



Dokumentation

der „Machbarkeitsstudie zum Einsatz von Linienbussen mit
alternativen Antrieben in Magdeburg und deren spezifischer
Infrastruktur zur Energieversorgung“

Erstellt von:

eebc European Electrical Bus Company GmbH

Bessie-Coleman-Straße 7

60549 Frankfurt am Main

und

PricewaterhouseCoopers GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft

Georg-Glock-Straße 22

40474 Düsseldorf

Auftraggeber:

Magdeburger Verkehrsbetriebe GmbH & Co. KG

Otto-von-Guericke-Straße 25

D-39104 Magdeburg

(Nachfolgend „MVB“, „Auftraggeber“ oder „Kunde“ genannt)

Version:

Version 1 erstellt am 23.06.2025

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

INHALT	I
I EINLEITUNG	1
II UMSETZUNG UND ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNG	2
1 AP 1: Vergleichende Darstellung von Bussen mit alternativen Antrieben und deren spezifischer Infrastruktur zur Energieversorgung	2
1.1 Rechtliche Vorgaben für die Beschaffung sauberer und emissionsfreier Busse	2
1.1.1 Betroffene Fahrzeugklassen der Clean Vehicles Directive	3
1.1.2 Anwendungsbereich der Clean Vehicles Directive	3
1.1.3 Beschaffungsrelevante Vorgaben der Clean Vehicles Directive	4
1.2 Technologische Grundlagen (Fahrzeuge)	6
1.2.1 Batterieelektrische Busse	8
1.2.2 Brennstoffzellen-Fahrzeuge	12
1.2.3 Emissionsbehaftete Antriebskonzepte für Omnibusse	15
1.2.4 Nebenaggregate vollelektrischer Busse	16
1.2.5 Überblick über die aktuelle E-Bus-Marktsituation in Deutschland	17
1.2.6 Übersicht des verfügbaren Fahrzeugangebots	21
1.3 Technologische Grundlagen (Energiezuführung)	31
1.3.1 Elektrische Busse	31
1.3.2 Wasserstoffbusse	38
1.3.3 Technologievergleich	40
1.4 Antriebssteckbriefe	44
2 AP 2: Verkehrsunternehmensspezifische Streckenanalyse	51
2.1 Methodik	51
2.1.1 Umlaufuntersuchung	51
2.1.2 Umlaufverkettung	51
2.1.3 Umlaufanpassung	52
2.1.4 Berechnungsgrundlage und Prämissen	53
2.1.5 Grafische Darstellungen	56
2.1.6 Abweichung vom Leistungsumfang	59
2.2 Umlaufanalyse - Einzelumläufe	60
2.2.1 Einzelumlaufanalyse BEV-Depotlader	60
2.2.2 Einzelumlaufanalyse FCEV	61
2.2.3 Einzelumlaufanalyse BZ REX	63
2.2.4 Einzelumlaufanalyse BEV-Gelegenheitslader	64
2.3 Umlaufanalyse – Fahrzeugtagesumläufe	67
2.3.1 Umlaufverkettung	67
2.3.2 Direktes Einsatzpotenzial	68
2.3.3 BEV-Depotlader: Ladeintervalle im Kontext der Aufenthaltsdauer über Nacht	70
2.3.4 Umlaufanpassung	73
3 AP 3 Ermittlung der Voraussetzungen für den Einsatz von Bussen mit alternativen Antrieben im Linienverkehr	76
3.1 Methodik	76
3.1.1 Lastgangoptimierung	76
3.1.2 Berechnungsgrundlagen und Prämissen	77
3.1.3 Modulbaukasten	77
3.1.4 Grafische Darstellungen	79

3.2	Allgemeines.....	80
3.2.1	Grundlegende Voraussetzungen nach Themengebieten	80
3.2.2	Jahresenergiebedarf	84
3.3	Elektrische Ladeinfrastruktur.....	85
3.3.1	Lastgangoptimierung.....	85
3.3.2	Konzeptentwurf modulares Ladesystem BEV-Depotlader	86
3.3.3	Konzeptentwürfe modulare Ladesysteme für weitere BEV-Ansätze.....	88
3.4	Wasserstofftankinfrastruktur	90
3.5	Betriebshofintegration.....	93
3.5.1	Komponentenübersicht.....	93
3.5.2	Konzeptdarstellungen	98
3.6	Betriebsanpassung.....	106
3.6.1	Werkstattanpassung.....	106
3.6.2	Fahrzeugwartung und Fahrzeugprüfung	108
3.6.3	Mitarbeiterschulung	108
3.6.4	Managementsysteme.....	109
3.7	Anforderung an Errichtung und Betrieb	114
3.7.1	Genehmigungsverfahren.....	114
3.7.2	Synergien und Verträglichkeit zu Straßenbahninfrastruktur	121
3.7.3	Möglichkeit zur Produktion von eigenem Strom	121
4	AP 4 Betrachtung der Kosten des Einsatzes von Bussen mit alternativen Antrieben	122
4.1	Prämissen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	123
4.1.1	Investitionen.....	123
4.1.2	Betriebsbezogene Aufwendungen	124
4.2	Übersicht bestehender relevanter Förderprogramme	127
4.2.1	Förderprogramme auf Bundesebene	127
4.2.2	Förderprogramme EU-Ebene	128
4.2.3	Förderung auf Landesebene.....	128
4.3	Kaufmännische Bewertung der Dekarbonisierung der Flotte der MVB	129
4.3.1	Fortschreibung des Status quo als Bezugsgröße	129
4.3.2	Kostenschätzungen der verschiedenen Antriebsvarianten	130
4.3.3	Kostenbetrachtungen für eine Umstellung mit Batteriebussen	133
4.3.4	Kostenbetrachtungen für eine Umstellung mit Brennstoffzellenbussen	136
4.3.5	Kostenbetrachtungen für eine Umstellung mit Brennstoffzellen-Range-Extender Bussen.....	140
4.3.6	Gegenüberstellung der Antriebsarten.....	144
5	AP 5 Erstellung eines Konzepts zur Wasserstoff-Betankungsinfrastruktur für den öffentlichen Straßenpersonenverkehr in Magdeburg	147
5.1	Betriebsinterne Tankanlagen oder externe Betankung?	147
5.2	Erforderliche Infrastruktur zur Wasserstofferzeugung.....	149
5.3	Mögliche Synergien mit anderen Verkehrssektoren	149
6	AP 6 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlung	150
6.1	Schlussfolgerungen	150
6.1.1	Zwischenfazit AP 1 und AP 2	150
6.1.2	Zwischenfazit AP 3 und AP 5	151
6.1.3	Zwischenfazit AP 4.....	151
6.1.4	Gesamtfazit	152
6.2	Handlungsempfehlung.....	153

I Einleitung

Emissionsfreier Verkehr ist bereits seit einiger Zeit im Fokus der Öffentlichkeit. In Politik, Wissenschaft aber auch Gesellschaft herrscht breiter Konsens, dass dies einen wesentlichen Bestandteil zur Einhaltung der Klimaziele darstellt. Die Forderungen nach entsprechenden Antriebstechnologien im ÖPNV werden aktuell sukzessive verschärft. So ist die sog. Clean Vehicles Directive (CVD) mit Stand Mai 2021 nicht mehr nur auf EU-Ebene gültig, sondern als Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungsgesetz in nationales Recht umgesetzt.

Als Betreiber für den Bus-ÖPNV stehen auch die Magdeburger Verkehrsbetriebe (MVB) vor der Fragestellung wie die geltenden Anforderungen in den nächsten Jahren erfüllt werden können. Dabei gilt es im Wesentlichen die wirtschaftlichste Alternative zur Flottendekarbonisierung zu identifizieren. Hierfür stehen verschiedene technische Optionen zur Verfügung, deren Eignung wiederum abhängig von den Einsatzprofilen vor Ort ist.

Auch wenn die Umstellung schrittweise erfolgt und zunächst nur Teilflotten dekarbonisiert werden, ist der langfristige Fokus hier entscheidend. Verschieden technische Alternativen weisen untereinander abweichende Vor- und Nachteile auf, die sich in Summe in den Gesamtkosten niederschlagen. Da für alle technischen Alternativen dieselben Dekarbonisierungsanforderungen gestellt werden, bleibt die entscheidende Frage mit welchem Aufwand das Ziel jeweils erfüllt werden kann.

Grundlegend für die kommerzielle Bewertung sind die technischen Besonderheiten der Antriebstechniken, über die der Umstellungsaufwand und Treibkraftaufwendungen hergeleitet werden können. Abhängig von Einflussfaktoren wie Einsatzreichweite (bzw. „Energieverbrauch“ gegenüber marktverfügbarer Speichergrößen) kann ein möglicher Zusatzaufwand erhoben werden, um dies in den Kostenbetrachtungen zu bewerten. Zusatzaufwendungen können hierbei beispielsweise Ladeinfrastrukturen aber auch Personalaufwendungen im Zuge einer Umlaufanpassung sein.

Um eine adäquate Handlungsempfehlung für eine sinnvolle emissionsfreie Vorzugstechnologie aussprechen zu können, wird hier eine entsprechende vergleichende Studie zu Linienbussen mit alternativen Antrieben in Magdeburg ausgeführt, um die Grundlage für eine langfristig ausgerichtete Dekarbonisierungsstrategie zu legen.

Das Dokument ist dabei entsprechend dem Leistungsverzeichnis in Arbeitspaketen aufgebaut:

- AP 1: Vergleichende Darstellung von Bussen mit alternativen Antrieben und deren spezifischer Infrastruktur zur Energieversorgung
- AP 2: Verkehrsunternehmensspezifische Streckenanalyse
- AP 3: Ermittlung der Voraussetzungen für den Einsatz von Bussen mit alternativen Antrieben im Linienverkehr
- AP 4: Betrachtung der Kosten des Einsatzes von Bussen mit alternativen Antrieben
- AP 5: Erstellung eines Konzepts zur Wasserstoff-Betankungsinfrastruktur für den öffentlichen Straßenpersonenverkehr in Magdeburg
- AP 6: Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen für die MVB und die Stadt Magdeburg

II Umsetzung und Ergebnisse der Untersuchung

1 AP 1: Vergleichende Darstellung von Bussen mit alternativen Antrieben und deren spezifischer Infrastruktur zur Energieversorgung

1.1 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 Richtlinienentwurf 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 Beschaffungsgesetzes (SaubFahrzeugBeschG), 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 Vehicles Directive verwendet. Dieser ist mit Blick auf die nationale Umsetzung in Deutschland synonym zum SaubFahrzeugBeschG zu verstehen.

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.

1.1.1 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 Fahrzeugklassen³, die sich wie folgt kategorisieren lassen:

- *Fahrzeug-Kategorie 1:* leichte Nutzfahrzeuge für den Personen- und Güterverkehr der Klassen M₁ und M₂ oder N₁⁴,
- *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 eingeschlossen.

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

1.1.2 Anwendungsbereich der Clean Vehicles Directive

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

- 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;
- 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;

³ Grundlage ist die Verordnung (EU) 2018/858 Artikel 4 Abs. 1 lit. a) und b).

⁴ 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.

- 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.

1.1.3 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 mindestens 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.

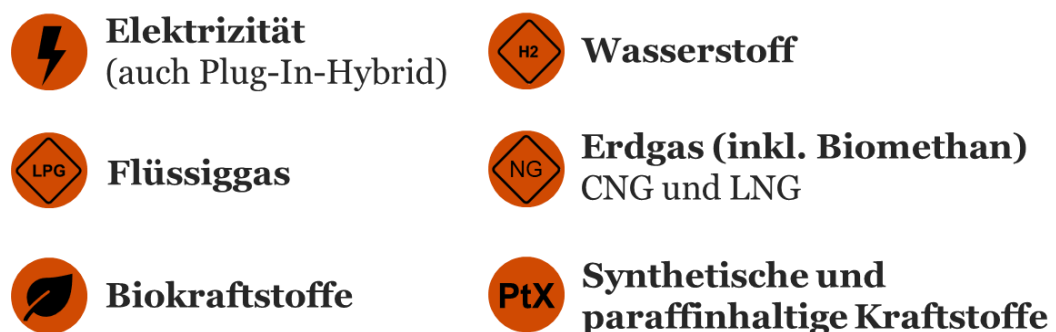


Abb. 1: Übersicht der als „sauber“ definierten Energieträger für den Antrieb eines Busses

Nach derzeitiger Auslegung gehören 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 %.

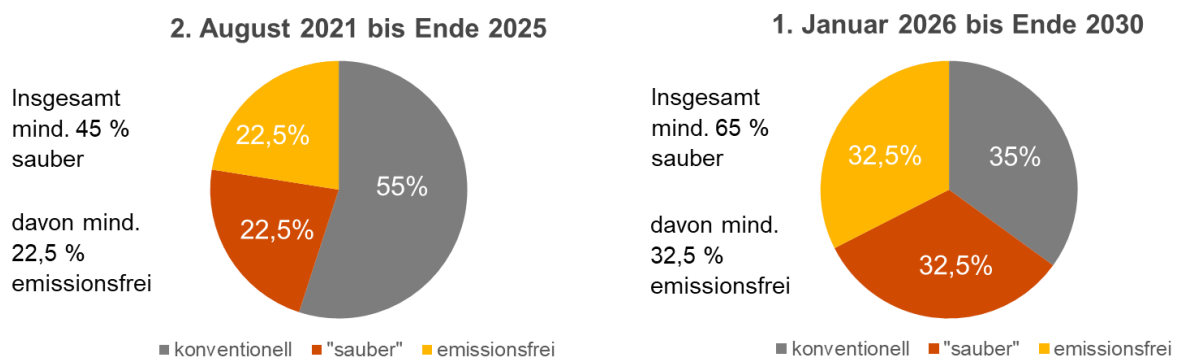


Abb. 2: Beschaffungsquoten der CVD in den Referenzperioden

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 Notfahraggregate 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/Sektorenauftraggeber“. 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 weniger 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 ungeklärte bzw. strittige Praxisfragen zur CVD bedürfen noch einer abschließenden juristischen Klärung.

1.2 Technologische Grundlagen (Fahrzeuge)

Die erfolgreiche Beschaffung und Einführung eines Elektrobusses oder gar die Umstellung auf eine elektrifizierte Busflotte steht in deutlicher Abhängigkeit zu den aktuell vorherrschenden Marktbedingungen. Die Beschaffung nimmt im Kontext der Elektrifizierung der Omnibus-Flotte eines Verkehrsunternehmens damit eine immer bedeutendere strategische und operative Rolle ein. Öffentliche bzw. kommunale Verkehrsbetriebe sind in der Regel Sektorenauftraggeber und unterliegen daher dem Anwendungsbereich der Sektorenverordnung. Mit der Überschreitung des Schwellenwertes von 443 T€ müssen daher Aufträge für die Lieferung von Elektrobussen europaweit ausgeschrieben werden. Dieser Schwellenwert wird dabei regelmäßig schon bei der Beschaffung eines einzelnen Batterie-Solo-Busses überschritten. Im Kontext der Beschaffung ist es von besonderer Bedeutung, auf umfassende Informationen über das bestehende Angebot auf dem europäischen E-Bus-Markt und insbesondere die Fahrzeugverfügbarkeit zurückgreifen zu können, um dies mit den im Rahmen der Machbarkeitsstudie erarbeiteten Anforderungen abzugleichen.

Die im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) eingesetzten Omnibusse lassen sich hinsichtlich verschiedener Antriebstechnologien unterscheiden.

Der Antrieb über **Verbrennungsmotoren** mit einem Diesel-Aggregat ist hierbei sowohl bei Bestandsfahrzeugen als auch bei Omnibus-Neuzulassungen aktuell noch die am weitesten verbreitete Technologie in Europa. Omnibusse mit Erdgas-Antrieb (CNG-Antrieb) oder Autogas-Antrieb (LPG-Antrieb) gehören ebenfalls zu den Antriebstechnologien, die eine Verbrennung fossiler Brennstoffe nutzen.

Elektrobusse (auch E-Busse) nutzen hingegen elektrischen Strom zum Antrieb eines Elektromotors. Ein batterieelektrischer Bus (auch Battery Electric Vehicle, BEV) deckt seinen Traktionsenergiebedarf während der Fahrt ausschließlich über eine mitgeführte Traktionsbatterie. Der Fahrstrom wird dabei außerhalb des Fahrbetriebs dem Fahrzeug extern zugeführt. Hierbei werden grundsätzlich zwei Strategien zur Nachladung der Batterie unterschieden: das **Depotladen** und das **Gelegenheitsladen**. Die notwendige Batteriekapazität und die entsprechenden Einrichtungen zur Aufladung unterscheiden sich bei diesen Batteriebus-Varianten. Das Konzept des Depotladens sieht vor, die Batterie der Busse in einem Ladevorgang voll aufzuladen. Dies geschieht im Bus-Depot und in der Regel über Nacht. Gelegenheitslader werden hingegen nicht

ausschließlich im Depot geladen, sondern im Verlauf des Fahrbetriebs bei entsprechender Gelegenheit (insbesondere Warte- und Wendezeiten an (End-)Haltestellen) zwischengeladen.

Ein **Brennstoffzellenbus** (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV oder auch „Wasserstoffbus“) nutzt die chemische Reaktionsenergie von Wasserstoff und Sauerstoff innerhalb einer Brennstoffzelle zum Antrieb eines Elektromotors und zur Speisung einer Traktionsbatterie, die dem Ausgleich von Lastspitzen und der Speicherung der rekuperierten Bremsenergie dient.

Hybrid-Busse (Hybrid Electric Vehicle, HEV) sind durch den Einsatz mehrerer Antriebssysteme gekennzeichnet. In der Regel werden ein Verbrennungsmotor (Diesel, CNG oder LPG) mit einem elektrischen Antriebsstrang, bestehend aus einem elektrischen Energiespeicher und Elektromotor, kombiniert. Hier gibt es grundlegend zwei unterschiedliche Ausprägungsarten des Hybridantriebs. In der Anwendung eines parallelen Hybrid-Antriebs greifen beide Antriebsarten gleichzeitig auf den Antriebsstrang zu, bei einem seriellen Hybrid-Antrieb wird ein Generator zur Speisung einer Traktionsbatterie durch den Verbrennungsmotor angetrieben. Die Zuführung der elektrischen Energie ist darüber hinaus ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal hybrider Antriebe. Bei Plug-In-Hybrid-Bussen (Plug-In-Hybrid-Vehicle, PHEV) lässt sich die Traktionsbatterie nicht nur fahrzeugseitig aufladen, sondern ebenfalls von außen über die Zuleitung aus dem Stromnetz.

Oberleitungsbusse (auch O-Busse oder Trolley-Busse) sind neben BEV-, FCEV- und HEV/PHEV-Bussen schließlich eine weitere elektrifizierte Omnibusvariante. Hier sind der Voll-O-Bus und der Hybrid-O-Bus zu unterscheiden. Der Voll-O-Bus deckt seinen Fahrleistungsenergiebedarf dynamisch über eine Oberleitung. Der Hybrid-O-Bus ist zusätzlich auch mit einem Verbrennungsmotor ausgestattet, der den Fahrbetrieb für Strecken ohne Oberleitung ermöglicht. Er lässt sich diesbezüglich auch zu den HEV-Bussen zählen. Eine weitere Besonderheit sind O-Busse mit In-Motion-Charging. Es handelt sich hierbei um Voll-O-Busse, welche mit einer zusätzlichen Traktionsbatterie ausgestattet sind, die während der Fahrt über die Oberleitungsversorgung aufgeladen und bei Streckenabschnitten ohne Oberleitung eingesetzt wird.

Die folgende Abbildung gibt zusammenfassend einen Überblick über die Systematik der bestehenden Antriebsarten elektrifizierter Busse im ÖPNV.



Abb. 3: Antriebsarten elektrifizierter Busse im ÖPNV

Die aktuell marktreifen emissionsfreien Antriebskonzepte für Omnibusse im ÖPNV basieren alle auf einem elektrischen Antriebsstrang und beinhalten letztlich die gleichen Funktionseinheiten:

- Energiezuführung,
- Energiespeicherung und
- Energieumsetzung (in mechanische Antriebsenergie und für sonstige Hilfebetriebe).

In den folgenden Abschnitten werden die verschiedenen Fahrzeugkonzepte beschrieben und typischen Stärken und Schwächen im allgemeinen Kontext miteinander verglichen. Des Weiteren werden auch Aussagen zur Marktverfügbarkeit in Deutschland getroffen.

1.2.1 Batterieelektrische Busse

1.2.1.1 Aufbau batterieelektrischer Busse

Batterieelektrische Busse werden durch eine integrierte Traktionsbatterie betrieben, die extern an Ladepunkten nachgeladen wird. Diese Fahrzeuge unterscheiden sich hauptsächlich hinsichtlich der Dimensionierung der einzelnen Elemente (z. B. Batteriekapazität) und des Nachladesystems. Die grundlegende Topologie bleibt dagegen für alle Typen gleich.

Zentrales Element ist somit die Traktionsbatterie. Aufgrund der Anforderungen im Fahrbetrieb und der technologischen Entwicklung wird die Traktionsbatterie in Lithium-Ionen-Technologie ausgeführt. Batterien werden über Gleichspannung geladen und stellen an ihren Klemmen während der Entladung ebenfalls Gleichspannung zur Verfügung. Die Spannung der Batterie bewegt sich im Bus- und Nutzfahrzeugsektor abhängig vom Aufbau i. d. R. zwischen ca. DC 500 – 850 V und bedarf deshalb Fachpersonal im Umgang. Die Gleichspannung wird über einen Antriebsumrichter in eine dreiphasige Wechselspannung umgesetzt, um den Motor und damit die Antriebswelle des Fahrzeuges anzutreiben. Dargestellt ist in der folgenden Grafik ein Zentralmotor, der über ein Differential an der Antriebsachse ansetzt. Üblich ist hier auch der Einsatz von radnahen Motoren oder Radnabenmotoren, wobei hier zwei Motoren pro Antriebsachse über separate Umrichter angetrieben werden. In Gelenk oder Doppelgelenk-Fahrzeugen über 15 m Länge werden häufig auch mehrere Achsen angetrieben. Entsprechend werden mehrere Motor-Umrichter Kombinationen parallel eingesetzt, die mit der zentralen Traktionsbatterie verbunden sind.

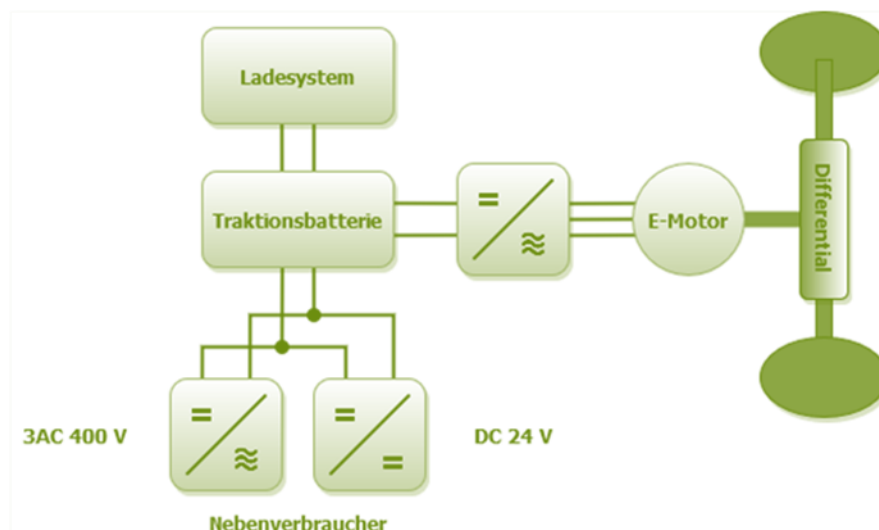


Abb. 4: Antriebstopologie batterieelektrischer Busse

In Diesel-Fahrzeugen erzeugt die Lichtmaschine mit der DC 24 V Batterie ein Kleinspannungsnetz für eine Vielzahl an elektrischen Nebenverbrauchern wie Beleuchtung, Scheibenwischer und ähnliches. In elektrischen Bussen wird die Lichtmaschine durch einen zusätzlichen DC 24 V

Umrichter ersetzt, der an die Traktionsbatterie angebunden ist (Hochspannungsbereich). Die DC 24 V Batterie bleibt im Fahrzeug enthalten und stabilisiert das Kleinspannungsnetz im Fahrzeug.

Für weitere Anwendungen wie Klimakompressoren werden höhere Leistungen benötigt, so dass i. d. R. eine höhere Spannung zum Einsatz kommt. Die meisten dieser Anwendungen sind auf 3AC 400 V Systeme ausgelegt, weshalb ebenfalls ein oder mehrere 3AC 400 V Umrichter für die Nebenverbrauchsaggregate in elektrischen Bussen verbaut sind.

Da elektrische Busse ebenfalls keine mechanisch angeflanschte Lenkhilfepumpe für die Servolenkung oder einen angeflanschten Druckluftkompressor nutzen können (im Stand ist die Drehzahl des E-Motors Null), müssen auch diese durch elektrisch angetriebene Versionen ersetzt werden.

Die hauptsächlichen grundlegenden Unterscheidungsmerkmale der batterieelektrischen Busse untereinander sind das Ladesystem und die gewählte Ladestrategie in Kombination mit der Batteriegröße. Üblicherweise wird die Batteriegröße durch die Ladestrategie bedingt. Depot-Ladestrategien erfordern großvolumige sogenannte Energiebatterien, während Strategien für das Laden auf Linie eine sehr leistungsfähige Batterievariante erfordern, die technisch bedingt kleinvolumig ausgelegt wird.

1.2.1.2 *Energiespeicher*

Kraftstoff für Verbrennungskraftmaschinen kann in flüssiger oder gasförmiger Form recht einfach und mit einer hohen Energiedichte auf dem Fahrzeug mitgeführt (gespeichert) werden. Für die Elektromobilität werden Speicher für elektrische Energie benötigt, die derzeit und auch mittelfristig bei Weitem nicht die Energiedichte von flüssigem Kraftstoff erreichen werden. Während früher Batterien auf Basis der Blei-, Nickel-Cadmium- oder sogar Schwefel-Natrium-Technologie Anwendung fanden, beherrschen derzeit hauptsächlich die Lithium-Ionen-Batterien den Markt für die Elektromobilität.

Das Feld der Lithium-Ionen-Batterie Technologie ist sehr vielseitig, weshalb an dieser Stelle lediglich die grundlegende Funktion erläutert werden soll. Lithium-Ionen (Li-Ion) Zellen bestehen vereinfacht aus den Hauptkomponenten Anode (negative Elektrode), Elektrolyt mit Separator und Kathode (positive Elektrode).

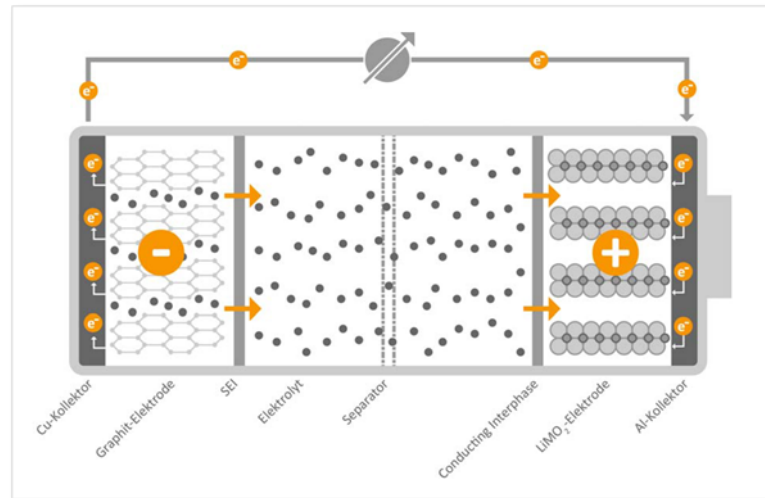


Abb. 5: Aufbau einer Li-Ion Zelle am Beispiel der Lithium-Mangandioxid-Zelle

Im Anodenmaterial werden bei der Entladung durch einen Oxidationsprozess Lithium-Ionen und Elektronen frei. Während die Ionen die Elektrolytschicht und den Separator passieren können, sind die beiden Elektroden elektrisch voneinander isoliert. Die Elektronen können also nicht durch die Zelle wandern, sondern fließen über den äußeren Stromkreis zur Anode. An der Anode findet ein Reduktionsprozess statt und die Lithium-Ionen werden im Kathoden-Trägermaterial eingelagert, wobei die Elektronen wieder aufgenommen werden. Im umgekehrten Fall (Zell-Ladung) werden dem Kathoden-Trägermaterial Elektronen entzogen, wodurch Lithium-Ionen frei werden. Diese passieren Elektrolyt und Separator, um an der Kathode wieder mit den Elektronen zu reagieren und werden im dortigen Trägermaterial eingelagert.

Die Anode besteht in der Regel aus Kupferfolie und einer Graphitschicht, um die Li-Ionen einlagern zu können. Alternativen, wie auch die LTO-Technologie, sind Lithium-Legierungen. Die Kathode besteht aus Mischoxiden, die auf Aluminiumfolie aufgebracht sind. Die Oxidschicht spendet während der Batteriebeladung die Lithium-Ionen.

Aktuell sind drei Arten der Zellchemie für E-Busse verbreitet: Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid (NMC), Lithium-Eisenphosphat (LFP) und Lithium-Titanat-Oxid (LTO). Alle drei Arten weisen unterschiedliche Eigenschaften hinsichtlich Anschaffungskosten pro kWh, Energiedichte, Zyklenfestigkeit (Lebensdauer) und Leistungsfähigkeit auf. Die Leistungsfähigkeit wird dabei anhand der C-Rate bemessen. Dieser Wert gibt an, welche maximale Leistung, bezogen auf die Batteriekapazität, die Batterie umsetzen kann. Eine C-Rate von 1 bedeutet, dass die Batterie in genau einer Stunde vollgeladen werden kann. Bei einer 200 kWh Batterie also eine Leistungsfähigkeit von 200 kW.

NMC-Batterien sind typische **Energiebatterien**. Die Zellzusammensetzung ist ideal geeignet, um hohe Energiemengen zu speichern. Die Anschaffungskosten pro kWh sind sehr günstig, jedoch bietet dieser Typ vergleichsweise geringe Zyklenfestigkeiten und Leistungswerte.

LTO-Batterien sind hingegen sogenannte **Leistungsbatterien**. Leistungswerte und Zyklenfestigkeit sind sehr hoch, wogegen Energiedichte und Kosten pro kWh gering bzw. hochpreisig eingestuft werden müssen.

Batterien mit LFP-Zellchemie werden ebenfalls dem Feld der Energiebatterien zugeordnet. Die einzelnen Parameter liegen üblicherweise zwischen den Werten von NMC und LTO-Zellchemie.

Vereinfacht interpretiert stellt die LFP-Technologie eine leistungsgesteigerte Energiebatterie gegenüber der NMC-Variante dar.

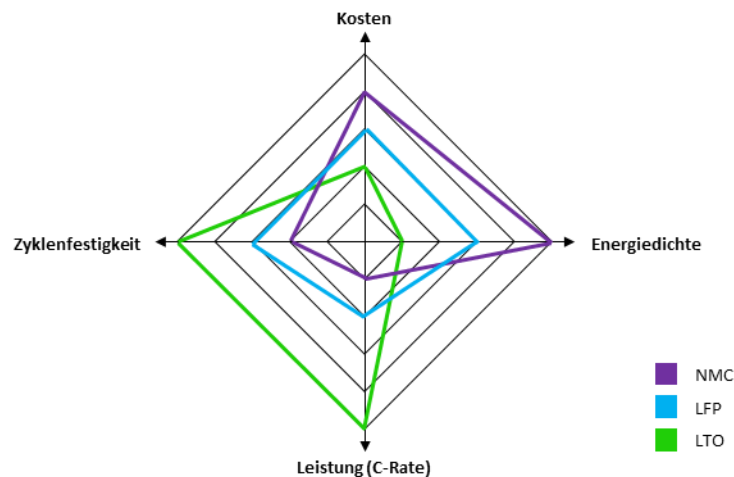


Abb. 6: Vergleich aktueller Zellchemie-Varianten im ÖPNV

Aufgrund der gegebenen Charakteristik werden Energiebatterien tendenziell großvolumig ausgelegt. Der Ansatz ist, die Zyklenlast möglichst gering zu halten, also wenige Ladevorgänge über die Lebensdauer auszuführen. Üblicherweise sind Energiebatterien so ausgelegt, dass sie in Betriebspausen mit geringer C-Rate geladen werden und die gespeicherte Energie über den Betriebstag verteilt, ohne Zwischenladen, abgeben.

Die Batterietechnologie entwickelt sich fortlaufend, so dass die namhaften Hersteller ca. alle drei Jahre eine verbesserte Generation von Batteriesystemen im Markt einführen. Es ist daher davon auszugehen, dass bald für Standardbusse Energiespeicher mit einer Kapazität größer als 500 kWh die Regel sein werden.

Leistungsbatterien werden hingegen kleinvolumig ausgelegt. Hier wird der Ansatz verfolgt, in mehreren Ladeintervallen pro Tag die Energie für den Tagesbedarf in der Batterie zu speichern. Für dieses wiederholte Zwischenladen ist eine hohe C-Rate erforderlich, um in kurzen Ladepausen den Ladestand nennenswert zu erhöhen.

Es ist jedoch nicht sinnvoll, aufgrund der hohen Anschaffungskosten pro kWh für Leistungsbatterien, anzunehmen, dass diese automatisch die teurere Variante darstellen. Berücksichtigt man die geringere zu installierende Kapazität und dehnt die Betrachtung auf die gesamte Lebensdauer aus, kann jede Variante anwendungsabhängig den Idealfall darstellen. Großen Einfluss haben hier externe Faktoren wie Infrastrukturkosten, Nutzungsprofil und Umgebungsbedingungen.

1.2.2 Brennstoffzellen-Fahrzeuge

1.2.2.1 Aufbau von Brennstoffzellenbussen

Fuel-Cell- bzw. Brennstoffzellenbusse (nachfolgend H₂-Bus genannt) sind grundsätzlich Hybridbusse, wobei meist neben einem Lithium-Ionen Batteriespeicher eine Brennstoffzelle als Primäraggregate eingesetzt wird. Auch hier erfolgt die Traktion elektrisch über einen Elektromotor. Abgesehen von der Brennstoffzelle entsprechen die eingesetzten Komponenten denen der voll-elektrischen Batteriebusse.

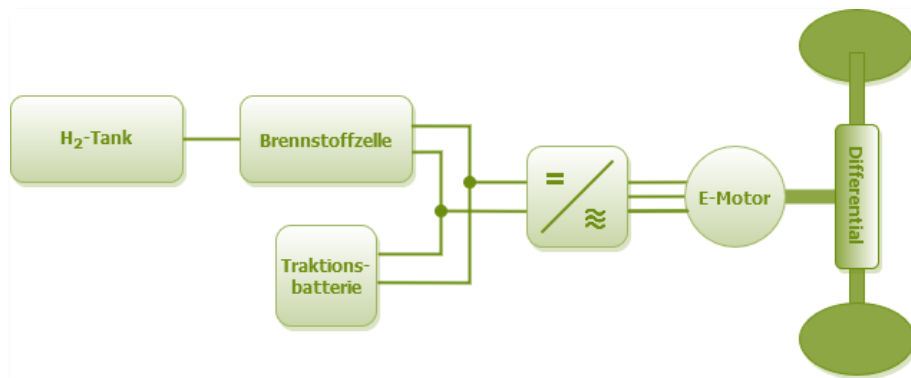


Abb. 7: Antriebstopologie Brennstoffzellenbus

In der Brennstoffzelle (BZ) reagiert Wasserstoff (H₂) mit Sauerstoff aus der Umgebungsluft in einem umgekehrten Elektrolyseprozess zu Wasser, wobei Energie freigesetzt wird. Der notwendige Wasserstoff wird in Wasserstofftanks im Fahrzeug mitgeführt. Aufgrund des größeren verfügbaren Bauraums im Bussektor gegenüber dem Pkw-Sektor, erfolgt die Speicherung bei reduziertem Druck (350 bar gegenüber 700 – 900 bar). Dies bietet Kostenvorteile sowohl auf Fahrzeug- als auch auf Tankinfrastrukturseite. Die mitgeführte Wasserstoffmenge beträgt etwa 30 bis 50 kg.

Prinzipiell kann ein H₂-Bus ohne Batteriespeicher direkt aus der Brennstoffzelle betrieben werden. Aus verschiedenen Gründen wird jedoch üblicherweise ein Batteriespeicher vorgesehen. Zum einen kann bereits über eine kleine Li-Ionen Batterie der Arbeitspunkt der Brennstoffzelle konstant gehalten werden, wodurch die Lebensdauer der kostenintensiven Brennstoffzelle maximiert wird. Andererseits ermöglicht die Brennstoffzelle keinen bi-direktionalen Leistungsfluss. Von den Elektromotoren durch Rekuperation gewonnene Bremsenergie kann also nur gespeichert werden, wenn zusätzlich ein Batteriespeicher im System eingebunden ist.

Ein entsprechender Systemaufbau mit einer Brennstoffzellen-Leistung in der Größenordnung von etwa 75 bis 100 kW elektrisch ist ausreichend, um die auftretenden Lastspitzen im Normalbetrieb eines H₂-Busses abzudecken.

Der Verbrauch eines 12 m H₂-Busses wird typischerweise zwischen 8,5 kg und 10,5 kg Wasserstoff pro 100 km angegeben. Natürlich ist der Wert stark abhängig von Fahrzeugkonfiguration, Umgebungsbedingungen und Witterungseinflüssen. Bei überschaubarem Energiebedarf für die Fahrzeugklimatisierung sind Reichweiten von 350 km und mehr absolut unkritisch.

Üblicherweise werden beim H₂-Bus Betankungsdauern von ca. 7 bis 10 Minuten angestrebt. Das Betriebskonzepte von Diesel- und H₂-Bus sind einander letztlich sehr ähnlich, auch wenn auf

Tankstellenseite auslegungsabhängig meist Regenerationszeiten zum Aufbau des Ladedrucks berücksichtigt werden müssen. Im Gegensatz zu batterieelektrischen Fahrzeugen deckt ein einziger kurzzeitiger Betankungsvorgang den Energiebedarf eines üblichen Betriebstags vollständig ab. Dieser Aspekt kann für eine Flottenumstellung sehr attraktiv sein. Jedoch muss dem Umstand Rechnung getragen werden, dass die Anzahl an Betankungsvorgängen pro Stunde pro Zapfsäule ggf. geringer ist als beim Dieselbus. Bei größeren Flotten müssen die Betankungsvorgänge zeitlich optimiert erfolgen, oder eine ausreichende Menge Zapfstellen vorgesehen werden.

Aktuell stellen Brennstoffzellen-Fahrzeuge die teuerste E-Bus Variante dar, was nicht zuletzt auf die Infrastrukturkosten zurückgeht.

1.2.2.2 Brennstoffzellen-Hybrid-Bus

Wie zuvor beschrieben, sind H₂-Busse sinnvollerweise immer als Hybridfahrzeug mit Brennstoffzelle und Batteriespeicher ausgeführt. Häufig werden im Bereich der H₂-Busse jedoch Begriffe wie Brennstoffzellenbus gegenüber Brennstoffzellen-Hybrid-Bus verwendet. Auch wenn es hier keine klare Definition gibt, geht dies üblicherweise auf die zusätzliche separate Nachlademöglichkeit des Batteriespeichers zurück. Fahrzeuge ohne elektrische Ladeschnittstelle werden dabei als (reiner) Brennstoffzellen- oder Fuel-Cell-Bus bezeichnet, während Fahrzeuge mit elektrischer Ladeschnittstelle den Zusatz „Hybrid“ im Namen führen (im Bereich der Diesel-Hybridtechnik spricht man von Diesel-Hybrid-Bussen gegenüber Diesel Plug-In-Hybrid-Bussen). Aufgrund der elektrischen Lademöglichkeit ist es sinnvoll, den Batteriespeicher größer auszulegen. So kann das Fahrzeug in der Betriebspause elektrische Energie speichern, was sich positiv auf den Wasserstoffverbrauch im Betrieb auswirkt. Das Fahrzeug bleibt darüber hinaus auch komplett ohne elektrisches Nachladen, bei erhöhtem Verbrauch, funktionsfähig. Der schematische Aufbau eines Brennstoffzellen-Hybrid Antriebsstranges ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

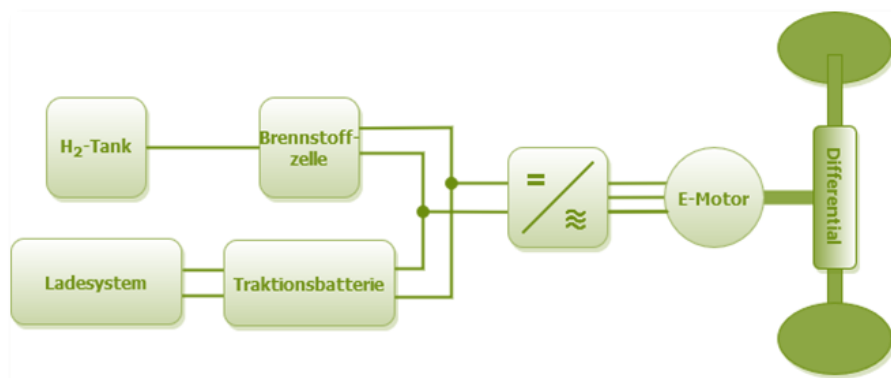


Abb. 8: Antriebstopologie BZ-REX bzw. BZ-Hybrid Bus

Abgesehen von der externen elektrischen Ladeschnittstelle, die üblicherweise als CCS-Steckkontakt ausgeführt ist, sind H₂-Busse und H₂-Hybrid-Busse gleich aufgebaut. Lediglich die Batteriegröße ist im Falle der Hybridausführung sinnvollerweise größer dimensioniert. Bei sehr groß dimensionierten Batterien und klein dimensionierten Brennstoffzellen wird häufig der Begriff Batteriebus mit Brennstoffzellen-Range-Extender (BZ-REX) aufgeführt, um die Typen noch weiter voneinander abzugrenzen.

Letztlich spiegeln die abweichenden Bezeichnungen weniger den technischen Aufbau der Fahrzeuge als die primäre Energiequelle wider:

- H₂-Bus: Energiezufuhr ausschließlich als Wasserstoff
- H₂-Hybrid-Bus: Energiezufuhr sowohl als Wasserstoff als auch über elektrische Ladeschnittstelle (ausgewogenes Verhältnis)
- BZ-REX Bus: Energiezufuhr primär über elektrische Ladeschnittstelle. Reichweitenerhöhung durch Wasserstoff (untergeordnet)

Typische Werte für den Batteriespeicher liegen bei etwa 40 bis 60 kWh für typische H₂-Hybrid-Anwendungen gegenüber 200 kWh und mehr für BZ-REX Anwendungen. Dem gegenübergestellt sind BZ-Leistungsklassen von 75 bis 100 kW für H₂-Hybride und 60 kW oder weniger für den BZ-REX Fall. Für BZ-REX Anwendungen ist es abhängig von der Systemauslegung, ob die Brennstoffzelle kontinuierlich bei sehr kleiner Leistung arbeitet oder erst ab einer bestimmten Entladetiefe zugeschaltet wird.

Durch das Zusammenspiel von extern geladenem Batteriespeicher und Brennstoffzelle können Verbrauchswerte für H₂-Hybrid-Busse und BZ-REX Busse nicht einfach pauschal abgeschätzt werden. Vereinfacht ausgedrückt ist bei langen Umläufen der Batteriespeicher früher entladen und das Energiedefizit muss über einen höheren H₂-Verbrauch gedeckt werden. Umgekehrt kann es sein, dass bei kurzen Umläufen der Batteriespeicher vollständig ausreicht, den Energiebedarf zu decken. Nicht zuletzt hängt die Verbrauchsgestaltung auch von der Regelungstechnologie ab, also davon, wann die Brennstoffzelle mit welchem Leistungswert zugeschaltet wird oder nicht.

Dieser Zusammenhang ist in folgender Tabelle dargestellt. Während für den reinen H₂-Bus einheitliche Verbrauchswerte abgeschätzt werden können, variieren diese für den BZ-REX-Bus stark:

Verbrauch pro 100 km	H ₂ -Bus	BZ-REX
Unbekannte Umlauflänge	8,5 – 10,5 kg H ₂	40 – 160 kWh Strom; 0 – 8 kg H ₂
125 km Umlauflänge		135 kWh Strom; 0 – 8 kg H ₂
250 km Umlauflänge		80 kWh Strom; 0 – 8 kg H ₂

Tab. 1: Exemplarische Verbrauchsdaten H₂-Busse

Basierend auf den Ausführungen von H₂-Bussen ergeben sich auch unterschiedliche Ansprüche an die benötigten Infrastrukturkomponenten. Reine H₂-Busse benötigen ausschließlich eine Wasserstofftankstelle. BZ-REX Busse hingegen benötigen neben einer Wasserstoffinfrastruktur auch eine zusätzliche Ladeinfrastruktur, um die Traktionsbatterie zu laden. Werden ausschließlich Fahrzeuge mit Range Extender eingesetzt, können stellenweise auch die Anforderungen an die Wasserstoffinfrastruktur, aufgrund der geringeren Kapazitätsanforderungen, reduziert werden.

1.2.3 Emissionsbehaftete Antriebskonzepte für Omnibusse

1.2.3.1 Diesel-Plug-In-Hybrid-Bus

Der Plug-In Hybrid-Bus stellt streng genommen keine eigenständige Fahrzeugklasse dar. Grundsätzlich sind alle beschriebenen Hybrid-Varianten als Plug-In Hybrid ausführbar. Die Bezeichnung Plug-In bezieht sich auf eine externe Lademöglichkeit der Traktionsbatterie.

Im Allgemeinen wird eine externe Lademöglichkeit erst bei vergleichsweise großen Batteriekapazitäten vorgesehen. Somit umfasst die Bezeichnung im praktischen Sprachgebrauch Hybrid-Fahrzeuge, bei denen dem elektrischen Teil-Antriebsstrang eine höhere Bedeutung zugemessen wird.

Die Nachladung kann grundsätzlich wie im Kapitel „batterieelektrische Fahrzeuge“ beschrieben erfolgen. Verfügbar sind bisher Varianten mit Nachladung per Steckkontakt oder Pantograph, wobei auch andere Schnittstellen durchaus umsetzbar sind. Der Übergang vom Hybridfahrzeug zum batterieelektrischen Fahrzeug mit sogenanntem Range Extender ist hierbei fließend, weshalb die Systeme untereinander ähnlich sind.

Plug-In Hybridfahrzeuge ermöglichen rein elektrische Reichweiten von 7 km bis mehr als 20 km. Die Batterien sind bei den führenden Herstellern auf Opportunity Charging Konzepte ausgelegt und entsprechend schnellladefähig. Bei adäquater Systemauslegung (Verteilung der Ladestationen) lässt sich der reguläre Linienbetrieb vollkommen im Elektrobetrieb umsetzen. Das Dieselaggregat wird in diesem Fall lediglich für die Transferfahrten Depot-Linie und für etwaige Ausfälle der Ladeinfrastruktur benötigt (Range-Extender Betrieb). Durch den Dieselantrieb sind die beschriebenen Systeme sehr variabel und können auch ohne weitere Ladeinfrastruktur als Hybridfahrzeuge im Dieselmotorbetrieb eingesetzt werden.

Anmerkung

Aktuell sind keine aktuellen Modelle für Diesel-Plug-In-Hybrid-Busse am Markt bekannt. Entsprechende Modelle sind eher als abgelöste Übergangstechnologie zu betrachten.

1.2.3.2 Erdgas-Bus

Ein Erdgasbus ähnelt von der Technologie einem Standard-Dieselbus. Statt des Dieselmotors wird jedoch komprimiertes Erdgas (CNG) verwendet. Erdgasfahrzeuge gehören in ihrer Einstufung auch zu den Fahrzeugen, die eine alternative Antriebstechnik besitzen.

Die Speicherung des Erdgases erfolgt in Druckflaschen auf dem Dach des Fahrzeugs, vergleichbar mit den Wasserstoff-Speichern der Brennstoffzellenfahrzeuge. Das Druckniveau beträgt jedoch nur bis zu 200 bar.

Erdgasbusse werden ebenfalls als Hybridbusse angeboten, die in den vorherigen Kapiteln gemachten Aussagen zur Hybridtechnik haben auch für Erdgasbusse Gültigkeit.

Ein Vorteil von Erdgasbussen ist die Einstufung als „sauberes Fahrzeug“ in der Clean Vehicle Directive. Somit emittiert zwar ein Erdgasbus immer noch Schadstoffe (vor allem CO₂ und NO_x),

der Ausstoß liegt jedoch unterhalb der Emissionen eines vergleichbaren Fahrzeugs mit Dieselmotor. Durch den Einsatz von Biogas kann der ökologische Fußabdruck weiterhin deutlich reduziert werden.

1.2.4 Nebenaggregate vollelektrischer Busse

Fahrzeugnebenaggregate von Elektrobussen, wie z.B. eine Lenkhilfepumpe, die Beleuchtungsanlagen und insbesondere Heizung und Klimatisierung (englisch Heating, Ventilation und Air Conditioning, HVAC) können abhängig von den Betriebsbedingungen signifikante Energieverbräuche aufweisen. Diese können im Spitzenfall sogar höher ausfallen als die für die Traktion benötigte Energie. Zusätzliche elektrische Nebenverbraucher haben somit einen direkten Einfluss auf die realisierbare Reichweite der E-Busse im Fahrbetrieb. Die Fahrzeughersteller und Zulieferer haben die daraus resultierenden notwendigen energetischen Effizienzsteigerungen der Nebenverbraucher erkannt und stattdessen neue Elektrobustmodelle deshalb mit immer effizienteren Technologien aus.

Die eingesetzten Nebenverbraucher lassen sich im Wesentlichen den vier Kategorien elektrische Verbraucher, mechanische Verbraucher, Thermomanagement Batterie und Thermomanagement Innenraum unterteilen. Auf Grund von Wechselwirkungen zwischen den Kategorien (beispielsweise im Thermomanagement) können nicht alle Komponenten isoliert betrachtet werden. Die folgende Abbildung zeigt die Kategorisierung der Nebenverbraucher.



Abb. 9: : Kategorien von Nebenverbrauchern

1.2.5 Überblick über die aktuelle E-Bus-Marktsituation in Deutschland

Der E-Bus-Markt in Deutschland hat sich hinsichtlich der Nachfrageseite und der eingeflotteten E-Busse in den vergangenen zehn Jahren dynamisch entwickelt. Der folgende Abschnitt zeigt die Entwicklung des Elektrobus-Bestandes im Ist auf. Neben der aktuellen Bestandsflotte werden indessen auch bereits bekannten Planungen zur Einflottung von E-Bussen bei deutschen Verkehrsunternehmen analysiert.

Die Erfassung des Bestandes sowie der Entwicklung des deutschen Elektrobus-Bestandes erfolgen mit einer „Bottom-up“-Methodik. Bei dieser Methodik werden die Elektrobusse auf Ebene der Verkehrsunternehmen bzw. Kommunen erfasst, indem auf öffentlich verfügbare Informationen zu den jeweiligen Planungen zurückgegriffen wird.

Elektrobus-Bestand im Ist

Zum Erhebungsstand Dezember 2023 befinden sich insgesamt 2.640 E-Busse in Deutschland im Einsatz. Mit Blick auf die Zuwachsraten der letzten fünf Jahre lässt sich ein nahezu exponentielles Wachstum feststellen (siehe Abb. 10).

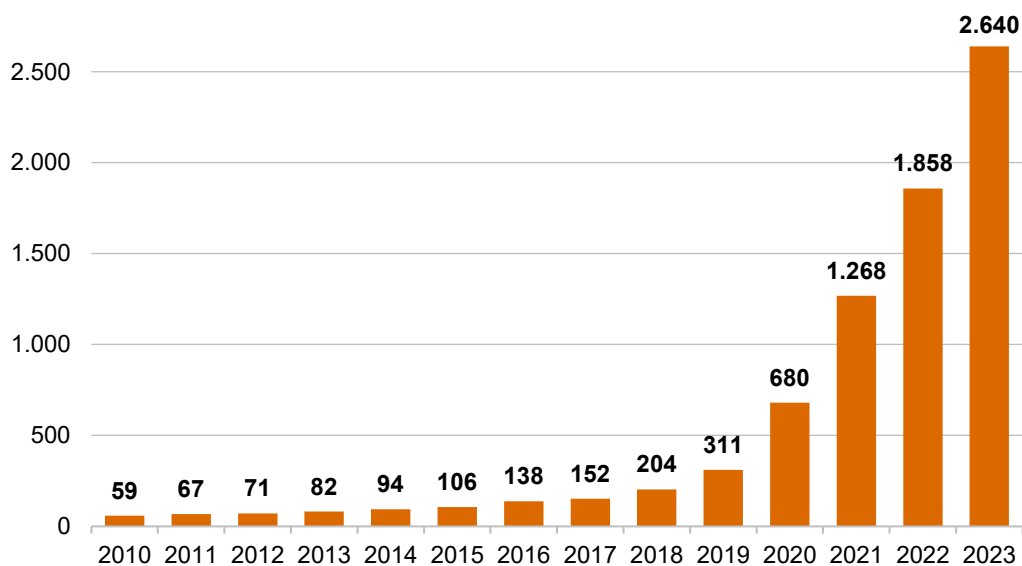


Abb. 10: Elektrobus-Bestand im Ist (Datenstand: 31. Dezember 2023) (n=2.640)

Nichtsdestotrotz spielen Elektrobusse nach wie vor noch eine untergeordnete Rolle im straßengebundenen ÖPNV mit Omnibussen in Deutschland. Der Gesamtbestand der in Deutschland im ÖPNV eingesetzten Busse beträgt gemäß Marktrecherchen von PwC aktuell rund 54.000 Fahrzeuge. Dieser Wert stammt aus einer Hochrechnung, basierend auf den veröffentlichten Statistiken des VDV (Anzahl der für den ÖPNV eingesetzten Fahrzeuge der VDV-Mitglieder) und des Statistischen Bundesamts (Verkehrsleistung im ÖPNV in Deutschland) für das Jahr 2018. Bei einem Gesamtbestand von ca. 54.000 ÖPNV-Bussen in Deutschland repräsentieren Elektrobusse somit heute gut 5 % der bundesdeutschen Flotte. Auch bei den Neuzulassungen stellen die Elektrobusse derzeit zwar noch eine Minderheit dar, eine Steigerung des E-Bus-Anteils

an den Neuzulassungen ist indessen zunehmend zu beobachten. Bei einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von ÖPNV-Bussen von 12 Jahren und der Annahme einer kontinuierlichen Neubeschaffung ergeben sich bei einem ÖPNV-Busbestand von 54.000 Fahrzeugen rund 4.500 Neuzulassungen pro Jahr. Im Verhältnis dazu liegt der E-Bus-Anteil an den Neuzulassungen in Deutschland im Jahr 2023 mit hinzugekommenen 782 Elektrobussen rechnerisch bei knapp 11 %. Hierbei ist jedoch auch zu berücksichtigen, dass die Verteilung regionale Unterschiede aufweist. In einigen Regionen und Städten sind sowohl die absoluten Beschaffungszahlen als auch die Anteile wesentlich höher und zeigen die dynamische Entwicklung im Bereich von Elektrobussen.

Die Verteilung des Elektrobus-Bestands nach Antriebsart zeigt, dass der Elektrobus-Bestand zu Beginn der 2010er-Jahre insbesondere durch Oberleitungsbusse geprägt war. Ausschlaggebend dafür sind die drei Städte Solingen, Esslingen und Eberswalde, die die einzigen deutschen Städte sind, die O-Busse einsetzen. Darüber hinaus kann festgestellt werden, dass Plug-In-Hybrid-Busse eine insgesamt untergeordnete Rolle spielen. Weiterhin zeigt sich, dass die Anzahl der Brennstoffzellenbusse im Zeitverlauf deutlich gestiegen ist. Deren Anzahl hat sich von 67 Fahrzeugen im Jahr 2020 auf 185 Fahrzeuge im Jahr 2023 erhöht, was einer Steigerung von mehr als 150 % entspricht.

