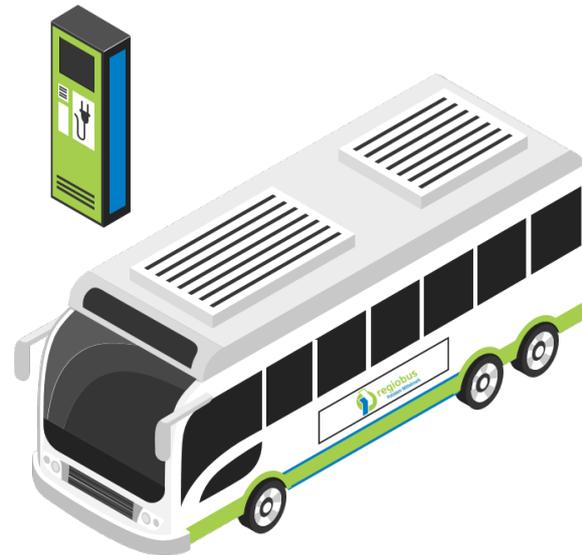


# Bericht

regiobus Potsdam Mittelmark GmbH  
Bad Belzig

Machbarkeitsstudie zur Umstellung auf alternative Antriebe bei der  
regiobus Potsdam Mittelmark GmbH



Auftrag: DEE00120246.1.1

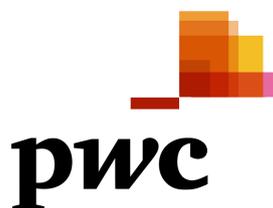


Beauftragt durch:



Bundesministerium  
für Digitales  
und Verkehr

Vergabe und Projektbegleitung durch:





<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
A. Auftrag und Auftragsdurchführung.....	7
B. Hintergrund und Zielsetzung.....	8
I. Ausgangslage .....	8
II. Rechtliche Vorgaben für die Beschaffung sauberer und emissionsfreier Busse.....	9
1. Betroffene Fahrzeugklassen der Clean Vehicles Directive .....	9
2. Anwendungsbereich der Clean Vehicles Directive .....	10
3. Beschaffungsrelevante Vorgaben der Clean Vehicles Directive.....	11
III. Zielsetzung.....	14
C. Technologische Grundlagen .....	16
I. Batterieelektrische Busse .....	18
1. Aufbau batterieelektrischer Busse .....	18
2. Energiespeicher.....	20
II. Brennstoffzellen Fahrzeuge .....	22
1. Aufbau von Brennstoffzellenbussen .....	22
2. Brennstoffzellen-Hybrid-Bus.....	24
III. Emissionsbehaftete Antriebskonzepte für Omnibusse.....	26
1. Diesel-Plug-In-Hybrid-Bus .....	26
2. Erdgas-Bus .....	27
IV. Nebenaggregate vollelektrischer Busse .....	27
V. Überblick über die aktuelle E-Bus-Marktsituation in Deutschland.....	28
VI. Übersicht des verfügbaren Fahrzeugangebots .....	33
D. Energiezuführung.....	44
I. Elektrische Busse.....	44
1. Ladestrategien für elektrische Busse .....	44
2. Aufbau der Ladeinfrastruktur .....	45
3. Ladeschnittstellen .....	47
II. Wasserstoffbusse .....	51
1. Wasserstoff-Tankstellen .....	51
2. Farbenlehre – Arten von Wasserstoff.....	52

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
E. Technologievergleich .....	53
I. Wirkungsgradkette .....	53
II. Wirtschaftlichkeit .....	54
III. Umweltbewertung.....	55
F. Untersuchungsgegenstand.....	57
I. Analyse des aktuellen Fuhrparks der regiobus .....	57
II. Ableitung Beschaffungsplanung bis 2035 für die regiobus .....	59
G. Verkehrlich-technische Betrachtung.....	61
I. Methodik Einsatz- und Infrastrukturanalyse.....	61
1. Umlaufuntersuchung.....	61
2. Umlaufverkettung .....	62
3. Lastgangoptimierung.....	64
4. Berechnungsgrundlage und Prämissen .....	65
5. Grafische Darstellungen .....	68
II. Einsatzanalyse.....	73
1. Untersuchung der Einzelumläufe.....	73
a) Einzelumlaufanalyse Linienbündel Bad Belzig .....	73
b) Einzelumlaufanalyse alle „eigene“ Linienbündel .....	77
c) Einzelumlaufanalyse Subunternehmer .....	83
d) Zwischenfazit Einzelumlaufanalyse .....	85
2. Umlaufverkettung und Untersuchung der Einsatzpotenziale .....	86
a) Einsatzpotenziale im Eins-zu-Eins Ersatz „eigen“ .....	87
b) Einsatzpotenziale im Eins-zu-Eins-Ersatz „Subunternehmer“ .....	94
c) Zwischenfazit Umlaufverkettung und Untersuchung der Einsatzpotenziale .....	97
3. Ausblick auf vollständige Flottentransformation .....	98
III. Infrastrukturanalyse .....	100
1. Lastgangoptimierung.....	100
a) Lastgangoptimierung am Beispiel BH Bad Belzig.....	101
b) Lastgangoptimierung Resultate und Dimensionierung Netzanschluss.....	102
2. Energiemengen .....	105
a) Infrastruktur-Betriebsreserve.....	106

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
3. Ladeinfrastrukturkonzept .....	107
a) Technische Gestaltung der Infrastruktur .....	107
b) Ladeinfrastrukturkonzept .....	118
4. Betriebshofintegration.....	130
a) Fluchtwege und Brandabschottung.....	131
b) Betriebshofintegration Standort Bad Belzig.....	132
c) Standort Beelitz.....	134
d) Standort Stahnsdorf .....	136
e) Standort Brandenburg an der Havel.....	138
f) Fazit Betriebshofintegration .....	140
IV. Migrationspfade im Kontext unterschiedlicher Umstellungsszenarien für die regiobus.....	141
1. Umstellungsszenario 1: Erfüllung der CVD-Quoten .....	142
2. Umstellungsszenario 2: CVD+ -Szenario .....	144
3. Umstellungsszenario 3: CVD+ + -Szenario .....	146
4. Umstellungsszenario 4: Vollumstellungsszenario (100%ige Neubeschaffung von E-Bussen) .....	147
H. Ökonomische Betrachtung.....	150
I. Prämissen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	151
1. Investitionen .....	151
a) Fahrzeuge .....	151
b) Lade- bzw. Betankungsinfrastruktur .....	152
c) Werkstattinfrastruktur.....	152
2. Betriebsbezogene Aufwendungen.....	153
a) Treibkraft.....	153
b) Instandhaltung.....	153
c) Fahrdienst.....	154
d) Sonstiges.....	154
II. Übersicht bestehender relevanter Förderprogramme.....	155
1. Förderprogramme auf Bundesebene .....	155
2. Förderprogramme EU-Ebene .....	156
3. Förderung auf Landesebene.....	156
III. Kaufmännische Bewertung der Dekarbonisierung der Flotte der regiobus.....	157
1. Fortschreibung des Status quo als Bezugsgröße .....	157

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
2. Kostenbetrachtungen für eine Umstellung mit Batteriebusen .....	158
a) Mehrkosten der Szenarien .....	158
b) Detailbetrachtung der Kosten des Vollumstellungsszenarios.....	160
3. Kostenbetrachtungen für eine Umstellung mit Brennstoffzellenbussen .....	162
a) Mehrkosten der Szenarien .....	162
b) Detailbetrachtung der Kosten des Vollumstellungsszenarios.....	164
4. Gegenüberstellung der Antriebsarten.....	165
I. Ökologische Betrachtung .....	167
J. Betriebs- und Einsatzkonzept.....	170
I. Zusammenfassung.....	170
II. Umsetzungskonzept .....	171
III. Empfehlung für die regiobus.....	172
K. Anhang .....	174
I. Ergebnisse der Kostenschätzung für die BEV-Szenarien.....	174
II. Ergebnisse der Kostenschätzung für die FCEV-Szenarien.....	177
III. Lastgänge.....	180
1. BH Bad Belzig.....	180
2. BH Beelitz .....	181
3. BH Brandenburg.....	182
4. BH Potsdam .....	183
5. BH Stahnsdorf.....	184
6. BH Werder .....	185
7. BH Ziesar .....	186
8. BH Vetter Wittenberg .....	187
9. BH Anger Potsdam .....	188
10. BH AC Busreisen Potsdam.....	189
11. BH Kortschlag .....	190

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

## A. Auftrag und Auftragsdurchführung

Mit Schreiben vom 24. November 2023 hat uns die

**regiobus Potsdam Mittelmark GmbH, Bad Belzig**

(im Folgenden kurz „regiobus“ oder „Gesellschaft“ genannt)

mit der Erstellung einer Machbarkeitsstudie „Machbarkeitsstudie zur Umstellung auf alternative Antriebe bei der regiobus Potsdam Mittelmark GmbH“ beauftragt. Das Projekt „Gesamtheitliche Strategie zur Umstellung der bisherigen Fahrzeugflotte auf alternative Antriebe (regiobus Elektro-Strategie 2023 – rES30)“ wird im Rahmen der Förderrichtlinie Bus des BMDV mit insgesamt 20.000 € durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr gefördert. Die Förderrichtlinie wird von der NOW GmbH koordiniert und durch den Projektträger Jülich (PtJ) umgesetzt.

Die Auftragsbearbeitung erfolgte in den Monaten Januar 2024 bis Oktober 2024 auf Grundlage der uns von der regiobus zur Verfügung gestellten Daten.

Für die technischen und betrieblichen Fragestellungen haben wir EEBC European Electrical Bus Company GmbH („EEBC“), Frankfurt am Main, als Unterauftragnehmer in dieses Projekt einbezogen.

## B. Hintergrund und Zielsetzung

### I. Ausgangslage

Die regiobus Potsdam Mittelmark GmbH (nachfolgend: „regiobus“) erbringt gemeinwirtschaftliche Busverkehrsdienstleistungen im öffentlichen Personennahverkehr im Landkreis Potsdam-Mittelmark und befördert jährlich rund 13,4 Millionen Fahrgäste. Sie ist der kreiseigene Verkehrsbetrieb des Landkreises Potsdam-Mittelmark. Zur Erbringung der Verkehre stehen der regiobus mit ihren 477 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern 170 eigene Busse zur Verfügung, die an den insgesamt sechs Betriebsstandorten stationiert sind. Jährlich werden so Busverkehrsleistungen im Umfang von ca. 12,1 Mio. Nutz-Wagen-Kilometern (ca. 14,0 Mio. Gesamtkilometer) zum überwiegenden Teil im Linienverkehr nach § 42 PBefG erbracht. Der eigene Fuhrpark der regiobus umfasst 92 Solo-, 71 Gelenk-, vier Midi- und drei Minibusse mit hauptsächlich konventionellem Dieselantrieb und hat ein Durchschnittsalter von aktuell 6,0 Jahren. Die regiobus setzt bereits heute einen Minibus und einen Solobus mit batterieelektrischem Antrieb ein. Zudem operiert ein Großteil der eingesetzten Flotte mit dem nach Clean Vehicle Directive (nachfolgend: „CVD“) als „sauber“ eingestuften Treibstoff HVO. Die regiobus beschäftigt aktuell 329 Personale im Fahrdienst.

Die regiobus operiert an insgesamt sechs Standorten:

- Bad Belzig
- Beelitz
- Brandenburg
- Potsdam
- Stahnsdorf
- Werder.

Unter Betrachtung der regionalen und fahrplanspezifischen Gegebenheiten wurden die Betriebshöfe Bad Belzig, Beelitz und Stahnsdorf sowie eine Abstellfläche in Brandenburg an der Havel als Untersuchungsgegenstände für eine initiale Machbarkeitsuntersuchung für alternative Energieträger und Antriebstechnologien definiert.

Der Landkreis Potsdam-Mittelmark weist eine Fläche von knapp 2.600 km<sup>2</sup> auf, wodurch Lade- bzw. Betankungsinfrastruktur strategisch auf die Standorte verteilt werden muss, um die heutigen Umläufe weiterhin gewährleisten zu können.

## 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<sub>2</sub>- und andere Schadstoffemissionen sowie den Kraftstoffverbrauch miteinzubeziehen.<sup>1</sup> Die ex-post Evaluation der Richtlinie 2009/33/EG zeigte allerdings auf, dass dieser Ansatz durch die entsprechenden Beschaffungsstellen nicht konsequent umgesetzt wurde.<sup>2</sup> 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 Fahrzeugklassen<sup>3</sup>, die sich wie folgt kategorisieren lassen:

- *Fahrzeug-Kategorie 1*: leichte Nutzfahrzeuge für den Personen- und Güterverkehr der Klassen M<sub>1</sub> und M<sub>2</sub> oder N<sub>1</sub><sup>4</sup>,

---

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

<sup>2</sup> 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.

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

<sup>4</sup> Die Klasse M<sub>1</sub> umfasst Kraftfahrzeuge (Personenbeförderung) mit höchstens acht Sitzplätzen zusätzlich zum Fahrersitz und ohne Stehplätze. Zur Klasse M<sub>2</sub> gehören Kraftfahrzeuge (Personenbeförderung) mit mehr als acht Sitzplätzen zusätzlich zum Fahrersitz und mit einer zulässigen Gesamtmasse von maximal fünf Tonnen. Die Klasse N<sub>1</sub> umfasst Kraftfahrzeuge für den Güterverkehr mit einer maximalen Gesamtmasse von 3,5 Tonnen.

- *Fahrzeug-Kategorie 2:* Schwere Nutzfahrzeuge für den Güterverkehr der Klassen N<sub>2</sub> und N<sub>3</sub>,
- *Fahrzeug-Kategorie 3:* Schwere Nutzfahrzeuge zur Personenbeförderung (Busse) der Klasse M<sub>3</sub>, als Fahrzeuge mit einer zulässigen Personenzahl von mehr als 22 Personen ohne den Fahrer, die so konstruiert sind, dass Bereiche für Stehplätze vorgesehen werden, um ein häufiges Ein- und Aussteigen der Fahrgäste zu ermöglichen. Hierunter fallen nur Stadtbusse (M<sub>3</sub> Klasse I) mit vielen Stehplätzen, wohingegen Reisebusse bzw. Überlandbusse (M<sub>3</sub> Klasse II) mit geringer Stehfläche nicht in den Anwendungsbereich der Clean Vehicles Richtlinie fallen. Darüber hinaus werden Fahrzeuge der M<sub>3</sub> 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. -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.

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

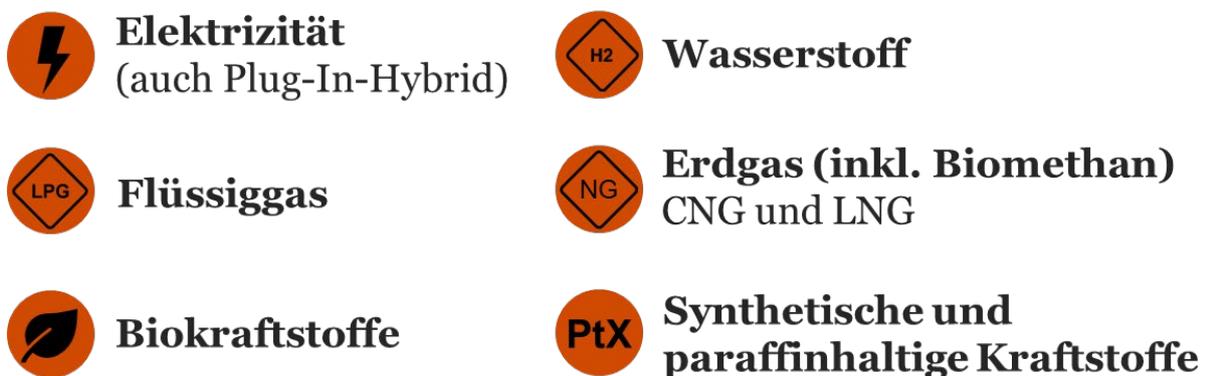
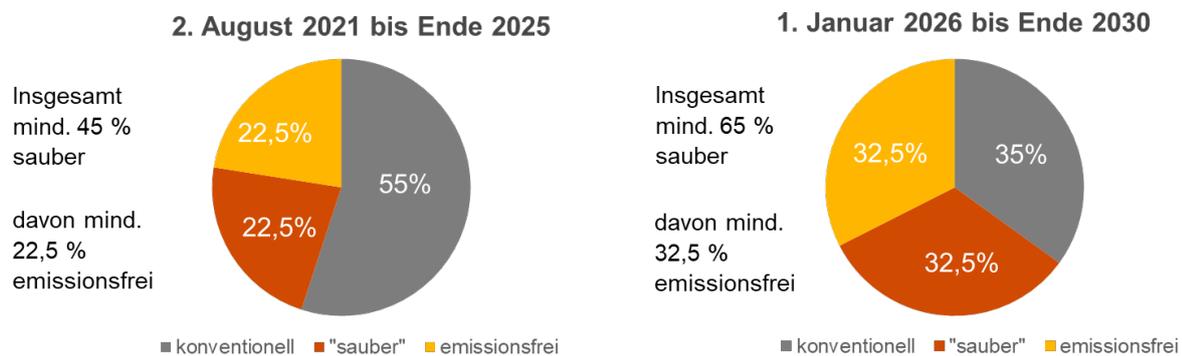


Abbildung 1: Übersicht der als „sauber“ definierten Energieträger für den Antrieb eines Busses

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

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



### Abbildung 2: Beschaffungsquoten der CVD in den Referenzperioden

Als emissionsfrei gelten dabei Fahrzeuge ohne konventionellen Verbrennungsmotor oder mit Verbrennungsmotor, der weniger als 1 g CO<sub>2</sub>/kWh bzw. 1 g CO<sub>2</sub>/km emittiert. Von praktischer Bedeutung werden in diesem Sinne vor allem Busse mit batteriebetriebenen Elektromotor oder mit einem Brennstoffzellenantrieb sein. Auch Trolleybusse mit vollelektrischem Notfahrregulat gelten als emissionsfrei, Hybrid-Busse fallen hier jedoch klar heraus. Für die Erfüllung der Quote können neben Neubeschaffungen auch Fahrzeuge in ein sauberes oder emissionsfreies Fahrzeug umgerüstet werden. Hier gilt es jedoch, die Wirtschaftlichkeit der Nachrüstung zu bewerten.

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

Dennoch verbleiben Unklarheiten bei der Anwendung der CVD, die juristisch aufgeklärt werden sollten. Dies betrifft beispielsweise die unterschiedlichen Betrachtungsebenen „Aufgabenträger/öffentlicher Dienstleistungsauftrag“ und „Verkehrsunternehmen/Sektoren-auftraggeber“.

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

### III. Zielsetzung

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 dargestellt, sind zur Einhaltung der CVD bzw. des SaubFahrzeugBeschG die öffentlichen Auftraggeber (Gemeinde, Kreis, Zweckverband, AöR) sowie die Sektorenauftraggeber (konzessionierte Verkehrsunternehmen – eigenwirtschaftlich und gemeinwirtschaftlich) verpflichtet. Subunternehmer sind mittelbar über den jeweiligen Verkehrsvertrag/öDA verpflichtet. Hierbei kommt es dann auf das konkrete Geltungsdatum des Vertrages an, also ob dieser in den Zeitraum der CVD fällt. Im Vorfeld der Veröffentlichung der Vorabkennzeichnung ist daher sowohl eine Entscheidung über den Umfang der zu erbringenden Verkehrsleistungen als auch eine Systementscheidung hinsichtlich der zukünftigen Antriebstechnologie zu treffen. Dies ist auch in der aktuellen, Anfang 2020 verabschiedeten, Fortschreibung des Nahverkehrsplans für den Landkreis Potsdam-Mittelmark 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 von Ausführungsvarianten eine passende Lösung vor dem Hintergrund der 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 Dieselnissen analysiert (z. B. Anstieg der Treibstoffkosten durch CO<sub>2</sub>-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 fünf **Arbeitspaketen** (AP) dargestellt:

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

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

## C. Technologische Grundlagen

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

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

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

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

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

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

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

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



**Abbildung 3: Antriebsarten elektrifizierter Busse im ÖPNV**

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

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

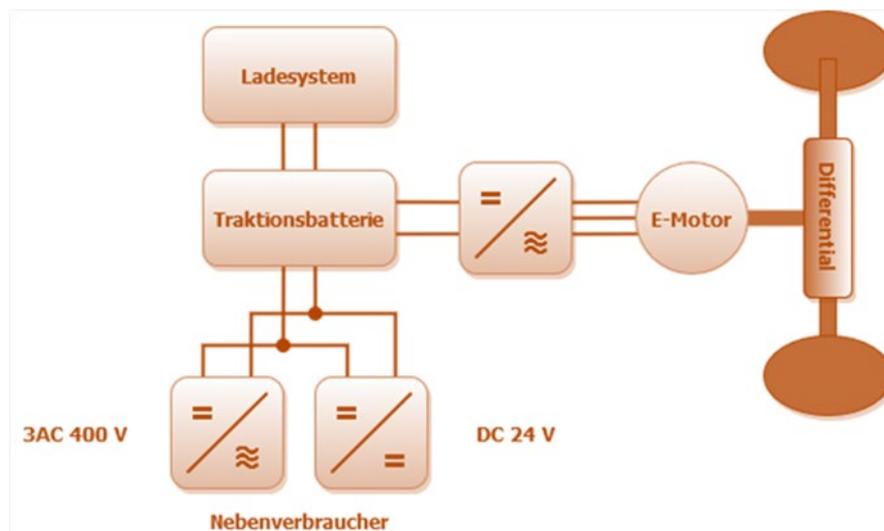
In den folgenden Abschnitten werden die verschiedenen Fahrzeugkonzepte beschrieben und typischen Stärken und Schwächen im allgemeinen Kontext miteinander verglichen. Des Weiteren werden auch Aussagen zur Marktverfügbarkeit in Deutschland getroffen.

## **I. Batterieelektrische Busse**

### **1. Aufbau batterieelektrischer Busse**

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

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



**Abbildung 4: Antriebstopologie batterieelektrischer Busse**

In Diesel-Fahrzeugen erzeugt die Lichtmaschine mit der DC 24 V Batterie ein Kleinspannungsnetz für eine Vielzahl an elektrischen Nebenverbrauchern wie Beleuchtung, Scheibenwischer und ähnliches. In elektrischen Bussen wird die Lichtmaschine durch einen zusätzlichen DC 24 V Umrichter ersetzt, der an die Traktionsbatterie angebunden ist (Hochspannungsbereich). Die DC 24 V Batterie bleibt im Fahrzeug enthalten und stabilisiert das Kleinspannungsnetz im Fahrzeug.

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

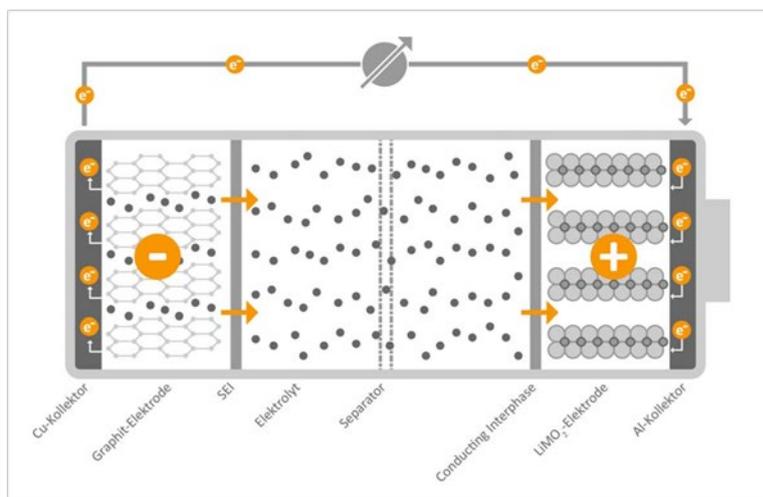
Da elektrische Busse ebenfalls keine mechanisch angeflanschte Lenkhilfepumpe für die Servolenkung oder einen angeflanschten Druckluftkompressor nutzen können (im Stand ist die Drehzahl des E-Motors Null), müssen auch diese durch elektrisch angetriebene Versionen ersetzt werden.

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

## 2. Energiespeicher

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

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



**Abbildung 5: Aufbau einer Li-Ion Zelle am Beispiel der Lithium-Mangandioxid-Zelle**

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

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

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

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

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

Batterien mit LFP-Zellchemie werden ebenfalls dem Feld der Energiebatterien zugeordnet. Die einzelnen Parameter liegen üblicherweise zwischen den Werten von NMC und LTO-Zellchemie. Vereinfacht interpretiert stellt die LFP-Technologie eine leistungsgesteigerte Energiebatterie gegenüber der NMC-Variante dar.

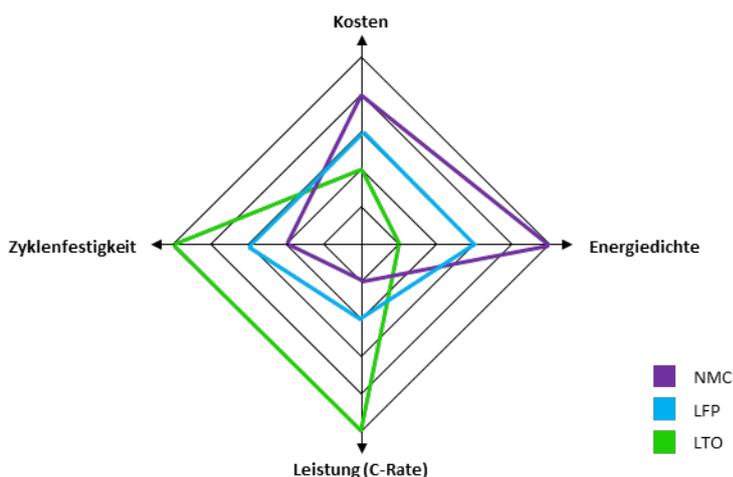


Abbildung 6: Vergleich aktueller Zellchemie-Varianten im ÖPNV

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

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

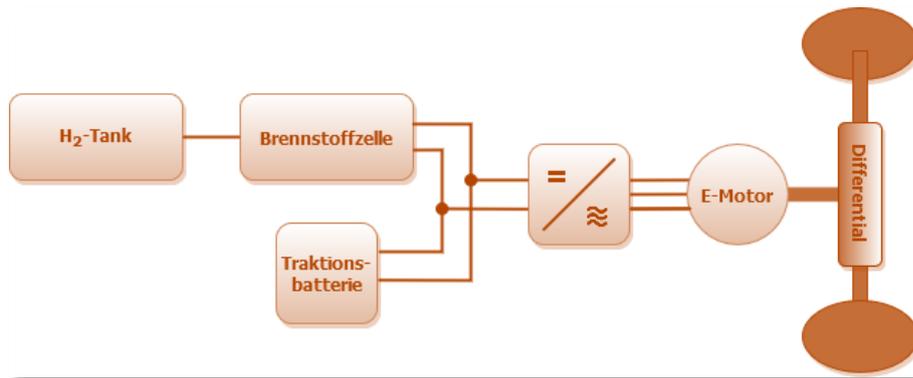
Leistungsbatterien werden hingegen kleinvolumig ausgelegt. Hier wird der Ansatz verfolgt, in mehreren Ladeintervallen pro Tag die Energie für den Tagesbedarf in der Batterie zu speichern. Für dieses wiederholte Zwischenladen ist eine hohe C-Rate erforderlich, um in kurzen Ladepausen den Ladestand nennenswert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

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

## **II. Brennstoffzellen Fahrzeuge**

### **1. Aufbau von Brennstoffzellenbussen**

Fuel-Cell- bzw. Brennstoffzellenbusse (nachfolgend H<sub>2</sub>-Bus genannt) sind grundsätzlich Hybridbusse, wobei meist neben einem Lithium-Ionen Batteriespeicher eine Brennstoffzelle als Primäraggregate eingesetzt wird. Auch hier erfolgt die Traktion elektrisch über einen Elektromotor. Abgesehen von der Brennstoffzelle entsprechen die eingesetzten Komponenten denen der voll-elektrischen Batteriebusse.



**Abbildung 7: Antriebstopologie Brennstoffzellenbus**

In der Brennstoffzelle (BZ) reagiert Wasserstoff ( $H_2$ ) mit Sauerstoff aus der Umgebungsluft in einem umgekehrten Elektrolyseprozess zu Wasser, wobei Energie freigesetzt wird. Der notwendige Wasserstoff wird in Wasserstofftanks im Fahrzeug mitgeführt. Aufgrund des größeren verfügbaren Bauraums im Bussektor gegenüber dem Pkw-Sektor, erfolgt die Speicherung bei reduziertem Druck (350 bar gegenüber 700 – 900 bar). Dies bietet Kostenvorteile sowohl auf Fahrzeug- als auch auf Tankinfrastrukturseite. Die mitgeführte Wasserstoffmenge beträgt 30 bis 40 kg.

Prinzipiell kann ein  $H_2$ -Bus ohne Batteriespeicher direkt aus der Brennstoffzelle betrieben werden. Aus verschiedenen Gründen wird jedoch üblicherweise ein Batteriespeicher vorgesehen. Zum einen kann bereits über eine kleine Li-Ionen-Batterie der Arbeitspunkt der Brennstoffzelle konstant gehalten werden, wodurch die Lebensdauer der kostenintensiven Brennstoffzelle maximiert wird. Andererseits ermöglicht die Brennstoffzelle keinen bi-direktionalen Leistungsfluss. Von den Elektromotoren durch Rekuperation gewonnene Bremsenergie kann also nur gespeichert werden, wenn zusätzlich ein Batteriespeicher im System eingebunden ist.

Ein entsprechender Systemaufbau mit einer Brennstoffzellen-Leistung in der Größenordnung von etwa 75 bis 100 kW elektrisch ist ausreichend, um die auftretenden Lastspitzen im Normalbetrieb eines  $H_2$ -Busses abzudecken.

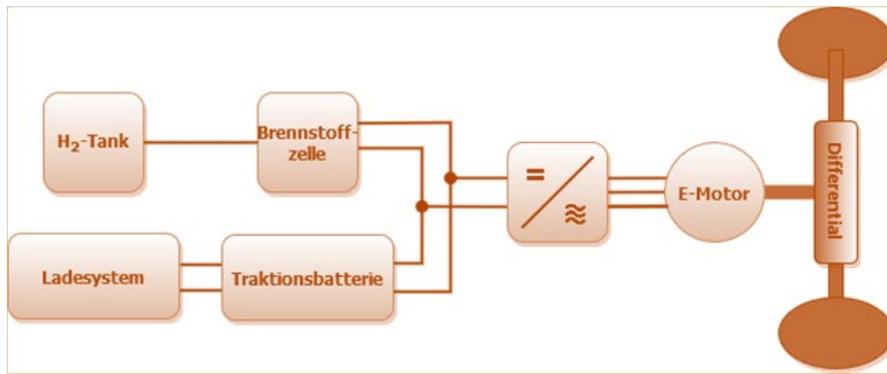
Der Verbrauch eines 12 m  $H_2$ -Busses wird typischerweise zwischen 8,5 kg und 10,5 kg Wasserstoff pro 100 km angegeben. Natürlich ist der Wert stark abhängig von Fahrzeugkonfiguration, Umgebungsbedingungen und Witterungseinflüssen. Bei überschaubarem Energiebedarf für die Fahrzeugklimatisierung sind Reichweiten von 350 km und mehr absolut unkritisch.

Üblicherweise werden beim H<sub>2</sub>-Bus Betankungsdauern von ca. 7 bis 10 Minuten angestrebt. Das Betriebskonzepte von Diesel- und H<sub>2</sub>-Bus sind einander letztlich sehr ähnlich, auch wenn auf Tankstellenseite auslegungsabhängig meist Regenerationszeiten zum Aufbau des Ladedrucks berücksichtigt werden müssen. Im Gegensatz zu batterieelektrischen Fahrzeugen deckt ein einziger kurzzeitiger Betankungsvorgang den Energiebedarf eines üblichen Betriebstags vollständig ab. Dieser Aspekt kann für eine Flottenumstellung sehr attraktiv sein. Jedoch muss dem Umstand Rechnung getragen werden, dass die Anzahl an Betankungsvorgängen pro Stunde pro Zapfsäule ggf. geringer ist als beim Dieselbus. Bei größeren Flotten müssen die Betankungsvorgänge zeitlich optimiert erfolgen, oder eine ausreichende Menge Zapfstellen vorgesehen werden.

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

## **2. Brennstoffzellen-Hybrid-Bus**

Wie zuvor beschrieben, sind H<sub>2</sub>-Busse sinnvollerweise immer als Hybridfahrzeug mit Brennstoffzelle und Batteriespeicher ausgeführt. Häufig werden im Bereich der H<sub>2</sub>-Busse jedoch Begriffe wie Brennstoffzellenbus gegenüber Brennstoffzellen-Hybrid-Bus verwendet. Auch wenn es hier keine klare Definition gibt, geht dies üblicherweise auf die zusätzliche separate Nachlademöglichkeit des Batteriespeichers zurück. Fahrzeuge ohne elektrische Ladeschnittstelle werden dabei als (reiner) Brennstoffzellen- oder Fuel-Cell-Bus bezeichnet, während Fahrzeuge mit elektrischer Ladeschnittstelle den Zusatz „Hybrid“ im Namen führen (im Bereich der Diesel-Hybridtechnik spricht man von Diesel-Hybrid-Bussen gegenüber Diesel Plug-In-Hybrid-Bussen). Aufgrund der elektrischen Lademöglichkeit ist es sinnvoll, den Batteriespeicher größer auszulegen. So kann das Fahrzeug in der Betriebspause elektrische Energie speichern, was sich positiv auf den Wasserstoffverbrauch im Betrieb auswirkt. Das Fahrzeug bleibt darüber hinaus auch komplett ohne elektrisches Nachladen, bei erhöhtem Verbrauch, funktionsfähig. Der schematische Aufbau eines Brennstoffzellen-Hybrid Antriebsstranges ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



**Abbildung 8: Antriebstopologie BZ-REX bzw. BZ-Hybrid Bus**

Abgesehen von der externen elektrischen Ladeschnittstelle, die üblicherweise als CCS-Steckkontakt ausgeführt ist, sind H<sub>2</sub>-Busse und H<sub>2</sub>-Hybrid-Busse gleich aufgebaut. Lediglich die Batteriegröße ist im Falle der Hybridausführung sinnigerweise größer dimensioniert. Bei sehr groß dimensionierten Batterien und klein dimensionierten Brennstoffzellen wird häufig der Begriff Batteriebus mit Brennstoffzellen-Range-Extender (BZ-REX) aufgeführt, um die Typen noch weiter voneinander abzugrenzen.

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

- H<sub>2</sub>-Bus: Energiezufuhr ausschließlich als Wasserstoff
- H<sub>2</sub>-Hybrid-Bus: Energiezufuhr sowohl als Wasserstoff als auch über elektrische Ladeschnittstelle (ausgewogenes Verhältnis)
- BZ-REX Bus: Energiezufuhr primär über elektrische Ladeschnittstelle. Reichweitenerhöhung durch Wasserstoff (untergeordnet).

Typische Werte für den Batteriespeicher liegen bei etwa 40 bis 60 kWh für typische H<sub>2</sub>-Hybrid-Anwendungen gegenüber 200 kWh und mehr für BZ-REX Anwendungen. Dem gegenübergestellt sind BZ-Leistungsklassen von 75 bis 100 kW für H<sub>2</sub>-Hybride und 60 kW oder weniger für den BZ-REX Fall. Für BZ-REX Anwendungen ist es abhängig von der Systemauslegung, ob die Brennstoffzelle kontinuierlich bei sehr kleiner Leistung arbeitet oder erst ab einer bestimmten Entladetiefe zugeschaltet wird.

Durch das Zusammenspiel von extern geladenem Batteriespeicher und geladenen Brennstoffzelle können Verbrauchswerte für H<sub>2</sub>-Hybrid-Busse und BZ-REX Busse nicht einfach pauschal abgeschätzt werden. Vereinfacht ausgedrückt ist bei langen Umläufen der Batteriespeicher früher entladen und das Energiedefizit muss über einen höheren H<sub>2</sub>-Verbrauch gedeckt werden. Umgekehrt kann es sein, dass bei kurzen Umläufen der Batteriespeicher vollständig ausreicht, den Energiebedarf zu decken. Nicht zuletzt hängt die Verbrauchsgestaltung auch von der Regelungstechnologie ab, also davon, wann die Brennstoffzelle mit welchem Leistungswert zugeschaltet wird oder nicht.

Dieser Zusammenhang ist in folgender Tabelle dargestellt. Während für den reinen H<sub>2</sub>-Bus einheitliche Verbrauchswerte abgeschätzt werden können, variieren diese für den BZ-REX-Bus stark:

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

**Tabelle 1: Exemplarische Verbrauchsdaten H<sub>2</sub>-Busse**

Basierend auf den Ausführungen von H<sub>2</sub>-Bussen ergeben sich auch unterschiedliche Ansprüche an die benötigten Infrastrukturkomponenten. Reine H<sub>2</sub>-Busse benötigen ausschließlich eine Wasserstofftankstelle. BZ-REX Busse hingegen benötigen neben einer Wasserstoffinfrastruktur auch eine zusätzliche Ladeinfrastruktur, um die Traktionsbatterie zu laden. Werden ausschließlich Fahrzeuge mit Range Extender eingesetzt, können stellenweise auch die Anforderungen an die Wasserstoffinfrastruktur, aufgrund der geringeren Kapazitätsanforderungen, reduziert werden.

