Jahr 2035 elektrifiziert. Ab dem Jahr 2042 ist demnach eine reine E-Bus-Flotte möglich. Insgesamt sorgt diese Umstellungsstrategie für ein abruptes Wachstum des E-Bus-Anteils und ermöglicht so eine zügige Umstellung der betrieblichen Aspekte. Die Auswirkung auf die Fuhrparkstruktur zeigt die folgende Abbildung.

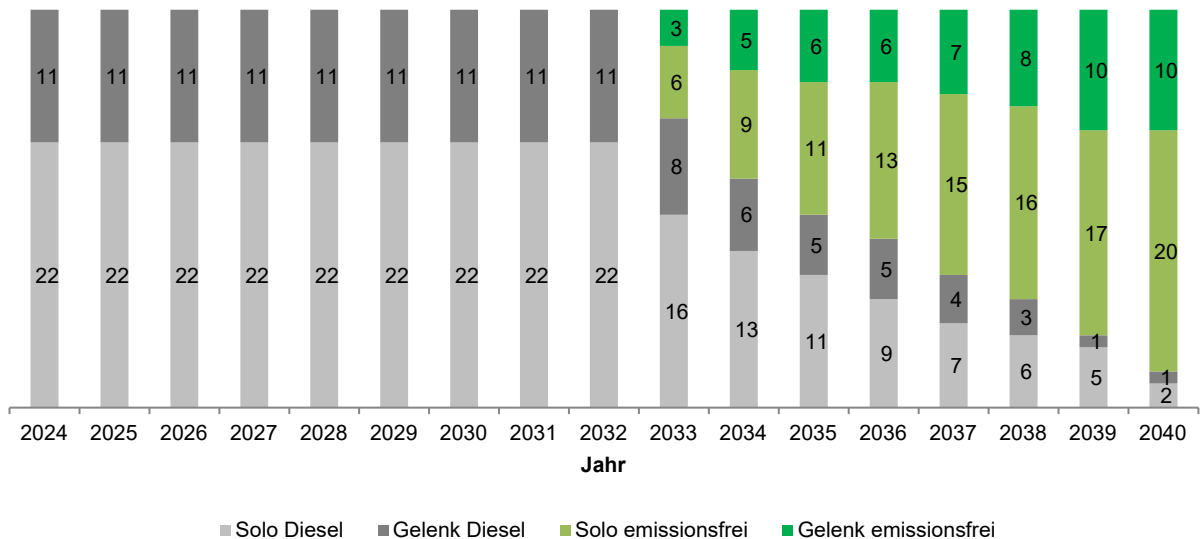


Abbildung 34: Entwicklung der VBBR Fuhrparkstruktur innerhalb des Vollumstellungsszenarios 2033

Analog zu Umstellungsszenario 1 wurde auch hier ein Szenario gerechnet, welches einen Verkauf der emissionsfreien Busse nach sechs Jahren mit einem Restwert von 25 % berechnet. Dabei ergibt sich die nachfolgend dargestellte Beschaffungsplanung:

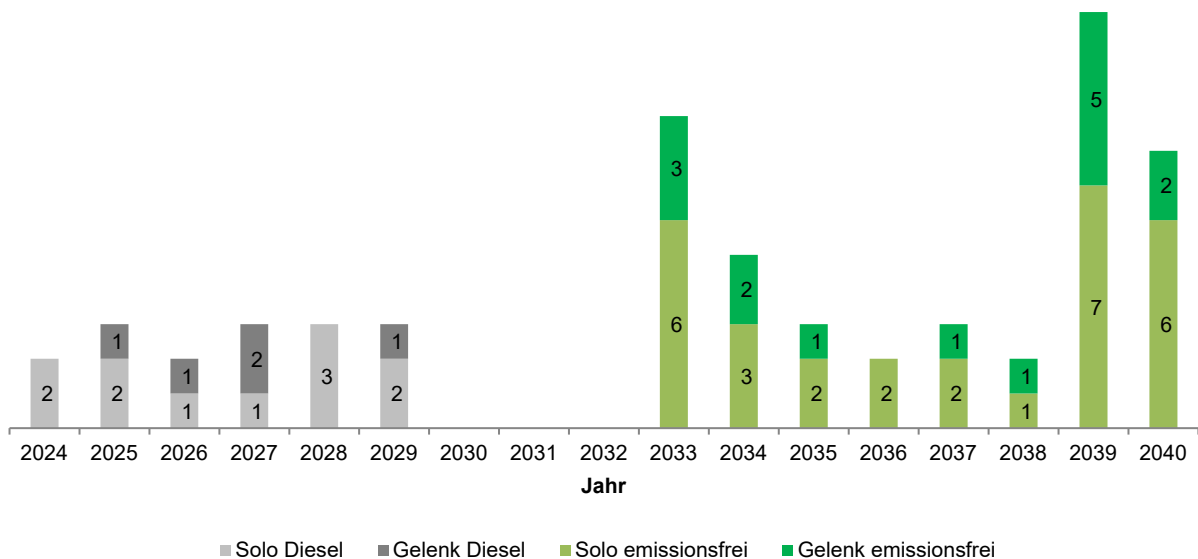


Abbildung 35: Beschaffungen der VBB im Vollumstellungsszenario 2033, Verkauf der E-Busse nach sechs Jahren mit einem Restwert von 25 %

Da bei dem benannten Szenario lediglich Neubeschaffungen von E-Bussen betrachtet werden, kommt es zu keinen Änderungen der Zusammensetzung des Fuhrparks im Vergleich zum Referenzszenario.

3. Umstellungsszenario 3: Vollumstellung ab 2029

Das dritte Umstellungsszenario sieht eine Vollumstellung ab dem Jahr 2029 vor. Ab dem Jahr 2029 erfolgt die ausschließlich emissionsfreie Neubeschaffung von Solo- und Gelenkbussen im Stadt- und Überlandverkehr. Das Vollumstellungsszenario bietet den schnellsten Pfad in die Elektromobilität bei der VBB. Die letzten Diesel-Solobusse könnten bereits im Jahr 2040 ausgeflottet werden.

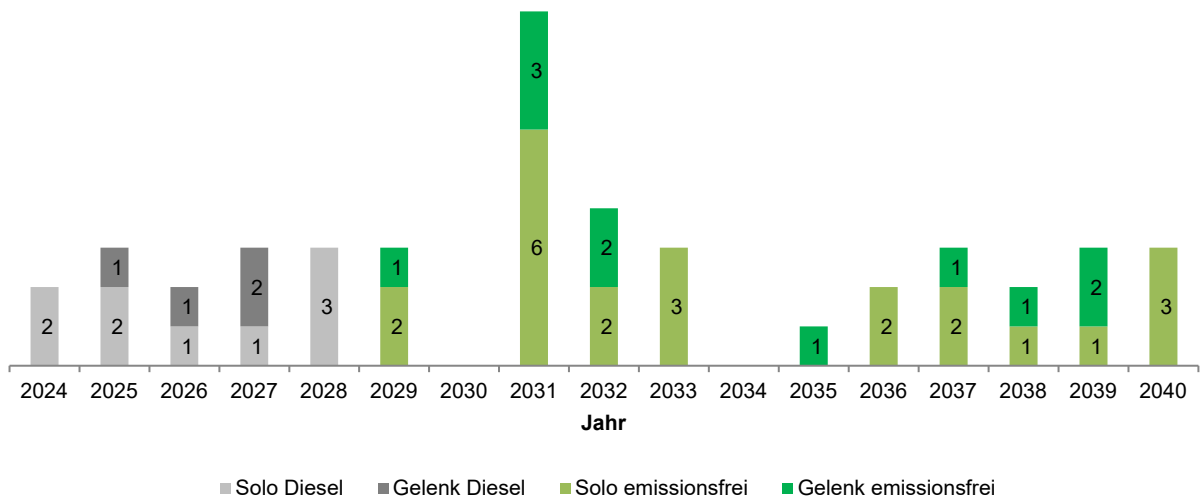


Abbildung 36: Beschaffungen der VBBR im Rahmen des Vollumstellungsszenarios 2029

Bereits im Jahr 2031 könnten so 36 % der Busse der VBBR mit einem emissionsfreien Antrieb ausgestattet sein. Im Jahr 2035 würde dieser Anteil auf ca. 61 % steigen und ab dem Jahr 2040 könnte die VBBR ausschließlich emissionsfreie Busse einsetzen. Diese Umstellungsstrategie sorgt für ein schnelles Wachstum des E-Bus-Anteils und ermöglicht dennoch eine sinnvolle sukzessive Partizipation an der laufenden technischen Entwicklung der E-Busse durch die kontinuierliche Beschaffung. Die folgende Abbildung zeigt die Entwicklung der Fuhrparkstruktur bis zum Jahr 2040.