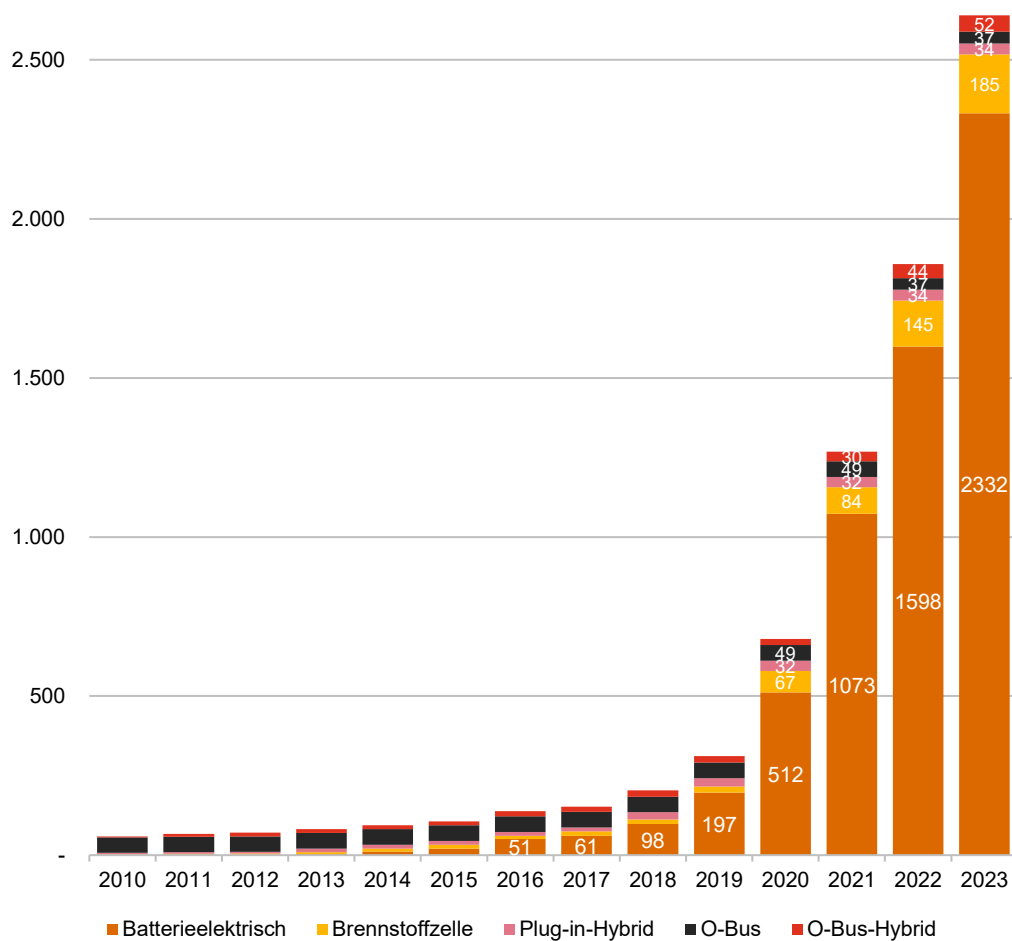


Abb. 11: Elektrobus-Bestand nach Antriebsarten (n=2.640)

Abb. 11 lässt aber insbesondere erkennen, dass nach wie vor die größten absoluten Zuwächse im Bereich der Busse mit batterieelektrischem Antrieb (Batteriebusse) zu verzeichnen sind. Ihr Bestand hat sich von 512 Fahrzeugen im Jahr 2020 auf 2.332 im Jahr 2023 signifikant erhöht. Insgesamt sind die Zuwächse des Elektrobus-Bestands im Jahr 2023 somit im Wesentlichen auf Batteriebusse zurückzuführen.

Elektrobus-Bestand im Plan

Nachdem im vorherigen Abschnitt die Elektrobus-Bestandszahlen zum Stichtag 31. Dezember 2023 im Ist dargestellt wurden, sollen in diesem Abschnitt die absehbaren Entwicklungen bis zum Jahr 2030 analysiert werden. Methodisch basiert die hier vorgestellte Erfassung der Entwicklung ebenfalls auf einer „Bottom-up“-Methodik, die auf Ausschreibungen, Unternehmensplanungen und anderen öffentlich kommunizierten Planungen der Unternehmen bzw. Aufgabenträger basiert. Die internen und bisher nicht öffentlich gemachten Planungen bzw. noch nicht weiter konkretisierten Überlegungen der betreffenden Unternehmen und Aufgabenträger lassen zukünftig weiter steigende Zahlen für den Elektrobus-Bestand erwarten. Die folgende Abbildung verdeutlicht, dass sich die dynamische Entwicklung der Elektrobusflotte in Deutschland, die bereits im Ist-Bestand zu erkennen ist, weiterhin fortsetzen wird.

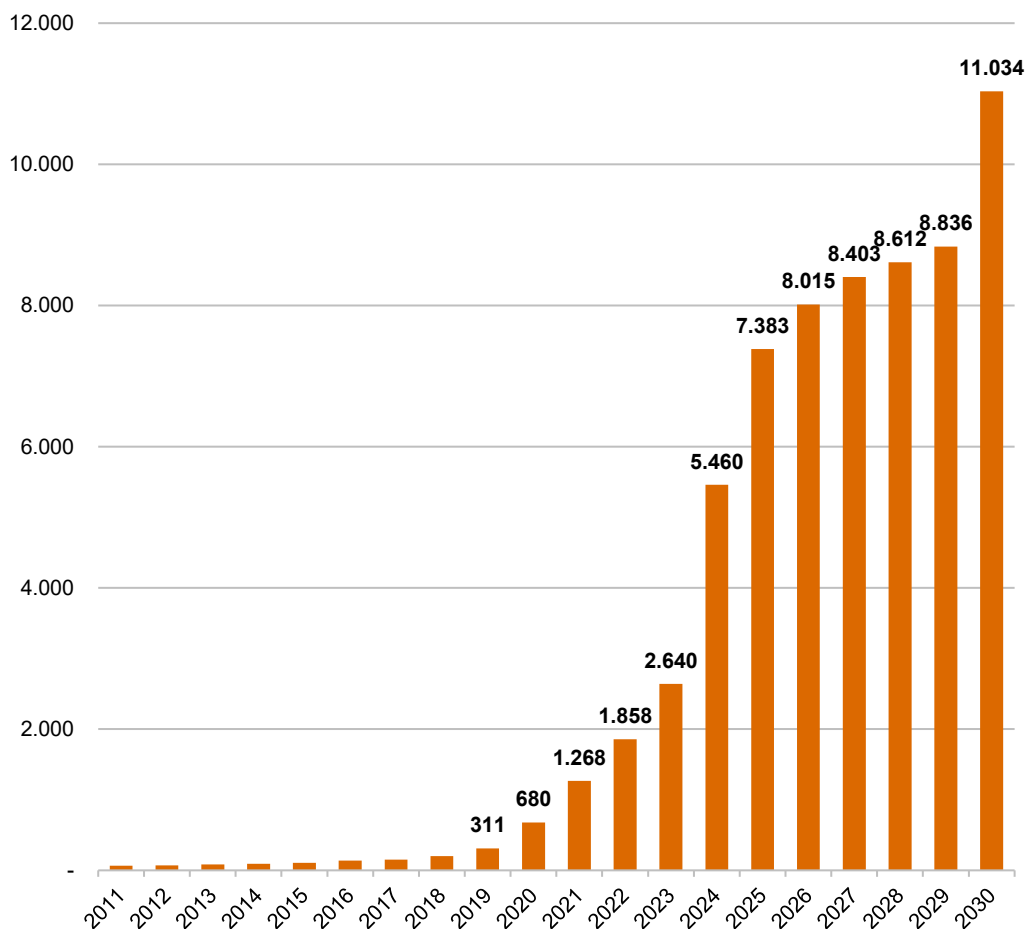


Abb. 12: Geplante Entwicklung des Elektrobus-Bestand bis 2030 (n=11.034)

Die bedeutende Rolle der batterieelektrischen Antriebstechnologie zeigt sich nicht nur im Status quo, sondern auch in den Planungen bis zum Jahr 2030. Knapp 9.300 der rund 11.000 derzeit bekannten Fahrzeugbeschaffungsplanungen entfallen auf den batterieelektrischen Antrieb. Auch der Anteil der Brennstoffzellenbusse erhöht sich bis zum Jahr 2030 deutlich im Vergleich zum Status quo, bleibt aber in relativer Betrachtung von deutlich geringer Relevanz. Derzeit sind Planungen für insgesamt 1.268 Brennstoffzellenbusse bei deutschen Verkehrsunternehmen bekannt (siehe Abb. 13).

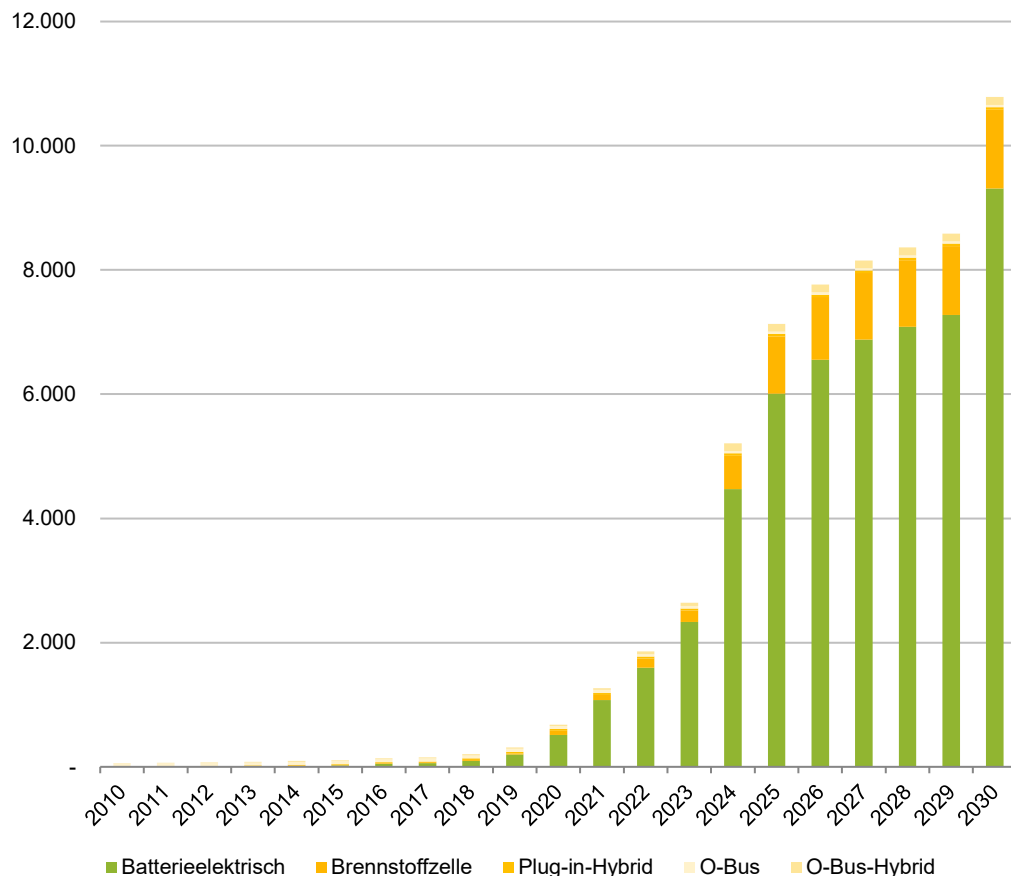


Abb. 13: Elektrobus-Bestand nach Antriebsarten bis zum Jahr 2030 (n=11.034)

In Hinblick auf die Häufigkeit der eingesetzten Ladestrategien bereits eingeflotteter Batteriebusse in Deutschland zeigt sich aktuell eine stärkere Verbreitung der Depotladung, wobei auch der Zusammenhang zur Fahrzeuggröße interessant ist. Von insgesamt 2.332 Batteriebusen in Deutschland sind 1.586 Standard-Solobusse und 745 Gelenkbusse. Bei einem Fahrzeug handelt es sich um einen Doppelstockbus. Bei insgesamt 2.110 dieser Fahrzeuge konnte die gewählte Ladestrategie erfasst werden. In Summe werden 1.571 Batteriebusse über Nacht im Depot nachgeladen, während 539 Batteriebusse während des Linieneinsatzes bei Gelegenheit zwischengeladen werden (vergleiche Tab. 2).

	Depotladung	Gelegenheitsladung	Keine Erfassung	Summe
Solo	1.194	206	186	1.586
Gelenk	377	333	35	745
Doppelstock			1	1
Summe	1.571	539	222	2.332

Tab. 2: Übersicht von Batteriebussen nach Bauart und Ladestrategie (n=2.332)

Es lässt sich schließlich festhalten, dass die häufigste E-Bus-Konfiguration in Deutschland bisher ein Standard-Solo Batteriebus von 12 m Länge ist, der über Nacht im Depot nachgeladen wird.

1.2.6 Übersicht des verfügbaren Fahrzeugangebots

Für die Entwicklung einer Strategie für die Flottentransformation ist es wichtig das, absehbar am Markt verfügbare, Fahrzeugangebot zu berücksichtigen. Hierzu führt PwC kontinuierlich eine Marktbeobachtung durch, die alle Busse mit elektrifizierten Antrieben umfasst. Hierunter fallen BEV, HEV/PHEV, FCEV und Trolleybusse. Im Ergebnis liegt somit eine umfassende Übersicht über die am europäischen Markt verfügbaren E-Bus-Modelle und deren Spezifikationen vor. Im Rahmen der Erhebung des Angebotes derjenigen E-Bus-Modelle, die auf dem europäischen Markt verfügbar sind, wurden insgesamt 342 Fahrzeugtypen bzw. -modelle erfasst, wobei nicht immer sämtliche Informationen erhoben werden konnten.

Antriebsart

Die Auswertung des E-Bus-Marktes hinsichtlich der angebotenen Antriebsarten zeigt aktuell ebenfalls eine deutliche Dominanz des Batteriebusses. Batteriebusse (243 Fahrzeuge) stellen knapp 70 % des gesamten Fahrzeugangebotes dar. E-Busse als Plug-In-Hybride repräsentieren die zweitgrößte Gruppe mit 34 Fahrzeugen. O-Bus-Hybride sind dabei mit 32 verfügbaren Modellen in ähnlicher Anzahl an Modellen verfügbar. FCEV-Busse weisen in der relativen Betrachtung ein geringes Angebot auf (26 Fahrzeuge). Auch E-Busse als Voll-O-Busse werden auf dem europäischen E-Bus-Markt vergleichsweise selten angeboten (7 Fahrzeuge). Die folgende Abbildung zeigt die Anzahl der E-Bus-Modelle nach Antriebsart im Überblick.

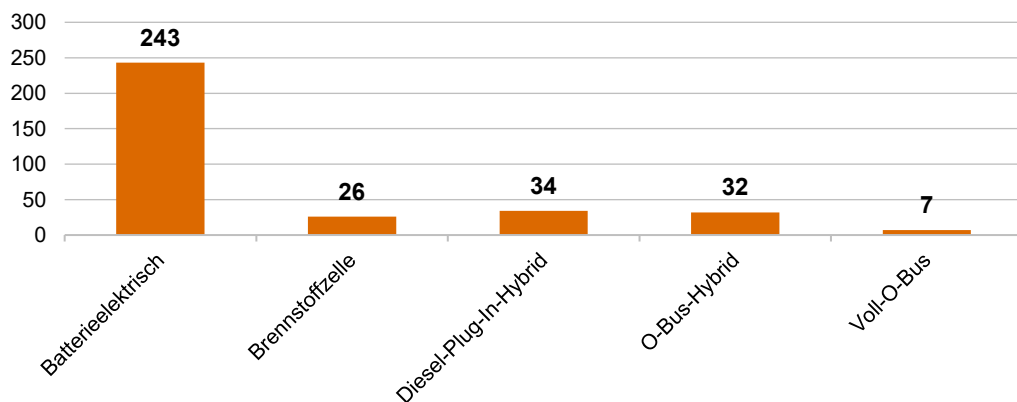


Abb. 14: Fahrzeugmodelle nach Antriebsart

Bauart

Bei der Mehrheit der auf dem Markt angebotenen E-Bus-Modelle handelt es sich um Standard-Solobusse (157), gefolgt von Gelenkbussen (66) und Midi-Bussen (55). Hinsichtlich der Bauarten Mini, Doppeldecker, Klein, Doppelgelenk und Standard-3-Achs sind jeweils weniger als 20 Fahrzeugmodelle verfügbar, wie folgende Abbildung zeigt.

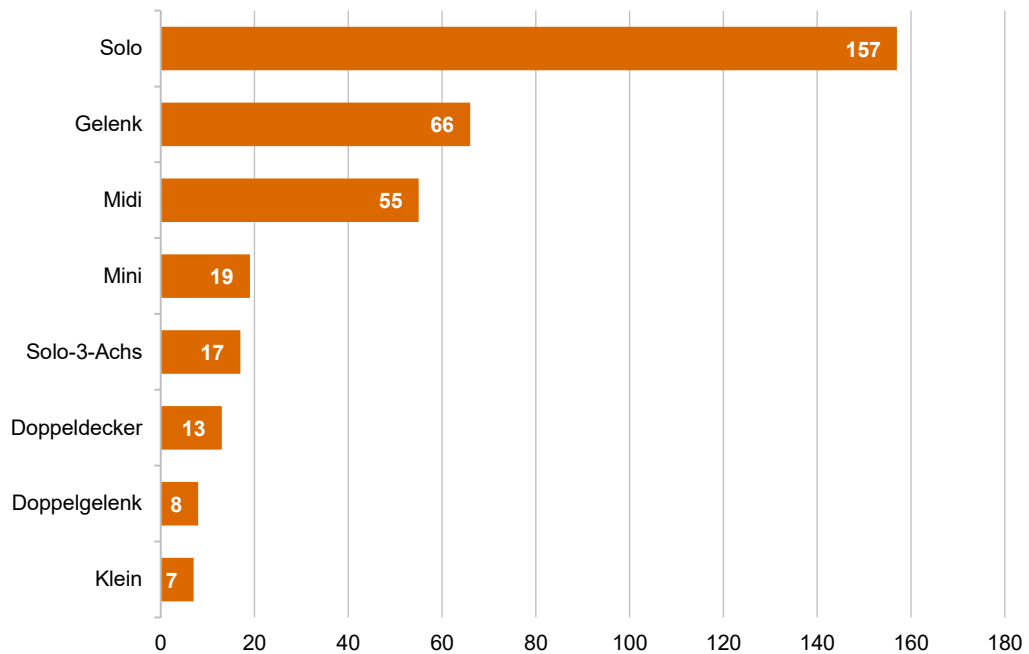


Abb. 15: Anzahl der verfügbaren Fahrzeugmodelle nach Bauart (n=342)#

Ladestrategie

In Bezug auf das Ladekonzept der erfassten E-Bus-Modelle zeigt sich ebenfalls ein deutlich ausgeprägter Schwerpunkt. Die meisten verfügbaren Fahrzeugmodelle sind Depotlader. 46 Fahrzeugmodelle werden hingegen als Gelegenheitslader angeboten. Es existieren daneben auch BEV-Busse, die ein Mischkonzept aus Depot- und Gelegenheitsladen ermöglichen. Diese machen ca. 15 % der verfügbaren Modelle aus. Weiterhin existieren 119 Modelle, welche keine Angabe in Bezug auf das präferierte Ladekonzept machen. Die folgende Abbildung zeigt zusammenfassend die Anzahl der angebotenen E-Bus-Modelle nach Ladekonzept.

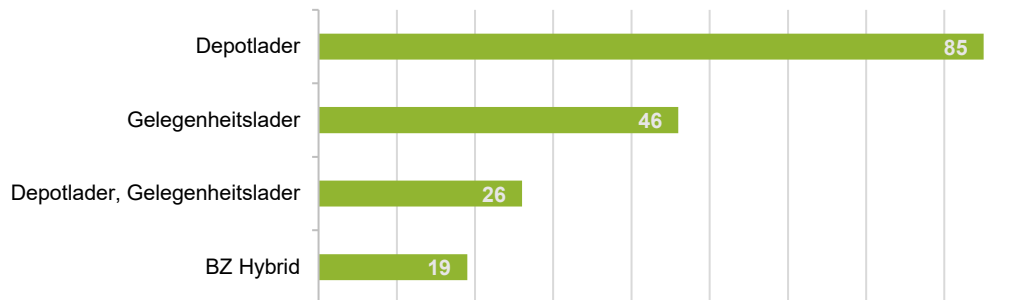


Abb. 16: Anzahl der angebotenen Fahrzeugmodelle nach Ladestrategie (n = 295)

Batteriekapazität

Hinsichtlich der verfügbaren Batteriekapazität zeigt sich eine zweigeteilte Abhängigkeit. Zum einen ist die Bauart bestimmend für die verfügbare Kapazität der Traktionsbatterie. Gelenkbusse haben demnach, insbesondere aufgrund ihres höheren Energiebedarfes, eine höhere durchschnittliche Batteriekapazität. Zum anderen bestimmt die vorgesehene Ladestrategie der Fahrzeuge die Batteriekapazität. Depotlader weisen somit durchschnittlich eine höhere Batteriekapazität (Solobus 337 kWh, Gelenkbus 542 kWh) auf als Gelegenheitslader, wie folgende Abbildung veranschaulicht.

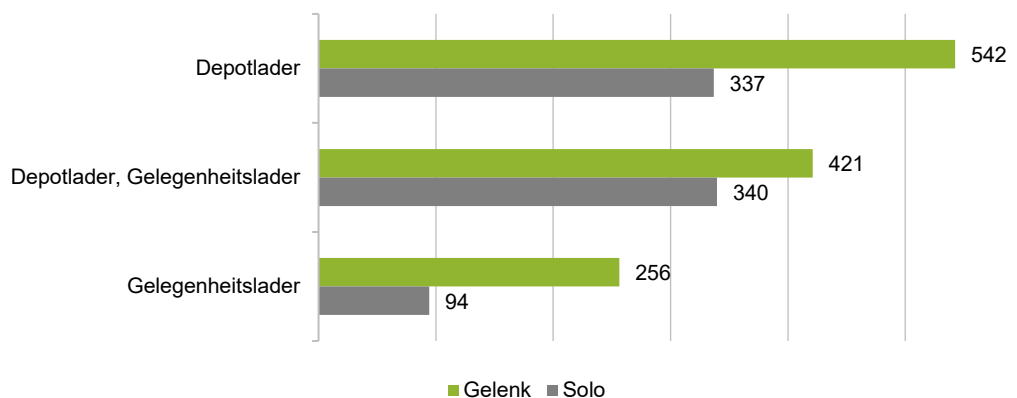


Abb. 17: Verfügbare durchschnittliche Batteriekapazitäten angebotener Batteriebusse nach Ladestrategie und Bauart in kWh

Maximale Reichweiten der E-Busse

In Bezug auf die maximalen Reichweiten der Batteriebusse gemäß Herstellerangaben ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den Batteriekapazitäten. Bei Batteriebussen weisen Depotlader im Durchschnitt die höchsten Reichweiten mit einer Ladung auf (368 km bei Gelenkbussen und 315 km bei Solobussen). Brennstoffzellenbusse haben dagegen im Mittel eine höhere Reichweite. Solobusse erzielen hier mit einer Wasserstoff-Tankfüllung eine durchschnittliche Reichweite von 479 km gemäß Angaben der Hersteller. Brennstoffzellen-Gelenkbusse kommen dabei auf eine maximale Reichweite von 300 km. Die folgende Abbildung stellt die durchschnittlichen maximalen Reichweiten von Batterie- und Brennstoffzellenbusse nach Ladestrategie und Bauart gegenüber.

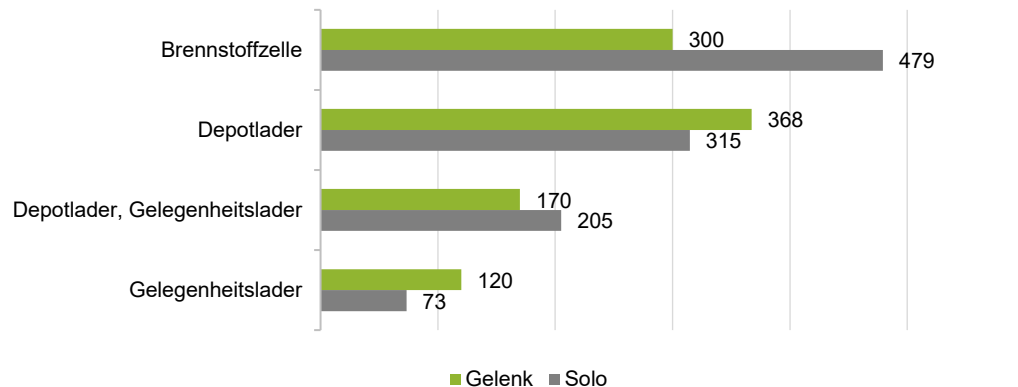


Abb. 18: Durchschnittliche Reichweiten (gemäß Herstellerangabe) angebotener Batteriebusse nach Ladestrategie und Bauart in km

Zu beachten ist hierbei jedoch, dass diese Reichweiten häufig nicht den in der Praxis erreichbaren Werten entsprechen. Hier ist insbesondere zu berücksichtigen, dass das ÖPNV-System auch unter schwierigen Bedingungen (kalter Wintertag, heißer Sommertag, Topografie etc.) funktioniert. Unter diesen realen Einsatzbedingungen stellen sich entsprechend andere Energieverbräuche ein. Diese realen Bedingungen unter den spezifischen lokalen Rahmenbedingungen werden daher bei den folgenden Analysen im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie zugrunde gelegt.

Im Fokus der weiteren Betrachtung steht das Thermomanagement des Innenraums. Hier besteht unter den Nebenverbrauchern insgesamt der größte Einfluss auf den Gesamtenergieverbrauch der Fahrzeuge. Die folgende Abbildung zeigt ein Praxisbeispiel zum Gesamtenergieverbrauch eines Batteriebusse im Fahreinsatz. Der Maximalverbrauch (unter den schlechtesten Einsatzbedingungen) pro Fahrzeugkilometer liegt hier rund 40 % höher als der durchschnittliche Verbrauch. Der Mehrverbrauch geht dabei vor allem auf die Heizung zurück, während der Energiebedarf weiterer Nebenverbraucher beim Durchschnitts- und Maximalwert vergleichbar ist und die Traktionsenergie nur geringfügig höher liegt.

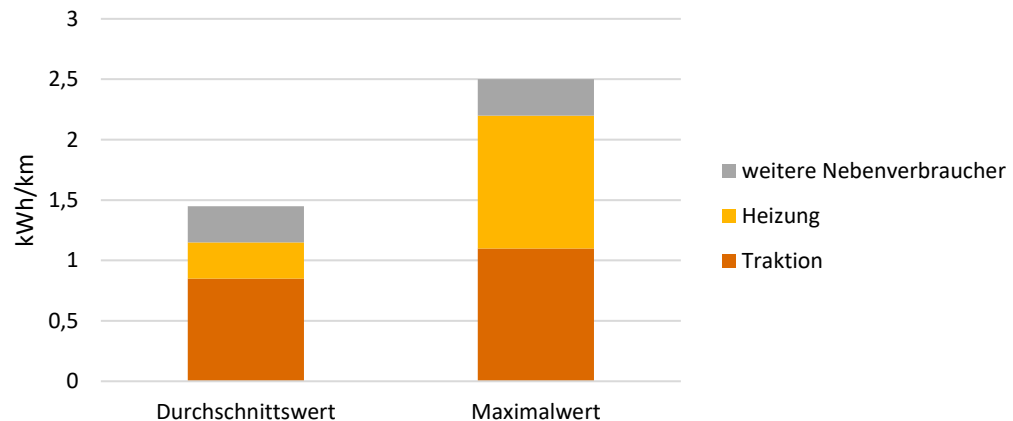


Abb. 19: Anteile der Nebenverbraucher am Gesamtenergieverbrauch⁵

Des Weiteren hängt der Gesamtenergieverbrauch je nach Anwendungsfall u. a. von folgenden Faktoren ab, die auch Wechselwirkungen mit den Nebenverbrauchern haben:

- Fahrzeugkonfiguration (Hersteller, Größenklasse, Komponenten, Ausstattung, HVAC-Konzept)
- Fahrprofil (Durchschnittsgeschwindigkeit, Topografie, Anzahl der Haltestopps, Anzahl und Dauer der Fahrgastwechsel)
- Betriebsbedingungen (Umlaufpläne, Standort vor dem Betrieb, Umgebungstemperatur, Tageszeit, Anzahl der Fahrgäste, Fahrgastinnenraum-Solltemperatur)

Die Abhängigkeit typischer Energieverbräuche von Elektrobussen von der Außentemperatur und dem Heizkonzept zeigt die folgende Abbildung. Die dargestellten Verbrauchswerte verdeutlichen die Relevanz der Heizung und Klimatisierung infolge unterschiedlicher Außentemperaturen. Insbesondere dem Heizkonzept wird bei der Entwicklung moderner Elektrobuse aus diesem Grund eine wichtige Rolle beigemessen.

⁵ Vgl. https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2018-09/Schlussbericht_E-Busse%20Hannover.pdf

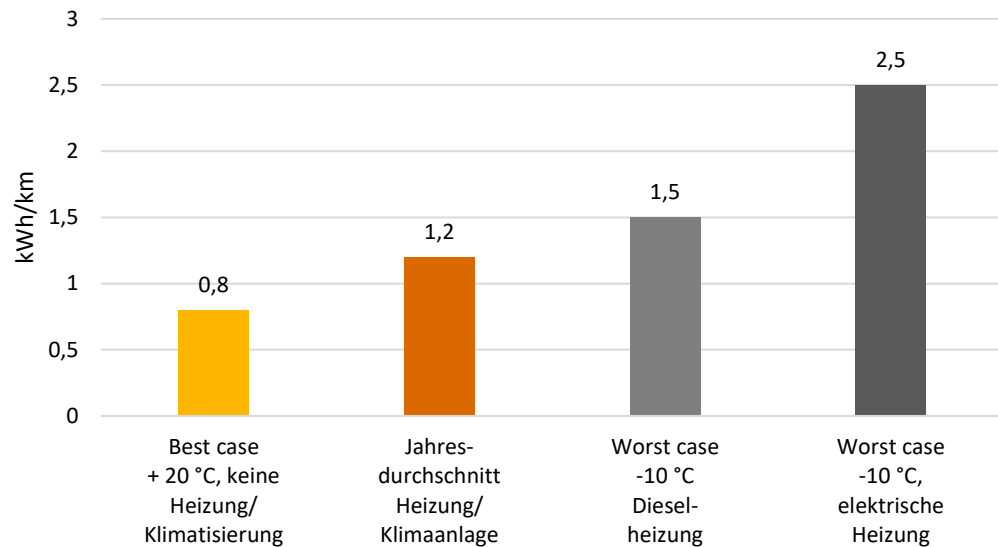


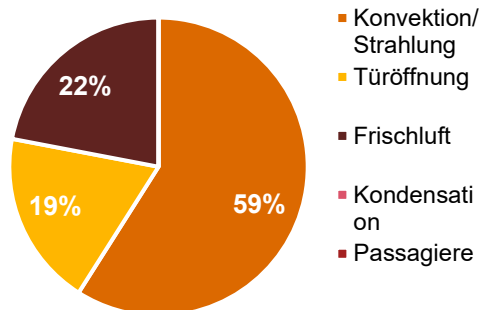
Abb. 20: Typischer elektrischer Energieverbrauch von Elektrobussen⁶

Thermomanagement Innenraum

Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft für einen durchschnittlichen Betriebspunkt die Anteile am Energieverbrauch nach verschiedenen Ursachen beispielhaft jeweils für kalte Außentemperaturen (Heizbetrieb) und warme Außentemperaturen (Kühlbetrieb) auf. Die Anteile variieren dabei je nach Betriebsbedingungen und Anwendungsfall. Im dargestellten Beispiel zeigt sich, dass sowohl für Heizen als auch für Kühlen rund die Hälfte des Energieverbrauchs der Konvektion/Strahlung zugeordnet werden kann. Die Anteile des Energieverbrauchs durch Frischluftzufuhr im Heiz- und Kühlbetrieb liegen mit rund 20 % auf einem ähnlichen Niveau. Größere Unterschiede sind beim Energieverbrauch durch das Öffnen der Türen zu erkennen, dessen Anteil im Winter (Heizbetrieb) mit rund 20 % deutlich höher ist als im Sommer (2 %). Dies kann durch die höheren Temperaturunterschiede und somit auch Druckunterschiede zwischen dem Fahrgastraum und der Umgebung im Winter erklärt werden. Zusätzlich zu den Verbräuchen der Konvektion/Strahlung, Frischluftzufuhr und der Türöffnung treten im Sommer außerdem Verbräuche durch die Abwärme der Passagiere und durch Kondensation auf.

⁶ Vgl. <https://www.sustainable-bus.com/news/electric-bus-range-focus-on-electricity-consumption-a-sum-up/>

Heizbetrieb, -15 °C



Kühlbetrieb, 30 °C

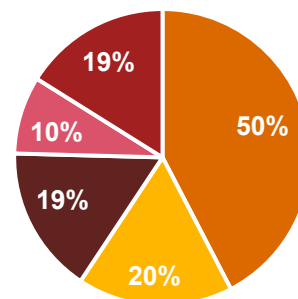


Abb. 21: Anteile am Energieverbrauch im Heiz- und Kühlbetrieb⁷

Verringerung des Energiebedarfs

Den hohen Energieverbräuchen durch Konvektion und Strahlung kann mit unterschiedlichen Maßnahmen entgegengewirkt werden. Eine Möglichkeit bieten passive Maßnahmen z. B. Speziallackierungen, sogenannte „cool paints“, und spezielle Verglasungen (z. B. Doppelverglasung bzw. Wärmeschutzverglasung), die dafür sorgen, dass ein Großteil der Infrarotstrahlen des Sonnenlichts reflektiert und damit der Wärmeübertrag im Bereich der Fenster minimiert wird. Der Fahrzeughersteller VDL gibt die Einsparungspotenziale durch Anwendung einer Doppelverglasung in der neuen Citea-Bus-Generation beispielsweise mit um 10 % an. Zusätzlich hilft eine verbesserte Wärmeisolierung der Karosserie (z. B. mit Hochleistungsdämmschaum) und der Dachkanäle den Energiebedarf weiter zu reduzieren.⁸

Einsparungen bei der Frischluftzufuhr und Kondensation werden bei modernen Bussen über Regelungssysteme erreicht. Diese messen die Innenraumtemperatur, den CO₂-Gehalt und die Luftfeuchte der Innenraumluft, um die Belüftungsstrategie in Abhängigkeit von der Anzahl der Passagiere und in Abhängigkeit der Außentemperatur bedarfsgerecht anzupassen.

Um die ausströmende Luftmasse bei der Türöffnung zu minimieren, können außerdem Ventilatoren über den Türen angebracht werden, die die Luft mit hohen Geschwindigkeiten senkrecht in Richtung Fahrzeugboden blasen. Mithilfe dieses Luftvorhangs („air-curtain“), wird ein starker Austausch der temperierten Luft des Fahrgastraums mit der Umgebungsluft verhindert.⁹ Diese Funktion ist heute serienmäßig bei konventionellen und Elektrobussen implementiert.

⁷ Vgl. https://www.researchgate.net/publication/285396879_Energiebedarf_verschiedener_Klimatisierungssysteme_fur_Elektro-Linienbusse

⁸ Vgl. <https://www.vdlbuscoach.com/de/news/archiv/neue-vdl-citea-generation-entwicklung-von-null-bis-zum-innovativen-produktprogramm>

⁹ Vgl. <https://www.busplaner.de/de/news/heiz-und-klimatechnik-heizsysteme-warme-luft-im-citaro-7648.html>

Um die verbleibende Energiemenge zum Heizen und Kühlen während des Betriebs möglichst gering zu halten, können Busse im Depot auf eine Solltemperatur vorkonditioniert oder überkonditioniert werden. Bei der passiven Vorkonditionierung werden die Fahrzeuge vor Betriebsbeginn oder zwischen den Umläufen üblicherweise in einer klimatisierten Halle geparkt und sowohl die Karosse als auch der Fahrgastinnenraum sowie die Batterie gegenüber der Außentemperatur beheizt oder gekühlt. Darüber hinaus können die Fahrzeuge zusätzlich noch über den Ladevorgang hinaus aktiv an der Ladeinfrastruktur angeschlossen bleiben und somit vor dem nächsten Umlauf auf die entsprechende Solltemperatur gebracht werden.

Eine Innenausstattung (z. B. Sitze) aus wärmespeichernden Materialien kann außerdem dabei helfen, die Wärme/Kälte über einen längeren Zeitraum zu speichern. Aufgrund der begrenzten Kapazität der Batterie kann die Vorkonditionierung damit insbesondere bei Elektrobussen ein wichtiges Element der Betriebsstrategie sein, um die erzielbaren Reichweiten im Betrieb zu erhöhen.

Effizienzverbesserungen

Für den verbleibenden Energiebedarf für das Heizen und Kühlen können prinzipiell elektrische, brennstoffbetriebene sowie kombinierte Heiz- und Kühlkonzepte (z. B. Hybridheizung) eingesetzt werden. Je nach Anwendungsfall – ob Heizen oder Kühlen – können dazu unterschiedliche Technologien eingesetzt oder kombiniert werden. Sollen Busse für den Einsatzzweck elektrisch gekühlt werden, eignen sich nach aktuellem Stand der Technik insbesondere Klimaanlage und Wärmepumpen. Zum elektrischen Heizen eignen sich insbesondere Wärmepumpen, Heizelemente (PTC-Elemente¹⁰) und Wasserheizungen.

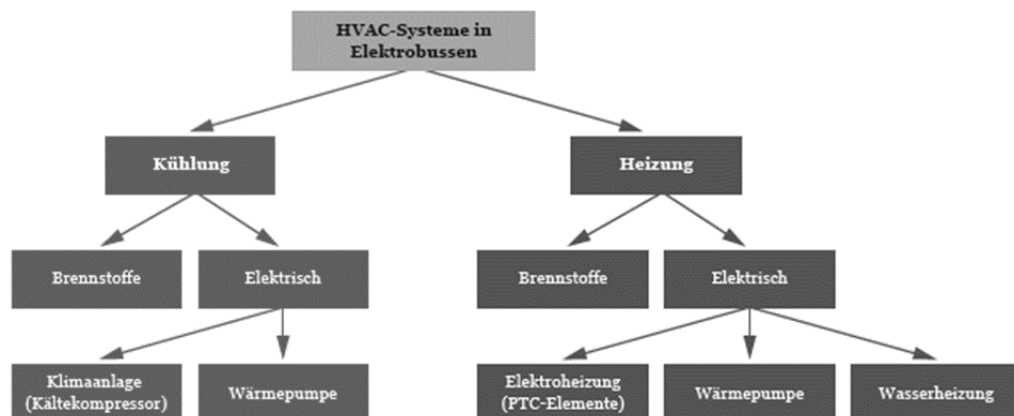


Abb. 22: Übersicht über die Heating, Ventilation und Air Conditioning (HVAC)-Systeme in Elektrobussen¹¹

¹⁰ PTC: Positive Temperature Coefficient

¹¹ Vgl. <https://medium.com/@francesco.impari/challenges-for-air-conditioning-and-heating-hvac-solutions-in-electric-buses-d18fc33a0433>

Wärmepumpen

Gegenüber den bisherigen Lösungen der Diesel- oder Elektroheizungen weisen insbesondere Wärmepumpen die größten Effizienzpotenziale auf. Der Vorteil von Wärmepumpen gegenüber elektrischen Heizsystemen und brennstoffbetriebenen Heizungen liegt in der Bereitstellung von Wärmeenergie. Die bereitgestellte Heiz-/Kühlenergie wird nach dem Funktionsprinzip der Wärmepumpen aus der Umgebungsluft bezogen und nicht aus einem Brennstoff oder aus dem Strom der Batterie. Gegenüber einer reinen Widerstandsheizung können Wärmepumpen deshalb effizienter als z. B. elektrische Heizer betrieben werden.

Seit dem Jahr 2013 sind die ersten Klimasysteme mit Wärmepumpen zum Heizen und Kühlen von Bussen in kleinen Stückzahlen verfügbar.¹² In den ersten Elektrobussen haben insbesondere die fehlende Verfügbarkeit, die hohen Kosten, das hohe Gewicht, der Platzbedarf und die fehlende technische Reife verhindert, dass ein Großteil der Fahrzeuge bereits mit Wärmepumpen ausgestattet war. In den letzten Jahren haben Komponentenhersteller die Produkte jedoch sukzessive weiterentwickelt und seit 2018 die zweite Generation von Wärmepumpen für Elektrobusse auf den Markt gebracht. Diese werden nun in Serie produziert und in modernen Elektrobussen eingesetzt.¹³ Im Vergleich zur vorherigen Wärmepumpengeneration wurden die neuen Modelle hinsichtlich der Effizienz, Leistungsabgabe und möglicher Einsatzbereiche (Temperatur) verbessert.

Ein wichtiges Element einer Wärmepumpe ist das verwendete Kältemittel. Als Kältemittel werden in Wärmepumpen üblicherweise R134a, R1234yf, R449A und R744 (CO₂) verwendet, wobei CO₂-Wärmepumpen erst in den letzten Jahren auf den Markt gekommen sind. Herkömmliche R134a-Wärmepumpen weisen im Bereich unter 0°C jedoch nur eine geringe Effizienz auf, können deshalb bei niedrigen Außentemperaturen keine ausreichende Wärmeleistung zur Verfügung stellen und sind daher im Winter auf Zusatzheizer angewiesen. Der Umstieg von R134a zu CO₂ als Kältemittel soll aufgrund der thermodynamischen Eigenschaften von CO₂ insbesondere im Temperaturbereich unter 5°C eine höhere Effizienz und somit eine deutlich größere Temperaturspanne sowie höhere Heizleistungen bei niedrigen Temperaturen ermöglichen (siehe Abb. 23).¹⁴

Eine weitere positive Eigenschaft des Umstiegs vom Kältemittel R134a auf CO₂ liegt in dem um den Faktor 1.430 geringeren Treibhauspotenzial (GWP100 – global warming potential).¹⁵ Seit dem 1. Januar 2017 darf in Klimaanlage von Kraftfahrzeugen der Klassen M₁ und N₁ außerdem kein Kältemittel mehr mit einem Treibhauspotenzial über 150 eingesetzt werden. Dies trifft jedoch bisher noch nicht für Busse mit einer Kapazität von mehr als 8 Sitzplätzen zu (Fahrzeugklassen M₂ und M₃).

¹² Vgl. <https://www.ki-portal.de/9748/premiere-fur-e-bus-klimasystem-mit-integrierter-waermepumpe/>

¹³ Vgl. <https://www.electrive.net/2019/02/23/konvekta-baut-produktion-fuer-co2-waermepumpe-aus/>

¹⁴ <https://www.nfz-messe.com/de/news/heiz-und-klimatechnik-der-naechste-evolutionsschritt-2877.html>

¹⁵ https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf

Neben den beschriebenen Vorteilen weisen aktuelle CO₂-Wärmepumpen aber auch spezifische Nachteile auf. Aufgrund der hohen benötigten Systemdrücke von bis zu 135 bar (R134a bis zu 25 bar – relativ) müssen die Anlagen druckbeständig und somit schwer gebaut sein, was zugleich höhere Bauteilkosten mit sich bringt. Außerdem ist der praktische Einsatz bei extrem hohen Umgebungstemperaturen von über 40 °C heutzutage noch eingeschränkt.

Trotz der spezifischen Nachteile scheint die technologische Reife in Verbindung mit den erzielbaren Effizienzvorteilen gegenüber herkömmlichen HVAC-Konzepten den Markthochlauf der Wärmepumpen zu fördern. Mit dem Einsatz von CO₂ als zukunftsfähigem Kältemittel (R744) und den fortschreitenden Effizienzverbesserungen sind CO₂-Wärmepumpen mittlerweile in Mitteleuropa prinzipiell als ganzheitliches Thermomanagement zum Heizen und Kühlen für Elektrobusse einsetzbar. Je nach Einsatzbedingungen können Elektrobusse mit modernen Wärmepumpen deshalb prinzipiell als Stand-Alone HVAC-System eingesetzt werden.¹⁶

Ein beispielhafter Vergleich der Energieverbräuche verschiedener Heizkonzepte in Abhängigkeit von der Außentemperatur eines 12 m Stadtbusses veranschaulicht die oben beschriebenen Effizienzvorteile (siehe folgende Abbildung). Für den Vergleich wird hierzu eine CO₂-Wärmepumpe der neusten Generation mit einer Diesel- und einer Elektroheizung verglichen. Dabei ist zu erkennen, dass die Wärmepumpe über das gesamte Temperaturspektrum von -20°C bis +5°C deutliche Effizienzvorteile gegenüber den beiden übrigen Heizkonzepten aufweist. Die Effizienzvorteile sinken zwar bei niedrigeren Temperaturen, die CO₂-Wärmepumpe weist jedoch auch in diesem Bereich noch eine hohe Energieeffizienz auf. Im Vergleich zur klassischen Elektroheizung können mit der CO₂-Wärmepumpe Einsparungen in Höhe von rund 45 % erreicht werden.

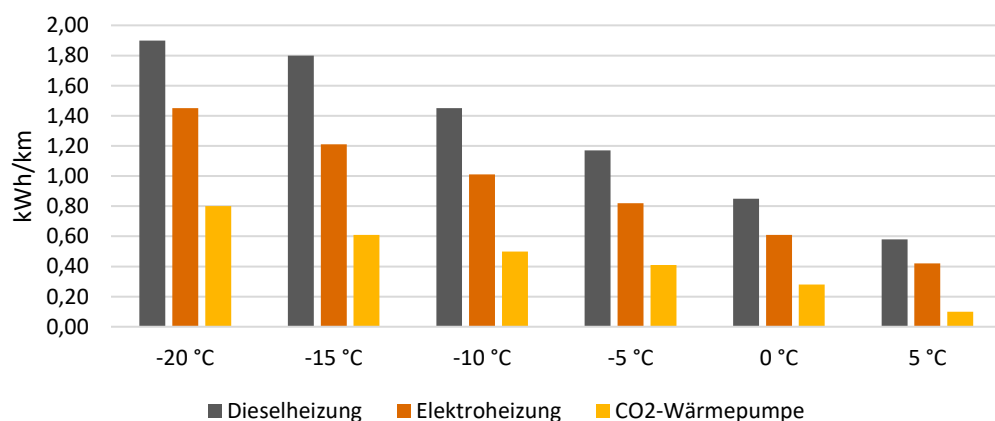


Abb. 23: Vergleich der Energieverbräuche unterschiedlicher Heizkonzepte¹⁷

¹⁶ https://www.konvekta.de/uploads/pics/Folder_CO2_WP_0916_02.pdf

¹⁷

https://www.konvekta.de/uploads/pics/CO2_Waermepumpe_fuer_Busse_dt_6Seiter_eBook_0919.pdf

1.3 Technologische Grundlagen (Energiezuführung)

1.3.1 Elektrische Busse

1.3.1.1 *Ladestrategien für elektrische Busse*

Zur Bezeichnung der aktuell verfolgten Ladestrategien werden häufig die Begriffe Overnight Charging bzw. Übernachtenladen, sowie Opportunity Charging bzw. Gelegenheitsladen herangezogen. In Bezug auf das Overnight Charging ist der Begriff stellenweise irreführend, da Ladevorgänge für dieses Verfahren nicht zwingend auf die Nacht beschränkt sind. Hier werden stattdessen stellenweise auch die Begriffe Laden im Depot (analog zu Overnight Charging) und Laden auf Linie (analog zu Opportunity Charging) herangezogen. Darüber hinaus lassen sich die verschiedenen Strategien nicht immer klar voneinander abgrenzen. Vielmehr kommen häufig, speziell für Großflottenanwendungen, Mischsysteme zum Einsatz, indem z. B. Overnight Charging Busse im Liniennetz zwischengeladen werden.

Laden im Depot

Laden im Depot (oder Overnight Charging) bezeichnet grundsätzlich eine zentral organisierte Ladestrategie. Hierbei wird der größte Anteil der elektrischen Traktionsenergie an einer Stelle oder an wenigen zentralen Stellen in die Batterien der E-Busse geladen. Im Allgemeinen sind diese zentralen Stellen Depotflächen, auf denen die Busse längerfristig geparkt werden.

Gegenüber dem Laden auf Linie wird hier mit reduzierter Leistung geladen. Abhängig von der Konzeption sind Ladeleistungen von ca. 50 bis 150 kW üblich, was der Leistungsfähigkeit eines Plug-In Ladesystems nach CCS-Standard entspricht. Jedoch gibt es auch hier Ausführungen, bei denen mit höherer Leistung bis zu 300 kW geladen wird, wobei andere Ladeschnittstellen beziehungsweise gekühlte Ladekabel erforderlich sind.

Depot-Ladesysteme zeichnen sich dadurch aus, dass alle Stellplätze über eine eigene Ladeschnittstelle verfügen. Busse werden in Betriebspausen geparkt und ohne weitere Eingriffe des Personals geladen, nachdem der Ladekontakt geschlossen wurde. Die erforderliche Elektronik wird sinnvollerweise aus Platzgründen nicht an den Stellflächen installiert, sondern an einer zentralen Stelle zusammengeführt. Dies birgt Vorteile für den Betrieb und die Wartung der Anlagen, allerdings ist die Ausführung sorgfältig zu planen, um den Netzanschluss (Energieversorgung) nicht zu überlasten und gleichzeitig sicherzustellen, dass alle Fahrzeuge rechtzeitig geladen sind. Fahrzeuge, die für diese Variante ausgelegt sind, verfügen in der Regel über eine groß dimensionierte sogenannte Energiebatterie (400 kWh+) mit elektrischen Reichweiten von bis zu 200 km und mehr. Der grundsätzliche Ansatz ist es, die Fahranforderungen eines Umlaufs möglichst aus einer einzigen Batterieladung zu erfüllen und die Fahrzeuge flexibel im gesamten Liniennetz einzusetzen.

Gelegenheitsladen bzw. Laden auf der Linie

Bei dieser Ladestrategie erfolgt die Ladung der Fahrzeuge direkt am Einsatzort. Mehrere ausgewählte Haltestellen, häufig auch Wende- oder Endhaltestellen, werden hier dezentral mit Ladeinfrastruktur ausgestattet, um die Fahrzeuge mit hoher Leistung schnell zu laden.

Als Ladeschnittstelle kommen hier nur sehr leistungsfähige Ansätze in Frage, um die erforderlichen Ladeleistungen von 300-500 kW zu erbringen. Aktuell sind hier Pantographensysteme die vorherrschende Variante. Durch den automatischen Kontaktschluss wird die Zeitspanne zwischen Parken und Laden gegenüber manuellen Plug-In Systemen stark verkürzt. Auch dies ist für den Erfolg dieser Strategie entscheidend, um die Netto-Ladezeit pro Halt zu maximieren.

Die dezentrale Platzierung der Ladesysteme macht es häufig erforderlich, Infrastruktur im innerstädtischen Bereich zu installieren und an das Energienetz anzubinden. Aufgrund der dichten Bebauung und fehlenden Energienetzkapazitäten, kann dies eine besondere Herausforderung darstellen. Vorteilhaft sind hier Installationsorte, bei denen Oberleitungsnetze von Stadtbahnen oder Trolleybussen erreichbar sind. Die Anschlusskapazität derartiger Netze verfügt üblicherweise über ausreichende Reserven, um die Ladeleistung zusätzlich auch für die E-Busse erbringen zu können.

Fahrzeuge für „Laden auf Linie“ Anwendungen werden oft mit kleiner dimensionierten sogenannten Leistungsbatterien (80-120 kWh) ausgerüstet, die eine elektrische Fahrstrecke in der Größenordnung von 60-80 km ermöglichen. Der grundsätzliche Ansatz ist es hier, E-Busse bei jeder Gelegenheit schnell nachzuladen. Für einen erfolgreichen Betrieb ist jedoch eine ausreichende Verweildauer an den Lade-Haltestellen zu gewährleisten. Auch wenn die Traktionsbatterie das gelegentliche Auslassen einer Ladestation (bei entsprechender Auslegung) durchaus zulässt, kann dieser Umstand bei Verzögerungen im Betriebsablauf problematisch werden. Fahrzeuge können im Liniennetz nur flexibel eingesetzt werden, sofern auch Lade-Haltestellen in ausreichender Frequenz angefahren werden.

*1.3.1.2 **Aufbau der Ladeinfrastruktur***

Die Ladeinfrastruktur für das Aufladen elektrisch angetriebener Fahrzeuge lässt sich grob in die nachfolgenden Funktionsblöcke gliedern:

- Ankopplung an das öffentliche Stromnetz,
- galvanische Trennung zwischen Stromnetz und Fahrzeug,
- Umwandlung des Drehstroms in Gleichstrom variabler Spannung,
- Kommunikations- und Überwachungsfunktionen sowie
- zugehörige Managementsysteme.

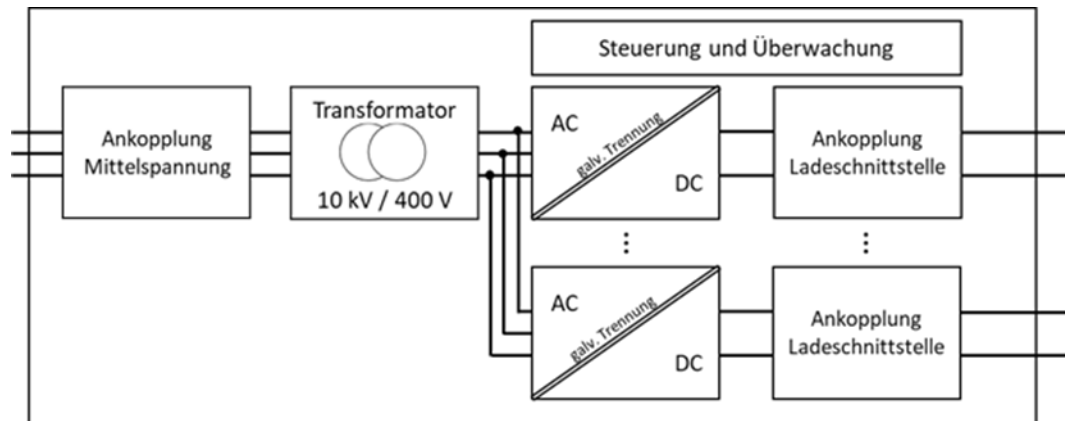


Abb. 24: Schematischer Aufbau der elektrischen Ladeinfrastruktur

Die Ankopplung an das öffentliche Stromnetz erfolgt über das Mittelspannungsnetz (10/20 kV) bzw. bei sehr großen E-Bus Flotten auch über das Hochspannungsnetz (110 kV). Die direkte Anbindung an das Niederspannungsnetz (400 V) ist nur für einzelne Ladestationen sinnvoll. Notwendige Schaltanlagen und Transformatoren müssen in unmittelbarer Nähe zu den Ladestandorten installiert werden, um die Spannungsniveaus für die Ladeinfrastruktur bereitzustellen und gleichzeitig Übertragungsverluste zu minimieren. Die teilweise sehr großen Energiemengen müssen durch den Netzbetreiber, passend zum Ladeplan, bereitgestellt werden. Lade- und Energiemanagementsysteme, ggf. ergänzt durch stationäre elektrische Zwischenspeicher, können hilfreich sein, um die Netzlast zeitlich zu optimieren und Netzausbaukosten zu minimieren.

Die vorgeschriebene galvanische Trennung zwischen Drehstromnetz und Fahrzeug-Hochvoltnetz kann dabei, wie dargestellt, entweder direkt im Netztransformator erfolgen oder auch in den Leistungselektronik-Baugruppen selbst. Die bevorzugte Ausführung ist dabei abhängig vom Anwendungsfall und der Anzahl parallel ladender Fahrzeuge.

Ein elektronischer Stromrichter wandelt die Netzspannung (Drehstrom) in Gleichspannung. Die Vorgabe der Spannungshöhe bzw. des zulässigen Ladestroms erfolgt dabei vom Fahrzeug über die Kommunikationsverbindung in der Ladeschnittstelle. Die vom Fahrzeug angeforderten Werte werden von der Elektronik automatisch geregelt, sofern diese innerhalb der vorgegebenen Grenzwerte für Strom und Spannung liegen. Diese Grenzwerte können entweder technischer Natur sein (z. B. die zulässigen Maximalwerte für Ladestrom der Schnittstelle) oder von außen vorgegeben werden. Von außen werden beispielsweise temporäre Maximalwerte durch Managementsysteme definiert, um das Ladeverhalten mehrerer Ladestationen zu steuern.

