Bericht – zur Veröffentlichung

REGIOBUS Mittelsachsen GmbH
Mittweida

Machbarkeitsstudie zur Umstellung der Betriebshöfe Mittweida/Hartmannsdorf der REGIOBUS Mittelsachsen GmbH

Busse mit alternativen Antrieben

Beauftragt durch:

Bundesministerium für Digitales und Verkehr

Vergabe und Projektbegleitung durch:

NOW-GMBH.DE

PtJ Projektträger Jülich Forschungszentrum Jülich

Auftrag: DEE00106000.1.1

pwc

Inhaltsverzeichnis Seite

A. Einleitung 6

I. Ausgangssituation 6

II. Rechtliche Vorgaben für die Beschaffung sauberer und emissionsfreier Busse 6

1. Betroffene Fahrzeugklassen der Clean Vehicles Directive 6

2. Anwendungsbereich der Clean Vehicles Directive 7

3. Beschaffungsrelevante Vorgaben der Clean Vehicles Directive 8

III. Zielsetzung und Inhalte der Machbarkeitsstudie 10

B. AP 1 – Einführung in die Elektromobilität im straßengebundenen ÖPNV – fahrzeugtechnische und marktseitige Grundlagen 13

I. Alternative Antriebe im ÖPNV: Technische Grundlagen und Marktübersicht 13

II. Überblick über die aktuelle E-Bus-Marktsituation in Deutschland 16

III. Übersicht des verfügbaren Fahrzeugangebots 20

C. AP 2 – Analyse Status quo und technische Grobkonzeptionierung 24

I. Untersuchung Einzelumläufe 24

1. Interpretation und Vorauswahl Vorzugstechnologie 25

II. Untersuchung Fahrzeugtagesumläufe 28

1. Umlaufverkettung 29

2. BEV Einsatzpotenziale ohne Anpassungsmaßnahmen 30

3. FCEV Einsatzpotenziale ohne Anpassungsmaßnahmen 32

4. Erforderliche Anpassungsmaßnahmen und Fahrzeugmengen für die Vollumstellung 34

III. Abschließende technische Technologieempfehlung 43

D. AP 3 – Fuhrparkanalyse und Erarbeitung Migrationspfad für die Regiobus 44

I. Analyse des aktuellen Fuhrparks der Regiobus 44

II. Ableitung Beschaffungsplanung bis 2035 für die Regiobus 45

III. Migrationspfade im Kontext unterschiedlicher Umstellungsszenarien für die Regiobus 46

1. Umstellungsszenario 1: Erfüllung der CVD-Quoten 47

2. Umstellungsszenario 2: CVD+-Szenario 49

Inhaltsverzeichnis Seite

3. Umstellungsszenario 3: CVD++-Szenario ... 51
4. Umstellungsszenario 4: Vollumstellungsszenario (100%ige Neubeschaffung von E-Bussen für Stadt- und Regionalverkehr ab 2025) ... 52

IV. CO_2 -Minderungspotenzial für die Szenarien der Regiobus ... 54

E. AP 4 – Bewertung und Definition notwendiger infrastruktureller und betrieblicher Maßnahmen für potenzielle Technologiealternativen ... 59

I. Überblick über das Gesamtsystem ... 59

II. Betriebshofuntersuchung ... 61
1. Lastganganalyse ... 61
2. Grobspezifikation Infrastruktur ... 64
a) Technische Gestaltung elektrische Lade-Infrastruktur ... 64
b) Technische Gestaltung Wasserstoff-Tankinfrastruktur ... 75
c) Ladeinfrastrukturkonzept ... 77
3. Betriebshofintegration ... 81
a) Integrationskonzepte ... 81
b) Schnittstellenausführung ... 84
c) Stufenweiser Systemausbau ... 86
4. Jahresenergiebedarf ... 87

III. Weitere betriebliche Anforderungen ... 89
1. Lademanagementsysteme ... 89
2. Planungsbedarf ... 91

F. AP 5 – Wirtschaftlichkeitsanalyse und Finanzierungsplanung unter Berücksichtigung möglicher Förderungen ... 92

I. Vorgehen und Zielsetzung ... 92

II. Übersicht bestehender relevanter Förderprogramme ... 92
1. Förderprogramme auf Bundesebene ... 92
2. Förderprogramme auf EU-Ebene ... 94
3. Förderung auf Landesebene ... 94

III. Kaufmännische Bewertung der Dekarbonisierung der Flotte der Regiobus ... 95
1. Zusammenfassung und Fazit Kostenbetrachtung ... 95

Inhaltsverzeichnis Seite

G. AP 6 – Ableitung von Handlungsempfehlungen hinsichtlich der zeitlichen, betrieblichen und technologischen Umsetzungsplanung 98

I. Zusammenfassung 98

II. Empfehlung einer betrieblich und wirtschaftlich vorzugswürdigen Antriebstechnologie für die Regiobus 99

III. Umsetzungsplanung für die Regiobus 101

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

A. Einleitung

I. Ausgangssituation

II. Rechtliche Vorgaben für die Beschaffung sauberer und emissionsfreier Busse

Mit der Richtlinie zur Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge (2009/33/EG) verfolgt die EU seit dem Jahr 2009 das Ziel, den Beitrag des Verkehrssektors zur Erreichung von Umwelt- und Klimazielen zu verbessern. Nach erfolgter Umsetzung in nationales Recht wurden der Bund, die Länder und Kommunen sowie öffentliche Unternehmen dazu angehalten, bei EU-weiten Vergabeverfahren zum Kauf von Fahrzeugen, die CO_2- und andere Schadstoffemissionen sowie den Kraftstoffverbrauch miteinzubeziehen.[1] Die ex-post Evaluation der Richtlinie 2009/33/EG zeigte allerdings auf, dass dieser Ansatz durch die entsprechenden Beschaffungsstellen nicht konsequent umgesetzt wurde.[2] Im Rahmen ihres zweiten Mobilitätspaketes legte die EU-Kommission im November 2017 einen Richtlinienvorschlag zur Überarbeitung der „Clean Vehicles Directive“ (2009/33/EG) vor, der am 18. April 2019 vom Europäischen Parlament und am 12. Juni 2019 schließlich vom Europäischen Rat verabschiedet wurde. Die aktualisierte Clean Vehicles Directive (CVD) definiert neue, verbindliche Ziele für die Beschaffung von „sauberen“ Fahrzeugen durch öffentliche Behörden und Unternehmen. Die Umsetzung der CVD erfolgte in Deutschland mit der Einführung des Saubere Fahrzeuge 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. 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 Fahrzeug-Klassen[3], die sich wie folgt kategorisieren lassen:

[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.

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

- *Fahrzeug-Kategorie 1:* leichte Nutzfahrzeuge für den Personen- und Güterverkehr der Klassen M_1 und M_2 oder N_1[4],
- *Fahrzeug-Kategorie 2:* Schwere Nutzfahrzeuge für den Güterverkehr der Klassen N_2 und N_3,
- *Fahrzeug-Kategorie 3:* Schwere Nutzfahrzeuge zur Personenbeförderung (Busse) der Klasse M_3, als Fahrzeuge mit einer zulässigen Personenzahl von mehr als 22 Personen ohne den Fahrer, das so konstruiert ist, dass Bereiche für Stehplätze vorgesehen werden, um ein häufiges Ein- und Aussteigen der Fahrgäste zu ermöglichen. Hierunter fallen nur Stadtbusse (M_3 Klasse I) mit vielen Stehplätzen, wohingegen Reisebusse bzw. Überlandbusse (M_3 Klasse II) mit geringer Stehfläche nicht in den Anwendungsbereich der Clean Vehicles Richtlinie fallen. Darüber hinaus werden Fahrzeuge der M_3 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.

2. Anwendungsbereich der Clean Vehicles Directive

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

a) Verträgen über den Kauf, das Leasing, die Anmietung oder den Ratenkauf, die durch öffentliche Auftraggeber od. Auftraggeber vergeben werden, soweit sie zur Anwendung der Richtlinien 2014/24/EU und 2014/25/EU verpflichtet sind;

b) öffentlichen Dienstleistungsaufträgen im Sinne der Verordnung (EG) Nr. 1370/2007, die die Erbringung von Personenverkehrsdienstleistungen auf der Straße über einen von den Mitgliedstaaten festzulegenden Schwellenwert hinaus zum Gegenstand haben, der den in Artikel 5 Absatz 4 jener Verordnung festgelegten Schwellenwert (geschätzter Jahresdurchschnittswert von weniger als 1.000.000 € oder eine jährliche öffentliche Personenverkehrsleistung von weniger als 300.000 km) nicht übersteigt;

c) Dienstleistungsaufträgen über Verkehrsdienste (hierunter fallen: straßengebundener öffentlicher Verkehr, straßengebundene Personensonderbeförderung, Bedarfspersonenbeförderung, Abholung von Siedlungsabfällen sowie Post- und Paketbeförderung bzw. -

[4] Die Klasse M_1 umfasst Kraftfahrzeuge (Personenbeförderung) mit höchstens acht Sitzplätzen zusätzlich zum Fahrersitz und ohne Stehplätze. Zur Klasse M_2 gehören Kraftfahrzeuge (Personenbeförderung) mit mehr als acht Sitzplatzen zusätzlich zum Fahrersitz und mit einer zulässigen Gesamtmasse von maximal fünf Tonnen. Die Klasse N_1 umfasst Kraftfahrzeuge für den Güterverkehr mit einer maximalen Gesamtmasse von 3,5 Tonnen.

zustellung), soweit die öffentlichen Auftraggeber bzw. Auftraggeber zur Anwendung der Vergabeverfahren nach den Richtlinien 2014/24/EU und 2014/25/EU verpflichtet sind.

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

3. Beschaffungsrelevante Vorgaben der Clean Vehicles Directive

Mit der CVD gibt die EU-Kommission feste, länderspezifische Beschaffungsquoten vor und macht zudem Vorgaben für die einzusetzenden Antriebsarten von Bussen im straßengebundenen ÖPNV. Die bisherige Technologieoffenheit wird mit der Aktualisierung aufgegeben. Die Erfüllung der auf nationaler Ebene definierten Beschaffungsquoten bildet den Kern der CVD. Hierbei sind die jeweils gültigen Zielperioden zu berücksichtigen. Die erste Periode bezieht sich auf den Zeitraum zwischen dem Inkrafttreten der Richtlinie am 2. August 2021 bis zum 31. Dezember 2025. Die zweite Periode beginnt mit dem 1. Januar 2026 und endet mit dem 31. Dezember 2030. Es ist vorgesehen, dass innerhalb der ersten Periode in Deutschland 45 % und in der zweiten Periode mindestens 65 % der Fahrzeug-Neubeschaffungen den von der EU-Kommission vorgegebenen „sauberen“ Antriebskonzepten entsprechen.

„Sauber“ 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 CO_2-Emissionen beitragen und die die Umweltverträglichkeit des Verkehrssektors erhöhen können. Hierzu zählen insbesondere die in der folgenden Abbildung dargestellten Energieträger.

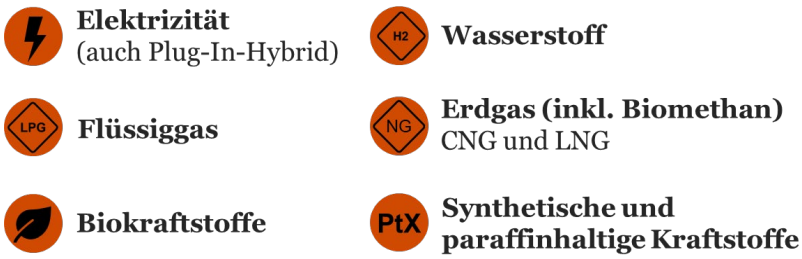


Abbildung 1: Übersicht der als „sauber“ definierten Energieträger für den Antrieb eines Busses (eigene Darstellung)

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

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

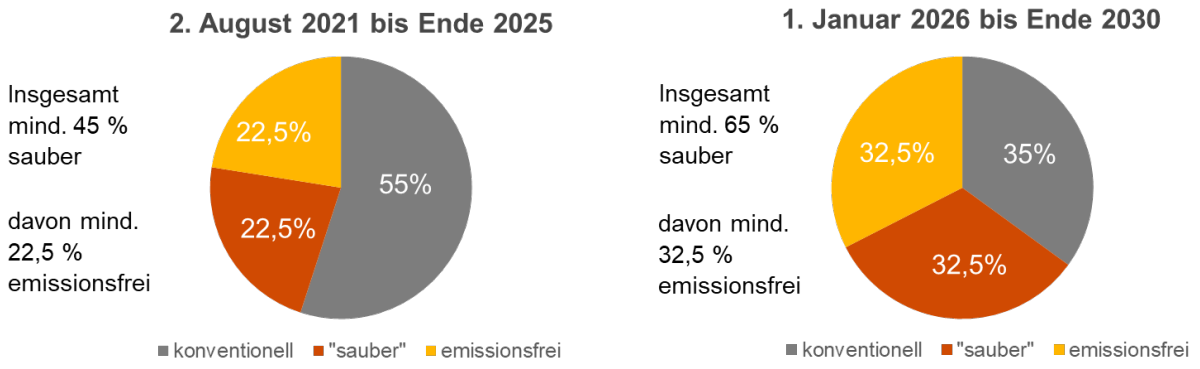


Abbildung 2: Beschaffungsquoten der CVD in den Referenzperioden (eigene Darstellung)

Als emissionsfrei gelten dabei Fahrzeuge ohne konventionellen Verbrennungsmotor oder mit Verbrennungsmotor, der weniger als 1 g CO_2/kWh bzw. 1 g CO_2/km emittiert. Von praktischer Bedeutung werden in diesem Sinne vor allem Busse mit batteriebetriebenem Elektromotor oder mit einem Brennstoffzellenantrieb sein. Auch Trolleybusse mit vollelektrischem Notfahraggregat 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.

Über die konkret durchgeführten Maßnahmen zur Umsetzung der Clean Vehicles Directive müssen die einzelnen Mitgliedstaaten bis zum 2. August 2022 berichten. Diese Berichterstattung konkretisiert dann auch die Absichten des Bundes in Bezug auf die Durchsetzung, einschließlich eines Zeitplans und einer möglichen Lastenverteilung zwischen den verschiedenen Zuständigkeitsebenen. 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 noch Unklarheiten bei der Anwendung der CVD, die juristisch aufgeklärt werden sollten. Dies betrifft beispielsweise die unterschiedlichen Betrachtungseben „Aufgabenträger/öffentlicher Dienstleistungsauftrag“ und „Verkehrsunternehmen/Sektorenauftraggeber“. Gemäß § 6 (4) SaubFahrzeugBeschG ist für die Quotenfestlegung jeweils das Datum des Zuschlags des jeweiligen Beschaffungsvorgangs maßgeblich. Dies ist insofern einerseits auf 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 oder 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 dann 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.

III. Zielsetzung und Inhalte der Machbarkeitsstudie

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

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

Systementscheidung hinsichtlich der zukünftigen Antriebstechnologie zu treffen. Dies ist auch im aktuellen, Mitte 2021 verabschiedeten, Nahverkehrsplan für den Landkreis Mittelsachsen verankert, der eine Prüfung der Umstellung auf alternative Antriebe, abgestimmt auf die Gegebenheiten vor Ort, vorsieht.

Die vorliegende Machbarkeitsstudie mit der Darstellung potenzieller Technologie- und Antriebsvarianten wurde mit der Zielsetzung entwickelt, eine fundierte und belastbare Diskussionsgrundlage für die anstehenden Systementscheidungen der Regiobus zu erstellen. Dabei wird unter Berücksichtigung technischer, betrieblicher und wirtschaftlicher Aspekte eine geeignete Vorzugstechnologie bzw. ein geeigneter Technologiemix für den Untersuchungsraum identifiziert und ein technisches Grobkonzept erarbeitet. Dieses kann im Anschluss an eine zu treffende Systementscheidung, für die dann favorisierte Antriebstechnologie, umsetzungsfähig erweitert werden. Aus technischer Perspektive ist es Zielsetzung des Projektes, aus der Vielzahl an Ausführungsvarianten eine passende Lösung vor dem Hintergrund der strategischen Ziele der Regiobus zu ermitteln. Dies betrifft sowohl die Fahrzeugausführung als auch die erforderliche Infrastruktur (Betriebshof/Lade- bzw. Betankungsinfrastruktur) und etwaige erforderliche Anpassungen des Betriebskonzeptes. Da eine solch weitreichende Entscheidung große Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit eines ÖPNV-Unternehmens hat, werden hierbei zudem die damit zusammenhängenden wirtschaftlichen Auswirkungen (Investitions- und Betriebskosten) genau betrachtet. Diese wurden insbesondere auch im Vergleich zu den heutigen und zukünftigen Kostenstrukturen beim Betrieb von Dieselbussen analysiert (z. B. Anstieg der Treibstoffkosten durch CO_2-Besteuerung).

Zusammengefasst werden mit der Machbarkeitsstudie folgende Ziele adressiert:

- **Wirtschaftlichkeit:** Die finanziellen Auswirkungen der Dekarbonisierung der Busflotte sind für die verschiedenen Antriebsformen und Quotenszenarien belastbar und transparent zu ermitteln. So können diese in den Wirtschaftsplan der Regiobus eingearbeitet werden (insbesondere zusätzlicher Zuschuss- und Finanzierungsbedarf).

- **Migrationspfad Flotte und Infrastruktur**: Die infrastrukturellen Anpassungserfordernisse der jeweiligen Antriebstechnologien sind ausführlich darzustellen und zu beschreiben. Hierbei werden sinnvolle Empfehlungen für mögliche Ausbaustufen in Abhängigkeit des Migrationspfades gegeben. Dies steht in engem Zusammenhang mit einer entsprechend zielführend angepassten Busbeschaffungsplanung.

- **Förderkulisse**: Die für die jeweiligen Antriebsformen zur Verfügung stehenden Förderquellen auf den verschiedenen Ebenen (Bund, Land und ggf. weitere) werden ermittelt und aufbereitet.

- **Transparente Entscheidungsgrundlagen**: Die Ergebnisse der Machbarkeitsstudie sind in zielgruppengerechte und aussagekräftige Informations- und Entscheidungsvorlagen überführt worden.

Die Ergebnisse der Machbarkeitsstudie werden nachfolgend strukturiert nach den sechs **Arbeitspaketen** (AP) dargestellt:

- AP 1 – Einführung in die Elektromobilität im straßengebundenen ÖPNV – fahrzeugtechnische und markseitige Grundlagen,
- AP 2 – Analyse des Status quo, technische Grobkonzeptionierung und Bewertung der Technologiealternativen einschließlich infrastruktureller, betrieblicher und energetischer Auswirkungen,
- AP 3 – Entwicklung eines Migrationspfades der Flottenumstellung,
- AP 4 – Bewertung und Definition notwendiger infrastruktureller und betrieblicher Maßnahmen für potenzielle Technologiealternativen
- AP 5 – Kostenanalyse und Finanzierungsplanung unter Berücksichtigung möglicher Förderungen
- AP 6 – Ableitung von Handlungsempfehlungen hinsichtlich der zeitlichen, betrieblichen und technologischen Umsetzungsplanung
- sowie einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf die nächsten Schritte umfassend dargestellt.

B. AP 1 – Einführung in die Elektromobilität im straßengebundenen ÖPNV – fahrzeugtechnische und marktseitige Grundlagen

Die erfolgreiche Beschaffung und Einführung eines Elektrobusses sowie 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 428 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.

I. Alternative Antriebe im ÖPNV: Technische Grundlagen und Marktübersicht

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 Traktionsaktionsbatterie, 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 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 daneben 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 werden und bei Streckenabschnitten ohne Oberleitung eingesetzt werden.

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

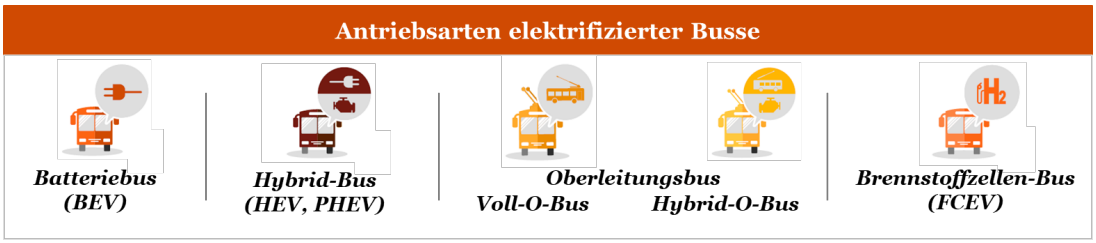


Abbildung 3: Antriebsarten elektrifizierter Busse im ÖPNV (eigene Darstellung)

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).

Im Rahmen einer ausführlichen Präsentation wurden bei der Regiobus die verschiedenen Fahrzeugkonzepte sowie die Lade- und Tankinfrastruktur vorgestellt.

II. 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 Abbildung 17).

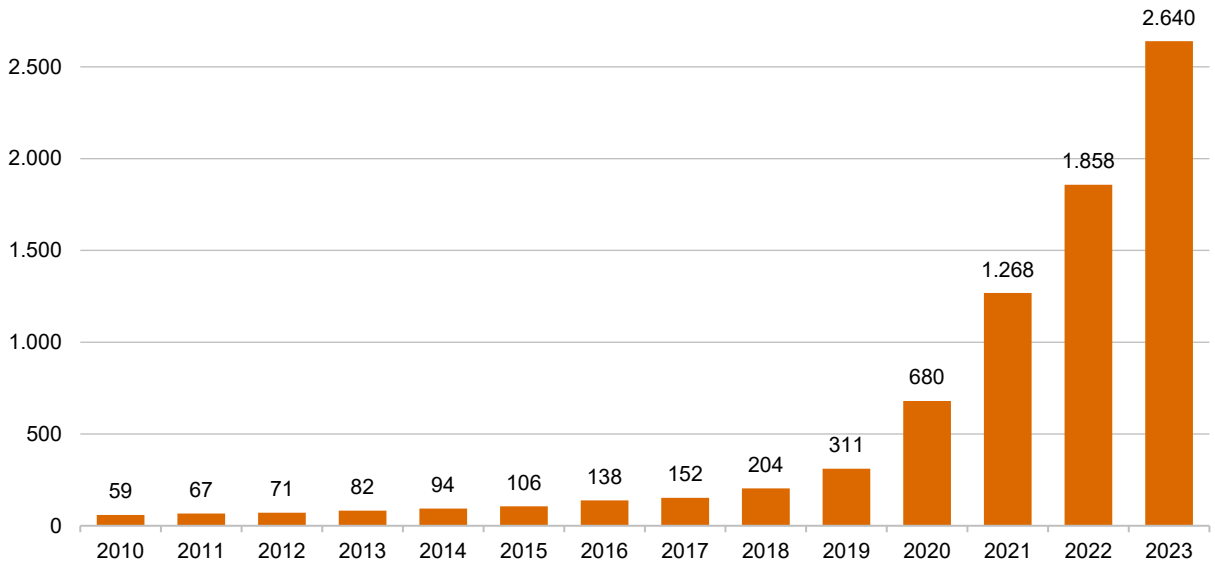


Abbildung 4: E-Bus-Bestand in Deutschland in den Jahren 2010 - 2023 - Datenstand: 31. Dezember 2023 (eigene Darstellung)

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.

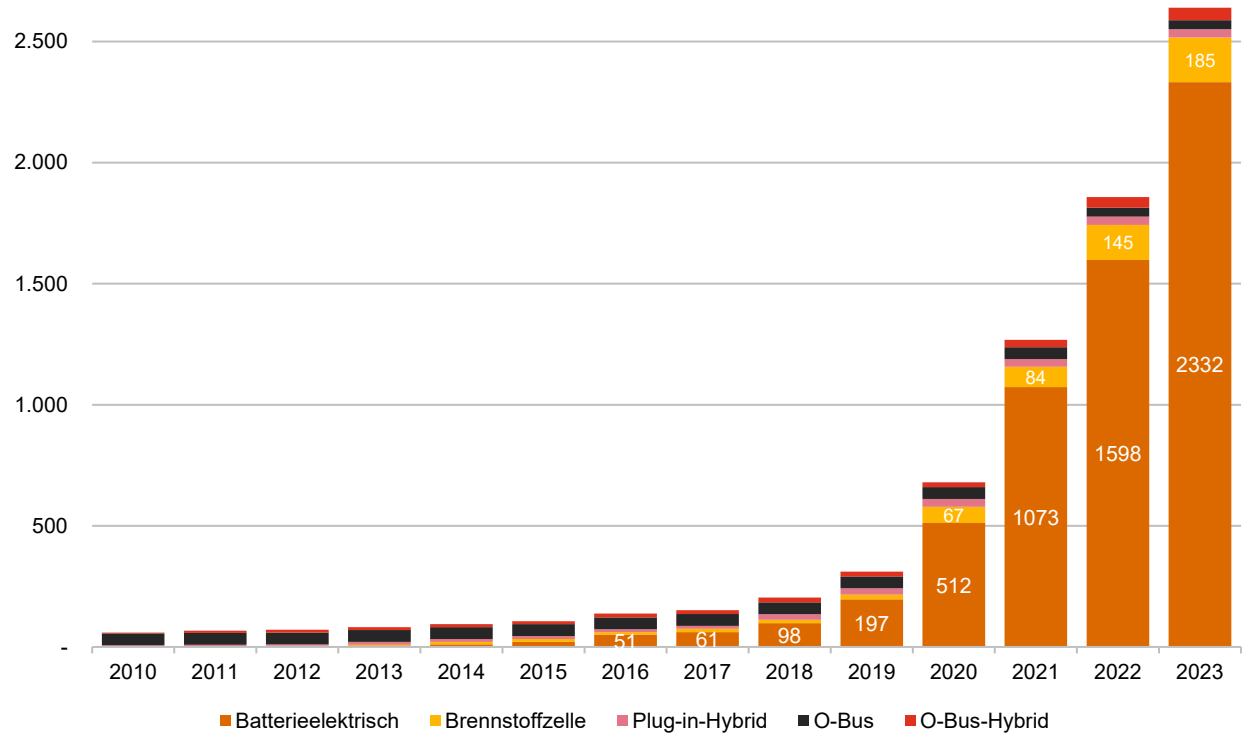


Abbildung 5: Elektrobus-Bestand nach Antriebsarten (n=2.640) (eigene Darstellung)

Abbildung 18 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.

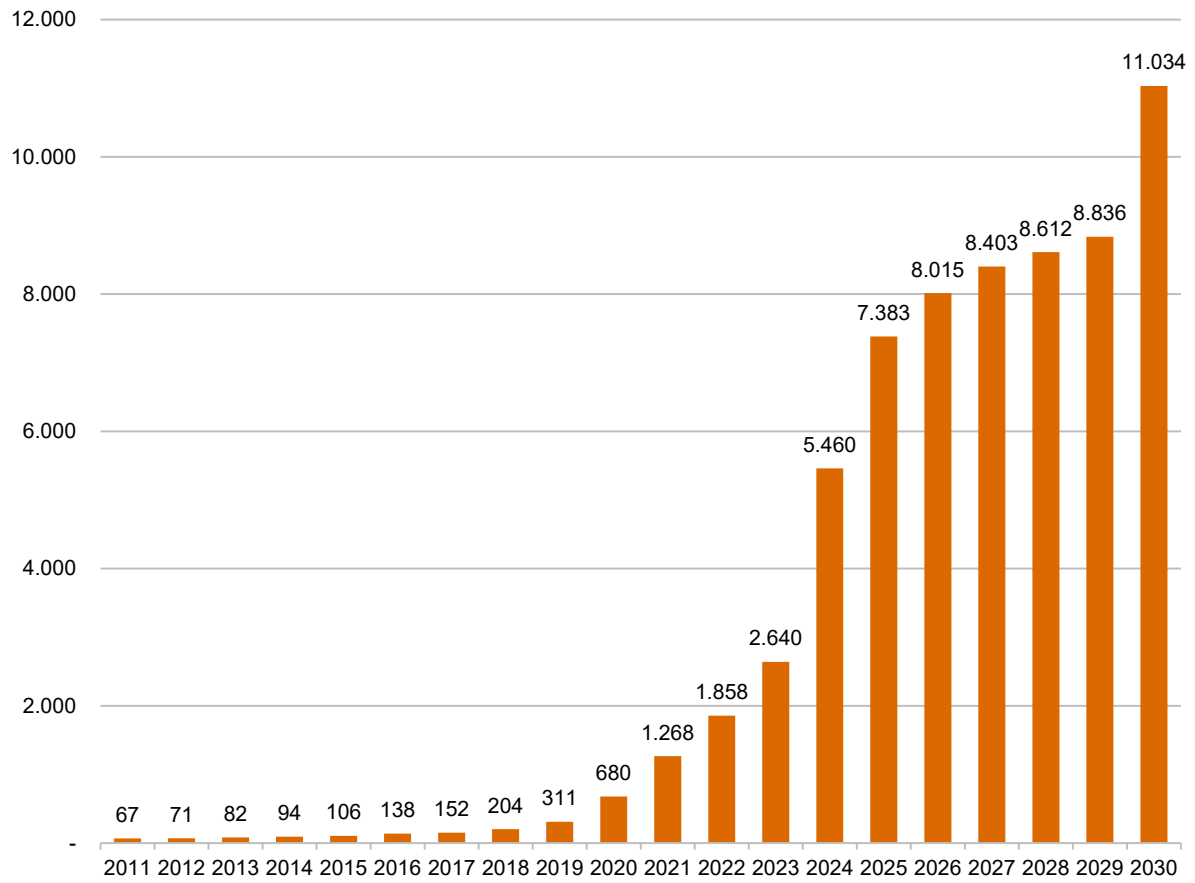


Abbildung 6: Geplante Entwicklung des Elektrobus-Bestands bis 2030 (eigene Darstellung)

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 Abbildung 20).

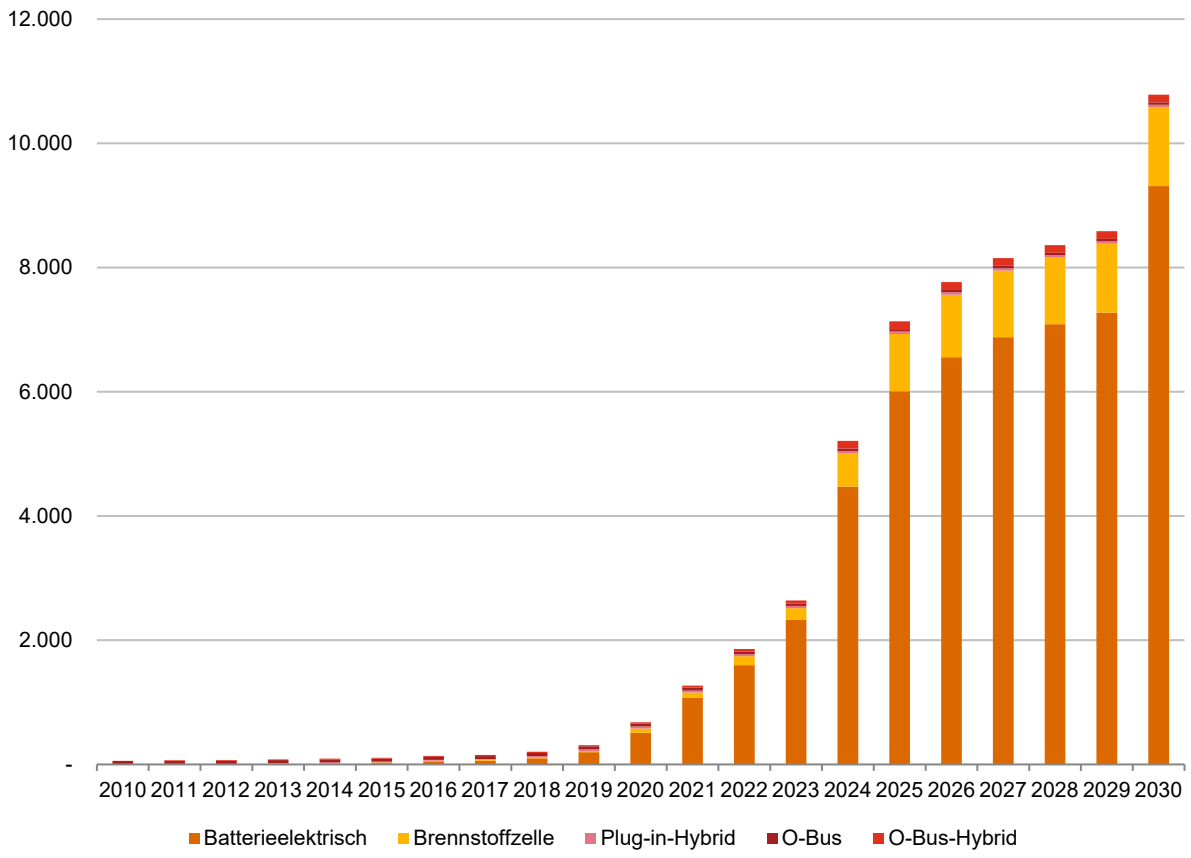


Abbildung 7: Elektrobus-Bestand nach Antriebsarten bis zum Jahr 2030 (n=11.034) (eigene Darstellung)

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 Batteriebussen 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.