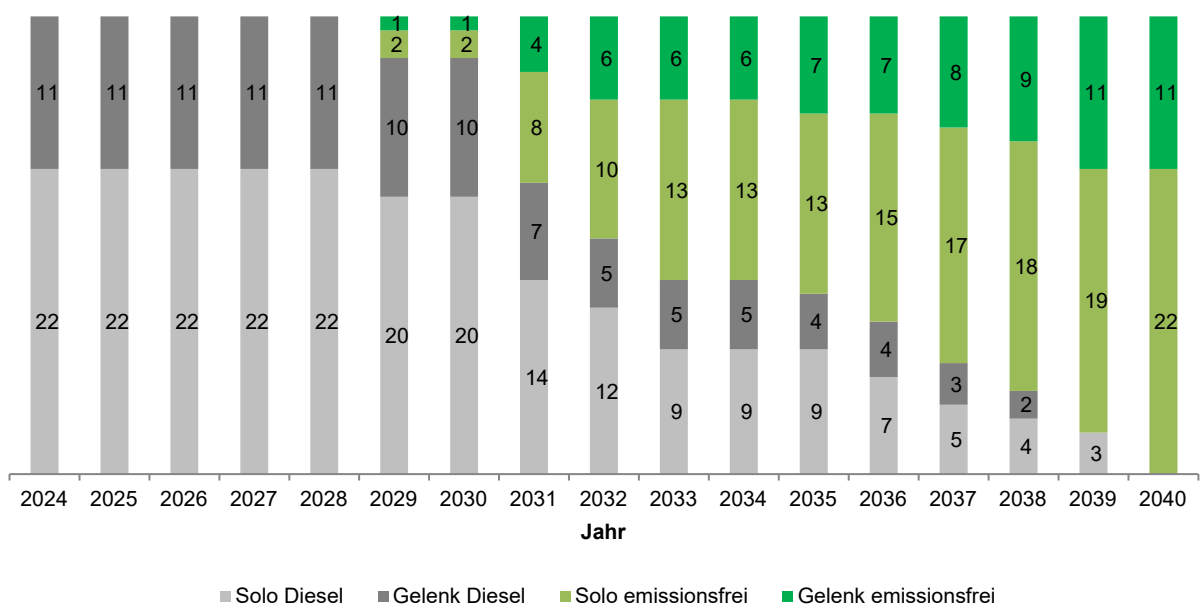


Abbildung 37: Entwicklung der VBBR Fuhrparkstruktur innerhalb des Vollumstellungsszenarios 2029

Analog zu den vorherigen Umstellungsszenarien soll auch bei dem Vollumstellungsszenario ab 2029 ein Szenario mit einem Verkauf der E-Busse nach sechs Jahren zu einem Restwert von 25 % gerechnet werden. Hierbei kommt es insbesondere durch den frühen Beginn der Umstellung im Jahr 2029 zu einer signifikanten Erhöhung der Beschaffungsprozesse im Vergleich zu den bereits untersuchten Umstellungsszenarien.

E. Ökonomische Betrachtung

Alle bisher erarbeiteten Maßnahmen und Szenarien der geplanten Flottentransformation werden nun abschließend zusammengeführt und betriebswirtschaftlich bewertet. Das übergeordnete Ziel ist es, die Aufwendungen der unterschiedlichen Migrationspfade für den Untersuchungszeitraum zwischen den Jahren 2024 und 2040 gegenüber einem fortgeschriebenen Status quo in Form eines Bezugsszenarios „100% Diesel“ zu vergleichen. Diese Fortschreibung ist indessen rein fiktiv und berücksichtigt nicht die rechtlichen Anforderungen der CVD und ist folglich auch nicht legal umsetzbar.

Das **Bezugsszenario** „100% Diesel“ bildet dabei eine Fortsetzung des Status quo ab. In diesem Szenario werden weiterhin nur Dieselsebusse beschafft und betrieben. Durch Vergleich der Szenarien für die Flottentransformation mit diesem Bezugsszenario werden die Auswirkungen auf die Kosten bzw. den Zuschussbedarf sichtbar, die sich im Zuge der Flottentransformation ergeben.

I. Übersicht bestehender relevanter Förderprogramme

Eine wesentliche Herausforderung für die Umstellung auf Elektrobusse sind neben den betrieblichen Aspekten die hohen Investitionskosten. Aktuell übersteigen allein die Anschaffungskosten für einen Elektrobus diejenigen für einen konventionellen Dieselsebus um mehr als das Doppelte. Darüber hinaus fallen weitere Investitionskosten, unter anderem für die Schaffung der Ladeinfrastruktur, den Umbau des Betriebshofes und der Werkstätten sowie für deren elektrische Ertüchtigung und den Anschluss an das Stromnetz an. Der Umfang des ohnehin schon notwendigen Finanzierungsbedarfs für die Fahrzeuge erhöht sich somit noch weiter.

Zur Unterstützung der Aufgabenträger und Verkehrsunternehmen bei der Umstellung auf saubere und emissionsfreie Busantriebe bieten der Bund und die Bundesländer verschiedene Förderprogramme an. Es handelt sich hierbei teilweise nicht nur um ÖPNV-spezifische Förderprogramme, die auf die Förderung von Bussen mit batterieelektrischen, Brennstoffzellen- oder Hybridantrieben gerichtet sind, sondern auch um finanzielle Unterstützung bei der Erstellung von Elektromobilitätskonzepten, Ladeinfrastruktur oder zusätzlich notwendiger Werkstatteinrichtung.

1. Förderprogramme auf Bundesebene

Die Förderung der Elektromobilität im ÖPNV in Deutschland spielt mit Blick auf die Förderlandschaft aktuell eine wichtige Rolle. Sowohl das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nuklearer Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) und ein Zusammenschluss der beiden Bundesministerien für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) und BMUV haben in der Vergangenheit über verschiedene Förderrichtlinien in

unterschiedlichen Ausprägungen zur Förderung von Bussen mit elektrischen Antrieben, den notwendigen Ladeinfrastrukturen und Werkstatteinrichtungen aufgerufen. Die folgende Tabelle stellt die jeweiligen Einzelheiten der Förderrichtlinien dar. Die „Förderung der Anschaffung von Elektrobussen im öffentlichen Personennahverkehr“ des BMUV ist zum Ende Dezember 2021 ausgelaufen. Insgesamt wurden im Rahmen des Programms ca. 1.600 E-Busse gefördert (Förderung als Zuschuss mit 80 % der Fahrzeug-Investitionsmehrkosten und 40 % der Investitionsausgaben für Ladeinfrastruktur). Die gemeinsame vorhabenbezogene Richtlinie des BMUV „Förderinitiative zur Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität“, die die Programme „Erneuerbar Mobil“ bzw. „Elektro-Mobil“ vereint, fördert gezielt Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Bereich der Elektromobilität in Deutschland und ist für die weiteren Betrachtungen innerhalb dieses Vorhabens nachrangig zu beurteilen. Die Kumulierbarkeit der folgenden Förderungen ist im Einzelfall zu prüfen.