Das Ladesystem ist über standardisierte Ladeschnittstellen an das Fahrzeug und typischerweise auch an ein Back-End System angebunden. Die Fahrzeug-Kommunikationsschnittstelle ist dabei physisch in die Ladeschnittstelle integriert. Die Back-End Anbindung erfolgt über Netzwerk-Protokolle (Ethernet). Der Informationsaustausch läuft direkt zwischen Fahrzeug und Ladepunkt (Sollwerte Ladung) bzw. zwischen Ladepunkt und Back-End (externe Grenzwerte und Freigaben) ab. Darüber hinaus übernimmt die Ladestation aufgrund der zentralen Position die Informationsübermittlung zwischen Back-End System und Fahrzeug (z. B. Statusinformationen).

Überwachungs- und Sicherheitsfunktionen sind durch Normen und Richtlinien vorgegeben. Überwacht werden sicherheitsrelevante Parameter wie Stromwerte, Isolationswerte, Abriss der Kommunikationsverbindung und ähnliches, um Ladevorgang und Betrieb als fehlerfrei zu

identifizieren. Bei kritischen Fehlern wird ein Ladevorgang umgehend unterbrochen und das Ladesystem in einen sicheren Zustand gebracht (vergleichbar mit einer Not-Aus Routine). Darüber hinaus sind Ladesysteme gesamtheitlich so ausgeführt, dass keine spannungsführenden Teile berührt werden können. Ladestecker sind während dem Ladevorgang verriegelt, so dass ein versehentliches Ab-ziehen des Kontakts unmöglich ist. Selbst wenn mutwillig der Stecker hinausgebrochen wird, führt der Abriss der Kommunikationsverbindung zu einer sofortigen Systemabschaltung.

Managementsysteme können eingesetzt werden, um die Netzlast, also den Energiebezug aus dem Stromnetz zu optimieren. Durch die Vermeidung von Lastspitzen oder den gezielten Energieabruf in Zeiten mit besonderen Preiskonditionen (abhängig vom Energieversorger z. B. vergünstigter Nachtтарif) können hier mit überschaubarem Aufwand große Einsparpotenziale abgerufen werden.

Das Funktionspotenzial von Managementsystemen geht jedoch auch weit über die reine Netzlastoptimierung hinaus. Die Anforderungen, die von einer größeren E-Bus-Flotte an die Betriebs-steuerung ausgehen, reichen in viele Belange des bisherigen Betriebswesens hinein. Fahrzeugdisposition, Werkstattmanagement und Abstellreihenfolge auf dem Betriebshof sind nur einige Aspekte, die durch die Notwendigkeit von Ladezeiten für Elektrobusse beeinflusst werden. Bei großen E-Bus Flotten ist die manuelle Abfertigung unter diesen Randbedingungen nur schwer oder gar nicht umsetzbar. Dedizierte Managementsysteme sorgen nicht nur dafür, dass Netzlastgrenzwerte eingehalten werden, sondern auch, dass Fahrzeuge zum einen rechtzeitig geladen sind und zum anderen ohne Rangieraufwand für den Einsatz zur Verfügung stehen. Die besondere Herausforderung liegt hier nicht allein darin begründet, dass das Ladeintervall beim E-Bus länger ist als das Betankungsintervall beim Dieselbus. Vielmehr ist die Ladezeit selbst eine variable Größe, abhängig vom vorherigen Einsatz, was die Ladeplatzorganisation unter besondere Herausforderungen stellen kann.

1.3.1.3 Ladeschnittstellen

Für die Nachladung batterieelektrischer Busse im Stand sind aktuell zwei Alternativen marktbeherrschend:

Nachladung mittels Steckkontakt (ähnlich dem Pkw-Bereich) oder

Nachladung per Pantograph (ähnlich der Straßenbahn).

Nachladung per Steckkontakt

Über Steckkontakte werden im Allgemeinen Busse mit Overnight Charging Konzept nachgeladen. Das Combined Charging System (CCS) ist in der IEC 62196-3 und SAE J1772 genormt. Das CCS ist eine Kombinationslösung für den europäischen Standard Typ 2 Steckkontakt mit Erweiterung zur DC Ladung. Das Konzept wird z. B. von führenden europäischen und amerikanischen Autobauern bereits großflächig umgesetzt. Steckverbindungen, die keine Exotenlösungen darstellen sollen, sind bis auf weiteres faktisch an die Normvorgaben aus dem Automobilbereich gebunden. Deshalb sind die Ladeleistungen aktuell auf typisch 200 A (ungekühlt) limitiert. Bei einer angenommenen Batteriespannung von 750 V ergeben sich 150 kW maximale Ladeleistung für einen typischen Elektrobus. Mit größer dimensionierten oder gekühlten Ladekabeln können bei Bedarf auch höhere Leistungswerte erzielt werden.



Abb. 25: Efacec CCS Ladestation mit Phoenix Contact Stecker auf Typ 2 Basis (Bild: Efacec)

Der Typ 2 Stecker umfasst prinzipiell auch die Möglichkeit der Nachladung über das dreiphasige 400 V System. Die Ladeleistungen sind allerdings vergleichsweise gering und bieten sich für eine Anwendung abseits des Pkw-Sektors mit höheren Leistungsanforderungen nur bedingt an. Auch ist hierfür die Installation zusätzlicher Ladeinfrastruktur an Bord des Fahrzeuges notwendig (Gleichrichtung mit Stromregelung), was zusätzliches Gewicht bedeutet und daher von den Fahrzeugherstellern standardmäßig nicht implementiert wird.

Der Kontaktschluss erfolgt durch manuellen Eingriff des Fahr- oder Betriebspersonals. Das Nachladesystem per Steckkontakt ist als sehr robust zu betrachten.

Typischerweise werden manuelle Steckkontaktlösungen für elektrische Konzepte eingesetzt, die über eine geringe Ladefrequenz verfügen. Die vergleichsweise geringen Kosten rechtfertigen den manuellen Aufwand zum Kontaktschluss. Weit verbreitet ist diese Lösung bei Konzepten mit Depotladung, wobei die Dauer des Kontaktschlusses und Ladezeit (aufgrund vergleichsweise geringer Ladeleistung) eine eher untergeordnete Rolle spielen. Es ist jedoch anzunehmen, dass bei weiterer Verbreitung von E-Mobilität (z. B. flottenweite Anwendung) manuelle Kontaktschlussverfahren für E-Busse nicht zwingend die Ideallösung für die Depotladung darstellen. Hintergrund dafür ist primär der benötigte Platzbedarf für Ordnungssystem, Stecker und Ladekabel im Parkraum der Fahrzeuge. Bei aufgesteckter Schnittstelle ragt das Ladekabel noch etwa 400 mm nach außen. Darüber hinaus stellt die zusätzliche (körperliche) Belastung für das Bedienpersonal und die Sicherstellung der Fahrzeugladung (z. B. Steckkontakt durch Fahrer nicht korrekt geschlossen) einen Aspekt dar, der sich besonders bei größeren Flotten negativ bemerkbar machen kann.

Aufgrund des manuellen Kontaktschlusses sind hochfrequente Nachladungen, also Opportunity Charging Konzepte, praktisch ausgeschlossen.

Steckkontakte werden ebenfalls als sekundäre Ladesysteme eingesetzt, da die fahrzeugseitigen Anschlüsse gut in andere Ladesysteme integriert werden können. Unabhängig von der primären Schnittstelle können solche Fahrzeuge an CCS-Ladepunkten geladen werden. Die Fahrzeuge können so z. B. in der Werkstatt zwischengeladen werden oder auch über mobile Ladegeräte notgeladen werden. Darüber hinaus bietet ein sekundärer CCS-Kontakt die Möglichkeit, Fahrzeuge mit Pantographentechnik (Laden auf Linie) im Depot über Nacht vorzuladen und elektrisch vorzuheizen, ohne Pantographenschnittstellen im Depot installieren zu müssen.

Nachladung per Pantograph

Über eine Pantographenlösung können sowohl Overnight als auch Opportunity Charging Konzepte geladen werden. Der hauptsächliche Anwendungsbereich liegt heute im Feld der Opportunity Charging Konzepte. Aufgrund Robustheit, Verbreitung, Kosten und Handhabung ist davon auszugehen, dass Pantographensysteme zukünftig auch verstärkt für flottenweite Overnight Charging Konzepte eingesetzt werden können. Zum einen stellt diese Variante aktuell die robusteste und kostengünstigste vollautomatische Kontaktmöglichkeit dar. Zum anderen führt die große Batteriedimensionierung dazu, dass auch bei vermeintlich kleiner Leistungsfähigkeit der Batterien (C-Rate) trotzdem faktisch große Ladeleistungen umsetzbar sind. Die resultierenden Leistungswerte können die Grenzwerte eines CCS-Steckers schnell überschreiten.

Obwohl der Einsatz von Pantographen auf dem Fahrzeugdach wie ein neues Anwendungsfeld scheint, kann auf langjährige Erfahrung und entsprechende Produkte aus der Schienenfahrzeug- und Trolleybustechne zurückgegriffen werden. Die notwendigen Anpassungen sind technologisch überschaubar, weshalb die eingesetzten Systeme eine hohe Verfügbarkeit aufweisen.

Pantographensysteme können in zwei Unterkategorien geordnet werden: Schienen- und Kontaktstift-Systeme. Die Schienensysteme sind der Bahntechnik sehr ähnlich. Auf Pantograph-Seite sind die Kontakte als Kohlenstoff-Schienen in ca. 5 cm Breite und Längen zwischen 30 und 50 cm ausgeführt. Auf der Gegenseite sind Kupferschienen verbaut, die rechtwinklig zu den Kohlenstoffschienen ausgerichtet sind. Durch die rechtwinklige Ausrichtung und Länge der Schienen wird eine hohe Positionstoleranz des Fahrzeuges erreicht und eine aufwendige Positionskorrektur ist nicht notwendig. Sobald das Fahrzeug in der markierten Stellfläche parkt, kann der Kontaktvorgang eingeleitet werden, wobei der Pantograph entweder vom Busdach nach oben zu den Ladeschienen ausgefahren oder umgekehrt von der Ladestation auf ein Ladeschienensystem auf dem Busdach abgesenkt wird.

Kontaktstift-Systeme werden i. d. R. vom Busdach nach oben zur Ladestation ausgefahren (Abb. 26 links), wobei auch Systeme in umgekehrter Ausrichtung verfügbar sind und die Kontaktstifte mit dem Lade-Arm von der Ladestation auf das Busdach abgesenkt werden (Abb. 26 rechts). Auf Pantographenseite ist in beiden Fällen ein trapezförmiger Kontakthalter installiert, auf dem die einzelnen Kontakte angebracht sind. Die Kontakte selbst sind als Federkontakte unterschiedlicher Länge ausgeführt. Durch die verschiedenen Längen und Positionierung auf dem Kontakthalter ist gewährleistet, dass zunächst der Schutzleiter- und Kommunikationskontakt geschlossen wird, bevor die Leistungskontakte schließen. Umgekehrt trennen zunächst die Leistungskontakte und die Erdung des Fahrzeuges wird als letztes getrennt. Das Gegenstück des Pantographen ist trichterförmig ausgelegt, damit der Pantograph bei Auslenkung vom Wagendach in Y-Richtung mechanisch auf die Kontaktschienen im Trichter ausgerichtet wird. Diese Schienen sind in X-Richtung ausgerichtet. In Summe wird somit eine ähnliche Positionstoleranz wie bei den Kohlenstoff-Schienen Systemen erreicht.

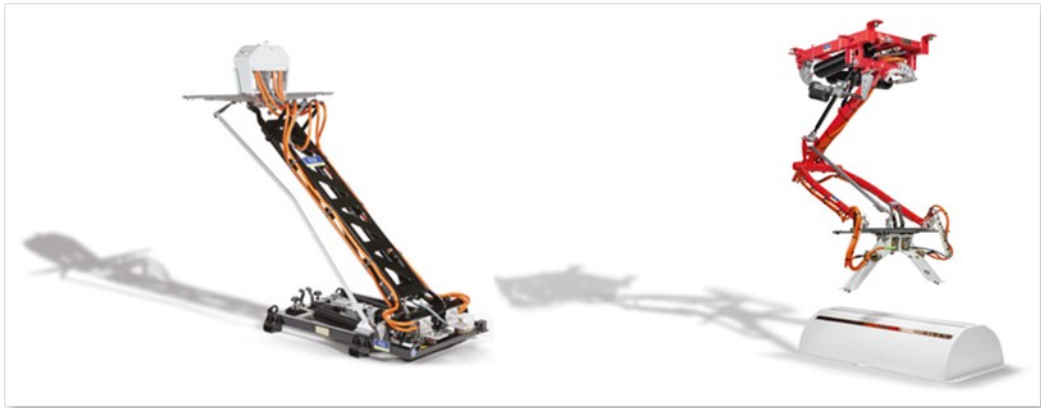


Abb. 26: Schunk Pantograph SLS 101 und SLS 201 (Bild: Schunk Transit Systems)

Grundsätzlich eignet sich der Einsatz von Pantographensystemen sowohl für Overnight als auch für Opportunity Charging Konzepte. Pantographen haben einen höheren Komplexitätsgrad als manuelle Steckkontaktlösungen, was sich – auch aufgrund der in der Regel größer dimensionierten Leistungselektronik – in höheren Systemkosten und Wartungsaufwendungen niederschlägt.

Bei gelegentlichen Ladevorgängen (Overnight Charging) sind diese Mehrkosten im Allgemeinen nicht gerechtfertigt, sofern nicht besonders hohe Ladeleistungen erforderlich sind oder eine Vielzahl an Fahrzeugen auf beengtem Platz geladen werden müssen. Der geringe Platzbedarf stellt für Flottenanwendungen stellenweise einen sehr großen Vorteil dar.

1.3.2 Wasserstoffbusse

1.3.2.1 Wasserstoff-Tankstellen

Um den notwendigen Wasserstoff für den Einsatz bereitzustellen, werden H₂-Busse ähnlich dem Dieselbus an H₂-Tankstellen betankt. Der Wasserstoff wird durch Überströmen aus den Tankstellen in die Fahrzeugtanks geleitet. Dafür muss auf Tankstellenseite ein höherer Druck als im Fahrzeugtank gewährleistet sein.

Wie in folgender Abbildung ersichtlich ist, ist der Tankvorgang dem des Dieselbusses sehr ähnlich. Die Verbindung zwischen Zapfsäule und Fahrzeug wird über eine Schlauch- und Kupplungsverbindung aufgebaut. Auf wenn für H₂-Fahrzeuge wenige zusätzliche Handgriffe erforderlich sind, stellt das Verfahren keinen nennenswerten Mehraufwand gegenüber der Dieselbetankung dar.



Abb. 27: Betankung eines Wasserstoffbusses¹⁸

Die abgebildete Füllkupplung wird als Schnellbetankungssystem für Busse und Lkw im Nutzfahrzeugsektor eingesetzt. Für den Tankvorgang wird diese aufgesetzt und verriegelt, bevor das Durchflussventil auf der Kupplung manuell geöffnet wird. Der eigentliche Betankungsvorgang wird abschließend per Knopfdruck an der H₂-Tankstelle eingeleitet.

Nutzfahrzeuge weisen einen gegenüber Pkw geringeren Speicherdruck auf. Im Pkw-Sektor muss vornehmlich aus Platzgründen ein 700 bar System eingesetzt werden, wobei im Feld der Nutzfahrzeuge 350 bar Speicherdruck umgesetzt werden können.

Aufgrund der Druckunterschiede müssen für H₂-Busse und H₂-Pkw unterschiedliche Füllkupplungen eingesetzt werden. Beide Fahrzeugvarianten können nicht an der derselben Tankkupplung befüllt werden. Wenn beide Varianten oder Druckpegel aus einem einzigen Ladepunkt bedient werden sollen, muss die Zapfstelle mit zwei Kupplungsabgängen versehen werden.

¹⁸ Vgl: <https://www.faz.net/aktuell/rhein-main/region-und-hessen/treibstoff-fuer-zwei-geliehene-busse-16655357.html>

Eine Wasserstofftankstelle besteht stark vereinfacht aus einem Flüssiggasspeicher oder aus einer Kombination von Niederdruck-Gasspeicher und Hochdruckpufferspeicher. Die Pufferspeicher werden über Verdichter mit Wasserstoff etwa bei 0°C bis hin zu 1000 bar (Pkw) befüllt. Beim Betankungsvorgang werden die Pufferspeicher über eine Dispenserleitung in den Fahrzeugtank entladen. Der Betankungsablauf ist über den Industriestandard SAE J2601 international geregelt. Ziel des Standards ist es, mit primärer Ausrichtung auf den Pkw-Sektor, Betankungszeiten wie bei konventionellen Verbrennerfahrzeugen ohne Sicherheitsrisiken zu ermöglichen. Bei Nutzfahrzeugen sind Betankungszeiten zwischen 7 und 10 Minuten realistisch.

1.3.2.2 *Farbenlehre – Arten von Wasserstoff*

Wasserstoff ist stets ein farbloses Gas. Wasserstoff wird jedoch hinsichtlich seiner Klimabilanz bei der Herstellung über ein Farbensystem gekennzeichnet. Dabei wird zwischen grünem, grauem, blauen und türkisen Wasserstoff unterschieden.

- **Grüner** Wasserstoff ist emissionsfrei erzeugter Wasserstoff. Bei der Produktion aus regenerativen Energiequellen, wie Photovoltaik oder Windkraft, fallen keine Treibhausgasemissionen an.
- **Grauer** Wasserstoff wird über Dampfreformierung aus fossilen Brennstoffen gewonnen und ist entsprechend nicht klimaneutral. Unter hoher Hitze wird Erdgas in H₂ und CO₂ umgewandelt, wobei Emissionen in der Größenordnung von 10 t CO₂ pro 1 t erzeugtem H₂ entstehen.
- Als **blauer** Wasserstoff wird grauer Wasserstoff bezeichnet, bei dem das erzeugte CO₂ über Abscheidungs- und Speicherverfahren aufgefangen wird, bevor es in die Atmosphäre gelangt. Bilanziell wird blauer Wasserstoff als CO₂-neutral betrachtet. Jedoch wird das Prinzip der CO₂-Sequestrierung häufig insgesamt sehr kritisch betrachtet, da das CO₂ Problem hier nicht gelöst, sondern verlagert wird.
- **Türkiser** Wasserstoff wird durch thermische Spaltung von Methan (Methanpyrolyse) gewonnen. Bei diesem Prozess entsteht kein CO₂, sondern fester Kohlenstoff. Sofern der erforderliche Hochtemperaturreaktor aus erneuerbaren Energiequellen betrieben wird und die dauerhafte Bindung des Kohlenstoffs sichergestellt ist, wird türkiser Wasserstoff als klimaneutral betrachtet.

1.3.3 Technologievergleich

1.3.3.1 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 eine Gesamtwirkungsgrad von 24 bis 29 % (Basis ist sog. grüner Strom). Dem gegenüber steht ein Gesamtwirkungsgrad für batterieelektrische Fahrzeuge von 57 bis 63 %.

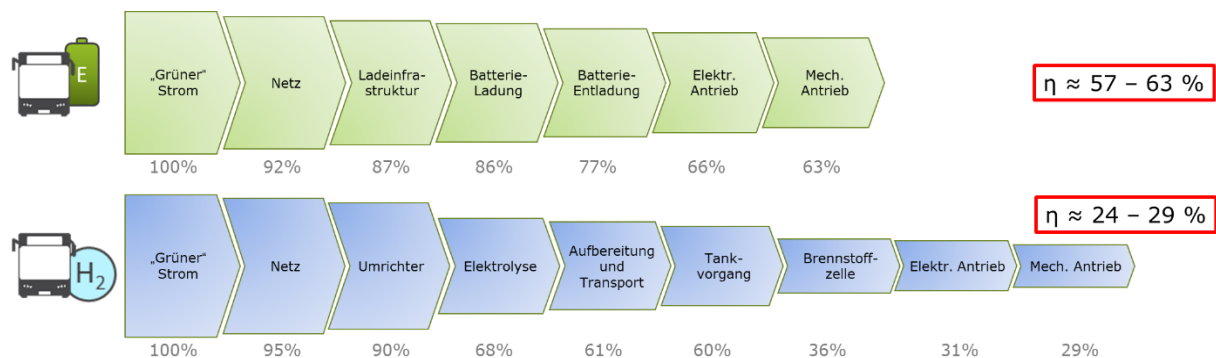


Abb. 28: Wirkungsgradverkettung Batterie- und Brennstoffzellenbus

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

1.3.3.2 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.

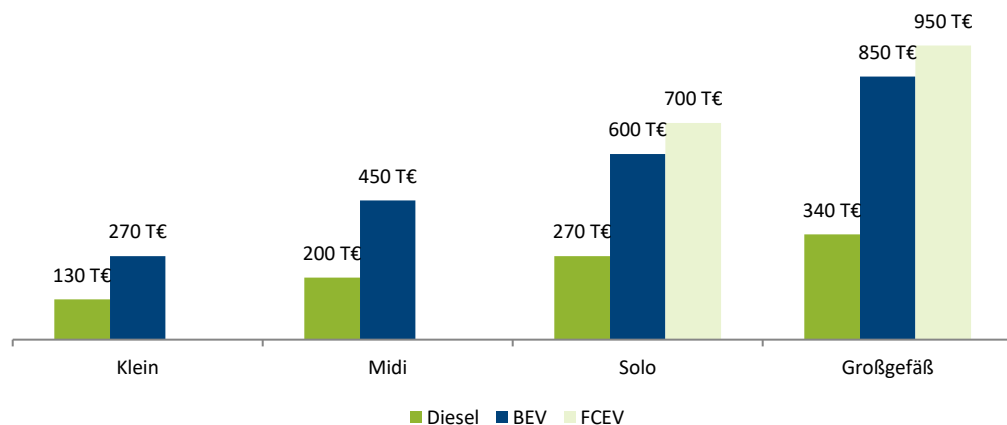


Abb. 29: Anschaffungskosten für Fahrzeuge im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

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 wurden für das Jahr 2025 nachfolgende Treibkraftkosten angesetzt:

- Diesel: 1,54 €/l
- Strom: 0,26 €/l
- Wasserstoff: 8,22 €/kg
- HVO: 1,84 €/l

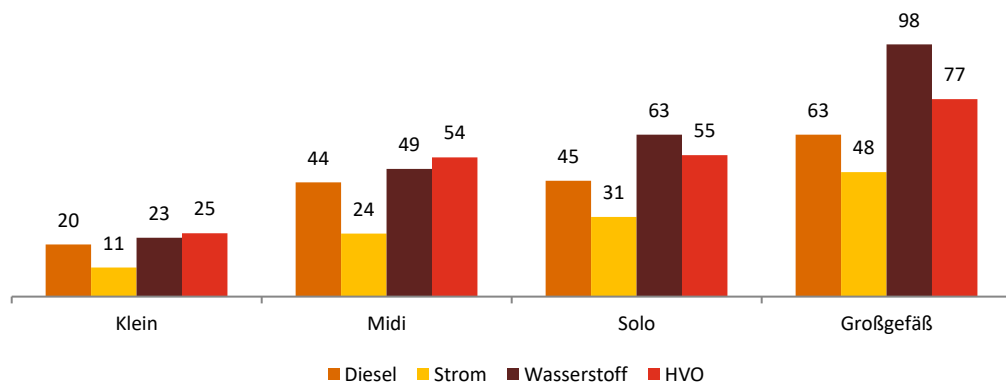


Abb. 30: Treibkraftkosten auf 100 km je Szenario in Euro

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

1.3.3.3 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 2,61 kg CO₂/l angesetzt. Bei einem durchschnittlichen Verbrauch von 30,9 l/100 km ergibt sich ein CO₂-Ausstoß von 80,6 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 400 g CO₂/kWh, was bei einem Verbrauch von 119 kWh/100 km pro Solobus etwa 47,6 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 8,9 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.

1.4 Antriebssteckbriefe

Zum Abschluss von AP 1 werden die relevanten Antriebstechniken hier hinsichtlich ihrer technischen, betrieblichen, ökonomischen und ökologischen Merkmale komprimiert dargestellt. Ergänzend werden Schaubilder aufgeführt, die die Antriebstopologie strukturiert aufzeigen.

In den Schaubildern wird die Energiewandlungskette von Energiezuführung bis Energienutzung dargestellt. Die Energiezuführung entspricht für emissionsfreie Antriebskonzepte der elektrischen Nachladung der Traktionsbatterie, beziehungsweise dem Nachtanken von Wasserstoff als Energieträger. Die Energienutzung, am gegenüberliegenden Ende der Schaubilder ist für alle Antriebsvarianten übertragbar, da sowohl Batterie- als auch Wasserstoffbusse gleichermaßen als Elektrobusse einen elektrischen Antriebsstrang aufweisen, um das Fahrzeug anzutreiben.

Darüber hinaus werden die Attribute Energiespeicherung und Wandlung von Energieträgern in die Schaubilder aufgenommen. Antriebsspezifisch erfolgt die Speicherung von elektrischer Energie in Batteriesystemen beziehungsweise die Speicherung von Wasserstoff in entsprechenden Tanksystemen. Um Wasserstoff als Energieträger für elektrische Antriebe nutzbar zu machen, muss eine entsprechende Wandlung über Brennstoffzellen erfolgen, weshalb dieser Unterpunkt in den Schaubildern vermerkt ist. Es ist zu beachten, dass im Gegensatz zu elektrischen Energieflüssen nur ein unidirektionaler Energiefluss möglich ist. Fahrzeugintern kann elektrische Energie nicht in Wasserstoff gewandelt werden¹⁹, so dass hier nur die Prozesskette Wasserstoff $\Rightarrow$ elektrischer Strom abgebildet wird.

¹⁹ Um aus elektrischen Strom Wasserstoff zu erzeugen, sind Elektrolyseure erforderlich. Auch wenn der Prozess einer „umgekehrten Brennstoffzelle“ grundsätzlich entspricht, können Brennstoffzellen nur elektrische Energie aus Wasserstoff erzeugen.

Steckbrief Batteriebus (BEV) mit Depotladung

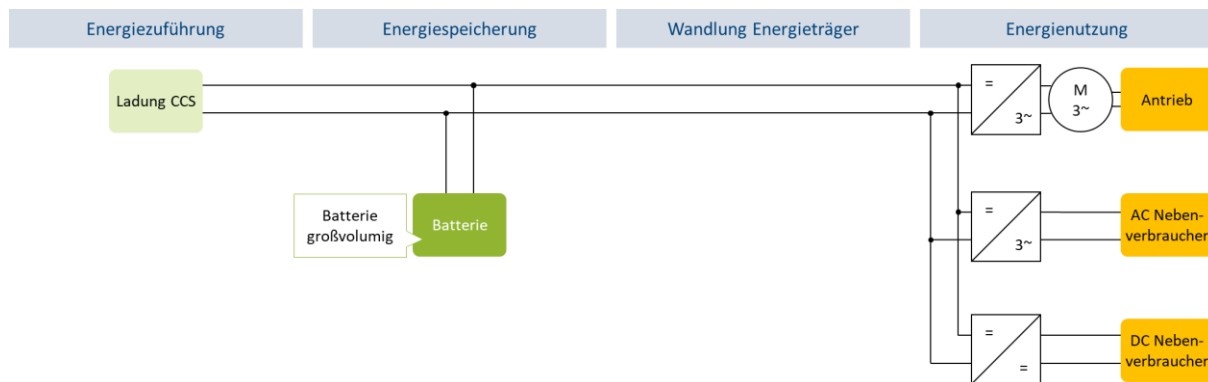


Abb. 31: Schaubild Batteriebus (BEV) mit Depotladung

Antriebssteckbrief (Hauptattribute)

Technische Merkmale

Stromversorgung	Nachladung über elektrische Ladeinfrastruktur (typ. mit Steckerladung). Speicherung der für den Umlauf erforderlichen Energie in der Traktionsbatterie.
Antrieb	Elektromotor, Traktionsbatterie i.d.R. als Energiebatterie
Bremsenergierückgewinnung	Rekuperation der Bremsenergie und Speicherung in Traktionsbatterie

Betriebliche Merkmale

Routenführung	Flexibel, nur begrenzt durch Reichweite
Reichweite	Moderat (typ. 200-250 km unter harten Bedingungen)
Kapazität und Durchsatz	Moderat
Zuverlässigkeit	Hoch

Ökologische Merkmale

Lokale Emissionen	Keine
Treibhausgase	Abhängig vom Strommix
Lärmemission	Gering

Ökonomische Merkmale

Anschaffungskosten	Moderat-hoch
Betriebskosten	Niedrig
Lebensdauer	Entsprechend Dieselbus, vielfach Batterietausch nach ca. 7-10 Jahren notwendig
Energieeffizienz	Hoch

Tab. 3: Antriebssteckbrief Batteriebus mit Depotladung

Steckbrief Batteriebus (BEV) mit Gelegenheitsladung

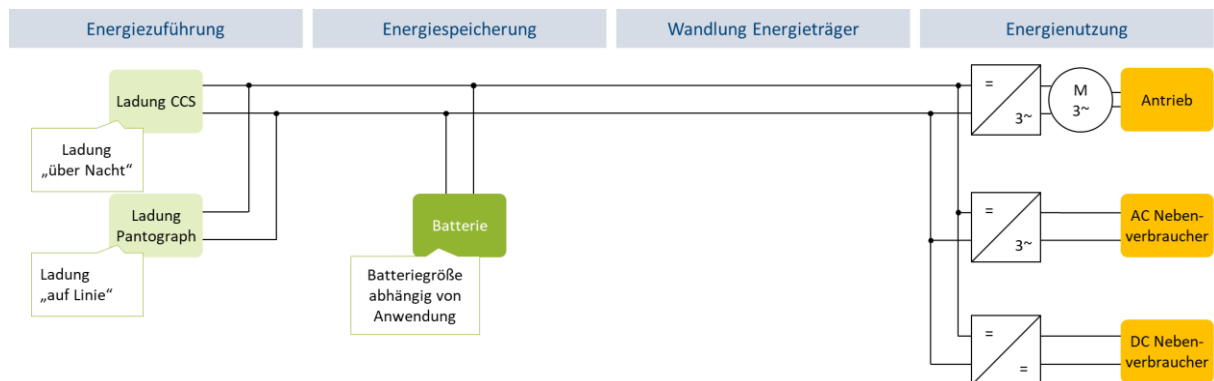


Abb. 32: Schaubild Batteriebus (BEV) mit Gelegenheitsladung

Antriebssteckbrief (Hauptattribute)

Technische Merkmale

Stromversorgung	Nachladung über elektrische Ladeinfrastruktur (typ. „über Nacht“ mit Steckerladung und „auf Linie“ via Pantographen). Speicherung der für den Teil-Umlauf erforderlichen Energie in der Traktionsbatterie.
Antrieb	Elektromotor, Traktionsbatterie als Energie- oder Leistungsbatterie (konfigurationsabhängig)
Bremsenergierückgewinnung	Rekuperation der Bremsenergie und Speicherung in Traktionsbatterie

Betriebliche Merkmale

Routenführung	Erfordert wiederholtes Anfahren von Ladepunkten (Standzeit zum Laden erforderlich)
Reichweite	Konfigurationsabhängig. Bei genügend häufiger bzw. ausreichender Nachladung unbegrenzte Reichweite möglich
Kapazität und Durchsatz	Konfigurationsabhängig moderat-hoch
Zuverlässigkeit	Moderat-hoch

Ökologische Merkmale

Lokale Emissionen	Keine
Treibhausgase	Abhängig vom Strommix
Lärmemission	Gering, am Ladepunkt ggf. Lüftergeräusche durch Ladeinfrastruktur

Ökonomische Merkmale

Anschaffungskosten	Hoch
Betriebskosten	Niedrig
Lebensdauer	Entsprechend Dieselbus, Batterietausch konfigurationsabhängig erforderlich
Energieeffizienz	Hoch

Tab. 4: Antriebssteckbrief Batteriebus mit Gelegenheitsladung

Steckbrief Brennstoffzellenbus (FCEV)

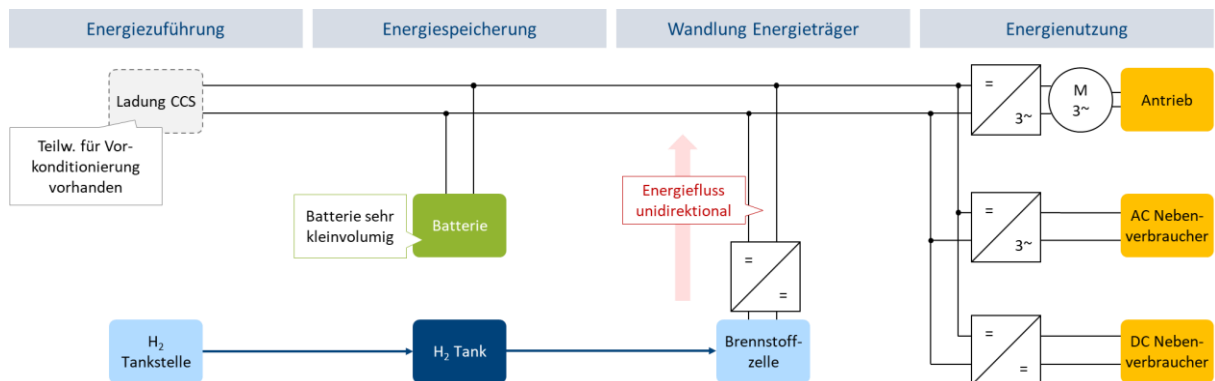


Abb. 33: Schaubild Brennstoffzellenbus (FCEV)

Antriebssteckbrief (Hauptattribute)

Technische Merkmale

Stromversorgung	Stromerzeugung über on-board Brennstoffzelle. Nachbetankung ähnlich z.B. CNG-System. H ₂ Speicherung in Hochdrucktanks.
Antrieb	Elektromotor, Brennstoffzelle, klein dimensioniertes Batteriesystem vorhanden
Bremsenergierückgewinnung	Rekuperation der Bremsenergie und Speicherung in Traktionsbatterie (wenn ausreichend)

Betriebliche Merkmale

Routenführung	Flexibel, nur begrenzt durch Reichweite
Reichweite	Moderat-hoch (typ. 300 km unter harten Bedingungen)
Kapazität und Durchsatz	Moderat-hoch
Zuverlässigkeit	Moderat-hoch

Ökologische Merkmale

Lokale Emissionen	Keine
Treibhausgase	Abhängig vom Strommix bei Wasserstoffproduktion
Lärmemission	Gering

Ökonomische Merkmale

Anschaffungskosten	Hoch
Betriebskosten	Hoch
Lebensdauer	Entsprechend Dieselbus, Refurbishment Brennstoffzelle vielfach während Lebensdauer erforderlich
Energieeffizienz	Moderat-gering

Tab. 5: Antriebssteckbrief Brennstoffzellenbus (FCEV)

Steckbrief Brennstoffzellenbus Range-Extender (BZ-REX)

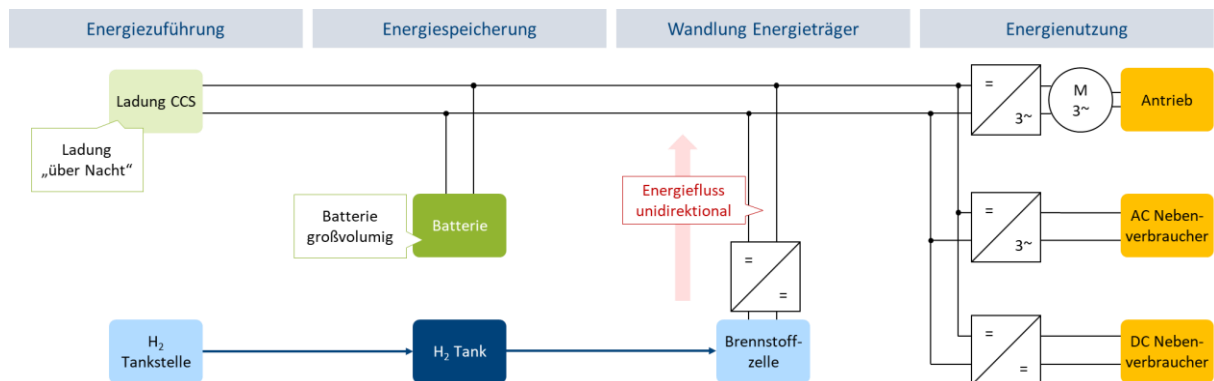


Abb. 34: Schaubild Brennstoffzellenbus Range-Extender (BZ-REX)

Antriebssteckbrief (Hauptattribute)

Technische Merkmale

Stromversorgung	Nachladung über elektrische Ladeinfrastruktur (typ. mit Steckerladung) und elektr. Energiespeicherung in der Traktionsbatterie. Ergänzend Stromerzeugung über on-board Brennstoffzelle. Nachbetankung ähnlich z.B. CNG-System. H ₂ Speicherung in Hochdrucktanks.
Antrieb	Elektromotor, Traktionsbatterie i.d.R. als Energiebatterie, Brennstoffzelle
Bremsenergierückgewinnung	Rekuperation der Bremsenergie und Speicherung in Traktionsbatterie

Betriebliche Merkmale

Routenführung	Flexibel, nur begrenzt durch Reichweite
Reichweite	Hoch-sehr hoch (typ. 350 km unter harten Bedingungen)
Kapazität und Durchsatz	Moderat-hoch
Zuverlässigkeit	Moderat-hoch

Ökologische Merkmale

Lokale Emissionen	Keine
Treibhausgase	Abhängig vom Strommix, auch bei Wasserstoffproduktion
Lärmemission	Gering

Ökonomische Merkmale

Anschaffungskosten	Sehr hoch
Betriebskosten	Moderat-hoch
Lebensdauer	Entsprechend Dieselbus, vielfach Batterietausch und ggf. auch Brennstoffzellentausch während Lebensdauer erforderlich
Energieeffizienz	Abhängig von Fahranteil aus Brennstoffzelle

Tab. 6: Antriebssteckbrief Brennstoffzellenbus Range-Extender (BZ-REX)

Steckbrief Oberleitungsbus ohne Traktionsbatterie (O-Bus)

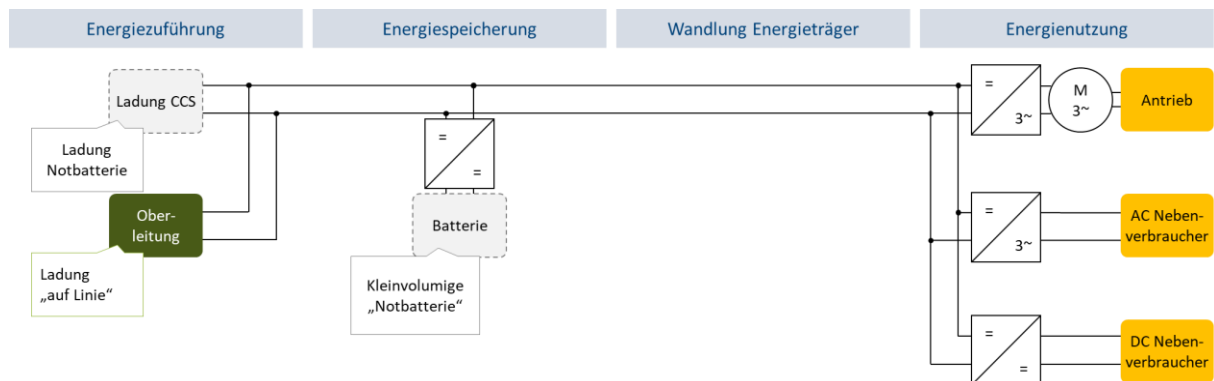


Abb. 35: Schaubild Oberleitungsbus ohne Traktionsbatterie (O-Bus)

Antriebssteckbrief (Hauptattribute)

Technische Merkmale

Stromversorgung	Kontinuierliche Stromversorgung aus Oberleitung über zwei Stangen-Stromabnehmer
Antrieb	Elektromotor, i.d.R. mit sehr klein dimensionierter Notbatterie
Bremsenergierückgewinnung	Rekuperation der Bremsenergie und Speicherung in Notbatterie oder Rückspeisung ins Oberleitungsnetz

Betriebliche Merkmale

Routenführung	Gebunden an Oberleitung, Umfahrung von Baustellen o.ä. im Notbetrieb möglich
Reichweite	Unbegrenzt
Kapazität und Durchsatz	Sehr hoch (25 m Doppelgelenkfahrzeuge möglich)
Zuverlässigkeit	Sehr hoch

Ökologische Merkmale

Lokale Emissionen	Keine
Treibhausgase	Abhängig vom Strommix
Lärmemission	Gering

Ökonomische Merkmale

Anschaffungskosten	Sehr hoch
Betriebskosten	Niedrig
Lebensdauer	Länger als Dieselbusse (i.d.R. Einsatz von Straßenbahnkomponenten)
Energieeffizienz	Hoch

Tab. 7: Antriebssteckbrief Oberleitungsbus ohne Traktionsbatterie (O-Bus)

Steckbrief Oberleitungsbus mit Traktionsbatterie (Duo-Bus)

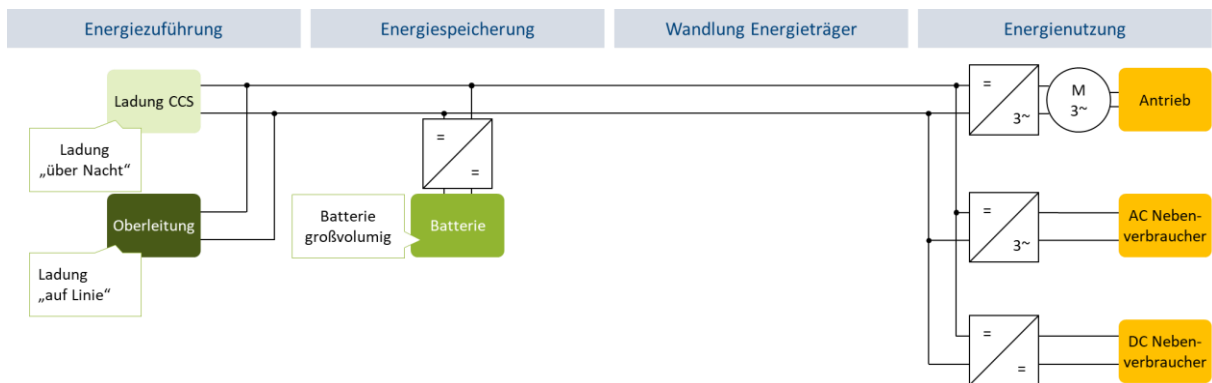


Abb. 36: Schaubild Oberleitungsbus mit Traktionsbatterie (Duo-Bus)

Antriebssteckbrief (Hauptattribute)

Technische Merkmale

Stromversorgung	Stromversorgung aus Oberleitung über zwei Stangen-Stromabnehmer, dabei auch Ladung der Traktionsbatterie
Antrieb	Elektromotor, Traktionsbatterie
Bremsenergierückgewinnung	Rekuperation der Bremsenergie und Speicherung in Traktionsbatterie, ggf. auch Rückspeisung ins Netz

Betriebliche Merkmale

Routenführung	Ca. 50-65 % Weganteil mit Oberleitung erforderlich
Reichweite	Unbegrenzt, wenn ausreichende Teilstrecken unter Oberleitung
Kapazität und Durchsatz	Sehr hoch (25 m Doppelgelenkfahrzeuge möglich)
Zuverlässigkeit	Hoch

Ökologische Merkmale

Lokale Emissionen	Keine
Treibhausgase	Abhängig vom Strommix
Lärmemission	Gering

Ökonomische Merkmale

Anschaffungskosten	Sehr hoch
Betriebskosten	Niedrig
Lebensdauer	Länger als Dieselbusse, vielfach Batterietausch nach ca. 7-10 Jahren
Energieeffizienz	Hoch

Tab. 8: Antriebssteckbrief Oberleitungsbus mit Traktionsbatterie (Duo-Bus)

2 AP 2: Verkehrsunternehmensspezifische Streckenanalyse

2.1 Methodik

2.1.1 Umlaufuntersuchung

Auf Basis der beigestellten Umlaufdaten erfolgt eine Energieverbrauchsberechnung pro Umlauf. Dabei wird zunächst der Traktionsenergieverbrauch isoliert anhand der angegebenen Fahrstrecken berechnet. Für jeden Linienabschnitt des Umlaufs werden spezifische Verbrauchswerte [kWh/km] angesetzt. Damit kann die ortsabhängige Topografie in der Berechnung berücksichtigt werden. Linienabschnitte mit höherem Steigungsanteil werden mit einem höheren Verbrauchswert bilanziert als Abschnitte im flacheren Gebiet. Da die Traktionsenergie nur von dem Weg-Höhen-Profil und der Zuladung abhängt, wird dieser Anteil des Energieverbrauchs als ganzjährig konstant veranschlagt.

Abhängig von äußeren Einflüssen wie beispielsweise der Umgebungstemperatur werden zusätzlich sogenannte Nebenverbraucherleistungen bilanziert. Diese sind über den Jahresverlauf nicht konstant, da insbesondere die Heizungs- und Klimaanlage abhängig von der Außentemperatur betrieben wird. Unter harten Bedingungen, z.B. an einem kalten Wintertag als Worst-Case Szenario, stellt der Energiebedarf für die elektrische Fahrzeugklimatisierung den größten Anteil der Nebenverbraucherleistung dar. Als zeitabhängige Größe wird die Energiemenge anhand der Einsatzzeiten und nicht anhand der Fahrstrecken berechnet.

Die Nebenverbraucherleistungen werden für jede Fahrzeugantriebstechnik und Fahrzeuggröße spezifisch vorgegeben. Darüber hinaus werden unterschiedliche Lastwerte für Linienfahrten, Transferfahren und Standzeiten berücksichtigt. Nach einer Standzeit von 10 Minuten wird stets angenommen, dass das Fahrzeug abgeschaltet wird und keine Energie verbraucht.

Die Summe aus Traktionsenergie und Nebenverbraucherenergie wird für jeden Umlauf gebildet, um den Energiebedarf des Umlaufs zu berechnen. Da in der Studie Machbarkeitsaussagen im Fokus stehen, werden hier primär härteste Bedingungen (Worst-Case, kalter Wintertag) für die Nebenverbraucher angesetzt. Schließlich soll das System ganzjährig auch unter harten Bedingungen einsatzfähig sein. Bei Bedarf kann auch ein mittlerer Verbrauchswert angesetzt werden (Average Case), der einen Jahresdurchschnittswert repräsentiert, wenn beispielsweise der jährliche Energieverbrauch abgeschätzt wird.

Eingesetzt wird ein Softwaretool für Energieberechnungen für Elektrobuserumläufe (Batteriebus und H₂ Bus). Das Tool ist eine Eigenentwicklung von eebc und wurde bereits erfolgreich in diversen vergleichbaren Untersuchungen eingesetzt.

2.1.2 Umlaufverkettung

Basis der Untersuchung sind Einzelumläufe, die im Rahmen der Umlaufuntersuchung hinsichtlich ihrer Machbarkeit mit emissionsfreien Antrieben untersucht werden. Dabei wird zunächst ermittelt, ob Umläufe als Fahrstrecke von Depot bis zu Depot machbar sind.

Darüber hinaus werden gegebenenfalls mehrere Einzelumläufe zu Tagesumläufen verkettet. Während Dieselbusse mit ihrer sehr hohen Reichweite problemlos zwei direkt aufeinanderfolgende Umläufe befahren können, müssen Batteriebusse in vielen Fällen erst im Depot nachgeladen werden, um den Energiebedarf des Folgeumlaufs zu decken.

Im Rahmen der Untersuchung werden Einzelumläufe zu Tagesumläufen zusammengesetzt, wobei der Ladebedarf und die notwendige Ladezeit zwischen zwei Umläufen berücksichtigt wird. Nach Möglichkeit werden die Fahrzeuge zwischen zwei Umläufen vollgeladen. Nur bei Notwendigkeit werden die Fahrzeuge teilgeladen, wenn die Energiemenge im Batteriespeicher anschließend für den Folgeumlauf ausreicht. In jedem Fall wird im Zuge der Berechnung eine Rangierzeit über 10 Minuten als Zeitpuffer kalkuliert, um ausreichende Zeitreserven zum Aufbau der Ladeverbindung zu berücksichtigen. Es ist möglich, dass im Betriebsalltag eine kürzere Rangierzeit ausreichend ist.

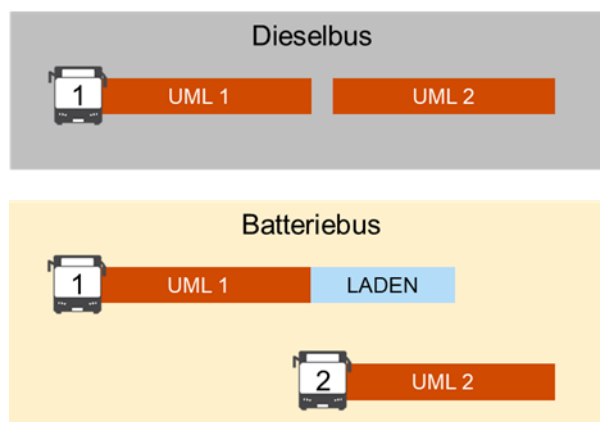


Abb. 37: Schema Umlaufverknüpfung

Bei kurzen Verweildauern im Depot ist es möglich, dass die Aufenthaltszeit nicht ausreicht, um den notwendigen Energiebedarf des Folgeumlaufs zu decken. Entsprechend muss ein zusätzliches Fahrzeug bilanziert werden, um alle Umläufe bedienen zu können. Damit entsteht, wie in obiger Abbildung schematisch dargestellt, ein Fahrzeugmehrbedarf, der für eine flottenweite Umstellung berücksichtigt werden muss.

Im Depot wird eine konstante Ladeleistung von 150 kW angenommen, was einem angesetzten Standardwert bei Ladung über die CCS 2 Schnittstelle entspricht.

2.1.3 Umlaufanpassung

Im Verlauf der Untersuchung werden Umläufe angepasst, um diese auf die Reichweitenpotentiale batterieelektrischer Busse anzupassen. Ziel ist es, lange Umläufe zu verkürzen und stattdessen ungenutzte Busse aus dem Depot in den Einsatz zu bringen. Dabei soll die notwendige Anzahl der Batteriebusse nach Anpassung im Idealfall der heutigen Anzahl an Dieselnissen entsprechen.

Reichweitenkritische Umläufe werden bei Bedarf ausschließlich an Wendestellen aufgetrennt oder „gebrochen“. Zwischen Brechpunkt und Depot wird eine zusätzliche Transferfahrt bilanziert, um den zusätzlichen Energiebedarf für das Einrücken ins Depot zu berücksichtigen. Wenn dieselbe Transferstrecke aus der Umlaufliste entnommen werden kann, wird die entsprechende Strecke angesetzt. Andernfalls werden Transferstrecke und Fahrtdauer über Google Maps (Pkw Daten, aufgerundet) erhoben.

Der zweite Umlaufteil ab dem Brechpunkt wird von einem anderen Fahrzeug aus dem Depot bedient. Auch hier wird die notwendige Transferstrecke und Transferzeit zum Wendepunkt berücksichtigt.

Die Umlaufanpassung erfolgt manuell. Brechpunkte werden anhand der Energieverbrauchs-berechnung ermittelt und so gewählt, dass die resultierenden Einzelumläufe mit Batteriebusen machbar sind.

Als Maßstab werden Batteriekapazitäten angesetzt, wie sie für den Umstellungszeitpunkt als realistisch angenommen werden. Es ist kein Ziel der Umlaufanpassung, ein Szenario für eine vollständige Flottenumstellung nach heutigem Entwicklungsstand zu liefern. Vielmehr soll eine Lösungsoption dargestellt werden, die realistisch ist, wenn im schrittweisen Systemausbau alle „einfachen“ Umläufe bereits elektrifiziert sind.

2.1.4 Berechnungsgrundlage und Prämissen

Im Rahmen der Untersuchung werden die folgenden Parameter und Eigenschaften als Berechnungsgrundlage herangezogen.

Fahrzeugbatterie (Traktionsbatterie)

In den letzten Jahren wird die Lithium-Ionen-Batterietechnik von einer rasanten technischen Entwicklung charakterisiert. In allen mobilen Anwendungen stehen heute Kapazitätswerte zur Verfügung, die noch vor wenigen Jahren nicht ansatzweise erreicht wurden. Dieser Entwicklungstrend wird unter Fachleuten auch weiterhin als anhaltend eingeschätzt. Im Rahmen dieser Untersuchung soll das Entwicklungspotenzial der Batterietechnik in die Bewertung einfließen, ohne dabei allzu optimistische Vorhersagen zu veranschlagen.

Wie in der folgenden Beispielabbildung dargestellt, legen wir eine kontinuierliche Entwicklungsprognose zugrunde.

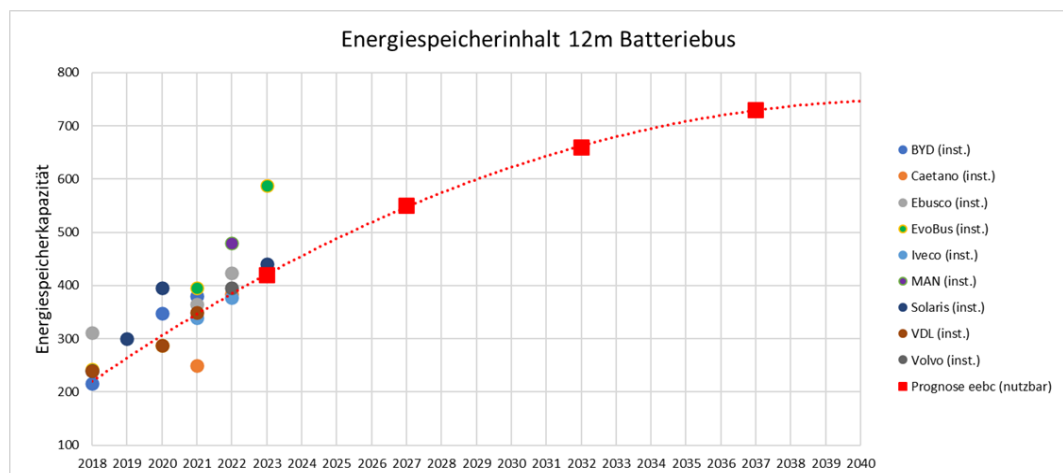


Abb. 38: Beispiel Entwicklungsprognose Batterietechnik (inst. = installiert)

Wir legen Wert darauf, im Rahmen unserer Bewertung eine konservative Linie zu verfolgen und tendenziell pessimistische Prognosen als Grundlage für die Machbarkeitsbewertung zugrunde zu legen. Aus diesem Grund setzen wir feste Kapazitätswerte an, die immer für einen Fünfjahreszeitraum als Grenzwert betrachtet werden. Daraus ergibt sich ein abgestufter

Entwicklungsverlauf mit Entwicklungssprüngen am Ende des Zeitintervalls. Dabei bewegen sich alle angesetzten Grenzwerte stets unter dem antizipierten oben dargestellten Verlauf.

Für die Untersuchung setzen wir die folgenden Kapazitätsgrenzwerte für die Batterien von BEVs mit CCS 2-Ladeschnittstelle an.

<i>Fahrzeugtyp</i>	<i>Kapazität bis 2027</i>	<i>Kapazität 2028-2032</i>	<i>Kapazität 2033-2037</i>	<i>Kapazität 2038-2042</i>
Solobus 12m	400 kWh	480 kWh	580 kWh	640 kWh
Gelenkbus	470 kWh	565 kWh	680 kWh	750 kWh
Midibus	280 kWh	340 kWh	410 kWh	455 kWh

Tab. 9: Kapazitätsprognose (nutzbar in kWh) für versch. BEV Fahrzeugtypen mit CCS 2-Schnittstelle

In diesem Kontext muss berücksichtigt werden, dass es sich um Prognosen und Annahmen handelt. Auch wenn eine Verbesserung der Batterietechnik mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit eintreten wird, ist letztlich unklar, ob diese Verbesserung langfristig ausschließlich für eine Vergrößerung der Batteriekapazität an Bord genutzt wird. Es ist ebenso denkbar, dass Hersteller die Entwicklungspotenziale dazu nutzen, kleinere und günstigere Batterien bei gleichbleibender Kapazität zu verbauen. Vereinfacht formuliert werden Batterien entweder besser oder günstiger.

Für Fahrzeugtypen mit Pantographenschnittstelle (Ansätze mit Zwischenladen auf Linie) wird angenommen, dass die Batteriekapazität reduziert werden muss, um dachseitig entsprechende Bauräume zu schaffen. In der Untersuchung wird der nutzbare Kapazitätswert dafür jeweils um 80 kWh reduziert, was etwa einem üblichen „Battery-Pack“ entspricht.

Ladetechnik

Zugrunde gelegt wird eine marktübliche Depot-Ladeinfrastruktur mit CCS 2 Ladestecker.