### III. Emissionsbehaftete Antriebskonzepte für Omnibusse

#### 1. Diesel-Plug-In-Hybrid-Bus

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

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

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

Plug-In Hybridfahrzeuge ermöglichen rein elektrische Reichweiten von 7 km bis mehr als 20 km.

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

## 2. Erdgas-Bus

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

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

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

Ein Vorteil von Erdgasbussen ist die Einstufung als „sauberes Fahrzeug“ in der Clean Vehicle Directive. Somit emittiert zwar ein Erdgasbus immer noch Schadstoffe (vor allem CO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub>), der Ausstoß liegt jedoch unterhalb der Emissionen eines vergleichbaren Fahrzeugs mit Dieselmotor. Durch den Einsatz von Biogas kann der ökologische Fußabdruck weiterhin deutlich reduziert werden.

## IV. Nebenaggregate vollelektrischer Busse

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

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



Abbildung 9: Kategorien von Nebenverbrauchern

## V. 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 in-dessen auch bereits bekannten Planungen zur Einfloftung 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 10).

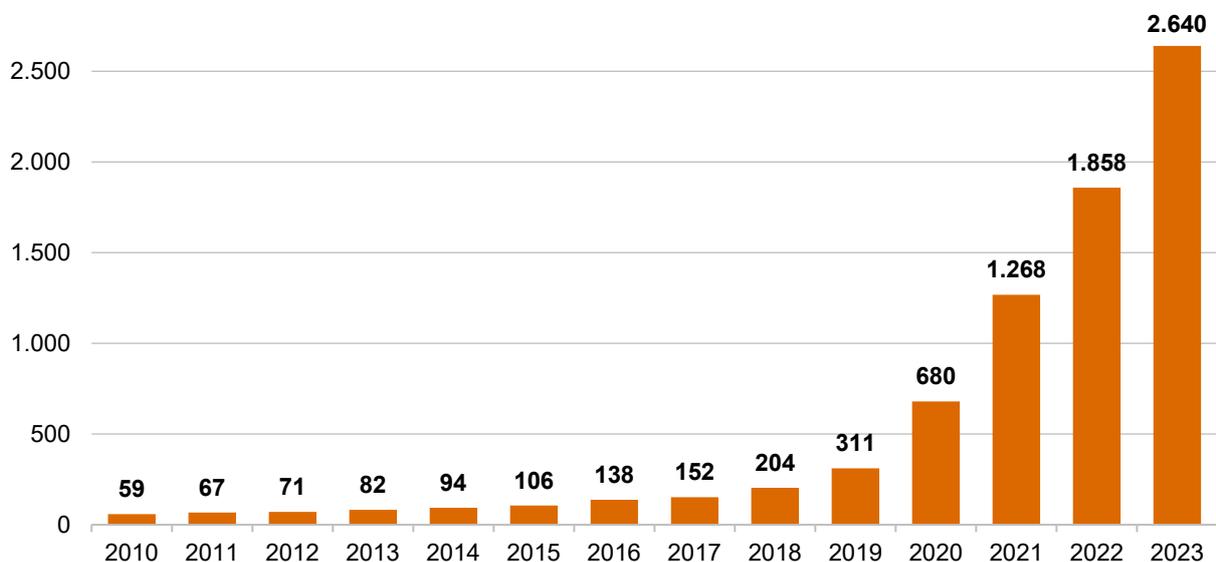
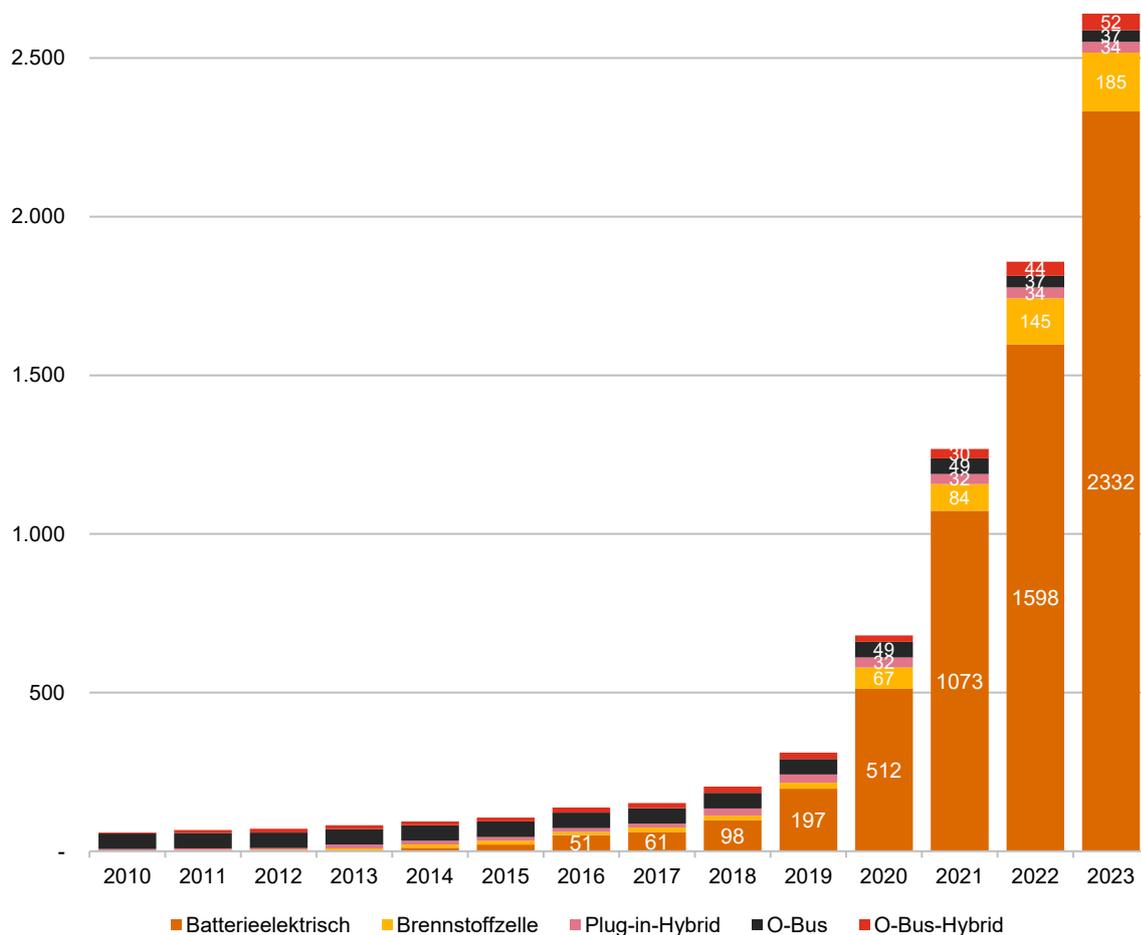


Abbildung 10: Elektrobus-Bestand im Ist (Datenstand: 31. Dezember 2023) (n=2.640)

Nichtsdestotrotz spielen Elektrobusse nach wie vor noch eine untergeordnete Rolle im straßengebundenen ÖPNV mit Omnibussen in Deutschland. Der Gesamtbestand der in Deutschland im ÖPNV eingesetzten Busse beträgt gemäß Marktrecherchen von PwC aktuell rund 54.000 Fahrzeuge. Dieser Wert stammt aus einer Hochrechnung, basierend auf den veröffentlichten Statistiken des VDV (Anzahl der für den ÖPNV eingesetzten Fahrzeuge der VDV-Mitglieder) und des Statistischen Bundesamts (Verkehrsleistung im ÖPNV in Deutschland) für das Jahr 2018. Bei einem Gesamtbestand von ca. 54.000 ÖPNV-Bussen in Deutschland repräsentieren Elektrobusse somit heute gut 5 % der bundesdeutschen Flotte. Auch bei den Neuzulassungen stellen die Elektrobusse derzeit zwar noch eine Minderheit dar, eine Steigerung des E-Bus-Anteils an den Neuzulassungen ist indessen zunehmend zu beobachten. Bei einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von ÖPNV-Bussen von 12 Jahren und der Annahme einer kontinuierlichen Neubeschaffung ergeben sich bei einem ÖPNV-Busbestand von 54.000 Fahrzeugen rund 4.500 Neuzulassungen pro Jahr. Im Verhältnis dazu liegt der E-Bus-Anteil an den Neuzulassungen in Deutschland im Jahr 2023 mit hinzugekommenen 782 Elektrobusen rechnerisch bei knapp 11 %. Hierbei ist jedoch auch zu berücksich-

tigen, 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 11: Elektrobus-Bestand nach Antriebsarten (n=2.640)**

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

Insgesamt sind die Zuwächse des Elektrobus-Bestands im Jahr 2023 somit im Wesentlichen auf Batteriebusse zurückzuführen.

### Elektrobus-Bestand im Plan

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

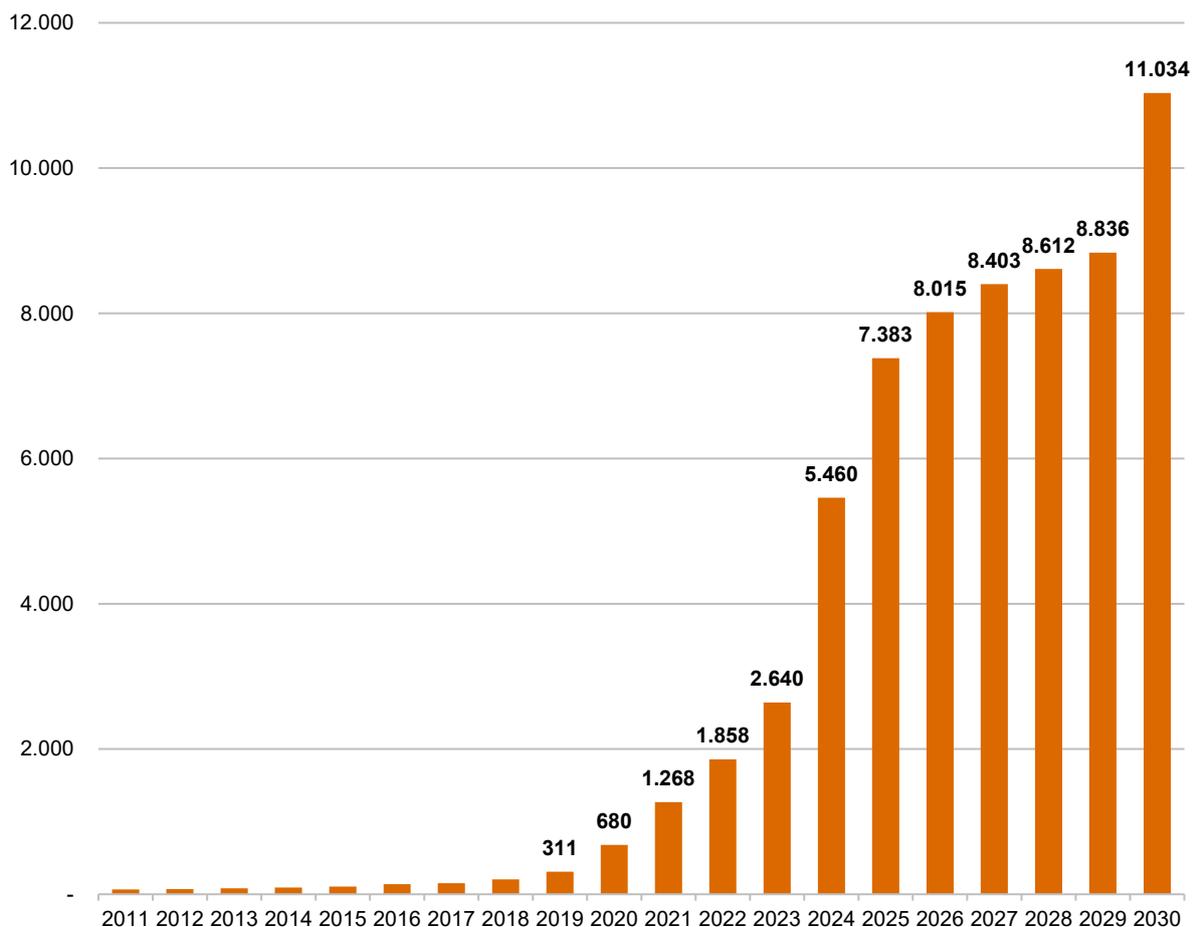
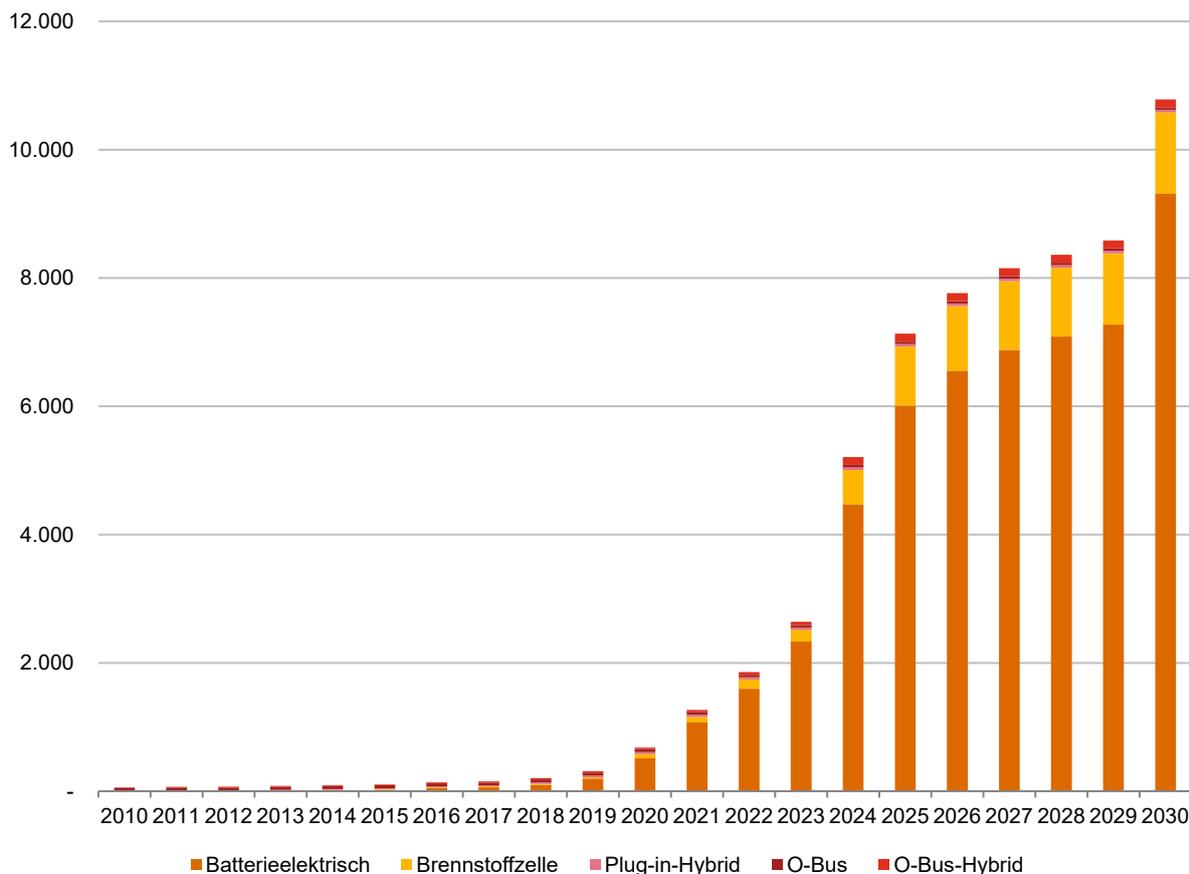


Abbildung 12: Geplante Entwicklung des Elektrobus-Bestand bis 2030 (n=11.034)

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



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

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

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

**Tabelle 2: Übersicht von Batteriebusen nach Bauart und Ladestrategie (n=2.332)**

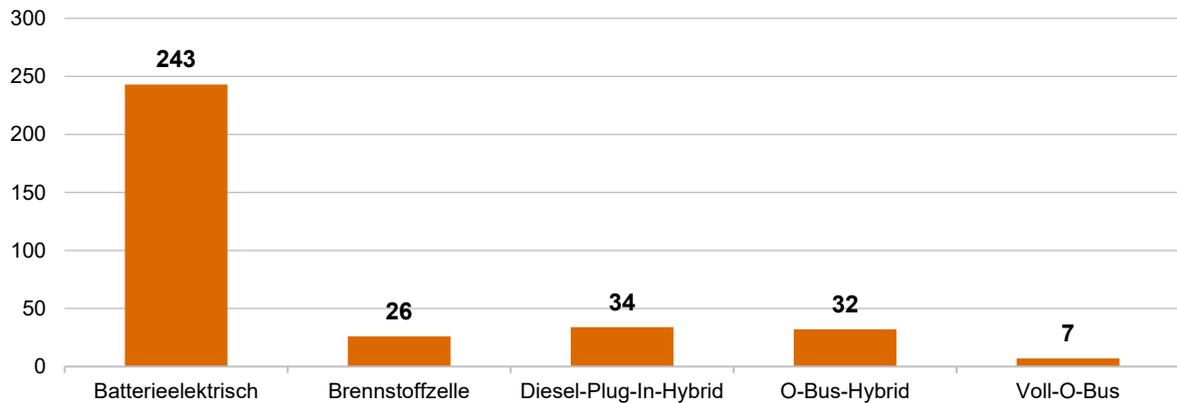
Es lässt sich schließlich festhalten, dass die häufigste E-Bus-Konfiguration in Deutschland bisher ein Standard-Solo Batteriebus von 12 m Länge ist, der über Nacht im Depot nachgeladen wird.

## VI. Übersicht des verfügbaren Fahrzeugangebots

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

### Antriebsart

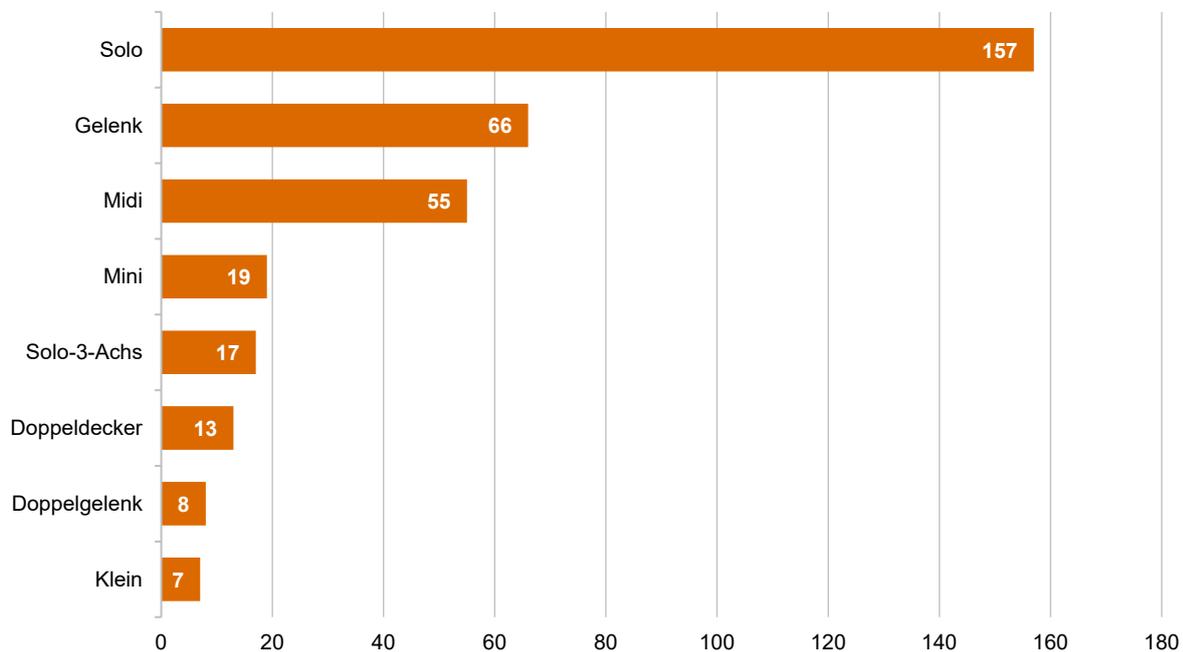
Die Auswertung des E-Bus-Marktes hinsichtlich der angebotenen Antriebsarten zeigt aktuell ebenfalls eine deutliche Dominanz des Batteriebusses. Batteriebusse (243 Fahrzeuge) stellen knapp 70 % des gesamten Fahrzeugangebotes dar. E-Busse als Plug-In-Hybride repräsentieren die zweitgrößte Gruppe mit 34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



**Abbildung 14: Fahrzeugmodelle nach Antriebsart**

### Bauart

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



**Abbildung 15: Anzahl der verfügbaren Fahrzeugmodelle nach Bauart (n=342)**

## Ladestrategie

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

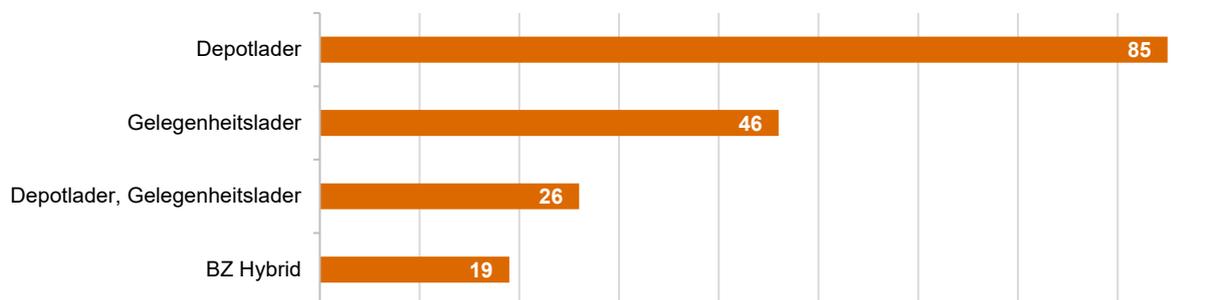


Abbildung 16: Anzahl der angebotenen Fahrzeugmodelle nach Ladestrategie (n = 295)

## Batteriekapazität

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

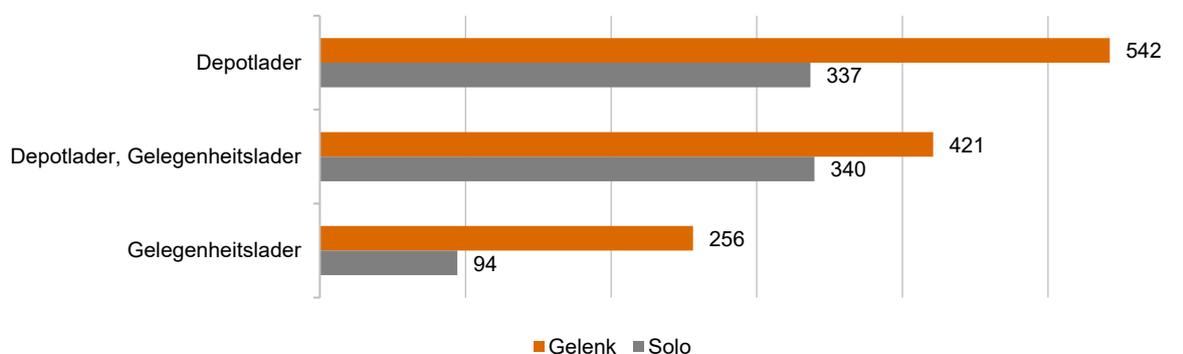
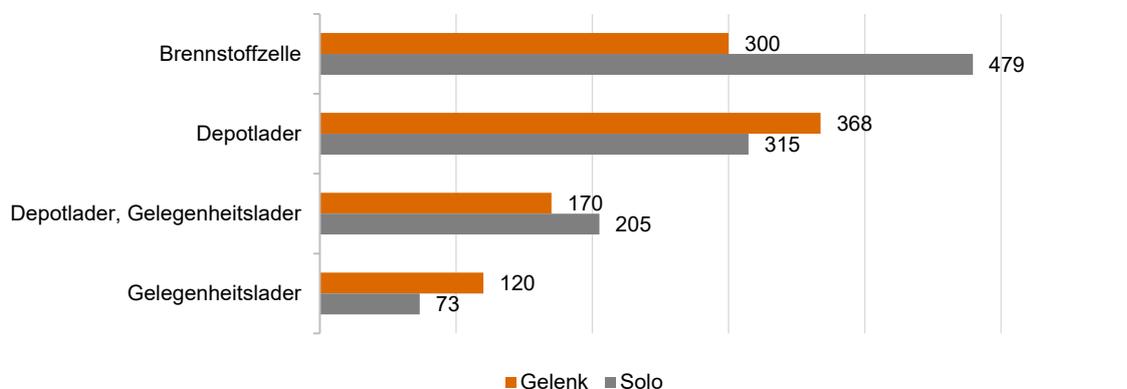


Abbildung 17: Verfügbare durchschnittliche Batteriekapazitäten angebotener Batteriebusse nach Ladestrategie und Bauart in kWh

### Maximale Reichweiten der E-Busse

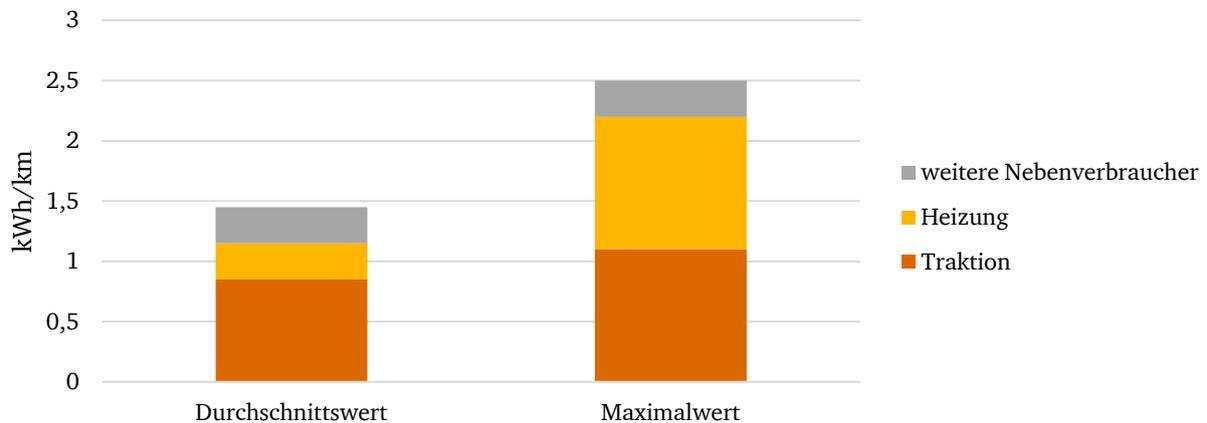
In Bezug auf die maximalen Reichweiten der Batteriebusse gemäß Herstellerangaben ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den Batteriekapazitäten. Bei Batteriebussen weisen Depotlader im Durchschnitt die höchsten Reichweiten mit einer Ladung auf (368 km bei Gelenkbussen und 315 km bei Solobussen). Brennstoffzellenbusse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



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

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

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



**Abbildung 19: Anteile der Nebenverbraucher am Gesamtenergieverbrauch<sup>1</sup>**

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

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

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

<sup>1</sup>Vgl. [https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2018-09/Schlussbericht\\_E-Busse%20Hannover.pdf](https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2018-09/Schlussbericht_E-Busse%20Hannover.pdf)

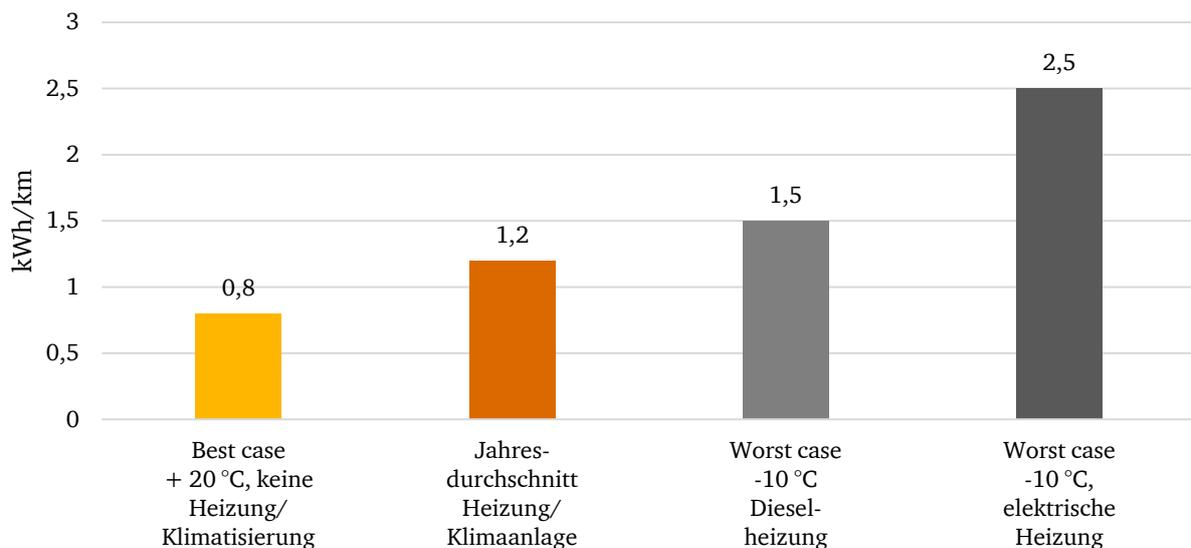


Abbildung 20: Typischer elektrischer Energieverbrauch von Elektrobussen<sup>1</sup>

### Thermomanagement Innenraum

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

<sup>1</sup> Vgl. <https://www.sustainable-bus.com/news/electric-bus-range-focus-on-electricity-consumption-a-sum-up/>

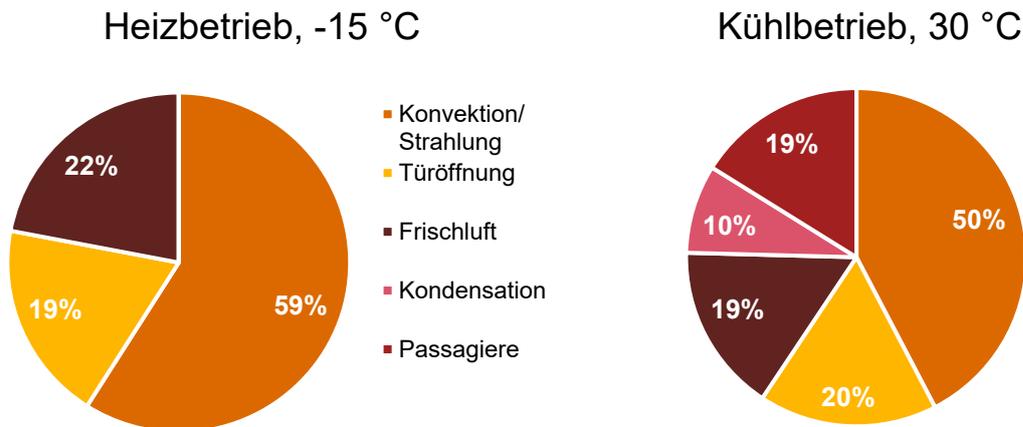


Abbildung 21: Anteile am Energieverbrauch im Heiz- und Kühlbetrieb<sup>1</sup>

### Verringerung des Energiebedarfs

Den hohen Energieverbräuchen durch Konvektion und Strahlung kann mit unterschiedlichen Maßnahmen entgegengewirkt werden. Eine Möglichkeit bieten passive Maßnahmen z. B. Speziallackierungen, sogenannte „cool paints“, und spezielle Verglasungen (z. B. Doppelverglasung bzw. Wärmeschutzverglasung), die dafür sorgen, dass ein Großteil der Infrarotstrahlen des Sonnenlichts reflektiert und damit der Wärmeübertrag im Bereich der Fenster minimiert wird. Der Fahrzeughersteller VDL gibt die Einsparungspotenziale durch Anwendung einer Doppelverglasung in der neuen Citea-Bus-Generation beispielsweise mit um 10 % an. Zusätzlich hilft eine verbesserte Wärmeisolierung der Karosserie (z. B. mit Hochleistungsdämmschaum) und der Dachkanäle den Energiebedarf weiter zu reduzieren.<sup>2</sup>

Einsparungen bei der Frischluftzufuhr und Kondensation werden bei modernen Bussen über Regelungssysteme erreicht. Diese messen die Innenraumtemperatur, den CO<sub>2</sub>-Gehalt und die Luftfeuchte der Innenraumluft um die Belüftungsstrategie in Abhängigkeit von der Anzahl der Passagiere und in Abhängigkeit der Außentemperatur bedarfsgerecht anzupassen.

<sup>1</sup> Vgl. [https://www.researchgate.net/publication/285396879\\_Energiebedarf\\_verschiedener-Klimatisierungssysteme\\_fur\\_Elektro-Linienbusse](https://www.researchgate.net/publication/285396879_Energiebedarf_verschiedener-Klimatisierungssysteme_fur_Elektro-Linienbusse)

<sup>2</sup> Vgl. <https://www.vdlbuscoach.com/de/news/archiv/neue-vdl-citea-generation-entwicklung-von-null-bis-zum-innovativen-produktprogramm>

Um die ausströmende Luftmasse bei der Türöffnung zu minimieren, können außerdem Ventilatoren über den Türen angebracht werden, die die Luft mit hohen Geschwindigkeiten senkrecht in Richtung Fahrzeugboden blasen. Mithilfe dieses Luftvorhangs („air-curtain“), wird ein starker Austausch der temperierten Luft des Fahrgastraums mit der Umgebungsluft verhindert.<sup>1</sup> Diese Funktion ist heute serienmäßig bei konventionellen und Elektrobussen implementiert.

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

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

### Effizienzverbesserungen

Für den verbleibenden Energiebedarf für das Heizen und Kühlen können prinzipiell elektrische, brennstoffbetriebene sowie kombinierte Heiz- und Kühlkonzepte (z. B. Hybridheizung) eingesetzt werden. Je nach Anwendungsfall – ob Heizen oder Kühlen – können dazu unterschiedliche Technologien eingesetzt oder kombiniert werden. Sollen Busse für den Einsatzzweck elektrisch gekühlt werden, eignen sich nach aktuellem Stand der Technik insbesondere Klimaanlage und Wärmepumpen. Zum elektrischen Heizen eignen sich insbesondere Wärmepumpen, Heizelemente (PTC-Elemente<sup>2</sup>) und Wasserheizungen.

---

<sup>1</sup> Vgl. <https://www.busplaner.de/de/news/heiz-und-klimatechnik-heizsysteme-warme-luft-im-citaro-7648.html>

<sup>2</sup> PTC: Positive Temperature Coefficient

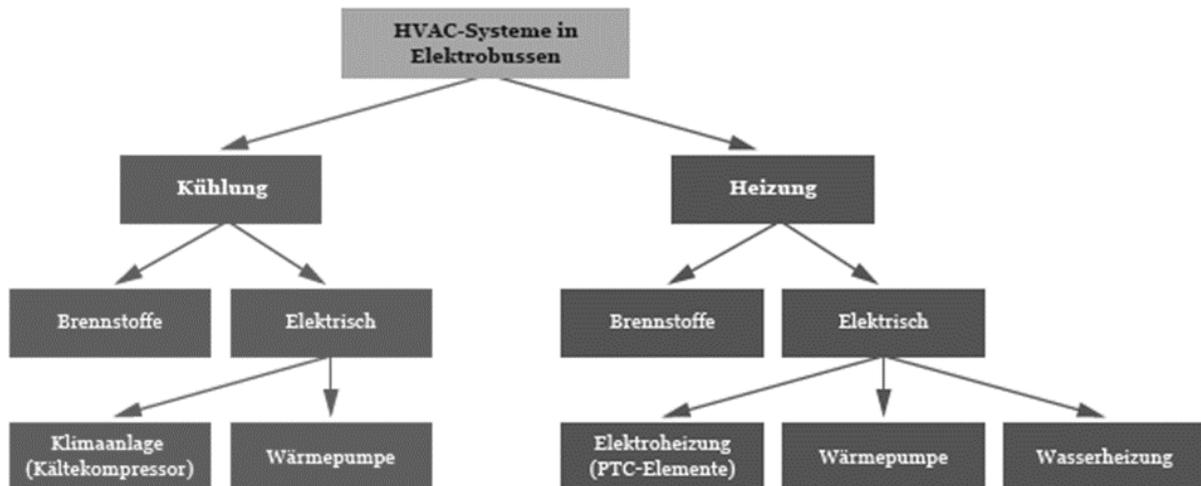


Abbildung 22: Übersicht über die Heating, Ventilation und Air Conditioning (HVAC)-Systeme in Elektrobussen<sup>1</sup>

### Wärmepumpen

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

Seit dem Jahr 2013 sind die ersten Klimasysteme mit Wärmepumpen zum Heizen und Kühlen von Bussen in kleinen Stückzahlen verfügbar.<sup>2</sup> In den ersten Elektrobussen haben insbesondere die fehlende Verfügbarkeit, die hohen Kosten, das hohe Gewicht, der Platzbedarf und die fehlende technische Reife verhindert, dass ein Großteil der Fahrzeuge bereits mit Wärmepumpen ausgestattet war. In den letzten Jahren haben Komponentenhersteller die Produkte jedoch sukzessive weiterentwickelt und seit 2018 die zweite Generation von Wärmepumpen für Elektrobusse auf den Markt gebracht. Diese werden nun in Serie produziert und in modernen Elektrobussen eingesetzt.<sup>3</sup> Im Vergleich zur vorherigen Wärmepumpengeneration wurden die neuen Modelle hinsichtlich der Effizienz, Leistungsabgabe und möglicher Einsatzbereiche (Temperatur) verbessert.