Richtlinie zur Förderung alternativer Antriebe von Bussen im Personennahverkehr

Mit der „Richtlinie zur Förderung alternativer Antriebe von Bussen im Personennahverkehr“ veröffentlichte das BMDV im September 2021 ein umfangreiches Förderprogramm mit einem Fördervolumen von zunächst 1,25 Mrd. € bis zum Jahr 2024. Gefördert wurden Batterie-, Brennstoffzellen- und Batterieoberleitungsbusse sowie biomethanbetriebene Busse, sowie dafür erforderliche Infrastruktur und Machbarkeitsstudien. Mit der Richtlinie wurden gezielt Verkehrsbetriebe gefördert. Im Rahmen des ersten Förderaufrufes wurden 900 Mio. € bereitgestellt, die Antragsfrist endete zum 5. Oktober 2021.

Im Detail waren folgende Bestandteile über diese Förderrichtlinie förderfähig:

- die Beschaffung und Umrüstung von Bussen mit alternativen Antrieben sowie die Beschaffung der zum Betrieb notwendigen Infrastruktur mit:
 - 80 % der Investitionsmehrkosten zur Dieselreferenz für Batterie-, Brennstoffzellen- und Batterieoberleitungsbusse,
 - 40 % Investitionsmehrkosten zur Dieselreferenz für Bio-Gasbusse,
 - 40 % der Investitionsvollkosten für die zum Betrieb notwendige, nicht öffentliche Infrastruktur (keine Elektrolyseure) sowie
- Machbarkeitsstudien.

Aufgrund der gespannten Haushaltslage des Bundes wurde das Förderprogramm jedoch Ende des Jahres 2023 eingestellt und es werden keine weiteren Mittel daraus ausgeschüttet.

2. Förderprogramme EU-Ebene

Auch auf EU-Ebene existieren Programme zur Förderung von E-Bussen im ÖPNV und entsprechend zugehöriger Ladeinfrastruktur. Hier ist in erster Linie der Europäische Fond für regionale Entwicklung (EFRE) zu nennen. Über dieses Programm sind bereits einige E-Busse in Deutschland gefördert worden. Die Förderung erfolgt als Zuschuss und ist insgesamt abhängig von Art und Umfang des Vorhabens. Maximal werden jedoch 50 % der zuwendungsfähigen Gesamtausgaben gefördert.

Die im Anhang beigefügte Tabelle gibt abschließend einen detaillierten Überblick über relevante Förderprogramme auf Bundes- und EU-Ebene.

3. Förderung auf Landesebene

Das Land Brandenburg bietet zum Bearbeitungszeitpunkt der Machbarkeitsstudie keine zielgerichteten Förderprogramme für Verkehrsunternehmen an, welche der CVD unterliegen. Eine eigene Richtlinie zur Beschaffung von Bussen mit alternativen Antrieben existiert aktuell nicht.

II. Kaufmännische Bewertung der Dekarbonisierung der Flotte der VBB

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die VBB dargestellt. Dies erfolgt getrennt für die unterschiedlichen Antriebsarten, also zunächst für eine reine Batteriebusflotte und anschließend für eine Flotte mit Brennstoffzellenbussen. Eine Mischflotte wird in Abstimmung mit der VBB auf Grund einer zu hohen Komplexität der Umstellung ausgeschlossen und daher nicht betrachtet. Im Anschluss an das Ergebnis der Fortschreibung des Status quo in Form des beschriebenen Referenzszenarios werden die Mehrkosten der drei Umstellungsszenarien (Vollumstellungsszenario 2031, Vollumstellungsszenario 2033, Vollumstellungsszenario 2029) aufgezeigt. Somit werden die Auswirkungen der unterschiedlichen Migrationspfade einer möglichen Flottentransformation auf das betriebliche Ergebnis der VBB sichtbar. Die Kosten möglicher zusätzlicher Betriebshofflächen sind nicht Bestandteil der folgenden kaufmännischen Bewertung der Flottentransformation der VBB.

1. Kostenbetrachtungen für eine Umstellung mit Batteriebussen

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die VBB dargestellt. Hierbei liegt der Fokus auf den Mehrkosten der unterschiedlichen Szenarien für eine Umstellung mit Batteriebussen gegenüber dem fortgeschriebenen Status quo.

Die Mehrkosten der unterschiedlichen Szenarien bei der Flottenumstellung mit Batteriebussen zeigen bei der VBB deutliche Unterschiede. Diese sind auf die unterschiedlichen Flottenstärken innerhalb der Szenarien zurückzuführen. Die Mehrkosten des Vollumstellungsszenarios ab 2031

bewegen sich so bei der VBBr nach anfänglichen Kosten für Vorbereitung und Planung bei durchschnittlich 1,6 Mio. € pro Jahr (ab 2035).

Bis zum Jahr 2030 sind die Beschaffungen und jährlichen Kosten des Vollumstellungsszenarios ab 2033 im Durchschnitt 29 T€ günstiger als im Vollumstellungsszenario ab 2031. Mit dem späteren Start der Flottenumstellung fallen die Kosten verzögert an. Zudem werden nach Beginn der Umstellung signifikante Mehrkosten aufgrund des höheren Beschaffungsvolumens verursacht. Jedoch werden durch den Beginn der Umstellung im Jahr 2033 weniger Batteriewechsel im Vergleich zum Jahr 2031 betrachtet. Im Jahr 2039 entstehen so Einsparungen in Höhe von 94 T€.

Durch den frühen Beginn der Umstellung beim Vollumstellungsszenario ab 2029 wird ein Kostenanstieg hervorgerufen. Ab 2031 liegen die jährlichen Kosten für das CVD++-Szenario durchschnittlich ca. 305 T€ im Jahr höher als beim Vollumstellungsszenario ab 2033, wobei die höheren Kosten vor allem zwischen den Jahren 2028 und 2031 entstehen.

Ab dem Jahr 2037 fallen zudem die ersten Batterietausche an, die die Kosten ab diesem Jahr und in den folgenden Jahren zusätzlich deutlich steigern. Für das Jahr 2035 können so Mehrkosten für das Vollumstellungsszenario ab 2029 unter den angenommenen Prämissen von etwa 117 T€ ggü. dem Vollumstellungsszenario ab 2033 bzw. 1,4 Mio. € ggü. dem Referenzszenario abgeschätzt werden.

Die folgende Abbildung zeigt die Entwicklung der Mehrkosten gegenüber dem Status quo bis zum Jahr 2040.

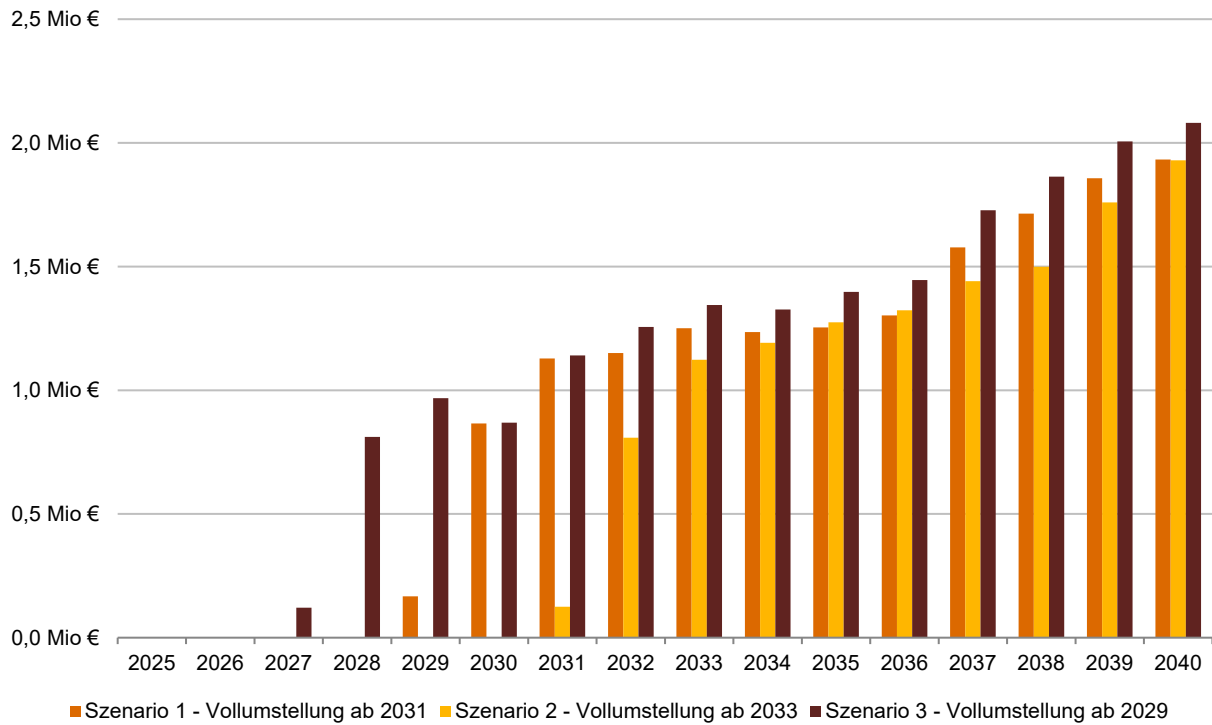


Abbildung 38: Mehrkosten ohne Förderung im Vergleich zum Status quo bis 2040 bei der VBBr (Batteriebusse)

Insgesamt fallen auf Grundlage der dargestellten Prämissen bis zum Jahr 2040 die in der folgenden Tabelle dargestellten Investitionskosten in den betrachteten Szenarien an.