Aufgrund der Strombegrenzung auf maximal 200 A (Ladestecker und Ladekabel) und einer typischen Batteriespannung von 750 V wird der Ladeleistungswert als Produkt beider Faktoren mit 150 kW berechnet. Die Ladeleistung wird während des Ladevorgangs mit 150 kW als konstant angenommen. Dieser Wert entspricht einem üblichen Standardwert für Batteriebusse mit CCS-Ladeschnittstelle. Für Depotladung wird dieser Leistungswert auch für Ansätze mit Pantographen angesetzt.

Schnellladestationen werden bei Bedarf mit einer Ladeleistung von 300 kW angesetzt. In der Praxis sind hier auch größere Leistungswerte umsetzbar. Der Leistungswert wird hier angesetzt, da er für alle Fahrzeugtypen eine Laderate von weniger als ein C bedeutet und somit für alle aktuellen Batteriesysteme ohne exorbitante Lebensdauereinbußen realistisch ist.

Entwicklungsprognose Brennstoffzellenfahrzeuge

Im Feld der Brennstoffzellentechnik wird das Entwicklungspotenzial auf absehbare Zeit als eingeschränkt aufgefasst. Möglich erscheint ein Reichweitenzuwachs, indem statt gasförmigen H₂ (GH₂) Flüssigwasserstoff (LH₂) in den Fahrzeugen gespeichert wird. Auch wenn dies als technisch realistisch eingeschätzt wird, ist es fraglich ob und wann entsprechende Techniken realisiert werden. Aufgrund der ohnehin im Feld emissionsfreier Antriebe starken Reichweitenpotenziale von Brennstoffzellenantrieben wird hier der aktuelle Status Quo auch langfristig angesetzt.

Ähnliches gilt auch für Fahrzeuge mit Brennstoffzellen Range Extender Technik. Auch wenn insbesondere im Bereich der Batterietechnik weitere Entwicklungen erwartet werden, wird hier langfristig der aktuelle Stand der Technik angesetzt. Aktuell sind nur einzelne Fahrzeuge am Markt, weshalb die weitere Entwicklung nicht auf Basis von Historiendaten abgeschätzt werden kann. Gleichzeitig sind die Reichweitenpotenziale sehr gut, so dass eine technische Entwicklung in der Batteriespeicherkapazität hier nur marginalen Einfluss auf die Machbarkeit hat.

Einschränkend gilt für die gesamte Bus-Modellpalette mit Brennstoffzellentechnik, dass von namhaften Europäischen Herstellern nur Solo- oder Gelenkbusbauausführungen am Markt sind. Auch wenn die Verbrauchsmengen grundsätzlich abschätzbar sind, fehlen Referenzwerte für die Speichertechnik, um Verbrauch und Tankgröße für Machbarkeitsbewertungen für andere Fahrzeuggrößen in Kontext zu setzen.

Betrachtet werden die folgenden Referenzwerte:

Fahrzeugtyp	Brennstoffzellenbus (FCEV)	Brennstoffzellenbus Range Extender (BZ-REX)	
	Tankkapazität	Batteriekapazität	Tankkapazität
Solobus 12m	35-38 kg	294 kWh	25 kg
Gelenkbus	47-50 kg	294 kWh	35 kg
Midibus	N.A.	N.A.	N.A.

Tab. 10: Kapazitätsprognose für H₂ Tanks und Batteriekapazitäten (nutzbar in kWh) für Fahrzeugtypen mit Brennstoffzellenantrieben

Einsatzumfeld

Die Topografieeinschätzung im Einsatzgebiet ist flach. Der Verbrauchswert für den Traktionsbetrieb (Fahrleistung ohne Klimatisierung) wird zurückhaltend angesetzt, um eine konservative Bewertung, vor dem Hintergrund modellspezifischer Verbrauchswerte und dem Einfluss des Fahrerverhaltens, zu erlauben. In der Praxis ist tendenziell von geringeren Verbrauchswerten als hier angenommen auszugehen.

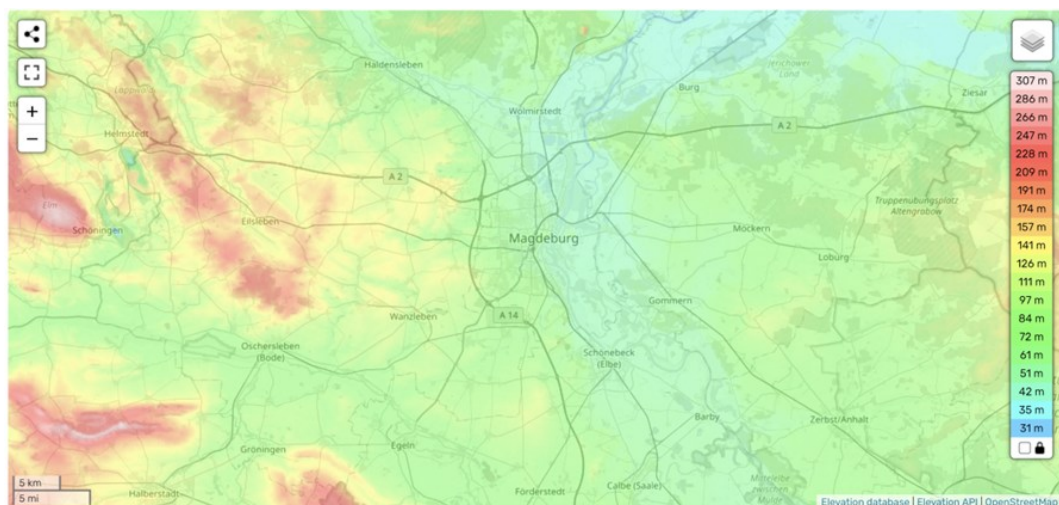


Abb. 39: Topografische Karte Magdeburg und Umgebung [Quelle: <https://de-de.topographic-map.com>]

Betrachteter Betriebstag

Für die Bewertung der Machbarkeit wird der härteste Betriebstag ausgewählt. Damit sollen die Bewertung der Machbarkeit sowie die erforderlichen Zusatz- und Optimierungsmaßnahmen am ungünstigsten Fall ausgerichtet werden. Damit wird sichergestellt, dass die Ergebnisse in allen Betriebsszenarien gültig sind. Für Betriebstage mit reduzierter Fahrleistung kann abgeleitet werden, dass die Machbarkeit gegeben ist, wenn diese unter härteren Anforderungen ebenfalls vorliegt.

Die Auswahl des Betriebstages erfolgt anhand der Tagesgesamtfahrleistung aller Fahrzeuge. Ausgewählt wird der Betriebstag „Montag bis Freitag Schule“.

2.1.5 Grafische Darstellungen

An dieser Stelle werden die Inhalte von Grafiken erläutert, die im Folgenden wiederholt aufgegriffen werden. Die Farbgebung entspricht nicht zwingend der Farbgebung im weiteren Verlauf des Dokuments. Aus Übersichtsgründen ist die Einheit der Y-Achse in vielen Fällen im Diagrammtitel aufgeführt und nicht an der Achse selbst. Dieser Ansatz wird verfolgt, um einen möglichst großen Ausschnitt der Grafik selbst zu erlauben.

Machbarkeitsdarstellung Umläufe Batteriebus

Der Verständlichkeit halber ist die Darstellung und Erläuterung hier auf ein dreistufiges Modell mit zwei Grenzwerten („Heute“ und „Zukunft“) reduziert.

Im Beispiel ist kein konkreter Zeitraum für „Zukunft“ definiert, da hier nur die Zusammensetzung der Grafik erläutert werden soll. Im Rahmen der Untersuchung berücksichtigen wir Grenzwerte, die jeweils für einen fünfjährigen Zeitraum definiert sind (z.B. 2028-2032). Die verschiedenen Grenzwerte und Zeiträume sind als solche in den Grafiken beschriftet beziehungsweise in Kapitel 2.1.4 *Berechnungsgrundlage und Prämissen* dargestellt. Die Interpretation der Grafiken entspricht weiterhin dem hier beschriebenen Schema.

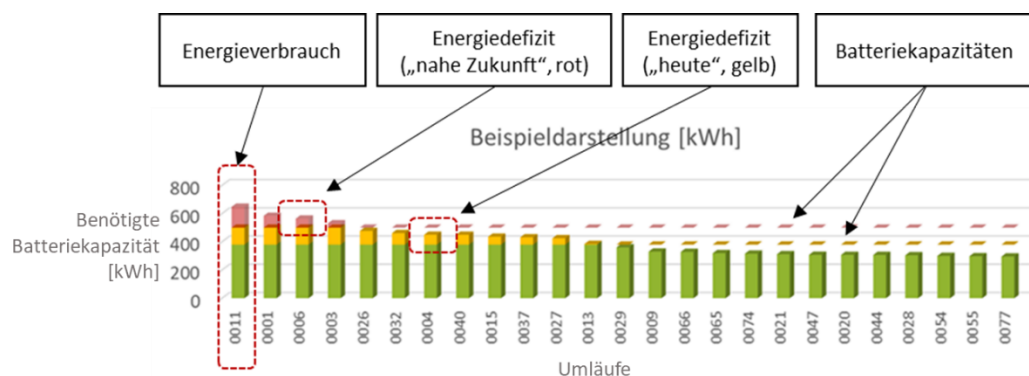


Abb. 40: Darstellung Energieverbrauch verschiedener Umläufe (im Bsp. Energieverbrauch = Stromverbrauch)

Für jeden Umlauf (X-Achse) ist der berechnete Strom- oder Energieverbrauch auf der Y-Achse dargestellt. Sofern nicht anderweitig angegeben, ist der Stromverbrauch im Worst-Case, also unter harten Umgebungsbedingungen, aufgeführt.

Die Darstellung erfolgt als mehrfarbiger Balken, um den Energieverbrauch in mehreren Zeitperioden bewerten zu können. Hintergrund ist die technische Entwicklung im Batteriesektor. Aufgrund dieser wird die Batteriekapazität über die Jahre steigen. Für jede Zeitperiode wird ein Erwartungswert für diese Batteriekapazität angesetzt. Energieverbräuche, die kleiner als die erwartete Batteriekapazität sind, gelten als ‚machbar‘, da die Energiemenge aus einer einzigen Batterieladung gedeckt werden kann. Energieverbräuche, die höher als die Referenzkapazität sind, gelten in diesem Zeitraum als ‚nicht machbar‘ oder ‚(reichweiten-)kritisch‘.

Im Beispiel sind zwei fiktive Referenzkapazitäten angesetzt, die hier nicht weiter beziffert sind. Diese Werte können auch als Grenzwert verstanden werden, ab dem ein Umlauf als kritisch bewertet wird. Hier wird ein Grenzwert für den heute marktüblichen Standard (gelbe gestrichelte Linie) und ein erwarteter Grenzwert für die Zukunft (rote gestrichelte Linie) dargestellt.

Sofern der Stromverbrauch kleiner als die heute nutzbare Batteriekapazität ist, ist der Stromverbrauch ausschließlich in grün dargestellt und der Umlauf ist damit heute als machbar klassifiziert. Dies entspricht den Beispielumläufen auf der rechten Seite der Grafik.

Bei einer Überschreitung eines Batteriekapazitätswertes wird für den Umlauf mehr Energie benötigt, als aus der Batterie entnommen werden kann. Entsprechend resultiert ein Energiedefizit. Gelbe Balkenanteile entsprechen dabei dem Defizit nach aktueller Technik.

Ein Balken, der nur grüne und gelbe Farbanteile aufweist, liegt zwischen beiden Grenzwerten. Der Energiebedarf kann nicht mit Traktionsbatterien erfüllt werden, die dem heutigen Stand der Technik entsprechen. Der Verbrauchswert ist höher als der Kapazitätswert „heute“ (gelb gestrichelte Linie). In der „Zukunft“ wird in diesem Fall eine Kapazität erwartet, die größer ist als der berechnete Energieverbrauch. In der Zukunft ist dieser Umlauf also ‚machbar‘.

Balken oder Umläufe, die neben einem grünen und gelben auch einen roten Farbanteil aufweisen, liegen über beiden Grenzwerten. Der Energiebedarf ist höher als die für „heute“ und für die „Zukunft“ angesetzte Batteriekapazität. Der Energiebedarf kann also auch langfristig nicht aus der Traktionsbatterie gedeckt werden. Trotz technischer Entwicklung müssen für diesen Umlauf Sondermaßnahmen getroffen werden, wenn eine Elektrifizierung geplant ist. Beispiele hierfür sind Umlaufanpassung oder Zwischenladen.

In den späteren Darstellungen werden statt „heute“ und „Zukunft“ mehrere Zeitintervalle in den Grafiken aufgeführt. Das Prinzip bleibt übertragbar. Balken (Energien Mengen / „Stromverbrauch“) sind in den Zeitintervallen machbar, deren Grenzwert nicht überschritten wird. Wenn ein Balken den Grenzwert erreicht, gilt er in dem Zeitintervall des Grenzwerts als ‚kritisch‘.

Für FCEV wird eine analoge Darstellung verfolgt. Aufgrund der nicht absehbaren technischen Entwicklung werden hier zwei verschiedene Grenzwerte für Tankkapazitäten angesetzt, die das aktuelle Marktspektrum abbilden.

Machbarkeitsdarstellung Umläufe Batteriebus mit vertauschten Achsen

Abhängig von der dargestellten Anzahl an Umläufen kann die oben beschriebene Darstellungsweise aus Formatierungsgründen ungünstig sein. In diesen Fällen wird die Grafik mit vertauschten Achsen dargestellt.

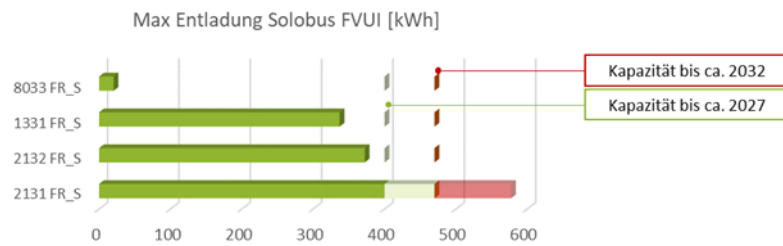


Abb. 41: Darstellung Energieverbrauch verschiedener Umläufe mit vertauschten Achsen (Praxisbeispiel)

Der Inhalt der Grafik entspricht dabei der ersten Variante, wobei die Umläufe an der Y-Achse aufgeführt sind. Die Höhe des Energieverbrauchs ist an der X-Achse ablesbar.

Umlaufübersicht

Diese Darstellungsform der Umlaufübersicht wird gewählt, um eine Auswahl von Umläufen gleichzeitig über einer Zeitachse darzustellen.

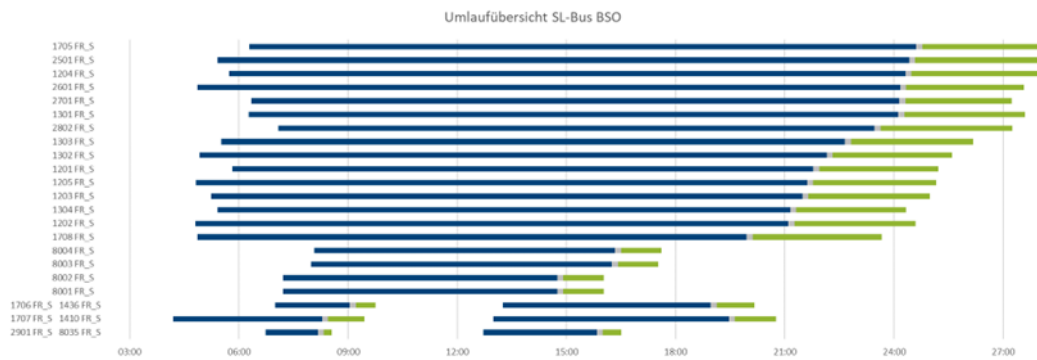


Abb. 42: Umlaufübersicht Beispieldarstellung (hier: Solobusse BEV Depot BSO)

Auf der X-Achse ist dabei die Zeit im 48 Stunden Format aufgetragen. Auf der Y-Achse die betrachteten Umläufe.

In Blau sind die Fahrtzeiten der Einzelumläufe dargestellt. Die Balken beginnen bei Abfahrt ab Depot und Enden bei Ankunft im Depot. Hier dargestellt ist eine BEV Variante, die nach Eintreffen im Depot nachgeladen wird, was über den grünen Balken symbolisiert wird. Für Dieselsebusse und FCEV entfällt der grüne Balken. In Grau ist eine zehninminütige Rangierzeit aufgeführt, die unmittelbar nach Ankunft im Depot beginnt.

Zeitangaben in Grafiken

Betriebstage gehen in vielen Fällen über den Kalendertag hinaus. Dies gilt insbesondere, wenn der Fokus auf Ladeinfrastruktur gelegt wird. Die Umläufe selbst erfolgen „am Tag“, während die Ladung in die Nachtstunden entfällt.

Zum Beispiel kann ein Umlauf um 3 Uhr morgens starten, um 19 Uhr im Depot enden und seinen Ladevorgang um 3 Uhr nachts beginnen.

Um eine eindeutige Zeitachse einzuführen, mithilfe derer frühmorgens von spätnachts unterschieden werden kann, werden Zeiten im 48 Stunden Format angegeben. Hierbei springt die Zeit nach 23:59 Uhr nicht auf 0:00 Uhr. Stattdessen wird von 24:00 Uhr „weitergezählt“. 3 Uhr nachts aus obigem Beispiel wird als 27:00 Uhr angegeben, um die Zeit gegenüber 3 Uhr morgens abzugrenzen.

2.1.6 Abweichung vom Leistungsumfang

Nach Vorgabe der Leistungsbeschreibung der Ausschreibung sind Anpassungen in der Betriebsplanung, wie die Anpassung von Umläufen, für den Technologievergleich auf ein Minimum zu reduzieren. Entsprechend wäre die Umlaufanpassung als leistungsstarkes Mittel zur Optimierung des Einsatzumfeldes für emissionsfreie Antriebe per Definition ausgeschlossen.

Gleichzeitig wird in der Ausschreibung die detaillierte Untersuchung eines nachzurüstenden Oberleitungsbussystems vorgegeben. Aufgrund der überproportional hohen Infrastrukturkosten bei Systemneueinführung kann hier die Wirtschaftlichkeit jedoch bereits in einer überschlägigen Rechnung bewertet werden.

In Abstimmung mit der MVB wurde entschieden, den Aspekt Umlaufanpassung in den Untersuchungsumfang aufzunehmen und im Gegenzug die Bewertung von Oberleitungsbussen auf allgemeiner Ebene anzusiedeln. Damit kann die Batteriebusstechnik letztlich in einem höheren Detaillierungsgrad betrachtet werden und der Technologievergleich auf gut realisierbare Optionen zugeschnitten werden.

2.2 Umlaufanalyse - Einzelumläufe

Im ersten Arbeitsschritt werden Einzelumläufe als kleinste Bewertungsinstanz in Fokus gesetzt. Einzelumläufe sind dabei als umlaufende Fahrstrecke definiert, die sowohl von einem Depot²⁰ starten als auch in einem Depot enden. Im Anwendungsfall starten und enden Einzelumläufe grundsätzlich in demselben Depot. Ein Fahrzeug kann in einem Fahrzeugtagesumlauf grundsätzlich mehrere Einzelumläufe absolvieren, wenn diese zeitlich hintereinander gestaffelt werden können (Umlaufverkettung).

Im Fuhrpark der Magdeburger Verkehrsbetriebe (MVB) werden nahezu ausschließlich Solo- und Gelenkbusse eingesetzt, die hier zur Dekarbonisierung mit batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV), brennstoffzellenelektrischen Fahrzeugen (FCEV) sowie Brennstoffzellen Range Extender Fahrzeugen (BZ-REX) untersucht werden. Im betrachteten Betriebstag (Wochentag Schule) liegt lediglich ein einzelner Midibus-Umlauf vor. Da dieser in allen Technologievarianten aufgrund des geringen Energiebedarfs als unkritisch bewertet wird, wird auf eine Graphendarstellung für diesen einzelnen Umlauf verzichtet.

2.2.1 Einzelumlaufanalyse BEV-Depotlader

Für BEV wird im ersten Untersuchungsschritt pro Einzelumlauf untersucht, welche maximale Batterieentladung im Einsatz unter Worst-Case Bedingungen zu erwarten ist. Da für BEV ein Zwischenladen im Umlauf grundsätzlich möglich ist, wird grundsätzlich über die gesamte Umlaufdauer untersucht, wie tief die Batterie maximal entladen²¹ wird.

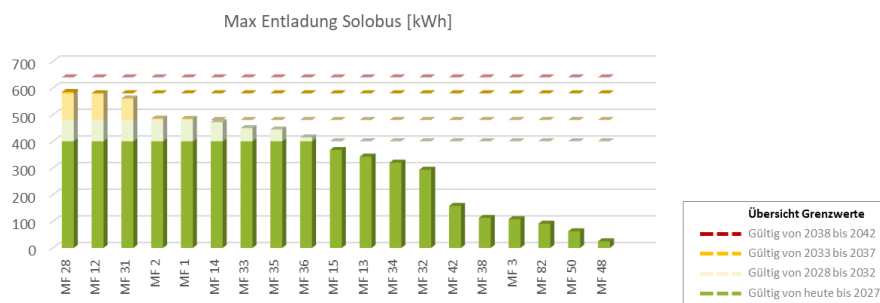


Abb. 43: Max. Entladung pro Einzelumlauf (BEV-Depotlader) – Solobus

Sowohl bei Solobussen (Abb. 43) als auch bei Gelenkbussen (Abb. 44) zeigt sich ein typisches „Bewertungsbild“ für BEV im ÖPNV. Einerseits ist eine relevante Anzahl Umläufe vorhanden, die bereits heute und kurzfristige (Prognose ab 2028) als machbar eingeschätzt werden. Andererseits sind diverse Umläufe vorhanden, die erst in späteren Entwicklungsstufen als machbar klassifiziert werden. Sofern hier, bei ambitionierten Umstellungsgeschwindigkeiten, die technische

²⁰ Der Begriff Depot wird hier als Sammelbegriff für Abstellplätze und Betriebshöfe gewählt

²¹ Modellhaft wird für die Untersuchung angenommen, dass eine unendlich große Traktionsbatterie im Fahrzeug vorhanden ist. Über die Umlaufdauer wird untersucht, welche Energiemenge maximal aus der idealen Batterie entladen wurde (max. Batterieentladung). Dieser Wert entspricht der minimal erforderlichen Batteriekapazität (nutzbar), um den Umlauf zu erfüllen.

Entwicklung nicht abgewartet werden kann, sind Sondermaßnahmen wie Umlaufanpassungen erforderlich, um die Umlauflängen entsprechend der erreichbaren Reichweiten einzukürzen.

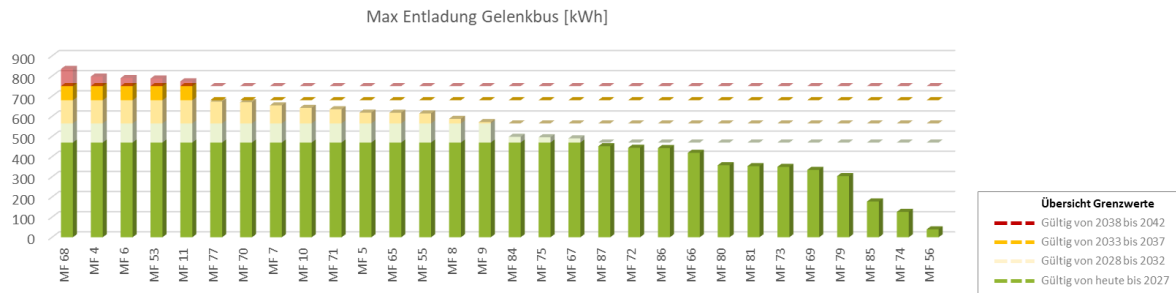


Abb. 44: Max. Entladung pro Einzelumlauf (BEV-Depotlader) – Gelenkbus

Im Feld der Gelenkbusse sind neben Umläufen, die erst in späteren Entwicklungsstufen als machbar bewertet werden, auch Umläufe vorhanden, die den letzten (roten) Grenzwert überschreiten. Diese Umläufe werden als langfristig kritisch bewertet, da eine Abschätzung der weiteren Batterietechnikentwicklung hier nicht getroffen wird. Auch wenn der Batterietechnik über die 2030er Jahre hinaus ein deutliches Entwicklungspotenzial zugesprochen wird, ist es schlicht nicht prognostizierbar, ob der Kapazitätswachstum in größeren Batteriesystemen mündet. Es ist gleichfalls möglich, dass nicht die Speicherkapazität vergrößert, sondern Volumen, Gewicht und Kosten – bei konstanter Kapazität – reduziert werden. Unabhängig von der tatsächlichen Entwicklung wird hier angenommen, dass für langfristig kritische Umläufe (mit rotem Balkenanteil) Anpassungsmaßnahmen für eine Dekarbonisierung, unabhängig vom Umstellungszeitpunkt, erforderlich sind.

Nicht grafisch dargestellt ist der einzelne Midibus-Umlauf, dessen maximale Batterieentladung mit deutlich unter 100 kWh bereits mit aktueller Batterietechnik als heute machbar bewertet wird.

2.2.2 Einzelumlaufanalyse FCEV

Im Brennstoffzellenmodell ist ein Nachtanken während des Umlaufs in der Regel nicht möglich. Entsprechend ist die benötigte Wasserstoffmenge pro Umlauf gleich der „Tankentladung“ am Umlaufende und als „H₂ Menge“ pro Umlauf in den Grafiken dargestellt. Als Grenzwert sind zwei verschiedene Werte für die Tankgröße aufgezeichnet, die den typischen Wertebereich verbauter Wasserstofftanks pro Fahrzeugtyp abbilden. Für die Machbarkeitsbewertung wird angenommen, dass jeweils die „große“ Tankkapazität zum Einsatz kommt.

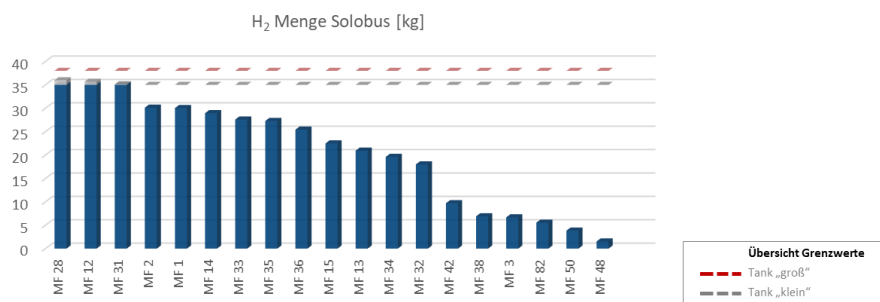


Abb. 45: H₂ Menge pro Einzelumlauf (FCEV) – Solobus

Brennstoffzellenbusse haben gegenüber der aktuellen Batterietechnik merkliche Reichweitenvorteile. Im Gegensatz zur Batterietechnik ist eine technische Weiterentwicklung mit nennenswerten Auswirkungen auf die Fahrreichweite nicht ausreichend belegt, um dies als Bewertungsgrundlage vorauszusetzen. Entsprechend erfolgt hier keine zeitabhängige Bewertung.

Aufgrund der aktuellen Reichweitenvorteile ist die Anzahl machbarer Einzelumläufe mit FCEV-Technik deutlich höher als im batterieelektrischen Fall. Im Feld der Solobusse können alle Umläufe bereits heute als machbar bewertet werden.

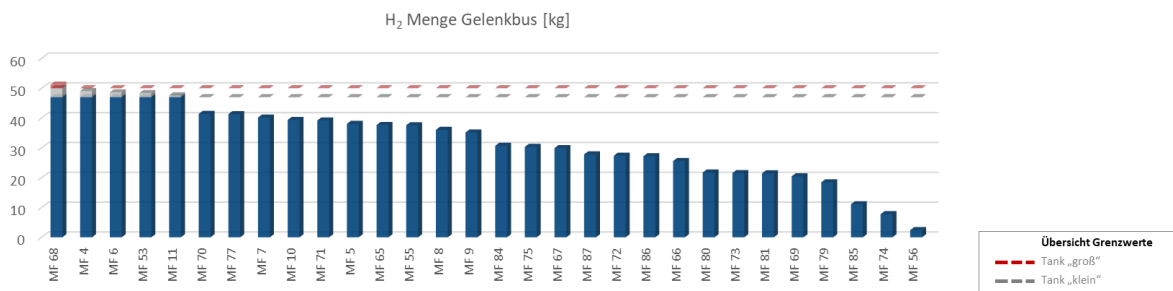


Abb. 46: H₂ Menge pro Einzelumlauf (FCEV) – Gelenkbus

Mit Blick auf die Verbrauchsgrafiken der Gelenkbusse wird deutlich, dass auch langfristig Reichweitenvorteile von FCEV zum Tragen kommen können. Hier ist lediglich ein einzelner Umlauf als „nicht machbar“ bewertet, während im BEV-Modell noch fünf Gelenkbusumläufe als langfristig kritisch bewertet wurden. Allerdings liegen vier Gelenkbusumläufe knapp unter dem Grenzwert für große H₂ Tankgrößen. Aufgrund der Berechnungsungenauigkeiten im Rahmen einer Machbarkeitsstudie kann festgehalten werden, dass die langfristigen Prognosen für BEV und FCEV auf Augenhöhe rangieren. Grund hierfür ist die erwartete technische Entwicklung. Aktuell und während dem Entwicklungsprozess werden der Brennstoffzellentechnik jedoch merkliche Reichweitenvorteile zugesprochen.

Nicht als Grafik aufgeführt ist der einzelne Midibus-Umlauf. Auch wenn der erwartete Wasserstoffbedarf, analog zum geringen Energiebedarf im BEV-Modell, gering ausfällt, scheitert die Machbarkeitsbewertung hier am Marktangebot. Da kein entsprechendes Modell am Markt platziert ist, wird der einzelne Umlauf hier als nicht machbar klassifiziert.

2.2.3 Einzelumlaufanalyse BZ REX

Brennstoffzellen Range Extender nutzen primär elektrische Energie aus der Traktionsbatterie. Bei vollständiger Entladung wird die Brennstoffzelle zugeschaltet, um über on-board Stromerzeugung die Reichweite zu verlängern. Die Verbrauchszusammensetzung wird folgend über die Farbgebung differenziert. Grüne Balkenanteile entsprechen dem elektrischen Energiebedarf aus der Traktionsbatterie entsprechend den Einheiten an der Y-Achse. Erst bei Erreichen des Grenzwertes (blaue Linie) wird die Brennstoffzelle zugeschaltet. Über den blauen Balkenanteil wird der korrespondierende H₂ Bedarf visualisiert. Da die Y-Achse hier einem elektrischen Energiebedarf entspricht, sind die Wasserstoffmengen über die Datenbeschriftungen quantifiziert.

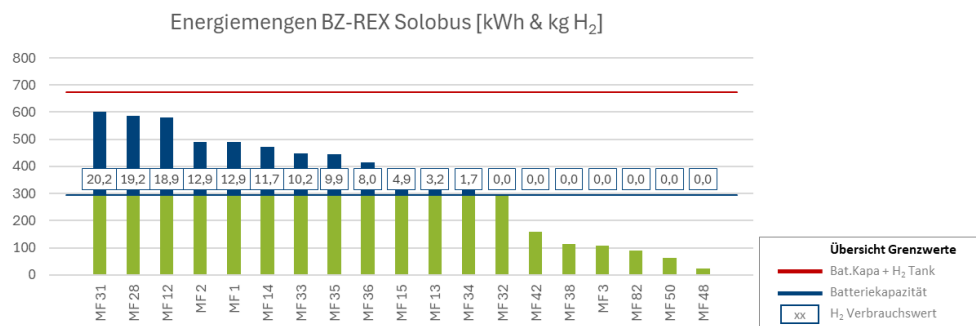


Abb. 47: Energiemengen pro Einzelumlauf (BZ-REX) - Solobus

Insgesamt ist das Bewertungsbild mit FCEV vergleichbar. Aufgrund des bisher sehr geringen Markangebots von BZ-REX, sowie den entsprechend fehlenden Praxiserfahrungen und Messdaten aus dem Betrieb, darf die Bewertungsgenauigkeit für BZ-REX hier nicht überbewertet werden.

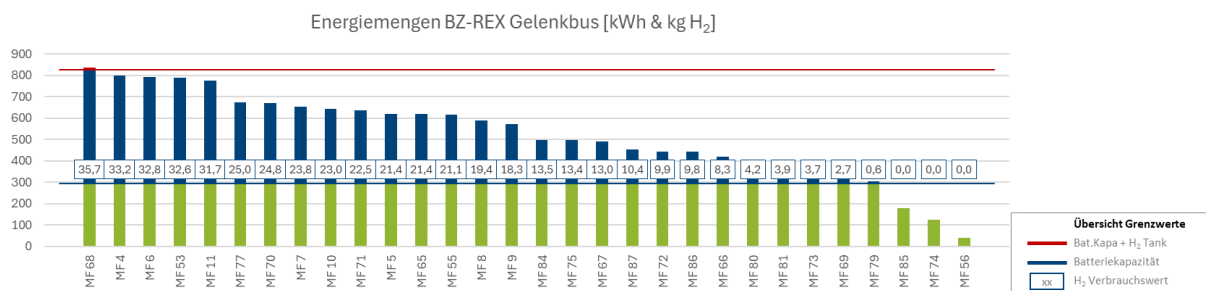


Abb. 48: Energiemengen pro Einzelumlauf (BZ-REX) - Gelenkbus

In Summe kann festgehalten werden, dass die Reichweitenpotenziale mindestens vergleichbar mit FCEV ausfallen. Abhängig von der Marktentwicklung wird tendenziell angenommen, dass höhere Reichweiten mit BZ-REX Modellen zu erzielen sind als mit FCEV.

Auch für BZ-REX ist kein passendes Marktangebot für Midibusse bekannt, weshalb die Bewertung des einzelnen Midibus-Umlaufs hier gleich dem FCEV-Modell ausfällt. Trotz geringer erwarteter Energiemengen wird der Einsatz als nicht machbar bewertet. In diesem Sonderfall ist die Bewertung jedoch hinfällig. Bei den geringen Verbrauchswerten würde der Umlauf, ein passendes Marktangebot vorausgesetzt, ohne Zuschalten der Brennstoffzelle absolviert werden. Das Fahrzeug würde praktisch als Batteriebus eingesetzt, weshalb auch im BZ-REX Modell eine Beschaffung des Midibusses als Batteriebus (ohne Range- Extender) sinnvoll wäre.

2.2.4 Einzelumlaufanalyse BEV-Gelegenheitslader

Im Gegensatz zu den vorangestellten Einzelumlaufanalysen für BEV-Depotlader, FCEV und BZ-REX wird für BEV-Gelegenheitslader eine abweichende Herangehensweise verfolgt. Entsprechend der Zielsetzung, eine möglichst hohe Machbarkeitsquote bei minimalen betrieblichen Anpassungen zu erzielen, wird der gesamte Umlaufdatensatz hinsichtlich denkbarer Ladepunkte an Wendestellen ausgewertet.

Im Sinne eines Maximalansatzes wird dabei zunächst angenommen, dass jede Wendestelle mit Ladeinfrastruktur ausgestattet ist. Nach Ausführung einer ersten Instanz der Einzelumlaufanalyse kann damit bestimmt werden, wie viele Umläufe im Idealfall machbar, respektive nicht machbar, sind. Dabei zeigt sich, dass eine vollständige Machbarkeit aller Umläufe grundsätzlich möglich ist, wenn Ladeinfrastruktur im ausreichenden Umfang installiert wird und erreichbar ist.

In einem iterativen Prozess wird im Anschluss geprüft, wie viele Ladepunkte tatsächlich erforderlich sind, um die ideale Machbarkeitsquote zu erzielen. Dabei kommt zum Tragen, dass diverse Wendepunkte mit Ladetechnik keinen oder nur einen marginalen Mehrwert bieten würden. Beispielsweise sind Ladepunkte überflüssig, wenn die Wendestellen nur von Umläufen angefahren werden, die auch ohne Nachladung auf Linie bereits unkritisch bewertet werden. Darüber hinaus bieten beispielsweise Wendestellen mit sehr kurzen Aufenthaltsdauern keinen relevanten Mehrwert, da hier auch bei höheren Leistungswerten nur sehr geringe Energiemengen in die Traktionsbatterie geladen werden können.

Abschließend wird festgehalten, welche Wendestellen sinnvollerweise mit Ladetechnik ausgestattet werden sollten, um ein maximal positives Ergebnis zu erzielen. In diesem Kontext wird ebenfalls erhoben, ob die bestimmten Wendestellen alternativlos sind, oder ob andere Wendestellen vergleichbare Mehrwerte als denkbare Ladepunkte erzeugen würden. Im zweiten Fall sind die Wendestellen als mögliche Ersatzstandorte voneinander gekennzeichnet.

Die Untersuchung zeigt dabei, dass mit insgesamt zehn Schnellladepunkten an Wendestellen sämtliche Umläufe mit aktueller Fahrzeugtechnik als machbar abbildbar sind. Pro Ladepunkt ist dafür eine Ladeleistung von 300 kW angesetzt. Betrachtet werden ausschließlich Wendezeiten mit mindestens 10 Minuten Aufenthalt, um eine praktische Realisierbarkeit zu gewährleisten. Für jeden Ladevorgang wird grundsätzlich eine 5-minütige Totzeit (Stillstand ohne Ladung) bilanziert, um Zeitverluste durch Verspätungen und ähnliches zu berücksichtigen.

Wie aus der folgenden Übersicht deutlich wird, sind sechs der zehn Ladepunkte alternativlos. Für vier Ladepunkte sind Ersatzstandorte denkbar.

<i>Initialer Standort</i>	<i>Erster Alternativstandort</i>	<i>Zweiter Alternativstandort</i>
Braunlager Straße	---	---
Cracau (Pechauer Platz)	---	---
Gr. Silberberg	---	---
IKEA West	---	---
Kastanienstraße	---	---
Messegelände/Bus	---	---
Ottweiler Straße	Buckau (Wasserwerk)	---
Diesdorf	Harsdorfer Platz	---
Olvenstedt (St.-Schütze-Platz)	Olvenstedt (Klusweg)	---
Olvenstedter Platz	Westerhüsen	Wissenschaftshafen

Tab. 11: Übersicht erforderliche Standorte und Standortalternativen für Gelegenheitsladung

Grundsätzlich gilt, wenn keiner der Standorte „pro Zeile“, also der initiale Standort beziehungsweise eine der Alternativmöglichkeiten, realisiert werden kann, dass die Machbarkeit sinkt und nicht mehr alle Umläufe als machbar bewertet werden können.

In diesem Kontext muss zwingend auch in Kontext genommen werden, dass die Ladepunkte nicht beliebig untereinander kombinierbar sind. Dies geht letztlich darauf zurück, dass die einzelnen potenziellen Ladestellen einerseits andere Umläufe „unterstützen“ und andererseits zu abweichenden Zeitpunkten dienlich sind. Selbst wenn ein Ladepunkt theoretisch lange Ladeintervalle für einen kritischen Umlauf ermöglicht, ist dies nur hilfreich, wenn der Energieeintrag zu einem sinnvollen Zeitpunkt erfolgen kann. Eine Nachladung zum Umlaufende ist beispielsweise überflüssig, wenn die Fahrzeugbatterie bereits vorher vollständig entladen wäre.

In der folgenden Darstellung sind die verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten aller Ladepunkte dargestellt (vertikal). Dabei werden die Alternativstandorte immer ersatzweise betrachtet. In der untersten Tabellenzeile ist aufgeführt, ob in der jeweiligen Kombination alle Umläufe als machbar bewertet werden können oder nicht.

Ladepunkt	Auswahl als Kombination von Ladepunkten																							
Braunlager Straße	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Cracau (Pechauer Platz)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Gr. Silberberg	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
IKEA West	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Kastanienstraße	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Messegelände/Bus	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Ottweiler Straße	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x												
Buckau (Wasserwerk)													x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Diesdorf	x	x	x	x	x	x							x	x	x	x	x	x						
Harsdorfer Platz							x	x	x	x	x	x							x	x	x	x	x	x
Olvenstedt (St.-Schütze-Platz)	x	x	x				x	x	x				x	x	x				x	x	x			
Olvenstedt (Klusweg)				x	x	x				x	x	x				x	x	x				x	x	x
Olvenstedter Platz	x			x			x			x			x			x			x			x		
Westerhüsen		x			x			x			x			x			x			x			x	
Wissenschaftshafen			x			x			x			x			x			x			x			x
Alle Umläufe machbar? (j = Ja, n = Nein)	j	j	j	j	n	j	j	n	j	n	n	n	j	j	j	j	n	j	j	n	j	n	n	n

Tab. 12: Mögliche Kombinationen von Ladepunkten für vollständige Machbarkeit (BEV-Gelegenheitslader)

Der einzelne Midibus-Umlauf steht auch hier außerhalb des Fokus. Analog zu dem FCEV und BZ-REX Modellen scheitert die Machbarkeit nominell am nicht vorhandenen Marktangebot. Da der Midibus-Umlauf im BEV-Depotlader Modell jedoch als unkritisch bewertet wird, ist ein Nachladen auf Linie hier obsolet. Das Fahrzeug kann, bei Verfolgung eines Gelegenheitsladeransatzes, unproblematisch als BEV-Depotlader umgestellt werden.

2.3 Umlaufanalyse – Fahrzeugtagesumläufe

Fahrzeugtagesumläufe bilden das vollständige Bewegungsprofil eines Fahrzeuges im betrachteten Betriebstag ab. Dabei gilt, dass ein Fahrzeug grundsätzlich mehrere Einzelumläufe an einem Tag absolvieren kann. Abhängig von der eingesetzten Antriebstechnik kann die Energiezuführung zwischen den Einzelumläufen erforderlich sein, was sich wiederum auf die Machbarkeit oder die benötigte Fahrzeugmenge (Fahrzeugmehrbedarfe) auswirken kann (Vgl. auch Kapitel 2.1.2).

Die Ergebnisse der Fahrzeugtagesumlaufanalyse werden tabellarisch dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Werteangaben hier Fahrzeugmengen und nicht Anzahlen von Einzelumläufen repräsentieren.

2.3.1 Umlaufverkettung

Die Auswirkung der Umlaufverkettung ist im Anwendungsfall überschaubar, da die meisten beigestellten Einzelumläufe bereits Fahrzeugtagesumläufen entsprechen. Lediglich in Einzelfällen können Umläufe verkettet werden.

Dabei gilt grundsätzlich, dass über die Umlaufverkettungen keine Fahrzeugmehrbedarfe ausgelöst werden. Sowohl in BEV- als auch in FCEV-Technik können die Einzelumläufe so kombiniert werden, dass die Fahrzeugmenge dem Dieselreferenzmodell entspricht. Das Dieselreferenzmodell wird dabei nach derselben Verkettungsmethodik berechnet wie die Modelle mit alternativen Antrieben. Im Gegensatz zu emissionsfreien Antrieben kann hier jedoch unterstellt werden, dass die Tankgröße in jedem Fall ausreichend ist, um mehrere Einzelumläufe nacheinander zu absolvieren. Für das Dieselreferenzmodell muss also keine Tankzeit zwischen den Einzelumläufen gewährleistet sein.

Auch wenn die Umlaufverkettung keine Fahrzeugmehrbedarfe auslöst, ist ein Einfluss auf die Machbarkeit für die BEV-Technik nicht ausgeschlossen. Im Zuge der technischen Entwicklung sinkt der Nachladebedarf zwischen Einzelumläufen. Mit steigender Batteriekapazität steht den Fahrzeugen eine größere Energiemenge zur Verfügung, die über den Betriebstag genutzt werden kann. Entsprechend fällt die Menge zuzuführender Energie, um den Folgeumlauf absolvieren zu können. Über die Zeitachse kann die Menge machbarer Fahrzeugtageeinsätze anwachsen.

Beispiel: Zwei Einzelumläufe erfordern jeweils 200 kWh elektrische Energie. Zwischen den Umläufen können 75 kWh nachgeladen werden. Bei einer 300 kWh Batterie wäre die Kombination nicht machbar. Nach dem ersten Umlauf kann der Ladestand der Batterie von 100 kWh auf 175 kWh angehoben werden, was für den zweiten Einzelumlauf nicht ausreicht. Wird hingegen eine 350 kWh Batterie angenommen, kann der Ladestand nach dem ersten Umlauf von 150 kWh auf 225 kWh angehoben werden, was für den Folgeumlauf ausreicht.

2.3.2 Direktes Einsatzpotenzial

Als direktes Einsatzpotenzial werden Fahrzeugtageinsätze bezeichnet, die im „Eins-zu-Ein-Ersatz“ auf die jeweilige Technologie umgestellt werden können. Abgesehen von der Bereitstellung adäquater Lade- oder Tankinfrastruktur sind keine Zusatzmaßnahmen wie Umlaufanpassung oder ähnliches erforderlich. Ziel der Übersicht ist aufzuzeigen, welche Fahrzeugmengen mit minimalem Aufwand dekarbonisiert werden können. Über Umlaufanpassungen kann das Einsatzpotenzial weiter gesteigert werden, wobei Mehraufwendungen zu tragen sind. Entsprechendes wird im Verlauf des Dokuments untersucht und diskutiert.

Das direkte Einsatzpotenzial wird hier tabellarisch dargestellt. Aufgrund dem technischen Entwicklungspotenzial für Batterietechnik, enthält die Tabelle eine Zeitachse entsprechend den Zeitpunkten der Entwicklungsprognose. Die Zeitachse ist hier ausschließlich für BEV mit Depotladung relevant. Für FCEV wird das Entwicklungspotenzial als nicht ausreichend belastbar eingeschätzt, um dies als Bewertungsgrundlage heranzuziehen. Gleichzeitig sind die Einsatzpotenziale ausreichend hoch, so dass eine überlagerte technische Entwicklung nur marginalen Einfluss hätte. Gleiches gilt auch für BZ-REX, wobei die Entwicklung aufgrund der Produktneuheit und dem entsprechend kleinen Marktangebot heute nicht prognostiziert werden kann. Für BEV mit Gelegenheitsladung kann die Entwicklungsprognose zwar gut hergeleitet werden. Jedoch ist die Entwicklung aufgrund der Aufgabenstellung irrelevant. Für das Antriebsmodell können bereits heute alle Umläufe als machbar bewertet werden (außer Midibusse aufgrund des Marktangebots), so dass die Entwicklung hier die Machbarkeit nicht weiter steigern kann.

Anmerkung

Anwachsende Batteriekapazitäten können im Modell BEV-Depotlader bei schrittweiser Systemumstellung dennoch einen Vorteil darstellen. Abhängig von Entwicklung und Beschaffungsplan ist es möglich, dass der Nachladebedarf sinkt, da mit größeren Batterien mehr Energie für den Umlauf „mitgeführt“ werden kann. Es ist grundsätzlich möglich, dass mit weiter entwickelten Batterien die Anzahl der notwendigen Ladepunkte reduziert werden kann. Eine entsprechende Prüfung müsste im Rahmen einer Detailuntersuchung angesiedelt werden.

Der Übersicht halber sind in der folgenden Tabelle BEV-Depotlader als BEV-D und BEV-Gelegenheitslader als BEV-G abgekürzt.

Oberleitungsbusse sind nicht in der folgenden Darstellung aufgeführt. Unabhängig von der genauen Ausführung als O-Bus oder Duo-Bus (ohne oder mit Traktionsbatterie), muss das Oberleitungsnetz so ausgelegt werden, dass die Energiezuführung im ausreichenden Maß gesichert ist. Entsprechend sind hier alle Fahrzeugeinsätze per Definition machbar, sofern ein entsprechendes Marktangebot abgerufen werden kann. Für Oberleitungsbusse liegt in Bezug auf Midibusse die aus anderen Antriebstechniken bekannte Einschränkung ebenfalls vor: Für Midibusse existiert kein adäquates Marktangebot, so dass dieser Fahrzeugtyp hier als nicht machbar klassifiziert wird. In Summe entsprechend die Angaben zu BEV-Gelegenheitsladern aufgrund der vergleichbaren Randbedingung (Ladeinfrastruktur im ausreichenden Maß für Vollumstellung vorhanden) exakt den Werten, die für Oberleitungsbusse gelten.

Direktes Einsatzpotenzial im Vergleich													
	Technik	Anzahl Umläufe	Anzahl Diesel	Heute		ab 2028		ab 2033		ab 2038		Langfristig kritisch	
Solobus (≈12 m)	BEV-D	19 Umläufe	17 Busse	8	47%	12	71%	15	88%	17	100%	0	0%
	BEV-G			17	100%	17	100%	17	100%	17	100%	0	0%
	FCEV			17	100%	17	100%	17	100%	17	100%	0	0%
	BZ-REX			17	100%	17	100%	17	100%	17	100%	0	0%
Gelenkbus (≈18 m)	BEV-D	30 Umläufe	28 Busse	10	36%	13	46%	23	82%	23	82%	5	18%
	BEV-G			28	100%	28	100%	28	100%	28	100%	0	0%
	FCEV			27	96%	27	96%	27	96%	27	96%	1	4%
	BZ-REX			27	96%	27	96%	27	96%	27	96%	1	4%
Midibus (≈9 m)	BEV-D	1 Umlauf	1 Bus	1	100%	1	100%	1	100%	1	100%	0	0%
	BEV-G			0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	1	100%
	FCEV			0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	1	100%
	BZ-REX			0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	1	100%

Abb. 49: Direktes Einsatzpotenzial im Vergleich für relevante Antriebsvarianten

Aus der Gegenüberstellung wird deutlich, dass BEV-Depotlader hier die kleinsten Machbarkeitsquoten aufweisen, was auf die Reichweitevorteile der Alternativtechniken, beziehungsweise die Energiezuführung auf Linie, zurückgeht. Gleichzeitig wird deutlich, dass sich die Ergebnisse über die Zeitachse nahezu auf ein gleiches Niveau einpendeln. Dennoch ist das direkte Einsatzpotenzial für BEV-Depotlader bereits mit heutiger Technik ausreichend, um die verpflichtenden CVD-Quoten zu erfüllen.

Über Umlaufanpassungen kann die technische Machbarkeit gesteigert werden, indem Mehraufwendungen in Kauf genommen werden. Mehraufwendungen sind hier üblicherweise auf zusätzliche Fahrstrecken (inkl. Personalaufwand) begrenzt. In Einzelfällen kann eine Erhöhung der Fahrzeugflotte erforderlich sein (Fahrzeugmehrbedarf).

Im Verlauf der Untersuchung werden Auswirkung und Mehraufwendungen für die Umlaufanpassungen in den Auswahlprozess einer Technologieempfehlung eingebunden. Sofern dadurch die technische Machbarkeit auf das Niveau der Alternativtechniken angehoben werden kann, muss abschließend kommerziell bewertet werden, welche Herangehensweise die übergeordneten Ziele (emissionsfreie Teilflotte) am wirtschaftlichsten erfüllt.

2.3.3 BEV-Depotlader: Ladeintervalle im Kontext der Aufenthaltsdauer über Nacht

In den folgenden Unterkapiteln wird unter anderem untersucht, ob ein Fahrzeugmehrbedarf aufgrund erforderlicher Umlaufanpassungen wahrscheinlich ist. Fahrzeugmehrbedarfe können jedoch auch über die Aufenthaltsdauer über Nacht im Kontext der Ladedauer ausgelöst werden.

Wenn die planmäßige Aufenthaltszeit nicht ausreicht, um die während des Einsatzes entladene Energie nachzuladen, muss ein Zusatzfahrzeug eingesetzt werden, um den Einsatz am Folgetag zu übernehmen.

Die Korrelation zwischen Aufenthalt und Ladedauer wurde für alle Alternativen mit externer Batterieladung untersucht (BEV-Depot- und Gelegenheitslader, sowie BZ-REX). Aufgrund der Energiezuführung während des Einsatzes (Zwischenladen), können die verbleibenden Ladebedarfe für BEV-Gelegenheitslader unproblematisch in den gegebenen Aufenthaltsdauern nachgeladen werden.

Für BEV-Depotlader und BZ-REX liegen hingegen Ladezeitdefizite vor, die hier mit denkbaren Lösungsansätzen beleuchtet werden. In den folgenden Abbildungen werden die Zusammenhänge von Aufenthaltsdauer und Ladeintervall visualisiert. Pro Fahrzeug ist die nächtliche Aufenthaltsdauer als grüner Balken dargestellt. Blau dargestellt sind Ladevorgänge, die innerhalb der Aufenthaltsdauer liegen. Rote Balken bilden hingegen Ladezeiten ab, die über die planmäßige Aufenthaltsdauer hinaus gehen.

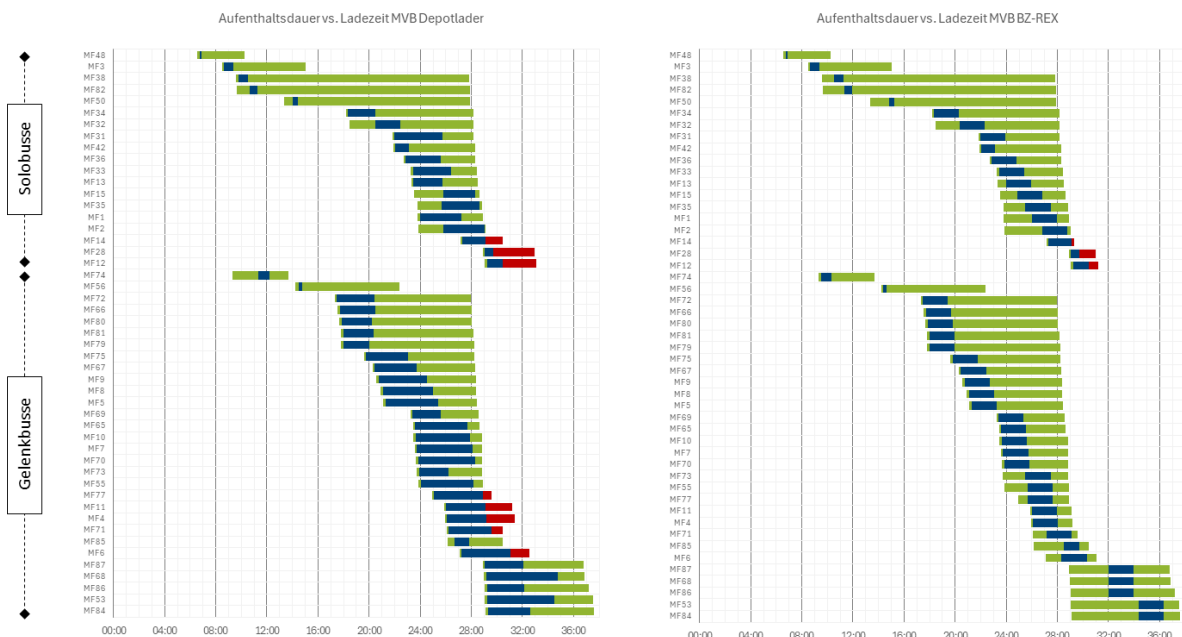


Abb. 50: Ladezeitdiagramm Status Quo (BEV-Depotlader und BZ-REX)

In Abb. 50 ist als Status Quo eine Umlaufzuordnung nach FIFO-Prinzip²² aufgeführt. Dabei wird angenommen, dass das erste einrückende Fahrzeug am Folgetag den ersten auslaufenden Umlauf übernimmt. Bei genauerer Betrachtung wird deutlich, dass die Ladevorgänge nicht immer

²² FIFO: First In First Out (engl.)

unmittelbar nach Ankunft im Depot beginnen (die blauen Balken liegen nicht immer ganz links in den grünen Balken). In der Darstellung wird auf optimierte Lastgänge zurückgegriffen, bei denen die Ladevorgänge nach Möglichkeit zeitlich versetzt wird. Dieser zeitliche Versatz ist hier irrelevant und wird in AP 3 im Kontext der Ladeinfrastruktur behandelt.

Im Status-Quo wird deutlich, dass für BEV-Depotlader in acht Fällen die planmäßige Aufenthaltsdauer nicht für die Nachladung der Batterien ausreicht. Auf der rechten Bildseite (BZ-REX) sind hingegen drei Fälle vorhanden, bei denen Ladezeit und Aufenthaltsdauer differieren.

Eine sinnvolle Gegenmaßnahme ist die einsatz- beziehungsweise energieverbrauchsorientierte Verkettung von Umläufen über Nacht. Dabei wird in Einzelfällen vom FIFO-Prinzip abgewichen, indem spät einrückenden Fahrzeuge mit großem Nachladebedarf möglichst späte Ausrückzeitpunkte am Folgetag zugeordnet werden. Fahrzeuge, die nach kurzen Umläufen mit einem geringen Nachladebedarf einlaufen, werden hingegen früheren Einsätzen zugeordnet.