	Depotladung	Gelegenheits-ladung	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

Tabelle 1: Übersicht von Batteriebussen nach Bauart und Ladestrategie (n=2.332)

Es lässt sich demnach 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.

III. Übersicht des verfügbaren Fahrzeugangebots

Für die Entwicklung einer Strategie für die Flottentransformation ist es wichtig, dass 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 (Details siehe Fahrzeugliste Anhang). Im Rahmen der Erhebung des Angebotes derjenigen E-Bus-Modelle, die auf dem europäischen Markt verfügbar sind, wurden insgesamt 295 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 (203 Fahrzeuge) stellen knapp 70 % des gesamten Fahrzeugangebotes dar. Diesel-Mild-Hybrid- und O-Busse repräsentieren die zweitgrößte Gruppe mit 28 Fahrzeugen. FCEV-Busse weisen in der relativen Betrachtung ein geringes Angebot auf (19 Fahrzeuge). Auch E-Busse als Plug-In-Hybride werden auf dem europäischen E-Bus-Markt vergleichsweise selten angeboten (15 Fahrzeuge). Die folgende Abbildung zeigt die Anzahl der E-Bus-Modelle nach Antriebsart im Überblick.

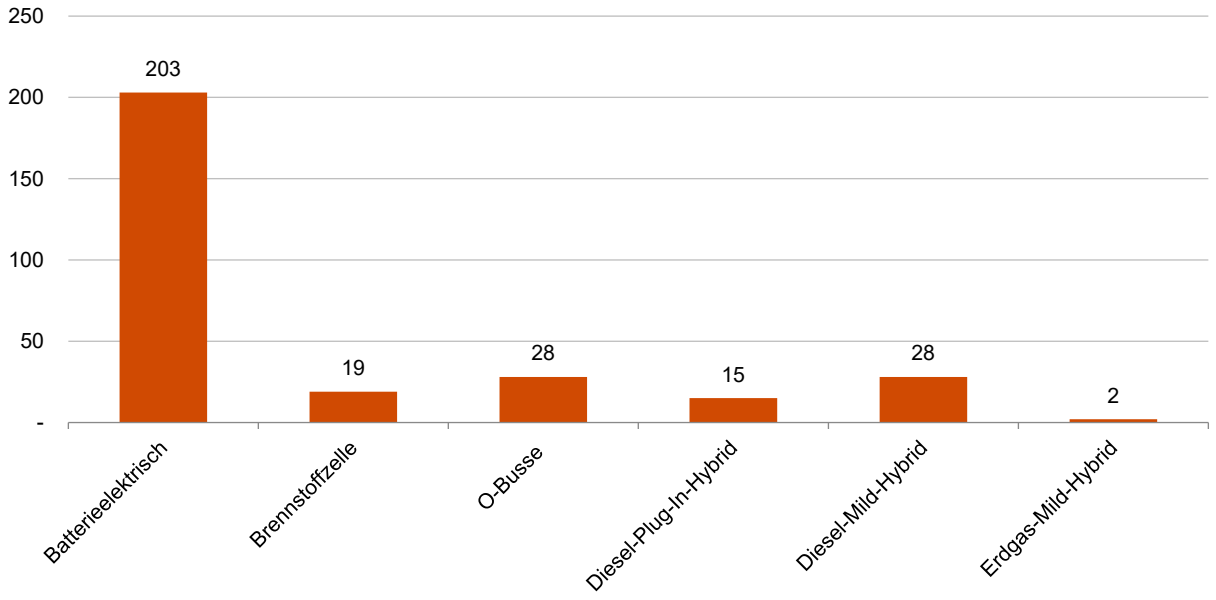


Abbildung 8: Fahrzeugmodelle nach Antriebsart (eigene Darstellung)

Bauart

Bei der Mehrheit der auf dem Markt angebotenen E-Bus-Modelle handelt es sich um Standard-Solobusse (135), gefolgt von Gelenkbussen (62) und Midi-Bussen (49). Hinsichtlich der Bauarten Mini, Doppeldecker, Klein, Doppelgelenk und Standard-3-Achs sind jeweils weniger als 20 Fahrzeugmodelle verfügbar, wie folgende Abbildung zeigt.

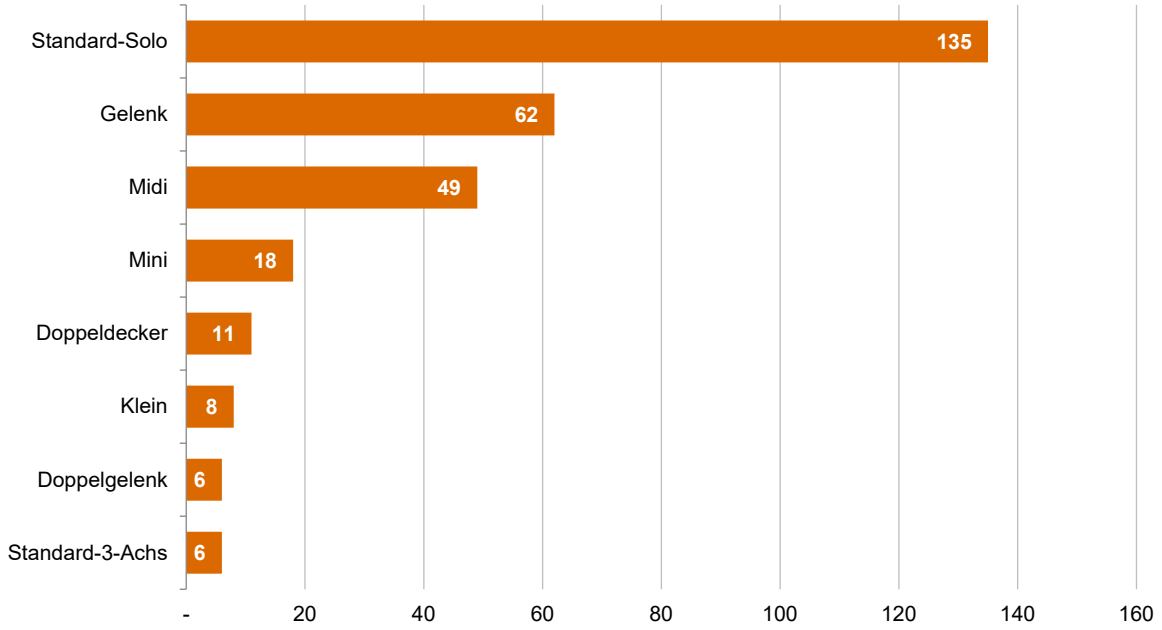


Abbildung 9: Anzahl der verfügbaren Fahrzeugmodelle nach Bauart (eigene Darstellung)

Ladestrategie

In Bezug auf das Ladekonzept der erfassten E-Bus-Modelle zeigt sich ebenfalls ein deutlich ausgeprägter Schwerpunkt. Die meisten verfügbaren Fahrzeugmodelle sind Depotlader. 41 Fahrzeugmodelle werden hingegen als Gelegenheitslader angeboten. Es existieren daneben auch BEV-Busse, die ein Mischkonzept aus Depot- und Gelegenheitsladen ermöglichen. Diese machen ca. 10 % der verfügbaren Modelle aus. Die folgende Abbildung zeigt zusammenfassend die Anzahl der angebotenen E-Bus-Modelle nach Ladekonzept.

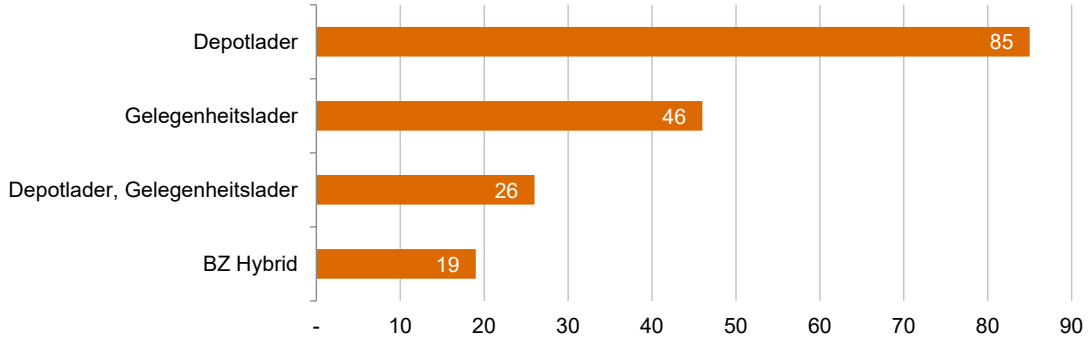


Abbildung 10: Anzahl der angebotenen Fahrzeugmodelle nach Ladestrategie (eigene Darstellung)

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 318 kWh, Gelenkbus 542 kWh) auf als Gelegenheitslader, wie folgende Abbildung veranschaulicht.

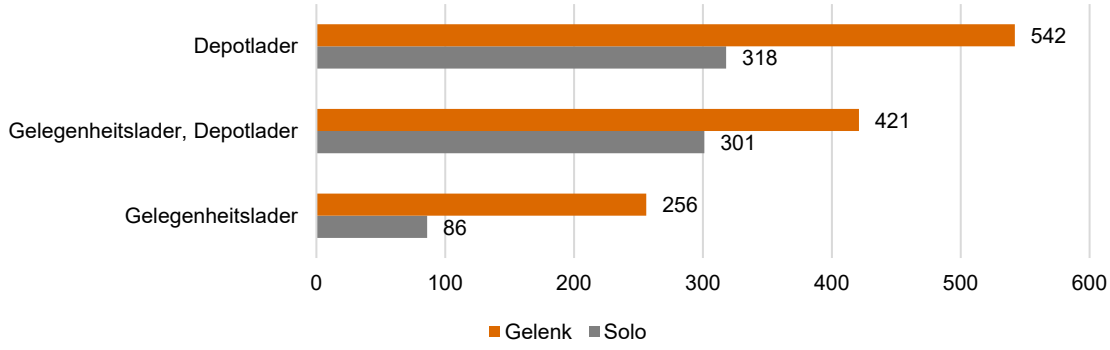


Abbildung 11: Verfügbare durchschnittliche Batteriekapazitäten angebotener Batteriebusse nach Ladestrategie und Bauart in kWh (eigene Darstellung)

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 (367 km bei Gelenkbussen und 314 km bei Solobussen). Brennstoffzellenbusse haben dagegen im Mittel eine höhere Reichweite. Solobusse erzielen hier mit einer Wasserstoff-Tankfüllung eine durchschnittliche Reichweite von 480 km gemäß Angaben der Hersteller. Da derzeit keine Brennstoffzellen-Gelenkbusse am Markt verfügbar sind, kann hier kein Wert ausgewiesen werden. Die folgende Abbildung stellt die durchschnittlichen maximalen Reichweiten von Batterie- und Brennstoffzellenbusse nach Ladestrategie und Bauart gegenüber.

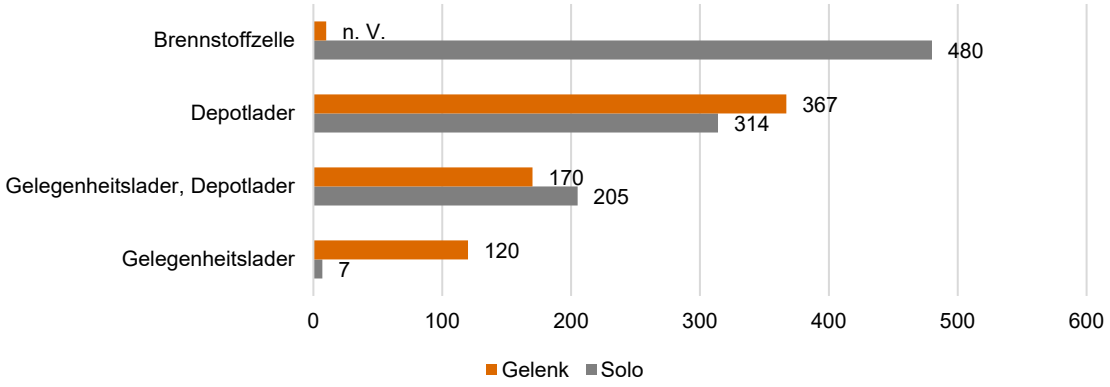


Abbildung 12: Durchschnittliche Reichweiten (gemäß Herstellerangabe) angebotener Batteriebusse nach Ladestrategie und Bauart in km (eigene Darstellung)

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 unter schwierigen Bedingungen (kalter Wintertag, heißer Sommertag, Topografie etc.) operiert. 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.

C. AP 2 – Analyse Status quo und technische Grobkonzeptionierung

Die Machbarkeitsstudie ist auf die Betriebshöfe (oder Depots) Mittweida und Hartmannsdorf fokussiert. Im Rahmen der begleitenden Abstimmungstermine wurden einzelne Arbeiten auch für weitere Depots im Sinne einer freiwilligen Zusatzleistung ausgeführt. Diese sind im vorliegenden Bericht nicht dokumentiert. Bei Bedarf sind die Ergebnisse in den bereitgestellten Präsentationsunterlagen zu finden.

Im Folgenden werden die Umläufe, die einem der beiden Depots zugeordnet werden, auch als Linienbündel bezeichnet. Das „Linienbündel (LB) Mittweida“ umfasst also alle Umläufe, die ab diesem Depot starten und dort enden.

In den Verbrauchsgrafiken für batterieelektrische Fahrzeuge ist jeweils die maximale Entladung im Umlauf aufgeführt. Da bei planmäßigen Aufenthalten im Depot die Fahrzeugbatterie nachgeladen werden kann (Nutzung der Ladeinfrastruktur des Depots), ist die Entladung am Ende des Umlaufs nicht zwingend die tiefste Batterieentladung im gesamten Umlauf. Da es sich hier um eine Machbarkeitsuntersuchung handelt, bei der die Batteriekapazität variabel ist, wird grundsätzlich die Batterieentladung thematisiert. Diese kann als Mindestmaß an Speicherkapazität verstanden werden, um den jeweiligen Umlauf zu erfüllen.

I. Untersuchung Einzelumläufe

Im ersten Schritt der Umlaufanalyse liegt der Fokus auf Einzelumläufen. Ein Einzelumlauf entspricht dabei einem Umlauf aus der beigestellten Umlaufliste, was über die Umlaufbezeichnung identifiziert wird.

Im Verlauf der Untersuchung wird dem Umstand Rechnung getragen, dass ein Fahrzeug durchaus mehrere Einzelumläufe an einem Tag absolvieren kann (Fahrzeugtagesumlauf). Sowohl Einzel- als auch Fahrzeugtagesumläufe können planmäßige Aufenthalte im Depot beinhalten. Für batterieelektrische Fahrzeuge sind elektrische Ladeinfrastrukturen in den jeweiligen Depots zwingend erforderlich. Entsprechend wird berücksichtigt, dass planmäßige Aufenthalte in den Depots zur Zwischenladung genutzt werden können. Dabei gilt:

- Zwischenladungen ‚im Umlauf‘ werden nur im Stammdepot des Fahrzeugs ausgeführt
- Aufenthaltsdauern werden nur nach Abzug einer 15-minütigen Deltazeit als Ladeintervall genutzt, um den Einfluss von Verspätungen zu berücksichtigen

Die Zwischenladungsvorgänge werden im Rahmen der Lastganguntersuchung selbstverständlich als Ladevorgang berücksichtigt, hier jedoch nicht weiter thematisiert.

1. Interpretation und Vorauswahl Vorzugstechnologie

Bei der Gegenüberstellung von Batterie- und Brennstoffzellentechnik wirken sich teils gegenläufige Hauptcharakteristika beider Techniken aus.

- FCEV weisen gegenüber BEV **heute** merkliche Reichweitenvorteile auf. Kurzfristig sind die Mengen machbarer Umläufe ausgeprägter als für BEV.
- Im Gegensatz zur FCEV-Technik wird für Traktionsbatterien eine Fortsetzung des Entwicklungstrends erwartet. Dies führt zu einer technischen Gleichwertigkeit in absehbarer Zeit. Aufgrund der zurückhaltenden Einschätzung der technischen Entwicklung ist anzunehmen, dass BEV früher als dargestellt auf dem Niveau von FCEV rangieren werden.
- FCEV sind im Markt weniger stark vertreten als BEV. Neben einem insgesamt eingeschränkten Marktangebot bedeutet dies insbesondere, dass Fahrzeugtypen abseits der „Standardgrößen“ (12 m Solobus und 18 m Gelenkbus) aktuell nicht verfügbar sind.

Trotz der Reichweitenvorteile von FCEV weisen BEV bereits heute ein deutliches Potenzial für die Flottendekarbonisierung auf. Nennenswerte Mengen der aktuellen Umläufe können bereits mit aktueller Technik (ohne Anpassungsmaßnahmen) auf BEV umgestellt werden.

Da die Flottenumstellung nicht ad-hoc sondern schrittweise erfolgt, kann das technische Entwicklungspotenzial von BEV über die Beschaffungsintervalle ausgenutzt werden, indem zunächst ‚einfache‘ Einsätze elektrifiziert werden. Langfristig stehen für beide Technologievarianten vergleichbare Mengen kritischer Umläufe zur Rede, die durch Anpassungsmaßnahmen machbar gestaltet werden müssen (i.d.R. durch Umlaufanpassung).

Die Ergebnisse lassen sich am besten in tabellarischer Form gegenüberstellen. Im LB Mittweida zeigt sich deutlich, dass mit BEV nennenswerte Anteile aller Umläufe bereits heute elektrifizierbar sind. Bei beiden Solobusvarianten sind mindestens zwei Drittel aller Umläufe direkt umstellbar.

	Anzahl machbarer / langfristig kritischer Umläufe im Vergleich										
Fahrzeugtyp	Technik	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solobus 12m	BEV	12	86%	13	93%	13	93%	13	93%	1	7%
(14 Umläufe)	FCEV	13	93%	13	93%	13	93%	13	93%	1	7%
Solobus 15m	BEV	4	67%	4	67%	4	67%	5	83%	1	17%
(6 Umläufe)	FCEV	4	67%	4	67%	4	67%	4	67%	2	33%
Gelenkbus	BEV	1	100%	1	100%	1	100%	1	100%	0	0%
(1 Umlauf)	FCEV	1	100%	1	100%	1	100%	1	100%	0	0%
Midibus	BEV	2	50%	3	75%	4	100%	4	100%	0	0%
(4 Umläufe)	FCEV	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	4	100%
Kleinbus	BEV	2	40%	2	40%	3	60%	3	60%	2	40%
(5 Umläufe)	FCEV	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	5	100%

Tabelle 2: Übersicht Einzelumlaufanalyse – LB Mittweida

Ähnliche Umstände zeigen sich im LB Hartmannsdorf, wo die Machbarkeitsquote für BEV-Solobusse heute ebenfalls bei mindestens zwei Drittel aller Umläufe liegt.

	Anzahl machbarer / langfristig kritischer Umläufe im Vergleich										
Fahrzeugtyp	Technik	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solobus 12m	BEV	15	68%	17	77%	20	91%	21	95%	1	5%
(22 Umläufe)	FCEV	20	91%	20	91%	20	91%	20	91%	2	9%
Solobus 15m	BEV	1	100%	1	100%	1	100%	1	100%	0	0%
(1 Umlauf)	FCEV	1	100%	1	100%	1	100%	1	100%	0	0%
Midibus	BEV	0	0%	2	100%	2	100%	2	100%	0	0%
(2 Umläufe)	FCEV	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	2	100%
Kleinbus	BEV	1	33%	2	67%	3	100%	3	100%	0	0%
(3 Umläufe)	FCEV	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	3	100%

Tabelle 3: Übersicht Einzelumlaufanalyse – LB Harmannsdorf

Besonders kritisch zeigen sich Fahrzeugtypen abseits der Standardausführungen für FCEV, da kein Marktangebot verfügbar ist. Entsprechend müssen in beiden Fällen, Mittweida und Hartmannsdorf, die entsprechenden Umläufe als nicht machbar klassifiziert werden. Grundsätzlich gilt eine Erweiterung des Marktangebots hier zwar nicht als unmöglich, jedoch sind keine Tendenzen erkennbar hier in absehbarer Zeit auf Angebote namhafter europäischer Hersteller zurückgreifen zu können.

Auch wenn dies für die ersten Umstellungsschritte keine besonderen Probleme darstellt, da ausreichende Mengen geeigneter ‚Kandidaten' im Feld der Solobusse zur Verfügung stehen, wird langfristig der Einsatz von BEV als unvermeidlich eingeschätzt. Dabei gilt, dass Mischflotten (BEV und FCEV) grundsätzlich eine Alternative sein können.

Insgesamt sprechen die Zahlen machbarer BEV-Umläufe dafür, dass die CVD-Anforderungen mit BEV-Technik ohne Probleme übererfüllt werden können. Auch wenn eine belastbare Aussage erst auf Basis von Fahrzeugtagesumläufen getroffen werden kann, kann hier bereits eine Vorzugstechnologie ausgewählt werden.

Für den weiteren Verlauf der Untersuchung werden batterieelektrische Antriebe als Vorzugstechnologie betrachtet. Hierbei fließt ein, dass sowohl Anschaffungs- als auch Betriebskosten von FCEV üblicherweise deutlich höher sind als für BEV. Diese allgemeine Annahme wird im Verlauf der Untersuchung selbstverständlich in den kommerziellen Abschnitten validiert. Vereinfacht formuliert scheinen die Betriebsanforderungen der Regiobus mit BEV gut erfüllbar zu sein, wenn eine sukzessive Flottenumstellung zur Debatte steht. Erfahrungsgemäß stellen BEV bei technischer Parität die sinnvollste Alternative dar. Entsprechend wird BEV-Technik im Folgenden als Initiallösung interpretiert, die bei Bedarf um FCEV ergänzt werden kann, wenn dies betrieblich und wirtschaftlich sinnvoll ist.

Im Rahmen von AP 2 wird die Analyse parallel für BEV und FCEV ausgeführt, um abschließend auf Basis der Fahrzeugzahlen und den Mehraufwendungen für einen vollständigen Flottenausbau die Vorauswahl einer Vorzugstechnologie zu bestätigen oder bei Bedarf zu korrigieren.

FCEV werden ansonsten als Härtefalllösung aufgegriffen, falls übliche Anpassungsmaßnahmen für BEV nicht wirtschaftlich sinnvoll zum Ziel führen. Aufgrund der Reichweitenvorteile gilt, dass Machbarkeitsaussagen für BEV auch auf FCEV übertragen werden können. Sofern gewünscht, ist ein alternativer Einsatz von FCEV statt BEV möglich, wenn die verbundenen Kosten gerechtfertigt sind.

In den folgenden Kapiteln wird der Betrachtungsrahmen vom Level der Einzelumläufe auf Fahrzeugtagesumläufe angehoben. Auf Basis der Einzelumläufe lassen sich zunächst nur Tendenzen und erfahrungsbasierte Rückschlüsse ableiten, die im Folgenden konkretisiert werden, indem Fahrzeugzahlen und Mehraufwendungen für die Flottentransformation beziffert werden.

II. Untersuchung Fahrzeugtagesumläufe

Einleitend wurden Einzelumläufe in den Untersuchungsfokus gesetzt, um erste Tendenzen für die Machbarkeit zu bestimmen. Ein Einzelumlauf ist dabei eine geschlossene Betriebsfahrt, die an einem Betriebshof startet und endet. Planmäßige Aufenthalte ‚innerhalb des Umlaufs' im Betriebshof können in den Umlaufdaten enthalten sein und werden grundsätzlich zur Zwischenladung genutzt, wenn die Aufenthaltsdauern ausreichen.

Zunächst wurde vernachlässigt, dass Fahrzeuge grundsätzlich mehrere Einzelumläufe an einem Betriebstag ausführen können. Die Summe aller Einzel-Umläufe pro Fahrzeug wird hier auch als Fahrzeugtagesumlauf bezeichnet. Die Transition von Einzel- zu Fahrzeugtagesumläufen kann sich auf die Machbarkeit auswirken, was hier folgend untersucht wird.

Von Bedeutung ist insbesondere, dass nicht Umläufe, sondern Fahrzeuge einem Antriebswechsel unterzogen werden. Ein Fahrzeug, dass mehrere Einzelumläufe an einem Tag bedient, muss am anspruchsvollsten Teilumlauf bemessen werden. Ein Fahrzeug, dass beispielsweise zwei „heute unkritische" Einzelumläufe fährt, bevor ein anspruchsvoller Einzelumlauf gefahren wird, kann erst umgestellt werden, wenn die Antriebstechnik für den anspruchsvollen Einzelumlauf ausreichend ist. Entsprechend wird hier nicht die Umlaufanzahl, sondern die Anzahl umstellbarer Fahrzeuge auf der Zeitachse (technische Entwicklung) bewertet, was später konkret wirtschaftlich bewertet werden kann.

Darüber hinaus muss berücksichtigt werden, dass die aktuellen Umlaufkonstellationen auf Basis der Dieseltechnik erstellt und optimiert wurden. Die Energiespeicherkapazitäten (Tankgröße) von Dieselbussen erlaubt Fahrreichweiten von deutlich über 400 km und ist damit sämtlichen emissionsfreien Antriebsalternativen deutlich überlegen. Auch aufgrund sehr kurzer Zeit für die Energiezuführung (Betankungsdauer) sind Reichweiten keine Problemstellungen in der aktuellen Umlaufplanung. In der Praxis bedeutet dies, dass Einzelumläufe unmittelbar nacheinander ausgeführt werden können, ohne dass Energie zwischen den Einzelumläufen zugeführt werden muss.

Für alternative Antriebssysteme gilt dies nicht zwingend. Abhängig von den Fahranforderungen kann die Zuführung von Energie notwendig sein. Abhängig von den Zeiträumen zwischen den Einzelumläufen kann dies Einfluss auf die Machbarkeit haben. Die Auswirkung auf die Machbarkeit ist dabei vielseitig und teilweise mit anderen Untersuchungsaspekten eng verbunden. Mögliche Auswirkungen sind beispielsweise:

- Erhöhung der notwendigen Fahrzeugmenge (Fahrzeugmehrbedarf):
  Teilweise kann es erforderlich sein, die Verkettung der Umläufe zu variieren, um die Dauer der Ladeintervalle zu verlängern. Abhängig von den Einsatzdauern und Nachladebedarfen weiterer Umläufe kann es sein, dass für die Neuverkettung der Einzelumläufe mehr Fahrzeuge erforderlich sind als im konventionellen Betrieb

- Verzögerung der Machbarkeit auf der Zeitachse (nur BEV).
  Falls das Zeitintervall zwischen zwei Umläufen nicht für eine Vollladung ausreicht, wird der zweite Umlauf mit einer teilentladenen Batterie begonnen. Abhängig vom Energiebedarf des zweiten Einzelumlaufs kann eine größere Batteriekapazität erforderlich sein als für die separate Erfüllung beider Einzelumläufe. Nach Umlaufverkettung muss die Batteriekapazität des Fahrzeuges den Energiebedarf des zweiten Einzelumlaufs **und** das Ladedefizit aus der Zwischenladung abdecken können.

1. Umlaufverkettung

Einleitend wird die mögliche Auswirkung auf die Fahrzeugmenge untersucht. Als Referenzgröße wird die Fahrzeugzahl der Einsatzflotte im Dieselbetrieb bestimmt (Vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Hierbei werden alle Einzelumläufe pro Fahrzeugtyp so verkettet, dass die minimale Fahrzeugzahl zur Erfüllung aller Einzelumläufe bestimmt wird.

Es gilt zu beachten, dass die Einsatzflotte ausschließlich die Menge aller zum Betrieb (Umlauferfüllung) erforderlichen Fahrzeuge darstellt. Reservebusse werden als zusätzliche Fahrzeugmenge aufgefasst, da diese keine Fahranforderungen erfüllen müssen („stehende Reserve“ wird ersatzweise für Fahrzeuge der Einsatzflotte eingesetzt). Die Fahrzeugflotte – inklusive Fahrzeugreserve – liegt über den Werten für die Einsatzflotte!

Ale Referenzwert für die Einsatzflotten ergibt sich pro Standort:

Fahrzeugtyp	Anzahl LB Mittweida	Anzahl LB Hartmannsdorf
Solobus 12m	13	22
Solobus 15m	6	1
Gelenkbus	1	0
Midibus	4	2
Kleinbus	5	3

Tabelle 4: Referenzwerte Einsatzflotten (mit konventionellen Antrieben)

Bei Übertragung auf batterieelektrische Antriebe zeigt sich, dass die Zeitintervalle zwischen Einzelumläufen immer ausreichend groß sind, um keinen Fahrzeugmehrbedarf auszulösen. Die Referenzwerte für konventionelle Antriebe können spätestens mit ab 2038 erwarteter Batterietechnik

auch mit BEV erzielt werden. Der Einfluss der Umlaufverkettung auf den Zeitpunkt der Machbarkeit wird in den folgenden Abschnitten geprüft.

2. BEV Einsatzpotenziale ohne Anpassungsmaßnahmen

Die Verkettung von Einzelumläufen zu Fahrzeugtagesumläufen kann für BEV Einfluss auf den Zeitpunkt der Machbarkeit haben, da die Traktionsbatterie im Zweifel Ladedefizite kompensieren muss. Als Ladedefizit wird in diesem Kontext die Teilmenge des Energiebedarfs des ersten von zwei verketteten Umläufen verstanden, die in der Ladezeit zwischen den Umläufen nicht nachgeladen werden kann.

Um im Verlauf der Untersuchung bewerten zu können, inwiefern mögliche Flottenmigrationspfade[5] realisierbar sind, wird zunächst das Einsatzpotenzial ohne Anpassungs- oder Sondermaßnahmen ermittelt. Dabei wird berechnet, welche Fahrzeugzahlen der Einsatzflotte im direkten Eins-zu-Eins-Ersatz über der Zeitachse möglich sind. Für die Realisierung sind keine Maßnahmen erforderlich, sofern im Betriebshof eine passende Ladeinfrastruktur vorgesehen wird.

Die Zeitachse wird über die Entwicklungsprognose der Batterietechnik bemessen. Mit steigender Kapazität können anspruchsvollere Tageseinsätze erfüllt werden. Auch hier ist aus Komplexitätsgründen ein Stufenmodell angesetzt, dass über Fünfjahreszeiträume konstante Werte für die Batterietechnik unterstellt. Die Werte entsprechen denen der Einzelumlaufanalyse und sind entsprechend konservativ ausgelegt. Es ist anzunehmen, dass die real marktverfügbaren Kapazitäten deutlich über den angesetzten Referenzwerten liegen. Anders formuliert kann angenommen werden, dass die mögliche („machbare“) Fahrzeugzahl voraussichtlich sogar größer ist als im Modell unterstellt.

Im Zuge der Einzelumlaufbetrachtung wurde bereits offensichtlich, dass einzelne Umläufe als langfristig kritisch bewertet werden müssen. Diese Einzelumläufe können auch mit ab 2038 antizipierten Batteriekapazitäten nicht erfüllt werden. Entsprechend wird das BEV-Einsatzpotenzial ohne Anpassungsmaßnahmen keine Flottenvollumstellung ermöglichen können. Im Fokus steht hier zunächst die Fragestellung welche Potenziale für die ersten Umstellungsschritte vorliegen, bevor langfristig mit Hinblick auf die Vollumstellung Anpassungsmaßnahmen ergriffen werden. Die notwendigen Anpassungsmaßnahmen werden im Folgekapitel untersucht.

Bei Betrachtung der Ergebnisse zeigt sich, dass ähnliche Machbarkeitsquoten, wie auf Ebene der Einzelumlaufanalyse erreicht werden. Die Einflüsse der Umlaufverkettung auf die Machbarkeit sind also überschaubar.

[5] Umstellungspläne auf emissionsfreie Antriebe in verschiedenen Szenarien bzw. ‚Umstellungsgeschwindigkeiten‘. vgl. hierzu Kapitel D.III Migrationspfade im Kontext unterschiedlicher Umstellungsszenarien für die Regiobus

Mit Blick auf das direkte Einsatzpotenzial im LB Mittweida wird deutlich, dass in Summe 20 von 29 Fahrzeugen der Einsatzflotte (ca. 69 %) ohne jegliche Sondermaßnahmen umstellbar sind. Dieser Wert ist mehr als ausreichend, um die Vorgaben der Clean Vehicles Directive (CVD) zu erfüllen. Selbst unter der Annahme, dass die gesamte Flotte im Geltungszeitraum bis 2030 voll umgestellt wird, liegt die maximale Quotenvorgabe bei 32,5 % für emissionsfreie Antriebe. Das Einsatzpotenzial reicht sogar aus, um sowohl die Vorgaben an emissionsfreie Fahrzeuge (≤ 32,5 %) als auch an saubere Fahrzeuge (≤ 32,5 %; in Summe ≤ 65 %) mit BEV ohne Anpassungsmaßnahmen zu erfüllen.