Szenario	Fahrzeuge	LIS & technische Ausstattung	Gebäude & Nutzung eigenes Grundstück	Sonstiges
Szenario 0 - Referenzszenario (keine Umstellung)	15,4 Mio. €	0,0 Mio. €	0,0 Mio. €	0,0 Mio. €
Szenario 1 – Vollumstellung ab 2031	29,0 Mio. €	3,0 Mio. €	15,1 Mio. €	1,3 Mio. €
Szenario 1 – Vollumstellung ab 2031, Veräußerung nach sechs Jahren	42,2 Mio. €	3,0 Mio. €	15,1 Mio. €	1,3 Mio. €
Szenario 2 – Vollumstellung ab 2033	29,3 Mio. €	3,0 Mio. €	15,1 Mio. €	1,1 Mio. €
Szenario 2 – Vollumstellung ab 2033, Veräußerung nach sechs Jahren	41,4 Mio. €	3,0 Mio. €	15,1 Mio. €	1,1 Mio. €
Szenario 3 – Vollumstellung ab 2029	30,2 Mio. €	3,3 Mio. €	15,1 Mio. €	1,5 Mio. €
Szenario 3 – Vollumstellung ab 2029, Veräußerung nach sechs Jahren	45,9 Mio. €	3,3 Mio. €	15,1 Mio. €	1,5 Mio. €

Tabelle 6: Investitionskosten nach Szenarien bis 2040, VBBR Batteriebusse ohne Förderung

2. Kostenbetrachtungen für eine Umstellung mit Brennstoffzellenbussen

Im folgenden Abschnitt liegt der Fokus der Analysen auf den Mehrkosten der unterschiedlichen Szenarien für eine Umstellung mit Brennstoffzellenbussen gegenüber dem fortgeschriebenen Status quo.

Auch hinsichtlich der Umstellung auf Brennstoffzellenfahrzeuge zeigen sich zwischen den Szenarien deutliche Kostenunterschiede. Im Vergleich zu der Umstellung mit Batteriefahrzeugen ergeben sich insgesamt nochmals deutlich höhere Mehrkosten gegenüber dem fortgeschriebenen Status quo.

Im Vollumstellungsszenario ab 2031 entstehen so Mehrkosten von anfänglich ca. 33 T€ p. a., insbesondere für die Vorhaltung bzw. dem Ausbau der ersten Stufe der Betankungsinfrastruktur. Ab dem Jahr 2030 steigen dann die Mehrkosten erwartungsgemäß mit wachsendem Anteil von Brennstoffzellenbussen in der VBB-Flotte kontinuierlich an. Im Jahr 2035 liegen die Mehrkosten im Vollumstellungsszenario ab 2031 dann bei ca. 2,0 Mio. €.

Für das Vollumstellungsszenario ab 2033 ergeben sich bis zum Jahr 2028 vergleichbare Mehrkosten, mit der starken Brennstoffzellenbusbeschaffung ab dem Jahr 2033 steigen diese hingegen dann leicht an. Im Jahr 2035 ergeben sich leichte Einsparungen in Höhe von 15 T€ im Vergleich zum Vollumstellungsszenario ab 2031.

Das Vollumstellungsszenario ab 2029 zeigt bis zum Jahr 2029 lediglich im Bereich der zu schaffenden Betankungsinfrastruktur und des begleitenden Bauleit- und Projektmanagements signifikante Mehrkosten im Vergleich zum Vollumstellungsszenario ab 2033. Mit dem Beginn der Beschaffung von Brennstoffzellenbussen ab 2029 kommt es zu einem signifikanten Anstieg der Kosten für Betankungsinfrastruktur, Fahrzeugvorhaltung und Treibkraft. Dadurch werden im Jahr 2035 Mehrkosten i. H. v. 2,3 Mio. erzielt im Vergleich zu dem Referenzszenario.

Auf Grund des deutlich höheren Umstellungstempos im Vollumstellungsszenario ab 2029 liegen hier die Mehrkosten noch einmal deutlich höher. Im ausgebauten Zustand im Jahr 2040 sind Mehrkosten von etwa weiteren 1,3 Mio. €, also ca. 3,6 Mio. €, unter den angenommenen Prämissen zu erwarten. (siehe folgende Abbildung).

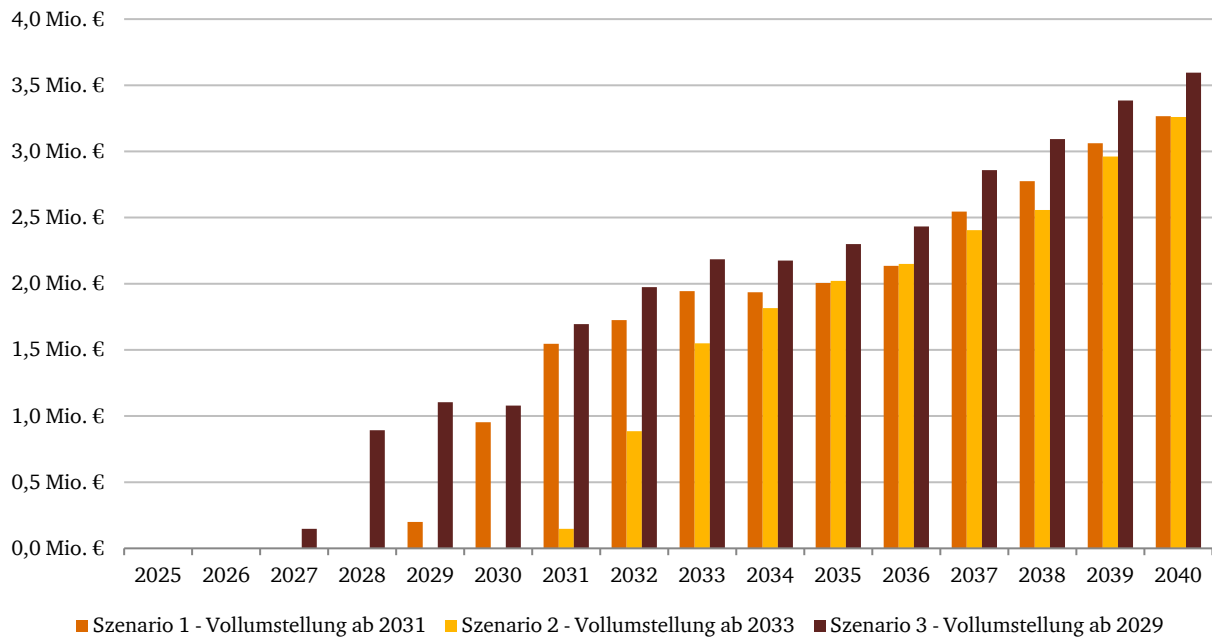


Abbildung 39: Mehrkosten ohne Förderung im Vergleich zum Status quo bis 2035 bei der VBBr (Brennstoffzellenbusse)

Insgesamt fallen auf Grundlage der dargestellten Prämissen bis zum Jahr 2040 die in der folgenden Tabelle dargestellten Investitionskosten in den betrachteten Szenarien an.