<sup>1</sup> Vgl. <https://medium.com/@francesco.impari/challenges-for-air-conditioning-and-heating-hvac-solutions-in-electric-buses-d18fc33a0433>

<sup>2</sup> Vgl. <https://www.ki-portal.de/9748/premiere-fur-e-bus-klimasystem-mit-integrierter-waermpumpe/>

<sup>3</sup> Vgl. <https://www.electrive.net/2019/02/23/konvekta-baut-produktion-fuer-co2-waermpumpe-aus/>

Ein wichtiges Element einer Wärmepumpe ist das verwendete Kältemittel. Als Kältemittel werden in Wärmepumpen üblicherweise R134a, R1234yf, R449A und R744 (CO<sub>2</sub>) verwendet, wobei CO<sub>2</sub>-Wärmepumpen erst in den letzten Jahren auf den Markt gekommen sind. Herkömmliche R134a-Wärmepumpen weisen im Bereich unter 0°C jedoch nur eine geringe Effizienz auf, können deshalb bei niedrigen Außentemperaturen keine ausreichende Wärmeleistung zur Verfügung stellen und sind daher im Winter auf Zusatzheizer angewiesen. Der Umstieg von R134a zu CO<sub>2</sub> als Kältemittel soll aufgrund der thermodynamischen Eigenschaften von CO<sub>2</sub> insbesondere im Temperaturbereich unter 5°C eine höhere Effizienz und somit eine deutlich größere Temperaturspanne sowie höhere Heizleistungen bei niedrigen Temperaturen ermöglichen (siehe Abbildung 23).<sup>1</sup>

Eine weitere positive Eigenschaft des Umstiegs vom Kältemittel R134a auf CO<sub>2</sub> liegt in dem um den Faktor 1.430 geringeren Treibhauspotenzial (GWP100 – global warming potential).<sup>2</sup> Seit dem 1. Januar 2017 darf in Klimaanlage von Kraftfahrzeugen der Klassen M<sub>1</sub> und N<sub>1</sub> außerdem kein Kältemittel mehr mit einem Treibhauspotenzial über 150 eingesetzt werden. Dies trifft jedoch bisher noch nicht für Busse mit einer Kapazität von mehr als 8 Sitzplätzen zu (Fahrzeugklassen M<sub>2</sub> und M<sub>3</sub>).

Neben den beschriebenen Vorteilen weisen aktuelle CO<sub>2</sub>-Wärmepumpen aber auch spezifische Nachteile auf. Aufgrund der hohen benötigten Systemdrücke von bis zu 135 bar (R134a bis zu 25 bar – relativ) müssen die Anlagen druckbeständig und somit schwer gebaut sein, was zugleich höhere Bauteilkosten mit sich bringt. Außerdem ist der praktische Einsatz bei extrem hohen Umgebungstemperaturen von über 40 °C heutzutage noch eingeschränkt.

Trotz der spezifischen Nachteile scheint die technologische Reife in Verbindung mit den erzielbaren Effizienzvorteilen gegenüber herkömmlichen HVAC-Konzepten den Markthochlauf der Wärmepumpen zu fördern. Mit dem Einsatz von CO<sub>2</sub> als zukunftsfähigem Kältemittel (R744) und den fortschreitenden Effizienzverbesserungen sind CO<sub>2</sub>-Wärmepumpen mittlerweile in Mitteleuropa prinzipiell als ganzheitliches Thermomanagement zum Heizen und Kühlen für Elektrobusse einsetzbar. Je nach Einsatzbedingungen können Elektrobusse mit modernen Wärmepumpen deshalb prinzipiell als Stand-Alone HVAC-System eingesetzt werden.<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> <https://www.nfz-messe.com/de/news/heiz-und-klimatechnik-der-naechste-evolutionsschritt-2877.html>

<sup>2</sup> [https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29\\_1.pdf](https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf)

<sup>3</sup> [https://www.konvekta.de/uploads/pics/Folder\\_CO2\\_WP\\_0916\\_02.pdf](https://www.konvekta.de/uploads/pics/Folder_CO2_WP_0916_02.pdf)

Ein beispielhafter Vergleich der Energieverbräuche verschiedener Heizkonzepte in Abhängigkeit von der Außentemperatur eines 12-m-Stadtbusses veranschaulicht die oben beschriebenen Effizienzvorteile (siehe folgende Abbildung). Für den Vergleich wird hierzu eine CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe der neuesten Generation mit einer Diesel- und einer Elektroheizung verglichen. Dabei ist zu erkennen, dass die Wärmepumpe über das gesamte Temperaturspektrum von -20°C bis +5°C deutliche Effizienzvorteile gegenüber den beiden übrigen Heizkonzepten aufweist. Die Effizienzvorteile sinken zwar bei niedrigeren Temperaturen, die CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe weist jedoch auch in diesem Bereich noch eine hohe Energieeffizienz auf. Im Vergleich zur klassischen Elektroheizung können mit der CO<sub>2</sub>-Wärmepumpe Einsparungen in Höhe von rund 45 % erreicht werden.

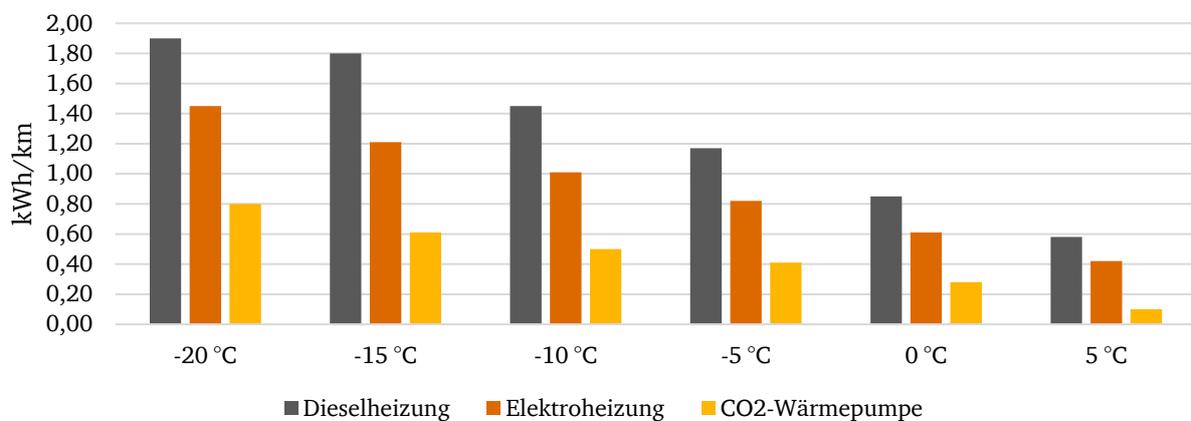


Abbildung 23: Vergleich der Energieverbräuche unterschiedlicher Heizkonzepte<sup>1</sup>

<sup>1</sup> [https://www.konvekta.de/uploads/pics/CO2\\_Waermepumpe\\_fuer\\_Busse\\_dt\\_6Seiter\\_eBook\\_0919.pdf](https://www.konvekta.de/uploads/pics/CO2_Waermepumpe_fuer_Busse_dt_6Seiter_eBook_0919.pdf)

## D. Energiezuführung

### I. Elektrische Busse

#### 1. Ladestrategien für elektrische Busse

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

#### Laden im Depot

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

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

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

## Gelegenheitsladen bzw. Laden auf der Linie

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

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

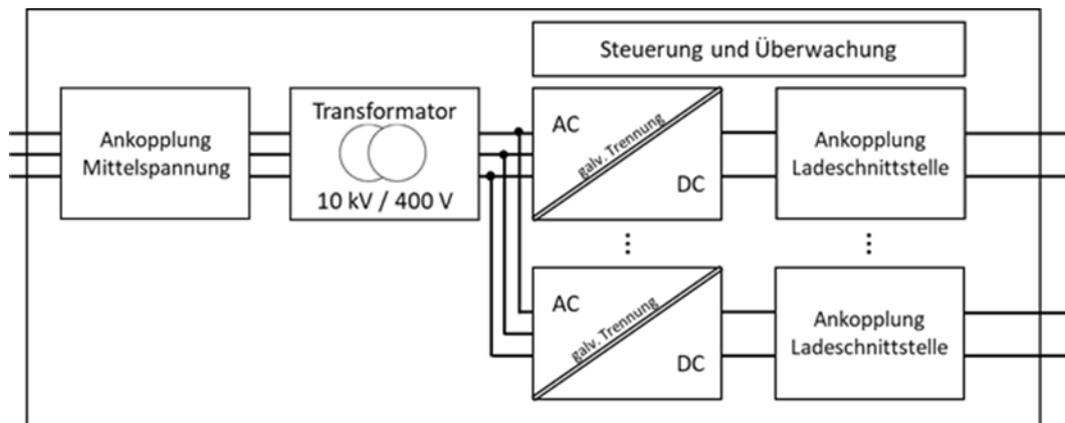
Die dezentrale Platzierung der Ladesysteme macht es häufig erforderlich, Infrastruktur im innerstädtischen Bereich zu installieren und an das Energienetz anzubinden. Aufgrund der dichten Bebauung und fehlenden Energienetzkapazitäten, kann dies eine besondere Herausforderung darstellen. Vorteilhaft sind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

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

## 2. Aufbau der Ladeinfrastruktur

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

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



**Abbildung 24: Schematischer Aufbau der elektrischen Ladeinfrastruktur**

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

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

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

Das Ladesystem ist über standardisierte Ladeschnittstellen an das Fahrzeug und typischerweise auch an ein Back-End System angebunden. Die Fahrzeug-Kommunikationsschnittstelle ist dabei physisch in die Ladeschnittstelle integriert. Die Back-End Anbindung erfolgt über Netzwerk-Protokolle (Ethernet). Der Informationsaustausch läuft direkt zwischen Fahrzeug und Ladepunkt (Sollwerte Ladung) bzw. zwischen Ladepunkt und Back-End (externe Grenzwerte und Freigaben)

ab. Darüber hinaus übernimmt die Ladestation aufgrund der zentralen Position die Informationsübermittlung zwischen Back-End System und Fahrzeug (z. B. Statusinformationen).

Überwachungs- und Sicherheitsfunktionen sind durch Normen und Richtlinien vorgegeben. Überwacht werden sicherheitsrelevante Parameter wie Stromwerte, Isolationswerte, Abriss der Kommunikationsverbindung und ähnliches, um Ladevorgang und Betrieb als fehlerfrei zu identifizieren. Bei kritischen Fehlern wird ein Ladevorgang umgehend unterbrochen und das Ladesystem in einen sicheren Zustand gebracht (vergleichbar mit einer Not-Aus Routine). Darüber hinaus sind Ladesysteme gesamtheitlich so ausgeführt, dass keine spannungsführenden Teile berührt werden können. Ladestecker sind während dem Ladevorgang verriegelt, so dass ein versehentliches Abziehen des Kontakts unmöglich ist. Selbst wenn mutwillig der Stecker hinausgebrochen wird, führt der Abriss der Kommunikationsverbindung zu einer sofortigen Systemabschaltung.

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

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

### **3. Ladeschnittstellen**

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

- Nachladung mittels Steckkontakt (ähnlich dem Pkw-Bereich) oder
- Nachladung per Pantograph (ähnlich der Straßenbahn).

## Nachladung per Steckkontakt

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



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

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

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

Typischerweise werden manuelle Steckkontaktlösungen für elektrische Konzepte eingesetzt, die über eine geringe Ladefrequenz verfügen. Die vergleichsweise geringen Kosten rechtfertigen den manuellen Aufwand zum Kontaktschluss. Weit verbreitet ist diese Lösung bei Konzepten mit Depotladung, wobei die Dauer des Kontaktschlusses und Ladezeit (aufgrund vergleichsweise geringer Ladeleistung) eine eher untergeordnete Rolle spielen. Es ist jedoch anzunehmen, dass bei wei-

terer Verbreitung von E-Mobilität (z. B. flottenweite Anwendung) manuelle Kontaktschlussverfahren für E-Busse nicht zwingend die Ideallösung für die Depotladung darstellen. Hintergrund dafür ist primär der benötigte Platzbedarf für Ordnungssystem, Stecker und Ladekabel im Parkraum der Fahrzeuge. Bei aufgesteckter Schnittstelle ragt das Ladekabel noch etwa 400 mm nach außen. Darüber hinaus stellt die zusätzliche (körperliche) Belastung für das Bedienpersonal und die Sicherstellung der Fahrzeugladung (z. B. Steckkontakt durch Fahrer nicht korrekt geschlossen) einen Aspekt dar, der sich besonders bei größeren Flotten negativ bemerkbar machen kann.

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

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

### Nachladung per Pantograph

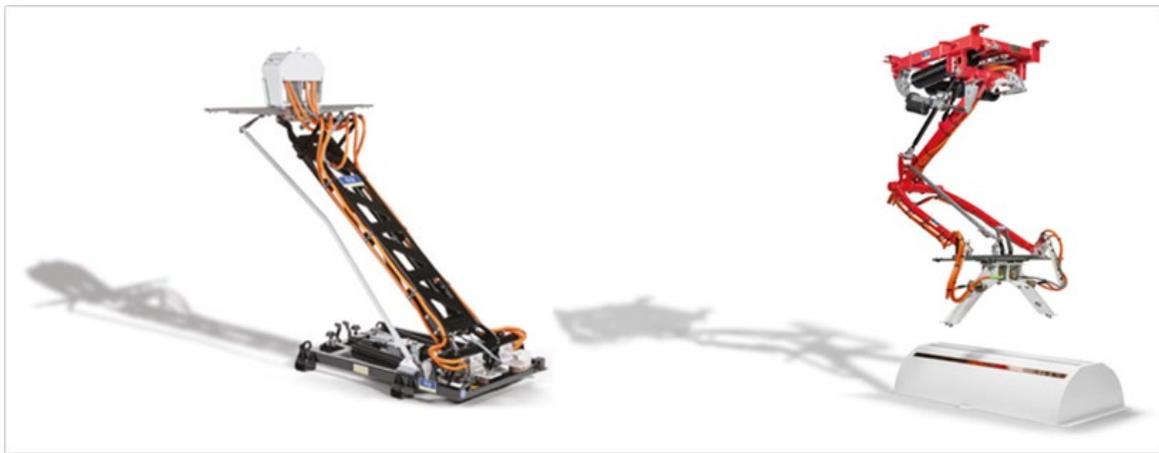
Über eine Pantographenlösung können sowohl Overnight als auch Opportunity Charging Konzepte geladen werden. Der hauptsächliche Anwendungsbereich liegt heute im Feld der Opportunity Charging Konzepte. Aufgrund Robustheit, Verbreitung, Kosten und Handhabung ist davon auszugehen, dass Pantographensysteme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

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

Pantographensysteme können in zwei Unterkategorien geordnet werden: Schienen- und Kontaktstift-Systeme. Die Schienensysteme sind der Bahntechnik sehr ähnlich. Auf Pantograph-Seite sind die Kontakte als Kohlenstoff-Schienen in ca. 5 cm Breite und Längen zwischen 30 und 50 cm ausgeführt. Auf der Gegenseite sind Kupferschienen verbaut, die rechtwinklig zu den Kohlenstoffschienen ausgerichtet sind. Durch die rechtwinklige Ausrichtung und Länge der Schienen wird

eine hohe Positionstoleranz des Fahrzeuges erreicht und eine aufwendige Positionskorrektur ist nicht notwendig. Sobald das Fahrzeug in der markierten Stellfläche parkt, kann der Kontaktvorgang eingeleitet werden, wobei der Pantograph entweder vom Busdach nach oben zu den Ladeschienen ausgefahren oder umgekehrt von der Ladestation auf ein Ladeschienensystem auf dem Busdach abgesenkt wird.

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



**Abbildung 26: Schunk Pantograph SLS 101 und SLS 201 (Bild: Schunk Transit Systems)**

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

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

## II. Wasserstoffbusse

### 1. Wasserstoff-Tankstellen

Um den notwendigen Wasserstoff für den Einsatz bereitzustellen, werden H<sub>2</sub>-Busse ähnlich dem Dieselbus an H<sub>2</sub>-Tankstellen betankt. Der Wasserstoff wird durch Überströmen aus den Tankstellen in die Fahrzeugtanks geleitet. Dafür muss auf Tankstellenseite ein höherer Druck als im Fahrzeugtank gewährleistet sein.

Wie in folgender Abbildung ersichtlich ist, ist der Tankvorgang dem des Dieselbusses sehr ähnlich. Die Verbindung zwischen Zapfsäule und Fahrzeug wird über eine Schlauch- und Kupplungsverbindung aufgebaut. Auf wenn für H<sub>2</sub>-Fahrzeuge wenige zusätzliche Handgriffe erforderlich sind, stellt das Verfahren keinen nennenswerten Mehraufwand gegenüber der Dieselbetankung dar.



**Abbildung 27: Betankung eines Wasserstoffbusses<sup>1</sup>**

Die abgebildete Füllkupplung wird als Schnellbetankungssystem für Busse und Lkw im Nutzfahrzeugsektor eingesetzt. Für den Tankvorgang wird diese aufgesetzt und verriegelt, bevor das Durchflussventil auf der Kupplung manuell geöffnet wird. Der eigentliche Betankungsvorgang wird abschließend per Knopfdruck an der H<sub>2</sub>-Tankstelle eingeleitet.

---

<sup>1</sup> Vgl: <https://www.faz.net/aktuell/rhein-main/region-und-hessen/treibstoff-fuer-zwei-geliehene-busse-16655357.html>

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

Aufgrund der Druckunterschiede müssen für H<sub>2</sub>-Busse und H<sub>2</sub>-Pkw unterschiedliche Füllkupplungen eingesetzt werden. Beide Fahrzeugvarianten können nicht an der derselben Tankkupplung befüllt werden. Wenn beide Varianten oder Druckpegel aus einem einzigen Ladepunkt bedient werden sollen, muss die Zapfstelle mit zwei Kupplungsabgängen versehen werden.

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

## 2. Farbenlehre – Arten von Wasserstoff

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

**Grüner** Wasserstoff ist emissionsfrei erzeugter Wasserstoff. Bei der Produktion aus regenerativen Energiequellen, wie Photovoltaik oder Windkraft, fallen keine Treibhausgasemissionen an.

**Grauer** Wasserstoff wird über Dampfreformierung aus fossilen Brennstoffen gewonnen und ist entsprechend nicht klimaneutral. Unter hoher Hitze wird Erdgas in H<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> umgewandelt, wobei Emissionen in der Größenordnung von 10 t CO<sub>2</sub> pro 1 t erzeugtem H<sub>2</sub> entstehen.

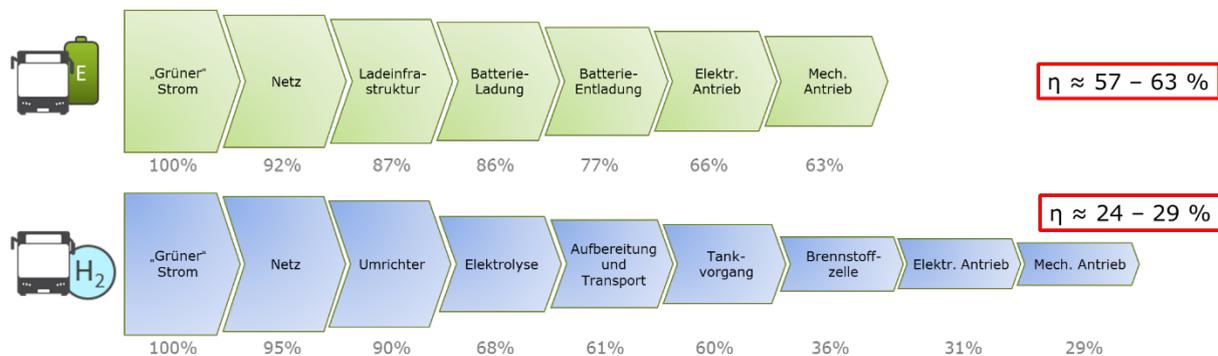
Als **blauer** Wasserstoff wird grauer Wasserstoff bezeichnet, bei dem das erzeugte CO<sub>2</sub> über Abscheidungs- und Speicherverfahren aufgefangen wird, bevor es in die Atmosphäre gelangt. Bilanzial wird blauer Wasserstoff als CO<sub>2</sub>-neutral betrachtet. Jedoch wird das Prinzip der CO<sub>2</sub>-Sequestrierung häufig insgesamt sehr kritisch betrachtet, da das CO<sub>2</sub> Problem hier nicht gelöst, sondern verlagert wird.

**Türkiser** Wasserstoff wird durch thermische Spaltung von Methan (Methanpyrolyse) gewonnen. Bei diesem Prozess entsteht kein CO<sub>2</sub>, sondern fester Kohlenstoff. Sofern der erforderliche Hochtemperaturreaktor aus erneuerbaren Energiequellen betrieben wird und die dauerhafte Bindung des Kohlenstoffs sichergestellt ist, wird türkiser Wasserstoff als klimaneutral betrachtet.

## E. Technologievergleich

### I. Wirkungsgradkette

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



**Abbildung 28: Wirkungsgradverkettung Batterie- und Brennstoffzellenbus**

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

Darüber hinaus entsteht Wasserstoff als Nebenprodukt in der chemischen Industrie (bspw. Chlorid-Produktion). Dieser wird in diversen Anwendungen bereits als Energieträger für Mobilitätsanwendungen genutzt, wie beispielsweise im Großraum Hürth bei Köln. Jedoch sind die Mengen an Wasserstoff als Überschussprodukt nicht ausreichend, um einen flächendeckenden Einsatz von H<sub>2</sub>-Bussen zu bedienen.

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

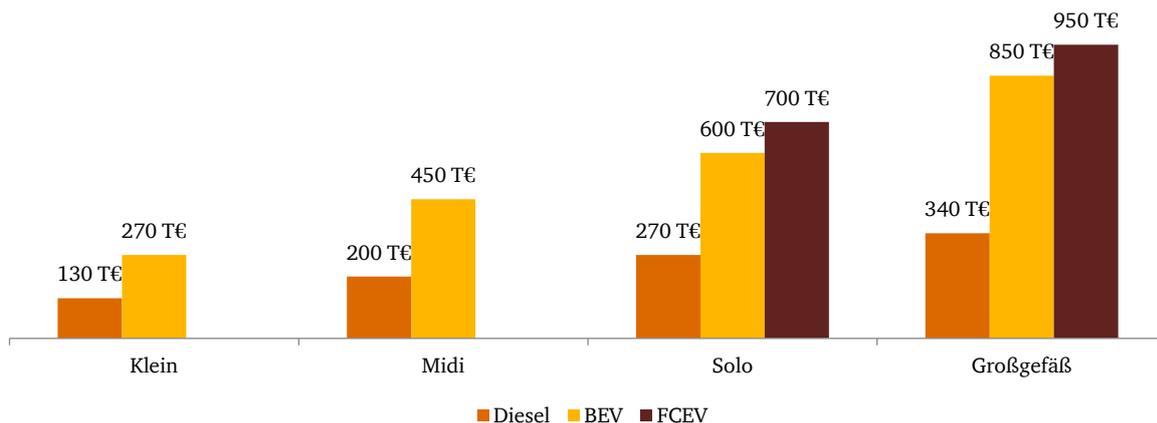
und günstige Batteriespeicher (Regelenergiespeicher) und einer besseren Energieverteilung tatsächlich existent sein werden.

## II. Wirtschaftlichkeit

Zwischen den betrachteten Technologien existieren signifikante Abweichungen zwischen

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

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



### Abbildung 29: Anschaffungskosten für Fahrzeuge im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

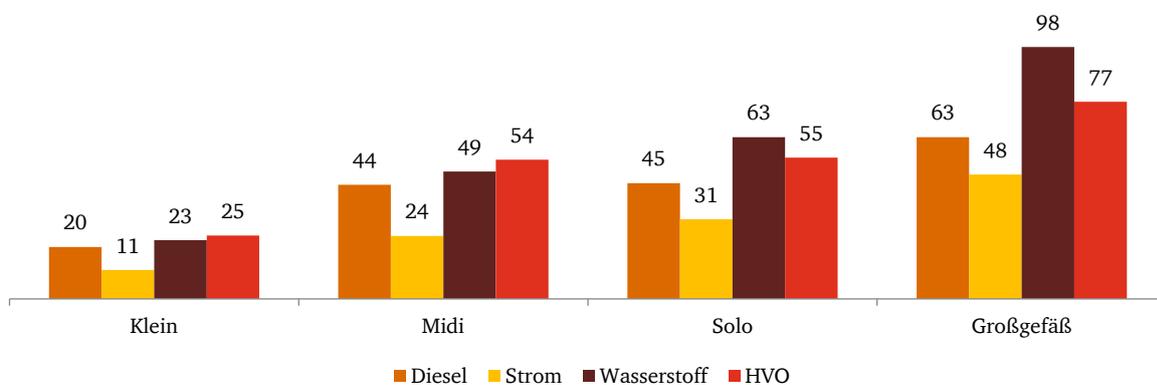
Die Investitionskosten für Lade- und Betankungsinfrastruktur stellen einen weiteren Kostentreiber dar. Diese fallen exklusiv bei dem BEV- und dem FCEV-Szenario an.

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

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

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

- Diesel: 1,46 €/l
- Strom: 0,26 €/l
- Wasserstoff: 8,22 €/kg
- HVO: 1,78 €/kg



**Abbildung 30: Treibkraftkosten auf 100 km je Szenario in Euro**

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

Eine detaillierte Betrachtung der Wirtschaftlichkeit wird in Abschnitt H.I vorgenommen.

### III. Umweltbewertung

Die Umweltbewertung erfolgt nachfolgend auf Grundlage des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes pro 100 km eines Solobusses mit der jeweiligen Antriebsart. Für Diesel wird ein CO<sub>2</sub>-Ausstoß von 2,61 kg CO<sub>2</sub>/l angesetzt. Bei einem durchschnittlichen Verbrauch von 30,9 l/100 km ergibt sich ein CO<sub>2</sub>-Ausstoß von 80,6 kg CO<sub>2</sub> je 100 km.

Der Strommix hat einen erheblichen Einfluss auf den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von BEV sowohl bei der Herstellung als auch während der Nutzung. Aktuell verursacht der deutsche Strommix Emissionen von etwa 400 g CO<sub>2</sub>/kWh, was bei einem Verbrauch von 119 kWh/100 km pro Solobus etwa 47,6 kg CO<sub>2</sub> pro 100 km entspricht. Zukünftig soll die CO<sub>2</sub>-Intensität des Strommixes sinken, um Klimaziele zu erreichen. Prognosen wie aus dem Ariadne-Projekt sehen für 2030 eine CO<sub>2</sub>-Intensität von 30-75 g CO<sub>2</sub>/kWh vor. Unter der Annahme von 75 g CO<sub>2</sub>/kWh für 2030, würden die Emissionen auf 8,9 kg CO<sub>2</sub> pro 100 km reduziert werden.

Die Emissionen von Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV) hängen stark vom Wasserstoffverbrauch und dem CO<sub>2</sub>-Fußabdruck des verwendeten Wasserstoffs ab. Der Verbrauch aktueller wasserstoffbetriebener Solobusse liegt bei etwa 8 kg Wasserstoff pro 100 km. Grauer Wasserstoff aus Erdgas hat hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen und wird nicht weiter betrachtet. Blauer Wasserstoff, ebenfalls aus Erdgas, verwendet CO<sub>2</sub>-Abscheidung, hat aber immer noch signifikante Emissionen und erhöhten Erdgasverbrauch. Grüner Wasserstoff wird durch Elektrolyse mittels Strom erzeugt, wobei die Emissionen stark von der CO<sub>2</sub>-Intensität des Strommixes abhängen. Der Transport von Wasserstoff, ob per Schiff oder Pipeline, verursacht zusätzliche Energieverluste. Für Import-Wasserstoff wird eine CO<sub>2</sub>-Intensität von 75 g CO<sub>2</sub>/kWh für 2030 angenommen. Der Wasserstoff muss zudem gespeichert und verteilt werden, was zusätzlichen Energiebedarf und Emissionen verursacht. Insgesamt ist die Speicherung und Verteilung von Wasserstoff energieintensiv, was bei der Bewertung der Klimafreundlichkeit von FCEV berücksichtigt werden muss.

Zusammengefasst benötigt ein Brennstoffzellenfahrzeug etwa 8 kg Wasserstoff für 100 km, was 266,7 kWh entspricht. Für die Speicherung, Distribution und Betankung fallen zusätzliche 12 % Hilfsenergiebedarf an, also 4 kWh Strom pro kg Wasserstoff. Bei Nutzung von grünem Strom im Produktionsland und einem deutschen Strommix von 75 g CO<sub>2</sub>/kWh für die Hilfsenergie, entstehen Betriebsemissionen von 20,0 kg CO<sub>2</sub> pro 100 km. Wenn der Wasserstoff in Deutschland erzeugt wird, entfallen die Transportverluste und es werden 54,8 kWh Strom pro kg Wasserstoff benötigt, was zu Emissionen von 32,9 kg CO<sub>2</sub> pro 100 km führt.

## F. Untersuchungsgegenstand

### I. Analyse des aktuellen Fuhrparks der regiobus

#### Anzahl Fahrzeuge und Fahrzeuggrößen

Der Fuhrpark der regiobus besteht zum Zeitpunkt der Erhebung Ende des Jahres 2023 aus Bussen mit konventionellem Diesel-Antrieb sowie einem Solobus und einem Midi-Bus mit batterieelektrischem Antrieb. Dabei ist der Großteil der Flotte inklusive der Reservefahrzeuge der Fahrzeugbauart Gelenk (71 Fahrzeuge) mit einer Länge von 18 bis 21 m zu zuordnen. Daneben befinden sich 92 Solobusse mit einer Länge von 12 bis 13,2 m bei der regiobus im Einsatz. Zudem besteht der Fuhrpark aus vier Midi-Bussen mit einer Länge von 10 m sowie drei Fahrzeugen mit einer Länge zwischen 6 und 8,7 m, welche unter der Gefäßgröße „Mini“ zusammengefasst werden. Die Erarbeitung verschiedener Migrationspfade erfolgt somit insgesamt für 170 Mini-, Midi-, Solo- und Gelenkbusse.<sup>1</sup> Die folgende Abbildung zeigt den regiobus Fuhrpark in seiner Struktur nach Fahrzeuggrößen.

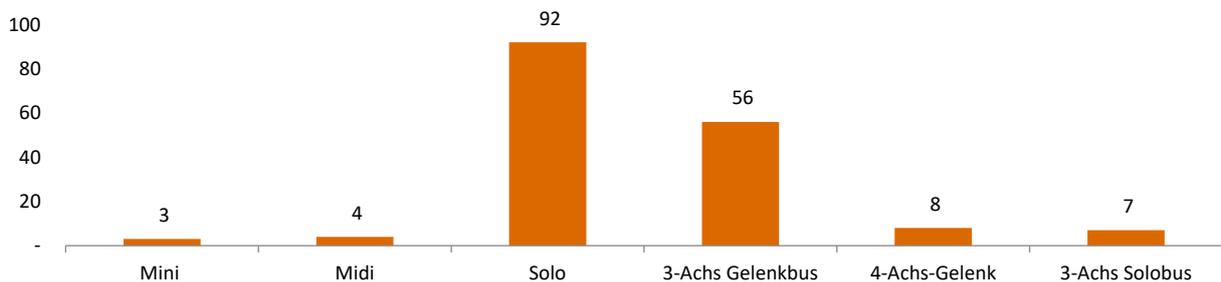


Abbildung 31: Fuhrparkstruktur: Anzahl Fahrzeuge nach Fahrzeuggrößen der regiobus

Ein Großteil der Fahrzeuge der Flotte stammen aus der Produktion des Herstellers EvoBus (Mercedes-Benz).

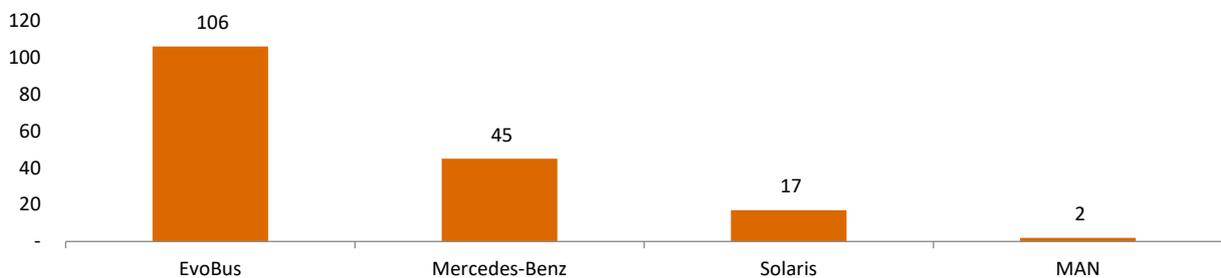
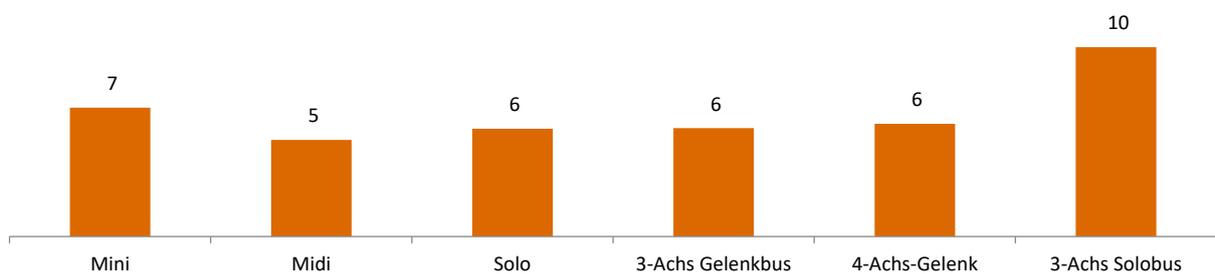


Abbildung 32: Fuhrparkstruktur: Übersicht der Fahrzeugklassen der regiobus

<sup>1</sup> Bei der Analyse wurde der zu diesem Zeitpunkt vorgehaltene Fuhrpark der regiobus zugrunde gelegt.

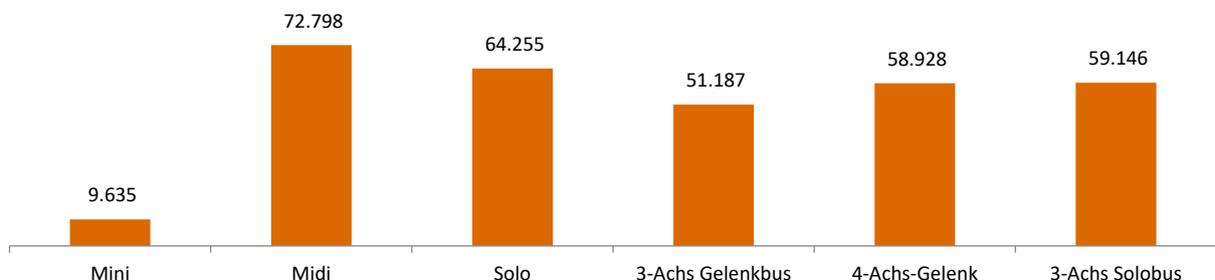
### Altersstruktur und Fahrleistungen

Der Fuhrpark der regiobus ist durch eine über die Nutzungsdauer gleichmäßig verteilte Altersstruktur geprägt. Die 3-Achs Solobusse in der Flotte sind im Durchschnitt deutlich älter als die sonstigen Gefäßgrößen. Dies ist im Wesentlichen auf die konzentrierte Beschaffung in den Jahren 2012 und 2013 zurückzuführen, über die in Summe sechs der insgesamt sieben im Fuhrpark befindlichen 3-Achs-Solobusse zugegangen sind. Das Durchschnittsalter aller Fahrzeuge liegt bei ca. sechs Jahren. 13 Fahrzeuge sind zum Stand der Erhebung Ende des Jahres 2023 dabei bereits zwölf Jahre oder länger im Einsatz.