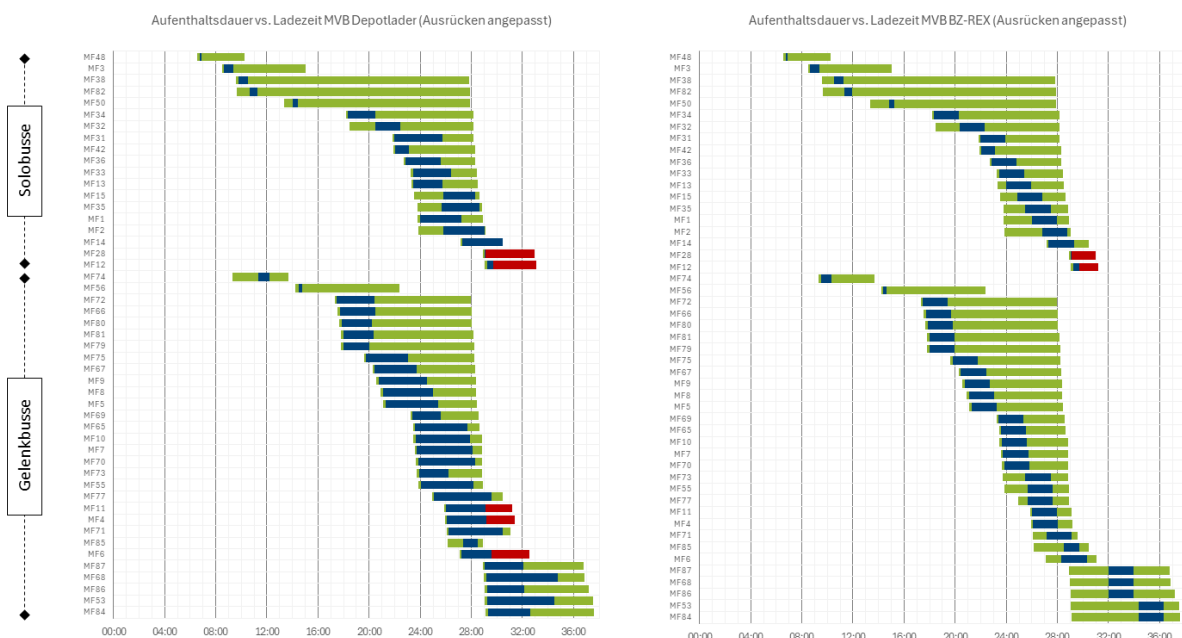


Abb. 51: Ladezeitdiagramm bei angepasster Abfahrtsreihenfolge (BEV-Depotlader und BZ-REX)

Wie aus der Darstellung mit geänderter Abfahrtsreihenfolge ersichtlich wird, sind die Verbesserungspotenziale einer Neuordnung der Abfahrtszeitpunkte begrenzt. Dennoch können relevante Mehrwerte erzeugt werden, insbesondere da die Neuverkettung nur eine administrative Änderung bedeutet und kostenneutral ausführbar ist. Nach entsprechender Anpassung können die defizitären Ladevorgänge für Depotlader auf 5 (-3) und für BZ-REX auf 2 (-1) reduziert werden.

Eine weitere Stellgröße bietet hier die Umlaufanpassung. Im Rahmen der Umlaufanpassung werden lange Umläufe aufgetrennt und neu kombiniert. Einrück- und Ausrückzeitpunkt sind von der Anpassung nicht betroffen, so dass die Anwesenheitszeit konstant bleibt. Aufgrund der Umlaufverkürzung wird jedoch weniger Energie im Einsatz „verbraucht“, weshalb Ladedefizit und damit auch die Ladezeit verkleinert werden.

Aufenthaltsdauer vs. Ladezeit MVB Depotlader (nach Umlaufanpassung)

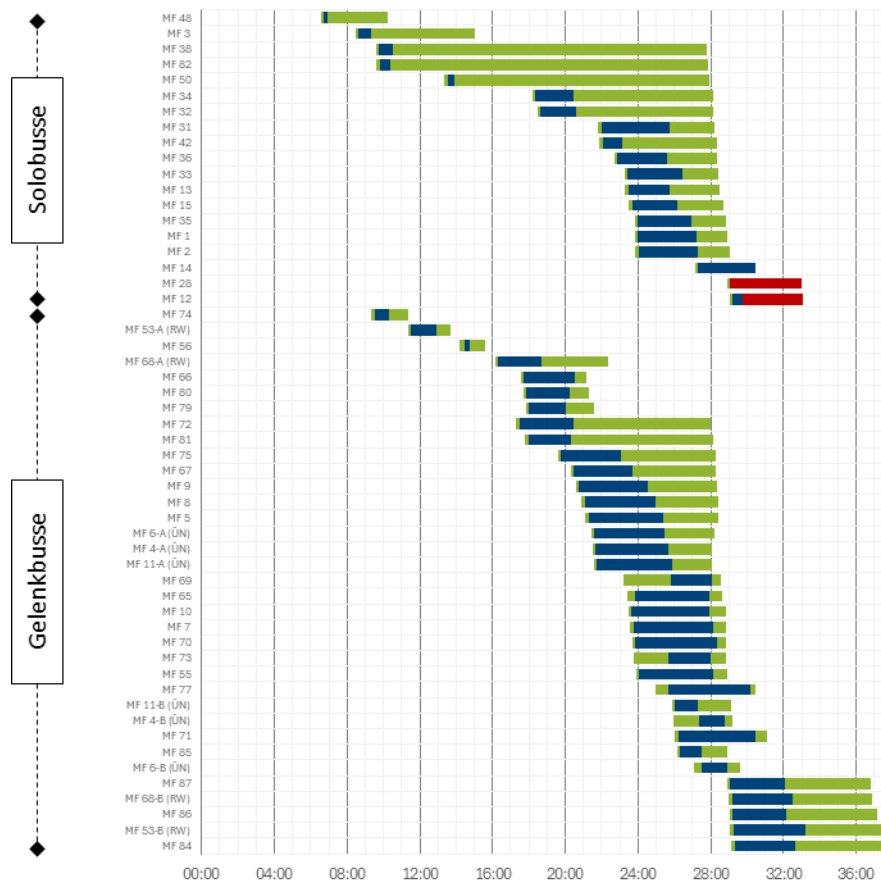


Abb. 52: Ladezeitdiagramm nach Umlaufanpassung (BEV-Depotlader exemplarisch)

Nach Umlaufanpassung verbleiben hier zwei defizitäre Einsätze beziehungsweise Ladeintervalle. Diese sind für BEV-Depotlader und BZ-REX identisch, weshalb in der Grafik exemplarisch nur BEV-Depotlader dargestellt sind. Eine Umlaufanpassung ist hier nicht zielführend, da die Aufenthaltsdauer sehr kurz ist. Um ein Einrücken mit ausreichend geringem Ladedefizit zu ermöglichen, müssten die entsprechenden Umläufe mehrfach gebrochen werden. Hier erscheint es sinnvoller, einen Fahrzeugwechsel über die Reserveflotte auszuführen. Dabei wird das Fahrzeug nach dem Einrücken vollgeladen und der Reserveflotte zugeordnet. Wenn Ladepunkte in der Werkstatt vorhanden sind, kann die Ladung parallel zu Wartungsmaßnahmen erfolgen, sofern diese nicht das Hochvoltssystem betreffen.

Aufgrund der laut Fahrzeugliste sehr großzügigen Solobus-Reserveflotte (ca. 15 Reservebusse) wird die Nutzung der Fahrzeugreserve für diesen Sonderfall als unkritisch eingeschätzt. Alternativ können grundsätzlich dedizierte Zusatzbusse beschafft werden.

2.3.4 Umlaufanpassung

Auch wenn für BEV-Depotlader die direkten Einsatzpotenziale heute kleiner ausfallen als für die Alternativtechniken, sind die Machbarkeitsquoten mehr als ausreichend, um die CVD-Quoten problemlos zu erfüllen. In Summe sind bereits heute 19 von 46 Fahrzeugen der Einsatzflotte direkt umstellbar, was einer Machbarkeitsquote von ca. 41 % entspricht. Mit ab 2028 antizipierter Technik steigt der Wert auf 26 von 46 Fahrzeugen (57 %).

Da die Quotenvorgaben von 22,5 %, respektive 32,5 % (ab 2026), nur auf die Fahrzeugneubeschaffungen anzuwenden sind, wäre es möglich, heute die gesamte Flotte neu zu beschaffen und dabei die Quotenvorgaben problemlos zu erfüllen. Die Umlaufanpassung ist also nicht erforderlich, um ausreichende ‚machbare‘ Fahrzeugmengen zur Realisierung eines Beschaffungsplanes zu erzeugen, sondern um langfristig kritische Umläufe zu kompensieren. Auch wenn deren Umstellungen auf absehbare Zeit nicht zwingend zur Debatte stehen, sollte im Rahmen einer Vorzugstechnologieauswahl der damit verbundene Aufwand berücksichtigt werden.

Die Diskussion der Umlaufanpassung²³ erfolgt hier primär auf BEV ausgerichtet, da hier der Anpassungsaufwand am höchsten ist. Dennoch müssen die Anpassungen für alle Antriebsvarianten ausgeführt werden, bei denen mindestens ein Umlauf als langfristig kritisch bewertet wurde. Die resultierenden Mehraufwendungen sind abschließend für alle betroffenen Fahrzeugtypen, BEV-Depotlader, FCEV und BZ-REX, zusammengefasst.

Nach ausgeführter Umlaufanpassung ergibt sich ein deutlich verbessertes Bewertungsbild. Eine weitere kurzfristige Verbesserung (Erhöhung der z. B. „ab 2028“ machbaren Fahrzeuge) ist grundsätzlich möglich, indem eine tiefergehende Umlaufanpassung ausgeführt wurde. Dabei muss eine weitere Erhöhung der Mehraufwendungen jedoch in Kauf genommen werden. Da die Umstellungsszenarien mit den gegebenen Ergebnissen bereits unkritisch sind, werden hier ausschließlich langfristig kritische Umläufe angepasst.

Einsatzpotenzial BEV-Depotlader nach Umlaufanpassung												
Fahrzeugtyp	Anzahl Umläufe	Anzahl Diesel	Heute		ab 2028		ab 2033		ab 2038		Langfristig kritisch	
Solobus	19	17	8	47%	12	71%	15	88%	17	100%	0	0%
Gelenkbus	35 (+5)	28	10 (+0)	36%	14 (+1)	54%	28 (+5)	100%	28 (+5)	100%	0	0%
Midibus	1	1	1	100%	1	100%	1	100%	1	100%	0	0%
Summe	1	46	19	41%	28	61%	44	96%	46	100%	0	0%

In Klammern dargestellt sind die Änderungen gegenüber dem direkten Einsatzpotenzial. Da die langfristig kritischen Umläufe nur bei Gelenkbussen auftreten, sind hier die Änderungen auf diesen Fahrzeugtyp begrenzt. In der Tabelle sind die Auswirkungen dargestellt, die sowohl auf die Anpassung aus Reichweitengründen (langfristig kritische Umläufe) als auch auf die Anpassung für

²³ Für die Herangehensweise der Umlaufanpassung Vgl. Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**

die Nachladung über Nacht zurückgehen. Grund hierfür ist, dass die über Nacht anpassbaren Umläufe gleichzeitig reichweitenkritische Umläufe sind.

Um die Umlaufanpassung auszuführen, sind zusätzliche Transferfahrten erforderlich, die sich mindestens als zusätzliche Fahrleistung und Personalaufwand niederschlagen. Da hier die Anforderung nicht nur auf langfristig kritische Umläufe, sondern auch auf Anpassungsmaßnahmen für die Nachladung über Nacht zurückgehen, sind die Mehraufwendungen hinsichtlich der Ursache aufgeteilt.

Sofern mit der Umlaufanpassung primär die Nachladeintervalle über Nacht adressiert werden sollen, muss folgender Mehraufwand getragen werden. Von Besonderheit ist hier der notierte Fahrzeugmehrbedarf. Sofern die Reserveflotte, wie angenommen, genutzt werden kann, um einen Fahrzeugwechsel über Nacht zu ermöglichen, entfällt der Mehrbedarf. Um dies zu verdeutlichen, ist der Eintrag in Klammern gesetzt. Da die angepassten Umläufe gleichzeitig auch „langfristig kritische Umläufe“ darstellen, müssen die Fahrstrecken und Personalaufwendungen dennoch getragen werden, wenn langfristig eine Vollumstellung angestrebt wird. Als zusätzlicher Personalaufwand ist hier die abgeschätzte Einsatzzeit aufgeführt. Dies beinhaltet die Transferzeit für Hin- und Rückweg, sowie eine zehnminütige Wartezeit am Ablöseort, um den Ablösebus vor Ankunft des abzulösenden Busses bereitzustellen.

Aufwendung	Anpassungsaufwand pro Antriebsvariante			
	BEV Depotlader	BEV Zwischenlader	FCEV	BZ-REX
Fahrzeugmehrbedarf	(+2 x Solobus)	---	---	(+2 x Solobus)
Zusätzlicher Personalaufwand	1 h 38 m	---	---	---
Zusätzliche Transferstrecke	34 km	---	---	---

*Tab. 13: Mehraufwendungen aufgrund Umlaufanpassung
(hier ausschließlich zur Optimierung der Aufenthaltsdauern über Nacht für ausreichende Ladeintervalle)*

Sofern die Umlaufanpassung darauf ausgerichtet wird, langfristig eine Flottenvollumstellung zu ermöglichen, müssen in Summe die folgenden Mehraufwendungen getragen werden. Die Anpassungen, um Ladeintervalle über Nacht zu optimieren sind dabei inkludiert. Lediglich der Fahrzeugmehrbedarf von +2 Solobussen kann hinzukommen, wenn die Reserveflotte nicht wie beschrieben zum Fahrzeugwechsel genutzt werden kann.

Aufwendung	Anpassungsaufwand pro Antriebsvariante			
	BEV Depotlader	BEV Zwischenlader	FCEV	BZ-REX
Fahrzeugmehrbedarf	---	---	---	---
Zusätzlicher Personalaufwand	2 h 52 m	---	0 h 44 m	0 h 44 m
Zusätzliche Transferstrecke	58 km	---	16 km	16 km
Besonderheiten	Ggf. 2 x zus. Solobusse erforderlich für Ladung über Nacht	10 x 300 kW Ladepunkte im Liniennetz	---	---

Tab. 14: Mehraufwendungen aufgrund Umlaufanpassung für alle langfristig kritischen Umläufe

3 AP 3 Ermittlung der Voraussetzungen für den Einsatz von Bussen mit alternativen Antrieben im Linienverkehr

Im dritten Arbeitspaket werden, mit Fokus auf Infrastruktur, die Voraussetzungen für den Einsatz alternativ angetriebener Fahrzeuge untersucht. Elektrische Ladeinfrastruktur wird hier ergänzend einer Lastgangoptimierung unterzogen, da dies letztlich Einfluss auf den Konzeptentwurf haben kann.

3.1 Methodik

3.1.1 Lastgangoptimierung

Als Lastgang wird hier die Netzlast bezeichnet, die sich am Versorgungsnetz aus der Summe aller einzelnen Ladevorgänge über der Zeitachse ergibt. Im Rahmen der Optimierung wird die Funktion eines Lademanagementsystems nachgebildet, das die Lastspitzen auf ein Minimum reduzieren soll.

Im ungesteuerten System beginnen Ladevorgänge unmittelbar nach Ankunft der Fahrzeuge und Schließen des Ladekontakts. Parallel ausgeführte Ladevorgänge summieren sich dabei zu einer steigenden Netzlast auf. Die Reduktion der Netzlast auf ein Minimum ist erforderlich, um die tatsächlich erforderliche Netzanschlusskapazität zu ermitteln und Netzanschlusskomponenten entsprechend zu dimensionieren.

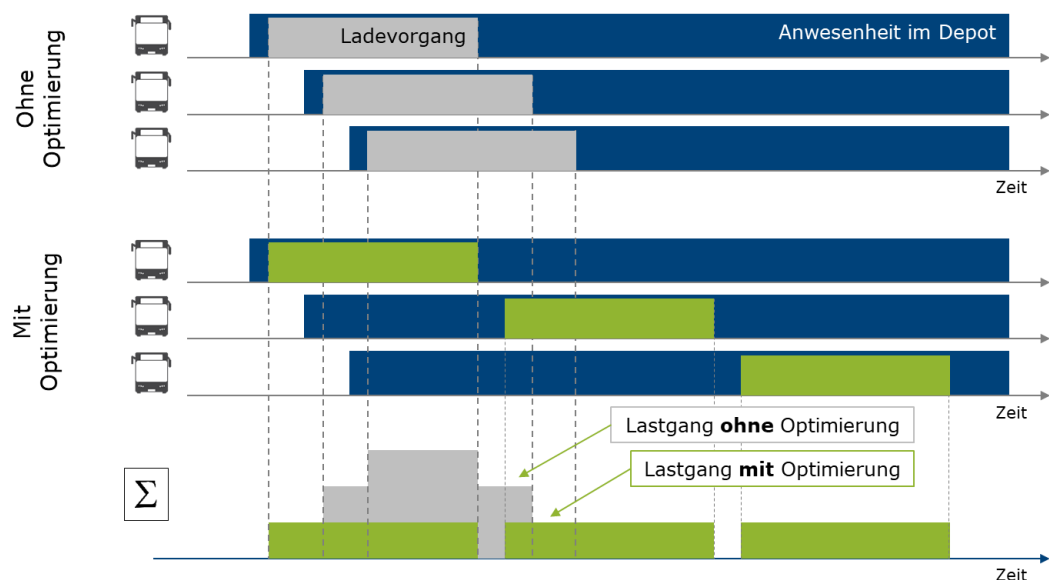


Abb. 53: Prinzip Lastgangoptimierung

Die Lastgangoptimierung bildet das Systemverhalten eines Lademanagementsystems nach, indem Ladevorgänge zeitlich optimiert gegeneinander versetzt werden. Teilweise wirken Lademanagementsysteme derart, dass Ladevorgänge nicht verschoben, sondern die Leistung pro Ladevorgang reduziert wird. In dieser Optimierung laufen viele Ladevorgänge bei geringer Last parallel.

Hier wird ein sukzessiver Ansatz verfolgt, bei dem die Ladeleistung über den gesamten Ladevorgang auf Nennleistung bleibt. Da die angesetzte Ladeleistung (150 kW) bezogen auf übliche Batteriekapazitäten einer C-Rate von deutlich unter 0,5 entspricht, muss keine erhöhte Batteriealterung gegenüber dem parallelen Ansatz befürchtet werden. Gleichzeitig hat der Ansatz den Vorteil, dass Ladevorgänge möglichst schnell abgeschlossen werden und Fahrzeuge früh wieder zur Verfügung stehen (z.B. für ungeplante Einsätze).

Im Rahmen der Untersuchung werden die folgenden Parameter und Eigenschaften als Berechnungsgrundlage herangezogen.

3.1.2 Berechnungsgrundlagen und Prämissen

Betrachtungsszenario

Zugrunde gelegt wird hier der Wechsel zwischen zwei Werktagen in einer Schulwoche. Für die Lastgangoptimierung und die darauf aufbauende Konzeptentwicklung für elektrische Ladeinfrastruktur wird grundsätzlich eine Vollumstellung der aktuellen Flotte angenommen. Der Status Quo wird dabei durch die beigestellten Umlaufdaten beschrieben. Die Differenz zwischen Einsatzflotte (Teilflotte, die zur Bedienung aller Umläufe erforderlich ist) und der Angabe in der Fahrzeugliste wird als Reserveflotte im Rahmen der Betriebshofintegration berücksichtigt. Dabei gilt, dass Reservebusse selbstverständlich an die Ladeinfrastruktur angebunden werden, hier aber keine Energiemengen bezogen werden. Die Fahrleistung, die ausschließlich über die Einsatzflotte erbracht wird, erzeugt den Ladebedarf im Ladesystem.

3.1.3 Modulbaukasten

Ladetechnik

Zugrunde gelegt wird eine marktübliche Depot-Ladeinfrastruktur mit CCS 2 Ladestecker.

Aufgrund der Strombegrenzung auf maximal 200 A (Ladestecker und Ladekabel ungekühlt) und einer typischen Batteriespannung von 750 V wird der Ladeleistungswert als Produkt beider Faktoren mit 150 kW berechnet. Die Ladeleistung wird während des Ladevorgangs mit 150 kW als konstant angenommen. Dieser Wert entspricht einem üblichen Standardwert für Batteriebusse mit CCS-Ladeschnittstelle.

Auch wenn die Ladeleistung an der CCS-Ladeschnittstelle orientiert ist, ist der Modellansatz schnittstellenunabhängig. Pantographensysteme erlauben zwar höhere Leistungswerte, jedoch sind höhere Ladeleistungen im Depot in der Regel nicht erforderlich.

Für das Ladesystem wird ein Gesamtwirkungsgrad von 90 % angesetzt.

Leistungsmodul

Das Leistungsmodul stellt die kleinste Baugruppe des dargestellten Konzepts dar. Wir gehen hier von einem 50 kW Leistungsmodul aus. Dabei wird empfohlen, in der Praxis nach Möglichkeit eine kleinere Größe zu wählen, um Konflikte mit Vorkonditionierungsvorgängen zu minimieren.

Die Ausführung kann dabei, zum Beispiel als 2x25 kW Modul erfolgen. Alternative Ausführungen sind gleichwertig, sofern eine Schrittweite der Leistungsverteilung von ca. 20 kW erreicht wird. Dabei ist es unerheblich, ob für ein 200 kW System vier 2x25 kW Module, zehn 20 kW Module oder zwanzig 10 kW Module verbaut werden.

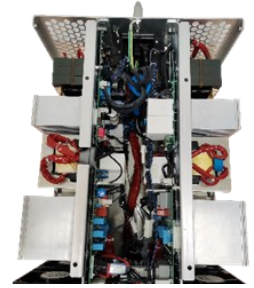


Abb. 54: Leistungsmodul

Das Leistungsmodul sollte ausgangsseitig mindestens einen Spannungsbereich zwischen 300 und 900 V (U_{DC}) abdecken und mindestens einen maximalen Ausgangsstrom von 35 A (bei 25 kW Leistung) ermöglichen. Das Leistungsmodul sollte außerdem über eine Schnellmontage-einrichtung, zum Beispiel als Einschubsystem, verfügen und innerhalb von wenigen Minuten austauschbar sein, um Stillstandszeiten zu minimieren.

Verschaltungsmodul

Unter dem Namen Verschaltungsmodul wird hier die Systemeinheit beschrieben, die die einzelnen Lademodule auf mehrere Ausgänge (Ladeschnittstelle) verschalten kann. Für die Systemauslegung sind zwei Varianten angenommen: Für 4 oder 8 Ladepunkte.

Dabei gilt, dass das Verschaltungsmodul alle Leistungsmodule einer Systemeinheit (LIS-Einheit) auf alle Ausgänge verschalten kann. Dabei müssen mindestens 150 kW am Ausgang realisierbar sein (3 Module). Die Verschaltungsmodule müssen geeignet sein, mindestens folgende Systemleistungen als LIS-Einheit zu verarbeiten:

- Variante mit 8 Ladepunkten: Mindestens für bis zu 600 kW
- Variante mit 4 Ladepunkten: Mindestens für bis zu 400 kW

3.1.4 Grafische Darstellungen

Lastgang

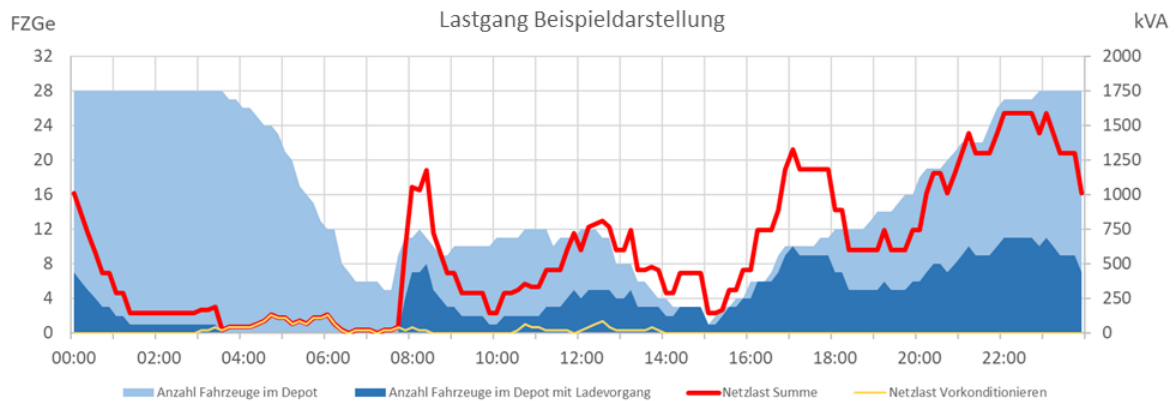


Abb. 55: Darstellung Lastgang

In der Lastganggrafik sind vier Werteverläufe abgebildet. An der linken Y-Achse sind die Fahrzeugzahlen aufgezeichnet, die als ausgefüllte blaue Kurven in der Grafik aufgeführt sind. In hellblau ist die Anzahl der im Depot anwesenden Fahrzeuge dargestellt. Maßgeblich ist hier die Anzahl der für den Betrieb genutzten Fahrzeuge (Einsatzflotte). Reservefahrzeuge und ähnliches werden vernachlässigt, da diese als ‚stehende‘ Fahrzeuge keinen Ladebedarf aufweisen. In dunkelblau ist die Anzahl gleichzeitig ladender Fahrzeuge aufgeführt.

Der rote Liniengraph hat die größte Aussagekraft im Diagramm. Er stellt die am Netzanschlusspunkt resultierende Last dar. Die Netzlast ist in kVA als sogenannte Scheinleistung angegeben. Der höchste Punkt wird als Lastspitze bezeichnet. In Gelb ist die Netzlast aller Vorkonditionierungsvorgänge aufgeführt. Hierfür wird angenommen, dass das Fahrzeug 30 Minuten vor geplanter Abfahrt mit einer Leistung von 20 kW vorgeheizt wird. Der gelbe Graph ist ein Teil des roten Graphs.

Lastgänge werden hier üblicherweise in zwei Varianten dargestellt: In einer nicht optimierten und einer optimierten Variante, die als solche gekennzeichnet sind. Im Dokument sind auch leicht abweichende Lastgangdarstellungen aufgeführt, die nach demselben Prinzip aufgebaut sind.

Zeitangaben in Grafiken

Sofern eine Unterscheidung gegenüber dem Folgetag erforderlich ist, kann auch hier das 48 Stundenformat angesetzt werden, bei dem die Stunden des zweiten Tages zwischen 24:00 und 48:00 Uhr gezählt werden

3.2 Allgemeines

3.2.1 Grundlegende Voraussetzungen nach Themengebieten

Einleitend erfolgt eine allgemein gehaltene Gegenüberstellung der grundlegenden Antriebsvoraussetzung nach Themengebieten. Aus Übersichtsgründen erfolgt die Darstellung hier aufgeteilt in die Themengebiete.

Einleitend werden die technischen Voraussetzungen betrachtet, die aus der folgenden Tabelle hervorgehen.

<i>Technische Voraussetzungen</i>	
BEV Depotlader	- BEV Fahrzeuge - Elektrische Depotladeinfrastruktur
BEV Zwischenlader	- BEV Fahrzeuge mit Pantographenschnittstelle - Elektrische Depotladeinfrastruktur - Elektrische Ladeinfrastruktur auf Linie
FCEV	- FCEV Fahrzeuge - H₂ Tankanlage (externe Betankung nur für einzelne Busse realistisch, sofern Tankanlage nicht dediziert für ÖPNV)
BZ-REX	- BZ-REX Fahrzeuge - H₂ Tankanlage (externe Betankung nur für einzelne Busse realistisch, sofern Tankanlage nicht dediziert für ÖPNV) - Elektrische Depotladeinfrastruktur
O-Bus	- Oberleitungsbusse - Elektrische Depotladeinfrastruktur (nicht zwingend) - Oberleitungsnetz im Einsatzgebiet (Linienabdeckung ca. 50-70 %)

Tab. 15: Grundlegende Voraussetzungen: Technische Voraussetzungen

Technisch erforderlich sind, neben den Fahrzeugen selbst, die passende Ladeinfrastruktur, für die eine adäquate Versorgungssituation vorausgesetzt wird. Abhängig von den Antriebskomponenten sind elektrische Ladeinfrastrukturen oder Wasserstofftankinfrastrukturen erforderlich. Hybridsysteme (BZ-REX) erfordern den Einsatz beider Infrastrukturen. Dabei gilt allgemein, dass eine externe Wasserstoffbetankung nur für sehr kleine Fahrzeugflotten als realistisch eingeschätzt wird. Sofern keine Vorrangspuren für den ÖPNV dediziert eingeplant sind, die Tankstelle also über einen „ÖPNV-Bereich“ verfügt, wird es als kritisch eingeschätzt, die erforderliche Vorrangssituation für den ÖPNV zu gewährleisten. Zumindest ist eine genaue Absprache mit dem Tankstellenbetreiber erforderlich, um Energieträgerversorgung und Tankzeiträume für den ÖPNV im geeigneten Maß zur Verfügung zu stellen.

Im Feld der elektrischen Ladeinfrastruktur sind üblicherweise Depotladeinfrastrukturen erforderlich, wobei dies bei Oberleitungsbusen auch über eine direkte Anbindung an das Oberleitungsnetz im Betriebshof erfolgen kann. Außerhalb des Depots sind Schnellladesysteme für BEV-Zwischenlader erforderlich. Für Oberleitungsbusse muss (bei verbauter Traktionsbatterie) ein Teil des Linienweges mit Oberleitungen ausgestattet sein (Faustformel: mindestens 50-70 %).

<i>Betriebliche Voraussetzungen</i>	
BEV Depotlader	- Lademanagementsystem - Betriebshofmanagementsystem (optional) - Wartungspersonal für Elektroantriebe und Elektroinfrastruktur
BEV Zwischenlader	- Lademanagementsystem - Betriebshofmanagementsystem (optional) - Wartungspersonal für Elektroantriebe und Elektroinfrastruktur
FCEV	- Betriebshofmanagementsystem (optional) - Wartungspersonal für Elektroantriebe und Gasanlagen
BZ-REX	- Lademanagementsystem - Betriebshofmanagementsystem (optional) - Wartungspersonal für Elektroantriebe, Gasanlagen und Elektroinfrastruktur
O-Bus	- Lademanagementsystem - Betriebshofmanagementsystem (optional) - Wartungspersonal für Elektroantriebe und Oberleitungsnetz

Tab. 16: Grundlegende Voraussetzungen: Betriebliche Voraussetzungen

Die betrieblichen Voraussetzungen sind weitestgehend variantenunabhängig. Für Ansätze mit elektrischer Ladung (auch BZ-REX) sind Lademanagementsysteme grundsätzlich sinnvoll, um den Leistungsbezug zu steuern und optimieren. Entsprechende Systeme sind vielfach direkt über die Hersteller der Ladeinfrastruktur beziehbar und können schon für einstellige Flotten Mehrwerte erzielen. Bei größeren Flotten kann ein Betriebshofmanagementsystem sinnvoll sein, dass einen größeren Rahmen um das Lademanagement zieht. Dabei ist der Begriff Betriebshofmanagementsystem nicht klar definiert. Sinnvoll erscheinen Bestandteile wie eine automatisierte Stell- und Ladeplatzzuordnung (insbesondere bei Blockabstellung), automatisierte Fahrzeugdisposition und Werkstattplanung sowie ein betriebshofübergreifendes Energiemanagement, wenn vor Ort regenerativ Energie erzeugt wird.

Aufgrund der elektrischen Antriebstechnik in allen Antriebsvarianten ist entsprechend ausgerichtetes Wartungspersonal erforderlich, dass abhängig von den Serviceverträgen auch infrastrukturseitige Aufgaben übernehmen kann bzw. muss.

Im Hinblick auf die baulichen Voraussetzungen ist eine Trennlinie zwischen elektrischer Ladeinfrastruktur und Wasserstofftankinfrastruktur erkennbar. Selbstverständlich muss für beide Varianten die Versorgungssituation gesichert sein. Während dies für Wasserstoff eine logistische Fragestellung bedeutet (Anlieferung des Energieträgers kann teilweise täglich erforderlich sein), muss eine Stromversorgung für elektrische Ladeinfrastruktur baulich sichergestellt werden.

Darüber hinaus unterscheiden sich die Varianten baulich vordergründig hinsichtlich ihrer zentralen beziehungsweise dezentralen Bauweise. Elektrische Ladesysteme erfordern Bauräume an den Stellplätzen, um die Ladeschnittstellen dezentral über den Betriebshof zu verteilen. Die bauraumintensiveren Komponenten in Gehäusebauweise sind darüber hinaus ortsflexibel und können üblicherweise gut in Randbereiche ausgelagert werden. Dabei sollten die Komponenten im näheren Umkreis der Ladepunkte platziert werden, um Leitungsverluste klein zu halten (i.d.R. < 80 m).

Wasserstofftankstellen werden, wie konventionelle Tankanlagen, zentral aufgebaut und erfordern entsprechend zusammenhängende Bauflächen. Sofern entsprechende Flächen verfügbar sind, kann der Umbau örtlich begrenzt erfolgen, ohne die eigentliche Fahrzeugabstellung zu betreffen.

Außerhalb des Betriebshofs eingesetzte Ladeinfrastruktur erfordert ebenfalls entsprechende Bauflächen, die über die Grundstücksgrenzen der MVB hinausgehen. Für Zwischenlader-Ansätze müssen Schnellladesysteme an Wendestellen installiert werden, während für Oberleitungsbusse ein Großteil des Liniennetzes überbaut werden muss, was eine entsprechend großflächige Beeinträchtigung darstellt.

<i>Bauliche Voraussetzungen</i>	
BEV Depotlader	- Ausreichende elektrische Netzanbindung (im Depot) - Bauräume im Depot dezentral unmittelbar an allen Lade-Stellplätzen (geringe Grundfläche, Installation über den Fahrzeugen über Tragwerke möglich) - Bauräume im Depot für Großkomponenten im Umfeld der Stellplätze (ortsflexibel aufgrund Anbindung über Kabelstrecken)
BEV Zwischenlader	- Ausreichende elektrische Netzanbindung (im Depot und an Wendestellen mit Schnellladung) - Bauräume im Depot dezentral unmittelbar an allen Lade-Stellplätzen (geringe Grundfläche, Installation über den Fahrzeugen über Tragwerke möglich) - Bauräume im Depot für Großkomponenten im Umfeld der Stellplätze (ortsflexibel aufgrund Anbindung über Kabelstrecken) - Bauräume für Schnelllader inkl. Transformator an den ausgewählten Endstellen zur Nachladung
FCEV	- Größere Zusammenhängende Bauräume im Depot (oder unmittelbarer Umgebung) für Wasserstofftankanlage - Sicherstellung von Sicherheitsradien
BZ-REX	- Ausreichende elektrische Netzanbindung (im Depot) - Bauräume im Depot dezentral unmittelbar an allen Lade-Stellplätzen (geringe Grundfläche, Installation über den Fahrzeugen über Tragwerke möglich) - Bauräume im Depot für Großkomponenten im Umfeld der Stellplätze (ortsflexibel aufgrund Anbindung über Kabelstrecken) - Größere Zusammenhängende Bauräume im Depot (oder unmittelbarer Umgebung) für Wasserstofftankanlage - Sicherstellung von Sicherheitsradien
O-Bus	- Ausreichende elektrische Netzanbindung (im Depot) - Umfangreiche Bauräume für Oberleitungssysteme und Unterwerke im Liniennetz - Bauräume im Depot dezentral unmittelbar an allen Lade-Stellplätzen (Oberleitungssegmente am Ladeplatz)

Tab. 17: Grundlegende Voraussetzungen: Bauliche Voraussetzungen

Für Wasserstofftankanlagen sind darüber hinaus Sicherheitsradien zu beachten, die zu schützenswerten Einrichtungen (z.B. Wohnbebauung) einzuhalten sind.

Anmerkung

Brandschutzkonzepte (z.B. Brandschutzwände) müssen grundsätzlich in die Fahrzeugabstellung integriert werden, wenn entsprechende Maßnahmen verfolgt werden sollen. Da die Anforderung weder technisch begründet noch über Vorschriften definiert ist (Umbau bestehender Strukturen), wird der Aspekt hier losgelöst betrachtet. Abhängig von den Vorgaben und Planwerten (z.B. vom Versicherer) müssen geeignete Schutzmaßnahmen baulich integriert werden. Üblicherweise erfolgen die Vorgaben unabhängig von der eingesetzten emissionsfreien Antriebstechnik.

Die Vorhaltung eines Havarieplatzes kann grundsätzlich auch als bauliche Anforderung verstanden werden. Wir verfolgen jedoch die Ansicht, dass perspektivisch (bei anwachsender Elektromobilität) entsprechende Havarieplätze unabhängig von der Endanwendung vorgehalten werden sollten. Es erreicht sinnvoller, an zentralen Orten in der Gemeinde „allgemein nutzbare“ Havarieplätze vorzusehen, die beispielsweise an die lokale Feuerwehr angebunden sind, als eine Vielzahl an Havarieplätzen „pro Flotte“ in der Gemeinde zu unterhalten, die nur in Extremsituationen genutzt werden.

Die wirtschaftlichen Voraussetzungen können kurz darauf zusammengefasst werden, dass das Gesamtsystem langfristig finanzierbar sein muss. Dabei müssen letztlich, wie hier im Rahmen der wirtschaftlichen Analyse, die einzelnen Kostentreiber identifiziert und einander gegenübergestellt werden. Vereinfacht formuliert bedeuten reichweitenstärkere Antriebsalternativen typischerweise einen höheren Kostenaufwand. Für reichweitenschwächere Alternativen, mit geringeren Systemkosten, können hingegen Anpassungsaufwendungen erforderlich werden, wenn sehr anfordernde Einsätze elektrifiziert werden. Die Anpassungsaufwendungen schlagen sich dabei letztlich ebenfalls als Kostenwerte nieder. Wie im Folgenden ersichtlich wird, werden die Antriebsalternativen mit abweichenden Gesamtkostenprognosen bewertet, deren Finanzierung für die Realisierung erforderlich ist.

3.2.2 Jahresenergiebedarf

Während der Fokus im Rahmen des Dokuments üblicherweise auf Worst-Case Situationen liegt (Einsatz unter härtesten Bedingungen; „kalter Wintertag“), wird für die Abschätzung des Jahresenergiebedarfs ein ganzjährig ansetzbarer Durchschnittswert für die umgebungsabhängigen Verbrauchsparameter angesetzt. Beispielweise für Nebenverbraucherleistung aufgrund der Fahrzeugklimatisierung.

Anmerkung

Da der Jahresenergiebedarf beispielweise abhängig von zukünftigen Wetterverläufen und Umgebungstemperaturen ist, kann hier nur eine Abschätzung als prognostizierte Größe erfolgen.

Für die drei im Detail betrachteten Antriebsalternativen ergibt sich folgender Jahresenergiebedarf. Abhängig von der Antriebsstruktur ist elektrische Energie und/oder Wasserstoff als Energieträger erforderlich.

Energie / Energieträger	BEV	FCEV	BZ-REX
Elektrische Energie	6,1 GWh p.a.	---	4,3 GWh p.a.
Wasserstoff	---	381,9 t H ₂ p.a.	125,2 t H ₂ p.a.

Tab. 18: Jahresenergiebedarf pro Antriebsalternative

Abhängig vom Umstellungszeitpunkt können Umlaufanpassungen erforderlich sein, die aufgrund zusätzlicher Transferwege den Energiebedarf erhöhen. Da dies einerseits abhängig vom Umstellungspfad (und damit von der Notwendigkeit einer Umlaufanpassung) ist und andererseits ganzjährig nur einen geringen Einfluss auf die Energiemengen hat, wird hier die Berechnung auf den Status Quo – vor etwaiger Umlaufanpassung – gestützt, weshalb für beide BEV-Ansätze (Depot- und Zwischenladen) gleiche Verbrauchswerte abgeschätzt werden.

Einordnung der Energiemengen

Die Größenordnung des BEV-Szenarios entspricht etwa dem Energiebedarf von 1.500 Vierpersonenhaushalten (4.000 kWh pro Jahr und Einfamilienhaus).

Im FCEV-Szenario resultiert ein Durchschnittswert von über einer Tonne Wasserstoff pro Kalendertag. Gegenübergestellt mit marktüblichen Trailerkapazitäten entspricht dies bei Anlieferung von Flüssigwasserstoff (LH₂ mit ca. 3 t LH₂ pro Trailer) einer Energieträgeranlieferung an jedem dritten Tag. Gasförmig (GH₂ mit ca. 1 t GH₂ pro Trailer) liegt die Anlieferfrequenz etwa bei einer täglichen Anlieferung.

Im BZ-REX Ansatz sind sowohl elektrische Energie als auch Wasserstoff erforderlich. Der elektrische Energiebedarf entspricht dabei etwa dem Energiebedarf von 1.075 Vierpersonenhaushalten zuzüglich einer GH₂ Anlieferung an jedem dritten Tag. Bei den vergleichsweise geringen H₂ Mengen gegenüber dem FCEV-Szenario ist der Einsatz mit dem kostengünstigeren GH₂ ohne die höheren Aufwände für Logistik und Lagerung realistischer.

3.3 Elektrische Ladeinfrastruktur

Die Auslegung der elektrischen Ladeinfrastruktur erfolgt für die Vollumstellung. Angesetzt wird entsprechend das Umlaufszenario „nach Umlaufanpassung“ bei dem keine langfristig kritischen Umläufe zu verzeichnen sind und die Vollumstellung spätestens mit ab 2038²⁴ antizipierter Technik möglich ist.

Da im Verlauf der Untersuchung keine Motivatoren erkennbar sind, dass den Einsatz der BZ-REX Technik gegenüber BEV und FCEV klar ausweist, werden im Kontext der Infrastrukturbetrachtung die „Extremfälle“ BEV und FCEV bearbeitet, die jeweils die maximalen Anforderungen an das Lade- oder Tanksystem stellen. BZ-REX als Hybridkonzept aus beiden Welten rangiert infrastrukturell ebenfalls zwischen beiden Ansätzen.

3.3.1 Lastgangoptimierung

Ohne Optimierung, also ohne optimierenden Eingriff eines Lademanagementsystems, erfolgen Ladevorgänge unmittelbar nach Abstellung am Ladeplatz (Ankunft zzgl. Rangierintervall). Entsprechend sind in der Darstellung deutliche Lastspitzen zu erkennen, die in Stoßzeiten, bei denen viele Fahrzeuge einrücken, besonders ausgeprägt sind.

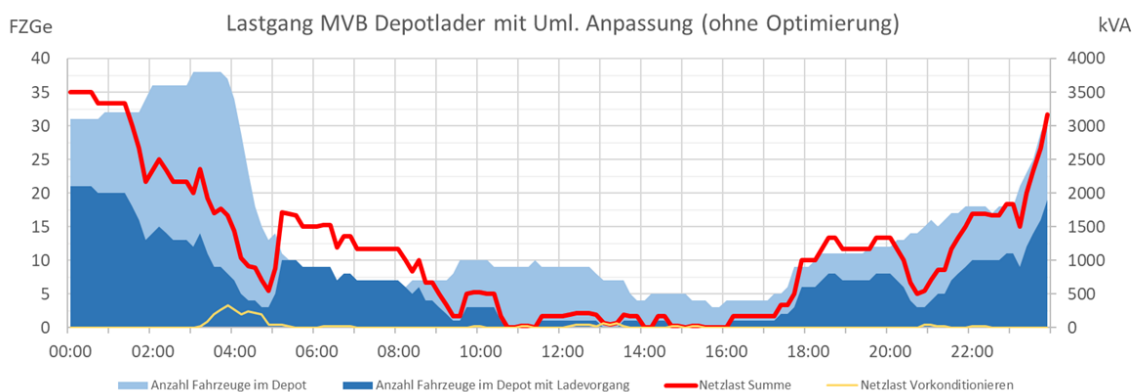


Abb. 56: Lastgang BEV-Depotlader – ohne Optimierung

Ohne Optimierung liegt die Lastspitze (etwa um Mitternacht) bei ca. 3.500 kVA. Aufgrund der begrenzten Aufenthaltsdauern sind die Spielräume für eine Lastoptimierung relativ eng. Dennoch kann die Lastspitze um etwa 19 % auf ca. 2.800 kVA reduziert werden. Qualitativ bleibt die Kurvenform nach Optimierung weitestgehend erhalten, was nicht zuletzt auf die Zwischenladungsvorgänge zurückgeht, bei denen vielfach große Anteile Aufenthaltsdauer als Ladezeit erforderlich sind. Über die Umlaufanpassung werden zusätzliche Zwischenladungsvorgänge erzeugt. Im Summe liegt die Tageslastspitze jedoch deutlich unter dem nächtlichen Peakwert, so dass die Zwischenladung insgesamt als unproblematisch eingeschätzt wird.

²⁴ Bis auf zwei Solobusse werden alle weiteren Einsätze spätestens mit ab 2033 antizipierter Technik als machbar eingeschätzt.

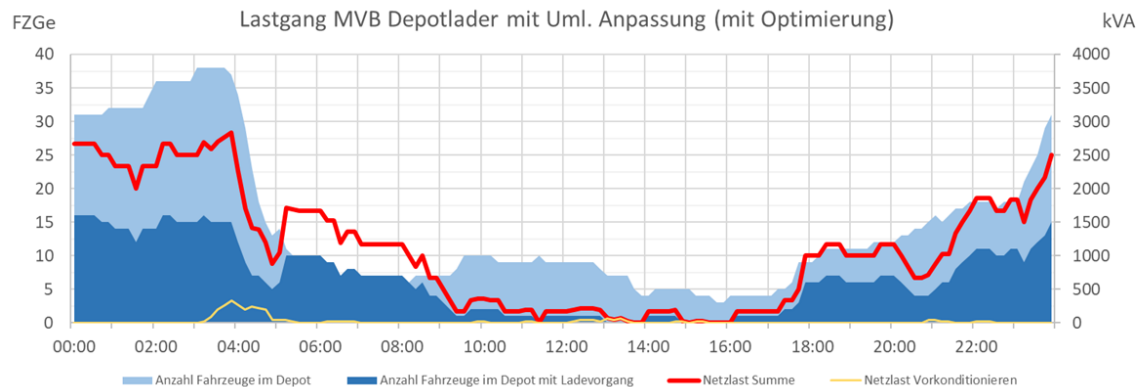


Abb. 57: Lastgang BEV-Depotlader – mit Optimierung

3.3.2 Konzeptentwurf modulares Ladesystem BEV-Depotlader

Die Darstellung des Ladeinfrastruktur-Konzeptentwurfs auf Basis des Modulbaukastens erfolgt hier steckbriefartig. Zugrunde gelegt sind die Umlaufdaten, beziehungsweise die daraus hervorgehenden Fahrzeugmengen und Lastgangoptimierungen. Entsprechend erfolgt auch hier die Bezeichnung anhand der beigeestellten Datensätze. Bei abweichenden Fahrzeugmengen kann eine Systemvariation erforderlich sein. Aufgrund des modularen Aufbaus können die Ladesysteme gut auf abweichende Flottengrößen angepasst werden.

Für das Infrastrukturkonzept wird jedem Fahrzeug (Einsatz- und Reserveflotte) ein Ladeplatz zugeordnet. Dabei lösen Reservebusse keinen Ladebedarf aus, da der Nachladebedarf auf den vorherigen Einsatz zurückgeht.

Der Konzeptentwurf des Ladesystems geht unter anderem auch die Lastgangoptimierung zurück. Um ausreichende Spielräume für Abweichungen vom Planablauf zu berücksichtigen (z.B. aufgrund von Verspätungen), wird eine Lastreserve vorgesehen. Der Wert „Lastspitze nach Optimierung inkl. Lastreserve“ muss vom Energienetzbetreiber am Standort bereitgestellt werden, um einen reibungslosen Betriebsablauf bei Vollumstellung des Standorts zu gewährleisten.

Der MS/NS Transformator wird größer dimensioniert als die erforderliche Netzlast, um den Betrieb im effizienten Teillastbereich ($\approx 70\text{-}80\%$ der Nennleistung) zu gewährleisten.

Die im Konzeptentwurf angegebenen Daten beziehen sich auf eine einzelne Instanz des Ladesystems. Teilweise müssen mehrere Instanzen eines Systementwurf vorgesehen werden, was unter Anzahl vermerkt ist. Zu berücksichtigen ist, dass teilweise zwei verschiedene Systemvarianten konzeptioniert werden. In diesen Fällen sind beide Varianten (in der angegebenen Anzahl) erforderlich.

Parameter für Konzeptionierung		
Max Ladeleistung pro Bus	150 kW	
Lastspitze nach Optimierung	2.833 kVA	
Maximale Anzahl gleichzeitiger Ladevorgänge (nach Lastgangoptimierung)	16	
Lastreserve	+5 Ladevorgänge (@ 150 kW)	
Lastspitze nach Optimierung inkl. Lastreserve	3.666 kVA	
Empfohlener MS/NS Transformator	5.250 kVA*	
Fahrzeuganzahl (+ Reserve)**	Solobus	17 (+15)
	Gelenkbus	28 (+4)
	Midibus	1 (+1)
Konzeptentwurf Ladeinfrastruktur		
1. Systemvariante (für alle Fahrzeugtypen)		
Anzahl	17 Systeme	
Systemleistung	400 kW	
Anzahl Ladepunkte pro System	4	

Tab. 19: Steckbrief Ladeinfrastrukturkonzept – BEV-Depotlader

* In der Praxis würde die Installation der Transformatoren auf mehrere kleiner dimensionierte Einzeltransformatoren zurückgeführt werden, um beispielsweise einen schrittweisen Systemausbau zu vereinfachen und Redundanzvorteile zu schaffen. Hier wäre eine Kombination aus zwei 2.000 kVA und einem weiteren 1.250 kVA Transformator beispielsweise denkbar.

** Die Reserveflotte ergibt sich hier rechnerisch aus der Differenz zwischen Gesamt- und Einsatzflotte

Aufgrund der relativ großen Solobusreserve (mit 15 Fahrzeugen) muss das Ladesystem hier zunächst variabel gehalten werden, ohne die Komponenten auf ein absolutes Minimum zu reduzieren. Grund hierfür ist, dass die Ladeinfrastruktur über Nacht bis zu 21 Ladevorgänge ermöglichen muss, ohne dass zwingend sichergestellt ist, an welchem Standort die Fahrzeuge stehen. Es wird als realistisch eingeschätzt, dass ein Systemansatz mit 600 kW Systemleistung verteilt auf acht Ladepunkte ebenfalls zielführend ist. In diesem Fall wären 8 Stück 600 kW Instanzen (8 Ladepunkte) sowie eine weitere 400 kW Instanz mit vier Ladepunkten im Konzeptentwurf denkbar.

3.3.3 Konzeptentwürfe modulare Ladesysteme für weitere BEV-Ansätze

BEV-Zwischenlader und BZ-REX können in kleiner dimensionierten Ladeinfrastrukturen betrieben werden, da hier ein Teil des Energieeintrags bereits parallel zum Linieneinsatz (BEV-Zwischenlader) oder über einen sekundären Energieträger (BZ-REX) erfolgt. Analog zur BEV-Depotlader-Modell erfolgt hier eine Steckbriefdarstellung zum Vergleich.

Parameter für Konzeptionierung		
Max Ladeleistung pro Bus	150 kW	
Lastspitze nach Optimierung	1.056 kVA	
Maximale Anzahl gleichzeitiger Ladevorgänge (nach Lastgangoptimierung)	5	
Lastreserve	+2 Ladevorgänge (@ 150 kW)	
Lastspitze nach Optimierung inkl. Lastreserve	1.345 kVA	
Empfohlener MS/NS Transformator	2.000 kVA	
Fahrzeuganzahl (+ Reserve)	Solobus	17 (+15)
	Gelenkbus	28 (+4)
	Midibus	1 (+1)
Konzeptentwurf Ladeinfrastruktur		
1. Systemvariante (für alle Fahrzeugtypen)		
Anzahl	8 Systeme	
Systemleistung	400 kW	
Anzahl Ladepunkte pro System	8	
2. Systemvariante (für Midibusse)		
Anzahl	1 System	
Systemleistung	400 kW	
Anzahl Ladepunkte pro System	2	

Tab. 20: Steckbrief Ladeinfrastrukturkonzept – BEV-Zwischenlader

Parameter für Konzeptionierung		
Max Ladeleistung pro Bus	150 kW	
Lastspitze nach Optimierung	1.756 kVA	
Maximale Anzahl gleichzeitiger Ladevorgänge (nach Lastgangoptimierung)	10	
Lastreserve	+3 Ladevorgänge (@ 150 kW)	
Lastspitze nach Optimierung inkl. Lastreserve	2.256 kVA	
Empfohlener MS/NS Transformator	2.000 kVA + 1.250 kVA	
Fahrzeuganzahl (+ Reserve)	Solobus	17 (+15)
	Gelenkbus	28 (+4)
	Midibus	1 (+1)
Konzeptentwurf Ladeinfrastruktur		
1. Systemvariante (für alle Fahrzeugtypen)		
Anzahl	8 Systeme	
Systemleistung	600 kW	
Anzahl Ladepunkte pro System	8	
2. Systemvariante (für Midibusse)		
Anzahl	1 System	
Systemleistung	400 kW	
Anzahl Ladepunkte pro System	2	

Tab. 21: Steckbrief Ladeinfrastrukturkonzept – BZ-REX

3.4 Wasserstofftankinfrastruktur

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 zugeschaltet. 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 Krypumpen erhöht.

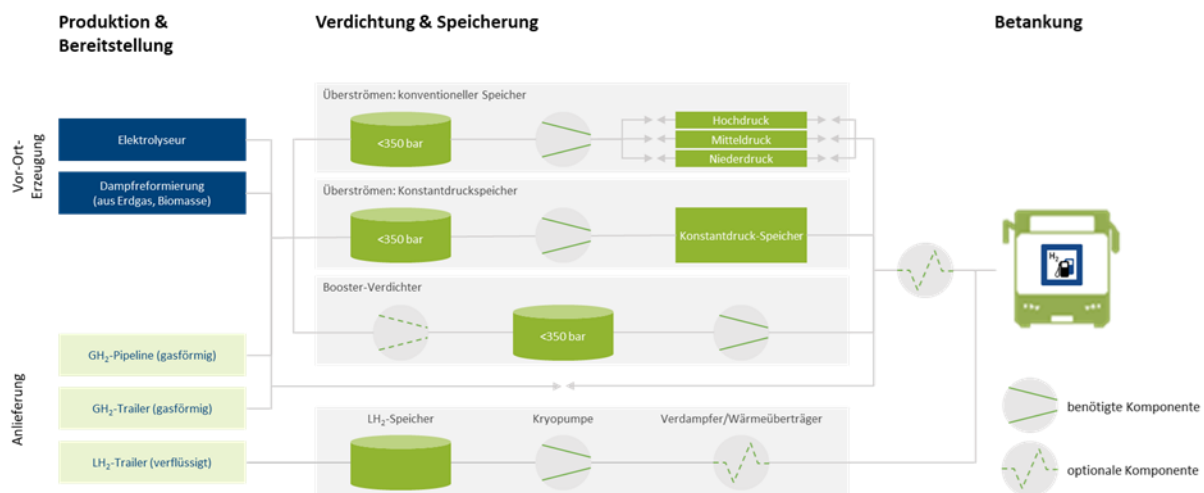


Abb. 58: Schematischer Aufbau Wasserstoff-Tankstelle

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 Anlieferungs- punkte für H₂-Trailer ergänzt werden müssen.