Szenario	Fahrzeuge	TIS & technische Ausstattung	Grundstücke & Gebäude	Sonstiges
Szenario 0 - Referenzszenario (keine Umstellung)	15,4 Mio. €	0,0 Mio. €	0,0 Mio. €	0,0 Mio. €
Szenario 1 – Vollumstellung ab 2031	32,5 Mio. €	3,8 Mio. €	14,5 Mio. €	1,3 Mio. €
Szenario 1 – Vollumstellung ab 2031, Veräußerung nach sechs Jahren	47,7 Mio. €	3,8 Mio. €	14,5 Mio. €	1,3 Mio. €
Szenario 2 – Vollumstellung ab 2033	32,9 Mio. €	3,8 Mio. €	14,5 Mio. €	1,1 Mio. €
Szenario 2 – Vollumstellung ab 2033, Veräußerung nach sechs Jahren	46,8 Mio. €	3,8 Mio. €	14,5 Mio. €	1,1 Mio. €
Szenario 3 – Vollumstellung ab 2029	34,0 Mio. €	4,2 Mio. €	14,5 Mio. €	1,5 Mio. €
Szenario 3 – Vollumstellung ab 2029, Veräußerung nach sechs Jahren	52,1 Mio. €	4,2 Mio. €	14,5 Mio. €	1,5 Mio. €

Tabelle 7: Investitionskosten nach Szenarien bis 2040, VBB, Brennstoffzellenbusse

3. Gegenüberstellung der Antriebsarten

Hinsichtlich der Vorbereitung einer Technologieentscheidung werden nun die Kosten der beiden untersuchten Antriebsarten gegenübergestellt. Die folgende Abbildung stellt die Mehrkosten der Umstellung mit Brennstoffzellenbussen gegenüber der Umstellung mit Batteriebusen dar.

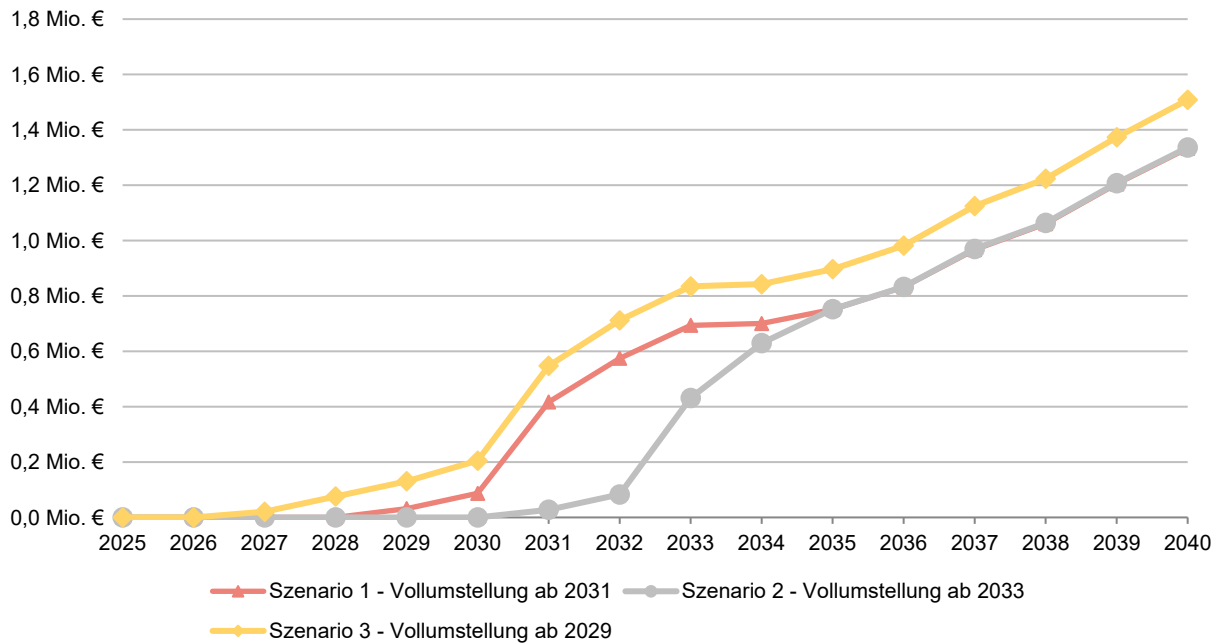


Abbildung 40: Mehrkosten der Umstellung mit Brennstoffzellenbussen gegenüber der Umstellung mit Batteriebusen

Im Vollumstellungsszenario ab 2031 liegen die Mehrkosten bei Einflottung der ersten Busse im Jahr 2031 bereits bei ca. 417 T€. Die Mehrkosten steigen dann deutlich auf etwa 1,3 Mio. € im Jahr 2040 an. Auch bei dem Vollumstellungsszenario ab 2033 steigen die antriebsbedingten Mehrkosten von anfänglichen 426 T€ im Jahr 2033 auf 1,3 Mio. € im Jahr 2040 an. Analog werden auch bei dem Vollumstellungsszenario ab 2029 Mehrkosten in Höhe von 136 T€ im Jahr 2029 und 1,5 Mio. € im Jahr 2040 hervorgerufen.

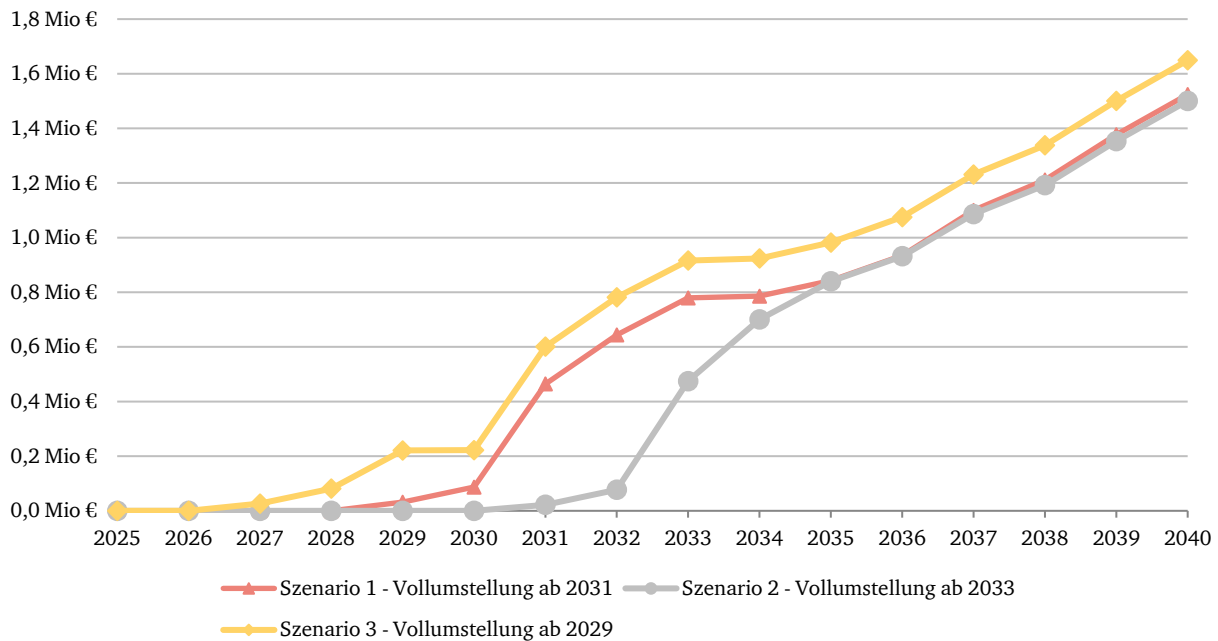


Abbildung 41: Mehrkosten der Umstellung mit Brennstoffzellenbussen gegenüber der Umstellung mit Batteriebusen im Szenario mit dem Verkauf von Bussen nach sechs Jahren zu einem Restwert von 25 %

Auch bei dem betrachteten Szenario gem. Abbildung 41 kommt es zu einer ähnlichen relativen Kostenentwicklung. Dabei weist das Vollumstellungsszenario ab 2029 durchgängig höhere Kosten als die Szenarien 1 und 2 auf. Aufgrund des frühen Beginns der Umstellung fallen bei dem Vollumstellungsszenario ab 2029 früher signifikante Mehrkosten im Vergleich zum Diesel-Szenario sowie dem Szenario 1 an. Mit dem Beginn der Vollumstellung im Szenario 2 ab 2033 nähern sich die jährlichen Mehrkosten dem Kostenverlauf des Szenarios 1 an. Ab 2035 gibt es zwischen den jährlichen Mehrkosten von Szenario 1 und 2 nur noch leichte Unterschiede.