**Abbildung 33: Fuhrparkstruktur: Durchschnittsalter der Fahrzeugklassen der regiobus**

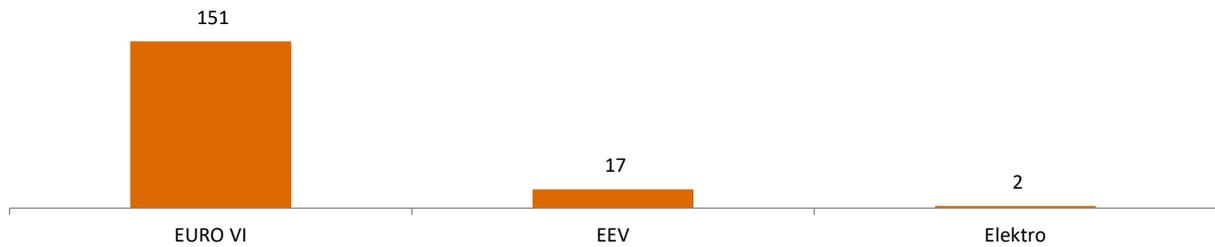
Pro Jahr legen die Solobusse bei regiobus ca. 64.300 km zurück, wohingegen die Gelenkbusse eine Fahrleistung von ca. 52.200 km erreichen.



**Abbildung 34: Fuhrparkstruktur: Durchschnittliche Fahrleistung der Fahrzeugklassen der regiobus**

### Emissionsklassen

Alle Fahrzeuge der Flotte der regiobus weisen die Emissionsklasse EEV, EURO VI oder Elektro auf. Seit 2014 wurden ausschließlich Fahrzeuge der Emissionsklasse EURO VI und Elektro beschafft. 89 % der Flotte der regiobus besitzt aktuell die Emissionsklasse EURO VI. Ende 2025 werden gemäß Beschaffungsplanung keine Fahrzeuge der Emissionsklasse EEV mehr im Fuhrpark sein. Zudem wurde 2018 der erste batterieelektrische Mini-Bus und 2022 der erste batterieelektrische Solobus beschafft.



**Abbildung 35: Fuhrparkstruktur: Emissionsklassen im Fuhrpark der regiobus**

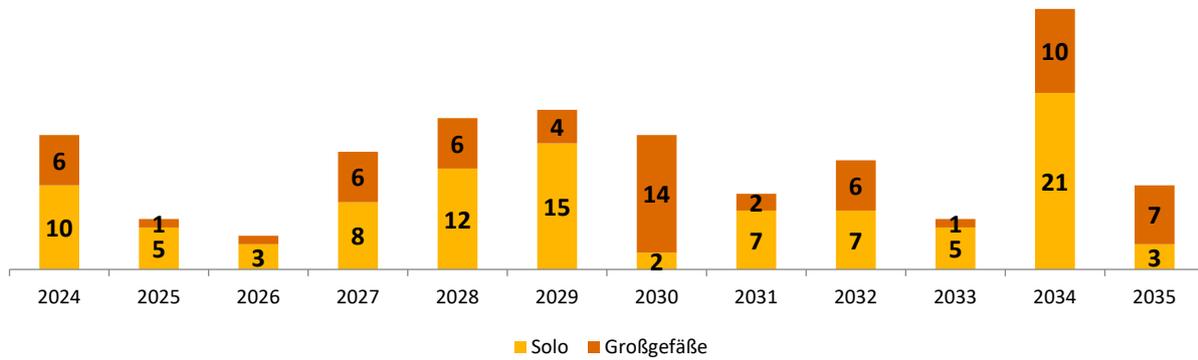
Die heutige Fuhrparkstruktur wird im Folgenden als Grundlage zur Ableitung einer Beschaffungsplanung bis zum Jahr 2035 angenommen.

## II. Ableitung Beschaffungsplanung bis 2035 für die regiobus

Die Beschaffungsplanung der regiobus für die Jahre 2024 bis 2035 ist wesentlich für die Erstellung eines Migrationspfades der Flottentransformation mit emissionsfreien Bussen. 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 92 Solo-, 71 Gelenk-, vier Midi- und drei Mini-Busse soll beibehalten werden,
- Neuanschaffungen dienen lediglich dem Ersatz von Altfahrzeugen,
- ab 2024 werden 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 36: Beschaffungsplanung der regiobus bis zum Jahr 2035: Anzahl Fahrzeuge nach Bauart**

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.

## G. Verkehrlich-technische Betrachtung

### I. Methodik Einsatz- und Infrastrukturanalyse

#### 1. Umlaufuntersuchung

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

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

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

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

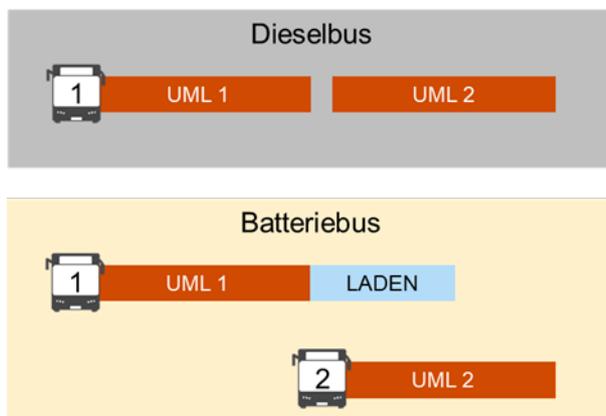
Eingesetzt wird ein Softwaretool für Energieberechnungen für Elektrobustumläufe (Batteriebus und H<sub>2</sub>-Bus). Das Tool ist eine Eigenentwicklung von EEBC und wurde bereits erfolgreich in diversen vergleichbaren Untersuchungen eingesetzt.

## 2. Umlaufverkettung

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

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

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



**Abbildung 37: Schema Umlaufverknüpfung**

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

Im Depot wird eine konstante Ladeleistung von 130 kW angenommen, was einem Standard-Durchschnittswert bei Ladung über die CCS 2.0 Schnittstelle entspricht.

### Ausführung der Umlaufverkettung

Die Umlaufverkettung erfolgt auf Basis der bereitgestellten Umlauflisten. Verkettungen können nur für Umläufe ausgeführt werden, für die derselbe Fahrzeugtyp angegeben ist. Darüber hinaus liegen keine Einschränkungen hinsichtlich des Fahrzeugtyps vor. Damit können beispielsweise alle Solobusumläufe mit einem beliebigen Solobusumlauf verkettet werden.

Die Verkettung erfolgt unter Berücksichtigung zweier Zielgrößen: Minimale Flottengröße und (bei Notwendigkeit) maximale Ladezeiten. Dafür wird die Verkettung zunächst bei unterstelltem Dieselantrieb ausgeführt. Da im Dieselmotor keine Zwischenladungen erforderlich sind, kann so die minimale Fahrzeugmenge zur Erfüllung aller Einzelumläufe berechnet werden. Dieser Wert wird als Vergleichswert herangezogen, gegenüber dem Größere notwendige Fahrzeugflotten bei Alternativtechnologien als ‚Mehrbedarf‘ bezeichnet werden. Primäres Ziel der Umlaufverkettung ist es, den Mehrbedarf auf ein Minimum zu reduzieren. Darüber hinaus können Verkettungen stellenweise unterschiedlich ausgeführt sein, ohne die Fahrzeugmenge zu erhöhen. Bei Notwendigkeit wird die Verkettungsvariante gewählt, die für die betrachtete Teilflotte die besten Ladeintervalle zur Verfügung stellt.

Vielfach ergibt sich die Verkettung nach dem FIFO-Prinzip (First-In-First-Out). Der erste ankommende Umlauf wird mit dem ersten startenden Umlauf verkettet. Von dieser Struktur kann jedoch abgewichen werden. Der Nachvollziehbarkeit halber, sind die Umlaufverkettungen in Anlage 4) aufgeführt.

**Wichtig:** Die Umlaufverkettung ist im Rahmen der Machbarkeitsuntersuchung auf den Fahrzeugeinsatz limitiert. Sondernutzungen, wie geplante Werkstattmaßnahmen, sind nicht Teil der Umlauflisten und können hier nicht berücksichtigt werden. Die regiobus plant „ungenutzte“ Fahrzeuge vielfach für geplante Werkstattmaßnahmen, was hier vernachlässigt wird. Im Rahmen einer detaillierten Umsetzungsplanung sollte dieser Aspekt aufgegriffen und im Detail untersucht werden, wenn die Umsetzung konkreter geplant ist und die tatsächliche Auswirkung auf den Werkstattbetrieb gut nachvollziehbar ist. Im Rahmen der Untersuchung steht die allgemeine Machbarkeit und Transformierbarkeit der Fahrzeugflotte im Vordergrund, während die Werkstattplanung für einzelne Fahrzeuge und Einsätze in einer tieferen Detailebene angesiedelt ist. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass Werkstatt- und Ladeplanung in Konkurrenz stehen und im schlimmsten Fall ein Fahrzeugmehrbedarf entsteht, wenn aufgrund von Ladevorgängen oder Umlaufverkettungen Werkstattintervalle nicht ideal eingeplant werden können.

### 3. Lastgangoptimierung

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

Im ungesteuerten System beginnen Ladevorgänge unmittelbar nach Ankunft der Fahrzeuge und Schließen des Ladekontakts. Parallel ausgeführte Ladevorgänge summieren sich dabei zu einer steigenden Netzlast auf. Gleichzeitig hat die Amplitude des Lastgangs Einfluss auf die Tarifgestaltung des Energieversorger und die Systemkosten der Ladeinfrastruktur. Hohe Leistungswerte müssen vom Energieversorger bereitgestellt werden können. Auch wenn eine Lastspitze nur sehr kurzzeitig anliegt, müssen versorgerseitig entsprechende Netzreserven vorgesehen werden, was sich in der Preisgestaltung niederschlägt. Gleichzeitig müssen die Ladeinfrastruktur und insbesondere die Netzanschlusskomponenten für die maximale Leistung ausgelegt sein, was sich merklich auf die Systemkosten auswirkt.

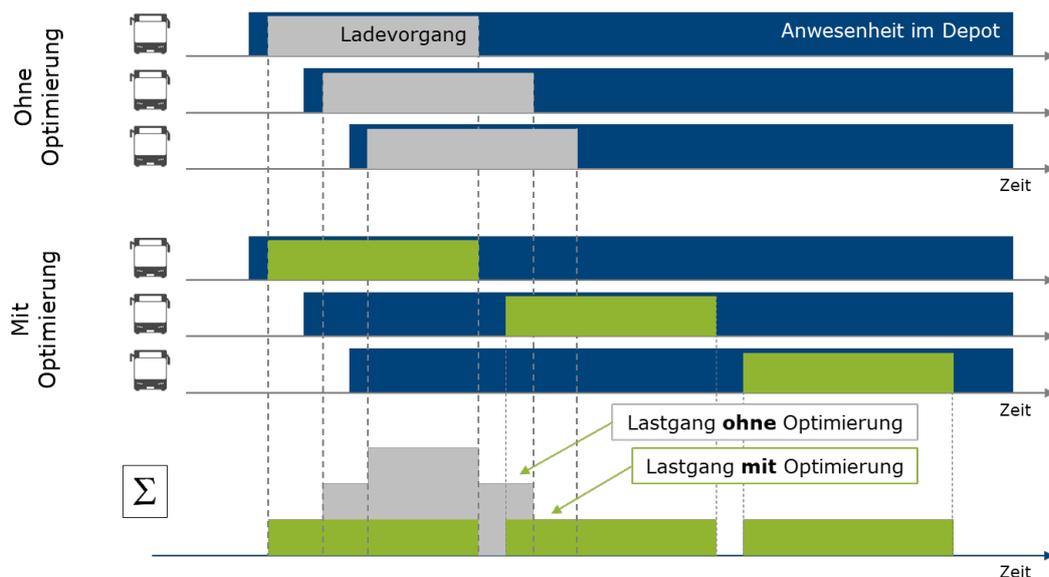


Abbildung 38: Prinzip Lastgangoptimierung

Durch zeitliche Verschiebung einzelner Ladevorgänge minimiert ein Lademanagementsystem die Lastspitze. Im Rahmen der Untersuchung wird dieser Vorgang manuell ausgeführt, während dies im Ladesystem selbst rechnergestützt automatisiert erfolgt. Angenommen wird hierfür eine konstante Ladekurve mit 130 kW Ladeleistung am Fahrzeug. Wie jedes Energiesystem weist auch die Ladeinfrastruktur Verluste auf, die hier primär auf Abwärmeverluste zurückgehen. Die Verluste der Ladeinfrastruktur zwischen Fahrzeug und Netzanbindung (Transformator, Leitungen, Ladegeräte, Schnittstellen) werden mit 10 % pauschal angesetzt. Auch wenn es hier in der Praxis herstel-

lerabhängige Abweichungen zu verzeichnen gibt, stellt ein Gesamtwirkungsgrad von 90 % erfahrungsgemäß einen guten Richtwert für die Ladeinfrastruktur dar.

#### 4. Berechnungsgrundlage und Prämissen

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

##### Fahrzeuggestaltung (Traktionsbatterie)

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

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

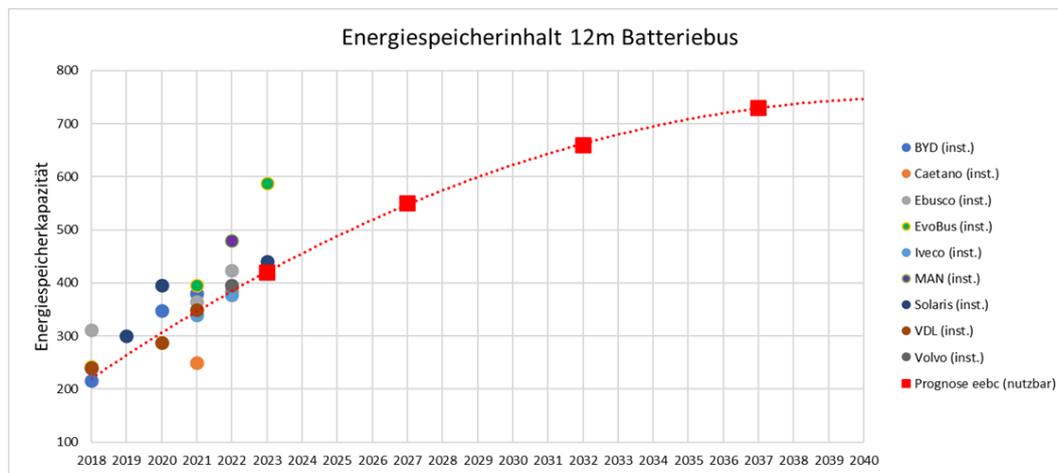


Abbildung 39: Beispiel Entwicklungsprognose Batterietechnik (inst. = installiert)

Wir legen Wert darauf, im Rahmen unserer Bewertung eine konservative Linie zu verfolgen und tendenziell pessimistische Prognosen als Grundlage für die Machbarkeitsbewertung zugrunde zu legen. Aus diesem Grund setzen wir feste Kapazitätswerte an, die immer für einen Fünfjahreszeitraum als Grenzwert betrachtet werden. Daraus ergibt sich ein abgestufter Entwicklungsverlauf mit Entwicklungssprüngen am Ende des Zeitintervalls. Dabei bewegen sich alle angesetzten Grenzwerte stets unter dem antizipierten oben dargestellten Verlauf.

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

Fahrzeugtyp	Kapazität bis 2027	Kapazität 2028-2032	Kapazität 2033-2037	Kapazität 2038-2042
Solobus	400 kWh	480 kWh	580 kWh	640 kWh
Gelenkbus	470 kWh	565 kWh	680 kWh	750 kWh
Midibus	280 kWh	340 kWh	410 kWh	455 kWh
Capabus	470 kWh	565 kWh	680 kWh	750 kWh
Sprinter	95 kWh	115 kWh	140 kWh	155 kWh
Pkw	95 kWh	115 kWh	140 kWh	155 kWh

**Tabelle 3: Kapazitätsprognose (nutzbar in kWh) für versch. BEV-Fahrzeugtypen mit CCS-Schnittstelle**

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

Darüber hinaus kann die Batteriekapazität bei verbauten Pantographenschnittstellen geringer ausfallen als für Fahrzeuge mit Steckerladung. Dies ist letztlich abhängig von der Bauweise der Fahrzeuge. Erst in aktuellen Baureihen wird eine integrierte Batteriebauweise verfolgt, bei der die Dachfläche als Bauraum für Pantographen erhalten bleibt. Darüber hinaus wird und wurde die Dachfläche als Bauraum für die Traktionsbatterien benötigt. Da Pantograph und Batterie um dieselben Flächen konkurrieren, kann eine Reduktion der Batteriekapazität bei Pantographenmodellen erforderlich sein. Wie aus den Zahlenwerten ersichtlich wird, ist das Prognosemodell jedoch sehr konservativ ausgelegt und wird regelmäßig ‚von der Realität überholt‘. Entsprechend ist insbesondere perspektivisch davon auszugehen, dass die angesetzten Batteriekapazitäten auch mit Pantographenschnittstelle am Markt verfügbar sein werden.

## Ladetechnik

Zugrunde gelegt wird eine marktübliche Depot-Ladeinfrastruktur mit CCS 2.0-Ladestecker.

Aufgrund der Strombegrenzung auf maximal 200 A (Ladestecker und Ladekabel ungekühlt) und einer typischen Batteriespannung von 650 V wird der Ladeleistungswert als Produkt beider Faktoren mit 130 kW berechnet. Die Ladeleistung wird während des Ladevorgangs mit 130 kW als konstant angenommen. Dieser Wert entspricht einem üblichen Standardwert für Batteriebusse mit CCS-Ladeschnittstelle.

Auch wenn die Ladeleistung an der CCS-Ladeschnittstelle orientiert ist, ist der Modellansatz schnittstellenunabhängig. Pantographensysteme erlauben zwar höhere Leistungswerte, jedoch sind höhere Ladeleistungen schlicht nicht erforderlich. Der Batterieentwicklungsprozess resultiert in stetig anwachsenden Reichweiten für batterieelektrische Busse, so dass bereits mit aktueller Technik ein Großteil aller Fahrzeugeinsätze auch mit Batteriebussen möglich ist. Insbesondere im Regionalbusverkehr wird die Notwendigkeit Energie „auf Linie“ zuzuführen zunehmend obsolet. Unter sehr anspruchsvollen Bedingungen, wie sehr schnellen Flottenumstellungen oder sehr stark ausgelasteten Innenstadtlinien mit hoher Taktfrequenz, kann die Pantographentechnik ein Mittel darstellen, um etwaige Fahrzeugmehrbedarfe zu vermeiden. Im Vorgriff auf die Ergebnisse kann hier bereits festgehalten werden, dass dies im betrachteten Einsatzgebiet nicht der Fall ist.

Gegenüber einer Ladung per Steckkontakt weisen Pantographen jedoch auch weitere Vorteile auf. Die dachseitige Schnittstellenausführung erlaubt eine platzeffiziente Abstellung der Fahrzeuge, da keine seitlich herausragenden Ladestecker und Ladekabel existent sind. Darüber hinaus minimiert der automatische Kontaktschluss den Bedarf manueller Eingriffe, was sich positiv auf Fehleranfälligkeit und Ergonomie am Arbeitsplatz auswirkt.

## Betrachteter Betriebstag

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

Die Auswahl des Betriebstages erfolgt anhand der Tagesgesamtfahrleistung aller Fahrzeuge. Die höchsten Werte liegen hier am „Freitag\_Schule“ vor, weshalb dieser Tag als Maßstab angesetzt wird.

## Einsatzumfeld

Die Topografieeinschätzung im Einsatzgebiet ist moderat (flach) ohne nennenswerte Steigungsanteile. Gegenüber dem Fahrbetrieb in der Ebene wird ein Mehrverbrauch von etwa 10 % berücksichtigt, wenn die entsprechenden Linien kundenseitig als leicht steigungslastig definiert wurden.

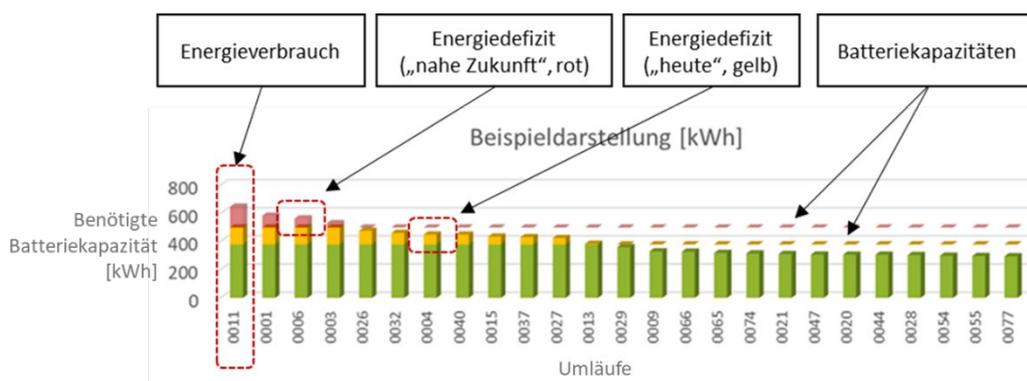
## 5. Grafische Darstellungen

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

### Machbarkeitsdarstellung Umläufe Batteriebus

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### Machbarkeitsdarstellung Umläufe Batteriebus mit vertauschten Achsen

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

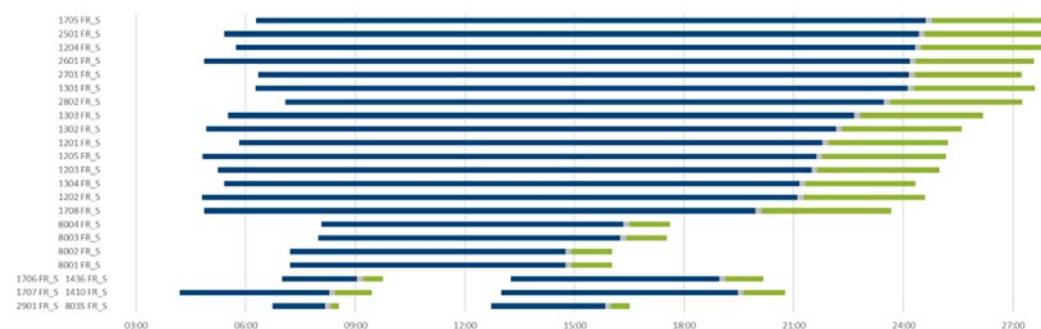


**Abbildung 41: Darstellung Energieverbrauch verschiedener Umläufe mit vertauschten Achsen (Beispieldarstellung)**

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

### Umlaufübersicht

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



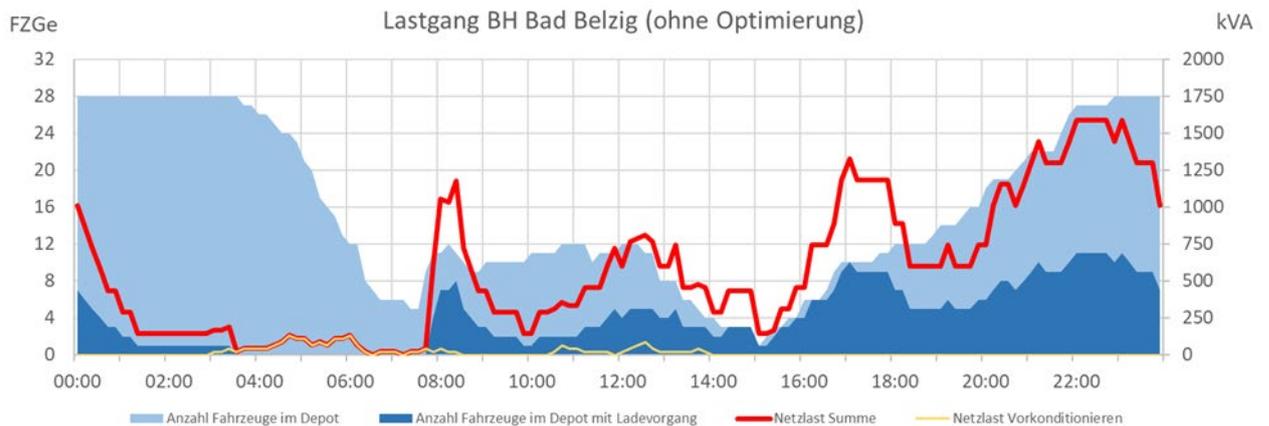
**Abbildung 42: Umlaufübersicht Beispieldarstellung**

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

In Blau sind die Fahrtzeiten der Einzelumläufe dargestellt. Die Balken beginnen bei Abfahrt ab Depot und Enden bei Ankunft im Depot. Hier dargestellt ist eine BEV-Variante, die nach Eintreffen

im Depot nachgeladen wird, was über den grünen Balken symbolisiert wird. Für Dieselbusse und FCEV entfällt der grüne Balken. In Grau ist eine zehninminütige Rangierzeit aufgeführt, die unmittelbar nach Ankunft im Depot beginnt.

### Lastgang



**Abbildung 43: Darstellung Lastgang**

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

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

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

### Zeitangaben in Grafiken

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

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

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

## II. Einsatzanalyse

### 1. Untersuchung der Einzelumläufe

Im ersten technischen Untersuchungsschritt werden die Einzelumläufe ins Auge gefasst. Als Einzelumlauf wird hier eine Fahrt betrachtet, die an einem Betriebshof startet und endet. Im Verlauf der Untersuchung werden diese Einzelumläufe zu Fahrzeugtagesumläufen verkettet.

Mit Fokus auf die Einzelumläufe kann zunächst ein erstes Bild der allgemeinen Machbarkeit erzeugt werden. Vereinfacht formuliert ist die Erstellung ‚machbarer‘ Fahrzeugtagesumläufe problematisch, wenn bereits der Großteil aller Einzelumläufe reichweitenkritisch bewertet werden muss. Das Bewertungsbild kann insbesondere in Hinblick auf die zur Diskussion stehenden emissionsfreien Antriebsalternativen – Batteriebus (BEV) und Brennstoffzellenbus (FCEV) – umfassend ausgewertet werden.

Mit Hinblick auf die technische Vorbewertung gilt, dass BEV aus kommerziellen Gründen grundsätzlich vorzuziehen sind, wenn diese technisch gleichwertig zu FCEV sind. Aufgrund der aktuellen Reichweitenvorteile von FCEV, stehen diese Modelle im Sinne einer „Notlösung“ zur Verfügung, wenn die Machbarkeit kritisch ist. In diesem Fall müssen merkliche Mehrkosten in Kauf genommen werden, um Reichweitenvorteile abzurufen.

In diesem Kontext gilt es zu beachten, dass der Reichweitenvorteil als zeitlich begrenzt aufgefasst wird. Auf dem Feld der Batterietechnik werden kontinuierlich Verbesserungen erreicht. Dieser Trend wird auch in den nächsten Jahren als anhaltend antizipiert, während für FCEV-Technik kein nennenswertes Entwicklungspotenzial bekannt ist. Mittel- bis langfristig können mit BEV mindestens gleiche Reichweiten erzielt werden, wie mit FCEV. Dies gilt unter der Einschränkung, dass sich das Entwicklungspotenzial auch zukünftig in gesteigerten Kapazitäten (und Reichweiten) niederschlägt. Alternativ ist es ebenfalls möglich, dass die Weiterentwicklung in effizienteren („kleineren und leichteren“) sowie kostengünstigeren Systemen mündet. In diesem Fall bleibt zwar der Reichweitenvorteil vorhanden, dafür steigt der Kostenvorteil der BEV-Technik und die Vorrangposition der BEV-Alternative bleibt erhalten.

#### a) Einzelumlaufanalyse Linienbündel Bad Belzig

Aus Übersichtsgründen wird das Linienbündel hier exemplarisch in einem höheren Detaillierungsgrad dargestellt, bevor es auf eine tabellarische Zusammenfassung zurückgeführt wird, die auch für alle weiteren Linienbündel angewendet wird.

Bei Betrachtung der Solobus-Einzelumläufe zeigt sich ein Bild, das auch für alle weiteren Linienbündel charakteristisch ist: Nahezu alle Umläufe sind bereits heute als machbar klassifiziert. Lediglich ein einzelner Einzelumlauf sticht aus dem Gesamtbild hervor. Dieser Umlauf kann erst im Zuge der technischen Entwicklung ab ca. 2038 als machbar bewertet werden. Dennoch ist es relevant, dass kein Umlauf als langfristig kritisch interpretiert wird. Es gilt als sehr wahrscheinlich, dass es in absehbarer Zeit technische Batterielösungen am Markt geben wird, mit denen auch dieser Umlauf absolviert werden kann. Sofern eine Vollumstellung des Linienbündels nicht vor 2038 erfolgen muss, sollte die Entwicklungsachse diesen Problemfall ohne weitere Sondermaßnahmen kompensieren.



Abbildung 44: Energiemenge pro Einzelumlauf (BEV); LB Bad Belzig – Solobus

Für die Gelenkbusse im Linienbündel zeigt sich ein vergleichbares Bild. Auch hier sind nahezu alle Umläufe bereits heute oder kurzfristig (ab ca. 2028) als machbar klassifiziert. Besonders auffällig ist Umlauf 5391, der sogar als langfristig kritisch bewertet werden muss. Hier sind auch bei schrittweiser Umstellung Sondermaßnahmen sehr wahrscheinlich erforderlich.

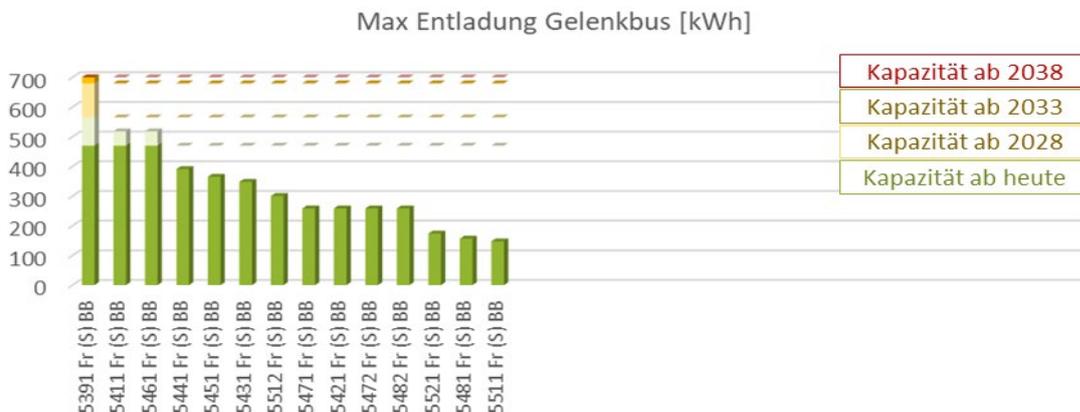
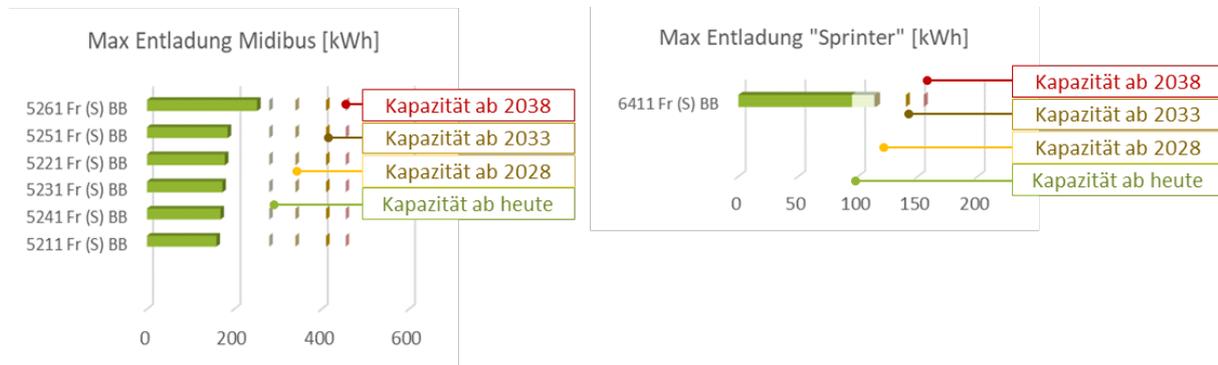


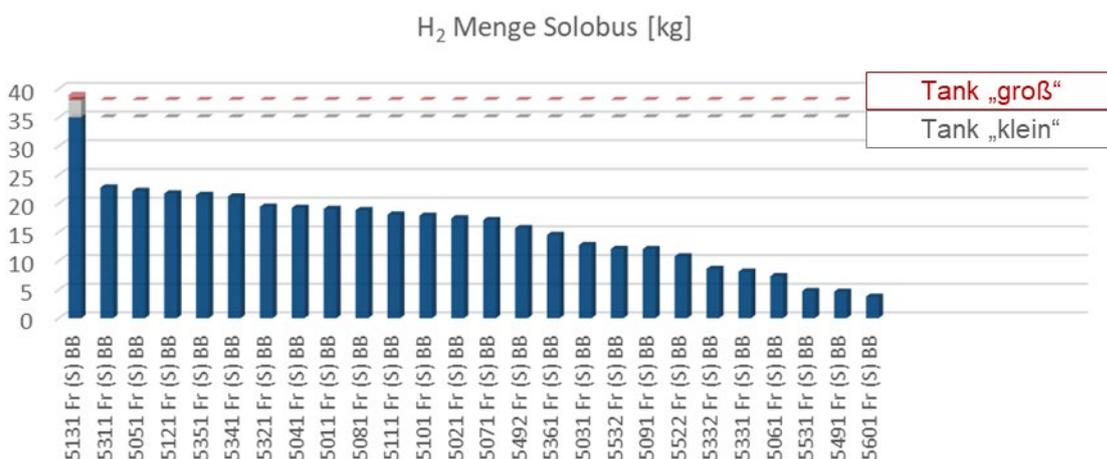
Abbildung 45: Energiemenge pro Einzelumlauf (BEV); LB Bad Belzig – Gelenkbus

Auch die restlichen Fahrzeugtypen des Linienbündels passen in das bisherige Muster. Auch hier sind spätestens ab ca. 2028 alle Einzelumläufe als machbar bewertet, wobei alle Midibusumläufe bereits heute als machbar gelten.



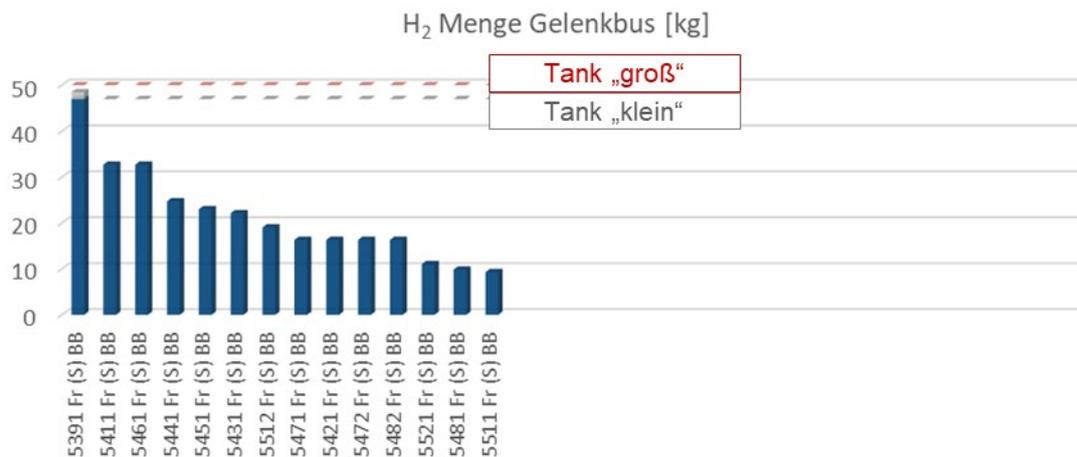
**Abbildung 46: Energiemenge pro Einzelumlauf (BEV); LB Bad Belzig – Midibus und Sprinter**

Bei Ausdehnung des Betrachtungsrahmens auf die Technikalternative FCEV zeigen sich erwartungsgemäß marginale Vorteile gegenüber der BEV-Technik. Dabei wird bei den Solobusumläufen deutlich, dass der Reichweitenvorteil der FCEV-Technik zeitlich begrenzt ausfällt. Auch bei Einsatz von FCEV bleibt der einzelne Umlauf kritisch. Da hier keine Entwicklungsachse unterstellt werden kann, muss der Umlauf sogar als langfristig kritisch betrachtet werden: Bei Realisierung müssten Sondermaßnahmen wie Umlaufanpassung ergriffen werden, was einen Fahrzeugmehrbedarf auslösen kann.



**Abbildung 47: Energiemenge pro Einzelumlauf (FCEV); LB Bad Belzig – Solobus**

Für Gelenkbusse überschreitet der Verbrauchsgraph nicht die maximale Tankkapazität, so dass hier minimale Vorteile zu verzeichnen sind, wenn eine Umstellung aller Gelenkbusumläufe vor 2038 zwingend erforderlich sein sollte.



**Abbildung 48: Energiemenge pro Einzelumlauf (FCEV); LB Bad Belzig – Gelenkbus**

Während für große Fahrzeugtypen (Solo- und Gelenkbus) marginale Vorteile für die FCEV-Technik zu verzeichnen sind, kehrt sich das Bild mit Hinblick auf die weiteren Fahrzeugtypen um. Die Verbrauchsbewertung ist hier obsolet, da keine Referenzwerte europäischer Hersteller vorliegen. Bis heute existiert von entsprechenden Herstellern kein nutzbares Marktangebot für Midibusse und Fahrzeuge der Sprinter-Klasse.