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

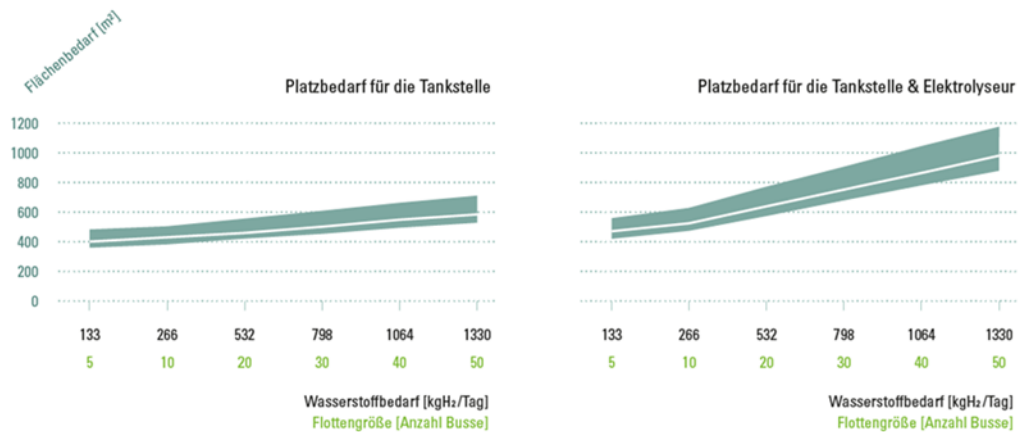


Abb. 59: Platzbedarf Wasserstoff-Tankstelle im ÖPNV [aus NOW GmbH (2018) „Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV“]

Grundsätzlich ist sowohl der Einsatz einer mit Flüssigwasserstoff (LH₂) versorgen Tankanlage ebenso möglich wie der Einsatz eines Systems mit gasförmiger (GH₂) Anlieferung. LH₂ wird durch Verdichtung (Energieeintrag) aus GH₂ gewonnen. Aufgrund des höheren Energiebedarfs sind die Bezugskosten für LH₂ üblicherweise höher, können aufgrund des geringeren Volumens jedoch aus logistischen Gründen bevorzugt sein.

Die Auswahl einer Variante wird aktuell mit den benötigten Energieträgermengen begründet, da bisher kein flächendeckendes Wasserstoffnetz vorhanden ist und keine Synergieeffekte vorliegen, die eine der Varianten begründen würden.

Aus den Jahresenergiemengen kann der durchschnittliche Tagesbedarf an Wasserstoff hergeleitet werden. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass beispielsweise im Winter pro Tag höhere Mengen anfallen, während im Frühjahr und Herbst (geringe Klimatisierungsleistung im Fahrzeug) Mengen anfallen, die unter dem Durchschnittswert liegen.

Die täglich im Schnitt antizipierten Wasserstoffmengen ergeben sich zu:

- FCEV: $\approx 1,05 \text{ t H}_2 \text{ pro Tag}$
- BZ-REX: $\approx 0,35 \text{ t H}_2 \text{ pro Tag}$

GH₂ Tankstellen sind üblicherweise auf etwa 20-25 Nutzfahrzeuge pro Tag ausgelegt, während LH₂ Anlagen für 100 und mehr Fahrzeuge am Tag ausgelegt werden können. Der Durchsatz wird effektiv durch die Anlieferoptionen begrenzt. Aktuell liegen Speicherkapazitäten für LH₂ Trailer bei 3,3 t H₂, während GH₂ Trailer etwa bei 1,25 t H₂ liegen. Im FCEV-Szenario ist an Tagen mit hohem Verbrauch im Vollausbau von einer etwa täglichen Energieträgeranlieferung auszugehen. Aus logistischen Gründen wäre hier die Flüssigvariante mit einer etwa dreitäglichen Anlieferung besser geeignet.

Da für Teilflotten, oder BZ-REX Modelle, eine GH₂ Tankanlage eine gangbare Alternative darstellen kann, wird im Rahmen der späteren Betriebshofintegration auch diese Variante vergleichend betrachtet.

Sicherheitsabstände für H₂ Tankanlagen

In der VDV-Schrift 825 werden unter Verweis auf die 12. BImSchV einzuhaltende Sicherheitsradien für H₂ Tankanlagen angegeben. Abhängig von der Anwendung werden folgende Sicherheitsradien angegeben, die gegenüber schutzbedürftigen Objekten, wie Wohnbebauung, Bahntrassen oder Straßen mit mehr als 10.000 Fahrzeugen pro Tag, einzuhalten sind.

Anwendung	Sicherheitsradius
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

Tab. 22: Abstände zu schutzbedürftigen Objekten nach VDV 825 (12. BImSchV)

Ausgehend von den denkbaren Standorten, an denen eine Wasserstofftankstelle im Betriebshof realisierbar erscheint, scheinen Wohnbebauungen im Sicherheitsradius zu liegen. Sofern das zukünftige Einsatzkonzept eine H₂ Tankanlage erfordert, sollte im Rahmen einer entsprechenden Detailprüfung erhoben werden, ob eine Reduktion der Sicherheitsabstände, beispielsweise durch bauliche Schutzeinrichtungen, möglich ist.

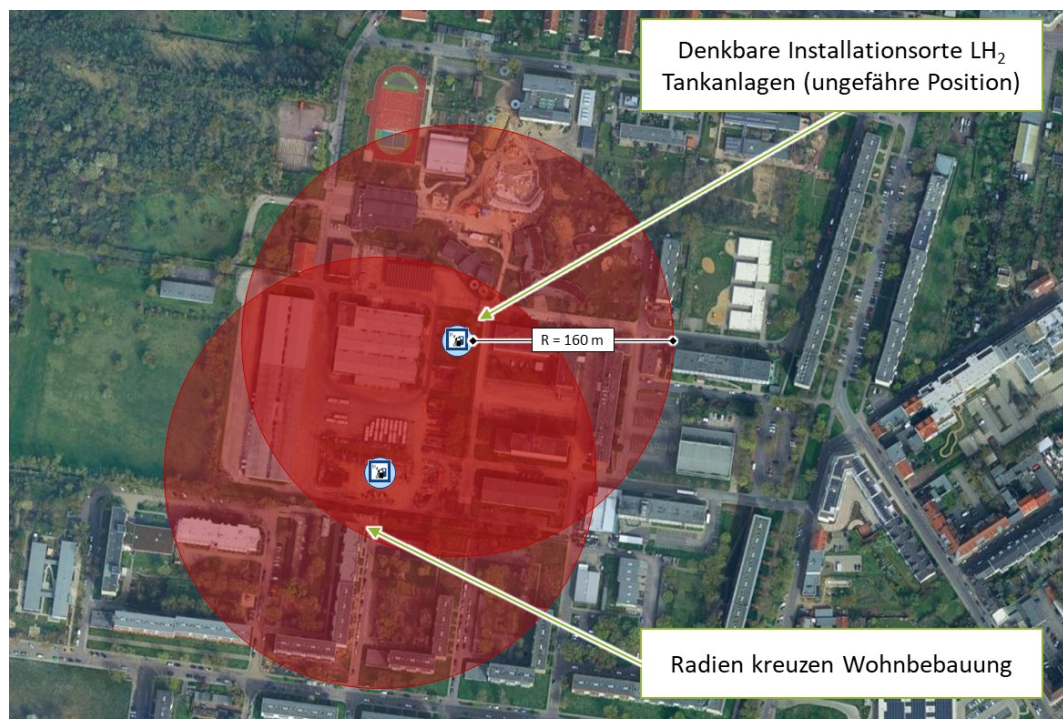


Abb. 60: Sicherheitsabstände LH₂ Tankanlage

3.5 Betriebshofintegration

3.5.1 Komponentenübersicht

3.5.1.1 Elektrische Ladeinfrastruktur

Zugrunde gelegt werden sogenannte Matrix-Ladeinfrastrukturen, die auf einem kooperativen Betrieb interner Leistungsmodule basieren. Dabei wird ein Schnittstellenkonzept verfolgt, dass 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 Bauraum 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 parametrierung wird.



Abb. 61: CCS Anschlussbox mit Seilzug-Abrollsystem



Bild: CarMedialab GmbH

Abb. 62: 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: MAN Truck & Bus (über nfv-messe.com)

Abb. 63: 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.



Abb. 64: Praxisbeispiel mit beidseitigen Ladeschnittstellen auf Höhe der Vorderachse

Im Rahmen der Konzeptentwicklung werden in den Grundstücken Mittel-/Niederspannungs-transformatoren 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).

3.5.1.2 Wasserstoff Tankinfrastruktur

Für eine mögliche Vollumstellung der Busflotte scheint eine LH₂ Tankanlage aufgrund der Versorgung per Trailer besser geeignet. Dennoch stellt GH₂ insbesondere für denkbare BZ-REX Flotten eine gangbare Alternative dar, weshalb für die Betriebshofintegration beide Varianten grundsätzlich betrachtet werden.

Für Tankstellen mit LH₂-Hauptspeicher werden Komponenten entsprechend dem Schema in Abb. 65 berücksichtigt. Die Bemaßung erfolgt angelehnt an Praxiswerte, wobei analog zur elektrischen Ladeinfrastruktur stets eine leicht erhöhte Baufläche angenommen wird.

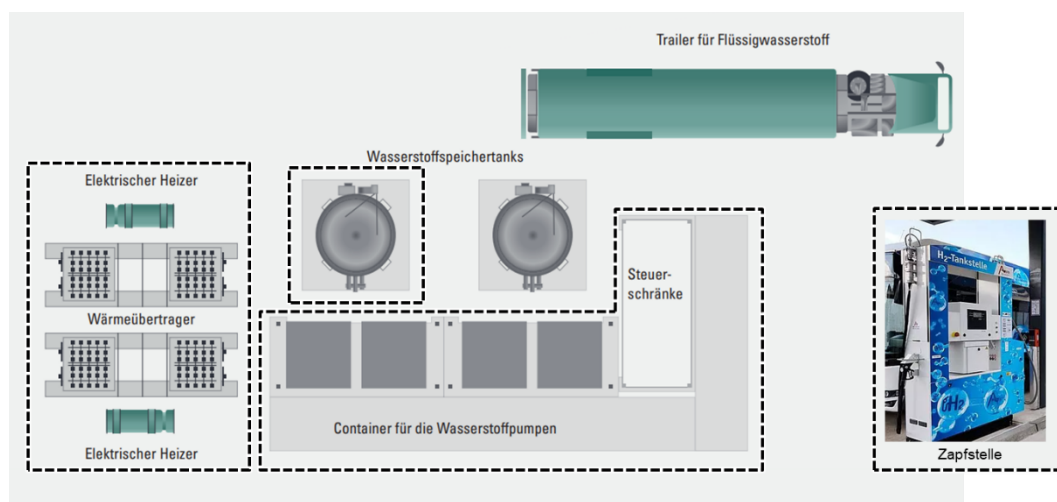


Abb. 65: Komponentenübersicht Betriebshofintegration LH₂ Tankanlage

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 Komponenten entsprechend der folgenden Abbildung berücksichtigt, die sich wie folgt zusammensetzen.

- 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

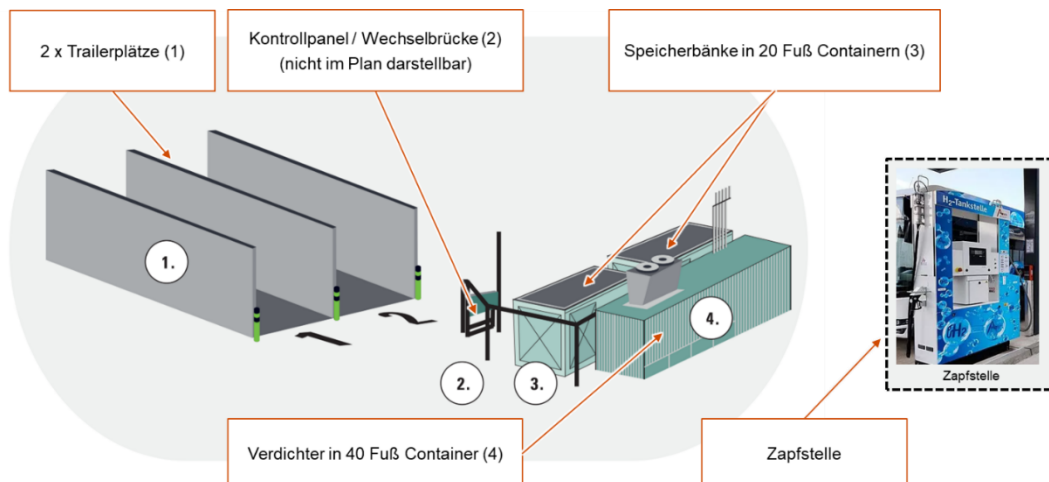


Abb. 66: Komponentenübersicht Betriebshofintegration GH₂ Tankanlage

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 ca. 60 Fahrzeuge eine geringere Menge Zapfpunkte ausreicht.

3.5.1.3 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.

Für die Abstandsmaße um den Havarieplatz gibt es abweichende Empfehlungen zwischen 5 m und 20 m Abstandsradius. Den größten Sicherheitsabstand in Literaturwerten geht auf eine Realisierung der Berliner Verkehrsbetriebe zurück, wobei ein dreistufiges Zonenkonzept umgesetzt wird.

- Sicherheitsabstand Arbeitsschutz: $R = 1,5 \text{ m}$
- Brandlastfreie Zone und Halteverbot: $R = 10 \text{ m}$
- Sicherheitsabstand zu Gebäuden: $R = 20 \text{ m}$

Andere Literaturquellen, wie die VDV-Empfehlung 825, empfehlen lediglich die Vorhaltung einer brandlastfreien Zone mit Halteverbot im Radius von 5 m um das verunfallte Fahrzeug.

Die Vorhaltung eines Havarieplatzes wird grundsätzlich empfohlen und als sinnvoll eingeschätzt. Auch wenn der Havarieplatz nur in sehr seltenen Fällen tatsächlich erforderlich ist, können die Auswirkungen möglicher Spätfolgen eines Unfalls auf ein beherrschbares Maß reduziert werden.

Nach Auffassung der Autoren sollte die Thematik Havariefläche nicht zwingend als betreiber-spezifische Problemstellung betrachtet werden. Im Zuge des Ausbaus elektrischer und teilelektrischer Antriebskonzepte sind entsprechende Flächen auch für eine Vielzahl anderer Fahrzeuge erforderlich. Es erscheint sinnvoll, hier eine enge Abstimmung mit den lokalen Sicherheitsorganen und anderen Betreibern größerer elektrischer Fahrzeugflotten zu suchen, inwiefern Havarieflächen zentralisiert aufgebaut werden. Im Idealfall werden Havarieflächen möglichst nah an Niederlassungen der Feuerwehr vorgehalten.

Grundsätzlich gilt, dass Havarieflächen auch anderweitig nutzbar sind, sofern eine zeitnahe Räumung im Einsatzfall gewährleistet ist. Beispielsweise können Pkw-Parkplätze oder ähnliches genutzt werden, die im Einsatzfall geräumt werden.

3.5.2 Konzeptdarstellungen

Für die Fahrzeugabstellung stehen zwei grundsätzliche Platzbereiche im Betriebshof zur Diskussion: Abstellhalle im Westen des Grundstücks und Freibereich im östlichen Bereich. Die aktuelle Mischabstellung von Solo- und Gelenkbussen pro Spur in der Abstellhalle kann aus Platzgründen in der Halle nicht ohne weiteres geändert werden. Für eine Abstellung von zwei Gelenkbussen hintereinander, scheint ein Hallenneubau erforderlich.

Anmerkung

Es kann im Rahmen einer Machbarkeitsstudie nicht bewertet werden, inwiefern ein Hallenneubau in der gegebenen Form mit geringfügiger Verbreiterung der Halle sinnvoll ist. Prämisse hier ist die weitestgehende Beibehaltung der offenen Abstellung im östlichen Bereich. Alternativ kann eine großflächige Überplanung des gesamten Abstellbereichs ins Auge gefasst werden.

Im Freibereich wird angenommen, dass die dargestellte Fläche bei Bedarf überbaut werden kann. Die Freifläche wird aktuell sowohl zur Fahrzeugabstellung als auch vom Bereich Straßenbahn-Gleisbau genutzt.



Abb. 67: Freifläche im Betriebshof

Im Freibereich stehen grundsätzlich zwei Gestaltungsalternativen zur Verfügung: Block- und Schrägaufstellung. Pro-Argument für die Schrägaufstellung ist insbesondere die hohe Einsatzflexibilität für die Fahrzeuge. Jeder Stellplatz kann – unabhängig von anderen Fahrzeugen – jederzeit erreicht oder verlassen werden. Dem entgegen steht, dass Blockaufstellungen platzeffizienter sind und mehr Abstellkapazitäten auf demselben Bauraum ermöglichen. In Blockaufstellung sind die zentralen Charakteristiken gegenläufig. Die Platznutzung ist sehr effizient und verspricht große Zahlen abstellbarer Fahrzeuge. Jedoch muss hier berücksichtigt werden, dass die Ein- und Ausfahrt durch andere (ggf. ladende Busse) blockiert werden kann. Mit adäquater Planung oder den Einsatz entsprechender Managementtools kann dieser Herausforderungen üblicherweise gut begegnet werden.

Brandschutzeinrichtungen sind in Neubauanlagen grundsätzlich gut integrierbar. Die in den folgenden Konzepten angesetzten Platzreserven zwischen den Fahrzeugen ermöglichen das Einziehen entsprechender Schutzeinrichtungen. Dies gilt für alle Abstellkonzepte im Freibereich sowie für Neubauansätze der Abstellhalle. Einschränkungen liegen lediglich für Umbaumaßnahmen der aktuellen Halle vor. Für eine belastbare Bewertung wird ein entsprechend ausgerichtetes Brandschutzgutachten empfohlen. Als kritisch eingeschätzt wird die allgemeine

Bausubstanz, die im Kontext von Brandschutzmaßnahmen nicht bewertet werden kann. Grundsätzlich scheinen ausreichende Platzverhältnisse (zwischen den abgestellten Fahrzeugen) vorzuliegen, um auch im Bestand Brandschotts nachzurüsten. Inwiefern eine bauliche Integration in die Bestandhalle praktisch möglich ist, kann an dieser Stelle nicht beantwortet werden.

Da die Stellplatzkapazitäten in allen folgend dargestellten Varianten für die aktuelle Fahrzeugflotte ausreichend dimensioniert sind, werden die Zahlenwerte am Ende des Kapitels in Tab. 23 zusammengefasst.

Im ersten Konzeptansatz für BEV (Abb. 68) wird von einem Umbau der Abstellhalle ausgegangen, bei dem die aktuelle Stellplatzkapazität unverändert beibehalten werden kann. Im Freibereich wird eine Schrägaufstellung verfolgt. Die Ladeschnittstellen selbst können unproblematisch am Ladeplatz von oben zugeführt werden. Angenommen wird die Einrichtung eines Tragwerks quer zur Fahrtrichtung, über das die Ladestecker von oben zugeführt werden können.

Ladeinfrastrukturkomponenten sind in den Abbildungen als blaue (MS/NS Transformatoren) beziehungsweise grüne (Gehäuse Ladetechnik) Flächen eingezeichnet, die gut in der Nähe der Ladepunkte, aber außerhalb der Fahrwege, platziert werden können. An den Stirnseiten der Schrägabstellungen sind entsprechende Installationsflächen freigehalten. Für die Abstellhalle kann der vorhandene Grünsteifen neben der Halle für die Installation angesetzt werden.



Abb. 68: Betriebshofintegration (BEV) mit Umbau Abstellhalle und Schrägaufstellung im Freibereich

Gegenüber dem ersten Konzeptansatz ist in Abb. 69 nur die Abstellhalle geändert. Über eine Vergrößerung der Baufläche kann das Abstellkonzept dahingehend geändert werden, dass die Mischabstellung pro Spur verworfen werden kann. Pro Spur können entweder zwei Gelenk- oder drei Solobusse hintereinander abgestellt werden. Dabei können Gelenkbusstellplätze selbstverständlich auch für Solo- oder Midibusse genutzt werden.



Abb. 69: Betriebshofintegration (BEV) mit Neubau Abstellhalle und Schrägaufstellung im Freibereich

Trotz größerer Grundfläche bei einem Hallenneubau werden die Abstellkonzepte für die Freifläche im östlichen Bereich nicht negativ beeinflusst. Anhand des sogenannten BO-Kraftkreises wurde im Konzeptentwurf berücksichtigt, dass die Fahrwege sich nicht mit den geplanten Stellplätzen oder Infrastruktureinrichtungen kreuzen. Dennoch ersetzt der hier verfolgte Ansatz keine konkrete Schleppkurvenberechnung im Rahmen einer Detailplanung.

Im dritten Konzeptansatz liegt der Fokus auf der Freifläche. Dargestellt ist für die Abstellhalle eine Nachrüstung von Ladeinfrastruktur (Umbau). Für die Freiflächeninstallation ist die jeweilige Hallenausführung irrelevant, da beide Varianten für die Abstellhalle (Neu- oder Umbau) neben allen Freiflächenkonzepten abbildbar sind.



Abb. 70: Betriebshofintegration (BEV) mit Umbau Abstellhalle und Blockabstellung im Freibereich (Fahrtrichtung West-Ost)

Im Freibereich ist in Abb. 70 eine Blockabstellung mit 14 Spuren berücksichtigt. Die konzentrierte Fahrzeugabstellung erlaubt dabei die größten Stellplatzkapazitäten. Bei der dargestellten Fahrtrichtung (West-Ost) wirkt sich vorteilhaft aus, dass die Freifläche zwischen aktueller Abstellhalle und Blockabstellung im Freibereich für beide Abstellungen als Aus- respektive Einfahrt von/zur Abstellung genutzt werden. Aufgrund der Doppelnutzung ist die Platzeffizienz maximal.

Der vierte Konzeptansatz beinhaltet für die aktuelle Abstellhalle ein Neubaukonzept, wobei dies durch ein Umbaukonzept ohne Einfluss auf die Freiabstellung ersetzbar ist.



Abb. 71: Betriebshofintegration (BEV) mit Umbau Abstellhalle und Blockabstellung im Freibereich (Fahrtrichtung Süd-Nord)

Im Vergleich zur vorangestellten Variante mit Blockabstellung in West-Ost Richtung, wird in Abb. 71 deutlich, dass hier die Doppelnutzung der Freifläche zwischen Abstellhalle und Freiabstellung entfällt. Aufgrund der Zuwegung im Norden und Süden der Blockabstellung müssen hier insgesamt drei Ein- und Ausfahrtbereiche freigehalten, was sich auf die Stellplatzkapazitäten auswirkt. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass die Stellplatzkapazitäten in allen Varianten größer als die aktuelle Fahrzeugflotte sind. Eine maximale Platzeffizienz erscheint nicht zwingend erforderlich.

Abschließend wird der Fokus auf die Installationsoptionen für Wasserstofftankinfrastruktur gelegt. Wie aus Abb. 72 hervorgeht, wird als möglicher Installationsort der in den BEV-Konzepten angesetzte Havarieplatz angesetzt. Entsprechend liegen keine Auswirkungen auf die Fahrzeugabstellung der BEV-Konzepte vor, so dass diese auch für FCEV ansetzbar sind.

Die Einschränkung, keinen Havarieplatz auf dem Betriebshofgelände vorsehen zu können, wird weitestgehend unkritisch eingeschätzt. Es erscheint sinnvoller, einen externen Havarieplatz zu wählen, der gegebenenfalls auch von anderen Akteuren mit emissionsfreien Fahrzeugflotten genutzt werden kann.

Von Relevanz ist, dass die Bauflächen im nord-östlichen Bereich großzügig ausfallen, so dass sowohl LH₂ als auch GH₂ Tankanlagen auf Konzeptebene unproblematisch verortet werden können. Im Rahmen einer Detailuntersuchung müsste jedoch geklärt werden, inwiefern die erforderlichen Schutzradien hier eingehalten werden können.



Abb. 72: Betriebshofintegration (FCEV) mit LH₂ oder GH₂ Tankanlage

Abschließend werden hier die Stellplatzkapazitäten aufgeführt, die sich aus den verschiedenen Abstellkonzepten ergeben. Die Angaben gelten dabei technologieunabhängig, da dieselben Ansätze für BEV und FCEV abgebildet werden können. Gegenüber der aktuellen Fahrzeugflotte von 66 Fahrzeugen (32 x SL, 32 x GL, 2 x MI) stellen sich die Stellplatzkapazitäten ehr großzügig dar. Auch wenn die Maximalkapazitäten nicht erforderlich sind, kann so ein gleitender Übergang gewährleistet werden, indem beispielsweise die Freiabstellung vorbereitend für Elektromobilität (ungenutzt) ertüchtigt wird, während der Normalbetrieb weitestgehend über die vorhandene Abstellhalle abgewickelt wird.

<i>Abstellhalle</i>			
<i>Variante</i>	<i>Stellplatzkapazität</i>		
	SL	GL	Summe
Umbau	20	20	40
Neubau	36	16	52
<i>Freibereich</i>			
<i>Variante</i>	<i>Stellplatzkapazität</i>		
	SL	GL	Summe
Schrägaufstellung	--	38	38
Blockaufstellung (West-Ost)	12	48	60
Blockaufstellung (Süd-Nord)	36	20	56

Tab. 23: Stellplatzkapazitäten pro Variante

Die Angaben pro Fahrzeugtyp sind als Maximalwerte zu verstehen. Auf Stellplätzen für Gelenkbusse können kleinere Fahrzeugtypen (SL oder MI) beispielsweise ebenfalls abgestellt werden, da die Ladeschnittstelle etwa auf gleicher Höhe ab der Fahrzeugfront platziert ist.

Die Abstellkonzepte für einen Hallenneubau beziehungsweise Blockaufstellungen im Freibereich gehen auf Spurkonzepte zurück, die entweder mit Solo- oder Gelenkbussen geplant werden können. Beispielsweise können in Blockabstellungen entweder sechs Solobusse oder vier Gelenkbusse verplant werden. Bei höherem Fokus auf Solobusse kann die Stellplatzanzahl – ohne Einfluss auf die Platzverhältnisse – erhöht werden. Für eine bessere Nachvollziehbarkeit sind in folgender Tabelle die Spurzahlen und möglichen Fahrzeuge pro Spur aufgeführt.

Aufgrund der längeren Spurausführung bei Blockaufstellung in West-Ost Richtung ist hier grundsätzlich auch ein Mischkonzept denkbar, bei dem die Spur zur Hälfte mit Solo- und zur Hälfte mit Gelenkbussen geplant wird. Da hier eine maximale Stellplatzeffizienz nicht erforderlich scheint, wird empfohlen, lieber auf typenreine Spurkonzepte zurückzugreifen, um die Fahrzeugdisposition nicht unnötig zu erschweren.

Neubau Abstellhalle		
Anzahl Spuren	20	
Fahrzeugaufteilung pro Spur		
Variante	Anzahl SL	Anzahl GL
Nur Solo	3	0
Nur Gelenk	0	2
Freibereich Blockabstellung (West-Ost)		
Anzahl Spuren	14	
Fahrzeugaufteilung pro Spur		
Variante	Anzahl SL	Anzahl GL
Nur Solo	6	0
Nur Gelenk	0	4
Mischkonzept	3	2
Freibereich Blockabstellung (Süd-Nord)		
Anzahl Spuren	22	
Fahrzeugaufteilung pro Spur		
Variante	Anzahl SL	Anzahl GL
Nur Solo	3	0
Nur Gelenk	0	2

Tab. 24: Mögliche Spurgestaltungen in Blockabstellkonzepten

3.6 Betriebsanpassung

3.6.1 Werkstattanpassung

Neben den Anforderungen an Fahrzeuge und Infrastruktur bewirkt die Einführung einer emissionsfreien Antriebstechnik auch Anforderungen an die Werkstattausstattung, was hier behandelt wird. Ergänzend zu diesen Ausführungen hat der VDV in der Schrift 825 „Anforderungen an Betriebshöfe und Werkstätten beim Einsatz von Linienbussen mit sauberen und/oder emissionsfreien Antrieben“ Empfehlungen definiert.

Aufgrund der aktuellen Flottenstruktur sind die bisherigen Berührungspunkte des MVB Bus-Werkstattpersonals mit Hochvolttechnik vermutlich überschaubar. Da im Straßenbahnsektor, an anderen Standorten, entsprechendes Fachpersonal eingesetzt wird, ist ein Wissenstransfer hier realistisch. Vorausgesetzt wird ausreichend qualifiziertes Personal, um die geplanten Servicemaßnahmen realisieren zu können.

Auf organisatorischer Ebene liegt ein überschaubarer Anforderungskatalog vor, der in erster Linie auf den sicheren Umgang mit Hochvoltssystemen, beziehungsweise auf sicheres Arbeiten im Umfeld von Hochvoltssystemen, zielt. Im Zuge der Einführung muss das Gefahrenpotenzial anhand von Gefährdungsbeurteilungen analysiert werden, um darauf aufbauend Betriebs- und Arbeitsanweisungen für den gefahrungsfreien Umgang zu definieren. Die Betriebs- und Arbeitsanweisungen umfassen dabei neben den Werkstattbetrieben auch externe Aspekte, wie Pannendienstanweisungen oder Rettungskarten für den Havariefall. Von besonderer Bedeutung ist in diesem Kontext ein valides und periodisch aktualisiertes Schulungskonzept, dass neben Werkstattpersonal auch weitere Personengruppen umfasst, die im Umgang mit den batterieelektrischen Fahrzeugen stehen.

Um die Wartungsmaßnahmen in einem sicheren Umfeld auszuführen, sind für die Werkstatt entsprechend ausgerichtete Arbeitsplätze für Elektrobusse erforderlich. Im Fokus steht hierbei insbesondere der Aspekt Dacharbeitsstand. Im Gegensatz zu konventionellen Fahrzeugen wird das Fahrzeugdach nahezu vollständig als Bauraum für Teile der Antriebstopologie verwendet, weshalb regelmäßig Arbeitseinsätze auf dem Fahrzeugdach zu erwarten sind. Idealerweise werden Dacharbeitsstände so ausgeführt, dass gleichzeitig auf dem Dach und auf Bodenebene gearbeitet werden kann, um effiziente Arbeitsabläufe zu ermöglichen. Parallel kann über eine Wartungsgrube auch der Fahrzeugunterboden zugänglich gemacht werden, so dass ein paralleler Arbeitsbetrieb auf drei Ebenen möglich ist.



Abb. 73: Dacharbeitsstand (Blick von oberer Ebene auf Fahrzeugdach)

Im Werkstattbereich ist bereits ein geeigneter mobiler Dacharbeitsstand vorhanden. Die Deckenhöhe und seitlichen Abstände in der bestehenden Werkstatt scheinen darüber hinaus ausreichend für die Nachrüstung eines stationären Dacharbeitsstand. Für eine etwaige Erweiterung (zusätzliches Werkstattgebäude) im Zuge des Flottenausbaus sollten die Platzbedarfe für Dacharbeitsstände und Krananlagen bereits im Planungsprozess berücksichtigt werden.

Dachseitig sind bei Elektrobussen teils schwere Komponenten installiert, für deren Austausch eine Krananlage mit mindestens einer Tonne Hebekraft sinnvoll sein kann, sofern entsprechende Maßnahmen nicht in den herstellerseitigen Serviceanteil ausgegliedert werden sollen.

Um die Traktionsbatterie während Wartungsmaßnahmen nachladen zu können, wird ein klein dimensioniertes DC-Ladegerät empfohlen, das üblicherweise als mobiles Ladegerät ausgeführt wird (Leistungsklasse ca. 20 bis 40 kW). Für den Betrieb des Ladegeräts ist mindestens eine 32-A-CEE Drehstrom-Steckdose (20 kW) bzw. 63 A (40 kW) erforderlich.

Um Personenschäden auszuschließen, Gefahrensituationen zu vermeiden beziehungsweise frühzeitig zu erkennen und Rettungsmaßnahmen umgehend ergreifen zu können, sollte dem Sicherheitsaspekt große Aufmerksamkeit zukommen. Über Zugangskontrollen kann sichergestellt werden, dass nur unterwiesenes und befugtes Personal Zugang zu den potenziell gefährlichen Werkstattbereichen erhält. Brandschutzmaßnahmen umfassen neben ausbreitungshemmenden Maßnahmen insbesondere eine Brandmeldeanlage zur frühzeitigen Erkennung einer Gefahrensituation. Sofern weiterhin fossile Zusatzheizgeräte eingesetzt werden, sind Abgasabsauganlagen für ein sicheres Arbeitsumfeld auch im E-Bus Bereich erforderlich.

Selbstverständlich sollte die Notfallausrüstung in unmittelbarer Umgebung des Arbeitsplatzes gut zugänglich und gekennzeichnet gelagert werden. Für die Vermeidung von Stromunfällen sollten Isolierhandschuhe, Isoliermaterial sowie Schutzkleidung direkt zugänglich sein. Ein Defibrillator ist als Notfallgerät sehr empfehlenswert.

Um ein geordnetes Arbeitsumfeld ohne Hindernisse und Stolperfallen zu gewährleisten, sind geeignete Aufbewahrungsmöglichkeiten sowohl für Spezialwerkzeuge als auch für große Komponenten im näheren Umfeld der Arbeitsplätze sinnvoll.

Die beschriebenen Anpassungsfaktoren gelten für BEV und FCEV, da in beiden Fällen der Elektroantrieb für die Wartungs- und Servicemaßnahmen zentral ist. Bei FCEV kommt ergänzend hinzu, dass über geeignete Überwachungs- und Notbelüftungskonzepte ausreichende Sicherheitsfunktionen bei Gasaustritt gewährleistet sind.

3.6.2 Fahrzeugwartung und Fahrzeugprüfung

Die Fahrzeugdurchsicht bzw. -Wartung verändert sich mit der Umstellung auf emissionsfreie Antriebe. Hierbei entfallen Themen wie Motorölwechsel, Katalysator- und Feinstaubfilter-Wartung und auch der Wechsel von Bremsbelägen und Bremsscheiben wird aufgrund der elektromotorischen Dauerbremse deutlich reduziert.

An die Stelle der mechanischen Tätigkeiten treten z.T. umfangreichere elektrotechnische Wartungsschritte. Neben der Überprüfung von Isolationsstrecken, Schutzleiterverbindungen dem Zustand von Hochvoltkabelverbindungen treten vermehrt Computer-gestützte Diagnose- und Wartungsschritte.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass der Zeitaufwand für die Wartungen geringer wird. Es werden aber höher qualifiziertes Personal und anspruchsvollere Spezialwerkzeuge benötigt.

3.6.3 Mitarbeiterschulung

Um einen sicheren, wirtschaftlichen und regelkonformen Betrieb gewährleisten zu können, ist die gezielte Schulung der MVB-Mitarbeiter zwingend erforderlich. Nachfolgend erhalten Sie eine Übersicht über die notwendigen Schulungsmaßnahmen.

Schulung des Fahrpersonals

Das Fahrpersonal ist maßgeblich für einen sicheren und energieeffizienten Betrieb der neuen Fahrzeuge verantwortlich. Die Schulung im Fahrdienst umfasst insbesondere:

- Fahrzeugtechnik: Einführung in die Funktionsweise von Elektrobussen, Unterschiede zu konventionellen Antrieben, Ladeinfrastruktur sowie Sicherheitsaspekte im Umgang mit Hochvoltssystemen.
- Fahrverhalten: Anpassung des Fahrstils zur Optimierung der Reichweite, regeneratives Bremsen, Temperaturmanagement.
- Lade- und Betriebsabläufe: Einweisung in betriebliche Ladeprozesse, Meldewesen bei technischen Auffälligkeiten, Umgang mit Störungen.
- Sicherheit und Notfälle: Verhalten bei technischen Störungen, Pannen oder Unfällen mit Hochvoltkomponenten.

Schulung des Werkstattpersonals

Für die Wartung und Instandhaltung der neuen Fahrzeuge sind weiterführende technische Kenntnisse erforderlich. Die Schulung erfolgt in mehreren Stufen nach DGUV-Vorgaben:

- Hochvoltunterweisung (Stufe 1 und ggf. 2E/3): Sensibilisierung für Gefahren durch elektrische Spannung, Durchführung sicherer Arbeiten an HV-Systemen.

- Fahrzeugspezifische Techniks Schulungen: Vermittlung von Kenntnissen zu Antriebsstrang, Batterie, Ladetechnik und Diagnosewerkzeugen.
- Arbeitsschutz und Entsorgung: Schutzmaßnahmen bei Arbeiten an HV-Systemen, fachgerechter Umgang mit HV-Batterien.

Schulung des Betriebspersonals (Disposition, Leitstelle)

Auch das disponierende Personal muss mit den betrieblichen Eigenheiten von Elektrobussen vertraut sein:

- Planung und Umlaufgestaltung: Berücksichtigung von Ladezeiten, Reichweiten, Witterungseinflüssen und Reserven.
- Monitoring und Datenanalyse: Nutzung von Telematik- und Flottenmanagementsystemen zur Effizienzüberwachung und Fehlerfrüherkennung.

Wiederkehrende Unterweisungen und Dokumentation

Gemäß Arbeitsschutzgesetz und DGUV-Vorschriften sind regelmäßige Unterweisungen und Auffrischungsschulungen durchzuführen. Alle Schulungen sind zu dokumentieren und dem jeweiligen Tätigkeitsbereich zuzuordnen.

Eine frühzeitige Einbindung externer Schulungsanbieter sowie der Fahrzeughersteller ist daher ratsam, um den spezifischen Anforderungen der jeweiligen E-Bus-Typen gerecht zu werden.

3.6.4 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 Fahrzeugmengen können grundsätzlich weitestgehend 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. Alle weiteren Unterkategorien für Managementsysteme im elektrifizierten Betriebshof sind der Vollständigkeit halber aufgeführt, gelten für den Anwendungsfall jedoch zum Teil als optional.

Betriebshofmanagement

Betriebshofmanagementsysteme können mehrere Managementsysteme unter einem Dach zusammenfassen. Sinnvoll sind derartige Systeme für Großflotten, wenn vermeintliche Randaspekte wie Fahrzeugdisposition, preisoptimierter Energieeinkauf, Werkstattmanagement, automatisierte Umlaufoptimierung oder Stellplatzzuweisung automatisiert in direkter Verbindung mit dem Lademanagement ausgeführt werden sollen. Bei den hier relevanten Fahrzeugmengen erscheint ein entsprechendes System als nicht zwingend erforderlich.

Stellplatzmanagement

Stellplätze können nicht beliebig ausgewählt werden, wenn das Ladesystem möglichst effizient betrieben werden soll. In Anbetracht der überschaubaren Fahrzeugflotte und dem dazugehörigen Ladeinfrastrukturkonzept ist eine flexible (momentanlastabhängige) Zuordnung der Stellplätze nicht erforderlich. Vielmehr ist eine feste Zu- und Abfahrtsreihenfolge nach einem einfachen Prinzip hier die praktikabelste Lösung.

Abrechnungsmanagement

Die Etablierung eines Abrechnungsmanagementsystems ist nur erforderlich, wenn die Ladeinfrastruktur externen Nutzern zugänglich gemacht werden soll, oder die bezogenen Strommengen aus anderen Gründen detailliert abgerechnet werden müssen. Die genaue Ausführung eines solchen Systems ist abhängig von der Zielsetzung, also welche Nutzergruppen stehen im Fokus und in welchem Ausmaß wird eine Nutzung durch Dritte angestrebt. Grundsätzlich sind drei Funktionseinheiten relevant für das Abrechnungsmanagement:

- Mengenerfassung
- Nutzeridentifikation und Autorisierung
- Datenverarbeitung

Im Vordergrund steht zunächst die Mengenerfassung, um die geladenen Energiemengen korrekt zu erfassen. Die Energiemengen werden pro Ladevorgang erfasst und einem Nutzerprofil zugeordnet. Die Energiemengenmessung erfolgt innerhalb des Ladesystems und muss ggf. eichrechtskonform umgesetzt werden. Da die Energiemenge möglichst verlustfrei bestimmt werden muss, erfolgt die Messung unmittelbar vor dem Ladekabel im Gleichstromkreis. Eichrechtskonforme Messeinrichtungen für Depot-Ladeinfrastruktur sind nicht zwingend standardmäßig Teil eines Ladeinfrastruktursystems im ÖPNV.

Über die Nutzeridentifikation und Autorisierung werden Ladevorgänge hinterlegten Nutzerprofilen zugeordnet, in denen die bezogenen Energiemengen gespeichert werden. Von Bedeutung ist hier die eindeutige Identifikation des Nutzers unter Einhaltung aller relevanten Sicherheitskriterien. Als Identifikationsmedium sind diverse Varianten verfügbar, die in ein Ladesystem integriert werden können. Auch diese sind nicht zwingend standardmäßig Teil einer Infrastruktur. Typische Identifikationsvarianten sind beispielsweise:

- Nutzerkarten mit RFID-Chip oder -Karte
- Kombination von Log-In und Passwort
- Automatische Identifikation über die Fahrzeug-ID (übermittelt über Ladestecker)

Der Begriff Datenverarbeitung bezieht sich hier im Wesentlichen auf das Speichern und Exportieren von Daten. Die erfassten Energiemengen werden mit Zusatzinformationen (z. B. Zeitstempel) in einer Datenbank hinterlegt und dem Nutzerprofil zugeordnet. Von Bedeutung ist, dass die Speicherung entsprechend sicherheits- und datenschutzrechtlicher Vorgaben erfolgt und entsprechend manipulationssicher ausgeführt ist. Die Daten werden über eine Schnittstelle an externe Verwaltungssysteme übergeben, über die Aspekte wie Guthabenverwaltung, Rechnungslegung und ähnliches verwaltet werden.

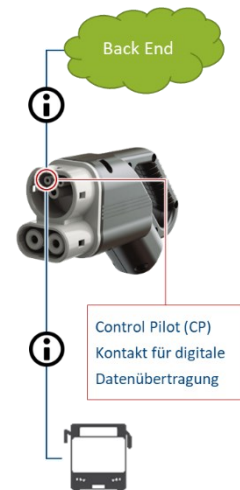
Anmerkung: Ladeinfrastrukturen erfüllen nicht zwingend die sicherheits- und datenschutzrechtlichen Anforderungen für ein Abrechnungsmanagementsystem und müssen im

Ausschreibungsprozess als notwendig (Muss-Kriterium) spezifiziert werden. Sofern gewünscht, sollten die Parameter möglichst genau benannt und eine Systemausführung für eine eichrechtskonforme Abrechnung gefordert werden.

Lademanagementsysteme

Wie anhand der dargestellten Lastgangoptimierungen ersichtlich ist, sind entsprechende Managementsysteme für den Anwendungsfall der MVB 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.

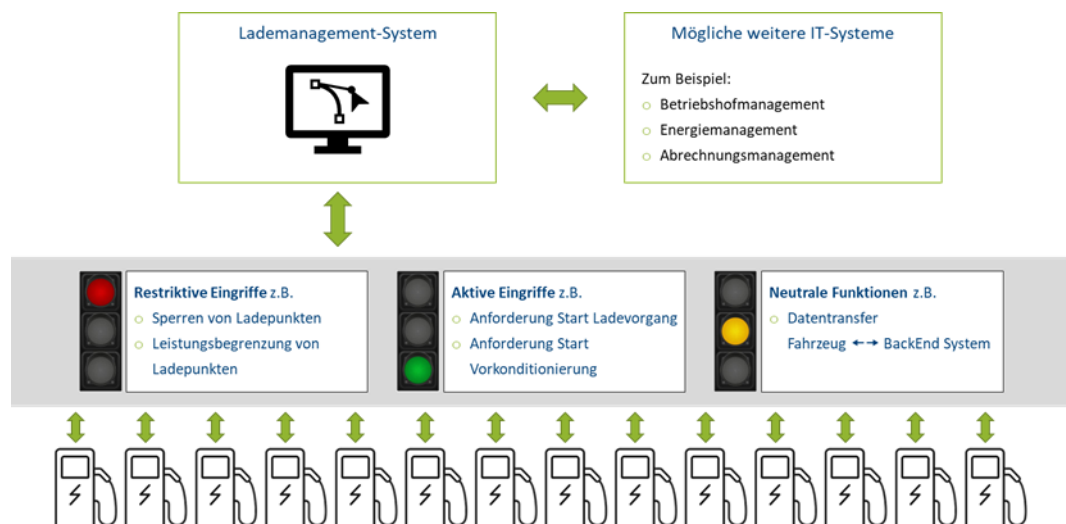


Abb. 74: Lademanagementsystem Informationsebene

Grundsätzlich kann ein Lademanagementsystem Funktionen aus drei Kategorien abdecken:

- Restriktive Eingriffe
Restriktive Eingriffe blockieren Funktionen oder den Umfang von Funktionen und Aktionen, die ansonsten ausgeführt werden würden, um die Gesamtheit der Ladevorgänge zu optimieren. Dies betrifft zum Beispiel das zeitweilige Sperren von Ladepunkten oder die Begrenzung von Ladeleistungen an einzelnen Ladepunkten. Selbstverständlich können die Eingriffe auch auf einen größeren Umfang bezogen sein und ganze Systemeinheiten sperren oder limitieren.
- Aktive Eingriffe
Aktive Eingriffe lösen Aktionen aus, die ohne einen Eingriff zu diesem Zeitpunkt nicht erfolgen würden. Das Managementsystem versendet in diesem Fall eine Anforderung an das Fahrzeug, bestimmte Aktionen einzuleiten. Beispielsweise den Start eines Lade- oder eines Vorkonditionierungsvorgangs. Nach Erhalt der Aufforderung stellt das Fahrzeug seinerseits eine Leistungsanfrage an das Ladesystem, um den Vorgang zu starten.
- Neutrale Funktionen
Ergänzend kann das Lademanagementsystem neutrale Funktionen umsetzen, die keine Aktion zur Folge haben. Dies betrifft im Wesentlichen den Austausch diverser Datensätze über die Kommunikationsschnittstelle zum Fahrzeug, um diese an angebundene IT-Systeme weiterzureichen oder in eigenen Softwareroutinen auszuwerten. Grundsätzlich könnten alle Datensätze aus der Fahrzeugsteuerung übertragen werden. Typische Beispiele sind der Ladestand der Batterie oder der Kilometerstand.

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 Magdeburg.

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 überschaubaren 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)

Im Bereich der Softwareanbieter für den ÖPNV-Bereich bieten die Firmen PSI Transcom, init innovation in traffic systems, IVU Traffic Technologies und Verkehrsautomatisierung Berlin entsprechende Erweiterungen zu ihren Software-Suiten speziell für den Einsatz von Elektrobussen an, z.B. Last- und Lademanagement, Umlaufplanungen für Elektrobusse, Betriebshof-managementsysteme. Andere Hersteller wie z.B. die Firma Sinos haben sich auf das Lade- und Energiemanagement spezialisiert.

3.7 Anforderung an Errichtung und Betrieb

3.7.1 Genehmigungsverfahren

Im Zuge der Umstellung auf eine emissionsfreie Busflotte auf Basis alternativer Antriebstechnologien in Form von batterieelektrischen Systemen oder Wasserstoff-Brennstoffzellentechnologie, ergeben sich für die MVB umfassende gesetzliche, technische und organisatorische Anforderungen. Diese betreffen sowohl die bauliche und energiewirtschaftliche Erschließung der erforderlichen Ladeinfrastruktur für Elektrobusse als auch die Errichtung und den sicheren Betrieb potenzieller Wasserstofftankstellen auf den Betriebshöfen.

Neben den planerischen und genehmigungsrechtlichen Fragestellungen rücken zunehmend auch die arbeits- und sicherheitstechnischen Voraussetzungen für den Betrieb der Anlagen in den Fokus. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf die Integration von Hochvoltkomponenten, die Handhabung von Wasserstoff als Gefahrstoff sowie die damit verbundenen betrieblichen Gefährdungspotenziale.

Nachfolgend werden daher sämtliche relevanten Genehmigungs-, Anzeige- und Berichtspflichten übersichtlich dargestellt und sowohl die rechtlichen Rahmenbedingungen auf Bundesebene als auch die spezifischen Vorgaben des Landes Sachsen-Anhalt berücksichtigt. Darüber hinaus werden die arbeitsschutzrechtlichen Anforderungen im Detail beleuchtet, die erforderlich sind, um einen sicheren und rechtskonformen Betrieb beider Infrastrukturoptionen sowie den Gesundheitsschutz der Beschäftigten gewährleisten und nachweisen zu können.

Baurechtliche Anforderungen

Die Errichtung stationärer Ladeinfrastruktur auf dem Betriebshof der MVB ist baurechtlich relevant und erfordert in der Regel eine formale Baugenehmigung. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Ladeeinrichtungen in überdachten baulichen Anlagen (z. B. Carport-Konstruktionen oder Hallen) installiert werden oder wenn zusätzliche bauliche Anlagen wie Technikcontainer, Trafostationen oder Fundamente errichtet werden sollen. Die Genehmigungspflicht ergibt sich aus der Bauordnung des Landes Sachsen-Anhalt (BauO LSA) in Verbindung mit dem Baugesetzbuch (BauGB). Die zuständige Behörde ist die jeweilige lokale untere Bauaufsichtsbehörde, welche im Falle der MVB der bei der Stadt Magdeburg ansässige Fachdienst für Bauordnung und Denkmalschutz ist.

Diese baurechtlichen Anforderungen gelten in gleicher Weise für die Errichtung von Wasserstoff-tankstelleninfrastruktur. Auch hier handelt es sich um bauliche Anlagen im Sinne des Bauordnungsrechts. Darüber hinaus kann die Errichtung von Wasserstofftanktechnik zusätzliche Anforderungen an Abstandsflächen, Sicherheitszonen und Brandschutzmaßnahmen nach sich ziehen, die im Rahmen des Baugenehmigungsverfahrens berücksichtigt werden müssen.

Die baurechtliche Prüfung umfasst neben der grundsätzlichen planungsrechtlichen Zulässigkeit der baulichen Nutzung auch Fragen der Erschließung, der Entwässerung, des Brandschutzes sowie der Standsicherheit der Anlagen. Da die Lade- und Tankinfrastruktur ausschließlich auf Betriebshöfen der MVB und nicht im öffentlichen Raum errichtet wird, kann unter Umständen eine privilegierte Zulässigkeit gegeben sein, sofern es sich um eine betriebsbezogene Erweiterung handelt. Gemäß der BauO LSA ist dies zwar nicht konkret vorgesehen, dennoch wird empfohlen, frühzeitig eine bauplanungsrechtliche Voranfrage zu stellen und anschließend die Antragsunterlagen in enger Abstimmung mit einem bauvorlageberechtigten Planungsbüro zu erstellen.

Energiewirtschaftliche Anzeigepflichten

Mit dem Anschluss leistungsstarker Ladeinfrastruktur an das Stromnetz geht eine energiewirtschaftliche Anzeigepflicht gegenüber dem jeweiligen Verteilnetzbetreiber (VNB) einher. Diese Pflicht ergibt sich aus dem Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) sowie der Niederspannungsanschlussverordnung (NAV). Jede elektrische Anlage mit einer Leistung über 12 kVA ist dem Netzbetreiber vor Anschluss anzuzeigen. Bei Ladeleistungen, wie im hier vorliegenden Falle, von etwa 150 kW je Ladepunkt in Kombination mit mehreren gleichzeitigen Ladevorgängen an jedem Standort, ist davon auszugehen, dass eine signifikante Belastung des Netzes entsteht. In diesen Fällen ist der VNB verpflichtet, eine Netzverträglichkeitsprüfung durchzuführen. In der Regel ist im Kontext von Busdepots darüber hinaus ein Anschluss ans Mittelspannungsnetz erforderlich. Ebenso werden gegebenenfalls Maßnahmen zur Netzverstärkung oder der Abschluss eines individuellen Netzausbaupertrags benötigt. Die Anzeige beim Netzbetreiber sollte mindestens acht bis zwölf Wochen vor der geplanten Inbetriebnahme erfolgen. Bei umfassenderen Netzanschlussmaßnahmen kann ein noch längerer Vorlauf erforderlich sein. Grundsätzlich gilt es darüber hinaus zu beachten, dass die Netzanschlusskosten auf lokaler Ebene stark variieren können, sodass eine rechtzeitige Voranfrage beim Netzbetreiber empfohlen wird. Hierbei kann von einer durchschnittlichen Dauer der Kostenprüfung von rund zwei Monaten ausgegangen werden.

Sofern auf dem MVB-Betriebshof eine Wasserstofftankstelleninfrastruktur errichtet werden sollte, ergeben sich je nach technischer Auslegung ebenfalls energiewirtschaftliche Anzeigepflichten. Zwar erfolgt die Wasserstoffversorgung häufig über externe Traileranlieferung, jedoch kann insbesondere bei On-Site-Elektrolyse zur Wasserstoffproduktion oder beim Einsatz elektrisch betriebener Kompressoren und Kühlanlagen ein erheblicher Strombedarf entstehen. Wird ein Elektrolyseur oder eine vergleichbare Anlage betrieben, so handelt es sich um eine dauerhaft netzgekoppelte Verbrauchsanlage, die, analog zur Ladeinfrastruktur, ebenfalls gegenüber dem Netzbetreiber anzeigepflichtig ist. Auch hier ist bei Leistungen über 12 kVA eine Voranmeldung erforderlich. Bei größeren Leistungen kann zusätzlich eine Netzverträglichkeitsprüfung notwendig werden.

In beiden Fällen, also sowohl der Lade- als auch der Wasserstoffinfrastruktur, wird eine frühzeitige Abstimmung mit dem zuständigen Verteilnetzbetreiber empfohlen, um die lokalen Netzkapazitäten zu prüfen, die technische Anschlussbedingungen zu klären und etwaige Investitionen in die Erschließung zu planen.

Immissionsschutzrechtliche Bewertung

Obwohl Ladeinfrastruktur grundsätzlich nicht unter die genehmigungspflichtigen Anlagen nach der vierten Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) fällt, kann dennoch eine immissionsschutzrechtliche Relevanz bestehen, etwa bei der Errichtung und dem Betrieb von Hilfsaggregaten wie Diesel-Notstromanlagen oder geräuschintensiven Transformatoren oder Ladegeräten. In solchen Fällen können auflagenbezogene Maßnahmen zur Lärminderung erforderlich werden. Es wird daher empfohlen, im Planungsprozess eine lärmtechnische Vorprüfung durchzuführen und die untere Immissionsschutzbehörde frühzeitig einzubinden.

Gleiches gilt für Wasserstofftankstelleninfrastruktur, insbesondere wenn Druckspeicher, Verdichteranlagen oder elektrolysebasiertes Equipment mit nennenswerter Geräuscentwicklung betrieben werden. Zusätzlich zur Lärmproblematik kann bei wasserstoffführenden Komponenten eine besondere immissionsschutzrechtliche Einstufung relevant werden, wenn wassergefährdende Stoffe (z. B. Kühlmedien, Schmiermittel) oder explosionsfähige Stoffe auftreten. Auch wenn Wasserstoff selbst nicht als immissionsrelevanter Stoff im klassischen Sinne gilt, können

Emissionen aus Sicherheitsventilen oder Leckagen im Störfall eine Rolle spielen. Deshalb wird bei Wasserstofftankstellen eine umwelttechnische Begutachtung mit Fokus auf Geräuschemissionen, sicherheitstechnische Abluftführung und ggf. Geruchsbelästigung ebenfalls als sinnvoll erachtet. Auch wenn Wasserstofftankstellen, wie beschrieben, in vielen Fällen nicht unter die Genehmigungspflicht nach der vierten BImSchV fallen, ist zu beachten, dass ab einer Speicherkapazität von mehr als drei Tonnen eine immissionsschutzrechtliche Genehmigung benötigt wird. Sofern dieser Wert, wie bei Vorhaben in Busdepots üblich, nicht überschritten wird, bedarf es lediglich einer Baugenehmigung und Berücksichtigung der weiteren nachfolgend dargestellten rechtlichen Anforderungen.

In beiden Fällen wird empfohlen frühzeitig auf die untere Immissionsschutzbehörde der Stadt Magdeburg zuzugehen, um genehmigungsrechtliche Spielräume, etwaige Anzeige- oder Dokumentationspflichten sowie standortspezifische Schutzauflagen zu klären.

Umwelt- und Bodenschutzrechtliche Aspekte

Sofern auf den Betriebshöfen Tiefbauarbeiten zur Errichtung von Fundamenten, Kabeltrassen oder technischen Anlagen durchgeführt werden, ist eine Überprüfung auf Altlasten durchzuführen. Dies gilt insbesondere für Betriebshöfe mit industrieller Vornutzung oder unklarer Flächengeschichte. Die Verantwortung für diese Prüfung liegt bei der jeweils zuständigen unteren Bodenschutzbehörde. Werden kontaminierte Böden angetroffen oder bearbeitet, können zusätzliche Sanierungsmaßnahmen nach den Vorgaben des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG) sowie den landesrechtlichen Regelungen erforderlich werden.

Gleiches gilt für Standorte, an denen im Rahmen des Infrastrukturbaus wassergefährdende Stoffe verwendet oder gelagert werden. Sollte sich ein Betriebshof in einem Wasserschutzgebiet befinden, sind wasserrechtliche Genehmigungen nach dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG) sowie dem Landeswassergesetz Sachsen-Anhalt erforderlich. Dies betrifft insbesondere die Errichtung von Transformatorstationen, Batteriespeichern oder die Versiegelung großer Flächen mit entsprechendem Entwässerungskonzept.