	Anzahl ohne Anpassungsmaßnahmen umstellbarer Fahrzeuge (Eins-zu-Eins-Ersatz)										
Fahrzeugtyp	Einsatz-Flotte „Diesel“	Umstellung Heute		Umstellung ab 2028		Umstellung ab 2033		Umstellung ab 2038		Langfristig kritisch	
Solobus 12m	13	11	85%	12	92%	12	92%	12	92%	1	8%
Solobus 15 m	6	4	67%	4	67%	4	67%	5	83%	1	17%
Gelenkbus	1	1	100%	1	100%	1	100%	1	100%	0	0%
Midibus	4	2	50%	3	75%	4	100%	4	100%	0	0%
Kleinbus	5	2	40%	2	40%	3	60%	3	60%	2	40%
Summe	**29**	**20**	**69%**	**22**	**76%**	**24**	**83%**	**25**	**86%**	**4**	**14%**

Tabelle 5: Übersicht BEV Einsatzpotenzial ohne Anpassungsmaßnahmen – LB Mittweida

Wie erwartet sind jedoch auch Fahrzeuge als langfristig kritisch bewertet. Sofern langfristig eine Vollumstellung ins Auge gefasst wird, sind hier korrektive Maßnahmen erforderlich, um auch diese Fahrzeugeinsätze mit batterieelektrischen Antrieben machbar zu gestalten. Gleiches ist auch für das LB Hartmannsdorf erkennbar, wobei lediglich ein einziges Fahrzeug als langfristig kritisch bewertet wird.

	Anzahl ohne Anpassungsmaßnahmen umstellbarer Fahrzeuge (Eins-zu-Eins-Ersatz)										
Fahrzeugtyp	Einsatz-Flotte „Diesel“	Umstellung Heute		Umstellung ab 2028		Umstellung ab 2033		Umstellung ab 2038		Langfristig kritisch	
Solobus 12m	22	15	68%	17	77%	20	91%	21	95%	1	5%
Solobus 15 m	1	1	100%	1	100%	1	100%	1	100%	0	0%
Midibus	2	0	0%	2	100%	2	100%	2	100%	0	0%
Kleinbus	3	1	33%	2	67%	3	100%	3	100%	0	0%

Summe	28	17	61%	22	79%	26	93%	27	96%	1	4%

Tabelle 6: Übersicht BEV Einsatzpotenzial ohne Anpassungsmaßnahmen – LB Hartmannsdorf

Gleichzeitig ist auch dem Standort Hartmannsdorf eine große Menge bereits heute machbarer Fahrzeugeinsätze zugeordnet. Mit 17 von 21 Fahrzeugen (ca. 61 %) können zwar hier nicht zwingend die Quotenanteile für emissionsfreie **und** saubere Fahrzeuge (≤ 65 %) mit heutiger Technik erfüllt werden, jedoch wird dies spätestens mit Batterietechniken ab 2028 als realistisch eingeschätzt.

Insgesamt ist das direkte Einsatzpotenzial für BEV ohne Anpassungsmaßnahmen sehr positiv. Besonders attraktiv ist der hohe Anteil machbarer Standard-Solobusse. Bereits heute werden in Summe über beide Standorte 26 12m-Solobusse als direkt umstellbar eingeschätzt. Bezogen auf die Einsatzflotte über alle Fahrzeugtypen an beiden Standorten (57 Fahrzeuge) entspricht dies einem Anteil von ca. 46 %.

Das Einsatzpotenzial ist ausreichen, um die im weiteren Verlauf der Untersuchung diskutierten Migrationspfade zu erfüllen. Die Flottentransition kann also auf absehbare Zeit ohne Sondermaßnahmen oder betriebliche Anpassungen im Eins-zu-Eins-Ersatz erfolgen, selbst wenn die Quotenanteile für emissionsfreie **und** saubere Fahrzeuge mit BEV erfüllt werden sollen.

Perspektivisch steht jedoch noch die Frage im Raum, welche Mehraufwendungen zu erwarten sind, wenn die gesamte Flotte – unabhängig von aktuellen CVD-Vorgaben – auf emissionsfreie Antriebe umgestellt werden soll.

3. FCEV Einsatzpotenziale ohne Anpassungsmaßnahmen

Analog zu BEV kann auch für die FCEV-Technik ein direktes Einsatzpotenzial bestimmt werden. Aufgrund aktueller Reichweitenvorteile, die erst im Zuge der technischen Entwicklung der Batterietechnik entfallen, wird erwartet, dass kurzfristig ein höheres Einsatzpotenzial vorhanden ist. Mittel- bis langfristig wird eine Angleichung der Ergebnisse erwartet.

Das FCEV-Marktangebot stellt jedoch eine zusätzliche Einschränkung dar: Für Midi- und Kleinbusse ist kein Marktangebot vorhanden und belastbare Referenzwerte können nicht hergeleitet werden. Entsprechend werden beide Fahrzeugtypen für FCEV – unabhängig von den Verbrauchsdaten als langfristig kritisch bewertet. Für 15m-Solobusse ist zwar auch kein Marktangebot vorhanden, jedoch kann aufgrund der ähnlichen Ausführung die Speicherkapazität eines 12m-Solobusses angesetzt werden. Die Bewertung ist möglich, erfolgt für diesen fahrzeugtyp jedoch explizit auf theoretischer Basis.

Im Kontext der Einsatzpotenziale ist zu beachten, dass die kurzfristigen Einsatzpotenziale für BEV bereits als sehr gut bewertet werden. Mehrwerte aus der FCEV-Technik sind für die Umstellung nicht zwingend erforderlich.

Da für FCEV keine technische Entwicklung absehbar ist, sind die Zahlenwerte über der Zeitachse konstant. Der Umstellungszeitpunkt kann hier vernachlässigt werden. Die Darstellungsform in ‚Zeitscheiben' wird der Vergleichbarkeit halber beibehalten.

	Anzahl ohne Anpassungsmaßnahmen umstellbarer Fahrzeuge (Eins-zu-Eins-Ersatz)										
Fahrzeugtyp	Einsatz-Flotte „Diesel"	Umstellung Heute		Umstellung ab 2028		Umstellung ab 2033		Umstellung ab 2038		Langfristig kritisch	
Solobus 12m	13	12	92%	12	92%	12	92%	12	92%	1	8%
Solobus 15 m	6	4	67%	4	67%	4	67%	4	67%	2	33%
Gelenkbus	1	1	100%	1	100%	1	100%	1	100%	0	0%
Midibus	4	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	4	100%
Kleinbus	5	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	5	100%
Summe	29	17	59%	17	59%	17	59%	17	59%	12	41%

Tabelle 7: Übersicht FCEV Einsatzpotenzial ohne Anpassungsmaßnahmen – LB Mittweida

Aufgrund der sehr guten Ergebnisse mit BEV-Technik sind die Mehrwerte für FCEV im LB Mittweida sehr überschaubar, wenn das Marktangebot vorhanden ist. Gegenüber aktueller BEV-Technik ist nur ein weiterer Solobus umstellbar. Bereits mit Technik ab 2028 entfällt dieser Vorteil und sowohl für BEV als auch FCEV sind identische Umstellungspotenziale vorhanden. Im Gegensatz dazu wirkt sich das nicht existente Marktangebot sehr stark aus. Da keine Fahrzeuge am Markt bezogen werden können, fallen alle Midi- und Kleinbusse in die Gruppe der nicht umstellbaren Einsätze, so dass in Summe über 40 % aller Einsätze mit FCEV-Technik als nicht umstellbar bewertet werden müssen. Falls für die 15 m Ausführung von Solobusse auch perspektivisch kein Modell am Markt vertreten ist, steigt der Anteil nicht umstellbarer Fahrzeuge auf über 50 % der Flotte.

Im LB Hartmannsdorf zeigt sich ein ähnliches Verhalten. Die Machbarkeit für 12m-Solobusse liegt hier heute um fünf Fahrzeuge über dem BEV-Modell. Dieser Vorteil entfällt jedoch über der Zeitachse. Mit BEV-Technik ab 2028 sind drei weitere 12m-Solobusse mit FCEV-Technik zusätzlich machbar. Mit BEV-Technik ab 2033 sind spätestens beide Alternativen auf Augenhöhe. Langfristig muss sogar ein zusätzliches Fahrzeug als kritisch bewertet werden.

Auch hier gelten die bekannten Einschränken für die weiteren Fahrzeugtypen. Der 15m-Solobus wird – auf theoretischer Basis – identisch zur BEV-Technik bewertet. Kleinere Fahrzeuggrößen müssen auch hier aufgrund des nicht existenten Marktangebots insgesamt als nicht umstellbar bewertet werden.

	Anzahl ohne Anpassungsmaßnahmen umstellbarer Fahrzeuge (Eins-zu-Eins-Ersatz)										
Fahrzeugtyp	Einsatz-Flotte „Diesel“	Umstellung Heute		Umstellung ab 2028		Umstellung ab 2033		Umstellung ab 2038		Langfristig kritisch	
Solobus 12m	22	20	91%	20	91%	20	91%	20	91%	2	9%
Solobus 15 m	1	1	100%	1	100%	1	100%	1	100%	0	0%
Midibus	2	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	2	100%
Kleinbus	3	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	3	100%
Summe	28	21	75%	21	75%	21	75%	21	75%	7	25%

Tabelle 8: Übersicht FCEV Einsatzpotenzial ohne Anpassungsmaßnahmen – LB Hartmannsdorf

4. Erforderliche Anpassungsmaßnahmen und Fahrzeugmengen für die Vollumstellung

Um eine Flottenvollumstellung zu ermöglichen, müssen langfristig Anpassungsmaßnahmen ergriffen werden, um die Machbarkeit zum Zeitpunkt der Vollumstellung zu steigern.

Typischerweise stehen hierfür drei Alternativen zur Debatte:

1. Umlaufanpassung (betriebliche Lösung)
2. Zwischenladung an Wendestellen (technische Lösung)
3. Einsatz von FCEV als Alternativtechnologie (technische Lösung)

Für den Anwendungsfall der Regiobus in den Betriebshöfen Mittweida und Hartmannsdorf scheidet die dritte Alternative praktisch aus. Dies geht letztlich darauf zurück, dass die kritischen Fahrzeugeinsätze entweder auf Fahrzeugtypen entfallen, die nicht mit FCEV-Technik am Markt verfügbar sind, oder dass die relevanten Einsätze auch mit FCEV-Technik nicht machbar sind. Bei Einsatz von FCEV wäre auch hier eine Umlaufanpassung erforderlich.

Die zweite Option, Zwischenladen an Wendestellen, ist im Regionalverkehr üblicherweise nicht besonders gut geeignet, da die Linienwege weniger dicht ausgeführt sind als im innerstädtischen Einsatz. Zwischenladestationen können entsprechend nur von wenigen Fahrzeugen genutzt werden und sind entsprechend ineffizient. Die Option bleibt jedoch erhalten, wenn die prädestinierte Herangehensweise, per Umlaufanpassung, nicht die erwarteten Ergebnisse zeigt.

Analysiert wird hier insbesondere die erste Option der Umlaufanpassung. Im Rahmen der Machbarkeitsuntersuchung erfolgt hier eine qualifizierte Abschätzung der Auswirkung einer Umlaufanpassung. Exemplarisch werden die Ergebnisse über eine rudimentäre Umlaufanapassung am Beispiel Solobusse LB Hartmannsdorf validiert.

Grundsätzlich gilt es zu erwähnen, dass betriebsintern mit Fachplanern und Zugriff auf dedizierte Umlaufplanungstools voraussichtlich bessere Ergebnisse erzielt werden können als im hier verfolgten rudimentären Ansatz. Während bei einer qualifizierten Fachplanung alle Umläufe bei Bedarf neugestaltet und auf die Reichweiten alternative Antriebe ausgerichtet werden können, wird hier nur ein Ausschnitt der Einsätze ins Auge gefasst. Darüber hinaus wird angenommen, dass eine Vollumstellung frühestens ab 2028, also mit entsprechend antizipierten Batteriekapazitäten, erfolgen soll.

Hier werden zwei Kategorien von Fahrzeugeinsätzen betrachtet:

- Langfristig kritische Einsätze, die verkürzt werden müssen, um die Machbarkeit zu steigern
- Besonders kurze oder einfache Einsätze, deren Fahrzeuge (nach Vollladung im Depot) als Ablösefahrzeuge eingesetzt werden können

Das Vorgehen kann am besten am exemplarisch validierten Beispiel (Solobusse Hartmannsdorf) dargestellt werden.

	Anzahl ohne Anpassungsmaßnahmen umstellbarer Fahrzeuge (Eins-zu-Eins-Ersatz)										
Fahrzeugtyp	Einsatz-Flotte „Diesel“	Umstellung Heute		Umstellung ab 2028		Umstellung ab 2033		Umstellung ab 2038		Langfristig kritisch	
Solobus 12m	22	15	68%	17	77%	20	91%	21	95%	1	5%

Tabelle 9: Übersicht BEV Einsatzpotenzial ohne Anpassungen – LB Hartmannsdorf Solobus

Im Tabellenauszug ist das direkte Einsatzpotenzial erneut aufgeführt. Bei Umstellung ab 2028 sind bereits 17 Fahrzeuge machbar, so dass maximal fünf weitere Fahrzeugeinsätze machbar gestaltet werden müssen. Aus Komplexitätsgründen wird im Verlauf der Untersuchung der Vollumstellungszeitpunkt auf zwei Zeitpunkte begrenzt: Vollumstellung ab 2028 oder ab 2033 (mit entsprechenden Kapazitätswerten).

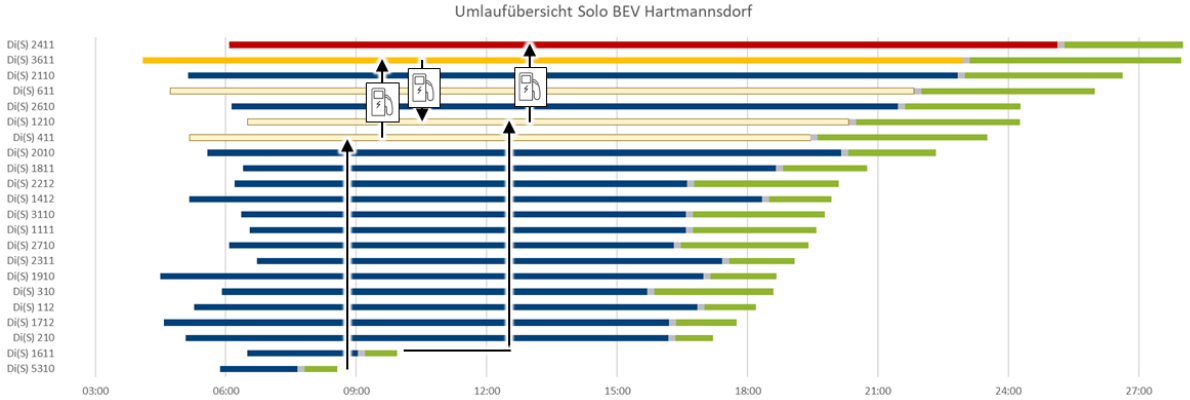


Abbildung 13: Schema Umlaufanpassung LB Hartmannsdorf Solobusse (12m) (eigene Darstellung)

In der Grafik sind alle Fahrtzeiten für Einsätze, die mit ‚Technik ab 2028' unkritisch bewertet werden in Blau dargestellt. Farblich hervorgehoben sind Einsätze, die erst nach 2028 als machbar eingeschätzt werden. Dabei sind Einsätze „machbar ab 2033" in Hellgelb dargestellt, während Einsätze „machbar ab 2033" in Dunkelgelb aufgeführt sind. In Rot sind Einsätze dargestellt, die als langfristig kritisch gelten und unabhängig von der Entwicklungsprognose in jedem Fall angepasst werden müssen. In Grün sind die Ladeintervalle dargestellt, die eingehalten werden müssen, um den gesamten Energiebedarf des Umlaufs nachzuladen (Depotladung bei 130 kW).

Am unteren Rand der Grafik sind zwei Umläufe aufgeführt, die durch eine kurze Einsatzdauer gekennzeichnet sind. Die zugeordneten Fahrzeuge stehen bereits am Vormittag nach Vollladung im Betriebshof zur Verfügung, ohne planmäßige Folgeumläufe bedienen zu müssen.

Über die Pfeile ist angedeutet, dass die Fahrzeuge (nach Vollladung) genutzt werden, um einen der fünf kritischen Umläufe[6] abzulösen. Die ‚hellgelben' Umläufe rangieren nur knapp über den Kapazitätswerten, die ab 2028 antizipiert werden. Um diese Umläufe machbar zu gestalten, muss nur ein vergleichsweise kleiner Teil des Umlaufs „abgeschnitten" werden. Die Ablöse des Umlaufs kann also frühzeitig erfolgen. Bis zum Ablösezeitpunkt hat das abgelöste Fahrzeug nur einen kleinen Umlaufanteil absolviert und weist nur eine geringe Batterieentladung auf. Entsprechend kann das Fahrzeug nach vergleichsweise kurzer Nachladezeit genutzt werden, um wiederum einen weiteren Umlauf abzulösen. Diese sukzessive Ablöse ist durch Pfeile mit symbolisierter Ladestation gekennzeichnet.

Im Beispiel kann die Umlaufanpassung mit der bestehenden Einsatzflotte ausgeführt werden. Dies geht letztlich darauf zurück, dass Fahrzeuge im Depot zur Verfügung stehen, die nach kurzer Einsatzzeit „ungenutzt" im Depot zur Verfügung stehen.

[6] Bei allen anzupassenden Umläufen in der Untersuchung sind die Einzelumläufe gleich den Fahrzeugtagesumläufen, da für diese Einsätze keine Einzelumläufe verkettet werden.

Als Gegenbeispiel mit resultierendem Mehrbedarf, werden hier die Midibusse aus dem LB Mittweida herangezogen. Wie aus der Darstellung ersichtlich ist, liegen die Zeiträume der vier Einsätze sehr parallel. Es steht kein Fahrzeug „ungenutzt“ zur Verfügung, um den kritischen Umlauf abzulösen. Sofern eine Vollumstellung vor 2033 möglich sein soll, muss hier ein Zusatzfahrzeug bilanziert werden. Wenn die Vollumstellung erst ab 2033 erfolgen soll, sind keine Anpassungen erforderlich, da der (hellgelb markierte) Umlauf mit ab 2033 antizipierter Technik bereits als machbar eingeschätzt wird.

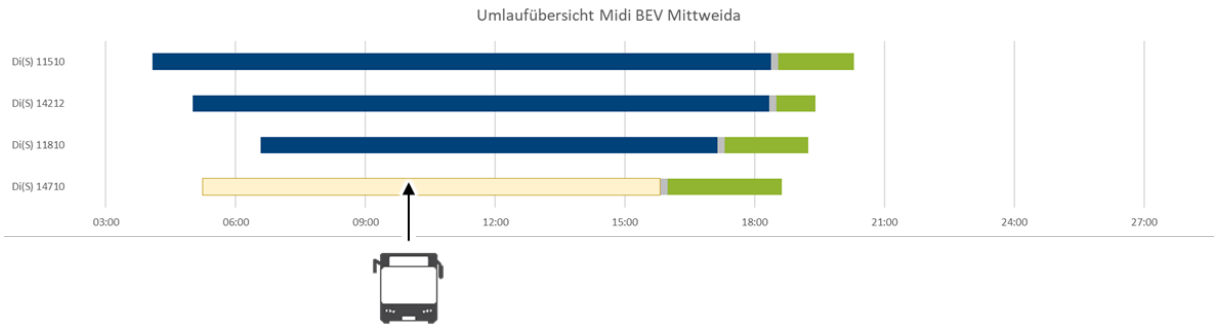


Abbildung 14: Schema Umlaufanpassung LB Mittweida Midibusse (eigene Darstellung)

Die Anpassungsstrategie geht auf viele ähnlich gelagerte Umlaufanpassungen zurück, die in vergleichbaren Untersuchungen ausgeführt wurden. Zur Sicherheit erfolgt die Abschätzung des Mehrbedarfs im Folgenden teilweise als Wertebereich. Erfahrungsgemäß sind die geringeren Zahlen für den Mehrbedarf realistischer und können durch adäquate Umlaufanpassung erzielt werden. Um die Aussagekraft der Abschätzung zu validieren, wurde für die Solobusse Hartmannsdorf die Umlaufanpassung exemplarisch ausgeführt.

Exemplarische Validierung: Rudimentäre Umlaufanpassung Solobusse LB Hartmannsdorf

Im Rahmen einer rudimentären Umlaufanpassung werden Umläufe ausschließlich an Wendestellen mit planmäßiger Wartezeit gebrochen. Entfernungen und Fahrtzeiten wurden per Google Maps (Pkw) hergeleitet und berücksichtigt. Als Zielgröße wird eine frühzeitige Vollumstellung mit Technik ab 2028 angesetzt. In Summe müssen fünf Einsätze, wie in Abbildung 26: Schema Umlaufanpassung LB Hartmannsdorf Solobusse (12m) grafisch dargestellt, angepasst werden.

Von der Umlaufanpassung betroffen ist folgender Ausschnitt aller Solobusumläufe mit den angegebenen Maximalentladungen (≙ erforderlicher Batteriekapazität):

Umlauf	Max. Batterieentladung [kWh]
Di(S) 1611	96
Di(S) 5310	98
Di(S) 1210	490
Di(S) 411	507
Di(S) 611	519
Di(S) 3611	632
Di(S) 2411	656

Tabelle 10: Umläufe Solobus Hartmannsdorf (Auszug) vor Anpassung

Aus der folgenden Tabelle geht hervor, wie die Umläufe vor Anpassung in die neu gebildeten Fahrzeugtagesumläufe eingehen. Dabei wird die Umlaufnummer um die Buchstaben A und B erweitert, um einen gebrochenen Umlauf darzustellen. Der Buchstabe A kennzeichnet dabei den ersten Umlaufteil, während B den zweiten Umlaufteil nach dem Aufbrechen kennzeichnet.

Umlauf (neu)	Umlaufbestandteile („alte Umläufe“)		Max. Batterie-entladung [kWh]
	Teil 1	Teil 2	
NEU 1	5310	411-B	321
NEU 2	411-A	3611-B	345
NEU 3	3611-A	611-B	314
NEU 4	1611	1210-B	301
NEU 5	1210-A	2411-B	318
NEU 6	2411-A	---	352
NEU 7	611-A	---	343

Tabelle 11: Umläufe Solobus Hartmannsdorf (Auszug) nach Anpassung

Nach Umlaufanpassung ist für die resultierenden neuen Umläufe (NEU 1 bis NEU 7) ebenfalls die maximale Batterieentladung pro Einsatz dargestellt. Sämtliche Verbrauchswerte liegen – nach Umlaufanpassung – unter dem Kapazitätswert für aktuelle Batterietechnik. Die Umläufe sind also bereits mit aktueller Technik realisierbar.

Für die Umlaufanpassung sind zusätzliche Transferwege erforderlich, um die Fahrzeuge vom Betriebshof zum Ablösepunkt und umgekehrt zu bewegen. Im Beispiel entsteht eine zusätzliche Transferstrecke (in Summe) von ca. 70 km, was keinen nennenswerten Einfluss auf den flottenweiten Energiebedarf hat. Relevanter ist hier die zusätzliche Transferdauer, die über zusätzliche Personalaufwendungen gedeckt werden muss. Auf Basis der Umlaufdaten – nach Anpassung – ergibt sich hier ein zusätzlicher Personalaufwand von ca. 2 Stunden netto pro Tag. Da am Ablösepunkt jedoch auch Wartezeiten einzuplanen sind, wird eine pauschale Abschätzung des Zeitaufwandes mit 30 bis 40 Minuten pro abgelösten Umlauf vorgeschlagen. Im Beispiel sind also für fünf Umläufe zusätzliche Personalaufwendungen in der Größenordnung zwischen 2,5 und 3,5 Stunden pro Tag zu erwarten.

Erwartete Mehraufwendungen Vollumstellung BEV

Die erwarteten Mehraufwendungen sind im Folgenden tabellarisch dargestellt, wobei zwischen einer Vollumstellung ab 2028 beziehungsweise ab 2033 unterschieden wird. Relevant sind hier die unterschiedlich erwarteten marktverfügbaren Batteriekapazitäten, die im Zuge der technischen Entwicklung ansteigen. Mit ansteigender Batteriekapazität müssen weniger Umläufe angepasst werden.

In den Tabellen aufgeführt sind Richtwerte für den Fahrzeugmehrbedarf sowie die Anzahl abgelöster, also vor Anpassung kritischer, Umläufe. Beide Werte beziehen sich auf den betrachteten betriebstag (Dienstag_Schule).

Der Fahrzeugmehrbedarf ist konservativ abgeschätzt und teilweise als Wertebereich dargestellt. Eine belastbare Aussage ist erst nach Durchführung einer detaillierten Umlaufanpassung möglich, was nicht Teil dieser Machbarkeitsstudie ist. Erfahrungsgemäß sind die optimistischen Einschätzungen in der Praxis gut realisierbar, so dass die kleineren Werte als realistisch eingeschätzt werden. Da hier die Gegenüberstellung mit der FCEV-Technik im Fokus steht, kann die Ungenauigkeit vernachlässigt werden.

Von Bedeutung ist ebenfalls die Anzahl abgelöster Umläufe, da hieraus ein Maß für den zusätzlichen Personalaufwand abgeleitet werden kann. Pro abgelösten Umlauf muss ein Fahrzeug aus dem Betriebshof zum Ablösepunkt verbracht werden und das abgelöste Fahrzeug im Anschluss wieder an den Ladeplatz im Depot gefahren werden. In erster Näherung kann ein Zeitaufwand von 30 bis 40 Minuten pro Ablösefahrt (inklusive Wartezeit am Ablösepunkt) abgeschätzt werden. Die

anfallenden zusätzlichen Transferstrecken fallen im Kontext der Tages-Gesamtfahrleistung sehr klein aus und können für die Bewertung vernachlässigt werden.

Erwartungsgemäß ist die Vollumstellung mit ab 2028 verfügbarer Technik ambitionierter als im folgenden Entwicklungsschritt mit ab 2033 antizipierter Batterietechnik. Ab 2033 hat die technische Entwicklung keine größere Auswirkung auf die Mehraufwendungen zur Vollumstellung, weshalb der Betrachtungsrahmen hier abgeschnitten wird.

Fahrzeugtyp	Vollumstellung ab 2028		Vollumstellung ab 2033	
	Fahrzeug Mehrbedarf	Anz. abgelöster Umläufe	Fahrzeug Mehrbedarf	Anz. abgelöster Umläufe
Solobus 12m	0-1	1	0	1
Solobus 15m	0	2	0	2
Gelenkbus	0	0	0	0
Midibus	1	1	0	0
Kleinbus	0-1	3	0-1	2
Summe	**1-3**	**7**	**0-1**	**5**

Tabelle 12: Übersicht Mehraufwendungen Vollumstellung BEV - Mittweida

In Mittweida wird ein Mehrbedarf zwischen einem und drei Fahrzeugen abgeschätzt, wobei erwartet werden kann, dass nur bei Vollumstellung ab 2028 ein Mehrbedarf im Feld der Midibusse vorliegt. Grund hierfür ist der parallele Einsatz aller vier Busse, so dass zur Ablöse ein zusätzliches Fahrzeug erforderlich ist. Ab 2033 entfällt hier jedoch die Notwendigkeit Umläufe anzupassen, so dass perspektivisch die Vollumstellung ohne Mehrbedarf realistisch erscheint.

Für das LB Harmannsdorf liegen ähnliche Ergebnisse vor, wobei die Einschätzung eindeutiger ausfällt. Bei Vollumstellung mit BEV-Technik ab 2028 muss ein zusätzlicher Kleinbus bilanziert werden, was ab 2033 nicht erforderlich ist.

Analog zum Standort Mittweida kann auch hier angenommen werden, dass eine vollständige Flottenumstellung spätestens ab 2033 ohne Fahrzeugmehrbedarf möglich ist.

Bei Vollumstellung beider Betriebshöfe müssen zusätzliche Personalaufwendungen berücksichtigt werden. Pro Umlauf kann ein Zeitintervall von 30 bis 40 Minuten Ablösedauer angesetzt werden. In Summe müssen ab 2028 13 Umläufe angepasst werden, wofür ein zusätzlicher Personalaufwand von ca. sieben bis neun Arbeitsstunden abgeschätzt wird. Mit Technik ab 2033 sinkt der

Bedarf auf 7 anzupassende Umläufe, was einem Personalbedarf von etwa drei bis fünf Stunden entspricht.

Fahrzeugtyp	Vollumstellung ab 2028		Vollumstellung ab 2033	
	Fahrzeug Mehrbedarf	Anz. abgelöster Umläufe	Fahrzeug Mehrbedarf	Anz. abgelöster Umläufe
Solobus 12m	0	5	0	2
Solobus 15m	0	0	0	0
Midibus	0	0	0	0
Kleinbus	1	1	0	0
Summe	**1**	**6**	**0**	**2**

Tabelle 13: Übersicht Mehraufwendungen Vollumstellung BEV - Hartmannsdorf

Erwartete Mehraufwendungen Vollumstellung FCEV

Eine belastbare Abschätzung der Mehraufwendungen für eine vollständige Flottenumstellung auf FCEV-Technik ist nicht möglich. Grund hierfür ist das fehlende Marktangebot für Midi- und Kleinbusse, dass eine Vollumstellung unmöglich macht. Eine Abschätzung auf theoretischer Ebene ist nicht möglich, da keine vergleichbaren Techniken am Markt verfügbar sind, die als Referenzwert herangezogen werden können. Hierbei kommt erschwerend hinzu, dass Kleinfahrzeuge vielfach mit Komponenten aus der Pkw-Technik ausgeführt werden, während Großfahrzeuge auf Komponenten aus dem Nutzfahrzeugsektor basieren. Insbesondere in der Wasserstofftechnik stellt dies ein Problem für die Bewertung dar, da Pkw-Brennstoffzellensysteme auf Flüssiggasspeichern aufbauen (> 700 bar) während im Nutzfahrzeugsektor ein niedriges Druckniveau verfolgt wird, um eine gasförmige Speicherung zu ermöglichen (ca. 350 bar).

15m-Solobusse können hier in die Bewertung einbezogen werden, da die technischen Parameter (Speichergröße) aus dem 12m-Modell auch hier angewendet werden. Die Bewertung erfolgt jedoch auf rein theoretischer Ebene, da auch hier kein Modell am Markt ist. Im Gegensatz zu den Kleinfahrzeugen wird hier jedoch angenommen, dass eine Modelleinführung kurzfristig realistisch ist, wenn die Nachfrage eine entsprechende Produktion rechtfertigt.

Unter den gegebenen Einschränkungen ergeben sich die folgend dargestellten Mehraufwendungen. Im Vergleich zum BEV-Modell zeigt sich, dass bei den vergleichbaren Fahrzeugtypen (12m-Solobus, Gelenkbus und 15m-Solobus auf theoretischer Ebene) bei kurzfristiger Umstellung (ab

2028) überschaubare Vorteile auf FCEV-Seite vorliegen. Ab 2033 entfallen diese Vorteile und der Mehraufwand ist für beide Varianten identisch.

In beiden Fällen stechen die kleinen Fahrzeugtypen ins Auge, die hier nicht bewertbar sind. Da diese Fahrzeugtypen für eine Vollumstellung ebenfalls auf alternative Antriebe umgestellt werden müssen, zeigen sich BEV allein aus Gründen der Modellvielfalt hier als vorteilhaft.

Fahrzeugtyp	Vollumstellung ab 2028		Vollumstellung ab 2033	
	Fahrzeug Mehrbedarf	Anz. abgelöster Umläufe	Fahrzeug Mehrbedarf	Anz. abgelöster Umläufe
Solobus 12m	0	1	0	1
Solobus 15m	0	2	0	2
Gelenkbus	0	0	0	0
Midibus	?	?	?	?
Kleinbus	?	?	?	?
Summe	?	?	?	?

Tabelle 14: Übersicht Mehraufwendungen Vollumstellung FCEV - Mittweida

Fahrzeugtyp	Vollumstellung ab 2028		Vollumstellung ab 2033	
	Fahrzeug Mehrbedarf	Anz. abgelöster Umläufe	Fahrzeug Mehrbedarf	Anz. abgelöster Umläufe
Solobus 12m	0	2	0	2
Solobus 15m	0	0	0	0
Midibus	?	?	?	?
Kleinbus	?	?	?	?
Summe	?	?	?	?

Tabelle 15: Übersicht Mehraufwendungen Vollumstellung FCEV - Hartmannsdorf

III. Abschließende technische Technologieempfehlung

Sowohl BEV als auch FCEV zeigen ein sehr gutes Umstellungspotenzial ohne Anpassungsmaßnahmen. Mit beiden Antriebstechniken können die CVD-Quotenvorgaben sehr gut erfüllt werden.

Darüber hinaus kann durch Umlaufanpassung die Anzahl machbarer Fahrzeugeinsätze erhöht werden. Für BEV ist die Flottenvollumstellung mit Technik ab 2028 bereits mit überschaubarem Mehraufwand möglich. Bei zeitlicher Streckung der Vollumstellung auf 2033 oder später sinkt der Mehraufwand deutlich und ein Fahrzeugmehrbedarf ist unwahrscheinlich.

Für FCEV ist eine Flottenvollumstellung aufgrund des mangelnden Marktangebots nicht möglich. Mehraufwendungen können hier nur in einem Einzelfall (15m-Solobus) auf theoretischer Ebene abgeschätzt werden. Im direkten Vergleich der bewertbaren Fahrzeugtypen zeigt sich, dass nur kurzfristig (vor „Technik 2033“) geringere Mehraufwendungen für die Vollumstellung zu erwarten sind. Mit BEV-Technik 2033 entfällt dieser Vorteil.