Aufgrund des deutlichen Entwicklungstrends im Automobilsektor hin zu batterieelektrischen Antriebssträngen ist es fraglich, ob entsprechend Modelle überhaupt am Markt platziert werden. Auf Basis des aktuellen Kenntnisstandes müssen die Einzelumläufe hier aufgrund des Marktangebots als nicht machbar klassifiziert werden. Da keine „ähnlichen“ Modelle mit referenzierbaren Bewertungskriterien (Verbrauch und Tankkapazität) am Markt sind, kann die Bewertung auch nicht in Anlehnung an Vergleichsmodelle erfolgen.

In den folgenden tabellarischen Darstellungen sind nicht verfügbare Marktangebot mit Fragezeichen dokumentiert. Die Umläufe werden als langfristig kritisch gewertet.

In der tabellarischen Übersicht werden die Erkenntnisse aus den grafischen Darstellungen zusammengefasst. Hier ist in Zahlenwerten gut erkennbar, dass die Diskrepanz zwischen BEV- und FCEV-Technik minimal ausfällt und auf einzelne Umläufe beschränkt ist.

Insbesondere vor dem Hintergrund einer schrittweisen Systemumstellung erscheinen die Dekarbonisierungspotenziale für beide Technikalternativen als sehr gut. Insbesondere bei Fokus auf die ab ca. 2028 als machbar klassifizierten Umläufe zeigt sich nahezu technische Parität. In jedem Fall ist scheint das Umstellungspotenzial – vorbehaltlich der späteren Umlaufverkettung – sehr gut.

Anzahl machbarer / langfristig kritischer Umläufe im Vergleich											
Fahrzeugtyp	Technik	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (26 Umläufe)	BEV	25	96%	25	96%	25	96%	26	100%	0	0%
	FCEV	25	96%	25	96%	25	96%	25	96%	1	4%
Gelenk (14 Umläufe)	BEV	11	79%	13	93%	13	93%	13	100%	1	7%
	FCEV	14	100%	14	100%	14	100%	14	100%	0	0%
Midibus (6 Umläufe)	BEV	6	100%	6	100%	6	100%	6	100%	0	0%
	FCEV	?	?	?	?	?	?	?	?	6	100%
„Sprinter“ (1 Umlauf)	BEV	0	0%	1	100%	1	100%	1	100%	0	0%
	FCEV	?	?	?	?	?	?	?	?	1	100%

**Tabelle 4: Übersicht Einzelumlaufanalyse LB Bad Belzig**

#### b) Einzelumlaufanalyse alle „eigene“ Linienbündel

Linienbündel, die durch die regiobus selbst betrieben werden, werden hier in Abgrenzung zu den Linienbündeln der Subunternehmer als „eigen“ betrieben bezeichnet. Auch über das im Detail dargestellte Linienbündel Bad Belzig setzte sich die positive Einschätzung beider technikalalternativen fort.

Im Linienbündel Beelitz weichen die Bewertungen der Solo- und Gelenkbusse nur um einzelne Umläufe voneinander ab, wobei die beiden zunächst kritischen Einzelumläufe ab 2033 ebenfalls als machbar eingeschätzt werden. Analoges gilt für den Fahrzeugtyp Pkw, der hier jedoch eher als Randaspekt betrachtet wird.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Es wird angenommen, dass die Dekarbonisierungsstrategie primär auf die Fahrzeugtypen Solo- und Gelenkbus zurückgeführt wird, da hier das Marktangebot am breitesten gefächert ist.

Anzahl machbarer / langfristig kritischer Umläufe im Vergleich											
Fahrzeugtyp	Technik	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (22 Umläufe)	BEV	21	95%	21	95%	22	100%	22	100%	0	0%
	FCEV	22	100%	22	100%	22	100%	22	100%	0	0%
Gelenk (13 Umläufe)	BEV	12	92%	12	92%	13	100%	13	100%	0	0%
	FCEV	13	100%	13	100%	13	100%	13	100%	0	0%
„Pkw“ (1 Umlauf)	BEV	0	0%	0	0%	1	100%	1	100%	0	0%
	FCEV	?	?	?	?	?	?	?	?	1	100%

**Tabelle 5: Übersicht Einzelumlaufanalyse LB Beelitz**

Im Linienbündel Brandenburg werden ausschließlich Solo- und Gelenkbusse eingesetzt, deren Umläufe bereits heute vollständig als unkritisch eingeschätzt werden.

Anzahl machbarer / langfristig kritischer Umläufe im Vergleich											
Fahrzeugtyp	Technik	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (25 Umläufe)	BEV	25	100%	25	100%	25	100%	25	100%	0	0%
	FCEV	25	100%	25	100%	25	100%	25	100%	0	0%
Gelenk (4 Umläufe)	BEV	4	100%	4	100%	4	100%	4	100%	0	0
	FCEV	4	100%	4	100%	4	100%	4	100%	0	0%

**Tabelle 6: Übersicht Einzelumlaufanalyse LB Brandenburg**

Auch im Linienbündel Potsdam sind sämtliche Solo- und Gelenkbusumläufe bereits mit heutiger Technik sowohl mit BEV als auch mit FCEV realisierbar. Lediglich für den einzelnen Midibusumlauf muss eine leicht abgeschwächte Bewertung erfolgen. Hier wird die Machbarkeit etwa im Jahr 2028 als unproblematisch bewertet.

Anzahl machbarer / langfristig kritischer Umläufe im Vergleich											
Fahrzeugtyp	Technik	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (12 Umläufe)	BEV	12	100%	12	100%	12	100%	12	100%	0	0%
	FCEV	12	100%	12	100%	12	100%	12	100%	0	0%
Gelenk (29 Umläufe)	BEV	29	100%	29	100%	29	100%	29	100%	0	0%
	FCEV	29	100%	29	100%	29	100%	29	100%	0	0%
Midibus (1 Umlauf)	BEV	0	0%	1	100%	1	100%	1	100%	0	0%
	FCEV	?	?	?	?	?	?	?	?	1	100%

**Tabelle 7: Übersicht Einzelumlaufanalyse LB Potsdam**

Im Linienbündel Stahnsdorf werden Capabusse eingesetzt, die aktuell weder als BEV noch als FCEV-Modell am Markt verfügbar sind. Aus Mangel an belastbaren Referenzwerten, wird hier eine an Gelenkbusse angelehnte Bewertung vorgenommen. Angesetzte Batterie- und H<sub>2</sub>-Tankgrößen entsprechen einem Gelenkbus, der jedoch mit einem erhöhten Verbrauchswert in die Berechnung eingeht.

Während für Solo- und Gelenkbusse (sowie für den Fahrzeugtyp Pkw) das positive Bewertungsbild aus den vorangegangenen Linienbündeln ebenfalls ersichtlich ist, sind die Capabusse kritisch bewertet. Zwei der acht Umläufe werden sogar als langfristig kritisch bewertet. Dies geht letztlich darauf zurück, dass praktisch ein Gelenkbus mit erhöhtem Verbrauchswert bilanziert wird. Aktuell sind keine Entwicklungen für Capabusse mit alternativen Antriebsstrang bekannt. Auch wenn eine spätere Markteinführung nicht ausgeschlossen werden kann, wird dies als kritisch eingeschätzt. Langfristig ist anzunehmen, dass hier abweichende Fahrzeugtypen eingesetzt werden müssen, die vor Umstellung auf Basis dafür entworfener Umlaufkonstellationen zu bewerten sind.

Anzahl machbarer / langfristig kritischer Umläufe im Vergleich											
Fahrzeugtyp	Technik	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (49 Umläufe)	BEV	47	96%	49	100%	49	100%	49	100%	0	0%
	FCEV	49	100%	49	100%	49	100%	49	100%	0	0%
Gelenk (2 Umläufe)	BEV	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	0	0%
	FCEV	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	0	0%
Capabus (8 Umläufe)	BEV	1	13%	2	25%	2	25%	6	75%	2	25%
	FCEV	8	100%	8	100%	8	100%	8	100%	0	0%
„Pkw“ (2 Umläufe)	BEV	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	0	0%
	FCEV	?	?	?	?	?	?	?	?	2	100%

**Tabelle 8: Übersicht Einzelumlaufanalyse LB Stahnsdorf**

Im Linienbündel Werder werden wieder nahezu ausschließlich Solo- und Gelenkbusse eingesetzt. Auch hier sind spätestens ab ca. 2028 alle Umläufe als machbar bewertet, unabhängig von der Technologiealternative. Der einzelne Umlauf in der Sprinter-Klasse wird für BEV bereit heute als unkritisch eingeschätzt, während die FCEV-Alternative aufgrund des Marktangebots als nicht machbar gewertet wird.

Anzahl machbarer / langfristig kritischer Umläufe im Vergleich											
Fahrzeugtyp	Technik	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (10 Umläufe)	BEV	9	90%	10	100%	10	100%	10	100%	0	0%
	FCEV	10	100%	10	100%	10	100%	10	100%	0	0%
Gelenk (25 Umläufe)	BEV	25	100%	25	100%	25	100%	25	100%	0	0%
	FCEV	25	100%	25	100%	25	100%	25	100%	0	0%
Sprinter (1 Umlauf)	BEV	1	100%	1	100%	1	100%	1	100%	0	0%
	FCEV	?	?	?	?	?	?	?	?	1	100%

**Tabelle 9: Übersicht Einzelumlaufanalyse LB Werder**

Im letzten „eigen“ betriebenen Linienbündel Ziesar werden ausschließlich Solobusse eingesetzt, deren Einzelumläufe bereits heute vollständig als unkritisch bewertet werden.

Anzahl machbarer / langfristig kritischer Umläufe im Vergleich											
Fahrzeugtyp	Technik	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (9 Umläufe)	BEV	9	100%	9	100%	9	100%	9	100%	0	0%
	FCEV	9	100%	9	100%	9	100%	9	100%	0	0%

**Tabelle 10: Übersicht Einzelumlaufanalyse LB Ziesar**

In Summe über alle „eigenen“ Linienbündel zeigt sich die positive Bewertung beider Technikalternativen am deutlichsten. Bereits heute sind 97 % (Solobus) beziehungsweise 95 % (Gelenkbus) aller Umläufe der primär eingesetzten Fahrzeugtypen mit BEV-Technik als unkritisch bewertet. In FCEV-Ausführung sind die Mengen marginal höher, so dass 99 % (Solobus) bzw. 100 % (Gelenkbus) der Umläufe als unkritisch bewertet werden. Dies entspricht in absoluten Zahlen le-

diglich vier Umläufen mehr, die pro Fahrzeugtyp als machbar klassifiziert werden. Diese geringfügige Abweichung lässt keine Begründung erkennen, die kostenintensivere FCEV-Technik einzusetzen, weshalb auch im Verlauf der Untersuchung BEV als primäres Umstellungsziel angesetzt werden. FCEV stehen bei Bedarf weiterhin als Lösungsoption zur Verfügung, wenn im Zuge der Umlaufverkettung abweichende Bewertungsmuster auftreten sollten.

Anzahl machbarer / langfristig kritischer Umläufe im Vergleich											
Fahrzeugtyp	Technik	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (153 Umläufe)	BEV	148	97%	151	99%	152	99%	153	100%	0	0%
	FCEV	152	99%	152	99%	152	99%	152	99%	1	1%
Gelenk (87 Umläufe)	BEV	83	95%	85	98%	86	99%	86	99%	1	1%
	FCEV	87	100%	87	100%	87	100%	87	100%	0	0%
Capabus (8 Umläufe)	BEV	1	13%	2	25%	2	25%	6	75%	2	25%
	FCEV	8	100%	8	100%	8	100%	8	100%	0	0%
Midibus (7 Umläufe)	BEV	6	86%	7	100%	7	100%	7	100%	0	0%
	FCEV	?		?		?		?		7	100%
„Pkw“ (3 Umläufe)	BEV	2	67%	2	67%	3	100%	3	100%	0	0%
	FCEV	?	?	?	?	?	?	?	?	3	100%
„Sprinter“ (2 Umläufe)	BEV	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	0	0%
	FCEV	?	?	?	?	?	?	?	?	2	100%

**Tabelle 11: Übersicht Einzelumlaufanalyse alle LB „eigen“**

Die weiteren Fahrzeugtypen werden primär über das Marktangebot bewertet. Während für Capabus beide Technologiealternativen nicht am Markt verfügbar sind, sind die kleineren Fahrzeugmodelle aktuell ausschließlich in BEV-Technik verfügbar. Die Bewertung ist hier ebenfalls positiv, auch wenn die Prozentwerte aufgrund der geringeren Umlaufgesamtzahl auf den ersten Blick vergleichsweise gering erscheinen. Dennoch handelt es sich nur um einzelne Umläufe, die nicht bereits heute als machbar bewertet werden können.

### c) Einzelumlaufanalyse Subunternehmer

Die Bewertung der durch Subunternehmer betriebenen Umläufe fällt noch positiver aus als die Bewertung der „eigen“ betriebenen Umläufe. Lediglich zwei Solobusumläufe können mit aktueller BEV-Technik nicht als machbar bewertet werden. Einer dieser Umläufe (Subunternehmer Sabinchen) wird ab ca. 2028 als machbar eingeschätzt, während der zweite etwa ab 2033 als unproblematisch kategorisiert wird. Pro Subunternehmer ergeben sich die folgenden Kennzahlen:

Anzahl machbarer / langfristig kritischer Umläufe im Vergleich											
Fahrzeugtyp	Technik	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (8 Umläufe)	BEV	8	100%	8	100%	8	100%	8	100%	0	0%
	FCEV	8	100%	8	100%	8	100%	8	100%	0	0%

**Tabelle 12: Übersicht Einzelumlaufanalyse LB Subunternehmer Glaser**

Anzahl machbarer / langfristig kritischer Umläufe im Vergleich											
Fahrzeugtyp	Technik	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (31 Umläufe)	BEV	31	100%	31	100%	31	100%	31	100%	0	0%
	FCEV	31	100%	31	100%	31	100%	31	100%	0	0%
Gelenk (1 Umlauf)	BEV	1	100%	1	100%	1	100%	1	100%	0	0
	FCEV	1	100%	1	100%	1	100%	1	100%	0	0%

**Tabelle 13: Übersicht Einzelumlaufanalyse LB Subunternehmer in Lehnin**

Anzahl machbarer / langfristig kritischer Umläufe im Vergleich											
Fahrzeugtyp	Technik	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (12 Umläufe)	BEV	11	92%	11	92%	12	100%	12	100%	0	0%
	FCEV	12	100%	12	100%	12	100%	12	100%	0	0%

**Tabelle 14: Übersicht Einzelumlaufanalyse LB Subunternehmer Lange**

Anzahl machbarer / langfristig kritischer Umläufe im Vergleich											
Fahrzeugtyp	Technik	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (6 Umläufe)	BEV	6	100%	6	100%	6	100%	6	100%	0	0%
	FCEV	6	100%	6	100%	6	100%	6	100%	0	0%
Gelenk (2 Umläufe)	BEV	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	0	0
	FCEV	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	0	0%

**Tabelle 15: Übersicht Einzelumlaufanalyse LB Subunternehmer Reich**

Anzahl machbarer / langfristig kritischer Umläufe im Vergleich											
Fahrzeugtyp	Technik	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (7 Umläufe)	BEV	6	86%	7	100%	7	100%	7	100%	0	0%
	FCEV	12	100%	12	100%	12	100%	12	100%	0	0%

**Tabelle 16: Übersicht Einzelumlaufanalyse LB Subunternehmer Sabinchen**

Wie bereits eingangs in diesem Abschnitt erwähnt, fällt die Bewertung alle Einzelumläufe in Summe über alle Subunternehmer sehr positiv aus. Lediglich zwei Einzelumläufe (Solobus) kön-

nen nicht mit aktueller BEV-Technik als machbar klassifiziert werden. Im Zuge der antizipierten technischen Entwicklung werden diese Umläufe ab ca. 2028 beziehungsweise ab ca. 2033 ebenfalls als machbar eingeschätzt.

		Anzahl machbarer / langfristig kritischer Umläufe im Vergleich									
Fahrzeugtyp	Technik	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (64 Umläufe)	BEV	62	97%	63	98%	64	100%	64	100%	0	0%
	FCEV	64	100%	64	100%	64	100%	64	100%	0	0%
Gelenk (3 Umläufe)	BEV	3	100%	3	100%	3	100%	3	100%	0	0
	FCEV	3	100%	3	100%	3	100%	3	100%	0	0%

**Tabelle 17: Übersicht Einzelumlaufanalyse alle LB Subunternehmer**

Die FCEV-Technik ist für alle Einzelumläufe unkritisch. Da hier ausschließlich Solo- und Gelenkbusse eingesetzt werden, ist keine Auswirkung auf Basis des Marktangebots zu berücksichtigen.

#### d) Zwischenfazit Einzelumlaufanalyse

Die Einzelumläufe werden für beide in Rede stehenden emissionsfreien Antriebsalternativen, BEV und FCEV, als durchweg positiv bewertet. Vor dem Hintergrund einer schrittweisen Flottendekarbonisierung werden beide Ansätze als technisch gleichwertig eingeschätzt. Die Abweichungen zwischen den Technikalternativen beschränken sich auf zehn Einzelumläufe im Feld der Solo- und Gelenkbusse. Bezogen auf die in Summe betrachtete Umlaufanzahl dieser Fahrzeugtypen (307 Umläufe) rechtfertigt die Abweichung nicht den Einsatz der kostenintensiveren FCEV-Technik. Im Verlauf der Untersuchung wird weiterhin die BEV-Technik als primäre Zielgröße definiert. Sofern im Rahmen der Umlaufverkettung die Bewertung abweicht, können FCEV jederzeit wieder als Technikalternative in die Untersuchung aufgenommen werden. Dabei stünde letztlich die Frage im Vordergrund, ob BEV mit Sondermaßnahmen (z. B. Umlaufanpassung und Mehrbedarf) oder die kostenintensivere Alternativtechnik FCEV in der Summe die wirtschaftlichste Lösung für die regiobus darstellt.

## 2. Umlaufverkettung und Untersuchung der Einsatzpotenziale

Als Einsatzpotenzial wird hier die Menge umstellbarer Fahrzeugmengen betrachtet. Dabei können verschiedene Randbedingungen angesetzt werden, wenn eine entsprechende Notwendigkeit erkannt wird. Beispielsweise kann das Einsatzpotenzial durch technische Maßnahmen (z. B. Zwischenladen an Wendestellen) oder Umlaufanpassung erhöht werden, wobei bei der Umlaufanpassung eine Fahrzeugmehrbedarf resultieren kann.

In jedem Fall muss die Bewertungsebene von Basis der Einzelumläufe auf die Fahrzeugebene angehoben werden. Fahrzeuge können am Betriebstag grundsätzlich mehrere Einzelumläufe hintereinander ausführen, was hier als Fahrzeugtagesumlauf bezeichnet wird. Übertragen auf die BEV-Technik muss der gesamte Fahrzeugtagesumlauf als kritisch bewertet werden, wenn nur ein einzelner der Einzelumläufe kritisch ausfällt. Das Bewertungsbild der Einzelumlaufanalyse kann also abweichen.

Darüber hinaus müssen BEV zwischen den Einzelumläufen vielfach Energie zuführen (vgl. Kapitel G.I.2 Umlaufverkettung), was im Einzelfall eine Problemstellung darstellen kann. Als Vergleichsbasis wird die Umlaufverkettung ohne Ladeintervalle für ein Dieselmodell ausgeführt. Die zur Ausführung aller Umläufe notwendige Fahrzeugmenge mit Dieselsechnik wird im Folgenden als Referenzwert herangezogen.

Sofern die Aufenthalte zwischen den Einzelumläufen im BEV-Modell nicht ausreichen, um die erforderliche Energiemenge zuzuführen, können zwei Effekte auftreten.

- Im ungünstigsten Fall ist für die Erfüllung beider (oder mehrerer) Einzelumläufe mit den gegebenen Ladeintervallen im Depot eine Batteriegröße erforderlich, die langfristig als unrealistisch eingeschätzt wird. In diesem Fall muss die Umlaufverkettung gegenüber dem Dieselmodell variiert werden, wodurch in der Regel ein Fahrzeugmehrbedarf entsteht. **Dies tritt im Fall der regiobus nicht ein.**
- Die Erfüllung aller Umläufe mit gegebenen Ladezeiten erfordert eine größere Batterie als die ausschließliche Erfüllung aller Einzelumläufe des Umlaufs, die jedoch nicht als langfristig kritisch eingeschätzt wird. In diesem Fall verschiebt sich lediglich der Zeitpunkt ab dem der Fahrzeugtagesumlauf als machbar bewertet wird. **Dies tritt im Fall der regiobus im überschaubaren Maß auf.**

*Beispiel: Gegeben ist ein Fahrzeugtagesumlauf mit zwei Einzelumläufen, die mit aktueller Technik gut realisierbar sind. Aufgrund einer kurzen Verweildauer zwischen den Umläufen im Depot kann die Batterie nur teilgeladen werden. Um den gesamten Betriebstag zu erfüllen, muss zu Betriebsbeginn eine höhere Energiemenge in der Batterie vorhanden sein als die heutige Technik erlaubt. Die notwendige Energiemenge kann jedoch im Zuge der erwarteten technischen Entwicklung ab ca. 2033 im Fahrzeug gespeichert werden. Der Fahr-*

*zeugtagesumlauf wird – trotz unkritischer Einzelumläufe – erst ab 2033 als machbar bewertet.*

Da sich aufgrund der Umlaufverkettung die Bewertungen lediglich auf der Zeitachse verschieben, kann der Fokus direkt auf die verbundenen Einsatzpotenziale gelegt werden. Die Verkettungen der Einzelumläufe zu Fahrzeugtagesumläufen sind im Anhang tabellarisch aufgeführt.

#### a) Einsatzpotenziale im Eins-zu-Eins Ersatz „eigen“

Zunächst wird erhoben, wie hoch das Einsatzpotenzial im sogenannten „Eins-zu-Eins-Ersatz“ für BEV ausfällt. Dabei wird die Menge aller Fahrzeugeinsätze erhoben, die ohne jegliche Sondermaßnahmen von Diesel- auf BEV-Technik umgestellt werden kann, sofern die Ladeinfrastruktur vorgesehen wird. Ähnlich der Einzelumlaufbetrachtung erfolgt die Bewertung unter Berücksichtigung der technischen Entwicklung über einer Zeitachse. Die tabellarische Darstellung ähnelt der Darstellung im Zuge der Einzelumlaufbewertung, wobei hier statt einzelnen Umläufen Fahrzeugtagesumläufe beziehungsweise die Menge umstellbarer Fahrzeuge aufgelistet wird.

Als Einsatzflotte wird die zur Erfüllung der Umläufe notwendigen Fahrzeugmenge betrachtet ohne Reserveflotte oder sonstige Flottenbestandteile. Unterschieden wird im Folgenden zwischen den einzelnen Betriebshöfen laut Umlaufliste. Als Stammdepot wird hier immer der Betriebshof bezeichnet, der denselben Namen wie das jeweilige Linienbündel trägt.

		Mögliche Einsatzflotte im Eins-zu-Eins-Ersatz									
Fahrzeugtyp	Einsatzfl. Diesel	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (26 Umläufe)	16	13	81%	14	88%	15	94%	16	100%	0	0%
Gelenk (14 Umläufe)	8	6	75%	7	88%	7	88%	7	88%	1	13%
Midi (6 Umläufe)	3	1	33%	3	100%	3	100%	3	100%	0	0%
Sprinter (1 Umlauf)	1	0	0%	1	100%	1	100%	1	100%	0	0%

**Tabelle 18: Übersicht BEV-Einsatzpotenzial „1:1“ LB Bad Belzig, Stammdepot**

In Tabelle 18 ist ersichtlich, dass auch nach Umlaufverkettung eine positive Bilanz für das Linienbündel Bad Belzig gezogen werden kann. Bereits mit heutiger Technik sind Fahrzeugmengen im direkten Ersatz umstellbar, die deutlich über den CVD-Quotenvorgaben liegen. Lediglich ein einzelnes Fahrzeug wird langfristig als kritisch interpretiert. Mit Ausblick auf eine Vollumstellung müssen perspektivisch Sondermaßnahmen berücksichtigt werden. Die dahingehende Untersuchung erfolgt im folgenden Kapitel dieses Dokuments.

Für das LB Beelitz werden zwei Betriebshöfe ins Auge gefasst. BH Kortschlag ist dabei bereits heute vollständig unkritisch, was aufgrund des eingesetzten Fahrzeugtyps jedoch nur eine unterordnete Rolle spielt. Aus Bewertungsperspektive ist das Stammdepot des LBs eines der kritischsten im Untersuchungsumfang. Während die Gelenkbuseinsätze bereits heute weitestgehend als direkt umstellbar bewertet werden, ist dies bei Solobussen erst ab 2033 der Fall. Dennoch sind die Ergebnisse nach wie vor positiv, da immer noch 50 % der Solobusumläufe direkt umstellbar sind und damit sämtliche Quotenvorgaben grundsätzlich gut erfüllbar sind.

		Mögliche Einsatzflotte im Eins-zu-Eins-Ersatz									
Fahrzeugtyp	Einsatzfl. Diesel	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (22 Umläufe)	10	5	50%	5	50%	9	90%	10	100%	0	0%
Gelenk (13 Umläufe)	7	6	86%	6	86%	7	100%	7	100%	0	0%

**Tabelle 19: Übersicht BEV-Einsatzpotenzial „1:1“ LB Beelitz, Stammdepot**

		Mögliche Einsatzflotte im Eins-zu-Eins-Ersatz									
Fahrzeugtyp	Einsatzfl. Diesel	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
„Pkw“ (1 Umlauf)	1	0	0%	0	0%	1	100%	1	100%	0	0%

**Tabelle 20: Übersicht BEV-Einsatzpotenzial „1:1“ LB Beelitz, BH Kortschlag**

Das LB Brandenburg wird vollumfänglich aus dem Stammdepot bedient. Die Ergebnisse sind auch sehr positiv. Auch wenn der Prozentwert von 50 % (Gelenkbusse) hier vermeintlich gering ausfällt, handelt es sich nur um ein einziges Fahrzeug, das ab 2038 ebenfalls als machbar eingeschätzt wird.

Mögliche Einsatzflotte im Eins-zu-Eins-Ersatz											
Fahrzeugtyp	Einsatzfl. Diesel	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (24 Umläufe)	13	10	77%	10	77%	13	100%	13	100%	0	0%
Gelenk (4 Umläufe)	2	1	50%	1	50%	1	50%	2	100%	0	0%

**Tabelle 21: Übersicht BEV-Einsatzpotenzial „1:1“ LB Brandenburg, Stammdepot**

Im LB Potsdam wird ein nennenswerter Teil der Solobusumläufe aus dem BH Vetter Wittenberg bedient. Sowohl die hier zugeordneten Fahrzeuge als auch die Fahrzeuge des Stammdepots sind hinsichtlich ihres BEV-Einsatzpotenzials sehr positiv zu bewerten.

Mögliche Einsatzflotte im Eins-zu-Eins-Ersatz											
Fahrzeugtyp	Einsatzfl. Diesel	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (5 Umläufe)	4	4	100%	4	100%	4	100%	4	100%	0	0%
Gelenk (29 Umläufe)	14	11	79%	13	93%	14	100%	14	100%	0	0%
Midi (1 Umlauf)	1	0	0%	1	100%	1	100%	1	100%	0	0%

**Tabelle 22: Übersicht BEV-Einsatzpotenzial „1:1“ LB Potsdam, Stammdepot**

		Mögliche Einsatzflotte im Eins-zu-Eins-Ersatz									
Fahrzeugtyp	Einsatzfl. Diesel	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (7 Umläufe)	3	3	100%	3	100%	3	100%	3	100%	0	0%

**Tabelle 23: Übersicht BEV-Einsatzpotenzial „1:1“ LB Potsdam, BH Vetter Wittenberg**

Das LB Stahnsdorf ist gekennzeichnet von einer größeren Variantenvielfalt an Fahrzeugtypen und Betriebshöfen. Dennoch kann hier weitestgehend ein sehr positives Fazit gezogen werden. Bis auf den Fahrzeugtyp Capabus sind spätestens 2028 alle Fahrzeugeinsätze für eine Direktumstellung geeignet. Das eher negative Bild im Feld der Capabusse geht einher mit dem Bewertungsbild der Einzelumläufe, da in diesem Segment keine Umläufe verkettet werden können. Jeder Einzelumlauf entspricht einem Fahrzeugtagesumlauf. Zwei der acht Umläufe müssen hier als langfristig kritisch bewertet werden, Aufgrund des nichtexistenten Marktangebots stehen FCEV hier auch nicht als Alternativtechnologie zur Verfügung. Für diesen Fahrzeugtyp ist eine belastbare Bewertung nicht möglich, da Referenzwerte aus dem Markt fehlen. Abhängig von dem zukünftigen Marktangebot kann es notwendig sein, alternative Fahrzeugausführungen (Gelenkbusse) einzusetzen.

		Mögliche Einsatzflotte im Eins-zu-Eins-Ersatz									
Fahrzeugtyp	Einsatzfl. Diesel	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (37 Umläufe)	21	18	86%	21	100%	21	100%	21	100%	0	0%
Gelenk (2 Umläufe)	1	1	100%	1	100%	1	100%	1	100%	0	0%
Capa (8 Umläufe)	8	1	13%	2	25%	2	25%	6	75%	2	25%

**Tabelle 24: Übersicht BEV-Einsatzpotenzial „1:1“ LB Stahnsdorf, Stammdepot**

		Mögliche Einsatzflotte im Eins-zu-Eins-Ersatz									
Fahrzeugtyp	Einsatzfl. Diesel	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (6 Umläufe)	3	3	100%	3	100%	3	100%	3	100%	0	0%

**Tabelle 25: Übersicht BEV-Einsatzpotenzial „1:1“ LB Stahnsdorf, BH Vetter Wittenberg**

		Mögliche Einsatzflotte im Eins-zu-Eins-Ersatz									
Fahrzeugtyp	Einsatzfl. Diesel	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (6 Umläufe)	3	2	67%	3	100%	3	100%	3	100%	0	0%

**Tabelle 26: Übersicht BEV-Einsatzpotenzial „1:1“ LB Stahnsdorf, BH Anger Potsdam**

		Mögliche Einsatzflotte im Eins-zu-Eins-Ersatz									
Fahrzeugtyp	Einsatzfl. Diesel	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (2 Umläufe)	1	1	100%	1	100%	1	100%	1	100%	0	0%

**Tabelle 27: Übersicht BEV-Einsatzpotenzial „1:1“ LB Stahnsdorf, BH Kortschlag**

Im LB Werder kann erneut ein vollständig positives Fazit gezogen werden. Spätestens im Jahr 2028 sind alle Fahrzeugeinsätze für die Direktumstellung auf BEV geeignet. Dies gilt unabhängig von den zugeordneten Betriebshöfen innerhalb des Bündels.

		Mögliche Einsatzflotte im Eins-zu-Eins-Ersatz									
Fahrzeugtyp	Einsatzfl. Diesel	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (8 Umläufe)	4	3	75%	4	100%	4	100%	4	100%	0	0%
Gelenk (24 Umläufe)	14	14	100%	14	100%	14	100%	14	100%	0	0%
„Sprinter“ (1 Umläufe)	1	1	100%	1	100%	1	100%	1	100%	0	0%

**Tabelle 28: Übersicht BEV-Einsatzpotenzial „1:1“ LB Werder, Stammdepot**

		Mögliche Einsatzflotte im Eins-zu-Eins-Ersatz									
Fahrzeugtyp	Einsatzfl. Diesel	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (1 Umlauf)	1	1	100%	1	100%	1	100%	1	100%	0	0%
Gelenk (1 Umlauf)	1	1	100%	1	100%	1	100%	1	100%	0	0%

**Tabelle 29: Übersicht BEV-Einsatzpotenzial „1:1“ LB Werder, BH AC Busreisen Potsdam**

		Mögliche Einsatzflotte im Eins-zu-Eins-Ersatz									
Fahrzeugtyp	Einsatzfl. Diesel	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (1 Umlauf)	1	0	0%	1	100%	1	100%	1	100%	0	0%

**Tabelle 30: Übersicht BEV-Einsatzpotenzial „1:1“ LB Werder, BH Anger Potsdam**

Als letztes der „eigen“ betriebenen Linienbündel steht LB Ziesar im Fokus. Auch hier werden sehr positive Ergebnisse erzielt, da nur zwei Fahrzeuge nicht auf Basis heutiger Technik mit BEV direkt dekarbonisierbar bewertet werden, was über die Entwicklungsprognose jedoch bis ca. 2038 kompensiert wird.

		Mögliche Einsatzflotte im Eins-zu-Eins-Ersatz									
Fahrzeugtyp	Einsatzfl. Diesel	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (9 Umläufe)	5	3	60%	3	60%	4	80%	5	100%	0	0%

**Tabelle 31: Übersicht BEV-Einsatzpotenzial „1:1“ LB Ziesar, Stammdepot**

Zusammengefasst über alle „eigen“ betriebenen Linienbündel zeigt sich deutlich, dass im Einsatzgebiet der regiobus ein sehr deutliches Einsatzpotenzial für die BEV-Technik vorhanden ist, ohne Sondermaßnahmen ergreifen zu müssen, die sich auf die notwendige Fahrzeugmenge auswirken können.

		Mögliche Einsatzflotte im Eins-zu-Eins-Ersatz									
Fahrzeugtyp	Einsatzfl. Diesel	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (152 Uml.)	84	65	77%	72	86%	81	96%	84	100%	0	0%
Gelenk (87 Umläufe)	48	40	85%	43	91%	45	96%	46	98%	1	2%
Midi (7 Umläufe)	4	1	25%	4	100%	4	100%	4	100%	0	0%
„Sprinter“ (2 Umläufe)	2	1	50%	2	100%	2	100%	2	100%	0	0%
„Pkw“ (3 Umläufe)	2	1	50%	1	50%	2	100%	2	100%	0	0%
Capa (8 Umläufe)	8	1	13%	2	25%	2	25%	6	75%	2	25%

**Tabelle 32: Übersicht BEV-Einsatzpotenzial „1:1“ alle LB „eigen“**

**b) Einsatzpotenziale im Eins-zu-Eins-Ersatz „Subunternehmer“**

Analog zu den „eigen“ betriebenen Linienbündeln wird auch das Einsatzpotenzial der Subunternehmer bewertet. Die Ergebnisse sind für alle Subunternehmer sehr gut, so dass im Folgenden auf eine textliche Beschreibung verzichtet wird. Lediglich drei Solobuseinsätze sind heute nicht als direkt umstellbar klassifiziert. Spätestens mit der Entwicklungsstufe ab 2033 können alle Fahrzeuge direkt auf BEV Technik umgestellt werden.

		Mögliche Einsatzflotte im Eins-zu-Eins-Ersatz									
Fahrzeugtyp	Einsatzfl. Diesel	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (8 Umläufe)	4	4	100%	4	100%	4	100%	4	100%	0	0%

**Tabelle 33: Übersicht BEV-Einsatzpotenzial „1:1“ LB Subunternehmer Glaser, Stammdepot**

		Mögliche Einsatzflotte im Eins-zu-Eins-Ersatz									
Fahrzeugtyp	Einsatzfl. Diesel	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (21 Umläufe)	12	11	92%	11	92%	12	100%	12	100%	0	0%
Gelenk (1 Umlauf)	1	1	100%	1	100%	1	100%	1	100%	0	0%

**Tabelle 34: Übersicht BEV-Einsatzpotenzial „1:1“ LB Subunternehmer in Lehnin, BH Behrendt Netzen**

		Mögliche Einsatzflotte im Eins-zu-Eins-Ersatz									
Fahrzeugtyp	Einsatzfl. Diesel	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (10 Umläufe)	5	5	100%	5	100%	5	100%	5	100%	0	0%

**Tabelle 35: Übersicht BEV-Einsatzpotenzial „1:1“ LB Subunternehmer in Lehnin, BH Buteo Lehnin**

		Mögliche Einsatzflotte im Eins-zu-Eins-Ersatz									
Fahrzeugtyp	Einsatzfl. Diesel	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (12 Umläufe)	8	7	88%	7	88%	8	100%	8	100%	0	0%

**Tabelle 36: Übersicht BEV-Einsatzpotenzial „1:1“ LB Subunternehmer Lange, Stammdepot**

		Mögliche Einsatzflotte im Eins-zu-Eins-Ersatz									
Fahrzeugtyp	Einsatzfl. Diesel	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (6 Umläufe)	4	4	100%	4	100%	4	100%	4	100%	0	0%
Gelenk (2 Umläufe)	1	1	100%	1	100%	1	100%	1	100%	0	0%

**Tabelle 37: Übersicht BEV-Einsatzpotenzial „1:1“ LB Subunternehmer Reich, Stammdepot**

		Mögliche Einsatzflotte im Eins-zu-Eins-Ersatz									
Fahrzeugtyp	Einsatzfl. Diesel	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (7 Umläufe)	4	3	75%	4	100%	4	100%	4	100%	0	0%

**Tabelle 38: Übersicht BEV-Einsatzpotenzial „1:1“ LB Subunternehmer Sabinchen, Stammdepot**

Da die Einzelbewertungen pro Subunternehmerlinienbündel bereits sehr positiv ausgefallen sind, fällt auch die Bewertung aller Subunternehmerlinienbündel in Summe entsprechend aus.