Mit Blick auf die mögliche Errichtung einer Wasserstofftankstelleninfrastruktur sind diese Anforderungen nochmals verschärft zu bewerten. Wasserstoffanlagen enthalten in der Regel technische Komponenten wie Druckbehälter, Verdichter oder Gasleitungen, bei denen Leckagen, Emissionen oder Zwischenmedien (z. B. Schmierstoffe, Kühlmittel) eine Umweltrelevanz entfalten können.

Auch die Ableitung von Oberflächenwasser, insbesondere bei betankungsaktiven Flächen im Außenbereich, muss umwelttechnisch betrachtet und gegebenenfalls genehmigt werden. Es ist daher dringend anzuraten, bereits in der frühen Planungsphase eine wasserrechtliche Vorprüfung durchzuführen und die untere Wasserbehörde frühzeitig in die Projektentwicklung einzubinden.

Meldepflicht gegenüber der Bundesnetzagentur und Berücksichtigung der LSV

Im Zusammenhang mit der Errichtung und dem Betrieb von Ladeinfrastruktur kommt häufig die Frage auf, inwiefern eine Meldepflicht gegenüber der Bundesnetzagentur besteht. Eine solche Pflicht ergibt sich aus der Ladesäulenverordnung (LSV), die jedoch dem Wortlaut nach ausschließlich Ladepunkte, die öffentlich zugänglich sind, adressiert. Da im Falle der MVB die Errichtung von nicht-öffentlicher Ladeinfrastruktur auf den Betriebshöfen vorgesehen ist, welche ausschließlich dem Laden der eigenen E-Bus-Flotte dienen sollen, besteht in diesem Kontext

zunächst einmal keine Meldepflicht und eine Eintragung in das öffentliche Ladesäulenregister entfällt somit.

Sofern jedoch perspektivisch auch Dritte Zugang zur Tankinfrastruktur erhalten sollen, ist eine individuelle Prüfung hinsichtlich der Anzeigepflichten durchzuführen.

Für Wasserstofftankstellen besteht aktuell keine vergleichbare bundeseinheitliche Meldepflicht gegenüber der Bundesnetzagentur, da die Ladesäulenverordnung ausschließlich elektrische Ladepunkte regelt und Wasserstofftankstellen somit nicht in den Anwendungsbereich der LSV fallen.

Eichrechtliche Anforderungen

Ladeeinrichtungen unterliegen, auch wenn sie ausschließlich auf dem MVB-Betriebshof für den Eigenbedarf genutzt werden, dem deutschen Mess- und Eichrecht, sofern die verbrauchte elektrische Energie als kWh-Einheit extern bzw. intern weiterverrechnet oder bilanziert wird. Die maßgeblichen Rechtsgrundlagen sind das Mess- und Eichgesetz (MessEG) und die Mess- und Eichverordnung (MessEV). Die MVB wäre in diesem Falle verpflichtet, jede eichpflichtige Ladesäule spätestens sechs Wochen nach der Inbetriebnahme beim zuständigen Landeseichamt Sachsen-Anhalt anzuzeigen. Die Eichgültigkeit beträgt grundsätzlich acht Jahre. Eine Verlängerung ist rechtzeitig, spätestens aber zehn Wochen vor Ablauf der Eichfrist, zu beantragen. Jegliche Veränderungen an den Messeinrichtungen, wie beispielsweise durch Softwareupdates, Umbauten oder Kalibrierungen, machen eine erneute Eichung erforderlich. Die Anforderungen an Transparenz, Manipulationssicherheit und die Signierung der Messdaten gelten unabhängig davon, ob die Ladesäule öffentlich oder ausschließlich betriebsintern genutzt wird.

Auch im Bereich der Wasserstofftankstelleninfrastruktur kann das Eichrecht relevant werden, insbesondere dann, wenn der abgegebene Wasserstoff mengenmäßig erfasst und zur internen Verrechnung, zur Verbrauchsstatistik oder im Rahmen einer geförderten Betriebsabrechnung genutzt wird.

Auch hier müssen die verwendeten Wasserstoffzähler dem Stand der Technik entsprechen, manipulationssicher sein und die erfassten Daten transparent dokumentieren. Zwar sind derzeit eichrechtlich zugelassene Wasserstoffzähler noch im Aufbau bzw. nicht flächendeckend verfügbar, dennoch gelten bereits jetzt technische Mindestanforderungen sowie Anzeigepflichten gegenüber dem zuständigen Eichamt, sobald eine eichpflichtige Verwendung vorgesehen ist.

Elektrische Sicherheit und Prüfvorgaben

Sämtliche Ladeeinrichtungen gelten als elektrische Betriebsmittel im Sinne der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) sowie der Unfallverhütungsvorschriften der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV Vorschrift 3). Vor der Inbetriebnahme ist daher eine fachgerechte sicherheitstechnische Prüfung durch eine hierzu befähigte Elektrofachkraft durchzuführen. Diese Erstprüfung umfasst unter anderem die Kontrolle der ordnungsgemäßen Installation, die Überprüfung der elektrischen Schutzmaßnahmen sowie die Funktionsprüfung der Ladeeinrichtungen im regulären Betriebsmodus. Die Ergebnisse sind schriftlich zu dokumentieren, aufzubewahren und im Rahmen der betrieblichen Dokumentation jederzeit nachvollziehbar bereitzuhalten.

Ebenfalls sind im laufenden Betrieb wiederkehrende Prüfungen durchzuführen. Die Prüfintervalle richten sich nach den jeweiligen Herstellerangaben, den technischen Gegebenheiten vor Ort sowie den im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung ermittelten betrieblichen Anforderungen. Die

technische Ausführung der Ladeinfrastruktur muss den anerkannten Regeln der Technik entsprechen. Insbesondere sind hier die Normen DIN VDE 0100-722 (Anforderungen für die Stromversorgung von Elektrofahrzeugen) sowie DIN EN 61851 (Ladesysteme für Elektrofahrzeuge) verbindlich anzuwenden.

Ergänzend gelten vergleichbare Anforderungen auch für die elektrischen Komponenten einer Wasserstofftankstelleninfrastruktur. Obwohl Wasserstofftechnik primär druck- und gasbasierte Systeme umfasst, beinhalten moderne Tankstellen wesentliche elektrische Betriebsmittel wie Kompressoren, Steuerungseinheiten, Sicherheitstechnik, Ventilantriebe sowie gegebenenfalls Elektrolyseure zur Vor-Ort-Erzeugung von Wasserstoff. Diese Systeme unterliegen ebenfalls den Vorschriften der BetrSichV sowie der DGUV Vorschrift 3 und sind entsprechend zu prüfen.

Bei wasserstofftechnischen Anlagen mit höherem Gefährdungspotenzial, etwa in explosionsgefährdeten Bereichen (Ex-Zonen), sind darüber hinaus die spezifischen Anforderungen der DIN EN 60079-Reihe (elektrische Betriebsmittel für gasexplosionsgefährdete Bereiche) zu beachten. Die Prüfung und Wartung dieser Anlagen dürfen ausschließlich durch hierfür qualifiziertes Personal mit Ex-Schutz-Zertifizierung durchgeführt werden.

In beiden Infrastrukturformen ist sicherzustellen, dass alle Prüfungen rechtzeitig erfolgen, dokumentiert sind und bei technischen Änderungen (z. B. Softwareupdates, Komponententausch) erneut durchgeführt werden, sofern sie sicherheitsrelevant sind.

Arbeitsschutzrechtliche Anforderungen

Im Zuge der schrittweisen Umstellung auf emissionsfreie Antriebe entstehen für die MVB tiefgreifende Veränderungen in den betrieblichen Abläufen und der technischen Infrastruktur. Sowohl mit der Einführung elektrisch angetriebener Busse als auch der parallelen Entwicklung wasserstoffbasierter Antriebslösungen gehen auch erhebliche Anforderungen im Bereich des Arbeits- und Gesundheitsschutzes einher. Die MVB wird in diesem Zuge verpflichtet sein, sämtliche mit dem Aufbau und Betrieb der neuen Lade- bzw. Betankungssysteme verbundenen Gefährdungslagen systematisch zu erfassen und entsprechende Schutzmaßnahmen zu ergreifen. Dies betrifft sowohl die Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Fahrzeuge als auch die technische Einrichtung und den Betrieb von Wasserstofftankstellen, sofern diese auf den Betriebshöfen realisiert werden.

Grundlage aller betrieblichen Arbeitsschutzmaßnahmen ist das Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG). Es verpflichtet Arbeitgeber nach §§ 3, 5 und 6 dazu, sämtliche Gefährdungen am Arbeitsplatz – physikalischer, chemischer oder biologischer Natur – zu ermitteln, zu bewerten und geeignete Schutzmaßnahmen zu ergreifen. Diese Verpflichtung gilt auch für neue Technologien, die im Betrieb eingeführt werden. Vor dem Hintergrund der Einführung von Hochvoltkomponenten, Lithium-Ionen-Batterien sowie wasserstofftechnischen Anlagen ergibt sich daraus die Notwendigkeit einer strukturierten, technologieübergreifenden Gefährdungsbeurteilung. Die daraus abgeleiteten Maßnahmen müssen dem Schutz der Beschäftigten ebenso dienen wie der Sicherung der betrieblichen Anlagen und der Umgebung.

Ergänzt wird das ArbSchG insbesondere durch die Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV), die den sicheren Betrieb technischer Arbeitsmittel regelt. Ladepunkte, Stromverteilungen, Wasserstoffleitungen, Drucktanks und zugehörige Steuer- und Sicherheitssysteme fallen allesamt in den Anwendungsbereich dieser Verordnung. Vor der Inbetriebnahme sind sämtliche relevanten technischen Einrichtungen durch befähigte Fachkräfte zu prüfen. Die Ergebnisse der Prüfungen sind zu dokumentieren und in regelmäßigen Abständen zu wiederholen. Ebenso sind

Betriebsanweisungen zu erstellen, welche den ordnungsgemäßen Umgang mit den Anlagen, Notfallabläufe und die Zuständigkeiten im Störfall beschreiben.

Für die räumliche Ausgestaltung der Lade- und Tankinfrastruktur sind zudem die Anforderungen der Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) zu berücksichtigen. Diese betreffen unter anderem die Gestaltung von Verkehrs- und Fluchtwegen, die Sicherheitskennzeichnung von Gefahrenbereichen, die Belüftung von Tankzonen sowie die Beleuchtung von Arbeitsplätzen im Umfeld der Infrastruktur. Die Einhaltung dieser Vorgaben ist insbesondere in Hallen und auf Betriebshöfen von Bedeutung, in denen regelmäßig mit brennbaren oder hochenergetischen Systemen gearbeitet wird.

In der Bauphase beider Infrastrukturen gelten die Vorschriften der Baustellenverordnung (BaustellV). Dabei ist in der Regel ein Sicherheits- und Gesundheitsschutzplan (SiGe-Plan) anzufertigen und fortzuschreiben. Die MVB wird in diesem Zuge verpflichtet sein, die Umsetzung der Maßnahmen zu überwachen und zu dokumentieren.

Im Betrieb der Ladeinfrastruktur entstehen insbesondere Gefährdungen im Zusammenhang mit Hochvoltkomponenten, thermischen Belastungen und den chemischen Risiken bei defekten oder beschädigten Lithium-Ionen-Batterien. Die sichere Abstellung verunfallter E-Busse muss in ausreichend freier Umgebung mit Schutzabstand erfolgen, um mögliche Brandausbreitung zu verhindern. Akkus mit potenziellen Defekten sind in feuerbeständigen, geschlossenen Behältern, wie zum Beispiel Metallgefäßen, zu lagern. Die Ladevorgänge selbst sind durch geeignete Batteriemanagementsysteme (BMS) zu überwachen. In diesem Kontext sind insbesondere die Vorgaben der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) zu berücksichtigen, da im Störungs- oder Brandfall der Akkumulator als gefährlicher Stoff eingestuft werden können. Auch Lichtbogengefahren oder unsachgemäßer Kontakt mit Stromquellen sind durch entsprechende Maßnahmen zu minimieren, unter anderem mit Lichtbogenschutzkleidung gemäß PSA-Benutzungsverordnung (PSA-BV).

Für Wasserstofftankstellen ergeben sich ergänzend umfangreiche arbeitsschutzrechtliche Anforderungen. Der Umgang mit Wasserstoff als hochentzündlichem Gas unter Druck unterliegt der Gefahrstoffverordnung, der Betriebssicherheitsverordnung sowie verschiedenen Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS 407, 510, 720 ff.). Wasserstoffanlagen sind hinsichtlich möglicher Explosionsgefahren in sogenannte Ex-Zonen einzuteilen. Zu den verpflichtenden Maßnahmen zählen unter anderem Gaswarnsysteme, Belüftungsanlagen, druckstoßfeste Behälter, Sicherheitsventile sowie die Einhaltung festgelegter Sicherheitsabstände zu benachbarten Anlagen. Für alle Tätigkeiten im Ex-Bereich ist ein Explosionsschutzdokument zu erstellen. Die TRBS 3151/2 sowie TRGS 720–722 regeln zudem technische und organisatorische Maßnahmen zum Explosionsschutz bei Lagerung und Verteilung. Hierbei ist auch die örtliche Feuerwehr frühzeitig einzubinden, um im Rahmen des Notfallmanagements geeignete Brandbekämpfungsstrategien festzulegen.

Unabhängig vom Antriebssystem gilt für alle Beschäftigten, die an Lade- oder Tanktechnik arbeiten, eine Qualifikationspflicht. Für Arbeiten an Hochvoltsystemen ist die Schulung gemäß DGUV Information 209-093 erforderlich. Sie beschreibt abgestufte Qualifikationsstufen, je nach Art der Tätigkeit und Gefährdungslage. Mitarbeitende, die in explosionsgefährdeten Bereichen tätig sind, benötigen ebenfalls eine spezielle Unterweisung, deren Inhalte dokumentiert und regelmäßig aufgefrischt werden müssen.

Darüber hinaus ist im Rahmen der arbeitsmedizinischen Vorsorge gemäß der Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge (ArbMedVV) sicherzustellen, dass Beschäftigte mit besonderen

Gefährdungen – etwa durch Strom, chemische Reaktionen oder körperliche Belastungen – anlassbezogen oder regelmäßig medizinisch betreut werden. Die Einbindung arbeitsmedizinischer und sicherheitstechnischer Fachkompetenz ist hierbei verpflichtend und muss kontinuierlich erfolgen.

Für alle Maßnahmen sind die berufsgenossenschaftlichen Vorschriften ergänzend zu beachten. Die DGUV Vorschrift 1 „Grundsätze der Prävention“ regelt allgemeine Anforderungen an das betriebliche Arbeitsschutzsystem. Die DGUV Vorschrift 2 verpflichtet zur Bestellung von Betriebsärzten und Fachkräften für Arbeitssicherheit. Besonders relevant ist im technischen Kontext die DGUV Vorschrift 3 „Elektrische Anlagen und Betriebsmittel“, die alle Ladeeinrichtungen, Transformatoren und elektrischen Betriebsmittel erfasst. Diese müssen regelmäßig durch qualifizierte Elektrofachkräfte geprüft und protokolliert werden.

Sowohl für Lade- als auch Tankinfrastruktur ist darüber hinaus ein umfassendes Notfallmanagement aufzubauen. Dieses umfasst Evakuierungs- und Brandbekämpfungspläne, die Definition von Alarmwegen, Erste-Hilfe-Maßnahmen sowie regelmäßige Notfallübungen. Auch hier ist die Abstimmung mit der örtlichen Feuerwehr obligatorisch und sollte bereits in der Planungsphase erfolgen.

Insgesamt zeigt sich, dass die Einführung alternativer Antriebstechnologien erhebliche Auswirkungen auf den betrieblichen Arbeits- und Gesundheitsschutz hat. Die MVB wird in diesem Kontext verpflichtet sein, sowohl die Errichtung als auch den Betrieb der Lade- und Wasserstofftankstelleninfrastruktur arbeitsschutzrechtlich umfassend abzusichern. Die Einhaltung der geltenden gesetzlichen Vorschriften, die fortlaufende Qualifizierung der Beschäftigten sowie die aktive Einbindung von Fachkräften und Behörden sind grundlegende Voraussetzungen für einen sicheren und nachhaltigen Betrieb der neuen Infrastruktur.

Schlussfolgerungen

Die Umstellung auf eine emissionsfreie Busflotte und der damit verbundene Aufbau alternativer Energieinfrastrukturen, in Form von Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Busse sowie von Wasserstofftankstellen, stellen für die MVB ein komplexes und genehmigungsintensives Vorhaben dar. Sowohl in der Planungs- als auch in der Umsetzungsphase sind zahlreiche rechtliche, technische und organisatorische Anforderungen zu beachten, die sich aus bundesrechtlichen Regelungen, landesspezifischen Vorgaben in Sachsen-Anhalt sowie den technischen Normen und arbeitsschutzrechtlichen Vorschriften ergeben.

Die Errichtung beider Infrastrukturen auf Betriebshöfen erfordert eine frühzeitige bau- und energiewirtschaftliche Abstimmung mit den zuständigen Behörden, insbesondere mit den örtlichen Bauaufsichtsämtern, Verteilnetzbetreibern, der unteren Immissionsschutz- und Wasserbehörde sowie mit den jeweiligen Fördermittelgebern. Ergänzend sind anzeige- und prüfpflichtige Sachverhalte im Kontext des Mess- und Eichrechts, des Betriebssicherheitsrechts und der DGUV-Vorgaben zu berücksichtigen.

Besonders relevant ist darüber hinaus die konsequente Umsetzung aller arbeitsschutzrechtlichen Anforderungen. Die neuen technischen Systeme – sowohl im Bereich Hochvolt und Ladeelektrik als auch im Kontext von Druckanlagen und wasserstoffführenden Komponenten – bringen spezifische Gefährdungslagen mit sich, denen durch strukturierte Gefährdungsbeurteilungen, qualifizierte Schulungen, geeignete persönliche Schutzausrüstung sowie klare Notfall- und Betriebsabläufe begegnet werden muss.

Insgesamt erfordert die Umsetzung des vorliegenden Vorhabens eine vorausschauende Planung, strukturierte Kommunikation mit allen relevanten Akteuren sowie eine frühzeitige Berücksichtigung aller genehmigungs- und arbeitsschutzrelevanten Aspekte, um eine rechtssichere und nachhaltige Realisierung der Flottenumstellung bei der MVB gewährleisten zu können.

3.7.2 Synergien und Verträglichkeit zu Straßenbahninfrastruktur

Grundsätzlich sind die Synergien zwischen Straßenbahn- und Bussektor überschaubar. Möglich ist ein Wissenstransfer der technischen Berufsfelder (Hochvolttechnik) in den Bussektor, wo bisher Elektroantriebe nicht im Fokus stehen.

Darüber hinaus gibt es wenig Synergieoptionen, da das Straßenbahnnetz getrennt von der Elektrobustchnik betrieben wird. Ausnahme stellen hier mögliche Schnelladestationen an Wendestellen dar, wenn Anschlusspunkte an das Straßenbahn-Oberleitungsnetz erreichbar sind und ausreichende Netzkapazitäten vorhanden sind. Sofern die Rahmenbedingungen erfüllt sind, ist eine Versorgung der Ladeinfrastruktur aus dem Straßenbahnnetz denkbar. Dabei muss sichergestellt sein, dass die Ladevorgänge mit ausreichender Leistung über die notwendigen Zeitintervalle ausgeführt werden können.

Bei Einsatz von Wasserstofftechnik ist zu berücksichtigen, dass Sicherheitsabstände zum Straßenbahnsystem eingehalten werden müssen, da die Funkenbildung am Stromabnehmer eine Zündquelle darstellen kann.

3.7.3 Möglichkeit zur Produktion von eigenem Strom

Erneuerbar erzeugte Energie bietet sich grundsätzlich gut für die Verwendung in einer batterieelektrischen Fahrzeugflotte an. Auch wenn Windkraftanlagen dabei technisch unproblematisch, stellen im städtischen Umfeld Photovoltaikanlagen hier praktisch die einzige gangbare Alternative dar.

Einer Nutzung von ‚Sonnenenergie‘ in der elektrischen Fahrzeugflotte steht die Diskrepanz von Erzeugung und Nutzung im Wege. Während die Fahrzeugnachladung primär über Nacht erfolgt, wird Strom aus PV-Anlagen über den Tag gewonnen. Auch wenn am Tag diverse Fahrzeuge zwischenladen, sind für eine hohe Eigennutzungsquote im Allgemeinen stationäre Batteriespeicher erforderlich.

Die Auslegung einer sinnvollen Speichergröße ist dabei abhängig von den Ausbauplänen der Erzeugungsinfrastruktur und letztlich auch der Busflotte. Entsprechende Analysen und Konzepte sind üblicherweise nicht trivial und im Rahmen einer Detailuntersuchung anzusiedeln. Maßgeblich ist hier eine Wirtschaftlichkeitsrechnung, bei der verschiedene Speichergrößen im Kontext der Bezugs- und Einspeisekosten mit einer Energieertragsprognose überlagert werden.

4 AP 4 Betrachtung der Kosten des Einsatzes von Bussen mit alternativen Antrieben

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 2035 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 Dieselbusse 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.

Die wirtschaftliche Betrachtung erfolgt dabei anhand der Kostenstrukturen der MVB auf Ebene betrieblicher Funktionsbereiche. Diese Struktur wird in der folgenden Tabelle verdeutlicht.

Kategorie	Funktionsbereich
Betrieb	Fahrdienst
	Disposition
	Bereitstellung
	Überwachung/Steuerung
Fahrzeug	Instandhaltung
	Fahrzeugvorhaltung
	Treibkraft
Overhead	Vertrieb/Marketing
	Planung
	Verwaltung/Zentrale Dienste
Rest	sonstige Funktionsbereiche

Tab. 25: Kostenstruktur auf Funktionsbereichsebene

Aus der Gewinn- und Verlustrechnung (GuV) und der dazugehörigen Kostenstellenrechnung der MVB für das Geschäftsjahr 2024 wurden die entsprechenden Aufwendungen der einzelnen Funktionsbereiche für die Darstellung eines Status quo abgeleitet. Dies dient insbesondere als Basis zur Fortschreibung der Aufwendungen nach Funktionsbereichen hinsichtlich der beiden betrachteten Szenarien.

Im Vorfeld der eigentlichen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden zunächst die anzusetzenden Prämissen und Eingangsdaten definiert und quantifiziert. Diese lassen sich hinsichtlich der Blöcke „Investitionen“ und „Betrieb“ unterscheiden. Es wurden hierbei alle betrieblichen Funktionsbereiche identifiziert, in denen sich die anfallenden Aufwendungen im Zuge der Flottentransformation nach Art und Umfang verändern. Alle fahrzeug-, ladeinfrastruktur- und werkstattbezogenen Investitionsausgaben lassen sich dagegen dem Block Investitionen zuordnen. Die Investitionen für die

Fahrzeuge und die Ladeinfrastruktur werden hierbei unter dem Funktionsbereich Fahrzeugvorhaltung zusammen erfasst. Die werkstattbezogenen Investitionen werden dagegen dem Funktionsbereich Instandhaltung zugeordnet.

Darüber hinaus hat die Flottentransformation auch Auswirkungen auf die betrieblichen Aufwendungen. Diese unterscheiden sich zwischen den Szenarien in den Funktionsbereichen Treibkraft, Instandhaltung, Fahrdienst und Überwachung/Steuerung.

4.1 Prämissen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

4.1.1 Investitionen

Fahrzeuge

Die **Anschaffungspreise** konventioneller Diesel- und batterieelektrischer Busse unterscheiden sich zum derzeitigen Stand noch um den einen Faktor ~ 2 . Aus den Marktdaten gehen aktuelle Anschaffungskosten für konventionelle Dieselbusse als Solo-Fahrzeug in Höhe von etwa 312 T€ und für Gelenkfahrzeuge mit gleichem Antrieb von gut 423 T€ hervor. Diese Anschaffungskosten der Dieselfahrzeuge werden mit 1,5 % p. a. fortgeschrieben. Mit Blick auf das aktuelle Batteriebusangebot und Informationen zu Anschaffungskosten aus vergleichbaren Projekten liegen aktuell die Preise für einen Solo-Batteriebus bei ca. 600 T€ und für einen Gelenk-Batteriebus bei ca. 850 T€. Diese Investitionsmehrkosten können ggf. durch eine entsprechende Förderung reduziert werden.

Die aktuellen Anschaffungspreise finden sich derzeit in einem Umfeld eines noch jungen Marktes wieder, der von staatlicher Seite erheblich gefördert und beeinflusst wird. Die Batteriebusnachfrage erfuhr, wie bereits gezeigt, in den letzten Jahren ein exponentielles Wachstum, welches sich in Anbetracht der vorherrschenden Planungen auch in den kommenden Jahren fortsetzen wird. Für die Bushersteller kann diese Entwicklung der Nachfrage eine deutliche **Kostendegression** mit zunehmender Produktionsmenge und Standardisierung bedeuten und soll im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung angenommen werden. Der Anschaffungspreis wird vor diesem Hintergrund ab dem Jahr 2029 für Solo-Batteriebusse mit 510 T€ und für Gelenk-Batteriebusse mit 723 T€ angesetzt. Dies entspricht einer Kostenreduktion von ca. 15 % im Vergleich zu den heutigen Anschaffungspreisen.

Für die Ermittlung der jeweiligen Abschreibungen auf die Fahrzeuge wird entsprechend der kaufmännischen Praxis der MVB eine Abschreibungsdauer von 12 Jahren und Restwerte in Höhe von 2 % des Anschaffungswertes angesetzt.

Lade- bzw. Betankungsinfrastruktur

Der Aufbau der Ladeinfrastruktur wird in mehreren Stufen empfohlen. Die hierbei anfallenden Investitionsausgaben für die vorbereitenden Elektroinstallationen (für Transformatoren, Ladegeräte und Gehäuse, Verkabelungen), die Elektroinstallationen pro Fahrzeug bzw. Ladepunkt (LP) (Ladestecker bzw. Ladehauben, Kabel, Software) und die anfallenden Tiefbau- und Stahlarbeiten. Die Abschreibung der Elektroinstallationen pro Fahrzeug erfolgt über zehn Jahre, alle übrigen Bestandteile der Ladeinfrastrukturkosten erfolgt über 20 Jahre. Bei dem Ausbau der Ladeinfrastruktur wird zunächst ausschließlich der bisherige Standort in Magdeburg betrachtet.

Je nach Umstellungsszenario fallen die Ausbaustufen auf dem Betriebsgelände entsprechend dem unterschiedlichen Hochlauf des Batteriebus-Flottenanteils bei der MVB zu unterschiedlichen Zeitpunkten an.

Werkstattinfrastruktur

Die E-Bus-Flottentransformation hat nicht nur Auswirkungen auf den Betriebshof, sondern stellt auch neue Anforderungen an die Werkstatt, die zusätzliche Werkstattausstattungen erfordern.

Ein Dacharbeitsstand wird im Rahmen der E-Bus-Einführung zu einer zentralen Ausstattung der Werkstätten. Von hier aus werden Sicht-, Isolations- und Funktionsprüfungen sowie Instandsetzungsarbeiten u. a. an kritischen Bauteilen des Hochvolt-Systems durchgeführt.

Grundlegend werden folgende weitere Ausstattungen der Werkstatt erforderlich:

- Dacharbeitsbühne,
- Test- und Messgeräte für Elektrobusse,
- mobile Ladegeräte für Zwischenladung der Fahrzeuge,
- persönliche Schutzausrüstung für Mitarbeiter.

Hierfür werden insgesamt Investitionen in Höhe von 200 T€ angesetzt, deren Abschreibung über zehn Jahre erfolgt.

4.1.2 Betriebsbezogene Aufwendungen

Treibkraft

Für die Ermittlung der Treibkraftkosten innerhalb der Szenarien und für die unterschiedlichen Antriebstechnologien der Fahrzeuge werden Treibkraftverbräuche bzw. die Energiebedarfe gemäß den Berechnungen aus Kapitel 3.2.2 angenommen. Für die Dieselsebusse werden die Verbrauchswerte gemäß der Fahrzeugliste der MVB angenommen und in der Fortschreibung beibehalten.

Für die Betrachtungen innerhalb des Untersuchungszeitraums bis zum Jahr 2035 wurden die Preise pro Einheit dynamisiert fortgeschrieben. Hinsichtlich der Diesel-Preise wurden zusätzlich die Entwicklung und Auswirkung der CO₂-Steuer und die dynamischen Preisentwicklungen 2024 berücksichtigt. Darüber hinaus wurden für die Traktionsenergie der Batteriebusse branchenübliche Strompreise angesetzt. Hierbei wurde die Reduzierung der EEG-Umlage für den Betrieb von Elektrobusen gemäß § 65a EEG 2021 berücksichtigt. Die folgende Tabelle zeigt auszugsweise die angesetzten Preise der Treibkraft pro Einheit. Es handelt sich hierbei um Werte mit einem Datenstand aus dem zweiten Quartal des Jahres 2023. In der Zwischenzeit können sich Änderungen in Bezug auf die vorherrschenden Marktpreise der Treibstoffe ergeben.

Jahr	Treibstoffkosten Diesel je l	Treibstoffkosten HVO100 je l	Fahrstromkosten je kWh	Wasserstoffkosten je kg
2024	1,50 €	1,77 €	0,26 €	8,10 €
2025	1,54 €	1,84 €	0,26 €	8,22 €
2030	1,89 €	2,26 €	0,28 €	8,86 €
2035	2,26 €	2,63 €	0,30 €	9,54 €

Tab. 26: Auszug der fortgeschriebenen Preise (netto) für Fahrstrom, Wasserstoff und HVO100

Instandhaltung

Aufgrund der bisherigen Erfahrungen lässt sich in Bezug auf die Wartung und Instandhaltung eine leichte Verringerung der anfallenden Kosten für Verschleißteile und wiederkehrende Instandhaltungsaufgaben bei batterieelektrischen Bussen gegenüber konventionell angetriebener Busse feststellen. Batteriebusse besitzen insgesamt weniger wartungsintensive, mechanisch verschleißende Teile, insbesondere in Bezug auf den Antriebsstrang. Aus diesem Grund wird für die neu eingefloteten Batteriebusse eine kaufmännisch vorsichtige Reduktion der Instandhaltungsaufwendungen von 5 % gegenüber den heutigen Kosten der MVB für konventionelle Busse angesetzt.

So ergeben sich zwar geringere Aufwendungen in Bezug auf die Instandhaltung und Wartung von Batteriebussen, jedoch fällt nach einer gewissen Nutzungsdauer mit einem erforderlichen **Batterietausch** eine kostenintensive batteriebuspezifische Instandhaltungsmaßnahme an. Dieser fällt, je nach Nutzungsprofil und Systemauslegung, erfahrungsgemäß nach fünf bis sieben Einsatzjahren an. Für die Betrachtungen im Rahmen dieser Studie wurde eine Standzeit von sechs Jahren angesetzt. Je nach Szenario wären die ersten Batterien demnach erstmalig im Jahr 2035 zu ersetzen. Für den Ersatz der Traktionsbatterien werden zusätzlich zu den übrigen Instandhaltungsaufwendungen einmalige Aufwendungen in Höhe von 100 T€ für Solo-Batteriebusse und 150 T€ für Gelenk-Batteriebusse angesetzt.

Die sonstigen anfallenden Aufwendungen des Funktionsbereichs Instandhaltung werden zudem mit 1,5 % p. a. fortgeschrieben.

Fahrdienst

Bei den Batteriebus-Szenarien fallen zusätzliche Aufwendungen für Ablösefahrten aufgrund von Umlaufanpassungen an (vgl. Kapitel 2.3.4). Alle anfallenden Personalaufwendungen werden mit 3,0 % p. a. fortgeschrieben.

Sonstiges

Für die geplante Flottentransformation sind Schulungen des Fahr- und Werkstattpersonals erforderlich. Für die Schulung des Fahrpersonals werden Schulungskosten von 300 € pro Mitarbeiter angenommen. Für das Werkstattpersonal wird eine Hochvoltschulung berücksichtigt, die mit 1.500 € pro Mitarbeiter angesetzt wird. Insgesamt werden somit Schulungskosten von ca. 175 T€ berücksichtigt.

Für die weitere Ausarbeitung einer Feinplanung für die Auslegung und Errichtung der Ladeinfrastruktur, der Erstellung von Lastenheften für die Ausschreibung der Fahrzeuge und den Infrastrukturaufbau sowie ein begleitendes Projektmanagement werden zudem zusätzliche Projektkosten angesetzt.

Des Weiteren sind Aufwendungen für die Bauplanung und -überwachung in die Kalkulation zu integrieren. Unter Berücksichtigung der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) werden in einer ersten Abschätzung für Arbeiten hinsichtlich der Schaltpläne und Architektur bzw. Statik 10 % des Infrastrukturinvestitionsvolumens (ohne Fahrzeuge) angenommen. Die Aufwendungen werden über 20 Jahre abgeschrieben.

Die anfallenden Personalaufwendungen der übrigen Funktionsbereiche werden in allen vier Szenarien mit 3,0 % p. a. fortgeschrieben.

4.2 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 Dieselbus um fast 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.

4.2.1 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 Elektrobusen 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 Förder-

volumen 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:
 - o 80 % der Investitionsmehrkosten zur Dieselreferenz für Batterie-, Brennstoffzellen- und Batterieoberleitungsbusse,
 - o 40 % Investitionsmehrkosten zur Dieselreferenz für Bio-Gasbusse,
 - o 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.

4.2.2 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.

4.2.3 Förderung auf Landesebene

Das Land Sachsen-Anhalt 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.

4.3 Kaufmännische Bewertung der Dekarbonisierung der Flotte der MVB

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die MVB dargestellt. Dies erfolgt getrennt für die unterschiedlichen Antriebsarten. Eine Mischflotte wird in Abstimmung mit der MVB 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 Umstellungsszenarios (CVD-Szenario, CVD+-Szenario, Vollumstellungsszenario ab 2028) aufgezeigt. Somit werden die Auswirkungen der unterschiedlichen Migrationspfade einer möglichen Flottentransformation auf das betriebliche Ergebnis der MVB sichtbar. Die Kosten möglicher zusätzlicher Betriebshofflächen sind nicht Bestandteil der folgenden kaufmännischen Bewertung der Flottentransformation der MVB.

4.3.1 Fortschreibung des Status quo als Bezugsgröße

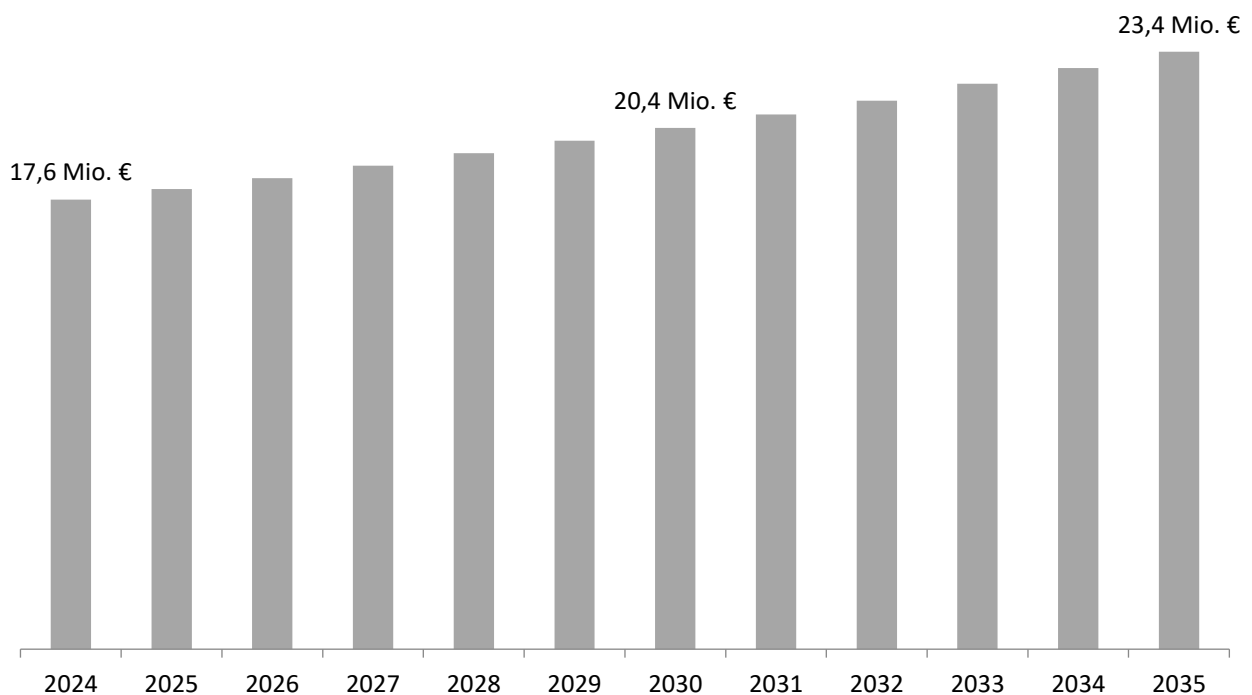


Abb. 75: Fortschreibung der Kosten des Status quo bis zum Jahr 2035, MVB

Die Fortschreibung des Status quo erfolgt entsprechend der dargestellten Prämissen bis zum Jahr 2035. Es handelt sich hierbei um eine Inflationierung der Kostentreiber der MVB. In dieser Fortschreibung werden weiterhin fiktiv ausschließlich Diesel-Busse beschafft. Ausgehend von einem Status quo im Jahr 2024 mit 17,6 Mio. € Gesamtaufwendungen steigen diese auf 20,4 Mio. € im Jahr 2030 und schließlich auf 23,4 Mio. € im Jahr. Die jährliche Entwicklung der Fortschreibung des Status quo zeigt die Abb. 75.

An dieser Stelle sei nochmals auf den fiktiven Charakter dieser Fortschreibung hingewiesen. Auf Grund der Vorgaben der CVD ist eine Umsetzung in dieser Form nicht möglich. Die Darstellung dient lediglich als Referenz zum Vergleich der vier erarbeiteten Umstellungsszenarien.

4.3.2 Kostenschätzungen der verschiedenen Antriebsvarianten

Für eine umfassende Untersuchung sollen zunächst die Rahmenbedingungen für eine Umstellung definiert werden, um nur ökonomisch und infrastrukturell sinnvolle Optionen in die kaufmännische Bewertung eingehen zu lassen. Hierbei soll zunächst eine statische Betrachtung der zu erwartenden Investitionskosten vorgenommen werden, um eine erste Abschätzung der zu erwartenden Kosten vornehmen zu können. Hierfür sind insbesondere die Kostenpositionen „Fahrzeugvorhaltung“, „Treibkraft“ und „Infrastruktur“ ausschlaggebend für eine ökonomische Umsetzung der Umstellungsszenarien.

4.3.2.1 Fahrzeugvorhaltung

Die Anschaffungskosten für Fahrzeuge fallen je nach Antriebsart sehr unterschiedlich aus. Hierfür haben wir auf Grundlagen von Marktdaten und Expertenwissen nachfolgende Ansätze für die Fahrzeugkosten getroffen:

Gefäßgröße / Antriebsart	Diesel	BEV	BEV REX	FCEV	O-Bus	O-Hybrid-Bus
Minibus	130.000 €	270.000 €	270.000 €	n. v.	n. v.	n. v.
Solobus	312.000 €	600.000 €	450.000 €	700.000 €	1.000.000 €	1.100.000 €
Gelenkbus	423.000 €	850.000 €	1.100.000 €	950.000 €	1.150.000 €	1.450.000 €

Tab. 27: Anschaffungskosten für Fahrzeuge mit unterschiedlichen Antriebstechnologien

Es wird deutlich, dass vor allem die Varianten mit BEV REX, O-Bussen und O-Hybrid-Bussen signifikante Mehrkosten im Vergleich zum Dieselbus aufweisen.

4.3.2.2 Treibkraft

Im Vergleich der Antriebsvarianten stellt Strom aktuell das kostengünstigste Medium dar. Durch den Direktantrieb kann bei O-Bussen ein höherer Wirkungsgrad im Vergleich zu O-Hybrid-Bussen und batterieelektrisch angetriebenen Bussen erzielt werden. Dadurch fallen die Treibkraftkosten bei einem O-Bus leicht günstiger aus im Vergleich zu O-Hybrid-Bussen und batterieelektrischen Bussen. Batterieelektrische Busse mit Brennstoffzellen-Range Extender weisen ähnliche Treibkraftkosten wie Dieselbusse auf. Dabei werden die Mehrkosten durch den Einsatz des wasserstoffbasierten Range Extender durch die Ersparnisse des eingesetzten Stroms kompensiert. Am teuersten fallen die Kosten für Wasserstoff aus. Eine Gegenüberstellung der erwarteten Treibkraftkosten pro Wagenkilometer können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Gefäßgröße / Antriebsart	Diesel	BEV	BEV REX	FCEV	O-Bus	O-Hybrid-Bus
Fuhrpark MVB	0,59 €/Wkm	0,43 €/Wkm	0,58 €/Wkm	0,85 €/Wkm	0,38 €/Wkm	0,40 €/Wkm

Tab. 28: zu erwartende Treibkraftkosten für die verschiedenen Antriebstechnologien

4.3.2.3 Lade- und Betankungsinfrastruktur

Eine weitere zentrale Komponente bei der Investitionskostenrechnung stellen die Infrastrukturkosten für die Lade- und Betankungsinfrastruktur dar. Dafür sollen nachfolgend die Kosten für den vollständigen Infrastrukturaufbau in Abhängigkeit zu den Antriebstechnologien verglichen werden:

Gefäßgröße / Antriebsart	Diesel	BEV	BEV REX	FCEV	O-Bus	O-Hybrid-Bus
Infrastrukturkosten	0 €	5,6 Mio. €	13,2 Mio. €	7,6 Mio. €	165,9 Mio. €	171,2 Mio. €

Tab. 29: Übersicht Infrastrukturkosten der verschiedenen Antriebstechnologien

Die Oberleitungsinfrastruktur weist Mehrkosten im Höhe von 165,9 Mio. € im Vergleich zum aktuellen Status quo auf, wohingegen der Ausbau der Betriebshöfe für Ladeinfrastruktur bzw. Wasserstoffbetankungsinfrastruktur lediglich Mehrkosten in Höhe von 5,6 bzw. 7,6 Mio. € hervorrufen würden. Auch die Bereitstellung von Lade- und Betankungsinfrastruktur wäre mit 13,2 Mio. € signifikant günstiger als die Installation von Oberleitungsinfrastruktur.

4.3.2.4 Zwischenfazit

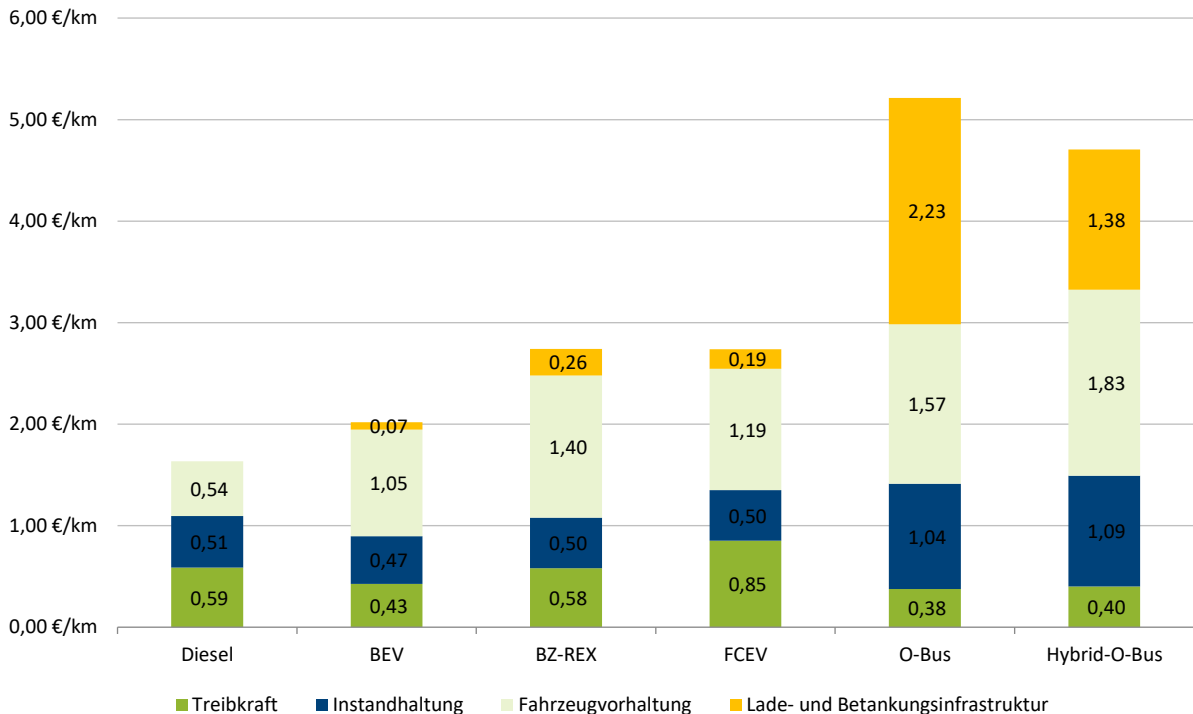


Abb. 76: TOC der alternativen Antriebsmöglichkeiten BEV, BZ-REX, FCEV, O-Bus und Hybrid-O-Bus

Auf Basis der vorangegangenen Analyse lassen sich nun die Gesamtkosten des Betriebs (Total Cost of Ownership, TCO) berechnen. Die TCO-Untersuchung zeigt, dass bei allen Varianten Mehrkosten im Vergleich zum Diesel-Szenario verursacht werden. Insgesamt stellt die günstigste alternative Antriebsart der batterieelektrische Bus mit TCO von 2,02 €/km dar. Die gesamthaften Betriebskosten für BZ-REX und für FCEV liegen etwas darüber bei 2,74 €/km bzw. 2,73 €/km. Diese Varianten verursachen demnach Mehrkosten zwischen 0,38 und 1,11 € pro km. Der Betrieb von O-Bussen oder Hybrid-O-Bussen hingegen ist deutlich teurer als die vorher beschriebenen Alternativen und beläuft sich auf 5,22 €/km für den O-Bus bzw. 4,70 €/km für die Hybridvariante. Dabei entstehen Mehrkosten von 3,58 bzw. 3,06 pro Kilometer im Vergleich zum Diesel-Szenario.

Im Rahmen der eingehenden kaufmännischen Untersuchung der Antriebsvarianten ist auffällig, dass neben den Anschaffungskosten für O-Busse und O-Hybrid-Busse signifikante Mehrkosten für die Installation von Oberleitungsinfrastruktur in Kauf genommen werden müssten. Diese daraus resultierenden Investitionsmehrkosten übersteigen potenzielle Ersparnisse durch den besseren Wirkungsgrad im Vergleich zum batterieelektrischen Bus signifikant. Zudem muss die Infrastruktur bereits zur Einführung der ersten O-Busse zumindest eine komplette Linie umfassen, um einen Linienbetrieb gewährleisten zu können. Dadurch muss die Infrastruktur bereits vor der Beschaf-

fung der Fahrzeuge zu einem großen Teil vorhanden sein. Ein granularer Ausbau, wie bei verschiedenen Ausbaustufen im Rahmen der Installation von Ladeinfrastruktur auf dem Betriebshof, kann nicht vorgenommen werden.

Aufgrund der wirtschaftlichen Defizite der Oberleitungsinfrastruktur werden Antriebstechnologien, welche eine Oberleitungsinfrastruktur benötigen, im weiteren Verlauf nicht weiter betrachtet.

4.3.3 Kostenbetrachtungen für eine Umstellung mit Batteriebussen

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

4.3.3.1 Mehrkosten der Szenarien

Die Mehrkosten der unterschiedlichen Szenarien bei der Flottenumstellung mit Batteriebussen zeigen bei der MVB deutliche Unterschiede. Diese sind auf die unterschiedlichen Flottenstärken innerhalb der Szenarien zurückzuführen.

Insgesamt entwickeln sich die Mehrkosten im CVD- und CVD+-Szenario ähnlich, die Mehrkosten im Vollumstellungsszenario liegen bis 2030 um ca. 30 bis 40 T€ höher als in den anderen beiden Szenarien. Besonders ab 2034 steigen die Kosten im CVD+-Szenario als auch im Vollumstellungsszenario noch einmal stärker als für das Mindestanforderungsszenario CVD. Die Mehrkosten für das Vollumstellungsszenario liegen im Jahr 2035 um ca. 100 T€ höher als für das CVD-Szenario und übersteigen die Mehrkosten für das CVD+-Szenario um ca. 65 T€.

Die folgende Abbildung zeigt die Entwicklung der Mehrkosten gegenüber dem Status quo bis zum Jahr 2035.

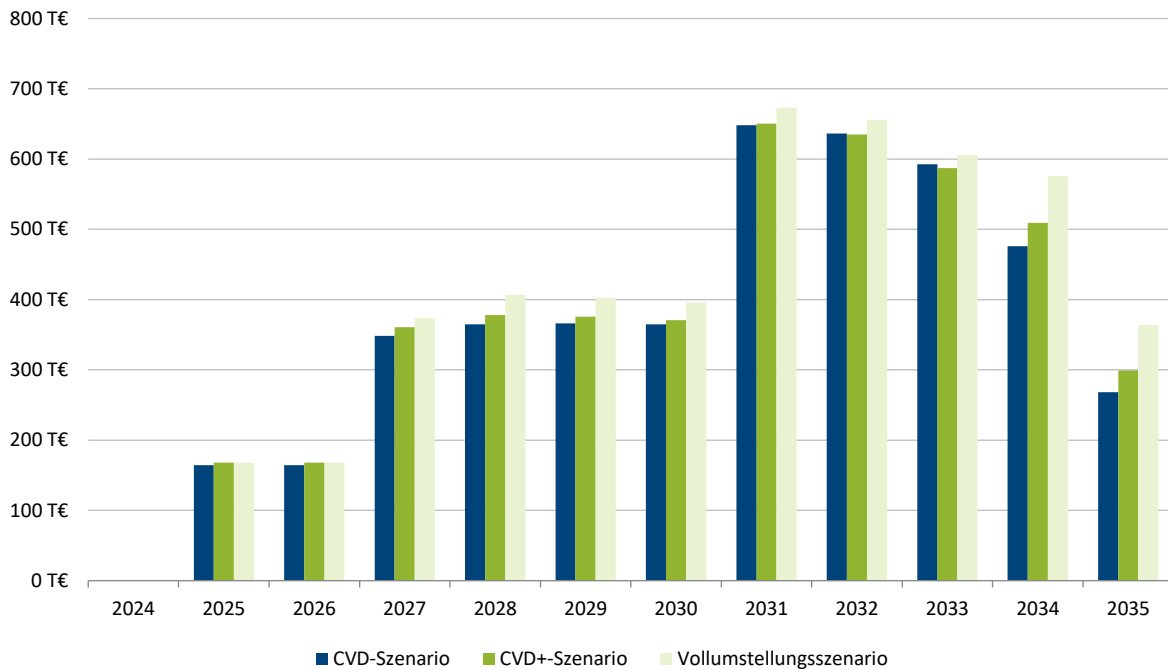


Abb. 77: Mehrkosten ohne Förderung im Vergleich zum Status quo bis 2035 bei der MVB (Batteriebusse)

Insgesamt fallen auf Grundlage der dargestellten Prämissen bis zum Jahr 2035 die in der folgenden Tabelle dargestellten Investitionskosten in den betrachteten Szenarien an.

Szenario	Fahrzeuge	LIS & technische Ausstattung	Sonstiges
Szenario 0 - Referenzszenario (keine Umstellung)	25,4 Mio.€	0,0 Mio.€	6,8 Mio.€
Szenario 1 – CVD-Szenario	28,1 Mio.€	1,6 Mio.€	8,8 Mio.€
Szenario 2 – CVD+-Szenario	28,5 Mio.€	1,7 Mio.€	8,8 Mio.€
Szenario 3 – Vollumstellung ab 2028	28,8 Mio.€	1,8 Mio.€	8,8 Mio.€

Tab. 30: Investitionskosten nach Szenarien bis 2035, MVB Batteriebusse ohne Förderung

4.3.3.2 Detailbetrachtung Geschäftsjahr 2035

Für das Geschäftsjahr 2035 wird im Folgenden dargestellt, wie sich die Mehrkosten der drei verschiedenen Umstellungsszenarios nach Funktionsbereichen aufgliedern. Für die hier betrachtete Umstellung mit Batteriebusen, entstehen die meisten Mehrkosten durch die Änderung der Fahrzeug- bzw. Infrastrukturvorhaltung. Diese werden allerdings zu einem großen Teil durch die Treibkrifteinsparungen kompensiert.

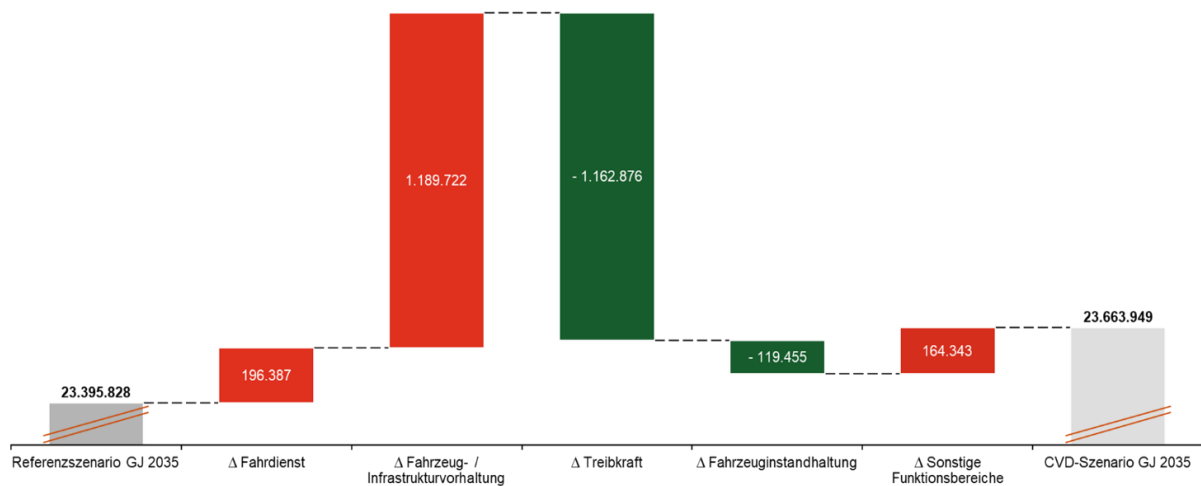


Abb. 78: Mehrkosten des CVD-Szenarios nach Funktionsbereichen im Jahr 2035, MVB (Batteriebusse)

Die Mehrkosten im Fahrdienst sind über alle drei betrachteten Szenarien hinweg gleich und belaufen sich im GJ 2035 auf 196.387 €. Insgesamt fallen die Mehrkosten im CVD-Szenario am geringsten aus.

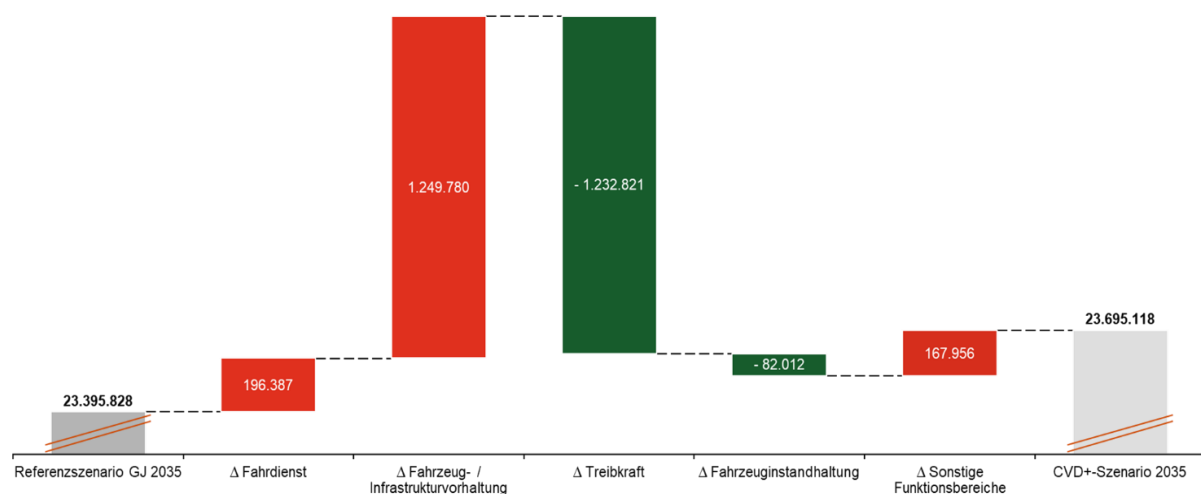


Abb. 79: Mehrkosten des CVD+-Szenarios nach Funktionsbereichen im Jahr 2035, MVB (Batteriebusse)

Verglichen mit dem CVD- entfallen im CVD+-Szenario zwar höhere Mehrkosten auf die Fahrzeug- bzw. Infrastrukturvorhaltung, diese werden aber auch durch größere Einsparungen beim Treibstoff kompensiert. Die Ersparnisse durch die Fahrzeuginstandhaltung fallen allerdings gleichzeitig niedriger im CVD+-Szenario aus.