In Summe rangieren beide Technologien für die Dekarbonisierung aus technischer Perspektive auf Augenhöhe, wenn die Vollumstellung außen vorgelassen wird. Beide Ansätze können die Zielgrößen erfüllen, so dass die finale Entscheidung einer Vorzugstechnologie kommerziell erfolgen könnte.

Da die Flottenvollumstellung jedoch nur mit BEV möglich ist (Marktangebot), entfällt auch die technische Empfehlung auf die batterieelektrische Antriebsvariante. Eine Mischflotte ist zwar denkbar, jedoch kann hier keine Notwendigkeit für die üblicherweise kostenintensivere FCEV-Technik erkannt werden. Die Empfehlung einer Vorzugstechnologie fällt in Summe deutlich zugunsten der BEV-Technik aus.

D. AP 3 – Fuhrparkanalyse und Erarbeitung Migrationspfad für die Regiobus

Im Anschluss an die betriebliche Analyse des Status quo und die technische Grobkonzeptionierung gilt es nun, das Vorhaben der Flottenumstellung auf Fuhrpark-Ebene auszuarbeiten und zu bewerten. Hierbei ist es das übergeordnete Ziel, einen Migrationspfad und damit einen Fahrzeugbeschaffungsplan für die Flottenumstellung bei der Regiobus mit Batteriebussen vor dem Hintergrund der aktuellen Fuhrparkstruktur und weiteren Einflussgrößen der Fahrzeugbeschaffung abzuleiten. Die Fahrzeugbeschaffungsplanung wird im Anschluss einer Analyse des aktuellen Fuhrparks für die Jahre 2021 bis 2035 zunächst technologieunabhängig erarbeitet. Diese Planung wird anschließend im Kontext der Flottentransformation in verschiedenen Umstellungsszenarien mit unterschiedlichen Elektrifizierungsquoten für die Neubeschaffungen belegt, um Migrationspfade abzuleiten. Diese sind:

- Szenario 1: Erfüllung der CVD-Quoten (sauber und emissionsfrei) („CVD-Szenario“)
- Szenario 2: Erfüllung der CVD-Quoten (emissionsfrei) ausschließlich mit E-Bussen („CVD+-Szenario“) sowie
- Szenario 3: Erfüllung der CVD-Quoten (emissionsfrei) ausschließlich mit E-Bussen („CVD++-Szenario“), wobei ab 2031 ausschließlich emissionsfreie Fahrzeuge für den Stadtverkehr beschafft werden sowie
- Szenario 4: 100%ige Neubeschaffung von E-Bussen im Stadt- und Überlandverkehr ab 2025 („Vollumstellungsszenario“)

Im Rahmen der detaillierten Beschreibung der jeweiligen Szenarien wird zudem gesondert auf Möglichkeiten zur Erfüllung der „sauberen“ CVD-Teilquote eingegangen.

Die Migrationspfade der vier Szenarien wurden entsprechend der Zielsetzung zusammen mit der Regiobus diskutiert, bewertet und im Projektverlauf sukzessive überarbeitet. Ergänzend zu den erarbeiteten möglichen Migrationspfaden wird zudem auch das CO_2-Minderungspotenzial für die jeweiligen Szenarien betrachtet.

I. Analyse des aktuellen Fuhrparks der Regiobus

Anzahl Fahrzeuge und Fahrzeuggrößen

Der Fuhrpark der Regiobus besteht zum Zeitpunkt der Erhebung Ende des Jahres 2022 ausschließlich aus Bussen mit konventionellem Diesel-Antrieb. Dabei ist der Großteil der Flotte der Stadtbusse inklusive der Reservefahrzeuge der Fahrzeugbauart Solo (57 Fahrzeuge, davon 53 Fahrzeuge (eigen), 4 Fahrzeuge (fremd) mit einer Länge von 10 – 12 m zuzuordnen. Die Erarbeitung

verschiedener Migrationspfade erfolgt somit insgesamt für die 57 Solobusse im Stadtverkehr. Die Fahrzeuge der Flotte stammen etwa zu gleichen Anteilen aus den Produktionen der Hersteller Daimler Buses (Mercedes-Benz) und MAN (Volkswagen).

Altersstruktur und Fahrleistungen

Die Solobusse des Stadtverkehrs im Fuhrpark der Regiobus sind durch eine über die Nutzungsdauer gleichmäßig verteilte Altersstruktur geprägt. Das Durchschnittsalter aller Fahrzeuge liegt bei ca. 10 Jahren. Pro Jahr legen die Solobusse (Stadtbusse) bei der Regiobus ca. 46.200 km zurück.

Emissionsklassen

Die Fahrzeuge der Flotte der Regiobus weisen die Emissionsklassen EEV, EURO III, EURO VI, EURO V und EURO VI auf. Die größten Anteile entfallen dabei auf die Emissionsklassen EEV und EURO VI – 58 % der Flotte der Regiobus besitzt die Emissionsklasse EURO VI und knapp 17 % der betrachteten Fahrzeuge die Emissionsklasse EEV.

Die heutige Fuhrparkstruktur wird im Folgenden als Grundlage zur Ableitung einer Beschaffungsplanung bis zum Jahr 2035 angenommen.

II. Ableitung Beschaffungsplanung bis 2035 für die Regiobus

Die Beschaffungsplanung der Regiobus für die Jahre 2023 bis 2035 ist wesentlich für die Erstellung eines Migrationspfades der Flottentransformation mit Batteriebussen. Daher wurden zunächst die Planungen der Regiobus für Ersatzbeschaffungen in der Busflotte erhoben. Darüber hinaus wurden für die Ableitung der Beschaffungsplanung in Abstimmung und Zusammenarbeit mit der Regiobus folgende Prämissen zugrunde gelegt:

- die Fuhrparkstruktur mit 167 Solo- und 24 Gelenkbussen soll beibehalten werden,
- Neuanschaffungen dienen lediglich dem Ersatz von Altfahrzeugen,
- ab 2025 werden neu angeschaffte Fahrzeuge nach 12 Jahren ersetzt.

Auf Grundlage der Fuhrparkstruktur und unter Berücksichtigung der dargestellten Prämissen wurde gemeinsam mit der Regiobus der in der folgenden Abbildung dargestellte Beschaffungsplan bis zum Jahr 2035 abgeleitet.

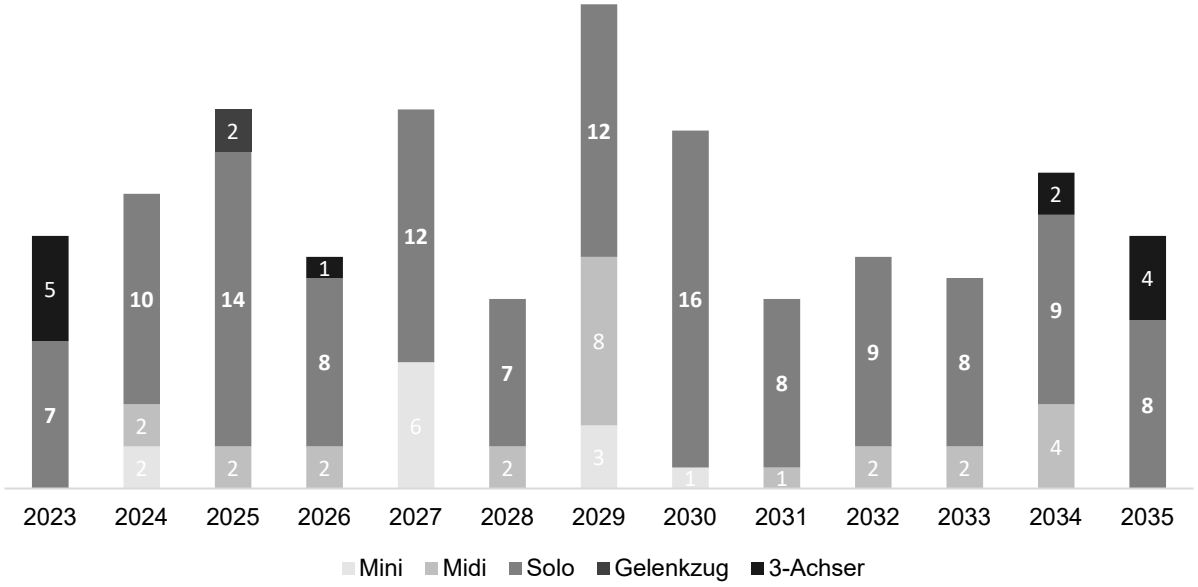


Abbildung 15: Beschaffungsplanung der Regiobus bis zum Jahr 2035: Anzahl Fahrzeuge nach Bauart (eigene Darstellung)

Über das Jahr 2035 hinaus können die Beschaffungen im 12-Jahres-Rhythmus fortgeschrieben werden. In Abhängigkeit des gewählten Migrationspfads ist der betrieblich notwendige Fahrzeugmehrbedarf zu beachten, der die Beschaffung in einzelnen Jahren erhöhen kann.

III. Migrationspfade im Kontext unterschiedlicher Umstellungsszenarien für die Regiobus

Auf diese Beschaffungsplanung werden nun die unterschiedlichen Umstellungsszenarien der Flottentransformation angewendet. Hierfür werden unterschiedliche Beschaffungsquoten auf die Neubeschaffungen angesetzt. Ziel ist es, die Beschaffungsplanung gemäß Umstellungsszenario für die Jahre 2023 bis 2035 abzuleiten und in einem nächsten Schritt die Auswirkungen auf den Fuhrpark der Regiobus darzustellen. Der betrieblich bedingte Fahrzeugmehrbedarf wird entsprechend mit der vollständigen Umstellung der Flotte auf emissionsfreie Antriebe berücksichtigt.

Des Weiteren wird für die Beschaffungsplanungen der unterschiedlichen Szenarien ein „Verbrennerverbot“ ab dem Jahr 2035 angenommen. Dieses lässt sich zum derzeitigen Stand, auch mit Blick auf den politischen Diskurs, als wahrscheinlich einstufen. Infolgedessen werden ab diesem Jahr grundsätzlich keine neuen Dieselbusse beschafft. Für den Zeitraum ab 2031 wird die CVD übereinstimmend der vorherigen Referenzperiode 2026 bis 2030 angewendet, was aber aufgrund der ausstehenden politischen Entscheidungen eine gewisse Unsicherheit beinhaltet.

1. Umstellungsszenario 1: Erfüllung der CVD-Quoten

Die Erfüllung der beiden CVD-Teilquoten „sauber“ und „emissionsfrei“ innerhalb der Fahrzeugbeschaffung stellt mit Inkrafttreten des SaubFahrzeugBeschG seit August 2021 die zu erfüllende Mindestanforderung an die Beschaffungsplanung für die entsprechenden Stadtbusse der Regiobus dar. Bis einschließlich des Jahres 2025 müssen jeweils 22,5 % der beschafften Fahrzeuge als sauber bzw. emissionsfrei gelten. Aufgrund der beschlossenen Branchenvereinbarung werden die erforderlichen CVD-Beschaffungsquoten im ersten Beschaffungszeitraum nicht berücksichtigt. Ab dem Jahr 2026 (und vorerst bis zum Jahr 2030) erhöhen sich die Teilquoten dann auf jeweils 32,5 %. Durch die Novellierung des öDA zum 1.6.2030 wird diese Quote mit dem Inkrafttreten auf die gesamte Busflotte im Stadtverkehr angewendet. Unter die „saubere“ Teilquote fallen, wie dargestellt, beispielsweise der Gasantrieb, der Plug-In-Hybrid-Antrieb oder die Verwendung von hydriertem Pflanzenöl (HVO100). Eine praktikable Lösung ist zum derzeitigen Stand die Erfüllung der sauberen CVD-Teilquote mit HVO100, die wie konventioneller Diesel regulär bei Bestandsfahrzeugen, aber auch insbesondere bei neu zu beschaffende Dieselbussen getankt und genutzt werden können. Die Verwendung von HVO100 hat demnach den Vorteil, dass weiterhin konventionelle Dieselbusse mit Verbrennungsmotor beschafft werden können, die durch die HVO100-Verwendung die saubere CVD-Teilquote erfüllen. Für die „emissionsfreie“ Teilquote sind im Wesentlichen der batterieelektrische Antrieb und der Antrieb mit Brennstoffzelle von Bedeutung.

Bei der Verrechnung der Quoten wird im Ergebnis stets auf ganze Fahrzeuge aufgerundet. Zudem wird zunächst eine möglichst kontinuierliche und nicht gebündelte Beschaffung der Fahrzeuge innerhalb der zweiten CVD-Periode und darüber hinaus vorgesehen, um an der technischen Entwicklung partizipieren und Lerneffekte generieren zu können. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass sich die Verteilung der entsprechenden E-Bus-Beschaffungen gemäß der CVD-Quoten innerhalb der beiden Referenzperioden frei gestalten lässt. Der erste E-Bus wird in diesem Szenario im Jahr 2025 beschafft. Für das Umstellungsszenario „Erfüllung der CVD-Quoten“ ergeben sich somit die nachfolgend dargestellten Beschaffungen bis zum Jahr 2035.

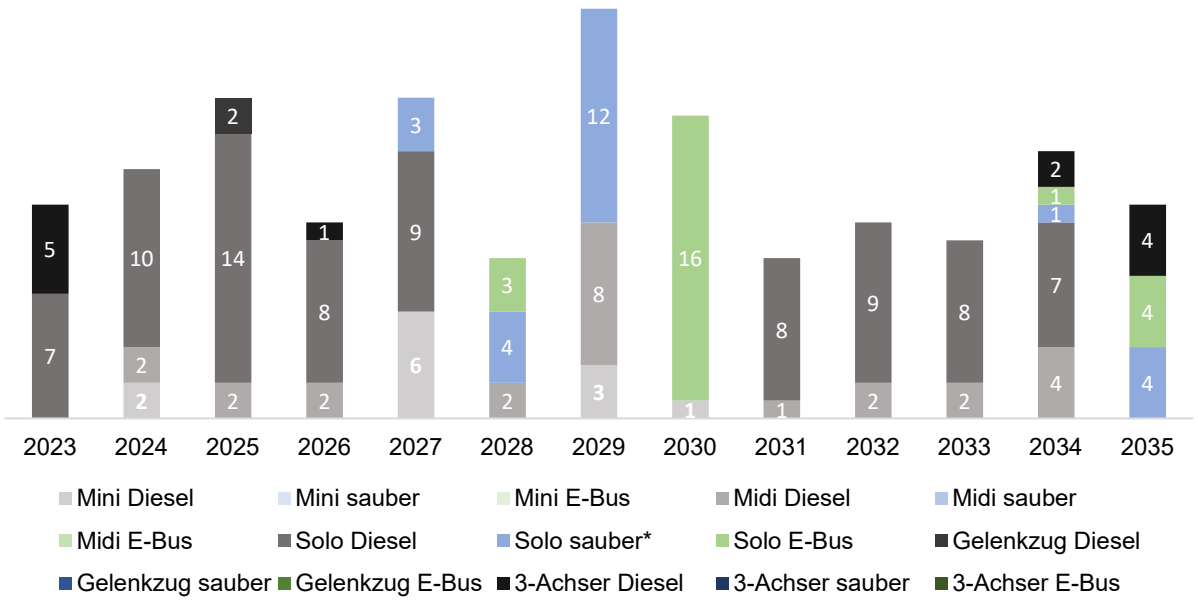


Abbildung 16: Beschaffungen der Regiobus im Umstellungsszenario Erfüllung der CVD-Quoten (eigene Darstellung)

Unter der Annahme, dass die CVD-Quoten der zweiten Referenzperiode über das Jahr 2030 hinaus gelten, könnten auch nach dem Jahr 2030 weiterhin teilweise Dieselbusse beschafft werden. Dieselbusse wären in der Regiobus-Flotte demnach ggf. auch noch über das Jahr 2040 hinweg in der Flotte vertreten. Im Jahr 2030 wäre der Fuhrpark zu knapp 33 % elektrifiziert und zu gleichen Anteilen sauber. Im Jahr 2035 sind gut 42 % der Stadtbusse der Regiobus elektrifiziert oder sauber. Die folgende Abbildung zeigt die Entwicklung der Zusammensetzung des Fuhrparks bis zum Jahr 2035.

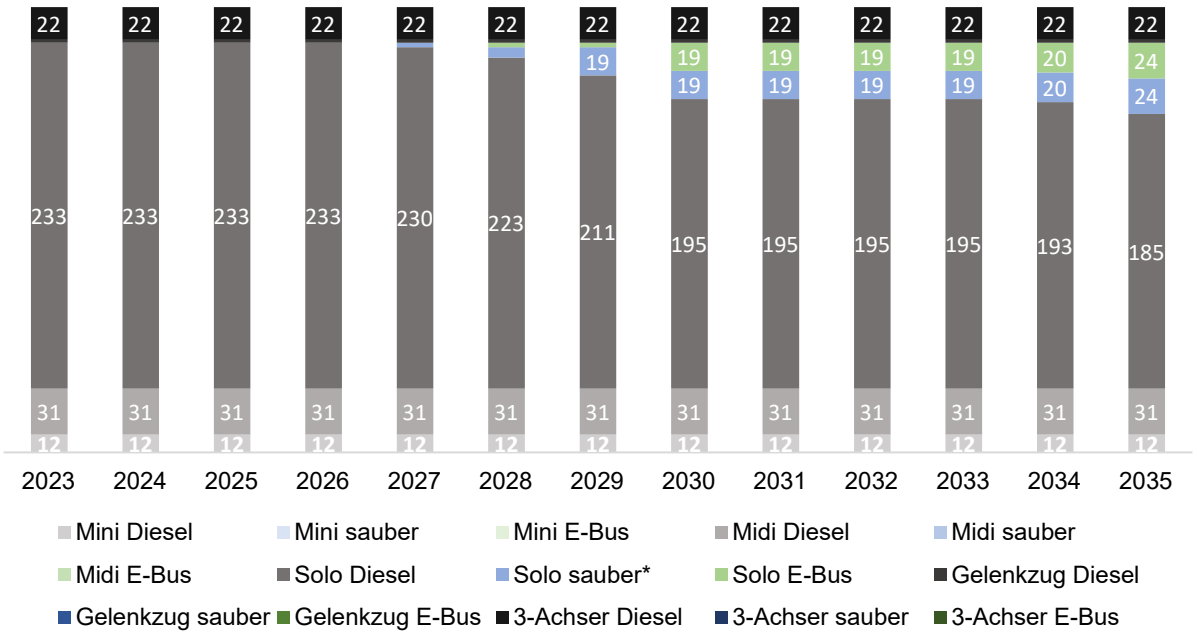


Abbildung 17: Entwicklung der Regiobus Fuhrparkstruktur bis 2035 im CVD-Umstellungsszenario (eigene Darstellung)

2. Umstellungsszenario 2: CVD+-Szenario

Das zweite Umstellungsszenario lässt sich hinsichtlich des Umstellungstempos und der Anzahl der beschafften E-Busse nach dem vorherigen Szenario einordnen und ist somit anspruchsvoller in Bezug auf Komplexität und Projektorganisation. Bis Ende des Jahres 2030 wird analog für Szenario 1 die emissionsfreie CVD-Quote angesetzt. Abweichend zum vorherigen Szenario berücksichtigt die Beschaffungsquote ausschließlich emissionsfreie Solobusse. Dadurch wird im Vergleich zum Szenario 1 die Beschaffung „sauberer“ Solobusse durch die Beschaffung emissionsfreier Busse ersetzt. Mit der Novellierung des öDAs zum 1.6.2030 muss die Gesamtflotte die Quoten gemäß CVD erfüllen. Dadurch kommt es zu einer Übererfüllung der Beschaffungsquote in der zweiten CVD-Periode. Ab dem Jahr 2031 sieht die Beschaffungsplanung für diesen Migrationspfad dann eine Fortführung der CVD-Beschaffungsquoten aus der zweiten Beschaffungsperiode vor. Beschaffungsprozesse von Überlandbussen werden in diesem Szenario von den CVD-Quoten nicht berücksichtigt.

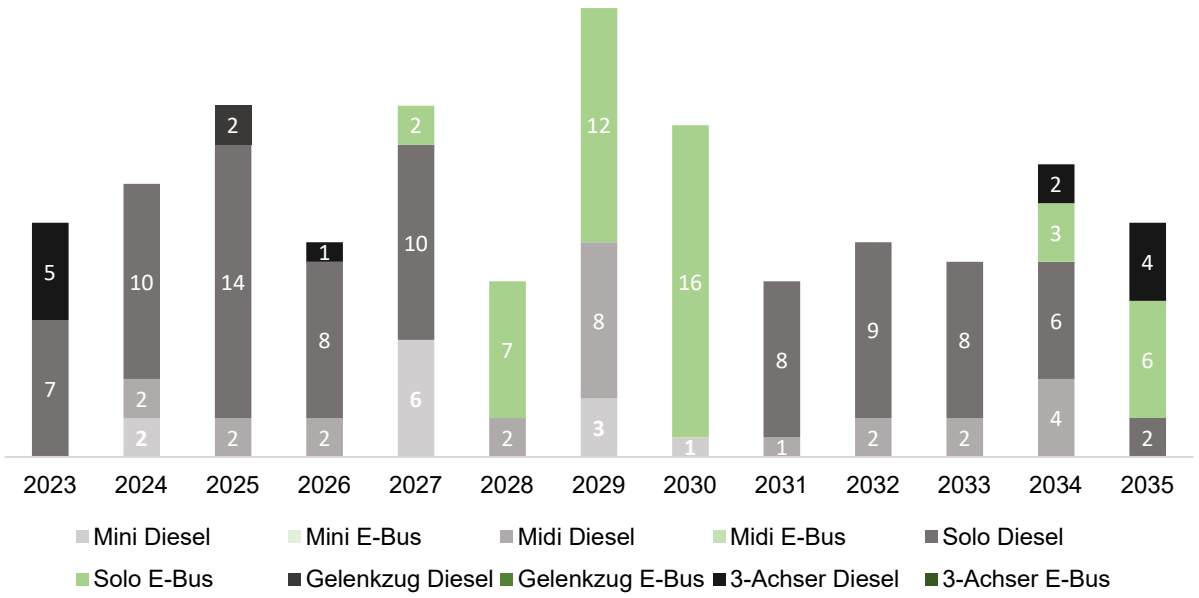


Abbildung 18: Beschaffungen der Regiobus im Rahmen des CVD+-Szenarios (eigene Darstellung)

Im Umstellungsszenario 2 sind somit 65 % des Solobus-Fuhrparks im Stadtverkehr der Regiobus bis zum Jahr 2030 elektrifiziert. Insgesamt sorgt diese Umstellungsstrategie für ein stetiges Wachstum des E-Bus-Anteils und ermöglicht so Lerneffekte hinsichtlich betrieblicher Aspekte. Die Auswirkung auf die Fuhrparkstruktur zeigt die folgende Abbildung.

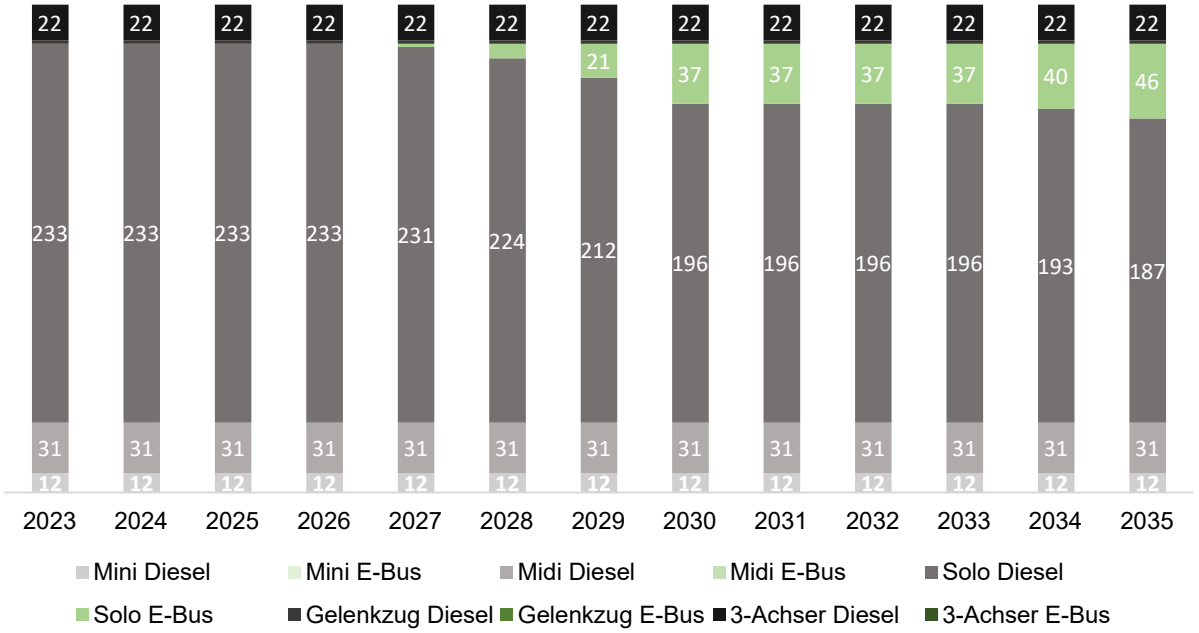


Abbildung 19: Entwicklung der Regiobus Fuhrparkstruktur innerhalb des CVD+-Szenarios (eigene Darstellung)

3. Umstellungsszenario 3: CVD++-Szenario

Das dritte Umstellungsszenario sieht eine nochmalige Verschärfung des Umstellungstempos und der Anzahl der beschafften E-Busse im Vergleich zum Umstellungsszenario 2 vor. Bis Ende des Jahres 2030 wird analog zu Szenario 2 die emissionsfreie CVD-Quote für Solobusse im Stadtverkehr angesetzt. Abweichend zum vorherigen Szenario erfolgt ab 2031 eine ausschließliche Neubeschaffung von E-Bussen für den Stadtverkehr. Daraus resultiert eine schnellere Umstellung im Vergleich zu Szenario 2.

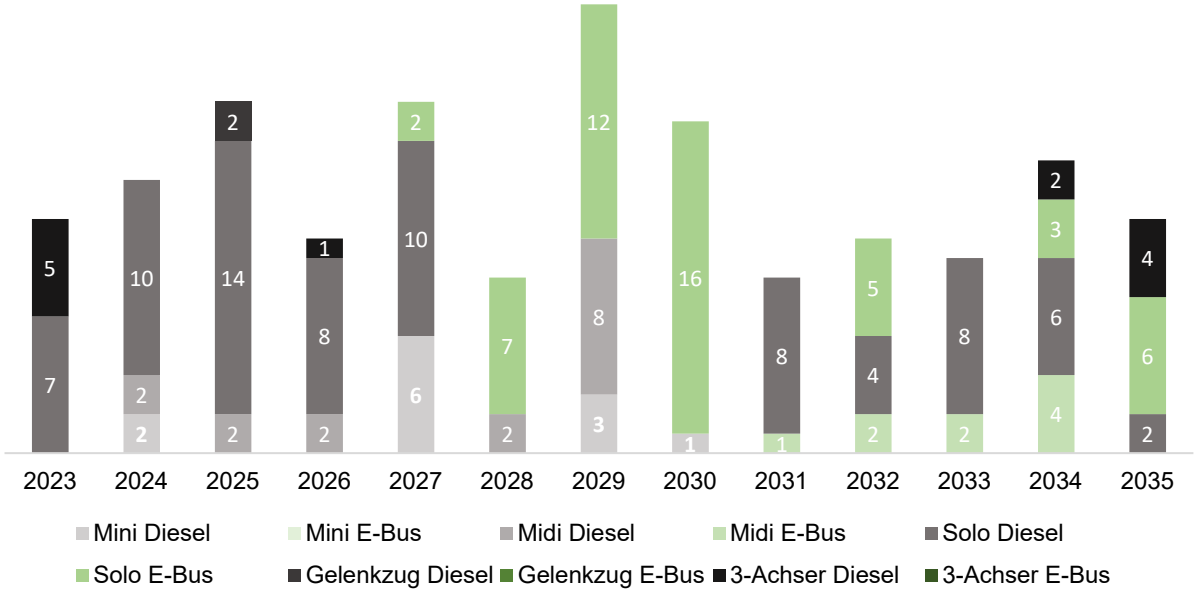


Abbildung 20: Beschaffungen der Regiobus im Rahmen des CVD++-Szenarios (eigene Darstellung)

Im Umstellungsszenario 3 sind somit ebenfalls 65 % des Solobus-Fuhrparks im Stadtverkehr der Regiobus bis zum Jahr 2030 elektrifiziert. Ab dem Jahr 2036 ist demnach eine reine E-Bus-Flotte im Stadtverkehr möglich. Insgesamt sorgt diese Umstellungsstrategie für ein stärkeres Wachstum des E-Bus-Anteils im Vergleich zum vorhergehenden Szenario und ermöglicht so Lerneffekte. Die Auswirkung auf die Fuhrparkstruktur zeigt die folgende Abbildung.

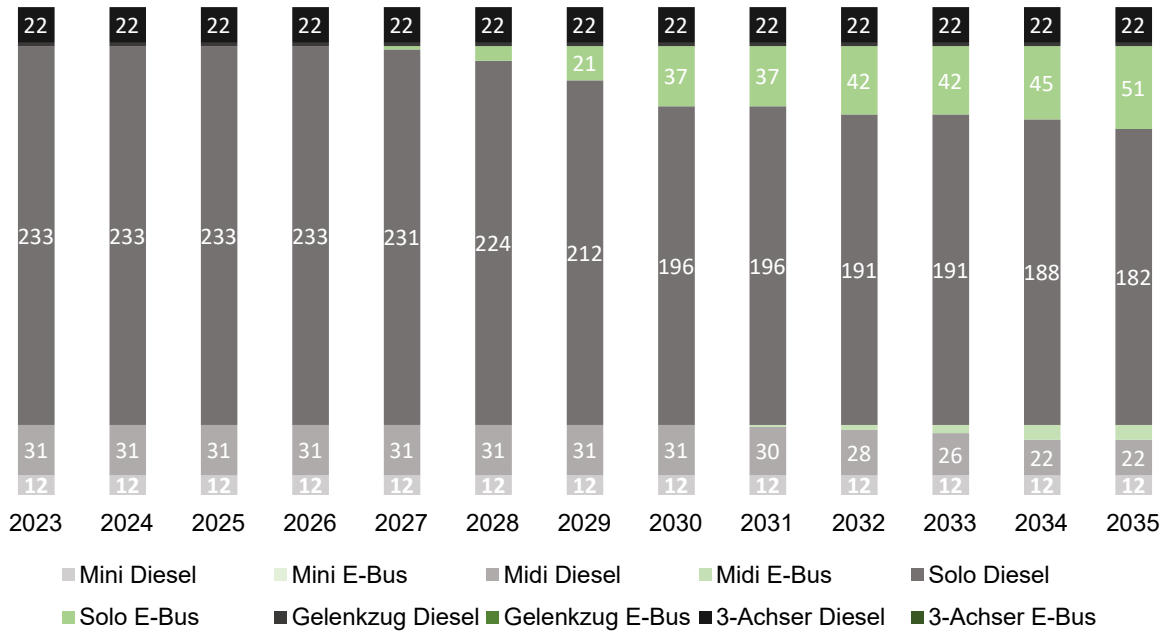


Abbildung 21: Entwicklung der Regiobus Fuhrparkstruktur innerhalb des CVD++-Szenarios (eigene Darstellung)

4. Umstellungsszenario 4: Vollumstellungsszenario (100%ige Neubeschaffung von E-Bussen für Stadt- und Regionalverkehr ab 2025)

Das vierte Umstellungsszenario sieht eine ausschließliche Neubeschaffung von E-Bussen ab dem Jahr 2025 im Stadtverkehr und Überlandverkehr vor. Damit können nur noch in dem Jahr 2024 Dieselbusse für den Stadtverkehr angeschafft werden. Das Vollumstellungsszenario bietet den schnellsten Pfad in die Elektromobilität bei Regiobus. Die letzten Diesel-Solobusse könnten bereits im Jahr 2040 ausgeflottet werden.