		Mögliche Einsatzflotte im Eins-zu-Eins-Ersatz									
Fahrzeugtyp	Einsatzfl. Diesel	Heute		Ab 2028		Ab 2033		Ab 2038		Langfristig kritisch	
Solo (64 Umläufe)	37	34	92%	35	95%	37	100%	37	100%	0	0%
Gelenk (3 Umläufe)	2	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	0	0%

**Tabelle 39: Übersicht BEV-Einsatzpotenzial „1:1“ alle LB Subunternehmer**

**c) Zwischenfazit Umlaufverkettung und Untersuchung der Einsatzpotenziale**

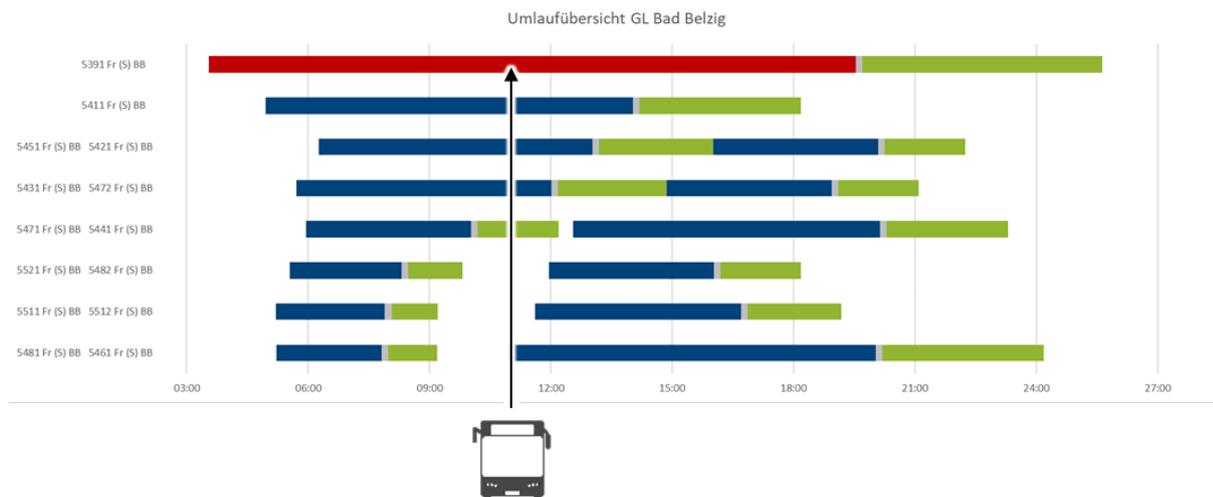
Selbst wenn ausschließlich die Einsätze der Stammdepots der favorisierten Linienbündel Bad Belzig, Beelitz, Brandenburg und Stahnsdorf ins Auge gefasst werden und dabei ausschließlich Solo- und Gelenkbusse betrachtet werden, sind bereits heute 60 direkt umstellbare Einsätze vorhanden. Ab 2028 steigt die Menge auf 65 Einsätze. Bezogen auf die Einsatzflotte aller Linienbündel (inklusive weiterer Depots pro LB und Subunternehmer) mit 187 Fahrzeugtagesumläufen entspricht dies einem Quotenanteil von 32,1 % heute beziehungsweise 34,7 % ab 2028. Zur Einordnung: In der zweiten CVD-Periode wird ein Quotenanteil von 32,5 % emissionsfreier Fahrzeuge vorgegeben.

Bei Ausdehnung der Betrachtung auf alle „eigen“ betriebenen Linienbündel unter denselben Randbedingungen (nur Berücksichtigung der Solos- und Gelenkbusse aus den Stammdepots) steigt die Menge machbarer Einsätze bereits heute auf 95 Fahrzeuge beziehungsweise 103 Solo- und Gelenkbusse ab 2028. Bezogen auf die Gesamteinsatzflotte entspricht dies 50,8 % heute und 55,1 % ab 2028.

Die direkt umstellbare Fahrzeugmenge im BEV-Szenario wird als sehr gut geeignet eingeschätzt, um die später definierten Migrationspfade unproblematisch zu erfüllen. BEV können für die folgende Untersuchung als Vorzugstechnologie beibehalten werden. Es kann keine Notwendigkeit für Alternativtechnologien festgestellt werden. Sondermaßnahmen sind nur perspektivisch erforderlich, wenn eine vollständige Flottentransformation zur Debatte steht und die wenigen langfristig kritischen Fahrzeugeinsätze (1x Gelenk-, 2 x Capabus) ebenfalls dekarbonisiert werden müssen.

### 3. Ausblick auf vollständige Flottentransformation

Wie in den vorangegangenen Kapiteln erarbeitet wurde, ist nur eine sehr geringe Fahrzeugmenge (bzw. Menge an Fahrzeugtagesumläufen) als langfristig kritisch charakterisiert. Die geringe Menge rechtfertigt weder den Einsatz einer kostenintensiveren Alternativtechnologie (FCEV) noch die Vorsehung technischer Lösungsoptionen (Schnellladepunkte an Wendestellen). Entsprechend stellt die Umlaufanpassung die einzige praktikable Sondermaßnahme für eine perspektivische Flottenvollumstellung dar.

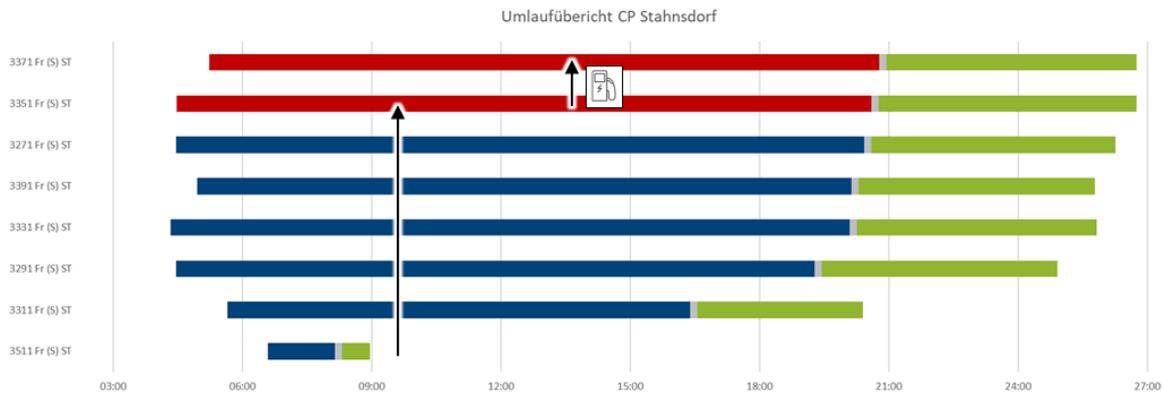


**Abbildung 49: Schaubild Umlaufanpassung Gelenkbus Bad Belzig**

Im Schaubild sind die Gelenkbuseinsätze ab dem Stammdepot Bad Belzig aufgezeichnet. Blaue Balkenanteile entsprechen Fahrtzeiten, grüne Balkenteile Ladezeiten und graue Balkenteile repräsentieren eine zehnmünütige Rangierzeit. In rot ist der kritische Fahrzeugeinsatz hervorgehoben. Es ist aus dem Schaubild ersichtlich, dass keine Fahrzeuge über längere Zeiträume ungenutzt im Depot zur Verfügung stehen, die für die Ablösung des Umlaufs nutzbar wären. Entsprechend muss langfristig von einem Mehrbedarf von +1 Gelenkbus ausgegangen werden. Dabei gilt es jedoch zu berücksichtigen, dass die Machbarkeit abhängig von der technischen Entwicklung ist.

In Anbetracht des konservativen Bewertungsansatzes ist es nicht unwahrscheinlich, dass zukünftig höhere Kapazitätswerte als angenommen verfügbar sind und der Umlauf auch ohne Anpassungen machbar wird.

Darüber hinaus sind lediglich zwei Capabus-Umläufe als langfristig kritisch bewertet. In diesem Kontext muss beachtet werden, dass aufgrund des mangelnden Marktangebots Speicherwerte eines Gelenkbusses angesetzt wurden. Die Bewertung der Capabusse erfolgt also auf einer rein theoretischen Ebene und unterliegt einer größeren Ungenauigkeit, wobei höhere Kapazitätswerte als angenommen wahrscheinlicher sind als der umgekehrte Fall.



**Abbildung 50: Schaubild Umlaufanpassung Capabusse Stahnsdorf**

Im Rahmen der Bewertungsgenauigkeit wird die Umlaufanpassung hier als gut ohne Mehrbedarf durchführbar betrachtet. Bereits ab ca. 9 Uhr morgens steht ein ungenutzter Capabus zur Verfügung. Sofern die Werkstattplanung den Zugriff auf das Fahrzeug nicht blockiert, kann das Fahrzeug nach Vollladung einen der kritisch bewerteten Einsätze ablösen. Das abgelöste Fahrzeug steht nach Vollladung wiederum zur Verfügung, um den zweiten langfristig kritischen Umlauf abzulösen.

Grundsätzlich kann an dieser Stelle angeführt werden, dass ein Mehrbedarf aufgrund der Umlaufanpassung nicht zwingend eine Erhöhung der Fahrzeugmenge bedeuten muss. Im Beispiel Bad Belzig kann auch ein Reservebus zur kurzzeitigen Überbrückung des Ladeintervalls eingesetzt werden, sofern die Reserveflotte ausreichend groß dimensioniert ist und ein Fahrzeug für mehrere Stunden aus dem Reservepool entfallen kann.

### III. Infrastrukturanalyse

#### 1. Lastgangoptimierung

Im Rahmen der Einsatzanalyse wurde erarbeitet, dass BEV den sinnvollsten Technologieansatz für die Dekarbonisierung der regiobus darstellen. Zur Auslegung der notwendigen elektrischen Ladeinfrastruktur wird zunächst eine Lastgangoptimierung ausgeführt, um einen realistischen Lastverlauf zugrunde legen zu können. Im Rahmen der Lastgangoptimierung wird praktisch das Systemverhalten eines Lademanagementsystems nachgebildet.

Für die Lastgangoptimierung werden die Umlaufdaten für einen Wochentag angesetzt. Da Montag\_Schule hier repräsentativ für alle Werktage Montag bis Donnerstag gilt, wird der Betriebstag zweimal hintereinander angesetzt.

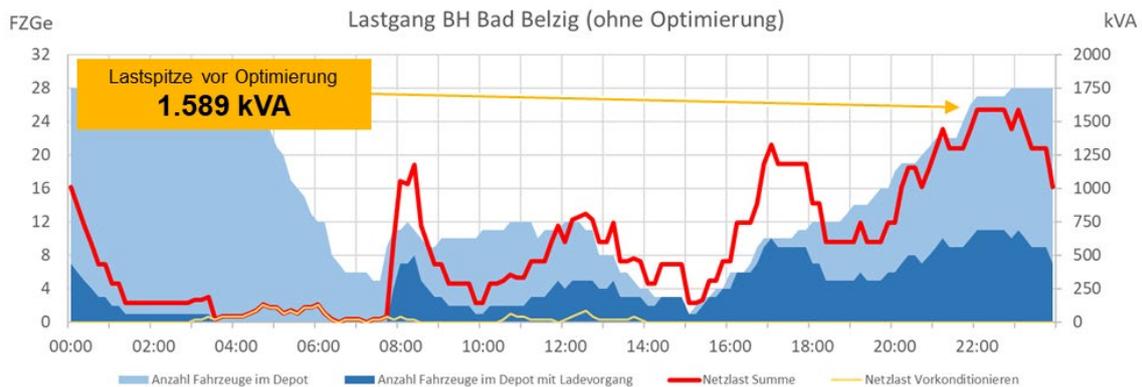
Grundsätzlich wird eine Vollumstellung angenommen, um die Infrastruktur perspektivisch dimensionieren zu können. Dafür wird angenommen, dass die technische Entwicklung zum Zeitpunkt des Vollausbaus ausreichend fortgeschritten ist, um sämtliche Umläufe mit BEV erfüllen zu können. Dies kann als unendlich große Batterie betrachtet werden. Mögliche Abweichungen, wie zum Beispiel Umlaufanpassungen, reduzieren im Allgemeinen die Anforderungen an das Ladesystem, da Teile des Ladebedarfs in den Tag verlagert werden, wenn das abgelöste Fahrzeug zum Nachladen einrückt. Dennoch wird im Rahmen des Konzeptentwurfs für die Ladeinfrastruktur eine ausreichende Reserve beaufschlagt, um mögliche Erhöhungen der Lastkurve kompensieren zu können.

Im Fall der regiobus erfolgt eine Betrachtung pro Betriebshof. Dabei ist zu beachten, dass einzelne Betriebshöfe aus anderen Linienbündeln angefahren werden. Die Aufenthalte werden hier als normaler Zwischenladevorgang berücksichtigt, unabhängig davon welchem Linienbündel der jeweilige Bus zuzuordnen ist.

Während die Ladeleistung weitestgehend auf 130 kW festgelegt wurde (vgl. Kapitel G.I.4), wird für die Fahrzeugtypen Sprinter und Pkw ein Sonderfall eingeräumt. Über Nacht wird hier ein batterieschonendes Laden mit 22 kW angesetzt, was einer typischen Wallbox mit Wechselspannungsanschluss (400 V) entspricht. Für Zwischenladungen am Tag wird eine höhere Ladeleistung bis zu 80 kW frei gegeben, was in der Praxis über die Schnellladeschnittstelle (DC Ladung) des BEV realisiert werden kann.

### a) Lastgangoptimierung am Beispiel BH Bad Belzig

Am Beispiel Bad Belzig kann die Auswirkung der Lastgangoptimierung gut dargestellt werden. Ohne Optimierung wird der Ladevorgang nach Ablauf einer Rangierzeit (10 Minuten) unmittelbar gestartet. Aufgrund der teilweise kumulierten Ankunftszeiten entstehen Lastspitzen, die in Abbildung 51 gut erkennbar sind.

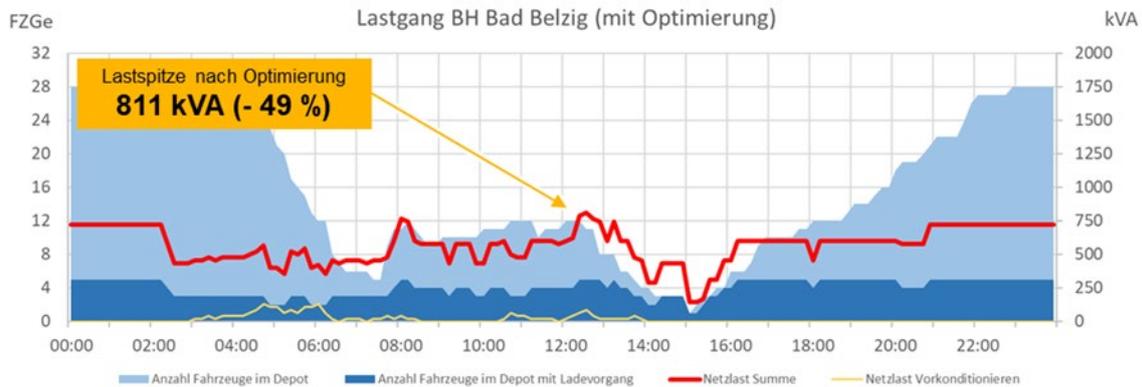


**Abbildung 51: Lastgang BH Bad Belzig (ohne Optimierung)**

Es wird ersichtlich, dass die Lastspitzen in Abhängigkeit der steigenden Flanken des hellblauen Graphs ansteigen: Mit Ankunft der Fahrzeuge steigt die Netzlast. Im Intervall zwischen ca. 00:00 Uhr und 06:00 Uhr ist darüber hinaus erkennbar, dass die Lastkurve etwa am Tageswechsel stark abfällt, ob wohl die Fahrzeuge noch über mehrere Stunden im Betriebshof stehen (hellblaue Kurve). Die Fahrzeuge sind also bereits deutlich vor Abfahrt vollgeladen und es liegt kein weiterer Ladebedarf vor. Die Anwesenheitsdauer wird also nur schlecht zur Nachladung ausgenutzt.

Im zweiten, optimierten Fall in Abbildung 52 wird ein deutlich konstanterer Lastverlauf ersichtlich. Durch die Verschiebung der einzelnen Ladeintervalle innerhalb der Aufenthaltsdauern im Depot, kann der Lastverlauf deutlich geglättet und hinsichtlich der Amplitude reduziert werden.

Die Lastspitze wird von 1.589 kVA um ca. -49 % auf 811 kVA reduziert. Der Lastverlauf ist insgesamt sehr homogen und rangiert die meiste Zeit etwa zwischen 500 und 720 kVA.



**Abbildung 52: Lastgang BH Bad Belzig (mit Optimierung)**

Auf eine detaillierte Beschreibung aller Lastgänge wird an dieser Stelle verzichtet, da Maßnahmen und Auswirkungen übertragbar sind. Die Graphen aller Lastgänge sind in Anlage 4) aufgeführt.

### b) Lastgangoptimierung Resultate und Dimensionierung Netzanschluss

Die relevanten Kennwerte der Lastgangoptimierung sind in folgender Tabelle aufgeführt. In der Tabelle ist ebenfalls eine abgeschätzte Größe für den MS/NS<sup>1</sup>-Transformator angegeben, über den die Netzanbindung auf Mittelspannungsebene erfolgt.

Die Dimensionierung des Netzanschlusstransformators basiert auf der Lastspitze nach Optimierung. Berücksichtigt wird Lastreserve in Höhe von 30 %. Darüber hinaus erfolgt die Auslegung derart, dass der Arbeitspunkt des Transformators 80 % der Nennleistung nicht überschreitet. Die Nennleistung entspricht der angegebenen Größe.

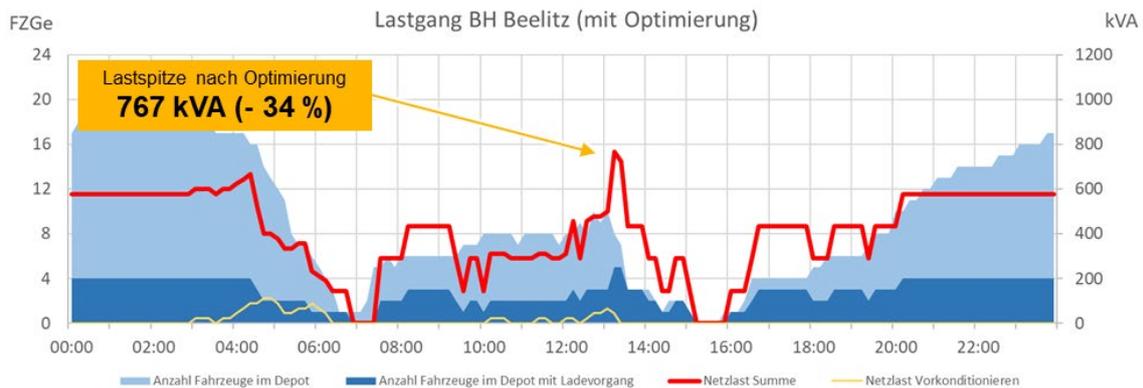
<sup>1</sup> MS/NS: Mittelspannung/Niederspannung

Betriebshof	Lastspitze vor Optimierung	Lastspitze nach Optimierung	Lastspitze Reduktion	Abgeschätzte Trafogröße
BH Bad Belzig	1.589 kVA	811 kVA	-49%	1.250 kVA
BH Beelitz	1.156 kVA	767 kVA	-34%	1.250 kVA
BH Brandenburg	867 kVA	433 kVA	-50%	800 kVA
BH Potsdam	1.300 kVA	722 kVA	-44%	1.250 kVA
BH Stahnsdorf	2.022 kVA	1.144 kVA	-43%	2.000 kVA
BH Werder	867 kVA	433 kVA	-50%	800 kVA
BH Ziesar	722 kVA	289 kVA	-60%	500 kVA
BH Vetter Wittenberg	333 kVA	333 kVA	0%	500 kVA
BH Anger Potsdam	433 kVA	289 kVA	-33%	500 kVA
BH AC Busreisen Potsdam	144 kVA	144 kVA	0%	400 kVA
BH Kortschlag	90 kVA	90 kVA	0%	400 kVA

**Tabelle 40: Resultate Lastgangoptimierung und erforderliche Netzanbindung**

Die Lastgangoptimierung kann weitestgehend ohne relevante Besonderheiten ausgeführt werden. Zu beachten ist lediglich ein einzelner Sonderfall im Linienbündel Potsdam. Umlauf 1501 läuft den Betriebshof erst gegen 29:04 Uhr (also 05:04 Uhr am Folgetag an). Das Zeitintervall bis zur geplanten Abfahrt um 06:39 Uhr reicht nicht für die Vollladung der Batterie aus. Da die Vollladung gegen 07:00 Uhr abgeschlossen ist, wird dieses Problem als vernachlässigbar eingeschätzt. Einerseits tritt der Umstand nur im Worst-Case Fall ein und ist damit auf eine überschaubare Anzahl Betriebstage begrenzt. Andererseits ist die Zeitdiskrepanz mit etwa 20 Minuten sehr klein, was notfalls gut durch den Einsatz eines Reservebusses kompensiert werden kann. In diesem Fall wird der Umlauf am Folgetag ab 06:39 Uhr mit dem Reservefahrzeug gefahren. Das am Vortag eingesetzte Fahrzeug wird ab ca. 07:00 Uhr (nach Vollladung) der Reserve zugeordnet.

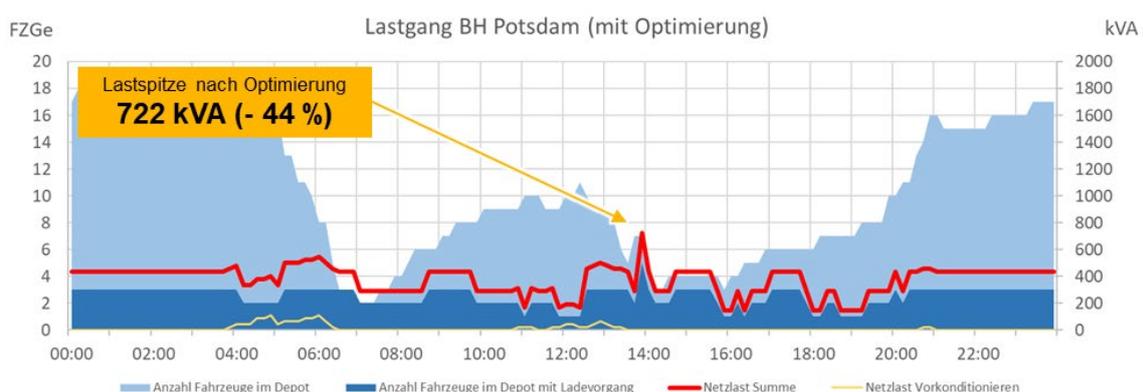
Darüber hinaus sind zwei Lastgänge nach Optimierung vorhanden, bei denen der Einsatz eines stationären Speichers dezente Vorteile erzielen könnte. Beide Fälle sind hier nur der Vollständigkeit erwähnt. Aufgrund der eher geringen Verbesserungspotenzialen gegenüber Netzlastanforderungen im Normalbereich, wird unterstellt, dass die Zusatzaufwendungen für einen stationären Speicher (Kosten, Platzbedarf und Wartung) hier nicht ergriffen werden.



**Abbildung 53: Lastgang BH Beelitz (nach Optimierung)**

Zwischen 13:00 Uhr und 14:00 Uhr weist der optimierte Lastgang eine kurzzeitige Lastspitze auf, die durch ein Lademanagement nicht ohne weiteres reduziert werden kann. Durch den Einsatz eines stationären Speichers, wäre eine weitere Reduktion auf ca. 600 kVA denkbar.

Im Betriebshof Potsdam liegen sehr ähnliche Umstände vor. Auch hier liegt in der Mittagszeit (ca. 14:00 Uhr) eine sehr kurzzeitige Lastspitze vor, die mittels einen stationären Speichers auf etwa 600 kVA reduziert werden könnte.



**Abbildung 54: Lastgang BH Potsdam (mit Optimierung)**

## 2. Energiemengen

Während die weiteren Elemente der Untersuchung auf den sogenannten Worst-Case, also einen Betriebstag mit harten Einsatzbedingungen und maximalem Energieverbrauch, zurückgehen, wird hier der Average-Case angesetzt. Der Average-Case entspricht hier einem erwarteten Jahresdurchschnittsverbrauch.

Auch wenn die empfohlene Vorzugstechnologie BEV lediglich einen elektrischen Energieverbrauch auslöst, wird hier der korrespondierende H<sub>2</sub>-Bedarf ebenfalls berechnet. Dafür wird eine vollständige Flottenumstellung auf FCEV-Technik unterstellt. Die Berechnung erfolgt jeweils pro Linienbündel.

Für die „eigen“ betriebenen Linienbündel erben sich die folgenden Jahresenergiebedarfe.

Linienbündel	Jährlicher Strombedarf	Jährlicher H <sub>2</sub> -Bedarf
Bad Belzig	2.822 MWh	160,7 t H <sub>2</sub>
Beelitz	2.184 MWh	123,4 t H <sub>2</sub>
Brandenburg	1.399 MWh	80,1 t H <sub>2</sub>
Potsdam	2.496 MWh	137,9 t H <sub>2</sub>
Stahnsdorf	3.934 MWh	216,9 t H <sub>2</sub>
Werder	2.091 MWh	119,3 t H <sub>2</sub>
Ziesar	522 MWh	29,3 t H <sub>2</sub>
<b>Summe</b>	<b>15.448 MWh</b>	<b>867,6 t H<sub>2</sub></b>

**Tabelle 41: Jahresenergiebedarf „eigene“ Linienbündel (BEV & FCEV)**

Der Vollständigkeit halber sind hier auch die Energiebedarfe der durch Subunternehmer betriebenen Linienbündel aufgeführt.

Linienbündel	Jährlicher Strombedarf	Jährlicher H <sub>2</sub> -Bedarf
Sub.Glaser	357 MWh	20,2 t H <sub>2</sub>
Sub.inLehnin	1.581 MWh	89,9 t H <sub>2</sub>
Sub.Lange	700 MWh	40,4 t H <sub>2</sub>
Sub.Reich	400 MWh	24,1 t H <sub>2</sub>
Sub.Sabinchen	327 MWh	18,5 t H <sub>2</sub>
<b>Summe</b>	<b>3.364 MWh</b>	<b>193,1 t H<sub>2</sub></b>

**Tabelle 42: Jahresenergiebedarf „eigene“ Linienbündel (BEV & FCEV)**

Zur Einordnung: Ab einem Jahresenergiebedarf (FCEV) von etwa 182,5 t H<sub>2</sub> p.a. muss im Durchschnitt täglich eine Traileranlieferung von Wasserstoff erfolgen, da die aktuelle Kapazität eines entsprechenden Tankfahrzeugs bei 500 kg H<sub>2</sub> liegt. Auch wenn die Flottenversorgung per Wasserstoff den Vorteil hat, dass kein Stromanschluss am Standort erforderlich ist, ist die Versorgung mit dem Energieträger dennoch aufwendig.

**a) Infrastruktur-Betriebsreserve**

Um von äußeren Einflussfaktoren unabhängiger zu sein, wird üblicherweise eine betriebsinterne Kraftstoffreserve vorgehalten. Während dies für BEV nicht praktikabel erscheint, kann Wasserstoff in entsprechenden Speichern als Reserve vorgehalten werden.

Im batterieelektrischen Fall ist die lokale Stromspeicherung zwar theoretisch möglich, in der Praxis sind jedoch pro Betriebstag sehr große lokale Speicher erforderlich, was einerseits wirtschaftlich eine enorme Herausforderung darstellt, und andererseits in der Praxis bereits an verfügbaren Bauräumen scheitert.

Zur Abschätzung sind hier folgend die im Worst-Case berechneten Energiemengen des Betriebstages Freitag\_Schule für die „eigen“ betriebenen Linienbündel aufgeführt. Abhängig von der Anzahl Tage, für die die Betriebsreserve ausgelegt sein soll, muss dieser Wert multipliziert werden.

Linienbündel	Täglicher Strombedarf im Worst-Case)	Täglicher H <sub>2</sub> -Bedarf (im Worst-Case)
Bad Belzig	12.423 kWh	785 kg H <sub>2</sub>
Beelitz	9.208 kWh	580 kg H <sub>2</sub>
Brandenburg	6.082 kWh	385 kg H <sub>2</sub>
Potsdam	10.241 kWh	639 kg H <sub>2</sub>
Stahnsdorf	15.006 kWh	932 kg H <sub>2</sub>
Werder	8.524 kWh	532 kg H <sub>2</sub>
Ziesar	2.194 kWh	139 kg H <sub>2</sub>
<b>Summe</b>	<b>63.678 kWh</b>	<b>3.992 kg H<sub>2</sub></b>

**Tabelle 43: Tagesenergiebedarf im Worst-Case „eigene“ Linienbündel (BEV & FCEV)**

Zur Einordnung: Für die Speicherung des Tagesbedarfs (BEV) in Bad Belzig wären etwa 31 x 400 kWh Batteriespeicher (entspricht etwas Solobusatterie) erforderlich.

### 3. Ladeinfrastrukturkonzept

#### a) Technische Gestaltung der 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.

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.

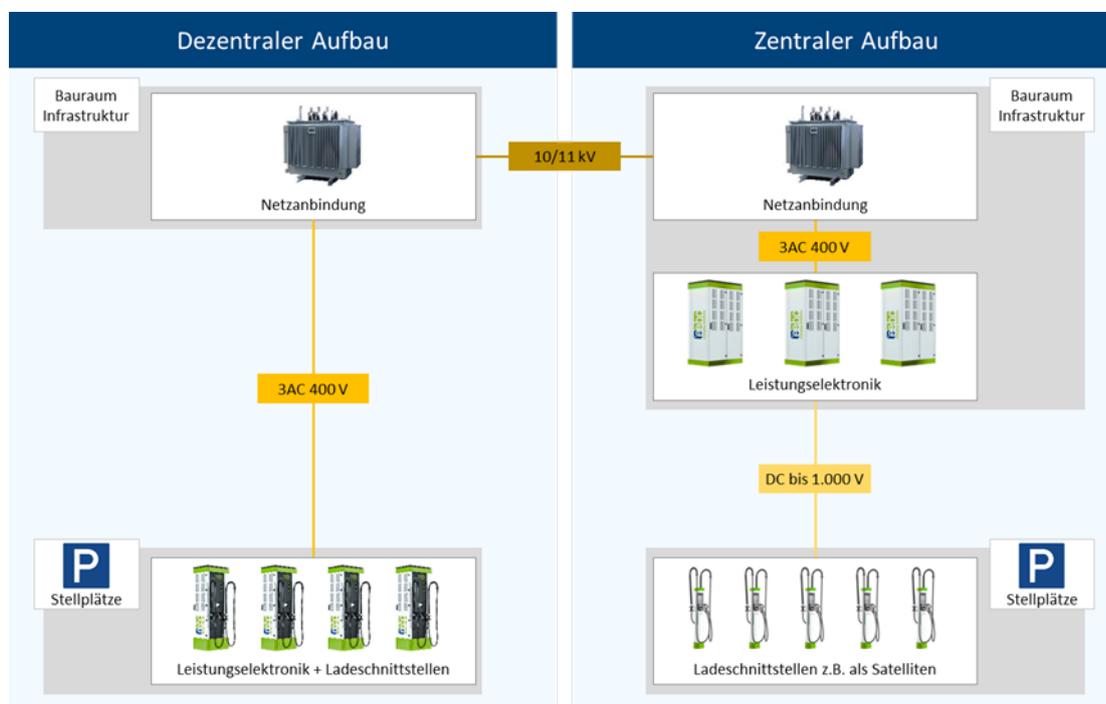


Abbildung 55: Dezentraler und zentraler Aufbau von Ladeinfrastrukturen

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 Kupferverschienenungen 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.

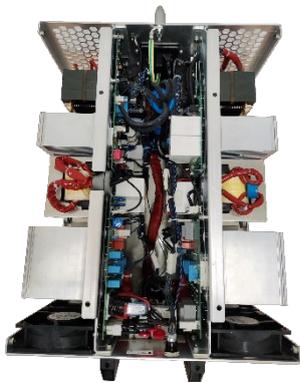


Abbildung 56: Leistungsmodul

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 Leistungsmodul 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 (Leistungsstufe) 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 Leistungsstufe 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).

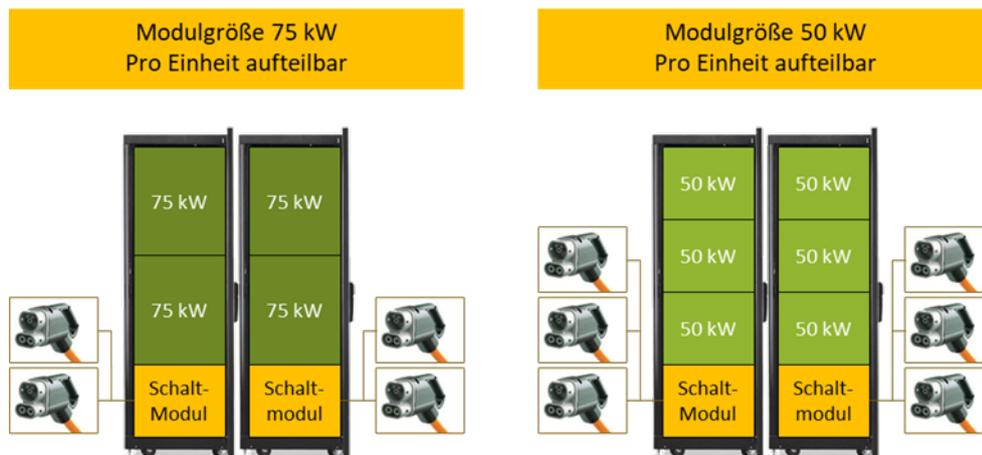


**Abbildung 57: Modulares System 2 x 1 x 150 kW**

Im ersten Fall mit sehr geringer Modularität ist pro Gehäuse ein einzelnes Lademodul verbaut, das mit einer Leistungsstufe 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 58: Modulare Systeme 2 x 2 x 75 kW und 2 x 3 x 50 kW**

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.

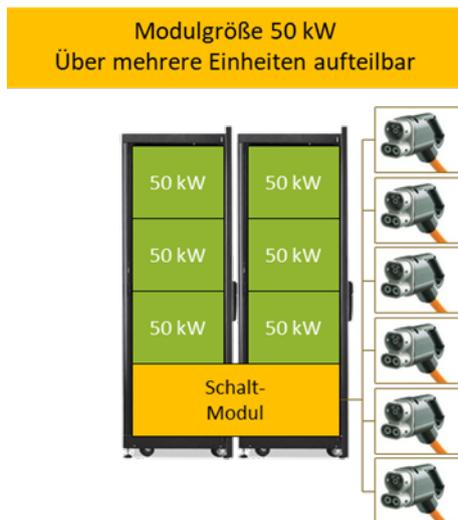
Ansatz: 1 x 2 x 75 kW	
Ladepunkt 1	Ladepunkt 2
0 kW	0 kW
0 kW	150 kW
150 kW	0 kW
75 kW	75 kW

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 44: Übersicht Verschaltungsmöglichkeiten bei verschiedenen Modulgrößen**

Die Auswirkung wird besonders deutlich, wenn die Möglichkeiten 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 59: Modulares System 1 x 6 x 50 kW**

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. Leistungsmodul rangieren üblicherweise zwischen 25 kW und 100 kW, wobei 50 kW den typischen Wert darstellen. Es gilt anzumerken, dass insbesondere sehr kleine Leistungsmodul 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 angebundene Ladeschnittstellen weiterreichen. Angenommen es werden zwei Systeme mit einer Modulleistung von 3 x 50 kW betrachtet (vgl. Beispiel in Tabelle 44). 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.

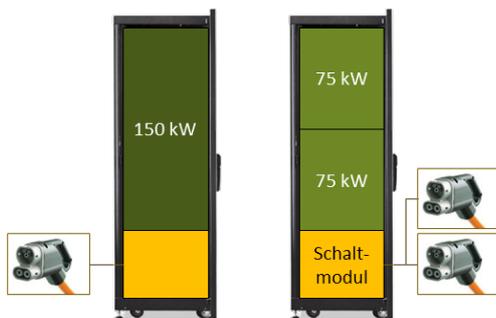
Für die regiobus lässt sich zusammenfassen, dass ein Konzeptansatz idealerweise auf dasselbe Leistungsmodul über alle verschiedenen Depots oder Ladeeinrichtungen hinweg zurückgeführt wird. Dabei gilt es eine möglichst kleine Modulgröße zu etablieren, um

- 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.