Die erheblichen Mehrkosten lassen sich über alle Szenarien hinweg insbesondere auf drei zentrale Kostentreiber zurückführen: Erstens sind es die höheren Anschaffungskosten für Fahrzeuge, zweitens die gestiegenen Investitionskosten für die Planung und Errichtung der notwendigen Betankungsinfrastruktur und drittens die höheren Kosten der Treibkraft.

F. Ökologische Betrachtung

Die VBBr verfolgt mit der Umstellung der Flotte auf emissionsfreie Antriebe das übergeordnete Ziel der Reduzierung lokaler Luftschadstoffe und insgesamt einen Beitrag zur Einsparung der CO₂-Emissionen zu leisten. Dieser Beitrag unterscheidet sich in seiner Höhe auf der Zeitachse je nach Szenario durch die unterschiedlichen Elektrifizierungsgrade und damit durch die Substitution alter Diesel-Busse in den jeweiligen Flotten. Aktuelle Diskussionen sehen mitunter auch synthetisch erzeugte Kraftstoffe („eFuels“) als Möglichkeit der Dekarbonisierung an. Aufgrund der deutlich höheren Beschaffungskosten (Studien taxieren den langfristigen Herstellungspreis, ohne Steuern und Abgaben auf ca. 1,20 € bis 3,60 €)¹ gegenüber herkömmlichen Kraftstoffen und der ab dem Jahr 2030 greifenden Regulierung der Fahrzeughersteller zur Senkung der Emissionen ihrer Flotten (VO (EU) 2024/1610), wird diese Option hier nicht näher betrachtet. Grundsätzlich ist jedoch davon auszugehen, dass sich der effektive CO₂-Ausstoß zwischen den Werten eines Elektro- und eines herkömmlichen Dieselmotors bewegt.

Im Folgenden werden die potenziellen CO₂-Einsparungen durch den Einsatz von Elektro- statt Dieselmotoren in den drei analysierten Szenarien dargestellt. Dabei werden bestimmte Prämissen berücksichtigt. Der erforderliche Fahrstrom sowie Wasserstoff müssen aus erneuerbaren Bezugsquellen stammen, d. h., der grüne Strom muss über einen entsprechenden Tarif aus erneuerbaren Quellen bezogen werden und der grüne Wasserstoff muss aus grünem Strom erzeugt und eingekauft werden. Zudem werden. Es wird berücksichtigt, dass pro verbrauchtem Liter Diesel 2,65 kg CO₂ emittiert werden. Die nachfolgend dargestellten Einsparungen basieren auf den Durchschnittsverbräuchen pro Fahrzeug im Jahr 2024.

VBBr	Ø Diesel-Verbrauch in Litern pro Jahr und Fahrzeug	Einsparpotenzial in t CO ₂ pro Jahr und Fahrzeug
Solobus	19.904	52,7
Gelenkbus	25.696	68,1

Tabelle 8: CO₂-Einsparpotenziale bezogen auf die Durchschnittsverbräuche nach Fahrzeugart, VBBr

Übertragen auf die entsprechende Fuhrparkstruktur der dargestellten Szenarien ergeben sich daraus folgende CO₂-Emissionen bzw. Einsparungen.

¹ Vgl. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (2023): Diskussionsbeitrag zur E-Fuel-Förderung

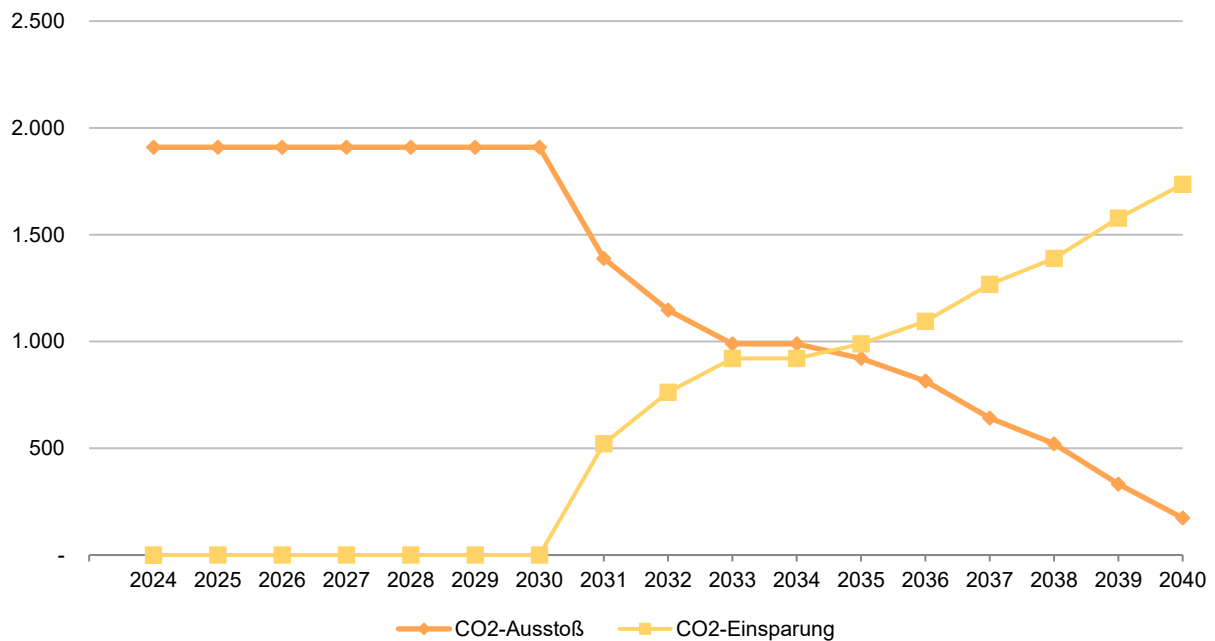


Abbildung 42: CO₂-Ausstoß und -Einsparung bei VBBR im Vollumstellungsszenario ab 2031 (in t)

Im CVD-Szenario reduzieren sich die CO₂-Emissionen der VBBR-Busflotte von ursprünglich ca. 1.909 t CO₂ auf bis zu rund 174 t CO₂ im Jahr 2040. Somit können durch den Einsatz von emissionsfreien Bussen und Diesel-Kraftstoffen ca. 1.735 t CO₂ eingespart werden.