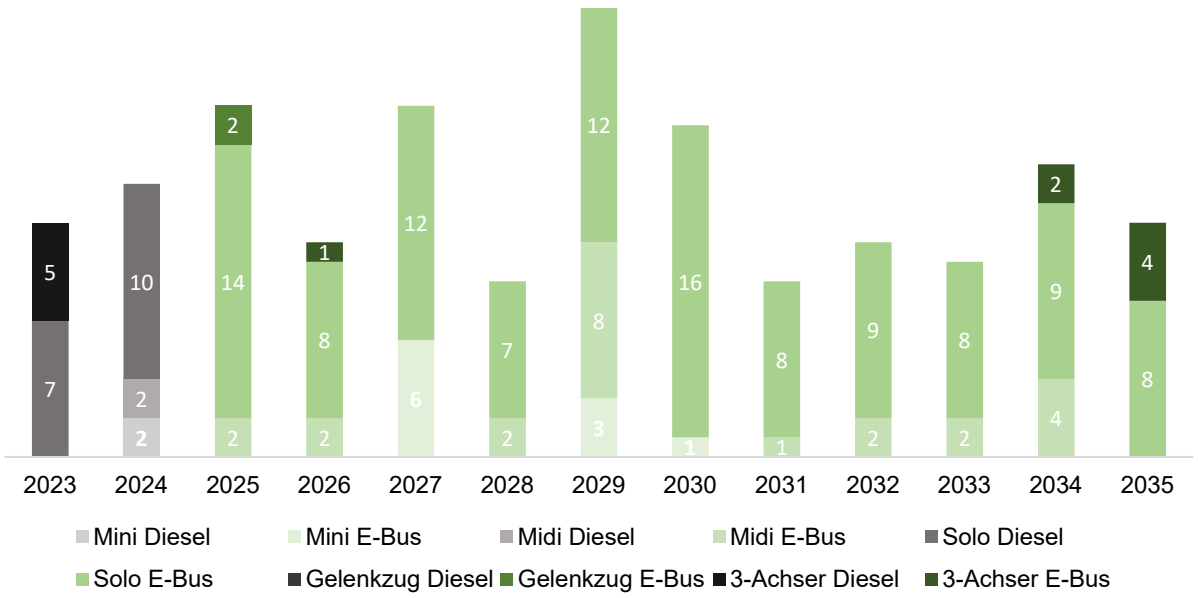


Abbildung 22: Beschaffungen der Regiobus bis zum Jahr 2035 im Vollumstellungsszenario ab 2025 (eigene Darstellung)

Bereits im Jahr 2030 könnten so alle Solobusse im Stadtverkehr mit einem emissionsfreien Antrieb ausgestattet sein. Ab dem Jahr 2030 erfolgt dann die sukzessive Umstellung der Solobusse im Überlandverkehr. Diese Umstellungsstrategie sorgt für ein schnelles Wachstum des E-Bus-Anteils und ermöglicht dennoch eine sinnvolle sukzessive Partizipation an der laufenden technischen Entwicklung der E-Busse durch die kontinuierliche Beschaffung. Die folgende Abbildung zeigt die Entwicklung der Fuhrparkstruktur bis zum Jahr 2035.

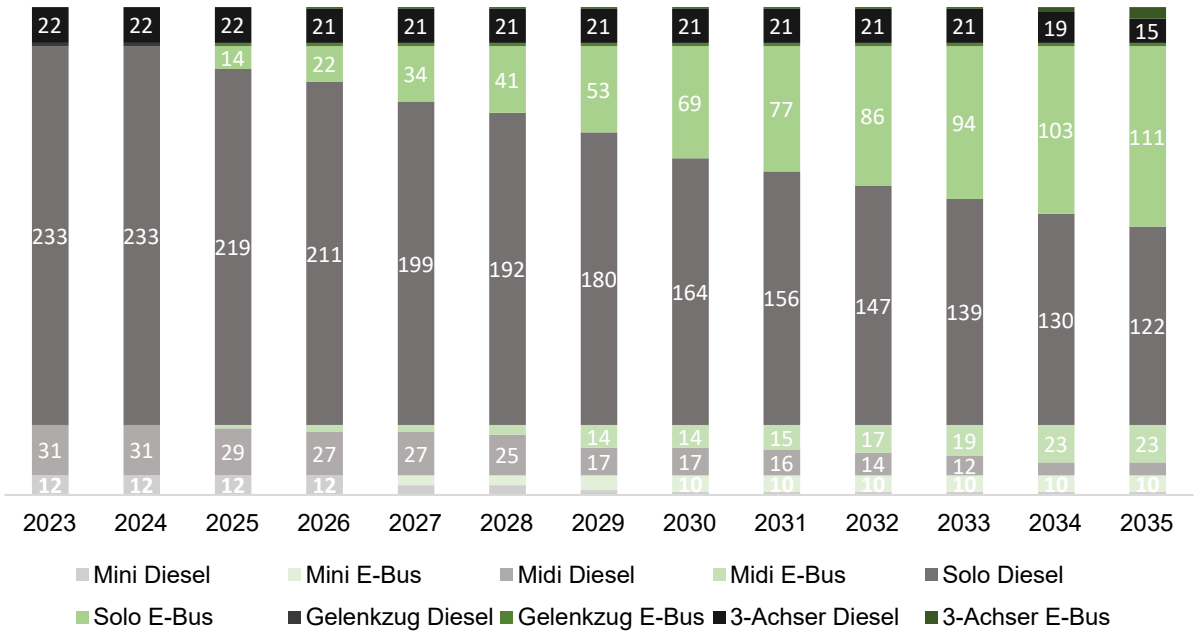


Abbildung 23: Entwicklung der Regiobus Fuhrparkstruktur bis zum Jahr 2035 im Vollumstellungs-szenario ab 2025 (eigene Darstellung)

Die vier Umstellungsszenarien wurden im Rahmen des Projektes innerhalb der Projektgruppe diskutiert, sind jedoch abschließend noch zur Entscheidung für ein finales „Flottentransformations-szenario“ zu bringen. Hierbei müssen die Zielsetzungen der Regiobus und ihrer Stakeholder (u. a. Aufgabenträger, Gesellschafter) berücksichtigt werden, die den anzusetzenden Migrationspfad und das entsprechende Umstellungstempo bestimmen.

IV. CO_2 -Minderungspotenzial für die Szenarien der Regiobus

Die Regiobus verfolgt mit der Umstellung der Flotte auf emissionsfreie Antriebe das übergeordnete Ziel der Reduzierung lokaler Luftschadstoffe und insgesamt einen Beitrag zur Einsparung der CO_2-Emissionen zu leisten. Dieser Beitrag unterscheidet sich in seiner Höhe auf der Zeitachse je nach Szenario durch die unterschiedlichen Elektrifizierungsgrade und damit durch die Substitution alter Dieselbusse in den jeweiligen Flotten.

Für die drei betrachteten Szenarien werden folgend die möglichen CO_2-Einsparungen durch die Substitution von Dieselbussen durch emissionsfreie E-Busse dargestellt.

Bezogen auf die Durchschnittsverbräuche pro Fahrzeug im Jahr 2022 ergibt dies die nachfolgend dargestellten Einsparungen.

Regiobus	ø Dieselverbrauch in Litern pro Jahr und Fahrzeug	Einsparpotenzial in t CO_2 pro Jahr und Fahrzeug
Minibus	2.414	6,40
Midibus	9.715	25,75
Solobus	15.930	42,21
Gelenkzug	3.001	7,95
3-Achser	10.067	26,68

Tabelle 16: CO_2-Einsparpotenziale bezogen auf die Durchschnittsverbräuche nach Fahrzeugart, Regiobus

Übertragen auf die entsprechende Fuhrparkstruktur der dargestellten Szenarien ergeben sich daraus folgende CO_2-Emissionen bzw. Einsparungen.

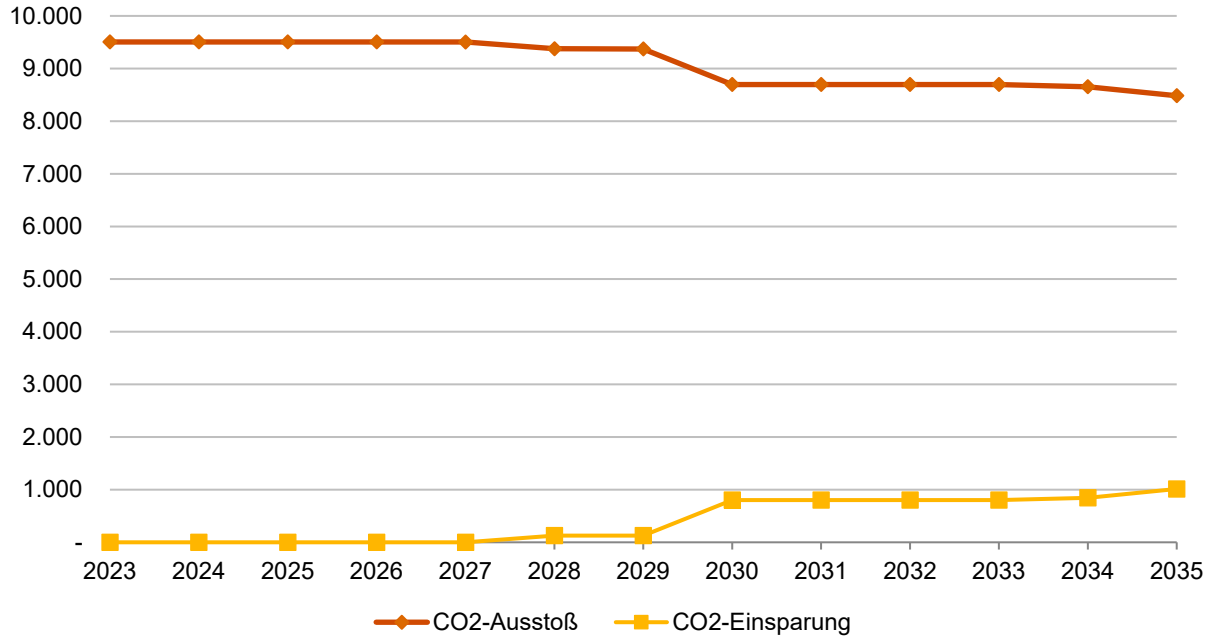


Abbildung 24: CO_2-Ausstoß und -Einsparung bei Regiobus im CVD-Szenario (in t) (eigene Darstellung)

Im CVD-Szenario reduzieren sich die CO_2-Emissionen der Regiobus-Busflotte von ursprünglich ca. 9.500 t CO_2 auf bis zu rund 8.500 t CO_2 im Jahr 2035. Somit können durch den Einsatz von emissionsfreien Bussen und HVO100 ca. 1.000 t CO_2 eingespart werden.

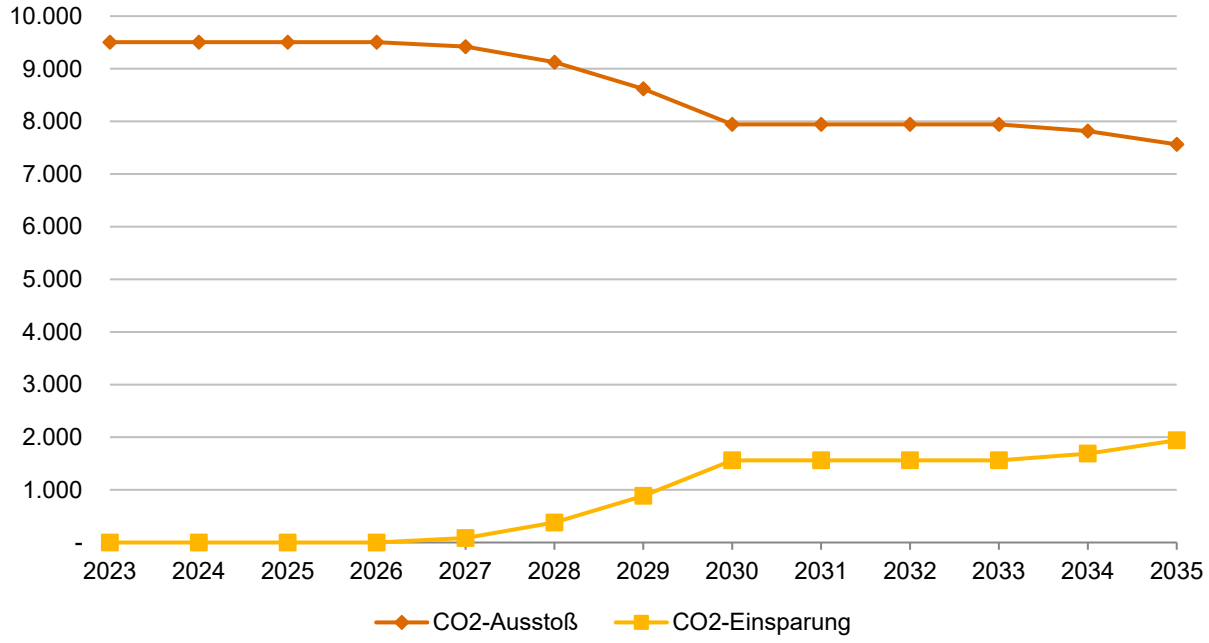


Abbildung 25: CO_2-Ausstoß und -Einsparung bei Regiobus im CVD+-Szenario (in t) (eigene Darstellung)

Durch die Flottentransformation im zweiten Szenario kann der CO_2-Ausstoß der Regiobus-Flotte bis zum Jahr 2035 auf ca. 80 % des ursprünglichen Wertes gesenkt werden. Im Jahr 2030 ermöglicht die Flottentransformation in diesem Szenario Einsparung von 1.562 t CO_2, im Jahr 3035 sind hingegen Einsparungen von über 1.942 t CO_2 möglich.

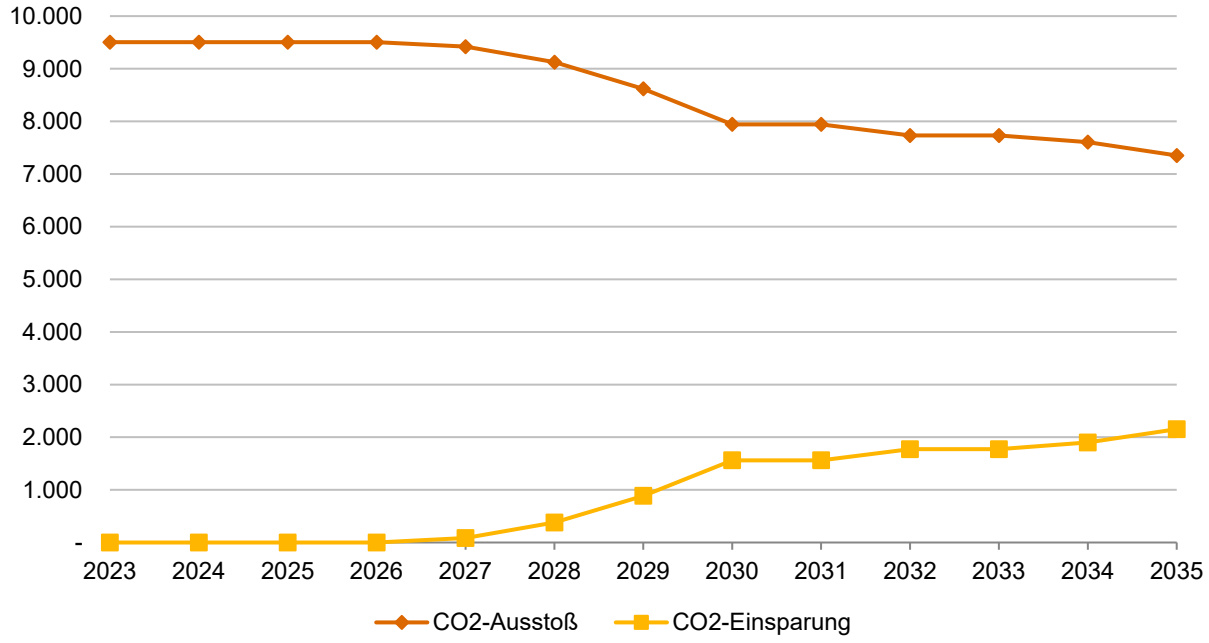


Abbildung 26: CO_2-Ausstoß und -Einsparung bei Regiobus im CVD++-Szenario (in t) (eigene Darstellung)

Im Dritten Szenario erfolgt eine leicht höhere CO_2-Einsparung durch die Vollumstellung der Stadtbusflotte ab 2031. Im Jahr 2030 können so bereits 1.562 t CO_2 im Vergleich zu 2024 eingespart werden. Bis 2035 wird der CO_2-Ausstoß um knapp ein Viertel reduziert.

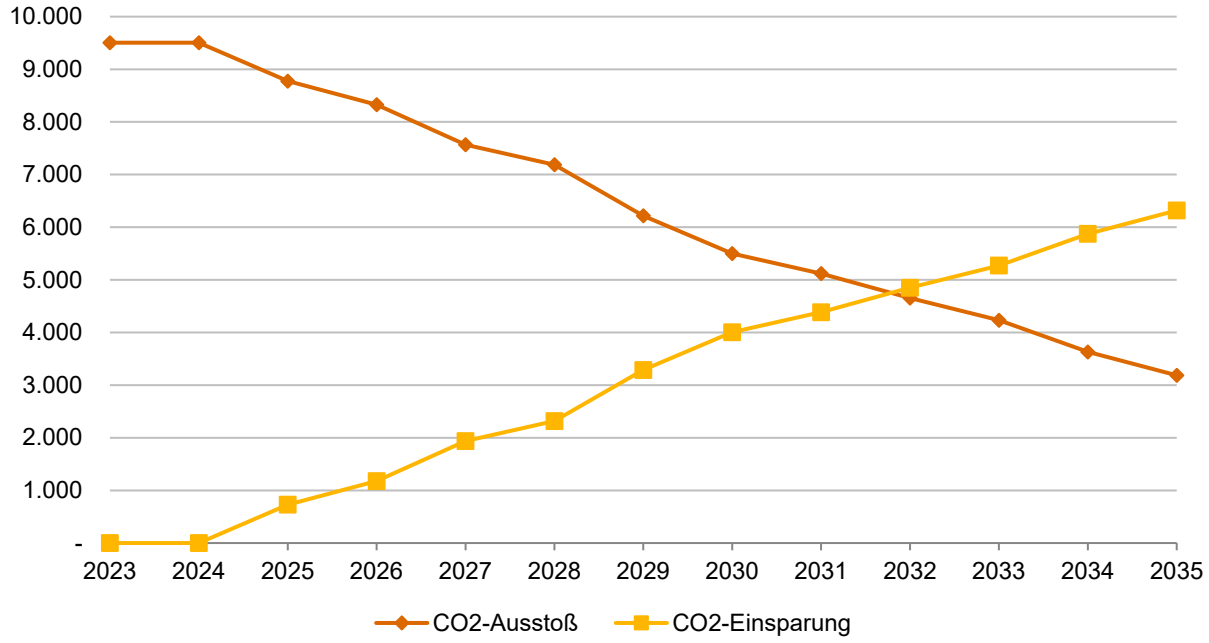


Abbildung 27: CO_2-Ausstoß und -Einsparung bei Regiobus im Vollumstellungsszenario (in t) (eigene Darstellung)

Im Vollumstellungsszenario ist die Flotte der Regiobus im Jahre 2041 unter den gesetzten Prämissen vollständig emissionsfrei im Einsatz. Es können somit insgesamt 9.500 t CO_2 eingespart werden. Im Jahr 2031 hat sich der CO_2-Ausstoß der Regiobus-Flotte bereits halbiert.

E. AP 4 – Bewertung und Definition notwendiger infrastruktureller und betrieblicher Maßnahmen für potenzielle Technologiealternativen

I. Überblick über das Gesamtsystem

Zur Versorgung der emissionsfreien Antriebsalternativen, batterie- oder brennstoffzellenelektrische Fahrzeuge, muss eine darauf ausgerichtete Versorgungsinfrastruktur vorgesehen werden. Für batterieelektrische Fahrzeuge kann Energie aus dem elektrischen Versorgungsnetz entnommen werden, dass über eine Ladeinfrastruktur den Fahrzeugen zur Verfügung gestellt wird. Für Brennstoffzellenfahrzeuge muss Wasserstoff als Energieträger bereitgestellt werden. Im Gegensatz zum Pkw-Sektor wird im Nutzfahrzeugsektor aktuell gasförmiger Wasserstoff (Drucklevel ca. 350 bar) eingesetzt. Der Einsatz von flüssigem Wasserstoff (Drucklevel ca. 700-900 bar) wird zwar auch im Nutzfahrzeugsektor vielfach diskutiert, jedoch ist am Markt keine entsprechende Technologieanpassung konkret absehbar. Entsprechend wird hier nach Stand der Technik von gasförmigem Wasserstoff ausgegangen.

Elektrische Ladeinfrastruktur für Flottenanwendungen wird üblicherweise zentral konzentriert, um den zur Verfügung stehenden Bauraum effizient zu nutzen. Da die Infrastrukturkomponenten über Leitungswege (Kabel) miteinander verbunden sind, besteht eine gute Flexibilität Komponenten im Betriebshof ‚zu verteilen'. Üblicherweise werden die bauraumintensiven Komponenten (z. B. Leistungselektroniken) in Schaltschränken zentral zusammengefasst, die außerhalb der Busstellplätze platziert werden. Im Stellplatzbereich muss lediglich die Ladeschnittstelle selbst vorgesehen werden, die beispielsweise über Kabelabrollsysteme von oben sehr platzeffizient ausgeführt werden kann. Üblicherweise können Ladesysteme so gut auch in bestehende Abstellungen integriert werden. Im Gegensatz dazu sind dezentrale Ansätze, bei denen Ladesäulen mit sämtlicher Infrastruktur im Gehäuse ausgestattet sind(ähnlich zu typischen Pkw-Ladesäulen im Stadtbild), eher für Einzelanwendungen mit wenigen Ladepunkten geeignet.

Elektrische Ladesysteme werden nach Stand der Technik modular aufgebaut. Üblicherweise werden Infrastruktur-Einheiten zusammengefasst, die als eigenständige Anlage zwischen einem und acht Fahrzeugen versorgen können. Über ein übergeordnetes Lademanagementsystem wird der Betrieb aller Infrastruktur-Einheiten verwaltet, so dass die individuellen Systeme in Summe geregelt werden. Der modulare Aufbau erlaubt einen gestaffelten Ausbau der Ladeinfrastruktur, der im Zuge des Flottenausbaus erfolgen kann. Auf ausführungstechnischer Ebene sind der Ausbauflexibilität Grenzen gesetzt. Hintergrund sind störende Einflüsse auf den Betriebsablauf bei Durchführung von Baumaßnahmen. In der Regel ist es sinnvoll, insbesondere Tiefbaumaßnahmen und andere aufwendungsintensive Vorbereitungsmaßnahmen zu bündeln. Die Störung der Abläufe erfolgt dann für einen Teilbereich des Betriebshofs einmalig. Die Installation der Ladeinfrastruktur

kann üblicherweise feinteiliger erfolgen. Abhängig vom Beschaffungsplan ist vielfach ein Infrastrukturausbau für „Gruppen“ von vier bis acht Fahrzeuge sinnvoll.

Im Gegensatz zur elektrischen Ladeinfrastruktur sind Tanksysteme für Wasserstoff weniger ortsflexibel. Da hier ein gasförmiger Energieträger bewegt wird, sollten H_2 Tanksysteme örtlich begrenzt ausgeführt werden. Entsprechend erfordern H_2 Tankanlagen einen zusammenhängenden Baubereich mit ausreichenden Platzreserven für Zufahrten und Tankstellplätzen, H_2 Trailern zur Produktanlieferung und die Infrastruktur selbst. Dieser Umstand kann bei vielfach zu beobachtenden intensiven Nutzungen bestehender Betriebshöfe eine Herausforderung darstellen.

Theoretisch kann die Nutzung externer Lade- oder Tankinfrastrukturen eine Nutzungsalternative darstellen. Dies scheitert jedoch in der Praxis bereits an den zu Verfügung stehenden Alternativen. Auch darüber hinaus wird dieser Aspekt als sehr kritisch erachtet. Einerseits ist die betriebsrelevante Infrastruktur außerhalb des direkten Zugriffsbereichs des Betreibers. Schutzmaßnahmen vor Vandalismus oder Unfällen (insbesondere bei teilöffentlicher Nutzung der Infrastruktur) müssen ebenfalls extern gewährleistet werden. Ähnliches gilt für die Sicherstellung freier Zufahrtswege („Falschparker“) und der erforderlichen Vorrangregelung für den ÖPNV: Bei externen Infrastrukturen muss jederzeit sichergestellt sein, dass ÖPNV-Fahrzeuge ohne Zeitverluste die Infrastrukturen erreichen können. Bei Wasserstoffinfrastrukturen kommt erschwerend hinzu, dass öffentliche Anlagen in der Regel auf das höhere Druckniveau im Pkw-Sektor ausgelegt sind. Für Nutzfahrzeuge müssen zwingend 350 bar Zapfpunkte verfügbar sein.

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird der Fokus auf die Vorzugstechnologie, also elektrische Ladesysteme, gelegt. Wasserstofftankinfrastrukturen werden in Grundzügen behandelt, um eine Einordnung zu ermöglichen.

II. Betriebshofuntersuchung

1. Lastganganalyse

Um eine Überdimensionierung elektrischer Ladeinfrastruktur zu vermeiden, wird das Funktionsverhalten eines Lademanagementsystems zugrunde gelegt (Siehe auch Methodik in Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Durch eine effiziente Staffelung der einzelnen Ladevorgänge kann die Ladeinfrastruktur effizienter ausgelegt werden. Selbstverständlich werden in diesem Kontext ausreichende Sicherheitsfaktoren berücksichtigt, um ebenfalls eine Unterdimensionierung zu vermeiden.

Die Systemauslegung erfolgt insgesamt ausgelegt auf eine vollständige Flottenelektrifizierung (Vollumstellung auf BEV). Dabei wird angenommen, dass die Batterietechnik ausreichend stark fortgeschritten ist, um alle Umläufe zu erfüllen. Praktisch bedeutet dies, dass alle Nachladungen über Nacht erfolgen. In der Praxis kann durch Umlaufanpassung eine anteilige Verschiebung des Ladebedarfs in den Tag erfolgen. Abgelöste Fahrzeuge rücken am Tag in das Depot ein, um nachgeladen zu werden. Dies stellt aus Perspektive des Ladesystems eine Entlastung dar, da über Nacht (Zeit maximalen Lastbedarfs) die Anforderungen reduziert werden. Um auch mit Bezug auf Ladeinfrastruktur (LIS) die konservative Ausrichtung der Studie fortzusetzen, wird hier angenommen, dass maximale Anforderungen vorliegen und alle Ladevorgänge über Nacht erfolgen („keine Umlaufanpassung“). Ausgenommen sind planmäßige Aufenthalte während des Tages, zum Beispiel Aufenthalte zwischen zwei Einzelumläufen, die in jedem Fall zur Nachladung der Fahrzeuge genutzt werden.

Als härtester Betriebstag steht „Dienstag_Schule“ im Fokus der Studie. Für die Lastganganalyse wird angenommen, dass am Folgetag („Mittwoch_Schule“) identische Abfahrtszeiten vorliegen, um das Ende der Aufenthaltsdauern im Depot definieren zu können. Um den Ladebedarf eines typischen Werktages anzusetzen, wird hier vereinfacht eine Betriebstagsfolge „Dienstag_Schule“ folgt auf „Dienstag_Schule“ unterstellt.

Für alle Fahrzeugtypen wird eine marktübliche Ladeleistung von 130 kW (am Ladepunkt) angesetzt. Ausnahme sind Kleinbusse, die hier mit einer reduzierten Ladeleistung von 80 kW bilanziert werden. Um die Netzlast zu ermitteln, wird ein Gesamtwirkungsgrad von 90 % der Ladeinfrastruktur angenommen, was einem realistischen Wert entspricht, um die anlagenbezogenen Verluste zu kalkulieren.

Betriebshof Mittweida

Im nicht-optimierten Ansatz liegen keine Restriktionen durch das Lademanagementsystem vor. Die Fahrzeuge können nach Ablauf einer zehnminütigen Rangierzeit (pauschal angesetzt) unmittelbar ihren Ladevorgang aufnehmen. Entsprechend spiegelt der Lastverlauf die

Einrückreihenfolge der Fahrzeuge wider. Ab ca. 16 Uhr steigt der Lastverlauf an, bis um ca. 19 Uhr das Maximum erreicht wird.

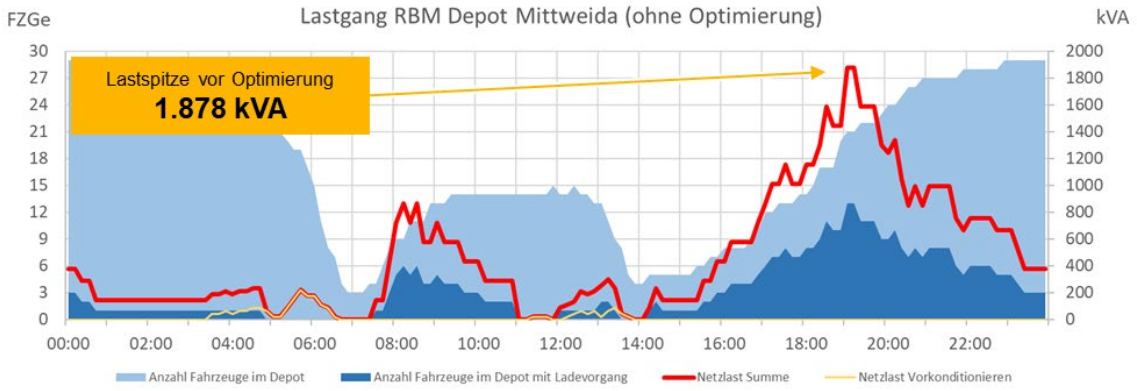


Abbildung 28: Lastgang Depot Mittweida (ohne Optimierung) (eigene Darstellung)

Der Lastverlauf fällt bereits deutlich vor 24 Uhr wieder ab. Gleichzeitig sind die Fahrzeuge, wie an der hellblauen Kurve erkennbar, bis ca. 05 Uhr am Folgetag im Depot. Die fahrplanbedingte Anwesenheitsdauer wird nicht effizient genutzt.

Im optimierten Lastverlauf wird die Anwesenheitsdauer deutlich effizienter ausgenutzt. Zwischen ca. 20 Uhr und ca. 03 Uhr am Folgetag wird ein nahezu konstanter Lastwert erreicht. Durch eine zeitliche Organisation der einzelnen Ladevorgänge kann im Beispiel die netzseitige Lastspitze von 1.878 kVA um ca. -64 % auf 668 kVA reduziert werden.

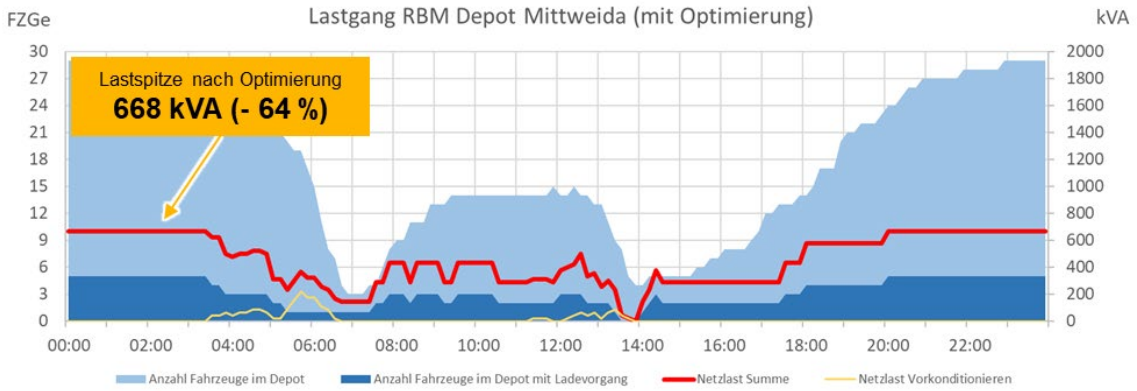


Abbildung 29: Lastgang Depot Mittweida (mit Optimierung) (eigene Darstellung)

Die Reduktion der Lastspitze wirkt sich dabei nicht ausschließlich auf das Ladesystem, sondern ebenfalls auf die erforderlichen Netzanschlusskomponenten aus. Einerseits ist eine deutlich geringere Netzkapazität erforderlich, was sich positiv auf die Realisierbarkeit der Flottendekarbonisierung auswirkt: Vielfach kann ein kostenintensiver Netzausbau durch optimierte Lastwerte

vermieden werden. Andererseits können MS/NS[7] Transformator schlicht kleiner und damit kostengünstiger dimensioniert werden. Abhängig von den Tarifkonditionen, die in der Regel abhängig vom maximal bezogenen Leistungswert ausfallen, können geringere Lastspitzen auch hier Vorteile bewirken.

Betriebshof Hartmannsdorf

Im Betriebshof Hartmannsdorf zeigen sich vergleichbare Umstände zum Depot in Mittweida. Auch hier ist im nicht-optimierten Ansatz ein Systemverhalten zu beobachten, dass abhängig von den Einrückzeiten ist. Die Lastspitze tritt hier bereits gegen ca. 17 Uhr ein, bevor der Lastverlauf über Nacht auf mittlerem Niveau rangiert. Auffallend ist eine zweite Lastspitze um ca. 08 Uhr, die auf planmäßige Zwischenladungsvorgänge zurückzuführen ist.