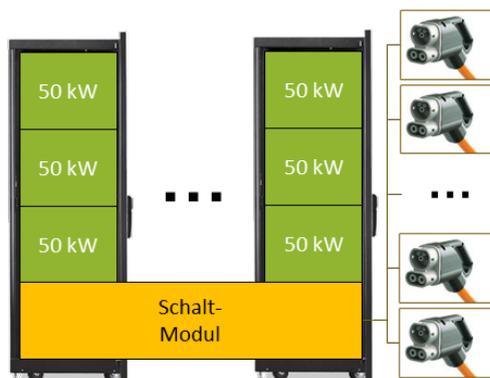
Als dediziertes System wird hier ein Ansatz verstanden, bei dem eine abgeschlossene Systeminstanz (LIS-Einheit) eine geringe Anzahl Ladepunkte ( $\leq 3$  LP) bedient. Darüber hinaus bestehen keine weiteren Verbindungen. Sobald die an die Ladepunkte angeschlossenen Fahrzeuge vollgeladen sind, wird die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



**Abbildung 60: Dediziertes Ladesystem (Beispiel)**

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 Infrastrukturkosten 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.<sup>1</sup> 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 61: Kooperatives Ladesystem (Beispiel)**

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, An-

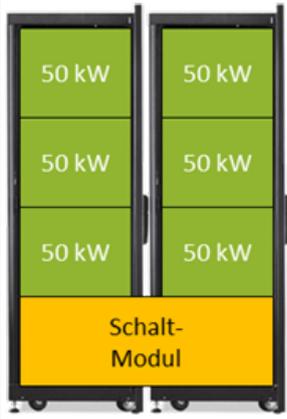
<sup>1</sup> In der Praxis kann in der Regel eine Ladeinfrastruktur mit 40-50 % der Leistung einer Ladeinfrastruktur umgesetzt werden, die für eine Ladesäule ohne Modularität und Kooperationsfähigkeit erforderlich wäre. Das Kosteneinsparpotenzial ist von diversen Einflussfaktoren (Hersteller, genaue Ausführung, Sondermaßnahmen) abhängig, sollte aber in erster Näherung proportional zur implementierten Leistungselektronik sein.

lagenausnutzungsgrad (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.

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 ( $\approx 20$  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	100 kW	↔ 60 kW	60 kW	Bus 3
	50 kW				
	50 kW	100 kW	↔ 130 kW	100 kW	Bus 4
	50 kW				

**Tabelle 45: 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 46: 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) 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 angebundnen Ladepunkten pro Systemeinheit.

Für die Auslegung wird eine Reserveflotte von 10 % pro Fahrzeugtyp angesetzt. Für größere Reserveflotten muss das Infrastrukturkonzept erweitert werden. Da die Reserveflotte (stehend) keinen Ladebedarf auslöst, können die Systeme unproblematisch erweitert werden.

Für die Betriebshöfe aus den „eigen“ betriebenen Linienbündeln ergeben sich folgende Infrastrukturkonzepte. Pro Betriebshof können mehrere Systemvarianten erforderlich sein. Für den Vollausbau sind alle angegebenen Varianten erforderlich.

### 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 Bad Belzig

### Randbedingungen

- Max. Ladeleistung pro Bus: 130 kW
  - Ausnahme Sprinter: 80 kW (Zwischenladen). 22 kW (Übernacht)
- Lastspitze nach Optimierung: 811 kVA
- Max. Anzahl gleichzeitiger Ladungen: 5
- Einsatzflotte + Reserve ( $\approx 10\%$ )
  - Solo: 16 + 2
  - Gelenk: 8 + 1
  - Midi: 3 + 1
  - Sprinter: 1 + 1
- Empfohlener MS/NS Transformator: 1.250 kVA

### Systemvariante 1:

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

### Systemvariante 2:

- Anzahl Instanzen des Systems: 2
- Zugeordnete Fahrzeugtypen: SP
- Systemleistung pro Instanz: 22 kW
- Anzahl Ladepunkte pro Instanz: 1
- *Anmerkung:*

*Hier: AC-Wallboxen/Ladepunkte. Schnellladungen am Tag werden mit der DC-Ladeinfrastruktur oben (Systemvariante 1) durchgeführt.*

**BH Beelitz**Randbedingungen

- Max. Ladeleistung pro Bus: 130 kW
- Lastspitze nach Optimierung: 767 kVA
- Max. Anzahl gleichzeitiger Ladungen: 5
- Einsatzflotte + Reserve ( $\approx 10\%$ )
  - Solo: 10 + 1
  - Gelenk: 7 + 1
- Empfohlener MS/NS Transformator: 1.250 kVA

Systemvariante 1:

- Anzahl Instanzen des Systems: 2
- Zugeordnete Fahrzeugtypen: SL, GL
- Systemleistung pro Instanz: 600 kW
- Anzahl Ladepunkte pro Instanz: 8

Systemvariante 2:

- Anzahl Instanzen des Systems: 1
- Zugeordnete Fahrzeugtypen: SL, GL
- Systemleistung pro Instanz: 400 kW
- Anzahl Ladepunkte pro Instanz: 4

## BH Brandenburg

### Randbedingungen

- Max. Ladeleistung pro Bus: 130 kW
- Lastspitze nach Optimierung: 433 kVA
- Max. Anzahl gleichzeitiger Ladungen: 3
- Einsatzflotte + Reserve ( $\approx 10\%$ )
  - Solo: 13 + 2
  - Gelenk: 2 + 1
- Empfohlener MS/NS Transformator: 800 kVA

### Systemvariante 1:

- Anzahl Instanzen des Systems: 2
- Zugeordnete Fahrzeugtypen: SL, GL
- Systemleistung pro Instanz: 400 kW
- Anzahl Ladepunkte pro Instanz: 8

### Systemvariante 2:

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

## BH Potsdam

### Randbedingungen

- Max. Ladeleistung pro Bus: 130 kW
- Lastspitze nach Optimierung: 722 kVA
- Max. Anzahl gleichzeitiger Ladungen: 5
- Einsatzflotte + Reserve ( $\approx 10\%$ )
  - Solo: 4 + 1
  - Gelenk: 14 + 2
  - Midi: 1 + 1
- Empfohlener MS/NS Transformator: 1.250 kVA

### Systemvariante 1:

- Anzahl Instanzen des Systems: 3
- Zugeordnete Fahrzeugtypen: SL, GL, MI
- Systemleistung pro Instanz: 600 kW
- Anzahl Ladepunkte pro Instanz: 8

## BH Stahnsdorf

### Randbedingungen

- Max. Ladeleistung pro Bus: 130 kW
- Lastspitze nach Optimierung: 1.144 kVA
- Max. Anzahl gleichzeitiger Ladungen: 7
- Einsatzflotte + Reserve ( $\approx 10\%$ )
  - Solo: 21 + 3
  - Gelenk: 1 + 1
  - Capa: 8 + 1
- Empfohlener MS/NS Transformator: 2.000 kVA

### Systemvariante 1:

- Anzahl Instanzen des Systems: 4
- Zugeordnete Fahrzeugtypen: SL, GL, CP
- Systemleistung pro Instanz: 600 kW
- Anzahl Ladepunkte pro Instanz: 8

### Systemvariante 2:

- Anzahl Instanzen des Systems: 1
- Zugeordnete Fahrzeugtypen: SL, GL, CP
- Systemleistung pro Instanz: 400 kW
- Anzahl Ladepunkte pro Instanz: 4

## BH Werder

### Randbedingungen

- Max. Ladeleistung pro Bus: 130 kW
  - Ausnahme Sprinter: 80 kW (Zwischenladen). 22 kW (Übernacht)
- Lastspitze nach Optimierung: 433 kVA
- Max. Anzahl gleichzeitiger Ladungen: 3
- Einsatzflotte + Reserve ( $\approx 10\%$ )
  - Solo: 4 + 1
  - Gelenk: 14 + 2
  - Sprinter: 1 + 1
- Empfohlener MS/NS Transformator: 800 kVA

### Systemvariante 1:

- Anzahl Instanzen des Systems: 3
- Zugeordnete Fahrzeugtypen: SL, GL
- Systemleistung pro Instanz: 400 kW
- Anzahl Ladepunkte pro Instanz: 8

### Systemvariante 2:

- Anzahl Instanzen des Systems: 2
- Zugeordnete Fahrzeugtypen: SP
- Systemleistung pro Instanz: 22 kW
- Anzahl Ladepunkte pro Instanz: 1
- *Anmerkung:*

*Hier: AC-Wallboxen/Ladepunkte. Schnellladungen am Tag werden mit der DC-Ladeinfrastruktur oben (Systemvariante 1) durchgeführt.*

## BH Ziesar

### Randbedingungen

- Max. Ladeleistung pro Bus: 130 kW
- Lastspitze nach Optimierung: 289 kVA
- Max. Anzahl gleichzeitiger Ladungen: 2
- Einsatzflotte + Reserve ( $\approx 10\%$ )
  - Solo: 5 + 1
- Empfohlener MS/NS Transformator: 500 kVA

### Systemvariante 1:

- Anzahl Instanzen des Systems: 1
- Zugeordnete Fahrzeugtypen: SL
- Systemleistung pro Instanz: 600 kW
- Anzahl Ladepunkte pro Instanz: 8

## BH Vetter Wittenberg

### Randbedingungen

- Max. Ladeleistung pro Bus: 130 kW
- Lastspitze nach Optimierung: 333 kVA
- Max. Anzahl gleichzeitiger Ladungen: 2
- Einsatzflotte + Reserve ( $\approx 10\%$ )
  - Solo: 6 + 1
- Empfohlener MS/NS Transformator: 500 kVA

### Systemvariante 1:

- Anzahl Instanzen des Systems: 1
- Zugeordnete Fahrzeugtypen: SL
- Systemleistung pro Instanz: 600 kW
- Anzahl Ladepunkte pro Instanz: 8

## BH Anger Potsdam

### Randbedingungen

- Max. Ladeleistung pro Bus: 130 kW
- Lastspitze nach Optimierung: 289 kVA
- Max. Anzahl gleichzeitiger Ladungen: 2
- Einsatzflotte + Reserve ( $\approx 10\%$ )
  - Solo: 4 + 1
- Empfohlener MS/NS Transformator: 500 kVA

### Systemvariante 1:

- Anzahl Instanzen des Systems: 1
- Zugeordnete Fahrzeugtypen: SL
- Systemleistung pro Instanz: 600 kW
- Anzahl Ladepunkte pro Instanz: 8

## BH AC Busreisen Potsdam

### Randbedingungen

- Max. Ladeleistung pro Bus: 130 kW
- Lastspitze nach Optimierung: 144 kVA
- Max. Anzahl gleichzeitiger Ladungen: 1
- Einsatzflotte + Reserve ( $\approx 10\%$ )
  - Solo: 1 + 1
  - Gelenk: 1 + 1
- Empfohlener MS/NS Transformator: 400 kVA

### Systemvariante 1:

- Anzahl Instanzen des Systems: 1
- Zugeordnete Fahrzeugtypen: SL
- Systemleistung pro Instanz: 400 kW
- Anzahl Ladepunkte pro Instanz: 4

## BH Kortschlag

### Randbedingungen

- Max. Ladeleistung pro Bus: 80 kW (Zwischenladen), 22 kW (Übernacht)
- Lastspitze nach Optimierung: 90 kVA
- Max. Anzahl gleichzeitiger Ladungen: 1
- Einsatzflotte + Reserve ( $\approx 10\%$ )
  - Pkw: 2 + 2
- Empfohlener MS/NS Transformator: 400 kVA

### Systemvariante 1:

- Anzahl Instanzen des Systems: 1
- Zugeordnete Fahrzeugtypen: Pkw
- Systemleistung pro Instanz: 400 kW
- Anzahl Ladepunkte pro Instanz: 4
- *Anmerkung:*  
*Schnellladepunkte auch für andere Pkw nutzbar*

### Systemvariante 2:

- Anzahl Instanzen des Systems: 4
- Zugeordnete Fahrzeugtypen: SP
- Systemleistung pro Instanz: 22 kW
- Anzahl Ladepunkte pro Instanz: 1
- *Anmerkung:*  
*Hier: AC-Wallboxen/Ladepunkte. Schnellladungen am Tag werden mit der DC-Ladeinfrastruktur oben (Systemvariante 1) durchgeführt.*

#### 4. Betriebshofintegration

Um batterieelektrische Fahrzeuge im Regelbetrieb einzusetzen, muss die eingangs konzeptionierte Ladeinfrastruktur in die Betriebshöfe der regiobus integriert werden. Im Rahmen dieses Kapitels wird untersucht, inwiefern dies auf Basis des Status-Quos möglich ist. Im Kontext dessen muss eingeordnet werden, dass im Rahmen einer Machbarkeitsstudie keine Detailplanung oder Architektenleistung erbracht werden kann (vgl. unten Abschnitt a) Fluchtwege und Brandabschottung).

Im Fokus der Untersuchung steht, inwiefern die aktuell verfolgte Abstellung um Ladeinfrastruktur erweitert werden kann. Untersuchungsgegenstand sind beispielsweise Bauraumanforderungen von Gewerken und Ladeschnittstellen, Leitungswege und Fahrwege. Bei der Platzierung von Komponenten wird ein Ansatz verfolgt, bei dem Leitungswege möglichst aufwendungsarm ausgeführt werden können. Unterirdische Kabelstrecken werden zugunsten überirdischer Installationen – sofern möglich – vermieden. Der aktuelle Status quo (inklusive heutiger Fahrwege) wird insgesamt nach Möglichkeit beibehalten.

Fahrzeugseitig wird eine Schnittstellenausführung nach VDV-Empfehlung vorausgesetzt, bei der die Ladekontakte auf Höhe der Vorderachse ausgeführt sind. Ergänzend wird hier teilweise eine beidseitige Schnittstellenausführung vorausgesetzt, bei der sowohl auf der linken als auch auf der rechten Fahrzeugseite ein Ladekontakt installiert wird. Diese Option ist bei namhaften Herstellern für batterieelektrische Busmodelle üblicherweise unproblematisch realisierbar und wird allgemein empfohlen, um eine platzsparende Abstellung zu ermöglichen.

Der geplante Flottenumfang entspricht der aktuellen Fuhrparkliste mit antizipierter Vollumstellung auf Batteriebusse. Dabei kann die Fuhrparkzusammensetzung in Bezug auf die Betriebshofintegration in Grenzen variiert werden:

- Teilmengen der konzeptionierten elektrischen Fahrzeugflotte sind möglich. Die Infrastruktur kann schrittweise ausgebaut werden, wobei ein Ausbau „pro Fahrzeug“ in der Regel nicht sinnvoll ist. Vielmehr bietet sich die Zusammenfassung örtlich begrenzter Bauabschnitte an, die im Zuge einer gemeinsamen vorbereitenden Maßnahme für die Ladeinfrastruktur vorgesehen werden (Leitungswege/Leerrohre vorbereiten, Haltekonstruktionen installieren, Fundamente gießen, Gehäuse setzen und ähnliches). Je nach Ausführung kann die Elektronik des Ladesystems ggf. schrittweise („pro Bus“) erweitert werden. Um Installations- und Inbetriebnahmeaufwendungen zu reduzieren, ist die Vollinstallation pro Systemvariante<sup>1</sup> in der Regel sinnvoll. Die Ladepunkte (Schnittstellen am Stellplatz) selbst

---

<sup>1</sup> Instanz des Ladesystems mit bis zu acht angebundene Ladeschnittstellen. Verbaut in Schaltschränken.

können meist nach Bedarf nachgerüstet werden, ohne den laufenden Betrieb nennenswert zu beeinflussen.

- Die betrachtete Flotte kann infrastrukturseitig mit überschaubarem Aufwand erweitert werden. Das verfolgte Ladeinfrastrukturkonzept ist modular aufgebaut und kann um weitere Instanzen erweitert werden, falls entsprechende Räume für die Abstellung zusätzlicher Fahrzeuge verfügbar sind.
- Position und Anzahl der Ladeschnittstellen kann im Konzept variiert werden, sofern die seitlichen Parkabstände davon nicht betroffen sind. Beispielsweise kann eine Abstellspur mit drei Solobussen hintereinander auch für zwei Gelenkbusse dimensioniert werden. Vor der Ausführungsplanung sollte ein möglichst finales Stellplatzkonzept verabschiedet werden. Der nachträgliche Umbau ist zwar denkbar, jedoch vielfach mit Bauaufwendungen verbunden, wenn Leitungswege geändert und Tragkonstruktionen umgebaut werden müssen. Bei Variation der Fahrzeugflotte kann eine Anpassung (Erweiterung) der konzeptionierten Ladeinfrastruktur erforderlich sein.
- Die betrachteten Stellplätze gelten „kleiner-gleich“ den angegebenen Fahrzeugtypen. Die Schnittstellenplatzierung erfolgt nach marktüblicher Ausführung (und VDV-Empfehlung) auf Höhe der Vorderachse, so dass auch kürzere Fahrzeuge auf Stellplätzen für längere Ausführungen geparkt und geladen werden können. Mögliche Einschränkungen liegen nur vor, wenn die Unterscheidung zwischen AC- und DC-Ladung relevant ist. Fahrzeuge ohne DC-Ladeschnittstelle müssen zwingend über eine AC-Ladeschnittstelle nachgeladen werden.

Vor Realisierung von Baumaßnahmen ist eine Detailplanung unerlässlich. Einerseits ist eine fachlich fundierte Beurteilung der Bausubstanz und Tragfähigkeit (beispielsweise von Hallenkonstruktionen) erforderlich. Andererseits muss die Untersuchung in einer tieferen Detailebene ausgeführt werden, um eine ausreichende Planungssicherheit vor der Auslösung möglicher Investitionen zu erreichen.

#### **a) Fluchtwege und Brandabschottung**

Untersuchungsgegenstand ist die Integration von Ladeinfrastruktur in das aktuelle Stellplatzkonzept. Die folgende Bewertung ist entsprechend auf diese Basis beschränkt. Es gilt zu beachten, dass weitere Faktoren einen großen Einfluss auf die finale Betriebshofgestaltung haben können, die erst im Rahmen einer Detailplanung unter Einbindung einer Architektenleistung und Fachplanern abschließend bewertet werden können.

Neben den möglichen Auswirkungen einer fachlichen Begutachtung von Boden sowie Bausubstanz, Tragfähigkeiten vorhandener Konstruktionen und ähnlichem, die möglicherweise Sanie-

rungsanforderungen oder Neubauten bedingen kann, stehen insbesondere die Themen Fluchtwege und Brandabschottung zur Debatte. Auch ohne fachlich vertiefte Untersuchung kann festgehalten werden, dass die vorhandenen Abstellhallen aktuelle Vorschriften und Empfehlungen für Fluchtwege im Neubau nicht immer erfüllen. Die aktuell verfolgten Abstellkonzepte zielen auf maximale Platzeffizienz und weisen vielfach eine tendenziell geringe Durchgangsbreite auf. Lade-stecker können zwar in die Abstellung integriert werden, beengen im Gefahrenfall die Fluchtwege jedoch über das aktuelle Maß hinaus. **Um mögliche Probleme mit Bauaufsicht, Berufsgenossenschaft und Versicherungen zu vermeiden, wird die Fachplanung von Flucht- und Rettungswegen im Rahmen der Detailplanung ausdrücklich empfohlen, auch wenn dies zur Folge haben kann, dass die Fahrzeugmenge in den Abstellhallen reduziert werden muss.**

Ähnliches gilt für Aufwendungen zur **Brandabschottung**, bei der Abstellhallen in verschiedene Segmente aufgeteilt werden, um die Ausweitung von Bränden zu verlangsamen. Die Bewertung der Installation von Brandabschottungen wird ebenfalls im Rahmen der Detailplanung dringend empfohlen, wobei insbesondere bei größeren Hallen die Einrichtung von Brandschotts als sinnvoll bewertet wird, um das Risiko eines Vollausfalls der Flotte zu reduzieren.

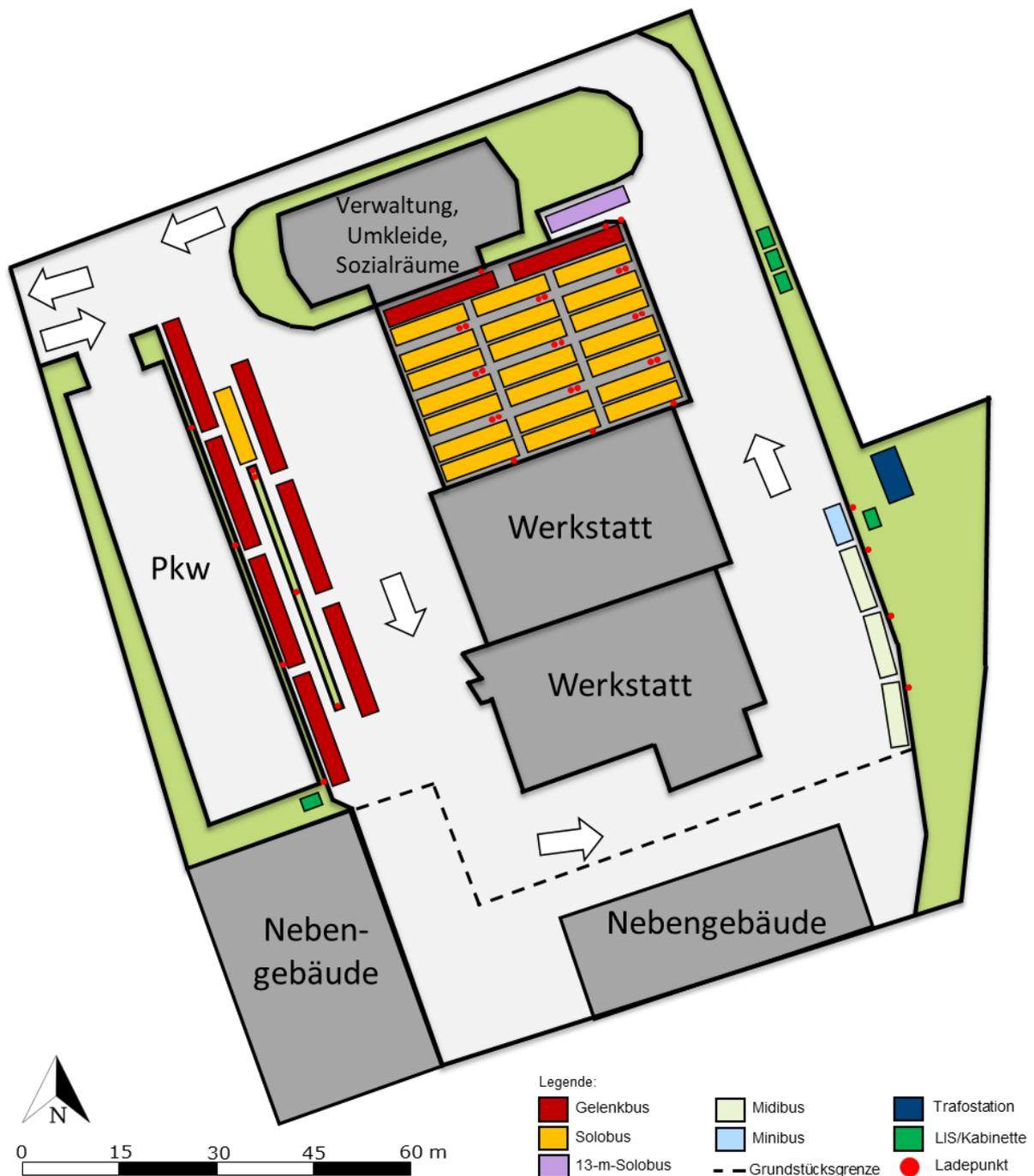
Ergänzend wird angeführt, dass die Empfehlungen aus VDV-Schrift 825 für den Neubau eines Betriebshofs für batterieelektrische Fahrzeuge nicht angewendet werden, da eine nachträgliche Erweiterung zur Debatte steht. Im Rahmen der VDV-Empfehlung sind erhöhte Abstände zwischen den Fahrzeugen vorgesehen, um selbst im Gefahrenfall einen freien Durchgang zwischen den Fahrzeugen zu gewährleisten. Die Empfehlungen werden grundsätzlich als sinnvoll eingeschätzt, führen bei der Umrüstung von Bestandsanlagen erfahrungsgemäß jedoch in der Regel zu umfassenden Hallenumbauten (oder Neubauten).

#### **b) Betriebshofintegration Standort Bad Belzig**

Entsprechend der Fuhrparkliste sind am Standort Bad Belzig (Brücker Landstraße) in Summe 36 Fahrzeuge stationiert:

- 9 x Gelenkbus (ca. 18 m)
- 1 x Solobus Dreiachser (ca. 13 m)
- 22 x Solobus (ca. 12 m)
- 3 x Midibus (ca. 10 m)
- 1 x Minibus (ca. 6 m).

Die auf dem Gelände vorhandenen Gebäude sind, abgesehen von der Abstellhalle, nicht vom Integrationskonzept betroffen.



**Abbildung 62: Plan Betriebshof Bad Belzig**

Das aktuelle Stellplatzkonzept in der Abstellhalle kann beibehalten werden, wenn die Themen Fluchtwege und Brandabschottung im Zuge des Bestandsumbaus nicht zum Tragen kommen. Im aktuellen Spurenkonzept sind die vorhandenen Doppelspuren jeweils durch einen Säulengang getrennt. Auf Seiten der Säulengänge können die Ladeschnittstellen platziert werden, ohne den Durchgang zwischen den Fahrzeugen in der Doppelspur zu beeinflussen. Die Schnittstellenausführung kann über ein Abrollsystem von oben erfolgen (sog. Deckenabroller), wenn die Bauräume im

Säulengang für Ladesatelliten (bauraumeffizientes Ordnungssystem für Ladestecker mit ähnlicher Ausführung wie Ladesäule ohne Leistungselektronik) nicht ausreichend sind. Für Fahrzeuge, die an den Hallenwänden abgestellt werden (Außenspuren), verkörpert die Installation von Ladeschnittstellen als Wallbox die bauraumeffizienteste Alternative. Wie im Plan verzeichnet, können weiterhin 23 Fahrzeuge abgestellt und geladen werden.

Darüber hinaus erfolgt die Fahrzeugabstellung außerhalb der Fahrwege im Depot an den Grundstücksgrenzen, beziehungsweise neben den Pkw-Parkfeldern auf der Westseite. Die Ladeschnittstellen können hier vollständig als Ladesatellit ausgeführt werden, wobei zwischen den Abstellspuren Einzelsatelliten erforderlich sind. Ergänzend werden auf dem Trennstreifen zwischen Pkw-Stellfläche und Busabstellung weitere Einzelsatelliten vorgesehen. Aufgrund des Versatzes der Fahrzeuge in Fahrtrichtung ist eine Ausführung als Doppelsatellit nicht möglich.

Am Standort Bad Belzig wird das südlich anschließende Grundstück durch einen Schwesterbetrieb genutzt, so dass die Befahrung dessen möglich ist. Die Platzierung von Infrastrukturkomponenten und Fahrzeugen erfolgt jedoch ausschließlich auf dem betriebseigenen Gelände.

Für die Platzierung von Elektronikgehäusen und Transformatorstationen bleibt ein ausreichender Gestaltungsspielraum vorhanden. Die im Plan eingetragenen Positionen stellen hier ein mögliches Ausführungsbeispiel dar. Aus Effizienzgründen sollte der Abstand zwischen MS/NS-Transformator und Ladeinfrastruktureinheiten (LIS-Einheiten; im Plan markiert als Kabinette/LIS) des Ladesystems möglichst kurz ausfallen, um die stärker verlustbehafteten 3AC 400 V Kabelwege auf ein Minimum zu reduzieren. Eine Anpassung der Platzierung in Abhängigkeit baulicher Anforderungen erscheint unkritisch.

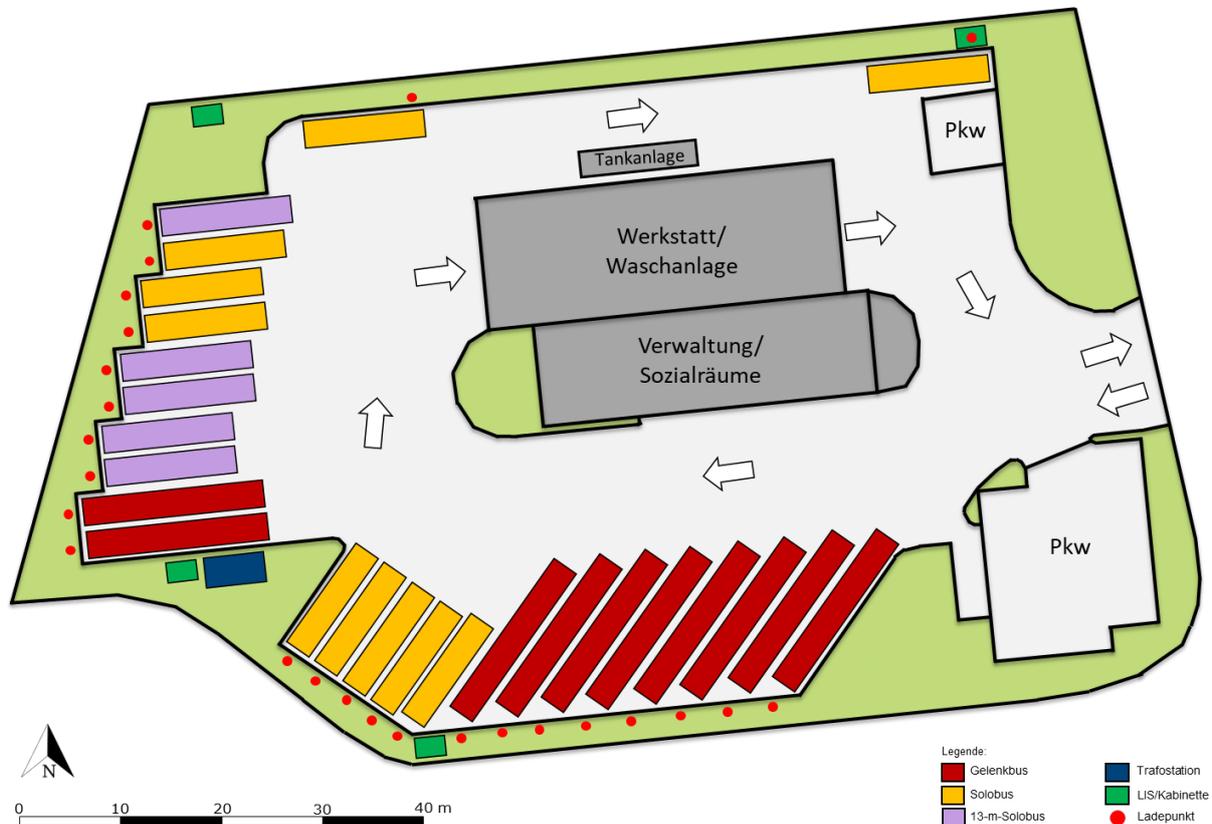
Die platzierten LIS-Einheiten können drei Gruppen von Abstellflächen zugeordnet werden. Die Ladepunkte der Abstellhalle (inkl. Stellplatz nördlich der Halle) werden über die LIS-Einheiten an der östlichen Grundstücksgrenze versorgt, während die Stellflächen an der West- und Ostseite über LIS-Einheiten in unmittelbarer Nähe auf den benachbarten Grünstreifen versorgt werden.

### **c) Standort Beelitz**

Entsprechend der Fuhrparkliste sind am Standort Beelitz (Im Schwäe) in Summe 25 Fahrzeuge stationiert:

- 10 x Gelenkbus (ca. 18 m)
- 5 x Solobus Dreiachser (ca. 13 m)
- 10 x Solobus (ca. 12 m).

Die auf dem Gelände vorhandenen Gebäude sind nicht vom Integrationskonzept betroffen. Alle Fahrzeuge werden in Freiabstellung geparkt.



**Abbildung 63: Plan Betriebshof Beelitz**

Die Fahrzeuge werden dem Grundstücksplan entsprechend außerhalb der Fahrwege an den Außengrenzen des Grundstücks abgestellt. Die Abstellung erfolgt weitestgehend in Schräg- oder Kopfabstellung. Auch wenn die Installation von Ladeinfrastruktur in diesen Abstellkonzepten unproblematisch ist, erfordert das Parkkonzept ein rückwärtiges Verlassen der Stellflächen (Einweiser für Rückwärtsfahrt erforderlich). In Anbetracht der großen Anzahl kopfseitig abgestellter Fahrzeuge scheint das Parkkonzept einen großen Aufwand für Betriebshofpersonal (Einweiser) zu verursachen. Ein Stellplatzkonzept mit Durchfahrsmöglichkeit wird grundsätzlich als empfehlenswert betrachtet, wobei die Argumentation nicht auf Ladeinfrastruktur, sondern Sicherheitsaspekte zurückgeht. Bei den vorherrschenden Platzverhältnissen ist ein entsprechendes Konzept jedoch nicht realisierbar, ohne auf Ausweichflächen für Teile des Fuhrparks zurückzugreifen.

An der Nordseite des Grundstücks werden zwei neue Stellflächen vorgesehen, die nicht Teil des aktuellen Stellplatzkonzeptes sind. Die Platzierung erfolgt in Absprache mit der regiobus auch am Platz der aktuellen Pkw-Abstellung in der nord-östlichen Ecke des Betriebshofs. Vorschlagsweise wird die Pkw Stellfläche nach Süden versetzt, wie im Plan verzeichnet. Ein Verschieben des Stell-

platzes in Richtung Westen (etwa mittig in die nördliche Umfahrung) kann realisiert werden, wenn langfristig die aktuelle Tankanlage zurückgebaut wird. Entsprechendes ist jedoch erst bei Vollumstellung der stationierten Flotte eine relevante Option.

Bei Kopf- und Schrägabstellung bietet sich auch der Einsatz dualer Ladesatelliten mit jeweils zwei Ladeschnittstellen an, die mittig zwischen zwei Stellplätzen installiert werden. Bei beidseitiger Schnittstellenausführung sind die Ladeschnittstellen über 5 bis 7 m lange Ladekabel gut erreichbar, wobei eine Länge von 7 m aus Handhabungsgründen empfohlen wird.

Die Platzierung von MS/NS-Transformator und LIS-Einheiten ist im betrachteten Grundstück unkritisch. Dargestellt ist ein Platzierungsvorschlag, der grundsätzlich variiert werden kann.

Die Installation auf den vorhandenen Grünstreifen bietet sich an, um den Bauaufwand gering zu halten. Im Rahmen einer Detailuntersuchung muss entschieden werden, ob der ‚einzelne‘ Stellplatz im nord-östlichen Bereich (auf aktueller Pkw-Fläche) in das Matrix-Ladesystem eingebunden wird, oder als eigenständige Kompaktladestation (Stand-Alone System mit integrierter Ladeelektronik) ausgeführt werden sollte. Dies hängt von der finalen Platzierung und der Anzahl aller relevanten Komponenten ab. Bei einem Matrix-Ladesystem sollte der Abstand zwischen LIS-Einheit und Ladepunkt 70 m nicht überschreiten.

Die Leitungswege können voraussichtlich vollständig über die umgebenden Grünstreifen ausgeführt werden, was den Aufwand für Tiefbaumaßnahmen deutlich reduziert. Unterirdische Leitungswege sind nicht zwingend erforderlich, können im Erdreich jedoch mit deutlich weniger Aufwand als unterhalb versiegelter Flächen erfolgen.

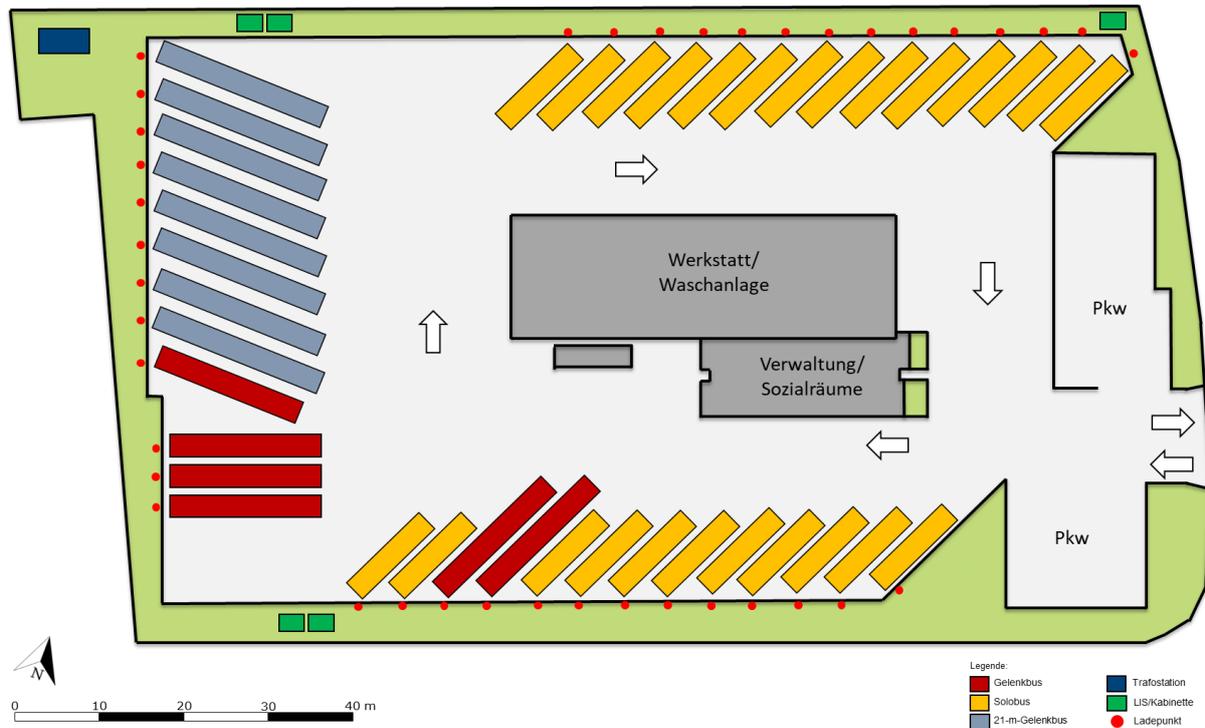
#### **d) Standort Stahnsdorf**

Am dritten untersuchten Standort in Stahnsdorf (Hamburger Straße) sind in Summe 39 Fahrzeuge stationiert:

- 8 x Großraum Gelenkbusse (ca. 21 m)
- 6 x Gelenkbus (ca. 18 m)
- 25 x Solobus (ca. 12 m).