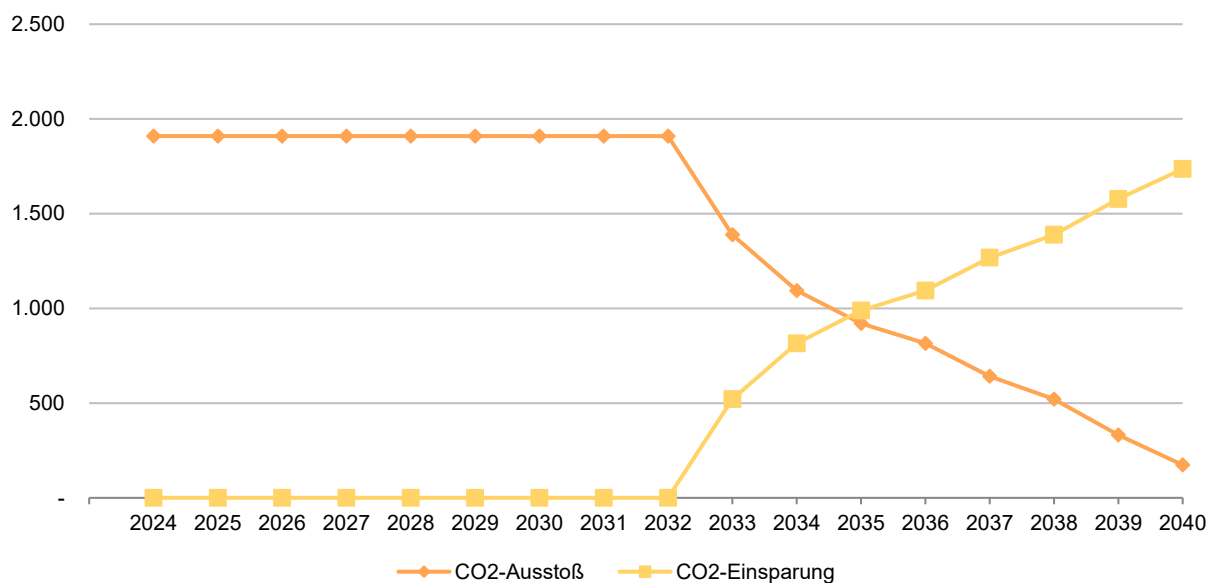


Abbildung 43: CO₂-Ausstoß und -Einsparung bei VBBR im Vollumstellungsszenario ab 2033 (in t)

Durch die Flottentransformation im zweiten Szenario kann der CO₂-Ausstoß der VBBR-Flotte bis zum Jahr 2040 auf ca. 9 % des ursprünglichen Wertes gesenkt werden. Im Jahr 2035 ermöglicht

die Flottentransformation in diesem Szenario Einsparungen von 989 t CO₂, im Jahr 2040 sind hingegen Einsparungen von über 1.736 t CO₂ möglich.

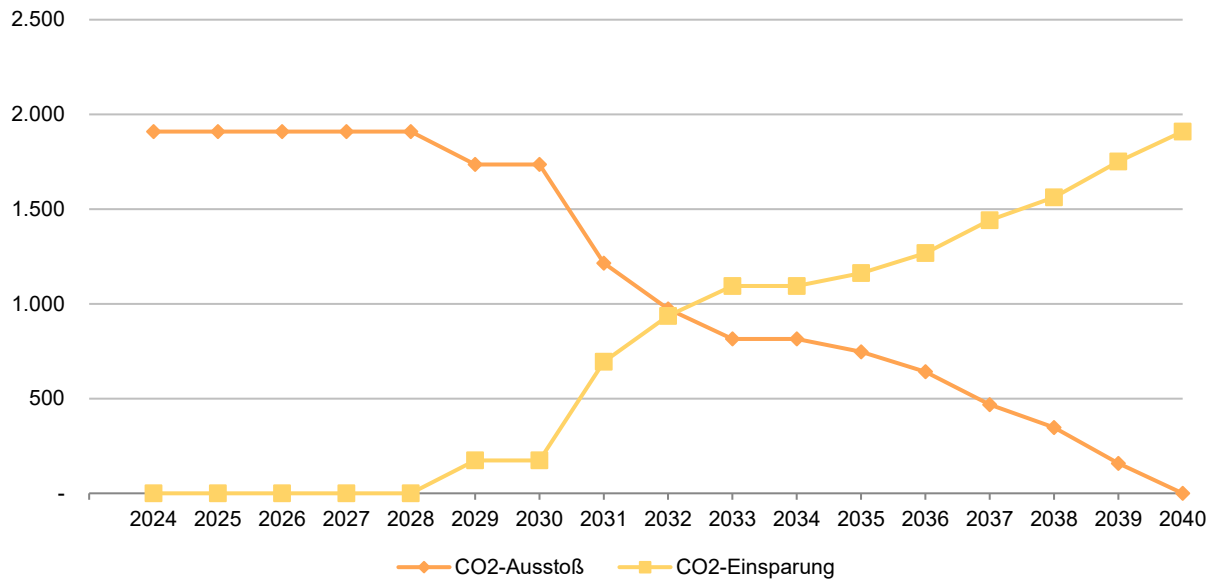


Abbildung 44: CO₂-Ausstoß und -Einsparung bei VBBR im Vollumstellungsszenario ab 2029 (in t)

Im dritten Szenario erfolgt eine signifikantere CO₂-Einsparung. Im Jahr 2035 können so bereits 1.162 t CO₂ im Vergleich zu 2024 eingespart werden. Bis 2040 wäre der Fuhrpark der VBBR emissionsfrei.

G. Betriebs- und Einsatzkonzept

Diese Machbarkeitsanalyse folgt der übergeordneten Zielsetzung, den Meinungsbildungsprozess hinsichtlich der potenziellen Antriebstechnologien mit Blick auf die zukünftige Ausgestaltung des öffentlichen Verkehrs in der kreisfreien Stadt Brandenburg an der Havel als wesentliche Diskussionsgrundlage zu flankieren. Im Anschluss an eine kurze Zusammenfassung der Ergebnisse der Analysen wird auf dieser Grundlage eine Empfehlung für eine vorzugswürdige Antriebstechnologie bzw. einen Technologiemix für den öffentlichen Verkehr der VBBr abgeleitet. Hierfür wird die Vorzugstechnologie von den übrigen Alternativen in Bezug auf die Rahmenbedingungen der VBBr abgegrenzt.

I. Zusammenfassung

Der Markthochlauf der Elektromobilität im ÖPNV mit Bussen ist in vollem Gange. Es zeichnet sich dabei mit dem Blick auf den Status quo, aber auch unter der Berücksichtigung bekannter zukünftiger Planungen ein klares Bild hinsichtlich einer dominierenden emissionsfreien Antriebstechnologie ab. Der batterieelektrische Antrieb ist sowohl auf der Nachfrageseite bei den Verkehrsunternehmen als auch auf der Angebotsseite bei den Herstellern am stärksten vertreten. Die Antriebstechnologie zeichnet sich derzeit zudem durch den höchsten technologischen Reifegrad emissionsfreier Bustechnologien aus. Auch in Bezug auf eine angebotsseitige Marktverfügbarkeit ist der Batterieantrieb gegenüber dem Brennstoffzellenantrieb als vorteilhaft zu bewerten, denn das Fahrzeugangebot ist mit Abstand am umfangreichsten. Es kann davon ausgegangen werden, dass dieser Vorsprung in den nächsten Jahren (noch) weiter erhalten bleibt.

Die derzeitige Entwicklung des E-Bus-Marktes lässt erahnen, dass der Batteriebus sich längerfristig zum Standardantrieb entwickeln wird und somit sukzessive den Diesibus in dieser Rolle ablöst. Der Brennstoffzellenantrieb zeigt indes ebenfalls weiteres Entwicklungspotenzial, wenngleich der Einsatz häufig nur unter bestimmten Rahmenbedingungen im Vergleich zum Batteriebus technisch, betrieblich und wirtschaftlich vorteilhaft ist. Auch unter Berücksichtigung der Gesamtenergieeffizienz und vor dem Hintergrund knapper Energieressourcen ist der Batteriebus dem Brennstoffzellenbus überlegen. Im Sinne von möglichen Opportunitätskosten kann sich dieser Zustand ändern, sofern lokal erzeugter Überschussstrom in Wasserstoff umgewandelt wird und so für die Verwendung im ÖPNV bereitsteht.

Sowohl bei den Anschaffungskosten für die Fahrzeuge als auch für die notwendige Lade- bzw. Betankungsinfrastruktur ist der Batteriebus in der ganzheitlichen Betrachtung auch kostenseitig vorteilhaft. Mit Blick auf betriebliche Aspekte hat der Brennstoffzellenbus den Vorteil höherer Reichweiten im täglichen Fahrbetrieb. Eventuell notwendige Anpassungen an Umläufen und ein zusätzlicher Mehrbedarf an Fahrzeugen fallen hier im Vergleich zum Batteriebus geringer aus. Muss die

Infrastruktur zur Wasserstoffherzeugung und insbesondere zur Betankung auf dem Betriebsgelände neu errichtet werden, so ist hier im Vergleich zur Ladeinfrastruktur für Batteriebusse ein deutlich höherer Flächenbedarf zu berücksichtigen.