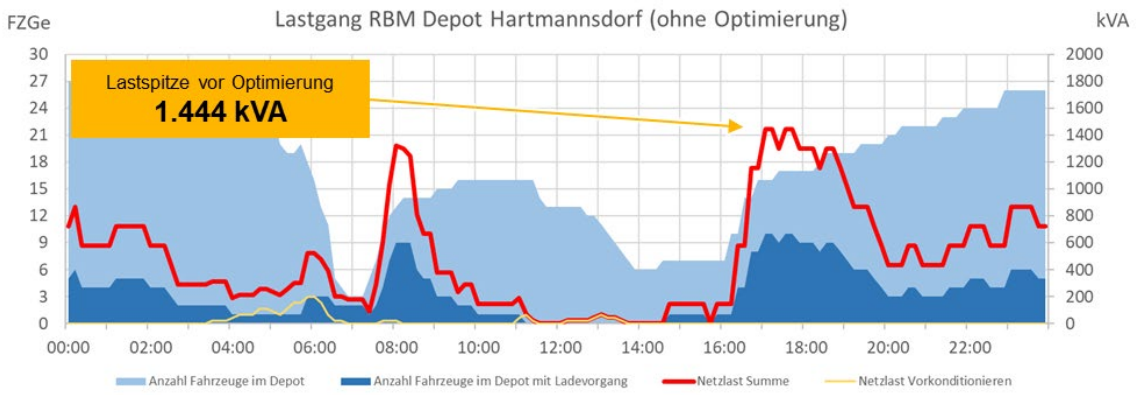


Abbildung 30: Lastgang Depot Hartmannsdorf (ohne Optimierung) (eigene Darstellung)

Durch die Lastgangoptimierung können beide Lastspitzen wirksam begrenzt werden. Ähnlich zum vorherigen Fall wird auch hier über Nacht ein weitestgehend konstanter Lastverlauf erreicht.

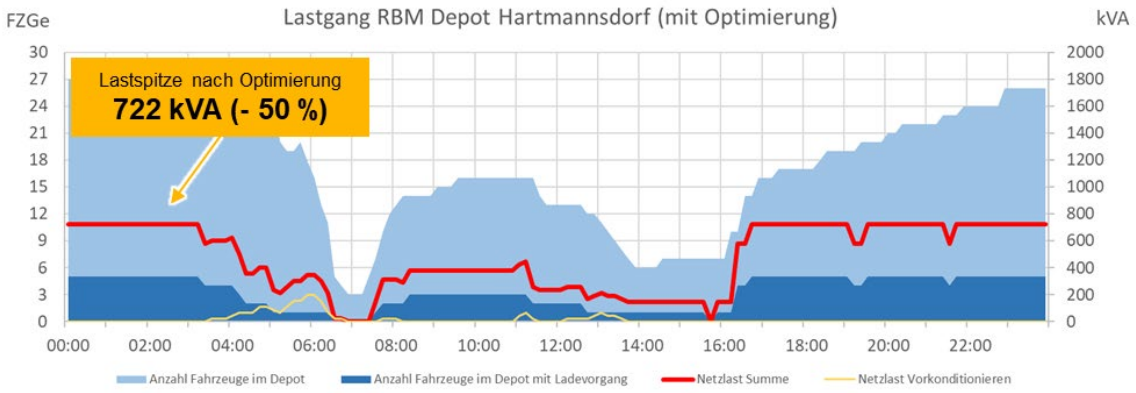


Abbildung 31: Lastgang Depot Hartmannsdorf (ohne Optimierung) (eigene Darstellung)

[7] MS/NS Transformator – Mittelspannungs- / Niederspannungstransformator

Durch die Lastgangoptimierung kann die maximale Lastspitze im Betriebshof Hartmannsdorf von 1.444 kVA um ca. -50 % auf 722 kVA reduziert werden.

Resultierender Netzanschluss

Der Netzanschluss erfolgt über den MS/NS Transformator. Dieser wird mit Sicherheitsfaktoren ausgelegt, um eine Abweichung gegenüber dem idealen Optimierungsablauf zu erlauben. In der Praxis können beispielsweise Verzögerungen im Betriebsablauf oder Änderungen an der Fahrplanstruktur Auswirkungen auf den Lastverlauf haben. Die Reserve wird mit 30 % gegenüber dem optimierten System veranschlagt. Der MS/NS Transformator wird für die Lastspitze inklusive Reserveaufschlag ausgelegt. Dabei wird ein maximaler Arbeitspunkt des Transformators von 80 % der Nennleistung angesetzt, um eine hohe Effizienz zu gewährleisten.

Aus der folgenden Tabelle sind die Kernfaktoren für die Auslegung des Netzanschlusses zu finden. Neben der erwarteten Lastspitze, die den oben dargestellten Werten nach Optimierung entspricht, ist hier insbesondere die empfohlene Anschlussleistung relevant. Diese beinhaltet die angesprochenen Sicherheitsfaktoren und entspricht dem maximal erwarteten Leistungswert, der aus dem Netz beziehbar sein sollte. Die Größe des MS/NS Transformators ist hier weitestgehend informativ, da es sich um ein Bauteil handelt, dass in der richtigen Dimensionierung zugekauft werden kann.

Betriebshof	Erwartete Lastspitze (nach Optimierung)	Empfohlene Anschlusskapazität (inkl. 30% Reserve)	Empfohlener MS/NS Trafo
Mittweida	668 kVA	868 kVA	1.250 kVA
Hartmannsdorf	722 kVA	939 kVA	1.250 kVA

Tabelle 17: Dimensionierung Netzanschluss

2. Grobspezifikation Infrastruktur

a) Technische Gestaltung elektrische Lade-Infrastruktur

Batterieelektrische Großfahrzeuge werden grundsätzlich mit DC-Ladesystemen geladen, um die notwendigen Ladeleistungen erbringen zu können. Im Wesentlichen unterscheiden sich moderne Ladesysteme für Batteriebusse hinsichtlich:

- Aufbauprinzip
- Modularität
- Kooperationsfähigkeit

Darüber hinaus unterscheiden sich Ladesysteme selbstverständlich anhand der Anzahl und Dimensionierung der einzelnen Systembausteine.

Aufbauprinzip

Unter dem Begriff Aufbauprinzip wird sich hier auf die grundsätzliche Aufbaustruktur eines Ladesystems mit mehreren Ladepunkten bezogen. Unterschieden wird zwischen zentralen und dezentralen Strukturen, wobei in der Praxis auch Mischformen denkbar sein können.

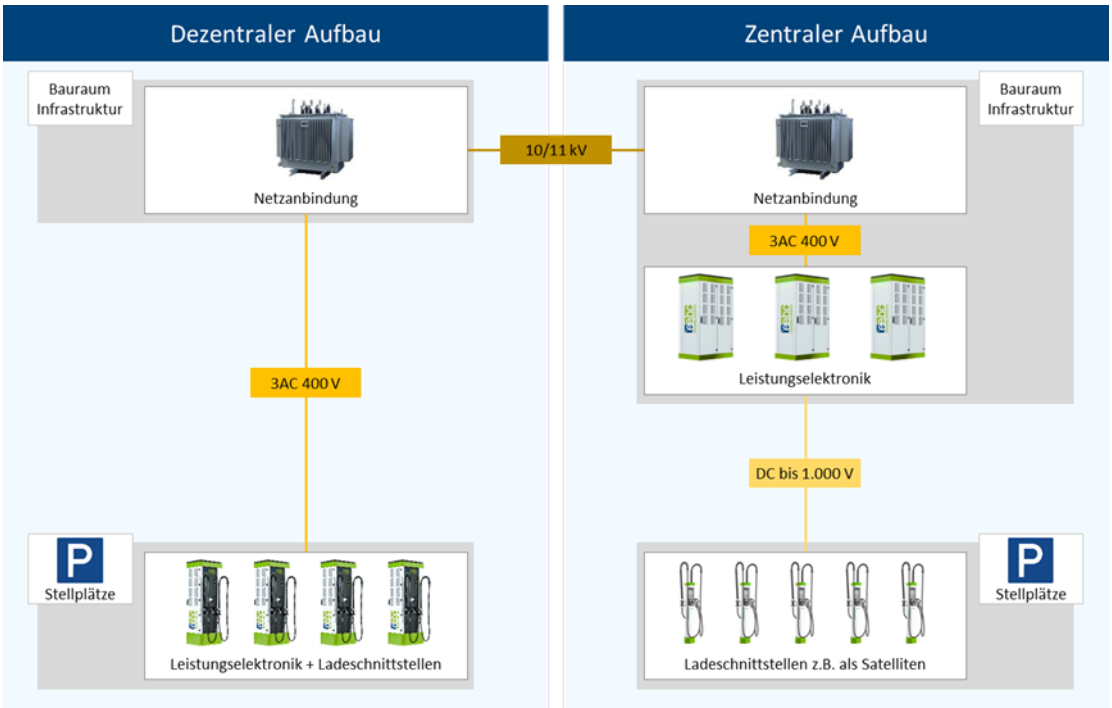


Abbildung 32: Dezentraler und zentraler Aufbau von Ladeinfrastrukturen (eigene Darstellung)

Die Zentralität bemisst sich hier an der Leistungselektronik. Im dezentralen Ansatz ist diese über die Summe der Ladepunkte dezentral verteilt. Dies entspricht der typischen Pkw-Ladesäule, bei der sämtliche Elektronik im Gehäuse mit der Ladeschnittstelle verbaut ist. Das abgeschlossene Ladesystem wird über eine 400 V Verbindung an den Netztransformator angeschlossen. Abhängig von der Anzahl der Ladepunkte wird der dezentrale Ansatz mehrfach parallel ausgeführt und jeweils an das 400 V Netz angeschlossen.

Im zentralen Ansatz sind Ladeschnittstelle und Leistungselektronik räumlich voneinander getrennt und über eine Gleichstromverbindung (DC-Strecke) miteinander verbunden. Die Leistungselektronik wird gruppiert in Elektronikgehäusen installiert und kann ortsflexibel installiert werden. Die Ladeschnittstelle wird bei diesem Aufbau auch als Ladesatellit bezeichnet. Der Ladesatellit kann auch als Ladesäule aufgebaut sein, wobei der Platzbedarf hier wesentlich geringer ist als für Ladesäulen aus dem dezentralen Ansatz. Darüber hinaus stehen weitere mögliche

Schnittstellenausführungen zur Verfügung, um beispielsweise den Platzbedarf weiter zu reduzieren (z. B. Pantographenlösungen).

Im Einsatzrahmen des ÖPNVs sind üblicherweise zentrale Aufbauten von Vorteil, was auf drei Hauptfaktoren zurückgeführt werden kann:

- Zentrale Aufbauten ermöglichen den Einsatz sogenannter Matrix-Systeme, die später unter der Überschrift Kooperationsfähigkeit beschrieben werden.
- Aufgrund der üblicherweise begrenzten Stellflächen in Depots sind zentrale Systeme im Vorteil, da große Mengen der Infrastruktur außerhalb der Stellflächen aufgebaut werden und im Umfeld der parkenden Busse nur minimale Bauflächen erforderlich sind.
- Im zentralen Aufbau werden Leistungselektronik und Netztransformator üblicherweise möglichst nah aneinander verbaut und im Idealfall sogar über Kupferverschienungen miteinander verbunden. Damit werden die stärker verlustbehafteten Wechselstromstrecken auf ein Minimum begrenzt. Die längsten Kabelstrecken werden über effizientere Gleichstromleitungen abgedeckt, was eine geringere Verlustleistung der Anlage gegenüber dezentralen Aufbauten bewirkt.

Der Hauptvorteil von dezentralen Ladesystemen geht auf die vollintegrierte Struktur zurück. Bei kleinen Systemen kann der Bauaufwand für die Installation sehr überschaubar ausfallen, sofern ein 400 V Netz mit ausreichenden Kapazitäten erreichbar ist. Der Ansatz eignet sich auch sehr gut für temporäre eingesetzte Systeme. Nach Außerbetriebsetzung kann die gesamte Systemeinheit vom Versorgungsnetz getrennt und verkrant werden, um an anderer Stelle weiter verwendet zu werden.

Modularität

Naturgemäß ist jedes Ladesystem modular aufgebaut und der Begriff Modularität kann auf verschiedene Ebenen ausgedehnt werden. Streng genommen kann eine mehrfache Ausführung von Ladesäulen nach dem dezentralen Ansatz als mehrere Module vom Typ Ladesäule interpretiert werden. Hier wird der Begriff auf ein Leistungsmodul reduziert.

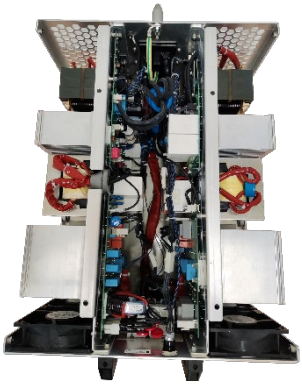


Abbildung 33: Leistungsmodul (eigene Darstellung)

Ein Leistungsmodul ist vereinfacht ein AC/DC-Wandler, also eine leistungselektronische Komponente, die den benötigten Ladestrom für die Ladeschnittstelle bereitstellt. Das Modul transformiert dafür die Wechselspannung zu einer Gleichspannung. Mehrere Leistungsmodule können parallel betrieben werden, um ein Vielfaches der Modulleistung für die Fahrzeugladung bereitzustellen.

Mit Bezug auf die hier diskutierte Modularität eines Ladesystems stehen drei Unterscheidungsmerkmale im Vordergrund. Primäres Merkmal ist die Anzahl und Größe (Leistungsklasse) der Module, vergleichbar mit einem Grundbaustein, der in einer gewissen Größe mehrfach eingesetzt wird. Darüber hinaus stehen Bauteilgleichheit, beziehungsweise Bauteilkompatibilität, sowie die Art der internen Schnittstellen im Fokus.

Für die weitere Betrachtung wird vorausgesetzt, dass in allen Systemen baugleiche oder voll kompatible Module eingesetzt werden. Bei Neueinführung eines Ladesystems kann dies vorausgesetzt werden. Bei einer nachträglichen Erweiterung sollte dieser Aspekt berücksichtigt werden, um Wartungsvorteile und reduzierte Lagermengen für Ersatzteile zu gewährleisten. Ziel ist es, Module mit gleicher Leistungsklasse auch identisch (oder schnittstellengleich) auszuführen, um die Variantenvielfalt auf ein Minimum zu begrenzen.

Im folgenden Abschnitt wird jeweils ein Ladesystem mit 300 kW Systemleistung herangezogen, um die weiteren Unterscheidungsmerkmale zu diskutieren. Angenommen wird hier ein fiktives Gehäuse (Schaltschrank) in dem bis zu 150 kW Leistungselektronik installiert werden können. In Summe werden hier also zwei Gehäuse pro Ladesystem angenommen. Die Gehäuse verfügen darüber hinaus über einen Bauraum für Verschaltungselektroniken (Gelb).

Abbildung 34: Modulares System 2 x 1 x 150 kW (eigene Darstellung)

Im ersten Fall mit sehr geringer Modularität ist pro Gehäuse ein einzelnes Lademodul verbaut, das mit einer Leistungsklasse von 150 kW beziffert ist. Jedes Gehäuse ist mit einer eigenen Ladeschnittstelle ausgestattet. Jeder dieser zwei Ladepunkte kann mit einer Ladeleistung zwischen 0 und 150 kW bedient werden. Eine weitere Aufteilung der Leistung ist nicht möglich, da nur ein einzelnes Modul über die Verschaltungselektronik an die Ladeschnittstelle angebunden werden kann. In diesem Spezialfall entspricht die Verschaltungselektronik einem einfachen Leitungsweg zur Durchleitung der Modulleistung. Der Aufbau ähnelt einer einfachen Pkw-Ladesäule.

Für Systeme mit gesteigerter Modularität sind zwei Beispiele aufgeführt. Der Hauptunterschied ist die verwendete Modulgröße mit 75 kW beziehungsweise 50 kW Modulleistung.

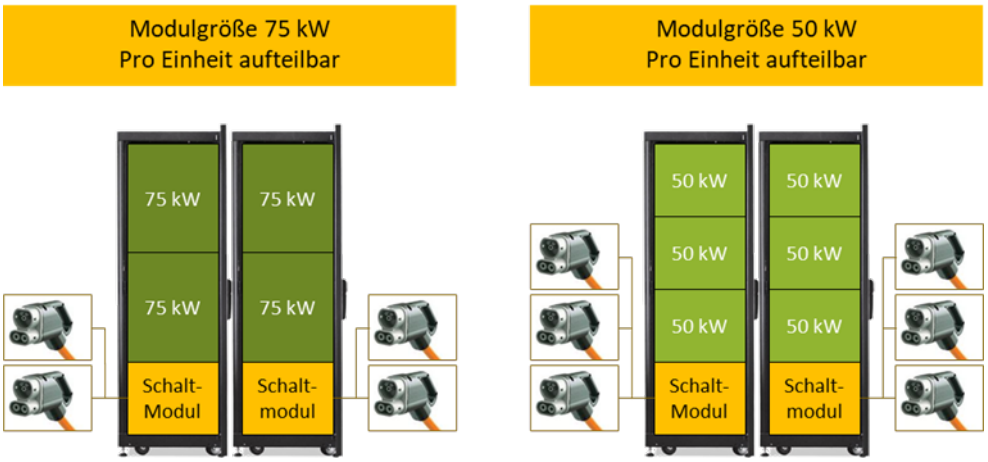


Abbildung 35: Modulare Systeme 2 x 2 x 75 kW und 2 x 3 x 50 kW (eigene Darstellung)

Um pro Einheit eine Gesamtleistung von 150 kW zu erreichen, sind entweder zwei 75 kW oder drei 50 kW Module verbaut. Im Ansatz mit 75 kW Modulen stehen zwei Subeinheiten zur Verfügung, die über das Schaltmodul an zwei Ladeschnittstellen verschaltet werden können. Dabei können beide Module beliebig den Ladepunkten zugeordnet werden; also eines oder beide der

verfügbaren Module. Im Ansatz mit 50 kW Modulen können drei kleinere Moduleinheiten flexibel auf drei Ladepunkte verteilt werden. Mit demselben Infrastrukturaufwand (300 kW im Beispiel) können also bereits aufgrund der Modulgröße und Modulanzahl Vorteile durch eine feinere Aufteilung der Systemleistung erzielt werden. Bei der Verschaltung ist zu berücksichtigen, dass in der Regel immer die gesamte Modulleistung blockiert wird. Um im ersten Fall eine Leistung von 80 kW zu erzielen, müssen beide Module eingesetzt werden. Die übrigen 70 kW können nicht weiter genutzt werden.

Ansatz: 1 x x2 x 75 kW	
Ladepunkt 1	Ladepunkt 2
0 kW	0 kW
0 kW	150 kW
150 kW	0 kW
75 kW	75 kW

Ansatz: 1 x 3 50 kW		
Ladepunkt 1	Ladepunkt 2	Ladepunkt 3
0 kW	0 kW	0 kW
0 kW	0 kW	150 kW
0 kW	150 kW	0 kW
150 kW	0 kW	0 kW
0 kW	50 kW	100 kW
0 kW	100 kW	50 kW
50 kW	0 kW	100 kW
100 kW	0 kW	50 kW
100 kW	50 kW	0 kW
50 kW	100 kW	0 kW
50 kW	50 kW	50 kW

Tabelle 18: Übersicht Verschaltungsmöglichkeiten bei verschiedenen Modulgrößen

Die Auswirkung wird besonders deutlich, wenn die Möglichketen der Leistungsverteilung tabellarisch aufgezeichnet werden (s.o.). Hierbei gilt, dass die eingetragenen Leistungswerte immer von Null bis zum angegebenen Wert gelten; eine geringere Leistung kann immer bezogen werden.

Die Modularität des Ladesystems kann darüber hinaus weiter gesteigert werden, wenn das Schaltmodul als Schnittstelle über mehrere Systeminstanzen (Gehäuse) ausgedehnt wird.

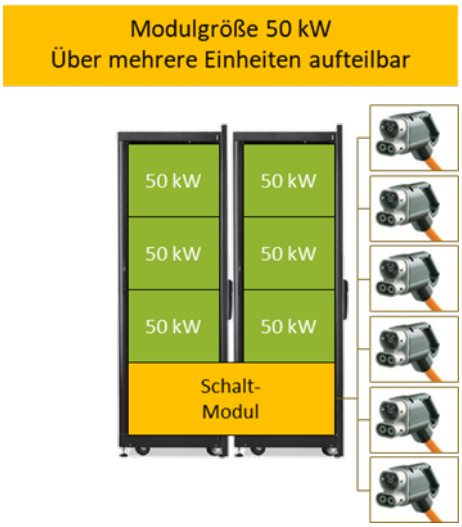


Abbildung 36: Modulares System 1 x 6 x 50 kW (eigene Darstellung)

Die obige Darstellung entspricht grundsätzlich dem zuvor dargestellten Fall, mit der Besonderheit, dass sechs Module vollständig variabel auf sechs Ladepunkte verschaltet werden können. In der Praxis sind Ansätze verbreitet, bei denen 2, 4, 6 oder 8 Ladepunkte an eine Systemleistung von 600 kW und mehr verschaltet werden können. Leistungsmodule rangieren üblicherweise zwischen 25 kW und 100 kW, wobei 50 kW den typischen Wert darstellen. Es gilt anzumerken, dass insbesondere sehr kleine Leistungsmodule teilweise zwar individuell, wie oben beschrieben, betrieben werden können, aber kein eigenständiges mechanisches Modul darstellen. Üblich ist beispielsweise der Einsatz von 50 kW Modulen (interpretierbar als kleinste Baueinheit im System), die intern als zwei individuelle 25 kW Gleichrichter fungieren. Im Fehlerfall muss jedoch das gesamte 50 kW Modul getauscht werden.

Durch den Einsatz von Verschaltungsmodulen über mehrere Systemeinheiten (LIS-Einheiten) hinweg wird praktisch der Bezugsrahmen vergrößert. Mehrere LIS-Einheiten können ihre Modulleistungen flexibel an das Verschaltungsmodul weiterleiten. Dieses kann die Leistungen dann flexibel kombinieren und an alle angebundenen Ladeschnittstellen weiterreichen. Angenommen es werden zwei Systeme mit einer Modulleistung von 3 x 50 kW betrachtet (vgl. Beispiel in Tabelle 19). Bei getrennter Ausführung können die Modulleistungen nur auf drei Ladepunkte verschaltet werden. Bei Ausführung mit einem gemeinsamen Verschaltungsmodul kann das Doppelte der Leistung auf alle sechs Ladeschnittstellen verteilt werden. Somit können beispielsweise am frühen Abend drei Busse auf den ersten drei Ladeplätzen mit 3 x 100 kW geladen werden, während in der Nacht dieselbe Leistung an drei anderen Ladepunkten bereitgestellt werden kann. Bei getrennter Ausführung wäre dies nicht möglich, da jeweils nur 150 kW zur Verfügung stehen, die auf die ersten oder auf die letzten drei Ladeplätze verteilt werden können.

Für die Regiobus lässt sich zusammenfassen, dass ein Konzeptansatz idealerweise auf dasselbe Leistungsmodul über alle verschiedenen Depots oder Ladeeinrichtungen hinweg zurückgeführt wird. Dabei gilt es eine möglichst kleine Modulgröße zu etablieren, um

- möglichst große Freiheitsgrade bei der Leistungsverteilung zu erzielen,
- in Verbindung mit sinnvoll dimensionierten Schaltmodulen sog. Matrix-Systeme umsetzen zu können (vgl. auch Kooperationsfähigkeit unten),
- die Ausfallsicherheit und Anlagenredundanz zu erhöhen (bei Ausfall eines Moduls bleibt die restliche Anlage in Betrieb),
- Ladesysteme möglichst präzise auf die Anforderungen anpassen zu können und
- Wartungs- und Reparaturvorteile durch möglichst kleine und kostengünstige Tauschkomponenten zu erzielen.

Kooperationsfähigkeit

Unter Kooperationsfähigkeit wird hier die Möglichkeit verstanden, Leistung über mehrere Systemeinheiten vererben zu können. Die Thematik wurde unter Modularität bereits aufgegriffen, da die Themen eng miteinander verwandt sind.

Als dediziertes System wird hier ein Ansatz verstanden, bei dem eine abgeschlossene System-instanz (LIS-Einheit) eine geringe Anzahl Ladepunkte (≤ 3 LP) bedient. Darüber hinaus bestehen keine weiteren Verbindungen. Sobald die an die Ladepunkte angeschlossenen Fahrzeuge vollgeladen sind, wird die Infrastruktur nicht weiterverwendet, bis ein Fahrzeug wechselt.

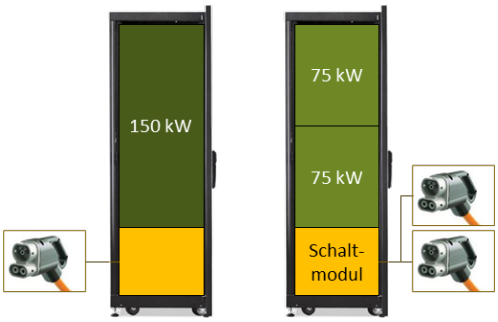


Abbildung 37: Dediziertes Ladesystem (Beispiel) (eigene Darstellung)

Nicht abgerufene Leistungen können nur für die pro Einheit angeschlossenen Ladeschnittstellen verwendet werden. Für eine Fahrzeugflotte sind entsprechend viele LIS-Einheiten erforderlich, was in einem tendenziell schlechten Anlagenausnutzungsgrad und hohen zu installierten Infrastrukturmengen pro Bus mündet.

Bei kooperativen Systemen wird der Bezugsrahmen ausgedehnt. Typisch sind vier bis acht angebundene Ladepunkte, die an mehrere LIS-Einheiten angeschlossen werden. Hierbei ist es eine

Definitionsfrage, ob dies schlicht als größere dedizierte LIS-Einheit mit einer größeren Anzahl Ladepunkten verstanden wird, oder ob dies als kooperatives System gekennzeichnet wird. In jedem Fall stehen mehr Ladepunkte in einem kooperativen Verbund, als bei hier dediziert genannten Systemen, was sich stark positiv auf den Anlagenausnutzungsgrad auswirkt (adäquate Planung vorausgesetzt). Dies geht darauf zurück, dass nicht genutzte Leistung in einem größeren Systemverbund vererbt werden kann, der nicht auf wenige Ladepunkte beschränkt ist. Entsprechende Systeme müssen anwendungsspezifisch geplant werden, erreichen jedoch in der Praxis deutlich geringere Werte für die zu installierten Infrastrukturmengen pro Bus, was sich in geringeren Anschaffungskosten niederschlägt.[8] Der große Systemverbund eines kooperativen Systems steigert außerdem die Ausfallsicherheit, weil bei Ausfall eines Moduls auf ein größeres Netzwerk betriebsbereiter Module zurückgegriffen werden kann.

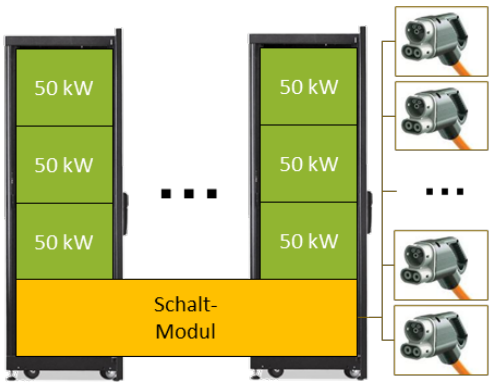


Abbildung 38: Kooperatives Ladesystem (Beispiel) (eigene Darstellung)

Die Begriffe dedizierte und kooperative Systeme sind naturgemäß nicht klar voneinander zu trennen. Eine weitere Erhöhung des Kooperationsgrades wird insbesondere softwaretechnisch erreicht, indem zum Beispiel die Ladevorgänge in jeder Systeminstanz übergeordnet gesteuert und aufeinander abgestimmt werden, um die Netzlast zu optimieren.

Wichtigkeit kleiner Modulgrößen im Systemverbund

Wie aus den vorangestellten Beschreibungen deutlich wird, haben kleine Modulgrößen in Verbindung mit möglichst kooperativen Systemen deutliche Vorteile in Bezug auf Systemauslegung, Anlagenausnutzungsgrad (bzw. geringere Systemkosten) und Wartung. Im typischen Lastverlauf einer Flottenladung können Modulgrößen von ca. 50 kW auf den ersten Blick ausreichend fein sein, um die erwarteten Mehrwerte zu erzielen.

[8] In der Praxis kann in der Regel eine Ladeinfrastruktur mit 40-50 % der Leistung einer Ladeinfrastruktur umgesetzt werden, die für eine Ladesäule ohne Modularität und Kooperationsfähigkeit erforderlich wäre. Das Kosteneinsparpotenzial ist von diversen Einflussfaktoren (Hersteller, genaue Ausführung, Sondermaßnahmen) abhängig, sollte aber in erster Näherung proportional zur implementierten Leistungselektronik sein.

In diesem Kontext wird jedoch häufig vernachlässigt, dass es durchaus relevante Lastanforderungen mit wesentlich kleineren Leistungswerten gibt. Betont werden soll hier insbesondere das sogenannte Vorkonditionieren, also das elektrische Vorheizen der Fahrzeuge vor Betriebsbeginn, um diesen Energieaufwand nicht aus der Traktionsbatterie während der Fahrt decken zu müssen. Dabei liegt ein sehr geringer Leistungsbezug (≈ 20 kW) über 30 bis 60 Minuten an. In vielen Fällen können sich Ladevorgänge und Vorkonditionierungen überschneiden, was zu Problemen führen kann. Bei großen Modulgrößen muss ein komplettes Modul für die Vorkonditionierung verwendet werden, weshalb dessen Leistung nicht für einen parallelen Ladevorgang nutzbar ist. Alternativ kann das Ladesystem insgesamt überdimensioniert werden, oder Vorkonditionierungen müssen bei entsprechenden Konflikten übersprungen werden, wenn ansonsten die rechtzeitige Ladung eines Fahrzeugs gefährdet ist.

Es gilt zu berücksichtigen, dass Leistungsmodule immer vollständig einem Ladepunkt zugeordnet werden müssen. Auch bei sehr geringen Leistungen wird ein Lademodul vollständig blockiert. Die Auswirkung dessen wird über ein Rechenbeispiel deutlich.

Betrachtet werden zwei Systeme mit 300 kW Systemleistung und mindestens vier Ladeschnittstellen an dem im Beispiel vier Fahrzeuge geladen werden sollen. Im ersten Fall werden 50 kW Module eingesetzt, während im zweiten Fall 25 kW Module eingesetzt werden. Fahrzeugseitig werden in beiden Fällen dieselben Anforderungen gestellt. Zwei Fahrzeuge sollen parallel vorkonditioniert werden (20 kW), ein Fahrzeug ist am Ende seines Ladevorgang mit reduzierter Leistung (60 kW) und ein Fahrzeug soll mit 130 kW geladen werden.

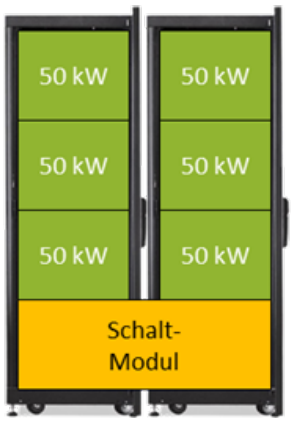
Ladesystem: 6 x 50 kW = 300 kW				Leistungsanforderung Fahrzeug		
Bild	Module	Leistung blockiert		Leistung angefordert	Leistung erhalten	Bus
	50 kW	25 kW	⇔	20 kW	20 kW	Bus 1
	50 kW	50 kW	⇔	20 kW	20 kW	Bus 2
	50 kW 50 kW	100 kW	⇔	60 kW	60 kW	Bus 3
	50 kW 50 kW	100 kW	⇔	130 kW	100 kW	Bus 4

Tabelle 19: Beispielhafter Leistungsbezug Ladesystem mit 50 kW Modulgröße

Im Ansatz mit 50 kW Modulgröße können zwar alle Leistungsanforderungen der ersten drei Busse erfüllt werden, jedoch kann für den letzten Bus nur noch eine Leistung von 100 kW statt 130 kW bereitgestellt werden. Grund hierfür ist die Nutzung aller Module des Ladesystems. In den ersten drei Ladevorgängen sind in Summe 100 kW blockiert, die fahrzeugseitig nicht genutzt werden können. Obwohl nur 200 kW von möglichen 300 kW genutzt werden, muss bereits Ladeleistung reduziert werden.

Im Vergleich mit einem Ladesystem gleicher Gesamtleistung und kleinerer Modulgröße zeigt sich hingegen ein anderes Bild. Für die Vorkonditionierungen mit kleiner Leistung muss jeweils nur ein Modul blockiert werden. Für die ersten drei Busse werden lediglich in Summe 25 kW (ungenutzt) blockiert, die fahrzeugseitig nicht verwertet werden können. Entsprechend kann der vierte Bus die volle Ladeleistung von 130 kW abrufen. Bei Bedarf können sogar 150 kW abgerufen werden, ohne auf das letzte noch freie 25 kW Modul zurückgreifen zu müssen. In Summe können hier die angeforderten 230 kW Ladeleistung erfüllt werden, wobei sogar eine Leistungsreserve von 25 kW frei verfügbar bleibt.