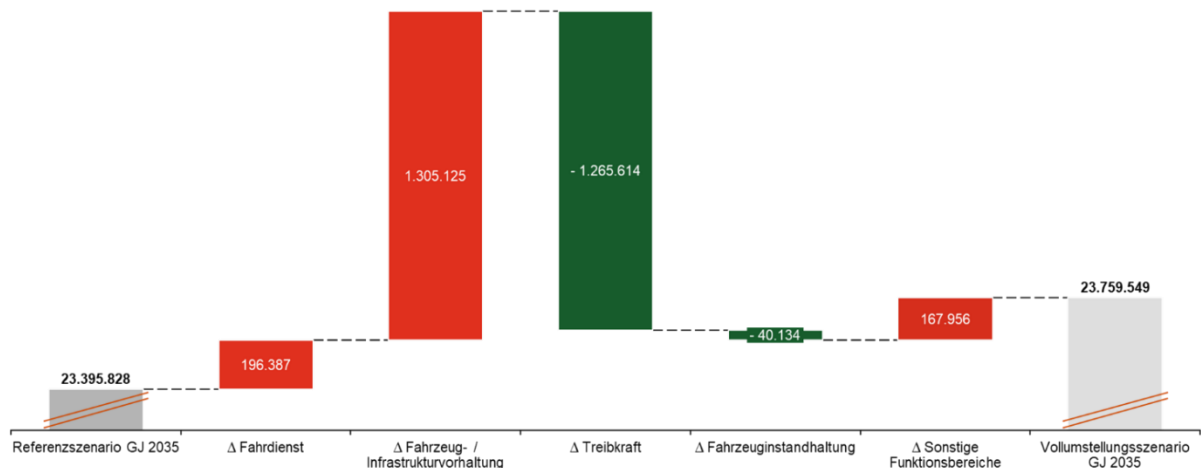


Abb. 80: Mehrkosten des Vollumstellungsszenarios nach Funktionsbereichen im Jahr 2035, MVB (Batteriebusse)

Das Vollumstellungsszenario, welches eine schnellere Umstrukturierung der Flotte als in den CVD-Szenarien vorsieht, geht ebenfalls mit höheren Mehrkosten für Fahrzeug- bzw. Infrastrukturvorhaltung einher, genauso wie größeren Einsparungen beim Treibstoff. Einsparungen bei der Fahrzeuginstandhaltung sind allerdings nur gering und belaufen sich auf ca. 40 T€.

4.3.4 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.

4.3.4.1 Mehrkosten der Szenarien

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 CVD-Szenario entstehen so Mehrkosten von anfänglich ca. 447 T€, 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 MVB-Flotte kontinuierlich an. Im Jahr 2035 liegen die Mehrkosten im CVD-Szenario ab 2031 dann bei ca. 2,1 Mio. €.

Für das CVD+-Szenario ergeben sich bis zum Jahr 2035 vergleichbare Mehrkosten. Durch den geringfügigen Fahrzeugmehrbedarf für die Umsetzung dieses Szenarios ergeben sich analog geringfügige Mehrkosten. Im Jahr 2035 ergeben sich leichte Mehrkosten in Höhe von 121 T€ im Vergleich zum CVD-Szenario.

Das Vollumstellungsszenario zeigt bis zum Jahr 2028 lediglich im Bereich der zu schaffenden Betankungsinfrastruktur und des begleitenden Bauleit- und Projektmanagements leichte Mehrkosten im Vergleich zum CVD+-Szenario. Mit dem Beginn der Beschaffung von Brennstoffzellenbussen ab 2028 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.

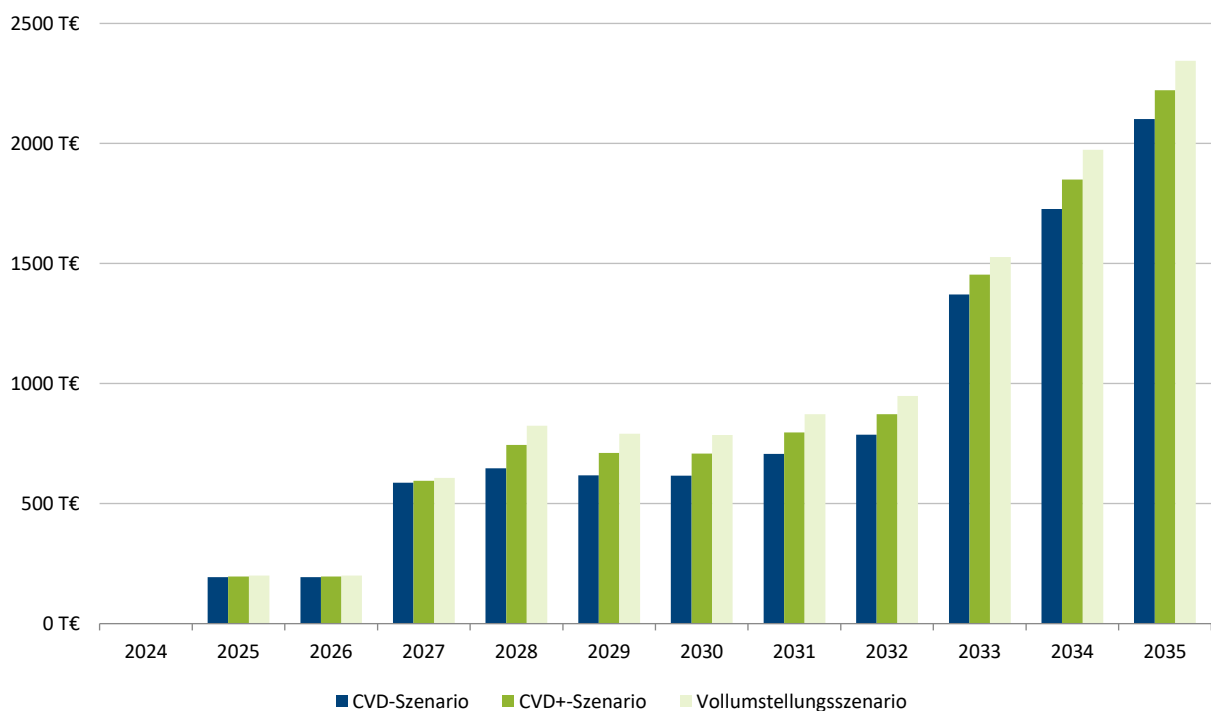


Abb. 81: Mehrkosten ohne Förderung im Vergleich zum Status quo bis 2035 bei der MVB (Brennstoffzellenbusse)

Insgesamt fallen auf Grundlage der dargestellten Prämissen bis zum Jahr 2035 die in der folgenden Tabelle dargestellten Investitionskosten in den betrachteten Szenarien an.

Szenario	Fahrzeuge	TIS & technische Ausstattung	Sonstiges
Szenario 0 - Referenzszenario (keine Umstellung)	25,4 Mio.€	0,0 Mio.€	6,8 Mio.€
Szenario 1 – CVD-Szenario	28,7 Mio.€	2,8 Mio.€	9,1 Mio.€
Szenario 2 – CVD+-Szenario	29,2 Mio.€	2,8 Mio.€	9,1 Mio.€
Szenario 3 – Vollumstellung ab 2028	26,6 Mio.€	2,9 Mio.€	9,1 Mio.€

Tab. 31: Investitionskosten nach Szenarien bis 2035, MVB, Brennstoffzellenbusse

4.3.4.2 Detailbetrachtung Geschäftsjahr 2035

Für das Geschäftsjahr 2035 wird im Folgenden dargestellt, wie sich die Mehrkosten der drei verschiedenen Umstellungsszenarios nach Funktionsbereichen aufgliedern. Für die hier betrachtete Umstellung mit Brennstoffzellenbussen entstehen die meisten Mehrkosten durch die Änderung der Fahrzeug- bzw. Infrastrukturvorhaltung.

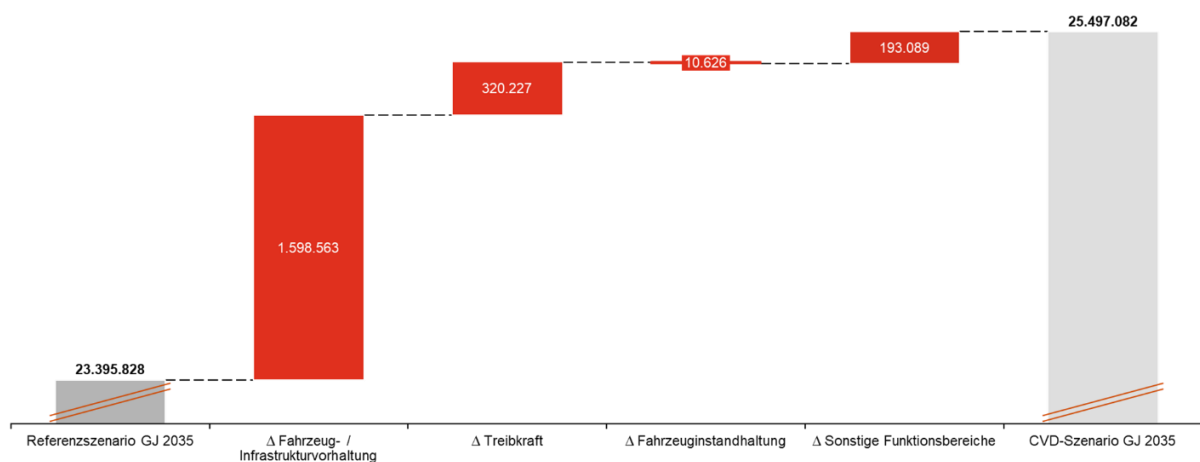


Abb. 82: Mehrkosten des CVD-Szenarios nach Funktionsbereichen im Jahr 2035, MVB (BZ-Busse)

Hohe Einsparungen bei den Treibkraftkosten gibt es nicht, im Gegenteil ist für die Einführung von Brennstoffzellenbussen je nach Umstellungsszenario mit Mehrkosten von ca. 320 bis 342 T€ zu rechnen. Die prognostizierten Mehrkosten sind am geringsten für das CVD-Szenario.

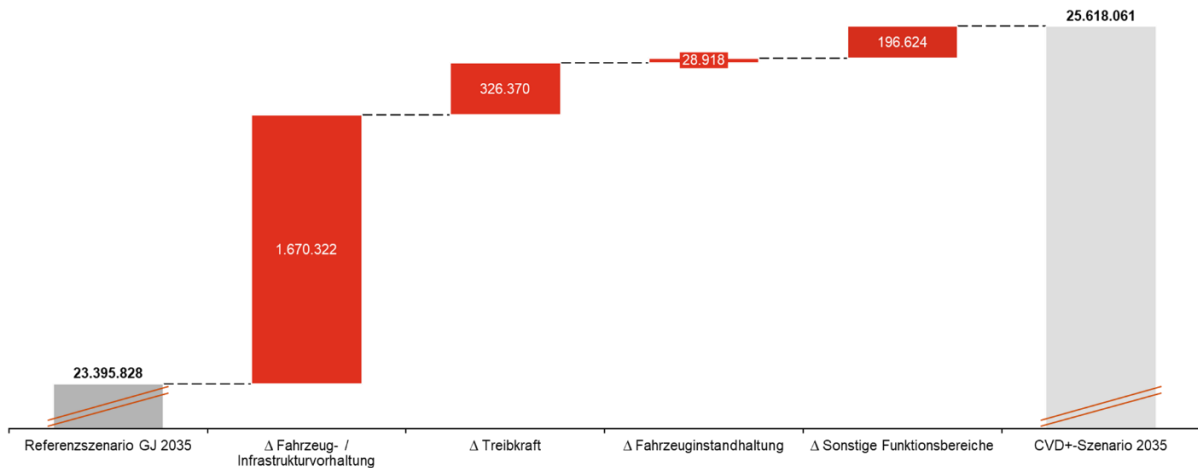


Abb. 83: Mehrkosten des CVD+-Szenarios nach Funktionsbereichen im Jahr 2035, MVB (BZ-Busse)

Den größten Einfluss auf die höheren Mehrkosten im CVD+- und Vollumstellungsszenario haben Änderungen in der Fahrzeug- bzw. Infrastrukturvorhaltung und der Fahrzeuginstandhaltung. Im CVD+-Szenario liegen die Kosten für Fahrzeug- bzw. Infrastrukturvorhaltung um ca. 72 T€ höher als für das CVD-Szenario. Die Kosten für die Fahrzeuginstandhaltung liegen ca. 18 T€ über denen im CVD-Szenario.

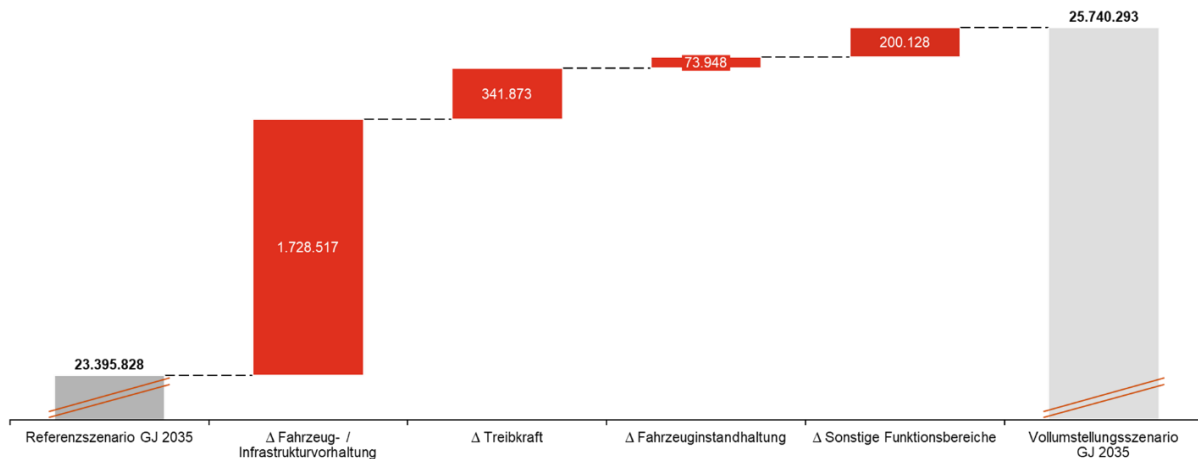


Abb. 84: Mehrkosten des Vollumstellungsszenarios nach Funktionsbereichen im Jahr 2035, MVB (BZ-Busse)

Durch die frühere Umstrukturierung der Flotte weist das Vollumstellungsszenario die höchsten Mehrkosten auf. Dadurch fallen für die Fahrzeug- und Infrastrukturvorhaltung rund 58 T€ Mehrkosten als im CVD+-Szenario bzw. 130 T€ im Vergleich zum CVD-Szenario an.

4.3.5 Kostenbetrachtungen für eine Umstellung mit Brennstoffzellen-Range-Extender Bussen

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

4.3.5.1 Mehrkosten der Szenarien

Auch hinsichtlich der Umstellung auf Bussen mit Brennstoffzellen-Range-Extender zeigen sich zwischen den Szenarien deutliche Kostenunterschiede. Im Vergleich zu der Umstellung mit Batterie-fahrzeugen ergeben sich insgesamt nochmals deutlich höhere Mehrkosten gegenüber dem fortgeschriebenen Status quo.

Im CVD-Szenario entstehen so Mehrkosten von anfänglich ca. 603 T€, 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 MVB-Flotte kontinuierlich an. Im Jahr 2035 liegen die Mehrkosten im CVD-Szenario ab 2031 dann bei ca. 2,3 Mio. €.

Für das CVD+-Szenario ergeben sich bis zum Jahr 2035 vergleichbare Mehrkosten. Durch den geringfügigen Fahrzeugmehrbedarf für die Umsetzung dieses Szenarios ergeben sich analog geringfügige Mehrkosten. Im Jahr 2035 ergeben sich leichte Mehrkosten in Höhe von 110 T€ im Vergleich zum CVD-Szenario.

Das Vollumstellungsszenario zeigt bis zum Jahr 2028 lediglich im Bereich der zu schaffenden Betankungsinfrastruktur und des begleitenden Bauleit- und Projektmanagements leichte Mehrkosten im Vergleich zum CVD+-Szenario. Mit dem Beginn der Beschaffung von Brennstoffzellenbussen ab 2028 kommt es zu einem signifikanten Anstieg der Kosten für Betankungsinfrastruktur, Fahrzeugvorhaltung und Treibkraft. Dadurch werden im Jahr 2035 Mehrkosten i. H. v. 2,5 Mio. € erzielt im Vergleich zu dem Referenzszenario.

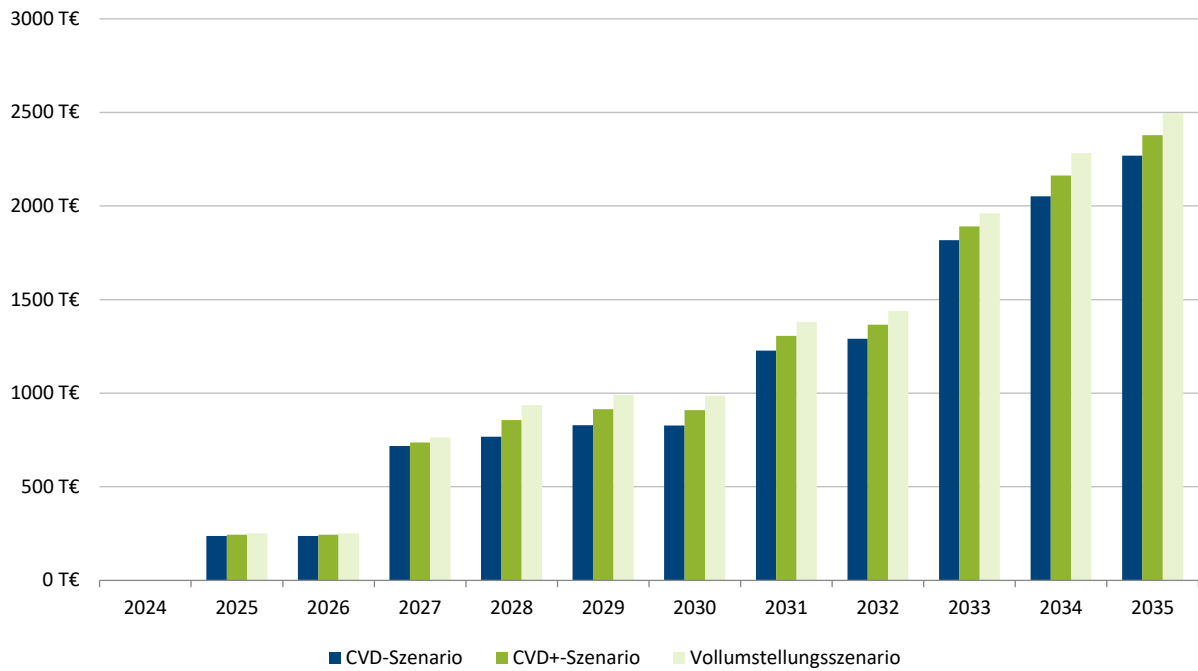


Abb. 85: Mehrkosten ohne Förderung im Vergleich zum Status quo bis 2035 bei der MVB (BZ-REX Busse)

Insgesamt fallen auf Grundlage der dargestellten Prämissen bis zum Jahr 2035 die in der folgenden Tabelle dargestellten Investitionskosten in den betrachteten Szenarien an.

Szenario	Fahrzeuge	TIS & technische Ausstattung	Sonstiges
Szenario 0 - Referenzszenario (keine Umstellung)	25,4 Mio.€	0,0 Mio.€	6,8 Mio.€
Szenario 1 – CVD-Szenario	30,5 Mio.€	4,4 Mio.€	9,6 Mio.€
Szenario 2 – CVD+-Szenario	31,2 Mio.€	4,5 Mio.€	9,6 Mio.€
Szenario 3 – Vollumstellung ab 2028	31,6 Mio.€	4,7 Mio.€	9,7 Mio.€

Tab. 32: Investitionskosten nach Szenarien bis 2035, MVB, BZ-REX Busse

4.3.5.2 Detailbetrachtung Geschäftsjahr 2035

Für das Geschäftsjahr 2035 wird im Folgenden dargestellt, wie sich die Mehrkosten der drei verschiedenen Umstellungsszenarios nach Funktionsbereichen aufgliedern. Für die hier betrachtete Umstellung mit Batteriebussen mit Brennstoffzellen Range Extender entstehen die meisten Mehrkosten durch die Änderung der Fahrzeug- bzw. Infrastrukturvorhaltung. Im Gegensatz zur Umstellung auf Batteriebusse fallen die Treibkrifteinsparungen durch den Einsatz von Range Extendern in allen drei Szenarien weitaus geringer aus.

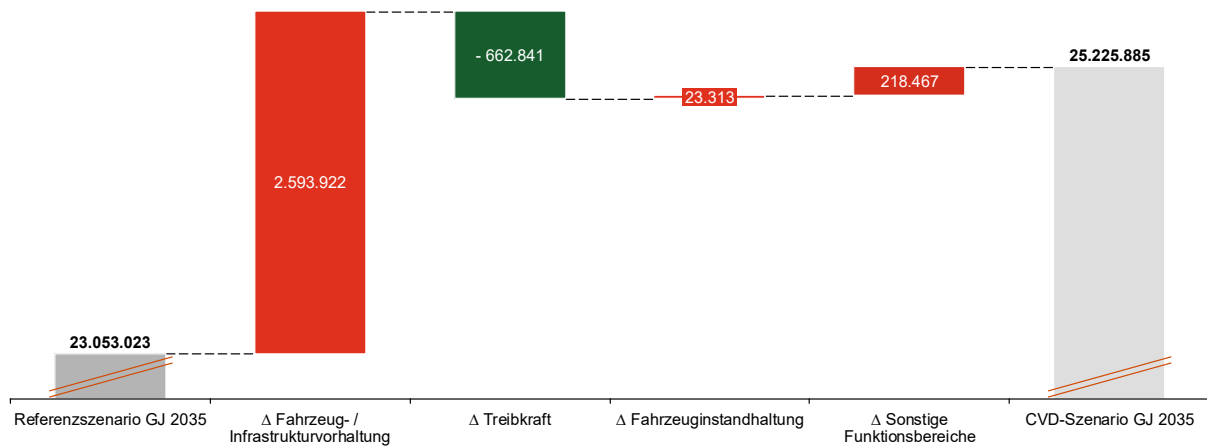


Abb. 86: Mehrkosten des CVD-Szenarios nach Funktionsbereichen im Jahr 2035, MVB (BZ-REX Busse)

Insgesamt fallen die Mehrkosten für eine Umstellung mit Batteriebussen mit Brennstoffzellen Range Extender weitaus höher aus, als für die Umstellung auf reine Batteriebusse. Für das Mindestanforderungsszenario CVD liegen die Mehrkosten im GJ 2035 bereits um über 2 Mio. € höher als im Referenzszenario GJ 2035.

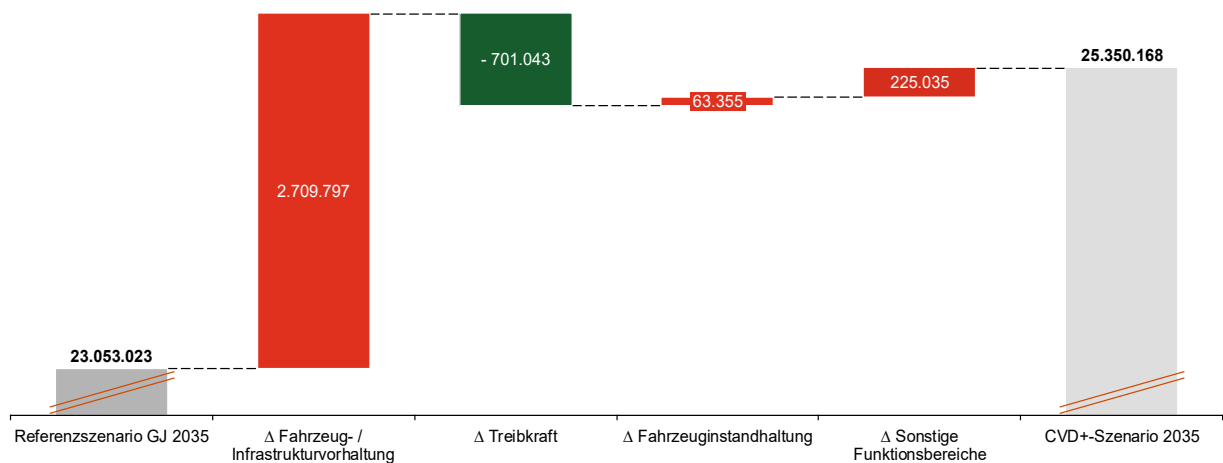


Abb. 87: Mehrkosten des CVD+-Szenarios nach Funktionsbereichen im Jahr 2035, MVB (BEV REX-Busse)

Wie auch bei einer Umstellung auf Batteriebusse steigen sowohl die Mehrkosten im Funktionsbereich Fahrzeug- bzw. Infrastrukturvorhaltung als auch die Einsparungen der Treibkraft mit der Geschwindigkeit des Umstellungsszenarios an.

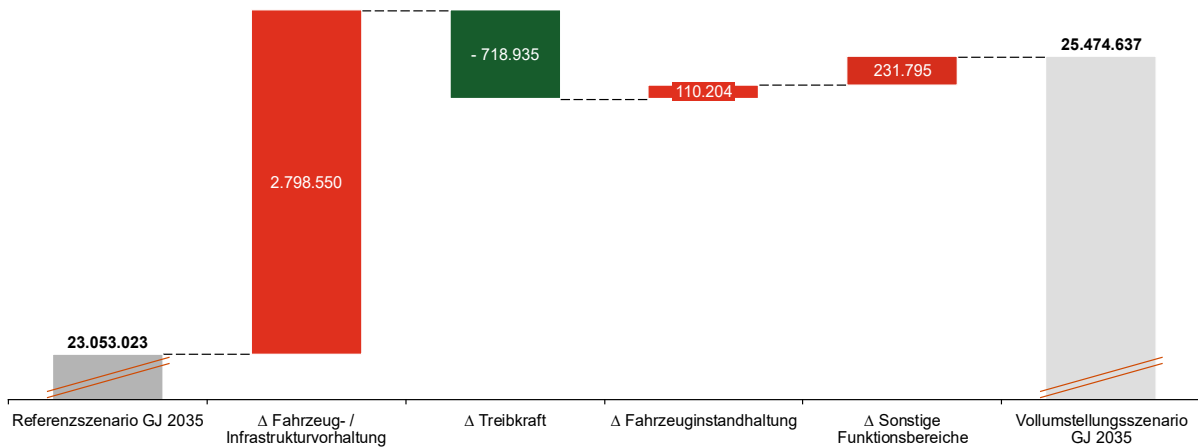


Abb. 88: Mehrkosten des Vollumstellungsszenarios nach Funktionsbereichen im Jahr 2035, MVB (BZ-REX Busse)

Die höchsten Mehrkosten fallen im Vollumstellungsszenario an. Im Vergleich zum CVD-Szenario liegen die Mehrkosten im Vollumstellungsszenario im GJ 2035 insgesamt ca. 249 T€ höher.

4.3.6 Gegenüberstellung der Antriebsarten

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

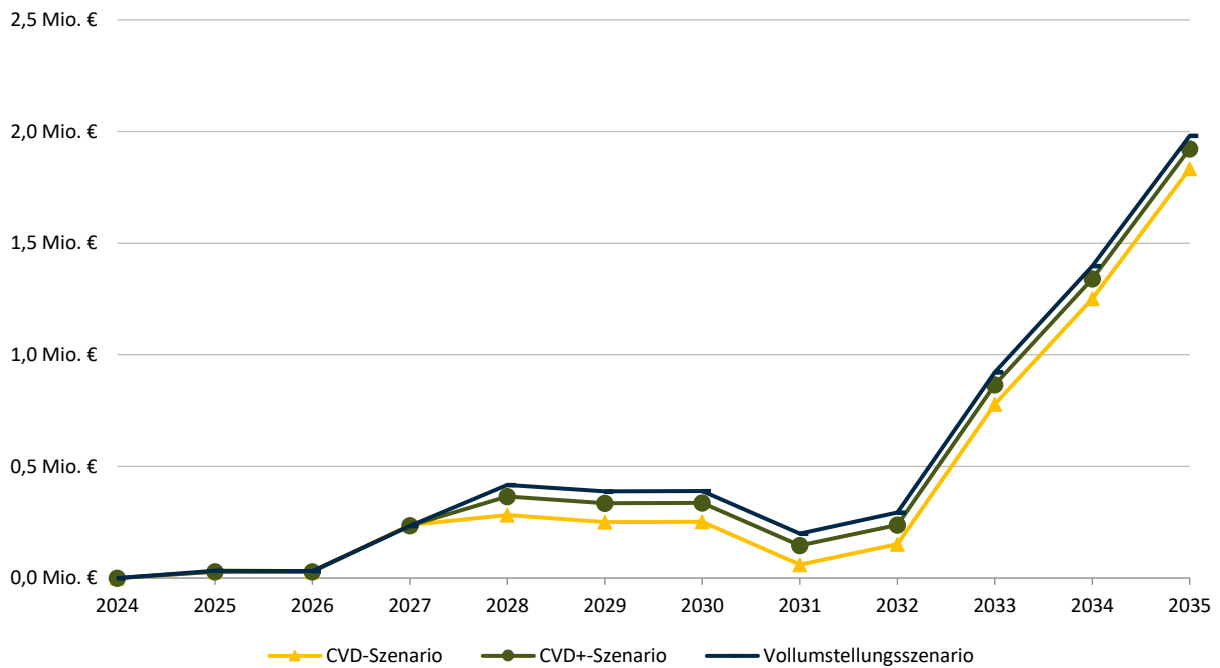


Abb. 89: Mehrkosten der Umstellung mit Brennstoffzellenbussen gegenüber der Umstellung mit Batteriebusen

Die Kosten für einer Umstellung mit Brennstoffzellenbusse gegenüber einer Umstellung mit Batteriebusen verlaufen bis zum Jahr 2028 relativ ähnlich, auch wenn hier bereits die Umstellung mit Brennstoffzellenbussen höhere Kosten verursacht als eine Umstellung mit Batteriebusen. Ab 2032 steigen die Mehrkosten für Brennstoffzellenbusse deutlich und erreichen im Jahr 2035 ihren Höchststand mit ca. 1,8 bis 2 Mio. €.

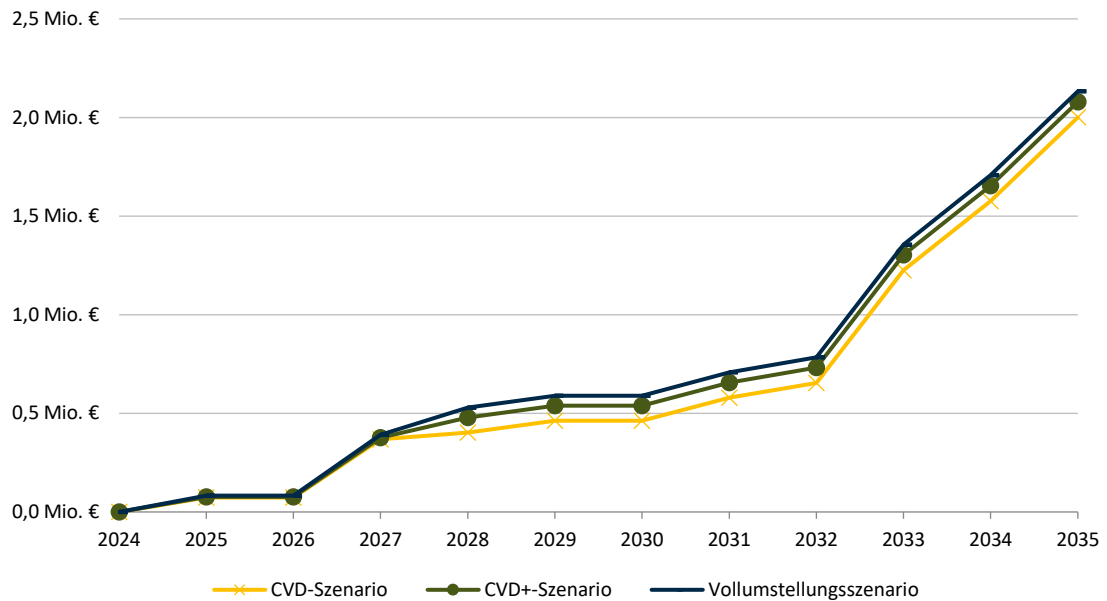


Abb. 90: Mehrkosten der Umstellung mit BZ-REX Bussen gegenüber der Umstellung mit Batteriebussen

Die Kosten für einer Umstellung mit Batteriebussen mit Brennstoffzellen-Range Extender gegenüber einer Umstellung mit Batteriebussen steigen im Vergleich zum Mehrkostenvergleich gegenüber Brennstoffzellenbussen bereits ab 2026 deutlich an. Dieser Trend setzt sich in den nächsten Jahren fort und die Mehrkosten erreichen ebenfalls im Jahr 2035 ihren Höchststand bei über 2 Mio €.

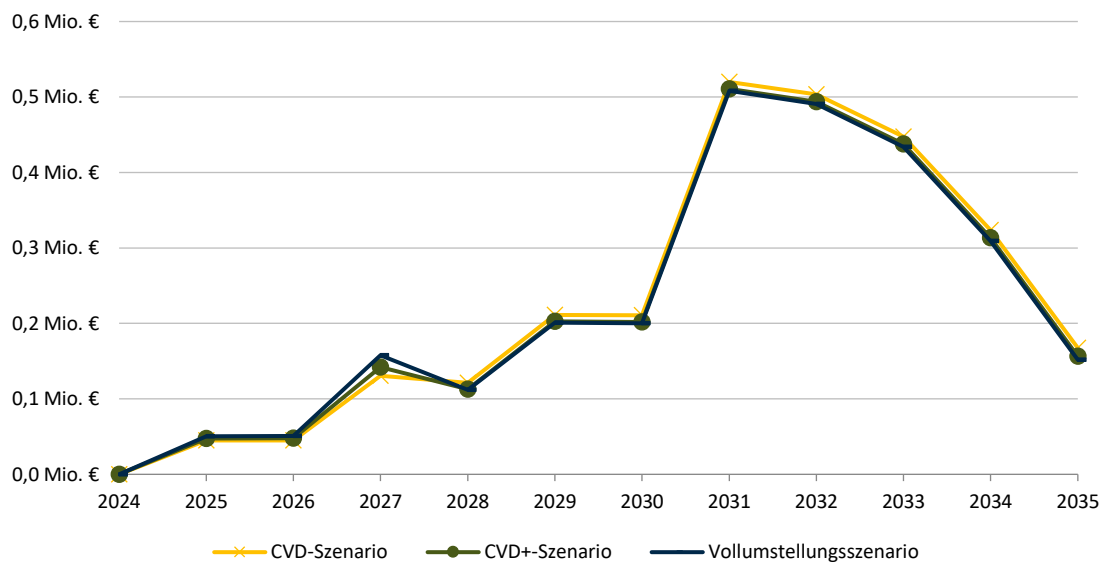


Abb. 91: Mehrkosten der Umstellung mit BZ-REX Bussen gegenüber der Umstellung mit Brennstoffzellenbussen

Bei der Umstellung mit Batteriebussen mit Brennstoffzellen-Range Extender treten besonders in den ersten Jahren im Gegensatz zur Umstellung mit Brennstoffzellenbussen Mehrkosten auf. Diese erreichen im Jahr 2031 bei ca. 500 T€ ihr Maximum und fallen danach wieder stark ab. Insgesamt weichen die Kosten beim Vergleich dieser beiden Alternativen weniger voneinander ab, als bei den vorigen Vergleichen mit Batteriebussen.

Die erheblichen Mehrkosten sind über alle Szenarien insbesondere auf die folgenden Kostentreiber zurückzuführen:

- höhere Anschaffungskosten für Fahrzeuge,
- höhere Investitionskosten für Planung und Errichtung der notwendigen Betankungsinfrastruktur sowie
- höhere Kosten der Treibkraft.

5 AP 5 Erstellung eines Konzepts zur Wasserstoff-Betankungsinfrastruktur für den öffentlichen Straßenpersonenverkehr in Magdeburg

Für ein Wasserstoff-Betankungskonzept stehen grundsätzlich drei Ansätze zur Debatte:

- Nutzung einer betriebsinternen Tankinfrastruktur
- Nutzung einer öffentlichen externen Tankinfrastruktur
- Nutzung einer nicht-öffentlichen externen Tankinfrastruktur („Mitbenutzung“)

Die erste Option, mit betriebsinterner Tankanlage, ermöglicht grundsätzlich auch die Mitbenutzung durch Dritte auf dem eigenen Betriebshofgelände.

Maßgeblich für eine Nutzung im Bus-ÖPNV sind die Sicherstellung der Versorgungssicherheit und einer Vorrangregelung. Beide Aspekte erhalten mit anwachsender Flotte eine größere Bedeutung. Sofern ausreichende Mengen konventioneller Reservebusse vorgehalten werden, und der Einsatz von FCEV-Bussen betrieblich kompensiert werden kann, können Risiken bezüglich Versorgungssicherheit und Vorrangregelung in Kauf genommen werden.

Hier wird angenommen, dass der Fahrzeugeinsatz nicht optional ist und der Betrieb adäquat sichergestellt werden muss.

5.1 Betriebsinterne Tankanlagen oder externe Betankung?

Die Nutzung betriebsexterner Tankanlagen wird als kritisch eingeschätzt, sofern nicht nur eine sehr kleine Teilflotte betrieben wird. Denkbar wäre ein entsprechender Ansatz zum Beispiel als Übergangslösung oder Redundanzsystem für eine betriebsinterne „Haupttankstelle“.

Im allgemeinen Rahmen werden die Sicherstellung der Versorgungssicherheit und die Vorrangregelung als kritisch eingeschätzt. Wie im Rahmen von AP 3 deutlich wird, wird bei Tankanlagen mit LH₂ Hauptspeicher allein für die MVB-Flotte eine Energieträgeranlieferung alle drei Tage abgeschätzt. Sofern der Hauptspeicher der Tankanlage eine mehrtägige Betriebssicherheit gewährleisten muss, kann der Systemansatz schnell an seine Grenzen stoßen. Die Sicherstellung der Versorgungssicherheit ist hier stark abhängig vom weiteren Nutzerprofil der Tankanlage. Da jedoch eine generelle intensive Nutzung der Tankanlage unterstellt wird, müsste dieser Aspekt zumindest im Detail betrachtet und eine minimale Speichermenge in der Tankanlage für den ÖPNV vertraglich sichergestellt werden.

Insbesondere bei öffentlichen externen Tankstellen wird die für den ÖPNV erforderliche Vorrangregelung als kritisch eingeschätzt. Da über Nacht ein Großteil der Busflotte nachbetankt werden muss, stehen pro Tankvorgang nur kurze Zeitintervalle zur Verfügung. Um reibungslose Abläufe zu ermöglichen, müssen mehrere Zapfstellen exklusiv für den ÖPNV erreichbar sein. Dabei muss ebenfalls sichergestellt sein, dass die Tankvorgänge nicht durch parallele Betankungen Dritter beeinträchtigt werden (z.B. aufgrund von Wartezeiten zum Druckaufbau).

Im Umfeld des MVB-Betriebshofs an der Kroatenwuhne ist die öffentliche Tankanlage am Glindenberger Weg 3 zumindest theoretisch erreichbar. Mit einer einfachen Fahrstrecke von mehr als 17 km sind für jeden einzelnen Tankvorgang jedoch mehr als 30 km Transferweg zu

überbringen. Einerseits bedeutet dies zusätzliche Kraftstoffaufwendungen (siehe Anmerkung unten), aber auch zusätzliche Personalaufwendungen für Transferweg, Wartezeit und den eigentlichen Betankungsvorgang. Da der Mehrwert von reichweitenstarken FCEV üblicherweise auch über den geringeren Umlaufanpassungsbedarf, beziehungsweise die damit verbundenen geringeren Personalaufwendungen, argumentiert wird, würde eine externe Betankung diesem Vorteil entgegenstehen.

Anmerkung

Online wird der Bezugspreis (Stand 27.05.2025) an der öffentlichen Tankstelle mit 17,75 € (brutto) pro kg H₂ angegeben. Bei einem sehr optimistisch angenommenen Verbrauchswert von 6 kg H₂ / 100 km ergibt sich bei den aktuellen Kosten ein Kraftstoff-Zusatzverbrauch von ca. 30 € pro Tankvorgang. Die Nutzung disqualifiziert sich hier bereits aus kommerziellen Gründen.

Denkbar wäre möglicherweise eine vollständige Neuplanung der Umläufe, bei denen die Tankintervalle so eingeplant werden, dass die Transferwege eingekürzt werden können.

Die oben beschriebenen Einschränkungen gelten grundsätzlich auch für nicht-öffentlich nutzbare externe Tankstellen. Da hier keine öffentliche Nutzung eingeräumt werden muss, ist anzunehmen, dass die Tankabläufe effizienter gestaltet werden können und die Aspekte Versorgungssicherheit und Vorrangregelung (ggf. begrenzt auf erforderliche Zeitslots) einfach abzustimmen sind, da die Nutzerprofile bei bekannter Flotte besser prognostizierbar sind.

Bei externer Betankung resultieren grundsätzlich längere Arbeitswege als bei einer betriebsinternen Realisierung. Die aus dem Dieselsektor bekannten Abläufe Tanken, Waschen, Abstellen werden über die Transferwege gestreckt. Das Ausmaß ist abhängig von der Entfernung zum Tankpunkt. Betriebshofintern sind außerdem Rotationskonzepte denkbar, bei denen ein Fahrzeug (ohne Personalbegleitung) den Tankvorgang absolviert und das Betriebshofpersonal gleichzeitig den nächsten Bus zur Tankanlage bewegt. Bei langen Transferwegen (zu externen Stellen) ist dies unrealistisch.

In Summe entfällt die Empfehlung auf eine betriebsinterne Tankstellenlösung. Da Tankstellen nicht modular erweitert werden können (kein „mitwachsen“), muss hier der Vollausbau der Flotte ins Auge gefasst werden. Die antizipierten Energieträgermengen rechtfertigen eine betriebsinterne Lösung.

Für sehr kleine Flotten kann die externe Betankung eine Option darstellen. Risiken und Zusatzaufwendungen sind zwar auch für kleine Flotten vorhanden, können jedoch möglicherweise durch die MVB akzeptiert werden, wenn im Gegenzug der Aufbau einer Wasserstofftankstellen entfällt.

5.2 Erforderliche Infrastruktur zur Wasserstofferzeugung

Das Tankstellenkonzept für den Vollausbau mit FCEV ist bereits in AP 3 enthalten. Um den Energieträger on-premise zu erzeugen, ist darüber hinaus ein Elektrolyseur erforderlich. Ausgehend vom mittleren Wasserstoffbedarf pro Kalendertag sollte die Produktionskapazität zwischen 1 und 1,5 t Wasserstoff pro Tag liegen.

Hier wird jedoch eine dedizierte kommerzielle Bewertung empfohlen, bei der die Flottengröße berücksichtigt wird. Bei Strombezug aus dem Versorgungsnetz zur Wasserstofferzeugung können insbesondere gegenüber BEV Betriebskosten entstehen, die um den Faktor drei höher sind als bei BEV. Sofern beide Systeme aus demselben Versorgungsnetz betrieben werden, führt die Wasserstoffprozesskette (Strom $\Rightarrow$ Wasserstoff $\Rightarrow$ Strom) gegenüber der direkten Stromnutzung in BEV zu einer Erhöhung des Strombedarfs (Faktor 2 bis 3 ist nicht unrealistisch).

5.3 Mögliche Synergien mit anderen Verkehrssektoren

Wie im AP 3 berechnet, liegt die Anlieferfrequenz für einen Vollausbau der MVB-Flotte bereits ohne zusätzliche Akteure bei etwa einem LH₂ Trailer alle drei Tage. Synergien mit anderen Nutzern sind nicht ausgeschlossen, müssen aber im Kontext der erforderlichen Energieträgermengen betrachtet werden. Während kleinere Wasserstoffflotten vermutlich in das Versorgungskonzept eingebunden werden können, sprengen größere Flotten schnell den Rahmen.

Mit voll umgestellter FCEV-Flotte stellt die MVB einen Großnutzer von Wasserstoff dar. Es wird als unwahrscheinlich eingeschätzt, dass die Flotte in ein größeres externes Versorgungskonzept reibungslos eingebunden werden kann.

Vielmehr sollte die MVB in dem Kontext als „großer Player“ oder Großabnehmer betrachtet werden. Denkbar sind Mitnutzungskonzepte, bei denen andere (kleinere) Akteure die Tankinfrastruktur auf dem MVB-Betriebshof nutzen. Allerdings gilt auch hier, dass nur kleine Flotten reibungslos eingebunden werden können. Sofern entsprechende Ansätze verfolgt werden, sollte hier eine Hochrechnung des Energiebezugs erfolgen, wobei auch die Anlieferung des Energieträgers in die Rechnung aufgenommen wird.

Der Standort einer „geteilten“ Tankstelle muss nicht zwingend im Betriebshof der MVB sein. Dennoch sollte der Ort in unmittelbarer Umgebung sein, um die Flottenbetankung ohne größere Transferstrecken zu bewerkstelligen.

6 AP 6 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlung

6.1 Schlussfolgerungen

6.1.1 Zwischenfazit AP 1 und AP 2

In den ersten beiden Arbeitspaketen liegt der Fokus auf einem Vergleich der Antriebsalternativen, mit technischem Schwerpunkt in AP 2. Aufgrund der engen thematischen Verbindung beider Arbeitspakete wird das Zwischenfazit hier zusammengefasst.

Aus der „Clean Vehicles Directive“ (CVD) der EU, beziehungsweise dessen Umsetzung in nationales Recht als Sauberes-Fahrzeug-Beschaffungs-Gesetz (SaubFahrzeugBeschG), gehen verpflichtende Anteile an sauberen (emissionsarmen) und emissionsfreien Fahrzeugen hervor. Diese sind sowohl auf Aufgabenträger- als auch auf Betreiberebene definiert und geben entsprechende Beschaffungsquoten für die MVB vor.

Grundsätzlich stehen mehrere emissionsfreie Antriebsalternativen zur Diskussion, wobei abgestimmt wurde, den Themenkomplex Oberleitungsbus vereinfacht zu bearbeiten, um stattdessen den Fokus auf Umlaufanpassungen und deren Auswirkungen zu legen. Auch wenn Oberleitungsbusse sehr gute Performancewerte aufweisen, kann bereits in überschlüssiger Rechnung eindeutig aufgezeigt werden, dass die verbundenen Kosten in keiner Relation zu den anderen Alternativen stehen und entsprechend keine sinnvolle Alternative für die MVB darstellen. Der auch als „Straßenbahn auf Rädern“ umgangssprachlich bezeichnete Fahrzeugtyp liegt (bei Systemneueinführung) auch preislich zwischen beiden Ansätzen.

Von Relevanz sind die Fahrzeugtypen Batteriebus (BEV), unterschieden als Depot- und Zwischenlader, Brennstoffzellenbus (FCEV) und Brennstoffzellen Range-Extender (BZ-REX). BZ-REX können als Batteriebusse (Depotlader) verstanden werden, deren zusätzliches Brennstoffzellensystem bei zunehmender Entladetiefe der Batterie zuschaltet.

Alle Antriebsvarianten haben ihre systembedingten Vor- und Nachteile, wobei üblicherweise die kostengünstigeren Alternativen aktuell Reichweitennachteile aufweisen. Aufgrund der erwarteten Batterieentwicklung wird angenommen, dass langfristig ein Angleich der unterschiedlichen Performanceeigenschaften erfolgen wird. Batteriebusse, die heute eher im Reichweitennachteil sind, werden in etwa 10 Jahren auf Augenhöhe mit Alternativtechniken erwartet.

In Summe können mit allen Antriebsalternativen einerseits die kurzfristigen CVD-Anforderungen ohne Sondermaßnahmen erfüllt werden. Als Sondermaßnahmen werden hier beispielsweise Umlaufanpassungen oder andere Maßnahmen, die über den direkten Ersatz von Fahrzeugen hinausgehen, verstanden. Auch Vollumstellungsszenarien können aus allen Antriebstechniken abgeleitet werden, wenn Sondermaßnahmen (hier: Umlaufanpassungen) erfolgen.

Auf technischer Ebene können Lösungsoptionen auch für reichweitenkritische Umläufe und Fahrzeugeinsätze erarbeitet und der verbundene Mehraufwand für die MVB abgeschätzt werden. Damit sind technisch zunächst alle Antriebsvarianten auf Augenhöhe, die die Kernziele ‚Erfüllung der CVD-Vorgaben‘ und ‚perspektivische Flottenvollumstellung‘ erfüllen können. Gleichzeitig können alle kostentreibenden Mehraufwendungen dimensioniert werden, so dass die Auswahl einer Vorzugstechnologie abschließend vollständig kommerziell begründet werden kann.

6.1.2 Zwischenfazit AP 3 und AP 5

Während der Schwerpunkt von AP 3 allgemeiner auf den Themenbereich Infrastruktur ausgerichtet ist, ist AP 5 auf den Themenbereich Wasserstoffinfrastruktur begrenzt. Da die Schlussfolgerungen gut zusammengeführt werden können, erfolgt auch hier das Fazit für beide Arbeitspakete.

Sofern ein Konzept realisiert wird, dass Wasserstoff als Energieträger einsetzt (FCEV aber auch BZ-REX) scheint die Installation einer Wasserstofftankstelle im Depot der MVB, beziehungsweise im direkten Umfeld, aus betrieblichen Gründen als sinnvoll. Neben der Sicherstellung der Versorgungssicherheit und Vorrangregelung für den ÖPNV (Zapfpunkt müssen „direkt erreichbar“ sein), sind hier insbesondere die Transferwege zwischen Abstellung und Tankplatz entscheidend.

Sowohl elektrische Ladesysteme als auch Wasserstofftankanlagen können für Vollumstellungs-szenarien dimensioniert und auf dem Betriebshof in der Kroatenwuhne auf Konzeptebene integriert werden. Die Vorhaltung von Infrastruktur stellt für keine Antriebsalternative eine unüberwindbare Hürde dar.

Für Wasserstofftankanlagen werden in der VDV 825 jedoch einzuhaltenden Sicherheitsradien angeführt, deren Sicherstellung auf Konzeptebene nicht gesichert ist. Scheinbar kreuzen Wohnbebauungen die Sicherheitsbereiche. Bei Verfolgung entsprechender Konzepte ist über entsprechend ausgerichtete Detailuntersuchungen zu prüfen, ob und inwiefern bauliche Schutzeinrichtungen hier Abhilfe schaffen können, oder ob ein externer Standort in unmittelbarer Umgebung gefunden werden muss.

Für BEV muss bei Konzeptverfolgung im Nachgang sichergestellt werden, dass die erforderliche Netzanschlussleistung (BEV Vollausbau bei etwa 3,7 MVA) bis zum Zeitpunkt des Vollaubaues gewährleistet werden kann. Sofern Konzepte mit Schnellladung an Wendestellen verfolgt werden, muss im Rahmen einer baulichen Prüfung evaluiert werden, ob Hindernisse für eine Realisierung vorliegen.

Im möglichen Rahmen der Machbarkeitsstudie werden für keine Technik besondere Hindernisse identifiziert, die sich zwingend für oder gegen eine Technik auswirken. Vielmehr sind auch infrastrukturseitig alle Technologieansätze so weit bewertbar tragfähig. Auch hier liegen keine technischen Argumente vor, so dass die Auswahl einer Vorzugstechnologie hier folgend kommerziell argumentiert werden kann.

6.1.3 Zwischenfazit AP 4

Aus dem AP 4 geht klar hervor, dass die MVB ihre Busflotte am wirtschaftlichsten mit Batteriebussen betreiben kann. Diese Option bietet das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis unter Berücksichtigung der aktuellen Marktentwicklung und technologischen Reife. Grundsätzlich lassen sich für die betrachteten Alternativen folgende grundlegende Charakteristika festhalten:

- Oberleitungs- und Oberleitungshybridbusse: Aufgrund des erforderlichen Aufbaus einer gesamten Oberleitungsinfrastruktur ist diese Variante nicht wirtschaftlich.
- Brennstoffzellenbusse: Diese sind mit höheren Investitionskosten und höheren Betriebskosten im Vergleich zu Batteriebussen verbunden. Somit ist diese Option aus kommerzieller Sicht nicht empfehlenswert.

- Batteriebusse mit Brennstoffzellen-Range Extendern: Diese Fahrzeuge benötigen Infrastruktur für das Laden der Batterien und für die Betankung mit Wasserstoff. Diese komplexe Infrastruktur ist mit entsprechend hohen Kosten verbunden. Da auch Batteriebusse ohne Range Extender passende Reichweiten bieten, ist auch diese Variante nicht zu empfehlen.
- Batteriebusse: Diese Fahrzeuge verursachen im Vergleich zu den heute üblichen Dieselmussen Mehrkosten. Die Mehrkosten sind jedoch geringer als mit den anderen Technologien. Für das Jahr 2035 haben wir beispielsweise einen Kostenvorteil bzw. Vorteil beim Zuschussbedarf von ca. 2 Mio. € gegenüber dem Einsatz von Brennstoffzellenbussen ermittelt.

6.1.4 Gesamtfazit

Für die aus der CVD hervorgehenden Dekarbonisierungsanforderungen an die MVB liegen mehrere technische Alternativen vor. Dabei können sowohl die „ersten Schritte“, also die reine Erfüllung der Vorgaben in den nächsten Jahren, als auch perspektivische Größen abgebildet werden. In allen Varianten sind vollständige Flottenumstellungen unproblematisch.

Abhängig von der Antriebsalternative und den resultierenden Reichweiten müssen insbesondere für Vollumstellungen Anpassungsmaßnahmen erfolgen. Primär kommt dabei die Umlaufanpassung zum Tragen, bei der kritische Umläufe frühzeitig abgelöst werden. Die mit den Mehraufwendungen (Fahrzeugvorhaltung, Personal und Treibkraftmengen) verbundenen Kosten sind in der Kostenbewertung eingepreist, so dass alle Kostentreiber pro Technik in die Bilanz aufgenommen werden.

Abschließend entfällt die Empfehlung auf Batteriebusse mit Depotladung, da dies trotz erforderlicher Umlaufanpassungen die wirtschaftlichste Alternative am Einsatzort darstellt.

6.2 Handlungsempfehlung

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Umstellung der MVB-Flotte auf alternative Antriebe technisch und betrieblich möglich ist. In Hinblick auf die eingesetzte Technologie wurde festgestellt, dass alle betrachteten Varianten für den Betrieb der MVB geeignet sind. Um den heutigen Fahrplan mit Batteriebussen abdecken zu können, ist zunächst keine Erweiterung des Fuhrparks erforderlich.

Im Vergleich der Technologien zeigt sich, dass Batteriebusse für die MVB insgesamt die vorzuziehende Technologie sind. Der Einsatz von Batteriebussen hat unter den Bedingungen der MVB 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 zudem unterschiedliche Migrationspfade für die Flotten-transformation aufgezeigt. Das CVD-Szenario bildet dabei das Mindestmaß an Fahrzeugen mit alternativem Antrieb, die durch die MVB einzusetzen sind.

Bei der Auswahl des für die MVB passenden Migrationspfades ist insgesamt eine Abwägung zwischen einem höheren Umstellungstempo und den zusätzlichen Kosten durch diese Umstellung vorzunehmen. Wir haben ermittelt, dass der verstärkte Einsatz von Batteriebussen für jeweils höhere Gesamtkosten sorgt. Die MVB-Stakeholder (vor allem Landeshauptstadt Magdeburg als Aufgabenträger und Anteilseigner) müssen daher letztlich entscheiden, wie schnell die Flottentransformation unter Beachtung der Mehrkosten erfolgen soll.

© 2025 eebc European Electrical Bus Company GmbH