Die Analysen der Machbarkeitsstudie zeigen, dass die Dekarbonisierung des ÖPNV der VBBR im Sinne der rechtlichen Mindestanforderungen aus der Clean Vehicles Directive grundsätzlich realisierbar ist.

Die drei erarbeiteten Umstellungsszenarien zeigen verschiedene Migrationspfade zur Einführung von E-Bussen für Brandenburg an der Havel auf. So kann im Vollumstellungsszenario ab 2029, mit einer ausschließlichen Beschaffung von E-Bussen ab dem Jahr 2029, der Fuhrpark der VBBR vollständig elektrifiziert und im Jahr 2040 emissionsfrei betrieben werden. Im Vollumstellungsszenario ab 2031 wird die Flottenumstellung mit dem geringsten Tempo angegangen. Bei der VBBR wäre die Flotte im Jahr 2042 komplett umgestellt.

Die drei dargestellten Migrationspfade der Flottentransformation müssen nun durch die Akteure vor Ort bewertet werden und ein Pfad als Grundlage der Umstellungsstrategie festgelegt werden. Ein langfristiger Transformationspfad führt zu Parallelbetrieb unterschiedlicher Technologien und erhöht die Komplexität des Betriebs.

Aus wirtschaftlicher Sicht gilt es zu berücksichtigen, dass aktuell keine Förderkulisse für Busse mit alternativen Antrieben existiert. Auch im Falle einer (temporär noch vorhandenen) Förderung der Investitionsmehrkosten kann davon ausgegangen werden, dass die Dekarbonisierung der Verkehrsleistungen in der kreisfreien Stadt Brandenburg an der Havel grundsätzlich teurer wird.

II. Umsetzungskonzept

Für die Flottentransformation der VBBR sind die Vorgaben der CVD aufgrund des Rahmenvertrags zur Beschaffung von Diesel-Bussen eher nachrangig zu betrachten. Viel mehr wird die herstellerseitige Umstellung auf E-Busse im Rahmen der Umsetzung der VO (EU) 2024/1610 als limitierender Faktor bei der Beschaffung von Diesel-Bussen angesehen. Hierfür ist eine erste großflächige Installation von Ladeinfrastruktur erforderlich, um der Vollumstellung ab dem Jahr 2029, 2031 oder 2033 gerecht zu werden.

Im Jahr 2026 sollten weitere Detailplanungen zur Einführung der alternativen Antriebe vorgenommen werden. Diese Planungen beinhalten insbesondere die Ausgestaltung der Depots aber auch technische Spezifikationen der Fahrzeuge wie beispielsweise die Ladetechnologie (Stecker oder Pantograph). Um ab dem Ende des Jahres 2029 die ersten E-Busse bei der VBBR einzufloten, sollte zudem spätestens im Jahr 2027 die Ausschreibung der baulichen Leistungen (u. a. Ladeinfrastruktur) initiiert werden. Dafür sind zudem die jeweiligen Lastenhefte zu erstellen, die die zuvor entwi-

ckelten Detailplanungen umsetzen. Anschließend ist in den Jahren 2028 und 2029 die Ausschreibung der Fahrzeuge durchzuführen.

Im Jahr vor der Einflottung der weiteren E-Busse in den VBB-Flotten sind die notwendigen Vorarbeiten durchzuführen. Dazu zählen vor allem die Errichtung der notwendigen Ladeinfrastruktur und die Schulung der Mitarbeiter hinsichtlich der Besonderheiten des E-Bus-Betriebs. Die Mitarbeiterschulungen werden dabei schwerpunktmäßig in den Bereichen Fahrdienst und Instandhaltung durchgeführt, wobei der Schulungsbedarf im Bereich der Werkstatt aufgrund der Einführung von Hochvolttechnologie am höchsten ist.

Sobald die neuen E-Busse bei der VBB in den Dienst gestellt sind, erfolgt der weitere stufenweise Ausbau der Ladeinfrastruktur und die anschließende Beschaffung von zusätzlichen E-Bussen. In den folgenden Jahren ist außerdem die infrastrukturelle Erschließung der weiteren Depotflächen vorzunehmen, um den zusätzlichen Flächenbedarf einer elektrifizierten Busflotte abzudecken.

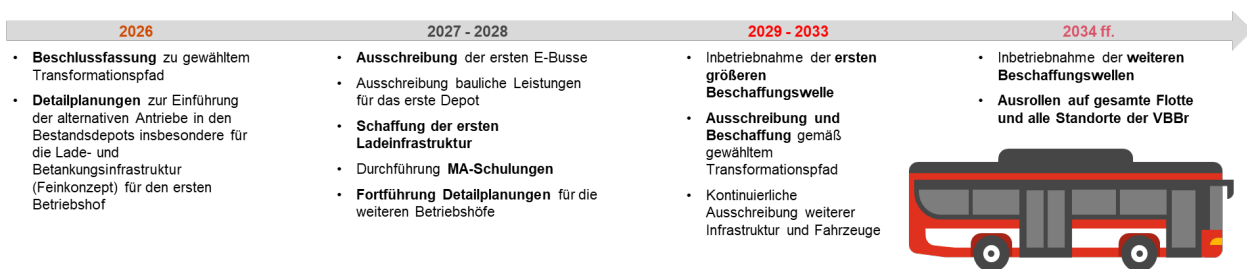


Abbildung 45: Beispielhafter Umsetzungsplan Flottentransformation der VBB

III. Empfehlung für die VBB

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Umstellung der VBB-Flotte auf alternative Antriebe technisch und betrieblich möglich ist. In Hinblick auf die eingesetzte Technologie wurde festgestellt, dass sowohl Batterie- als auch Brennstoffzellenbusse für den Betrieb der VBB geeignet sind. Um den heutigen Fahrplan mit Batteriebusen abdecken zu können, ist zunächst keine Erweiterung des Fuhrparks erforderlich.

Im Vergleich zwischen Batterie- und Brennstoffzellenbussen zeigt sich, dass **Batteriebusse für die VBB insgesamt die vorzuziehende Technologie** sind. Der Einsatz von Batteriebusen hat unter den Bedingungen der VBB folgende Vorteile gegenüber Brennstoffzellenbussen:

- **geringere Gesamtkosten**, sowohl in Hinblick auf Investitions- als auch Betriebskosten,
- **geringerer Flächenbedarf** für die Lade- bzw. Betankungsinfrastruktur,
- **ausgereifteres und größeres Fahrzeugangebot am Markt.**

Die Machbarkeitsstudie hat in Kapitel D zudem unterschiedliche Migrationspfade für die Flottentransformation der VBBR aufgezeigt. Das Vollumstellungsszenario ab 2033 bildet dabei das Mindestmaß an Fahrzeugen mit alternativem Antrieb, die durch die VBBR perspektivisch beschafft werden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die beschafften Fahrzeuge länger für den Linienbetrieb genutzt werden müssen als bisher. Die längere Nutzung der im Rahmen des langfristigen Rahmenvertrags beschafften Dieselsebusse ermöglicht ausreichend Vorlaufzeit, um eine grundlegende Umstellung des Betriebshofs und der Ausschreibung von Fahrzeugen und Ladeinfrastruktur zu ermöglichen.

Bei der Auswahl des für die VBBR passenden Migrationspfades ist insgesamt eine Abwägung zwischen einem höheren Umstellungstempo und den zusätzlichen Kosten durch diese Umstellung vorzunehmen. Im Kapitel E wurde ermittelt, dass der verstärkte Einsatz von Batteriebussen für jeweils höhere Gesamtkosten sorgt. Die VBBR-Stakeholder (vor allem die kreisfreie Stadt Brandenburg an der Havel als Aufgabenträger und Anteilseigner) müssen daher letztlich entscheiden, wie schnell die Flottentransformation unter Beachtung der Mehrkosten erfolgen soll.

Düsseldorf, den 15. September 2025

PricewaterhouseCoopers GmbH
Wirtschaftsprüfungsgesellschaft

Maximilian Rohs
Director

ppa. Hendrik Reinhardt