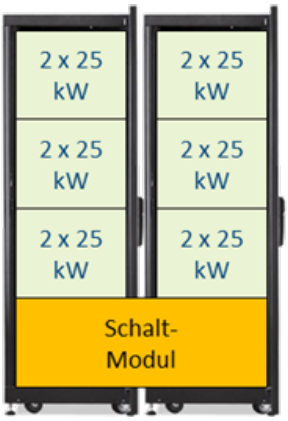
Ladesystem: 12 x 25 kW = 300 kW				Leistungsanforderung Fahrzeug		
Bild	Module	Leistung blockiert		Leistung angefordert	Leistung erhalten	Bus
	25 kW	25 kW	⇔	20 kW	20 kW	Bus 1
	25 kW	25 kW	⇔	20 kW	20 kW	Bus 2
	25 kW	75 kW	⇔	60 kW	60 kW	Bus 3
	25 kW					
	25 kW					
	25 kW	150 kW	⇔			Bus 4
	25 kW					
	25 kW					
	25 kW					
	25 kW					
	25 kW	frei		25 kW Reserve		

Tabelle 20: Beispielhafter Leistungsbezug Ladesystem mit 25 kW Modulgröße

Die Modulgröße sollte in jedem Fall so klein wie möglich gewählt werden. Dies bezieht sich nicht zwingend auf die mechanische Moduleinheit, sondern auf die kleinste praktisch nutzbare Moduleinheit. Es ist durchaus möglich, dass ein 50 kW Modul intern zum Beispiel aus zwei individuellen 25 kW Modulen besteht.

b) Technische Gestaltung Wasserstoff-Tankinfrastruktur

Auch wenn die Empfehlung einer Vorzugstechnologie auf BEV entfällt, sind FCEV eine grundsätzlich realisierbare Alternative, die hier nur kurz umrissen werden soll. Wasserstofftankinfrastruktur ähnelt einer Gastankstelle, wobei verschiedene Ausführungen möglich sind. 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 Niedrigdruck-Hauptspeicher (< 350 bar). Die Schnittstelle zum Fahrzeug wird über eine Speicherkaskade auf mehreren Druckleveln gebildet. Mit steigender Wasserstoffmenge im Fahrzeug steigt der Gegendruck und höhere Drucklevel der Speicherkaskade werden hinzugeschaltet. In der zweiten Variante wird auf eine Speicherkaskade verzichtet. Der Ladespeicher ist als Konstantdruckspeicher ausgeführt, wobei das Drucklevel immer über dem maximalen Gegendruck des Fahrzeugs liegen muss. In der dritten Variante ist der Haupttank als Hochdruckspeicher mit über 350 bar ausgelegt. Bei Bedarf wird das Druckniveau im Tankvorgang über eine nachgeschaltete Kryopumpe erhöht.

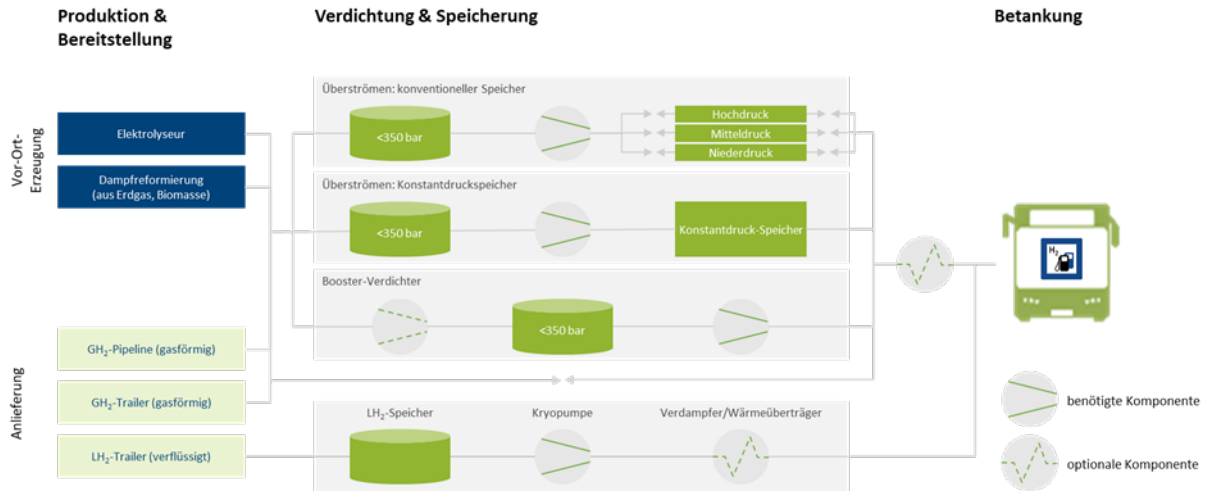


Abbildung 39: Schematischer Aufbau Wasserstoff-Tankstelle (eigene Darstellung)

Der Platzbedarf einer Wasserstofftankstelle geht auf die zu versorgende Fahrzeuganzahl zurück. Aufgrund des Aufbauprinzips müssen die Bauflächen zusammenhängend ausgeführt sein. Die Grundfläche der erforderlichen Speicher- und Steuerungskomponenten liegt bei grob 10 x 30 m für mittlere Flotten, die wiederum um Zapfstellen (Tankplätze mit Dispenser) sowie Anlieferungspunkte für H_2-Trailer ergänzt werden müssen.

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

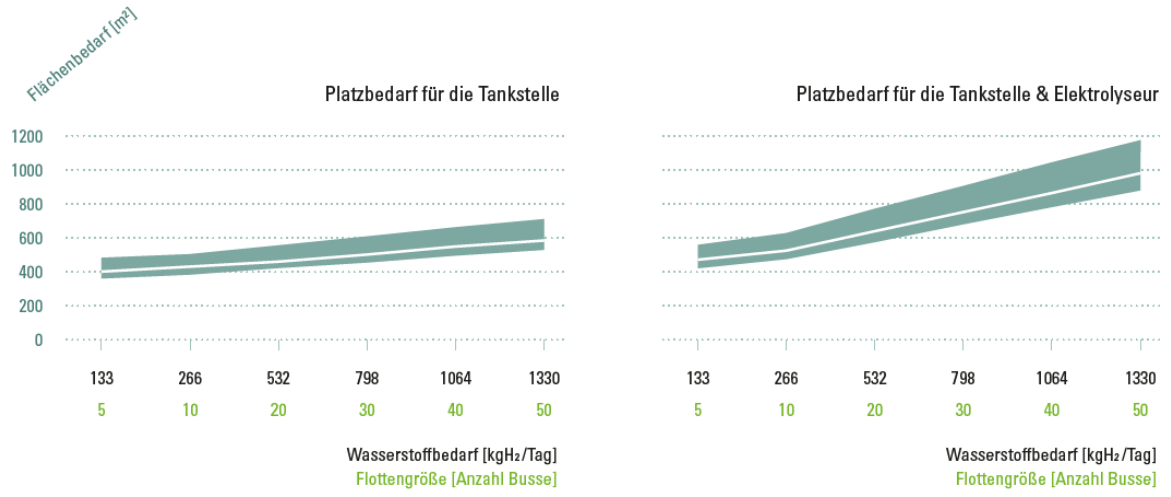


Abbildung 40: Platzbedarf Wasserstoff-Tankstelle im ÖPNV (Bild aus NOW GmbH (2018) „Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV“)

c) Ladeinfrastrukturkonzept

Für das Ladeinfrastrukturkonzept werden Matrix-Ladesysteme entworfen, die über eine Modulgröße von maximal 50 kW verfügen (ideal sind 25 kW). Verschaltungsmodule werden in drei Varianten berücksichtigt mit zwei, vier oder acht angebundenen Ladepunkten pro Systemeinheit.

Für die Auslegung wird eine Reserveflotte von 20 % pro Fahrzeugtyp gegenüber der berechneten Einsatzflotte angesetzt. Für größere Reserveflotten muss das Infrastrukturkonzept erweitert werden. Da die Reserveflotte (stehend) keinen Ladebedarf auslöst, können die Systeme unproblematisch erweitert werden.

Ladeinfrastrukturkonzepte pro Betriebshof

Auf den folgenden Seiten sind die Vorschläge für Ladeinfrastrukturkonzepte steckbriefartig aufgeführt, um einen Überblick über die Randbedingungen und Systemvarianten zu vermitteln.

Einleitend werden die betriebshofspezifischen Randbedingungen aufgeführt, die auf die eingesetzte Fahrzeugflotte und deren Einsatzprofile zurückgehen. Die eingangs in diesem Kapitel ausgeführte Lastgangoptimierung stellt eine Art Bindeglied zwischen der Umlaufuntersuchung und dem Infrastrukturkonzept dar. Relevant für die Auslegung des Ladesystems sind hier insbesondere die resultierende Lastspitze als Grundlage für die Dimensionierung des Netzanschlusses (MS/NS Transformator) sowie die maximale Anzahl gleichzeitig ladender Fahrzeuge.

Selbstverständlich sind in der Systemauslegung Sicherheitsfaktoren berücksichtigt, um ein Abweichen vom geplanten Betriebsablauf (z. B. Verspätungen) infrastrukturseitig kompensieren zu können.

Im unteren Teil der Steckbriefe sind ein oder zwei Systemvarianten aufgeführt, die auf die in diesem Kapitel beschriebene Systembeschreibung zurückgehen. Angegeben sind die Systemmerkmale Leistungsklasse sowie Anzahl der angebundenen Ladeschnittstellen pro Systemeinheit. Ergänzend ist die Anzahl der erforderlichen Systemeinheiten („Instanzen“) pro Variante neben den zugeordneten Fahrzeugtypen aufgeführt.

Wichtig ist, dass mehrere Systemvarianten nicht ersatzweise, sondern gemeinsam gelten. Abhängig von Lastanforderung und Fahrzeuganzahl kann die Installation von zwei verschiedenen Systemvarianten sinnvoll sein, um beispielsweise eine Überdimensionierung zu vermeiden. Teil des Konzeptes ist die Integration aller aufgeführten Systemvarianten in den Betriebshof mit Hinblick auf eine vollständige Flottenumstellung.

BH Mittweida

Randbedingungen

- Max. Ladeleistung pro Bus: 130 kW
  - Ausnahme Kleinbus: 80 kW
- Lastspitze nach Optimierung: 668 kVA
- Max. Anzahl gleichzeitiger Ladungen: 5
- Einsatzflotte + Reserve (≈20%)
  - Solobus 12m (SL12): 13 + 3
  - Solobus 15m (SL15): 6 + 1
  - Gelenkbus (GL): 1 + 1
  - Midibus (MI): 4 + 1
  - Kleinbus (KB): 5 + 1
- Empfohlener MS/NS Transformator: 1.250 kVA

Systemvariante 1:

- Anzahl Instanzen des Systems: 4
- Zugeordnete Fahrzeugtypen: SL12, SL15, GL, MI
- Systemleistung pro Instanz: 400 kW
- Anzahl Ladepunkte pro Instanz: 8

Systemvariante 2:

- Anzahl Instanzen des Systems: 1
- Zugeordnete Fahrzeugtypen: KB
- Systemleistung pro Instanz: 200 kW
- Anzahl Ladepunkte pro Instanz: 8

BH Hartmannsdorf

Randbedingungen

- Max. Ladeleistung pro Bus: 130 kW
  - Ausnahme Kleinbus: 80 kW
- Lastspitze nach Optimierung: 722 kVA
- Max. Anzahl gleichzeitiger Ladungen: 5
- Einsatzflotte + Reserve (≈20%)
  - Solobus 12m (SL12): 22 + 4
  - Solobus 15m (SL15): 1 + 1
  - Midibus (MI): 2 + 1
  - Kleinbus (KB): 3 + 1
- Empfohlener MS/NS Transformator: 1.250 kVA

Systemvariante 1:

- Anzahl Instanzen des Systems: 4
- Zugeordnete Fahrzeugtypen: SL12, SL15, MI
- Systemleistung pro Instanz: 400 kW
- Anzahl Ladepunkte pro Instanz: 8

Systemvariante 2:

- Anzahl Instanzen des Systems: 1
- Zugeordnete Fahrzeugtypen: KB
- Systemleistung pro Instanz: 200 kW
- Anzahl Ladepunkte pro Instanz: 4

3. Betriebshofintegration

a) Integrationskonzepte

Im Rahmen der Untersuchung wurde der Betriebshof Mittweida besichtigt und auf typische Herausforderungen wie Durchfahrtshöhen oder Parkabstände geprüft. Es konnten keine Herausforderungen identifiziert werden, die gegen eine Umsetzung des nachfolgenden Konzepts sprechen. Dennoch gilt die Einschränkung, dass hier eine Grobkonzeptionierung im Rahmen einer Machbarkeitsstudie ausgeführt wird. Vor Realisierung ist eine Detailplanung unter Einbeziehung eines Bauplaners oder Architekten unerlässlich.

Für den Betriebshof Hartmannsdorf wird auf ein aktuelles Neubauplanungskonzept zurückgegriffen, dass nach Kundenvorgabe angepasst wurde. Eine Besichtigung vor Ort ist nicht möglich, da sich der Betriebshof aktuell in Planung befindet.

Betriebshof Mittweida

Der Betriebshof Mittweida kann gut um Ladeinfrastruktur erweitert werden. Um ausreichende Lademöglichkeiten für die Einsatzflotte (zuzüglich 20 % Reserveflotte) vorzusehen, muss nur auf einen Teil der vorhandenen Stellplätze zurückgegriffen werden.

Abbildung 41: Integrationskonzept Betriebshof Mittweida (eigene Darstellung)

Die Fahrzeugabstellung wird auf drei Bereiche konzentriert, um den Infrastrukturausbau lokal zu begrenzen. Dabei wird auf überdachte Abstellungen zurückgegriffen. Im vorhandenen Busport im nord-westlichen Bereich des Geländes können Stellplätze für 14 Elektrobusse realisiert werden, die maximal 15 m lang sein können. Zugeordnet sind hier möglichst viele Solobusse in 12 m Ausführung, um ein rückwärtiges Verlassen der Stellplätze mit langen Fahrzeugtypen (>12m) nach Möglichkeit zu vermeiden. Grundsätzlich ist es auch denkbar, hier verstärkt Midi- und Kleinbusse zu platzieren, um das Unfallrisiko weiter zu reduzieren.

Die kleine Abstellhalle kann mit zwei Gelenkbussen und zwei Solobussen in 15 m Ausführung belegt werden. Alle weiteren Fahrzeuge können in der großen Abstellhalle geparkt werden, ohne deren Kapazitäten voll auszuschöpfen[9]. Denkbar wäre der Verzicht auf eine Abstellspur, um Fluchtwege nachzurüsten oder die Stellflächen werden als Ausbaupotenzial beibehalten.

Für die Platzierung der Ladeinfrastruktur liegen großzügige Bauräume vor, die hier exemplarisch ausgewählt werden. Ähnliches gilt für den Havarieplatz, der an verschiedenen Stellen im Depot vorgesehen werden könnte. Dabei gilt es zu beachten, dass die Fläche auch einer Doppelnutzung zugewiesen werden kann, wenn eine Räumung im Bedarfsfall kurzfristig möglich ist. Die Platzierung erfolgt hier außerhalb des Kernbereichs an der Grundstücksgrenze.

In Summe bleiben alle Freiabstellungen erhalten. Diese können entweder für konventionelle Fahrzeuge genutzt werden, oder langfristig ebenfalls um Ladeinfrastruktur erweitert werden.

Betriebshof Hartmannsdorf

Das Betriebshofkonzept Hartmannsdorf basiert weitestgehend auf zur Verfügung gestellten Planungsunterlagen, die nach Möglichkeit beibehalten wurden. Im roten Kasten sind Änderungsvorgaben markiert, die kundenseitig für die Konzeptionierung vorgegeben wurden. Dabei wird ein Teil des Stellplatzbereiches für Solobusse in einen Werkstattbereich mit angrenzender Abstellung für Gelenkbusse umgewidmet.

Erwartungsgemäß kann in das Plankonzept elektrische Ladeinfrastruktur unproblematisch integriert werden. Bauräume für Ladeinfrastruktur sind auch hier großzügig vorhanden, wofür insbesondere das Konzept der Schrägabstellung hilfreich ist. An den Stirnseiten der Abstellfelder liegen nutzbare Bereiche für die Installation von Baugruppen vor. Hier empfiehlt sich eine mechanische Absicherung gegen Kollisionen, die beispielsweise über Bordsteine oder Begrenzungsmasten ausgeführt werden können.

[9] Im Abstellkonzept sind Midi- und Kleinbusse zusammengefasst in Stellplätze für Fahrzeuge bis 10 m. Eine differenzierte (typenreine Aufstellung) ist unproblematisch realisierbar, indem drei der sechs Spuren exklusiv für Midibusse genutzt werden.

Aus ähnlich gelagerten Projekten liegen Kundenrückmeldungen vor, die ein rückwärtiges Ausfahren mit Gelenkbussen, wie im südlichen Stellplatzbereich, als kritisch bewerten.

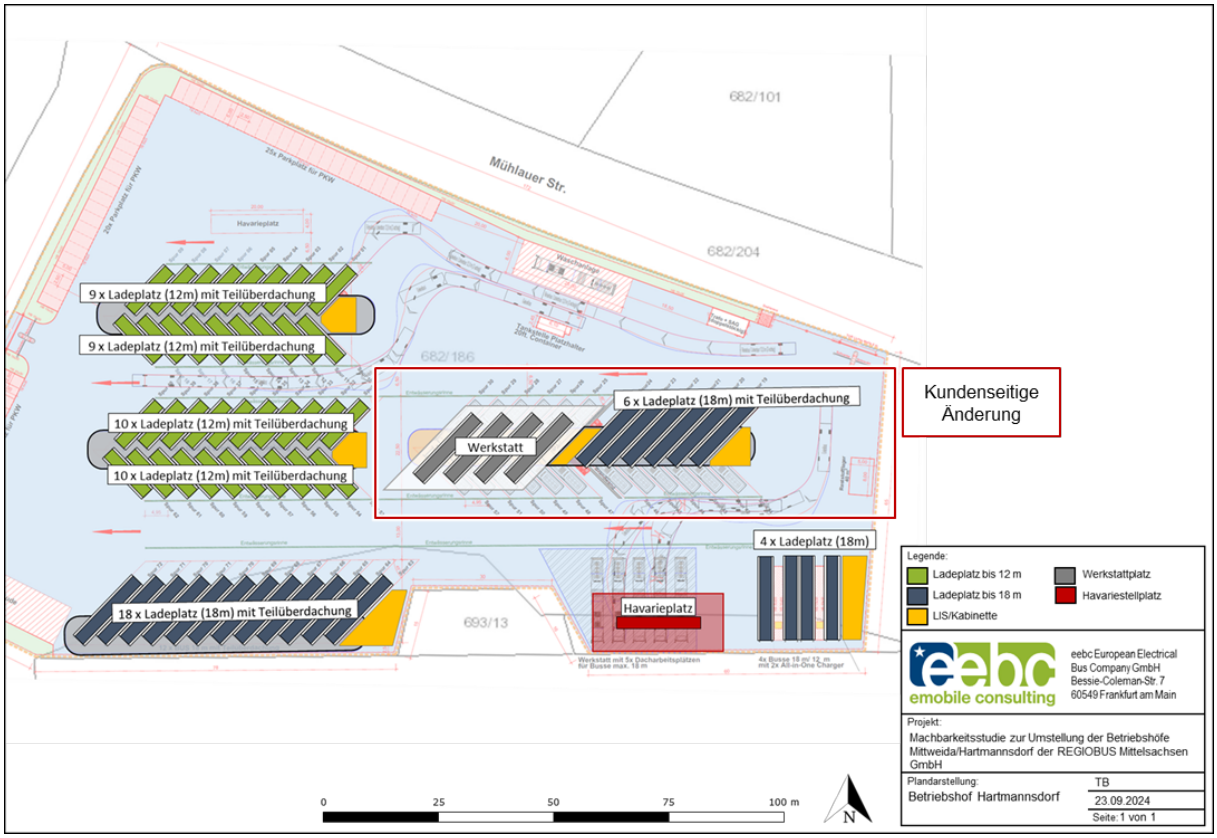


Abbildung 42: Integrationskonzept Betriebshof Hartmannsdorf (eigene Darstellung)

Im Sinne eines Gestaltungsimpulses soll das Thema hier kurz aufgegriffen werden, um eine mögliche Abstellvariante zu umreißen. Wie im folgenden Bildausschnitt dargestellt, scheint es möglich, rückwärtiges Ausparken für Gelenkbusse zu vermeiden. Für Solobusse muss die Kopfabstellung weiterhin verfolgt werden, was jedoch mit einem geringeren Unfallrisiko eingeschätzt wird als im Ansatz mit Gelenkbussen in Kopfabstellung.

Die Platzverhältnisse scheinen ausreichend, um die Gelenkfahrzeuge im mittleren Bereich des Depots zu stationieren und ein Abstellkonzept mit Durchfahrung zu ermöglichen. An den Hallenwänden der Werkstatt können ausreichende Bauflächen für Ladeinfrastrukturkomponenten freigehalten werden. Im südlichen Geländebereich werden in Kopfabstellung lediglich Fahrzeuge mit starrer Karosserie vorgesehen.

Um die Einfahrt in die Gelenkbusabstellung gut zu ermöglichen, scheint eine Rotation des nördlichen Parkfeldes für Solobusse im Uhrzeigersinn erforderlich. Die Platzreserven für einen Versatz nach Norden scheinen ausreichend.

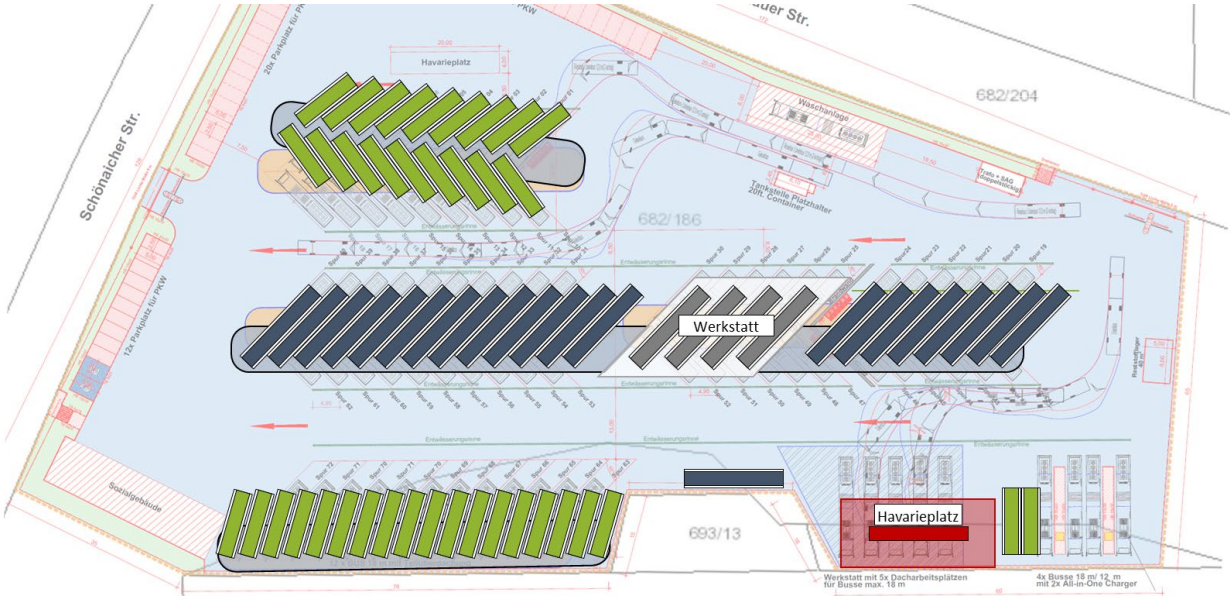


Abbildung 43: Mögliche Abstellalternative Depot Hartmannsdorf (eigene Darstellung)

Im Detail zu prüfen (Schleppkurven) sind die Ausfahrtswege der Gelenkbusse auf den westlichen Stellplätzen. Im Zweifel scheinen am östlichen Rand des Grundstücks ausreichende Platzreserven, um einzelne Gelenkbusse dorthin zu versetzen. In Summe bleiben im süd-östlichen Bereich des Geländes Freiflächen erhalten, die Ausbaupotenzial genutzt werden könnten. Bei Notwendigkeit kann der Havarieplatz auch außerhalb des Betriebshofgeländes vorgesehen werden, was weitere Bauräume frei macht.

b) Schnittstellenausführung

Die oben beschriebenen Konzepte erfordern teils eine platzeffiziente Schnittstellenausführung, um die Ladeinfrastruktur in die teilweise bestehende Abstellung zu integrieren.

Für Kopfabstellungen (rückwärtiges Verlassen des Ladeplatzes) bietet sich grundsätzlich der Einsatz von Ladesatelliten mit dualer Ladeschnittstelle an. Die Bauform entspricht einer schlanken Ladesäule, die im Wesentlichen als Ordnungssystem und Visualisierung (Display bei Bedarf) dient.

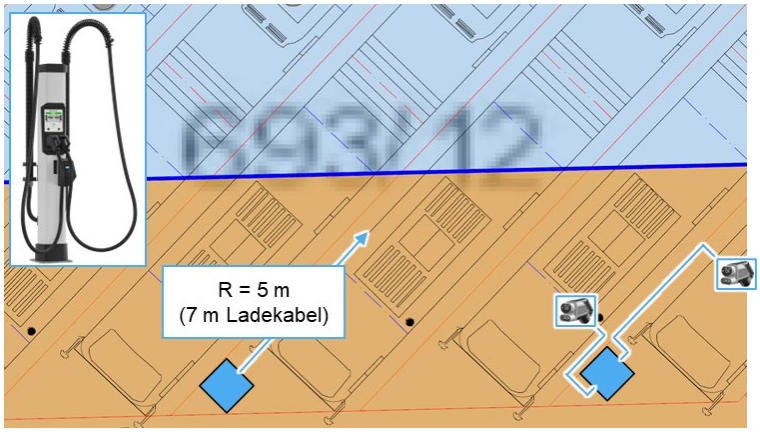


Abbildung 44: Ladesatelliten (Fa. Kempower) bei Kopfabstellung (eigene Darstellung)

Wie aus Abbildung 57 ersichtlich wird, liegt die Vorderachse auch bei Schrägabstellung innerhalb eines 5 m Radius um den Ladesatellit. Die dort platzierte Ladebuchse (Marktstandard) kann gut mit marktüblichen Ladekabellängen erreicht werden. Sinnvoll erscheint hier der Einsatz von Ladekabeln mit mindestens 7 m Länge, um ein Auslegen des Kabels auf dem Boden ohne Stolperfallen zu ermöglichen. Entsprechendes gilt auch bei Abstellung im 90° Winkel, wenn der Ladesatellit mittig vor der Front zweier Fahrzeuge platziert wird. Um das Ladekonzept zu realisieren, ist eine beidseitige Ladebusche an den Fahrzeugen erforderlich, da die Zuführung des Ladesteckers im Wechsel von links und von rechts erfolgt.

Bei Abstellungen mit Durchfahrung (zum Beispiel innerhalb der Abstellhallen) erscheint die Schnittstellenzuführung von oben sinnvoll. Über Kabelabrollsysteme, wie in Abbildung 58 exemplarisch dargestellt, kann das Ladekabel bei Bedarf von oben abgesenkt werden. Bei Nichtbenutzung werden Ladekabel und Ladestecker außerhalb der Fahrwege – ohne Kollisionsrisiko – gelagert.

Abbildung 45: ChargingReel Kabelabroller (Bild: Fa. Stemmann Technik)

Offensichtlich erfordert die Kabelzuführung von oben ein geeignetes Tragwerk für Schnittstellen und Anschlusskabel. In den hier verfolgten Konzepten können hierfür die Hallendecken oder

Überdachungen der Busports genutzt werden. Bei nicht vorhandenen, oder nicht tragfähigen, Oberkonstruktionen kann entweder ein Tragwerk nachgerüstet werden (Stahlkonstruktion, bei Bedarf auch freistehend) oder es wird ebenfalls auf Ladesatelliten zurückgegriffen. Im zweiten Fall muss berücksichtigt werden, dass ein zusätzlicher Platzbedarf zwischen zwei Doppelspuren vorliegt, um den Ladesatellit inklusive Rammschutz zu installieren.

c) Stufenweiser Systemausbau

Elektrische Ladesysteme sind sehr gut für einen schrittweisen Systemausbau geeignet. Im Gegensatz dazu sind die Optionen bei H_2 Tankinfrastruktur begrenzt, da die Tankanlagen als funktionsfähige Gesamteinheit aufgebaut werden müssen. Üblicherweise wird bei kleinen und mittleren Flotten, wie im Anwendungsfall, die Tankinfrastruktur vor Beginn der Flottenumstellung bereits vollständig aufgebaut. Erst bei sehr großen Flotten kann eine schrittweise Erweiterung der Tankanalage sinnvoll sein.

Für elektrische Ladeinfrastrukturen begrenzen die vorbereitenden Baumaßnahmen die Freiheitsgrade beim Systemausbau. Grundsätzlich ist es zwar denkbar, den Systemausbau feinteilig am Beschaffungsplan auszurichten, allerdings führen wiederholte Baumaßnahmen zu langfristigen Störungen im Betriebsablauf.

Es erscheint sinnvoll, die vorbereitenden Baumaßnahmen für den bestehenden Betriebshof Mittweida lokal zu isolieren. Beispielsweise zeitlich getrennte bauliche Vorbereitungen für den Busport im nord-westlichen Bereich des Grundstücks und die Abstellhallen. Abhängig vom Beschaffungsplan kann die Ausführung in den Abstellhallen auch weiter aufgeteilt werden, indem beispielsweise in zwei Einzelabschnitten jeweils die Hälfte der Spuren baulich vorbereitet wird.

Der baulichen Vorbereitung werden insbesondere Tiefbaumaßnahmen zugeordnet. Aufgrund der eingesetzten Maschinen und Art der Maßnahmen (z. B. Öffnung der Fahrbahnbeläge für unterirdische Kabelwege) sind ehebliche Beeinträchtigungen im Betriebsablauf zu erwarten, die konzentriert ausgeführt werden sollten. Teil der vorbereitenden Baumaßnahmen sind beispielsweise:

- Grundsätzliche bauliche Anpassungen wie Anfahrschutz, geänderte Spurausführung oder Fahrwege
- Gießen oder Setzen von Fundamenten für Ladeinfrastruktur, Transformatoren und vergleichbares
- Installation von Tragwerken, Kabeltrassen und Montagepunkten für Ladeschnittstellen
- Verlegung von Leerrohren oder Kabeln (vorbereitend)

Für den Betriebshof Hartmannsdorf (Neubau) wird angenommen, dass die vorbereitenden Baumaßnahmen für Ladeinfrastruktur im Zuge des Neubaus bereits erfolgen.

Bei vorhandener baulicher Vorbereitung ist es sinnvoll, die Ausbauschrittweite an den Ladeinfrastruktureinheiten zu orientieren, die systemabhängig für bis zu 8 Fahrzeuge ausgelegt sind. Um die Aufwendungen für Monteursleistungen überschaubar zu halten, bietet es sich an, zumindest die Ladeinfrastruktur im Schaltschrank (außerhalb des Stellplatzbereiches) vollständig für die gesamte Ladeinfrastruktureinheit auszuführen. Eine Teilbestückung ist zwar grundsätzlich möglich, wird üblicherweise jedoch nicht verfolgt.

Der Endausbau kann pro beschafftem Fahrzeug erfolgen. Dem Endausbau zugeordnet sind beispielsweise die Installation der Ladeschnittstelle sowie Inbetriebnahme und Parametrierung der Softwaresysteme.

4. Jahresenergiebedarf

Zur Berechnung des Jahresenergiebedarf wird von der bisherigen Worst-Case Betrachtung abgewichen, indem mittlere Verbrauchswerte für die Nebenverbraucherleistungen berücksichtigt werden. Diese entsprechen einem typischen mittleren Verbrauchswert für das gesamte Kalenderjahr.

Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass die Prognose von ganzjährigen Energiemengen naturgemäß fehlerbehaftet ist. Während im Rahmen der Machbarkeitsbetrachtung ausreichend hoch angesetzte Worst-Case Werte für eine valide Bewertung tragfähig sind, fließen in die Berechnung von Jahresenergiewerten diverse nicht abschätzbare Faktoren ein. Beispielsweise wird der Bedarf an Energie für die Fahrzeugklimatisierung von den Umgebungsbedingungen (Wetter) beeinflusst. Darüber hinaus hat das Fahrerverhalten einen großen Einfluss auf die umgesetzt Energiemenge. Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass mit adäquaten Fahrerschulungen Energieverbrauchseinsparungen in Höhe von 10 % üblicherweise gut erreicht werden.

Für eine vollständig auf batterieelektrische Fahrzeuge umgerüstete Fahrzeugflotte im aktuellen Umlaufplan wird ein Gesamtenergiebedarf von ca. 4.400 MWh abgeschätzt. Die Differenzierung in Standorte und Fahrzeugtypen kann der folgenden Tabelle entnommen werden.

Betriebshof	Solobus (12 m)	Solobus (15 m)	Gelenkbus	Midibus	Kleinbus	Gesamt
Mittweida	1.151 MWh	599 MWh	45 MWh	269 MWh	154 MWh	2.218 MWh
Hartmannsdorf	1.985 MWh	14 MWh	0 MWh	155 MWh	72 MWh	2.227 MWh
Summe	**3.137 MWh**	**612 MWh**	**45 MWh**	**424 MWh**	**227 MWh**	**4.445 MWh**

Tabelle 21: Jahresenergiebedarf Vollumstellung BEV

Der Vollständigkeit halber sind hier folgend auch die Verbrauchswerte für eine vollständig auf Wasserstoffbusse umgestellte Flotte dargestellt. Dabei sind die Verbrauchswerte auch für Fahrzeugtypen bestimmt, die nicht am Markt vertreten sind[10].

Vielfach wird der Einsatz von Wasserstofftechnik diskutiert, wenn eine Versorgung mit elektrischer Energie nicht im ausreichenden Maß möglich ist. Praktisch wird die Antriebstechnologie als mögliche Alternative zu einem Netzausbau in Fokus gestellt. Dabei wird jedoch vielfach vernachlässigt, dass die Versorgung mit dem Energieträger Wasserstoff eine logistische Herausforderung darstellen kann. Der berechnete Jahresverbrauch von ca. 286 t H_2 pro Jahr entspricht im Durchschnitt einer Anlieferung von 1,6 marktüblichen Lkw-Trailern mit 500 kg Fassungsvermögen pro Kalendertag.

Betriebshof	Solobus (12 m)	Solobus (15 m)	Gelenkbus	Midibus	Kleinbus	Gesamt
Mittweida	74,1 t H_2	38,6 t H_2	2,9 t H_2	17,2 t H_2	9,9 t H_2	142,7 t H_2
Hartmannsdorf	127,7 t H_2	0,9 t H_2	0 t H_2	10,0 t H_2	4,6 t H_2	143,2 t H_2
Summe	**201,9 t H_2**	**39,5 t H_2**	**2,9 t H_2**	**27,2 t H_2**	**14,4 t H_2**	**285,9 t H_2**

Tabelle 22: Jahresenergiebedarf Vollumstellung FCEV

[10] Die Verbrauchswerte können auch ohne Marktangebot gut über die physikalischen Rahmenbedingungen hergeleitet werden. Im Kontext der Machbarkeitsbewertung fehlt jedoch ein Referenzwert für die im Fahrzeug verbauten Speicher, um diese für Machbarkeitsbewertungen dem Verbrauch gegenüberzustellen

III. Weitere betriebliche Anforderungen

1. Lademanagementsysteme

Wie anhand der dargestellten Lastgangoptimierungen ersichtlich ist, sind entsprechende Managementsysteme bereits für sehr kleine Flotten sinnvoll und sollten für eine Ladeinfrastruktur vorgesehen werden.

Das Lademanagementsystem steht über die Ladeschnittstelle auf einer physikalischen Ebene in Verbindung mit den angebundenen 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, die Fahrzeuge werden hier über die Schnittstelle von der Ladeinfrastruktur entsprechend informiert.

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 vergleichbares, abzudecken.

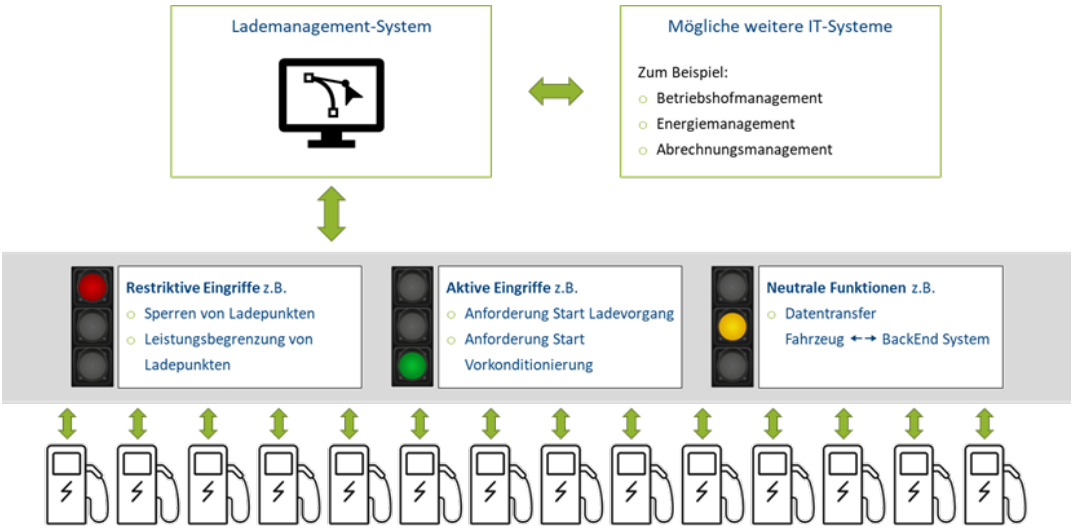


Abbildung 46: Lademanagementsystem Informationsebene (eigene Darstellung)

Lademanagementsysteme können diverse Funktionen übernehmen, die für den Anwendungsfall nicht relevant sind. Der Übergang von Lade- zu Betriebshofmanagementsystemen ist fließend und nicht klar definiert. Zwecks besserer Verständlichkeit wurden hier Kategorien eingeführt, um die Performance verschiedener Lademanagementsysteme voneinander abzugrenzen.

Die einfachste Kategorie für Lademanagementsysteme wird im Rahmen dieser Untersuchung als Ladeplan bezeichnet. Grundlage sind fest definierte Vorgaben und Zeitpunkte, an denen eine Funktion ausgeführt wird. Die Routinen werden auf einen überschaubaren Infrastrukturumfang begrenzt und bei größeren Gesamtsystemen mehrfach parallel ausgeführt. Mögliche Triggerpunkte, bei denen eine Funktion ausgeführt oder gewechselt wird, sind zum Beispiel Beendigungen von Ladevorgängen oder feste Zeitintervalle. Bei einem Triggerevent kann beispielsweise ein neuer Leistungswert vorgegeben werden, ein Ladepunkt gesperrt oder freigegeben werden. Der Ansatz ist am ehesten mit einer Steuerung im Feld der Regelungstechnik vergleichbar. Primär erfolgt die Steuerung hier abhängig von der Zeitachse.

Darüber hinaus sind der Funktion von Lademanagementsystemen wenig Grenzen gesetzt. In höheren Evolutionsstufen werden eine Vielzahl von Einflussfaktoren ausgewertet, um eine ständige Optimierung des Ladeplans auszuführen. Entsprechende Systeme sind zum Teil mit verhältnismäßig hohen Kosten verbunden und müssen anwendungsspezifisch erstellt oder parametriert werden, je nachdem welche Funktionen umgesetzt werden. Ein fiktives komplexes Lademanagementsystem kann die Ladeabläufe beispielsweise in Abhängigkeit der aktuellen Batteriezustände planen. Dafür kann das System über das ITCS-System auf die Speicherstände der Busse auf Linie zugreifen, um die erwartete Ladung bei Ankunft zu prognostizieren, Ladeplätze dafür gezielt zuzuweisen und gleichzeitig die Lastkurve in Abhängigkeit von Energie-Spotmarktpreisen oder lokalen PV-Anlagen zu steuern. Entsprechende Systeme erfordern eine Vielzahl an Schnittstellen zu weiteren IT-Systemen und werden nach Stand der Technik als aufwändig bewertet. Für Großunternehmen mag der Nutzen dem Aufwand überwiegen. Für die vergleichsweise kleinen Depots im Rahmen der Untersuchung werden derartige Ansätze als überdimensioniert bewertet.

Für die Betriebshöfe Mittweida und Hartmannsdorf scheint ein Lademanagementsystem mit überschaubaren Funktionsumfang sinnvoll. Das Kernziel ist hier die Optimierung des Lastverlaufes, um eine möglichst homogene Kurve ohne ausgeprägte Lastpeaks zu erreichen.

Grundsätzlich können Managementsysteme auch eine Ebene höher angesiedelt werden und ergänzend zu den Funktionen eines Lademanagementsystems weitere Funktionen übernehmen, die beispielsweise dem Energiemanagement zugeordnet sind oder bereits vorhandene Funktionen (z. B. Fahrzeugdisposition) übernehmen. Diese Ansätze erscheinen in Anbetracht der mittleren Flottengröße jedoch im Gegensatz zum Lademanagement als optional.

2. Planungsbedarf

Für die Betriebshofumstellung müssen die hier auf Konzeptebene ausgeführten Planungsansätze bauingenieurstechnisch validiert werden. Dies bezieht sich sowohl auf bauliche Maßnahmen und eine eingehende Expertenprüfung der vorhandenen Bausubstanz als auch auf detaillierte Ausführungsplanungen.

Beispielsweise muss im Rahmen einer Elektroplanung im Detail festgelegt werden, wo Komponenten platziert werden, wie Leitungswege effizient und wirtschaftlich ausgeführt werden und welche Komponenten im Detail eingesetzt werden. Dies erfolgt sinnvollerweise in enger Abstimmung mit Experten aus dem Bausektor, um die baulichen Anforderungen in der Planung zu berücksichtigen.

Sinnvoll erscheint außerdem die Einbindung von Rettungsdiensten (Feuerwehr) in den Planungsprozess, um dem Aspekt Sicherheit einen hohen Stellenwert einzuräumen. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass der vorliegende Untersuchungsgegenstand die Integrationsmöglichkeit von Ladeinfrastruktur in die bestehende Abstellung darstellt. Vielfach werden Umbaumaßnahmen genutzt, um das vorherrschende Flucht- und Rettungswegkonzept zu überprüfen und gegebenenfalls zu optimieren. Auch die Diskussion der geplanten Maßnahmen mit der Versicherung und der Berufsgenossenschaft sollte frühzeitig angegangen werden, um ggf. geforderte Sicherheitskonzepte in einem frühen Stadium der Planungen einfließen zu lassen.

F. AP 5 – Wirtschaftlichkeitsanalyse und Finanzierungsplanung unter Berücksichtigung möglicher Förderungen

I. Vorgehen und Zielsetzung

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 2023 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 rechtssicher 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.

II. 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 mehr als das Doppelte. Darüber hinaus fallen weitere Investitionskosten, unter anderem für die Schaffung der Ladeinfrastruktur, den Umbau des Betriebshofes und der Werkstätten sowie für deren elektrische Ertüchtigung und den Anschluss an das Stromnetz an. Der Umfang des ohnehin schon notwendigen Finanzierungsbedarfs für die Fahrzeuge erhöht sich somit noch weiter.

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

1. Förderprogramme auf Bundesebene

Die Förderung der Elektromobilität im ÖPNV in Deutschland spielt mit Blick auf die Förderlandschaft aktuell eine wichtige Rolle. Sowohl das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nuklearer Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), das Bundesministeriums für Digitales und

Verkehr (BMDV) und ein Zusammenschluss der beiden Bundesministerien für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) und BMUV haben über verschiedene Förderrichtlinien in unterschiedlichen Ausprägungen zur Förderung von Bussen mit elektrischen Antrieben, den notwendigen Ladeinfrastrukturen und Werkstatteinrichtungen aufgerufen. Die folgende Tabelle stellt die jeweiligen Einzelheiten der Förderrichtlinien dar. Die „Förderung der Anschaffung von Elektrobussen im öffentlichen Personennahverkehr“ des BMUV ist zum Ende Dezember 2021 ausgelaufen. Insgesamt werden 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 vorhabensbezogene Richtlinie des und des BMUV „Förderinitiative zur Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität“, die die Programme „Erneuerbar Mobil“ bzw. „Elektro-Mobil“ vereint, fördert gezielt Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Bereich der Elektromobilität in Deutschland und ist für die weiteren Betrachtungen innerhalb dieses Vorhabens nachrangig zu beurteilen. Die Kumulierbarkeit der folgenden Förderungen ist im Einzelfall zu prüfen.

Richtlinie zur Förderung alternativer Antriebe von Bussen im Personennahverkehr

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

Im Detail waren folgende Bestandteile über diese Förderrichtlinie förderfähig:

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

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

2. Förderprogramme auf EU-Ebene

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

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

3. Förderung auf Landesebene

Die Richtlinie Bus (RL Bus) ersetzt die bisherige Richtlinie ÖPNV und legt den Schwerpunkt auf die Förderung klimafreundlicher Busse. Eine finanzielle Unterstützung zur Deckung der antriebsbedingten Mehrkosten ist jedoch nur möglich, wenn ein Antrag auf Förderung durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) nachweislich abgelehnt wurde. Der Fördergeber ist das Landesamt für Straßenbau und Verkehr, und die Förderung erfolgt in Form von Zuschüssen. Insgesamt stehen dafür 55 Millionen Euro zur Verfügung. Die Förderziele umfassen die Verbesserung des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) in Sachsen, die Erhöhung des Anteils sauberer und emissionsfreier Busse sowie die Verringerung von Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor. Hintergrund der Förderung ist, dass in der bisherigen Richtlinie ÖPNV eine spezifische Förderung klimafreundlicher Antriebe fehlte. Zudem besteht durch das Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz ein dringender Handlungsbedarf.

Eine zentrale Voraussetzung für die Förderung ist, dass der ÖPNV verbessert und die Barrierefreiheit berücksichtigt wird. Die Verteilung der Gelder erfolgt künftig über einzelne Förderaufrufe, wobei der erste Förderaufruf bis zum 15. Dezember 2023 lief. Förderberechtigt sind Verkehrsunternehmen, Unterauftragnehmer und kommunale Gebietskörperschaften. Geförderte Fahrzeuge müssen eine Mindestlaufleistung von fünf Jahren im sächsischen ÖPNV erreichen, wobei Omnibusse und Kleinbusse mindestens 400.000 Kilometer und Midibusse mindestens 300.000 Kilometer zurücklegen müssen.

Zu den förderfähigen Fahrzeugen zählen emissionsfreie Fahrzeuge wie batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) und Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV). Auch saubere Fahrzeuge wie Plug-In-Hybride, gasbetriebene Busse, Busse mit Biokraftstoffen und „grünen“ synthetischen Kraftstoffen sowie Dieselbusse (bis Ende 2025 für den ÖPNV im ländlichen Raum) sind förderfähig. Darüber hinaus werden auch Überland- und Bürgerbusse unterstützt.

Weitere förderfähige Inhalte umfassen die zugehörige Infrastruktur für saubere und emissionsfreie Busse, die Nachrüstung von Fahrzeugen sowie allgemein verbessernde technische Ausstattungen oder Nachrüstungen, wie z. B. Maßnahmen zur Digitalisierung oder Barrierefreiheit. Die Förderung umfasst bis zu 30 % der Fahrzeuggrundkosten und deckt Investitionsmehrausgaben für klimafreundliche Antriebe je nach Unternehmensgröße ab: kleine und öDA Unternehmen erhalten 60 %, mittlere Unternehmen 50 % und große Unternehmen 30 % der Kosten. Biogasbetriebene Fahrzeuge werden zu 100 % gefördert. Für Infrastrukturvorgaben und Fahrzeugnachrüstungen werden bis zu 50 % der Kosten übernommen, wobei nicht-öffentliche Infrastruktur für saubere und emissionsfreie Fahrzeuge je nach Unternehmensgröße zu 50 % (kleine und öDA Unternehmen), 40 % (mittlere Unternehmen) und 20 % (große Unternehmen) gefördert wird.

III. Kaufmännische Bewertung der Dekarbonisierung der Flotte der Regiobus

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

1. Zusammenfassung und Fazit Kostenbetrachtung

Hinsichtlich der Vorbereitung einer Technologieentscheidung werden nun die Kosten der beiden untersuchten Antriebsarten gegenübergestellt. Die folgenden Abbildungen stellen die Mehrkosten der Umstellung auf alternative Antriebe dar.

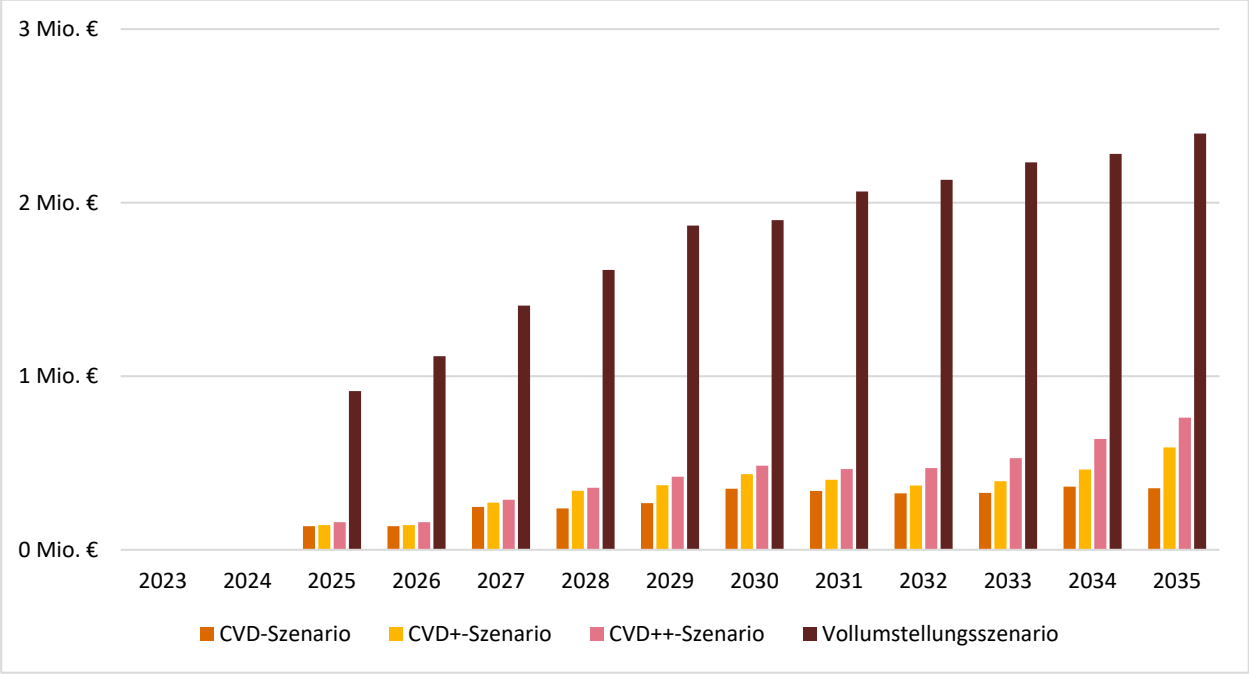


Abbildung 47: Mehrkosten ohne Förderung im Vergleich zum Status quo bis 2035 bei der Regiobus (Batteriebusse) (eigene Darstellung)

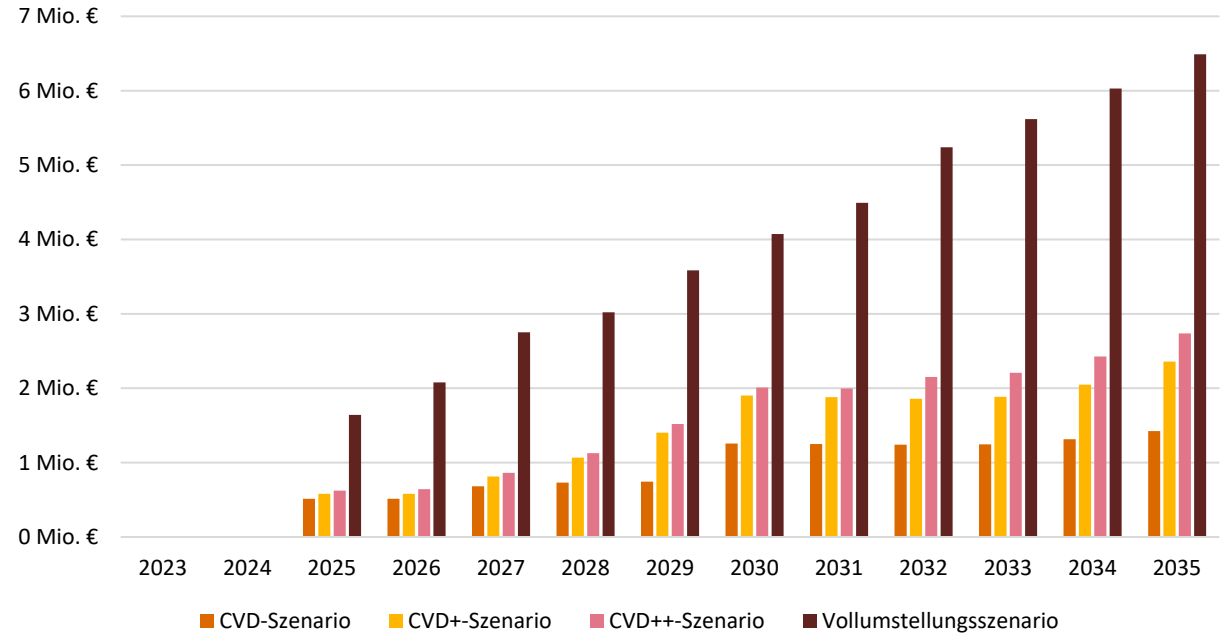


Abbildung 48: Mehrkosten ohne Förderung im Vergleich zum Status quo bis 2035 bei der Regiobus (Brennstoffzellenbusse) (eigene Darstellung)

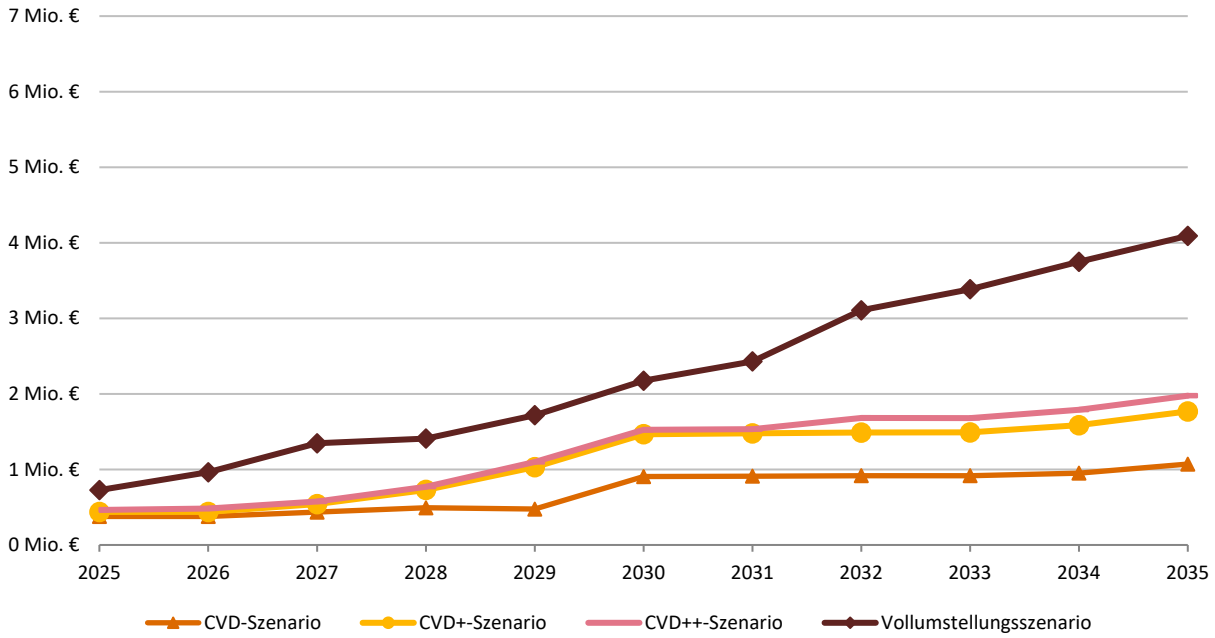


Abbildung 49: Mehrkosten der Umstellung mit Brennstoffzellenbussen gegenüber der Umstellung mit Batteriebussen, Regiobus (eigene Darstellung)

Im Vollumstellungsszenario liegen die Mehrkosten bei Einflottung der ersten Busse im Jahr 2027 bereits bei ca. 1,4 Mio. €. Die Mehrkosten steigen dann deutlich auf etwa 2,2 Mio. € im Jahr 2030 an. Im Jahr 2035 ist die Flottentransformation mit Brennstoffzellenbussen dann etwa 4,1 Mio. € teurer als 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.

G. AP 6 – Ableitung von Handlungsempfehlungen hinsichtlich der zeitlichen, betrieblichen und technologischen Umsetzungsplanung

Diese Machbarkeitsanalyse folgt der übergeordneten Zielsetzung, den Meinungsbildungsprozess hinsichtlich der potenziellen Antriebstechnologien mit Blick auf die zukünftige Ausgestaltung des ÖPNV in Mittelsachsen als wesentliche Diskussionsgrundlage zu flankieren. Im Anschluss an eine kurze Zusammenfassung der Ergebnisse der Analysen wird auf dieser Grundlage eine Empfehlung für eine vorzugswürdige Antriebstechnologie bzw. einen Technologiemix für den ÖPNV der Regiobus Mittelsachsen abgeleitet.

I. Zusammenfassung

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

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

Sowohl bei den Anschaffungskosten für die Fahrzeuge als auch für die notwendige Lade- bzw. Betankungsinfrastruktur ist der Batteriebus in der ganzheitlichen Betrachtung auch kostenseitig vorteilhaft. Mit Blick auf betriebliche Aspekte hat der Brennstoffzellenbus den Vorteil höherer Reichweiten im täglichen Fahrbetrieb. Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Vollumstellung zu einem Fahrzeugmehrbedarf von einem bis vier Fahrzeugen am Standort Mittweida und einem zusätzlich erforderlichen Fahrzeug am Standort Hartmannsdorf führt. Darauf aufbauend ist auch ein Mehrbedarf im Bereich der Fahrpersonale zu erwarten. Auf Grundlage der am Markt verfügbaren

Fahrzeugmodellen wurde bei den FCEV-Szenarien an den beiden Standorten kein Fahrzeugmehrbedarf induziert. Eventuell notwendige Anpassungen an Umläufen und ein zusätzlicher Mehrbedarf an Fahrzeugen fallen hier im Vergleich zum Batteriebus geringer aus. Muss die Infrastruktur zur Wasserstofferzeugung und insbesondere zur Betankung auf dem Betriebsgelände neu errichtet werden, so ist hier im Vergleich zur Ladeinfrastruktur für Batteriebusse ein deutlich höherer Flächenbedarf zu berücksichtigen.

Die Analysen der Machbarkeitsstudie zeigen, dass die Dekarbonisierung des ÖPNV der Regiobus im Sinne der rechtlichen Mindestanforderungen aus der Clean Vehicles Directive grundsätzlich realisierbar ist. Je nach den lokalen Anforderungen besteht jedoch auch darüber hinaus ein größeres Dekarbonisierungspotenzial.

Die vier erarbeiteten Umstellungsszenarien zeigen verschiedene Migrationspfade zur Einführung von E-Bussen in Mittelsachsen auf. So kann im Vollumstellungsszenario, mit einer ausschließlichen Beschaffung von E-Bussen ab dem Jahr 2025, der Stadtbus-Fuhrpark der Regiobus vollständig elektrifiziert und im Jahr 2042 emissionsfrei betrieben werden. Im CVD-Szenario wird die Flottenumstellung mit dem geringsten Tempo angegangen. Bei der Regiobus wäre die Solobus-Flotte im Jahr 2054 komplett umgestellt. Wobei hierbei zu erwähnen ist, dass höchstwahrscheinlich weitere Regulierungen für eine beschleunigte Umsetzung sorgen werden.

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

Aus wirtschaftlicher Sicht gilt es zu berücksichtigen, dass sich die Förderkulisse für Busse mit alternativen Antrieben in der zweiten Hälfte des laufenden Jahrzehnts verschlechtern dürfte. Auch im Falle einer (temporär noch vorhandenen) Förderung der Investitionsmehrkosten konnte gezeigt werden, dass durch die Dekarbonisierung der ÖPNV in Mittelsachsen grundsätzlich teurer wird. Zwar können durch die anfängliche Fokussierung auf das Depot in Mittweida Synergien bei der Errichtung der notwenigen Lade- bzw. Betankungsinfrastruktur gehoben werden, jedoch sind die dortigen Platzverhältnisse als kritisch zu werten. Im Sinne der Machbarkeit der Dekarbonisierung sind deshalb zukünftig zusätzliche Betriebsflächen für die Regiobus zwingend notwendig. Diese sollten frühzeitig gesichert werden.

II. Empfehlung einer betrieblich und wirtschaftlich vorzugswürdigen Antriebstechnologie für die Regiobus

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Umstellung der Regiobus-Flotte auf alternative Antriebe technisch und betrieblich möglich ist. In Hinblick auf die eingesetzte Technologie wurde

festgestellt, dass sowohl Batterie- als auch Brennstoffzellenbusse für den Betrieb des Regiobus geeignet sind. Um den heutigen Fahrplan mit Batteriebussen abdecken zu können, ist eine Erweiterung des Fuhrparks um zwei bis fünf Fahrzeuge, als bisher aufgrund geringerer Fahrzeugreichweiten und der entsprechenden Ladezeiten notwendig.

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

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

Die Machbarkeitsstudie hat in Kapitel E zudem unterschiedliche Migrationspfade für die Flottentransformation der Regiobus aufgezeigt. Das CVD-Szenario bildet dabei das Mindestmaß an Fahrzeugen mit alternativem Antrieb, die durch die Regiobus einzusetzen sind. Dabei müssen nur für die Erfüllung der „emissionsfrei“-Quote Fahrzeuge mit alternativem Antrieb beschafft werden. Für die Erfüllung der Teilquote von „sauberen“, aber nicht „emissionsfreien“ Fahrzeugen im Sinne der CVD können beispielsweise auch Dieselbusse eingesetzt werden, die alternative Kraftstoffe (z. B. Hydrotreated Vegetable Oil, HVO100) verwenden. Werden jedoch ausreichend „emissionsfreie“ Fahrzeuge eingesetzt, um damit die gesamte „sauber“-Quote zu erfüllen, ist der zusätzliche Einsatz alternativer Kraftstoffe nicht notwendig. Dies senkt auch die Komplexität der Flottentechnologien.

Bei der Auswahl des für die Regiobus passenden Migrationspfades ist insgesamt eine Abwägung zwischen einem höheren Umstellungstempo und den zusätzlichen Kosten durch diese Umstellung vorzunehmen. Im Kapitel E wurde ermittelt, dass der verstärkte Einsatz von Batteriebussen für jeweils höhere Gesamtkosten sorgt. Die einschlägigen Regiobus-Stakeholder müssen daher letztlich entscheiden, wie schnell die Flottentransformation unter Beachtung der Mehrkosten erfolgen soll.

III. Umsetzungsplanung für die Regiobus

Für die Flottentransformation der Regiobus sollte bereits im Jahr 2025 eine Richtungsentscheidung durch die Regiobus und deren Stakeholder getroffen werden, indem entschieden wird, welcher Transformationspfad (bspw. Vollumstellungs- oder CVD-Szenario) eingeschlagen werden soll. Diese Entscheidung bildet zudem auch die Basis für die Vorabbekanntmachung zum neuen öffentlichen Dienstleistungsauftrag, der die Verkehrsleistungen auf dem Gebiet des Landkreis Mittelsachsen ab 2030 regelt. Mit dem positiven Förderbescheid i. H. v. rund 3,8 Mio. € zur Anschaffung von zwölf Standardlinienomnibussen und fünf Midibussen mit batterieelektrischem Antrieb für den Linienverkehr im ÖPNV im Rahmen der RL Bus wurde hierbei bereist der Grundstein für die Implementierung einer batterieelektrischen Antriebstechnologie gelegt. Aufgrund der begrenzten räumlichen Kapazitäten des Betriebshof der Regiobus in Mittweida sollten zudem frühzeitig Fläche für einen weiteren Betriebsstandort, beispielsweise in Hartmannsdorf gesichert werden, damit die Flottentransformation auch langfristig umsetzbar ist.

Abbildung 50: Indikativer Umsetzungspfad der Flottentransformation für die Regiobus (eigene Darstellung)

In den Jahren 2025 und 2026 sollten weitere Detailplanungen zur Einführung der alternativen Antriebe vorgenommen werden. Diese Planungen beinhalten insbesondere die Ausgestaltung der Depots aber auch technische Spezifikationen der Fahrzeuge wie beispielsweise die Ladetechnologie (Stecker oder Pantograph). Um ab dem Jahr 2026 den ersten E-Bus bei der Regiobus einzuflotten, sollte zudem bereits im Jahr 2025 die Ausschreibung der baulichen Leistungen (u. a. Ladeinfrastruktur) initiiert werden. Dafür sind zudem die jeweiligen Lastenhefte zu erstellen, die die zuvor entwickelten Detailplanungen umsetzen. Anschließend ist in den Jahren 2025 und 2026 die Ausschreibung der (ersten) Fahrzeuge durchzuführen.

Im Jahr vor der Einflottung des ersten E-Busses in den Regiobus-Fuhrpark sind die notwendigen Vorarbeiten durchzuführen. Dazu zählen vor allem die Errichtung der notwendigen

Ladeinfrastruktur und die Schulung der Mitarbeiter hinsichtlich der Besonderheiten des E-Bus-Betriebs. Die Mitarbeiterschulungen werden dabei schwerpunktmäßig in den Bereichen Fahrdienst und Instandhaltung durchgeführt, wobei der Schulungsbedarf im Bereich der Werkstatt aufgrund der Einführung von Hochvolttechnologie am höchsten ist.

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

Düsseldorf, den 4. März 2025

PricewaterhouseCoopers GmbH
Wirtschaftsprüfungsgesellschaft

Maximilian Rohs ppa. Hendrik Reinhardt