Die auf dem Gelände vorhandenen Gebäude sind nicht vom Integrationskonzept betroffen. Alle Fahrzeuge werden ähnlich dem Standort Beelitz in Freiabstellung geparkt. Auch hier wird der Bedarf an Rückwärtsfahrten als hoch empfunden, wobei dies hier ebenfalls keinen Einfluss auf die Integration von Ladeinfrastruktur hat. Analog zum Standort Beelitz ist auch hier kein Abstellkonzept mit Durchfahrmöglichkeit umsetzbar, wenn die gegebene Fahrzeugmenge auf dem Grundstück abgestellt werden muss.

Die im Plan dargestellte Fahrzeugabstellung in Schräg- und Kopfabstellung entspricht dem aktuellen Status quo: Das aktuelle Stellplatzkonzept kann weiterverfolgt und um Ladeinfrastruktur erweitert werden.



**Abbildung 64: Plan Betriebshof Stahnsdorf**

Aufgrund der kopfseitigen Fahrzeugabstellung wird auch hier die Installation von dualen Ladesatelliten mit jeweils zwei Ladesteckern empfohlen, die mittig zwischen zwei Fahrzeugen platziert werden. Diese bieten deutliche Preisvorteile gegenüber zwei Einzelsatelliten.

Der das Grundstück umgebende Grünstreifen ist für die Installation von MS/NS-Transformator und LIS-Einheiten ausreichend dimensioniert. Lediglich für den MS/NS-Transformator sind die möglichen Bauflächen auf dem Grünstreifen eingeschränkt, wobei eine Platzierung in der nord-westlichen Grundstücksecke sinnvoll erscheint. Die LIS-Einheiten sind vorschlagsweise platziert, wobei hier ein Versatz möglich ist, sofern die Bauräume im näheren Umfeld der anzubindenden Ladepunkte gewählt werden.

Die vollständige Platzierung der Ladetechnik auf den gegebenen Grünflächen ist hinsichtlich der erforderlichen Leitungswege und verbundenen Bauaufwendungen attraktiv. Eine überirdische Leistungsverlegung erscheint vollständig möglich. Selbst bei Wahl einer unterirdischen Leistungsverlegung ist abseits versiegelter Flächen von einem überschaubaren Bauaufwand auszugehen.

e) Standort Brandenburg an der Havel

Der Standort Brandenburg an der Havel (Friedrichshafener Straße) stellt einen weiteren hier betrachteten Standort dar. In Summe sind hier 16 Fahrzeuge stationiert:

- 1 x Gelenkbus (ca. 18 m)
- 15 x Solobus (ca. 12 m).

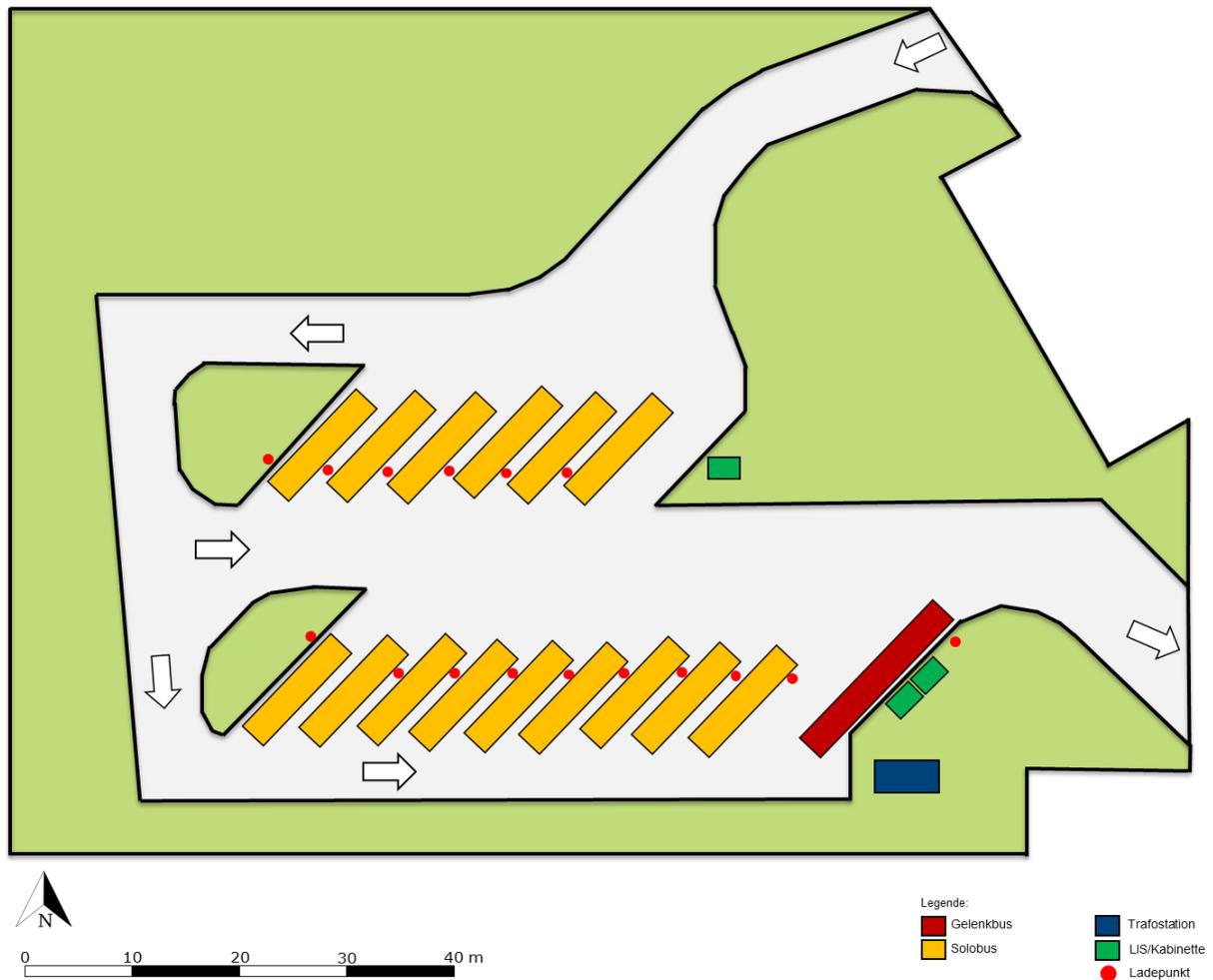


Abbildung 65: Plan Betriebshof Brandenburg an der Havel

Der Standort ist ein ausschließlicher Stellplatz ohne weitere Betriebsgebäude. Das vorhandene Fahr- und Abstellkonzept kann auch hier weiterverfolgt werden, da ausreichende Platzreserven zwischen den abgestellten Fahrzeugen vorgesehen werden können. Alle Stellplätze können in Einfahrtrichtung verlassen werden, so dass am Standort keine Rückwärtsfahrten erforderlich sind.

Die Ladeschnittstellen können als einseitige oder duale Ladesatelliten ausgeführt werden. Im Plan sind zunächst einseitige Schnittstellen vorgesehen, um einen maximalen Platzbedarf zugrunde zu legen. Über jeweils zwischen zwei Fahrzeugen platzierte duale Ladesatelliten (mit zwei Ladeschnittstellen) kann die Bauraumeffizienz bei Bedarf gesteigert werden, was hinsichtlich eines möglichen zukünftigen Ausbaus des Standorts als sinnvoll eingeschätzt wird.

Am Standort kann die großzügig bemessene umgebende Grünfläche sehr gut für die Installation vom MS/NS-Transformator und LIS-Einheiten genutzt werden. Im Plan verzeichnet ist ein Platzierungsvorschlag, der aus technischer Sicht sehr gut geeignet ist. Ähnlich zu den bereits diskutierten Betriebshof-Integrationskonzepten ist auch hier eine abweichende Platzierung unproblematisch möglich.

Aufgrund des Stellplatzkonzepten mit Durchfahrung müssen Ladesatelliten mit einem adäquaten Rammschutz ausgestattet werden, um Schäden an den Gewerken zu vermeiden. Grundsätzlich sind auch abweichende Gestaltungsoptionen denkbar, die das Unfallrisiko minimieren. Aufzuführen ist beispielsweise die Möglichkeit einer Teilüberbauung der Stellplätze (vergleichbar mit Carports), um die Ladeschnittstellen von oben über Deckenabroller zuzuführen und bei Nichtnutzung außerhalb des Kollisionsbereiches unter dem Überbauungsdach zu lagern. Die Platzverhältnisse erlauben die Installation von dualen Ladesatelliten auf angehobenen Plateaus, die über Bordsteine als Stellplatzbegrenzung fungieren können.

Die Leitungswege können nicht vollständig auf dem Grünstreifen ausgeführt werden. Aufgrund des Durchfahrkonzeptes muss entweder eine Überbauung erfolgen oder (wahrscheinlicher) eine Leitungstrasse quer zur Abstellung unterhalb der Stellplätze eingezogen werden. Dies gilt für beide Stellplatzbereiche auf dem Gelände. Aufwandsintensive Tiefbaumaßnahmen können nicht gänzlich vermieden werden, sofern auf eine Überbauung verzichtet wird, sind jedoch auf überschaubare Areale begrenzt.

Die großen umgebenden Grünflächen ermöglichen grundsätzlich auch die Realisierung eines Ladesystems über sogenannte Ladecontainer. Bei diesen neu am Markt verfügbaren Ansätzen sind MS/NS Transformator und die leistungselektronischen Komponenten in einer Containerlösung zusammengefasst. Der Container kann auf geeignet verdichteten Stellflächen per Kran platziert werden. Sofern eine Neugestaltung des Standorts zur Diskussion steht, kann dies eine sehr variable Lösung darstellen. Das System kann nach Nutzung bei Bedarf problemlos per Kran aufgenommen und verfrachtet werden. Da die gegebene Stellplatzsituation Tiefbaumaßnahmen erforderlich macht, ist es jedoch fraglich, ob diese auf temporäre Anwendungen ausgerichtete Lösung einen Mehrwert darstellt. Letztlich sind auch LIS-Einheiten mit Kranösen ausgestattet und können entsprechend aufwandsarm versetzt werden. Zu erwähnen ist jedoch, dass fest installierte LIS-Einheiten üblicherweise eine Kabelzuführung von unten durch die Fundamente erfordern.

## f) **Fazit Betriebshofintegration**

Die Analysen zur Betriebshofintegration von Ladeinfrastruktur für Batteriebusse fallen für alle betrachteten Betriebshöfe unkritisch aus. Dies gilt für die Standorte Bad Belzig, Beelitz, Stahnsdorf und Brandenburg an der Havel (Stellplatz). Der aktuelle Status quo kann in allen Fällen gut um die erforderliche Ladeinfrastruktur erweitert werden. Lediglich in Einzelfällen müssen ergänzend zum aktuellen Stellplatzkonzept einzelne Stellflächen hinzukommen. Diese können ohne störenden Einfluss auf die Fahrwege im Außenbereich der befahrbaren Grundstücksflächen ergänzt werden.

Um den Platzbedarf innerhalb der Stellflächen auf ein Minimum zu begrenzen, wird konsequent ein dezentrales Installationskonzept verfolgt. Hierbei wird am Stellplatz selbst lediglich die Ladeschnittstelle vorgesehen, während die bauraumaufwendigen Elektronikkomponenten extern in Schaltschränken verbaut werden. Die in sogenannten Ladeinfrastruktur-Einheiten (LIS-Einheiten; Bauform als Schaltschrank) zusammengefassten Gewerke können gut auf den vorhandenen Grünstreifen und Grünflächen an den Außengrenzen der Betriebshöfe verbaut werden. Gleiches gilt für die erforderlichen MS/NS-Transformatoren, die in einem Transformatorgehäuse ebenfalls auf den Grünbereichen platziert werden können.

Unter Einbehaltung des Status quos kann ein durchweg positives Fazit für alle Grundstücke gezogen werden. An dieser Stelle soll jedoch betont werden, dass Einflussfaktoren, die über den Inhalt dieser Machbarkeitsstudie hinaus gehen, durchaus die Bewertung abschwächen können.

Im Zuge der Erweiterung bestehender Anlagen kann das vorhandene Fluchtwegkonzept weiter fortgeführt werden. Jedoch gilt es zu beachten, dass aktuelle Vorschriften für Neubauten im Status quo nicht abgebildet sind. Innerhalb der Abstellhalle Bad Belzig können die vorhandenen Durchgänge erhalten bleiben, da die Ladestecker auf den jeweils gegenüberliegenden Fahrzeugseiten vorgesehen werden können. Die vorhandenen Wege erfüllen jedoch aller Voraussicht nach nicht die Durchgangsbreiten für Flucht- und Rettungswege für Neubauten. Um ausreichende Flucht- und Rettungswege vorzusehen, muss voraussichtlich ein Teil der Fahrzeuge aus der Halle ausgelagert werden. Für eine diesbezüglich belastbare Bewertung wird eine entsprechende Detailuntersuchung im Rahmen der Detail- oder Umsetzungsplanung empfohlen. Analoges gilt für mögliche Brandabschottungen, die in der Abstellhalle Bad Belzig eingezogen werden könnten. Ausreichende Bauräume für eine Installation unter Beibehaltung des Status quos in der Abstellung erscheinen nicht vorhanden. Auch hier wird eine Fachplanung im Zuge der Detail- oder Umsetzungsplanung empfohlen.

Abschließend wird noch der stellenweise hohe Anteil von Kopfabstellungen angeführt, der ein rückwärtiges Verlassen der Stellplätze erfordert (Einweiser erforderlich). Abweichende Konzepte mit Durchfahrung (ähnlich Stellplatz Brandenburg a. d. Havel) sind nur realisierbar, wenn Teile der Flotte außerhalb der Betriebshöfe stationiert werden.

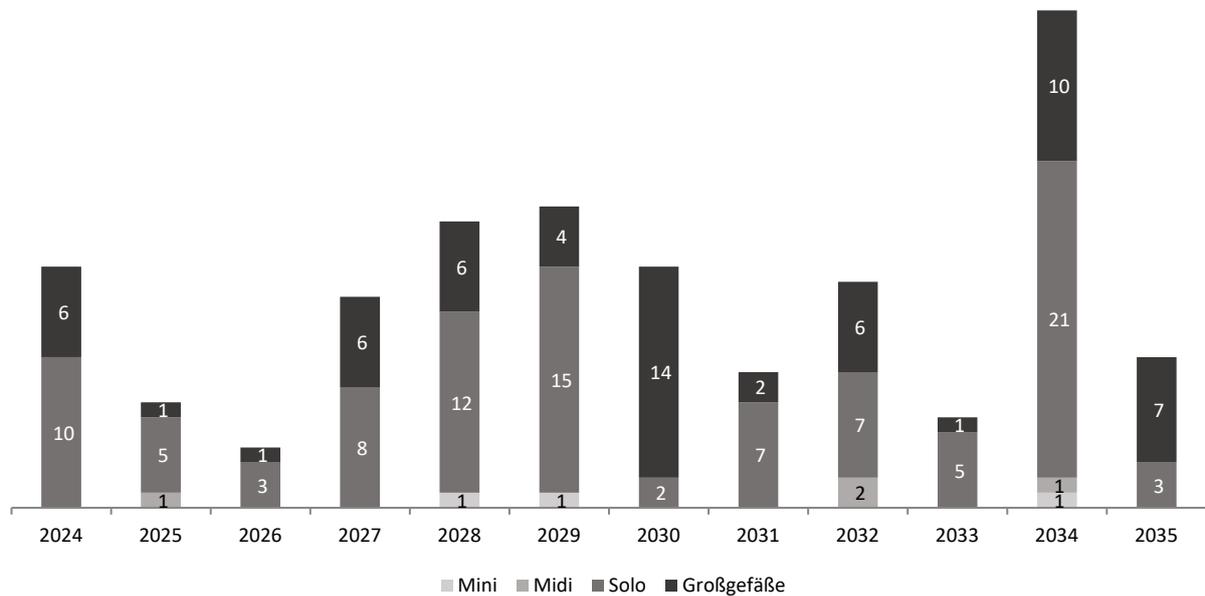
#### IV. Migrationspfade im Kontext unterschiedlicher Umstellungsszenarien für die regiobus

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 emissionsfreien Bussen vor dem Hintergrund der aktuellen Fuhrparkstruktur und weiteren Einflussgrößen der Fahrzeugbeschaffung abzuleiten. Die Fahrzeugbeschaffungsplanung wurde zunächst im Rahmen einer Analyse des aktuellen Fuhrparks für die Jahre 2024 bis 2035 im Abschnitt F technologieunabhängig erarbeitet. Diese Planung wird nachfolgend im Kontext der Flottentransformation in verschiedenen Umstellungsszenarien mit unterschiedlichen Elektrifizierungsquoten für die Neubeschaffungen belegt, um Migrationspfade abzuleiten. Diese sind:

- Szenario 1: Erfüllung der CVD-Quoten (sauber und emissionsfrei) („CVD-Szenario“),
- Szenario 2: Erfüllung der CVD-Quoten (sauber emissionsfrei) mit ausschließlicher Beschaffung von emissionsfreien Solobussen im Stadtverkehr gemäß der Beschaffungsquote der zweiten CVD-Beschaffungsperiode ab 2031 („CVD+-Szenario“),
- Szenario 3: Erfüllung der CVD-Quoten (emissionsfrei) mit ausschließlicher Beschaffung von emissionsfreien Bussen im Stadtverkehr und Anwendung der CVD-Quoten auf Solobusse im Überlandverkehr ab 2031 („CVD++-Szenario“) sowie
- Szenario 4: Erfüllung der CVD-Quoten (emissionsfrei) mit ausschließlicher Beschaffung von emissionsfreien Bussen ab 2031 („Vollumstellung“).

Bei allen Szenarien wird die gemäß Branchenvereinbarung vorgesehene Aussetzung der CVD-Beschaffungsquoten bis einschließlich 2026 berücksichtigt. Aufgrund der notwendigen Vorlaufzeiten zur Schaffung der Infrastruktur und der langwierigen Beschaffungszyklen der emissionsfreien Fahrzeuge sind die Beschaffungsplanungen in den Szenarien 1 bis 3 gleich. Das Szenario 4 bildet ein Extremszenario, was insbesondere die organisatorischen und finanziellen Herausforderungen einer Vollumstellung aufzeigen soll. 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<sub>2</sub>-Minderungspotenzial für die jeweiligen Szenarien betrachtet.



**Abbildung 66: Beschaffungsplanung der regiobus bis zum Jahr 2035: Anzahl Fahrzeuge nach Bauart**

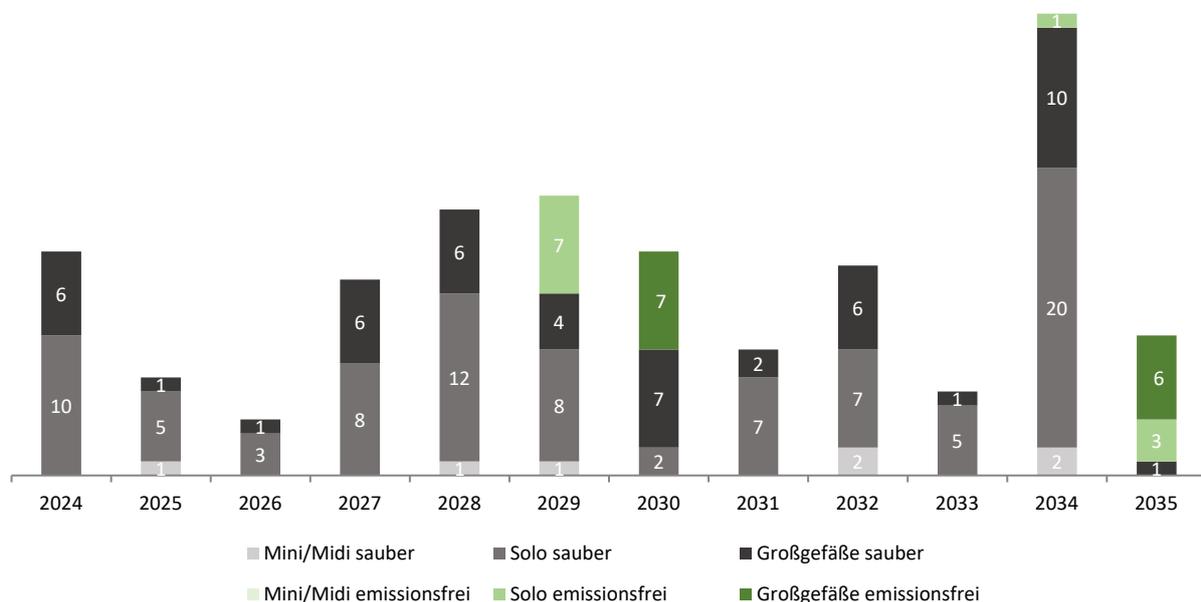
Auf diese Beschaffungsplanung werden nun die unterschiedlichen Umstellungsszenarien der Flottentransformation angewendet. Hierfür werden unterschiedliche Beschaffungsquoten auf die Neubeschaffungen angesetzt. Ziel ist es, die Beschaffungsplanung gemäß Umstellungsszenario für die Jahre 2024 bis 2035 abzuleiten 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. Bei einem Betrachtungshorizont bis zum Jahr 2035 werden bei keinem Szenario Mehrbedarfe induziert. Bei einer Erweiterung des Betrachtungshorizonts wird in Abhängigkeit zum Ausbau der Lade- und Betankungsinfrastruktur nur bei der Vollumstellung eine Erweiterung des Fuhrparks erforderlich.

### 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. Ab dem Jahr 2026 (und vorerst bis zum Jahr 2030) erhöhen sich die Teilquoten dann auf jeweils 32,5 %. Unter die „saubere“ Teilquote fallen, wie dargestellt, beispielsweise der Antrieb auf Basis von HVO100. Eine praktikable Lösung ist zum derzeitigen Stand die Erfüllung der saubereren CVD-Teilquote mit HVO100-Kraftstoffen, die wie konventioneller Diesel regulär bei Bestandsfahrzeugen, aber auch insbesondere bei neu zu beschaffende Dieseln

getankt und genutzt werden können. Die Verwendung von HVO100-Kraftstoffen hat demnach den Vorteil, dass weiterhin konventionelle 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 den CVD-Quoten innerhalb der beiden Referenzperioden frei gestalten lässt. Der erste E-Bus wird in diesem Szenario im Jahr 2029 beschafft. Mit dem im Jahr 2026 auslaufenden Rahmenvertrag fallen erst die ab 2027 getätigten Beschaffungen unter die angesetzte emissionsfreie CVD-Quote. Für das Umstellungsszenario „Erfüllung der CVD-Quoten“ ergeben sich somit die nachfolgend dargestellten Beschaffungen bis zum Jahr 2035.



**Abbildung 67: Beschaffungen der regiobus im Umstellungsszenario Erfüllung der CVD-Quoten**

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 die Solobusflotte im Stadtverkehr zu knapp 20 % elektrifiziert

(8 Solobusse). Im Jahr 2035 ist mehr als ein Viertel der Solobusse im Stadtverkehr der regiobus elektrifiziert, im Jahr 2046 ist dieser dann vollständig auf E-Busse umgestellt. Dieselbusse bilden in diesem Szenario also noch bis zum Ende des laufenden Jahrzehnts das Rückgrat des regiobus-Fuhrparks. Die folgende Abbildung zeigt die Entwicklung der Zusammensetzung des Fuhrparks bis zum Jahr 2035.

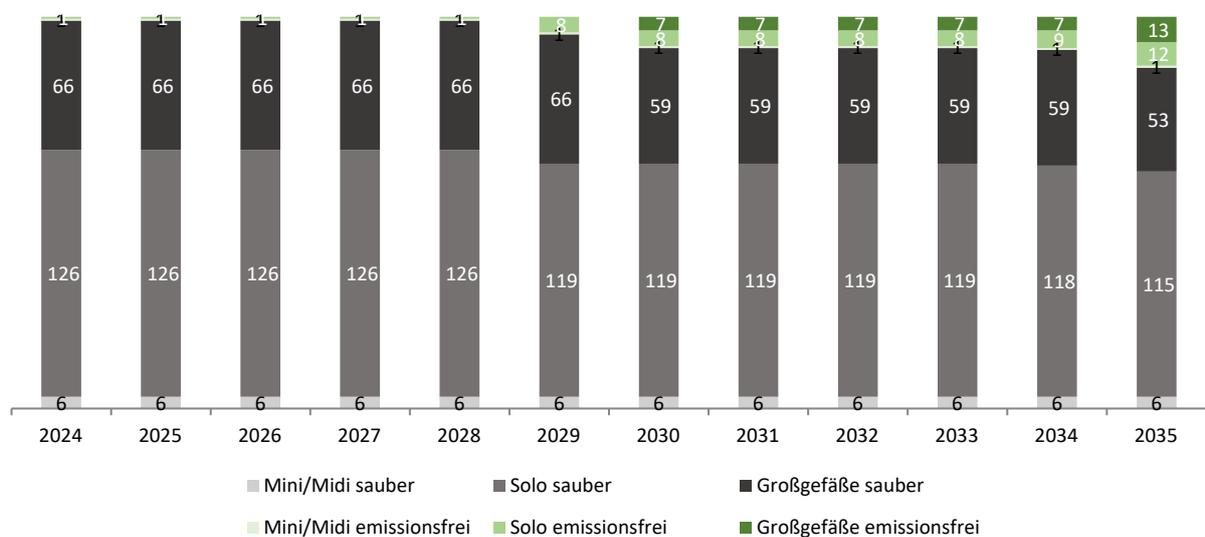
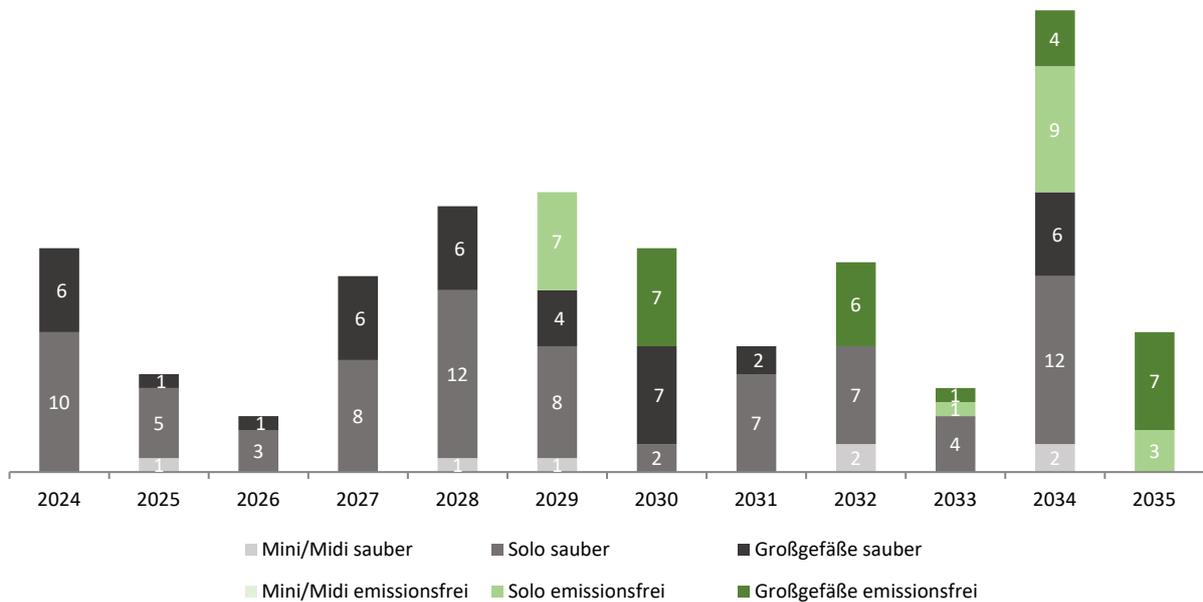


Abbildung 68: Entwicklung der regiobus Fuhrparkstruktur bis 2035 im CVD-Umstellungsszenario

## 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 zu Szenario 1 die reguläre CVD-Quote angesetzt. Abweichend zum vorherigen Szenario berücksichtigt die Beschaffungsquote ab dem Jahr 2031 ausschließlich emissionsfreie Solobusse. Dadurch wird im Vergleich zum Szenario 1 die Beschaffung „sauberer“ Solobusse durch die Beschaffung emissionsfreier Busse ab dem Jahr 2031 ersetzt. Beschaffungsprozesse von Überlandbussen werden in diesem Szenario von den CVD-Quoten nicht berücksichtigt.



**Abbildung 69: Beschaffungen der regibus im Rahmen des CVD+-Szenarios**

Im Umstellungsszenario 2 sind somit 20 % der Solobusse im Stadtverkehr der regibus bis zum Jahr 2030 elektrifiziert. Ab dem Jahr 2046 ist demnach eine reine E-Bus-Flotte möglich. 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.

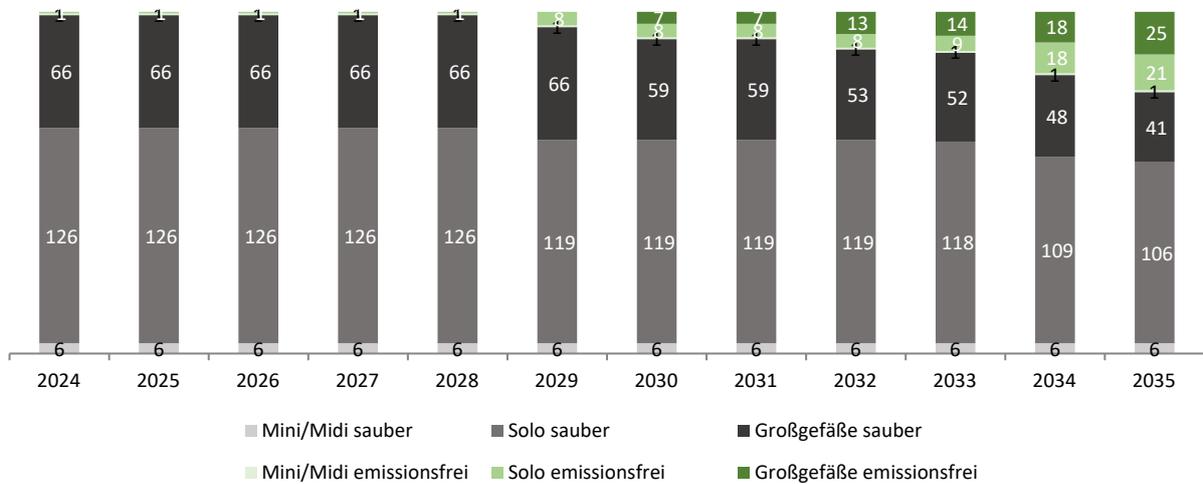


Abbildung 70: Entwicklung der regiobus Fuhrparkstruktur innerhalb des CVD+-Szenarios

### 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 die emissionsfreie CVD-Quote für Solobusse im Stadtverkehr angesetzt. Abweichend zum vorherigen Szenario berücksichtigt die Beschaffungsquote ab dem Jahr 2031 auch die Überlandbusse. Dadurch wird die Bemessungsgrundlage für die Beschaffungsquoten im Vergleich zum Szenario 2 signifikant erhöht.

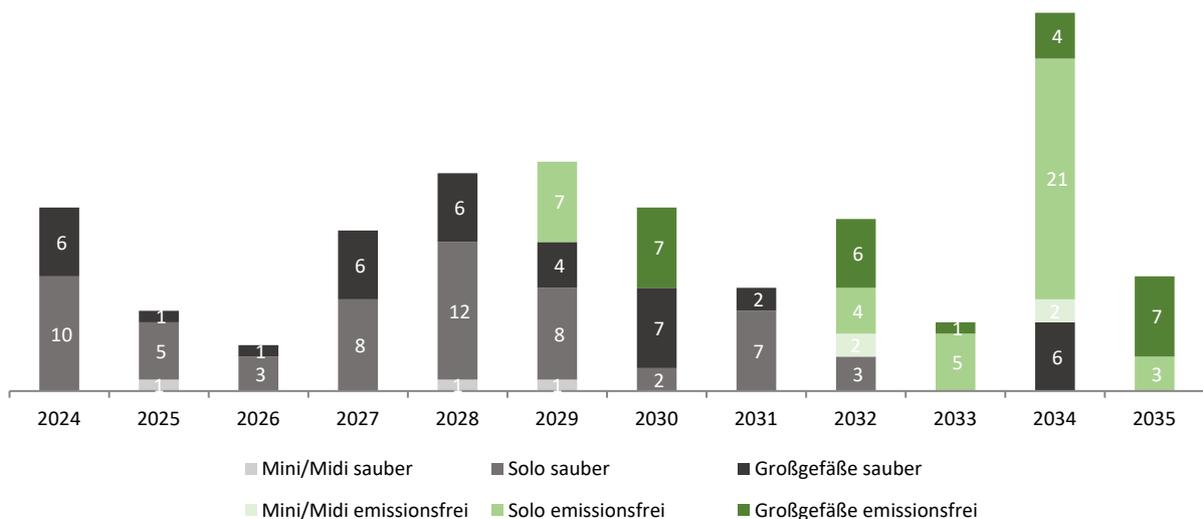


Abbildung 71: Beschaffungen der regiobus im Rahmen des CVD++-Szenarios

Im Umstellungsszenario 3 sind somit ebenfalls 20 % der Solobusse im Stadtverkehr bis zum Jahr 2030 elektrifiziert. Ab dem Jahr 2046 ist demnach eine reine E-Bus-Flotte möglich. Insgesamt sorgt diese Umstellungsstrategie für ein stärkeres Wachstum des E-Bus-Anteils im Vergleich zum vorhergehenden Szenario und ermöglicht so Lerneffekte insbesondere in Bezug auf die Elektrifizierung des Überlandverkehrs mit Solo- und Gelenkbussen. Die Auswirkung auf die Fuhrparkstruktur zeigt die folgende Abbildung.

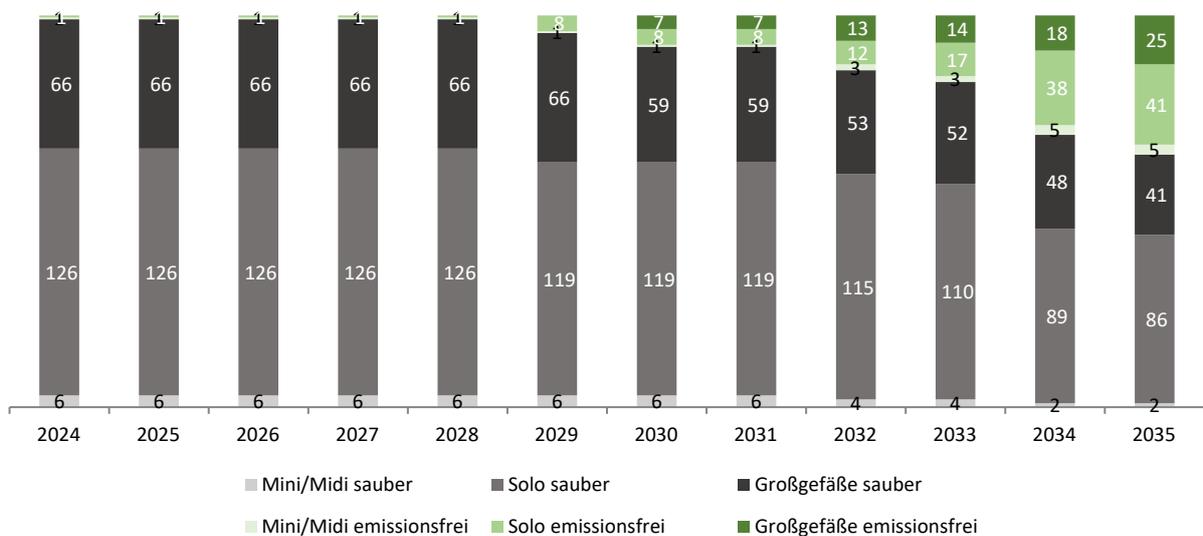
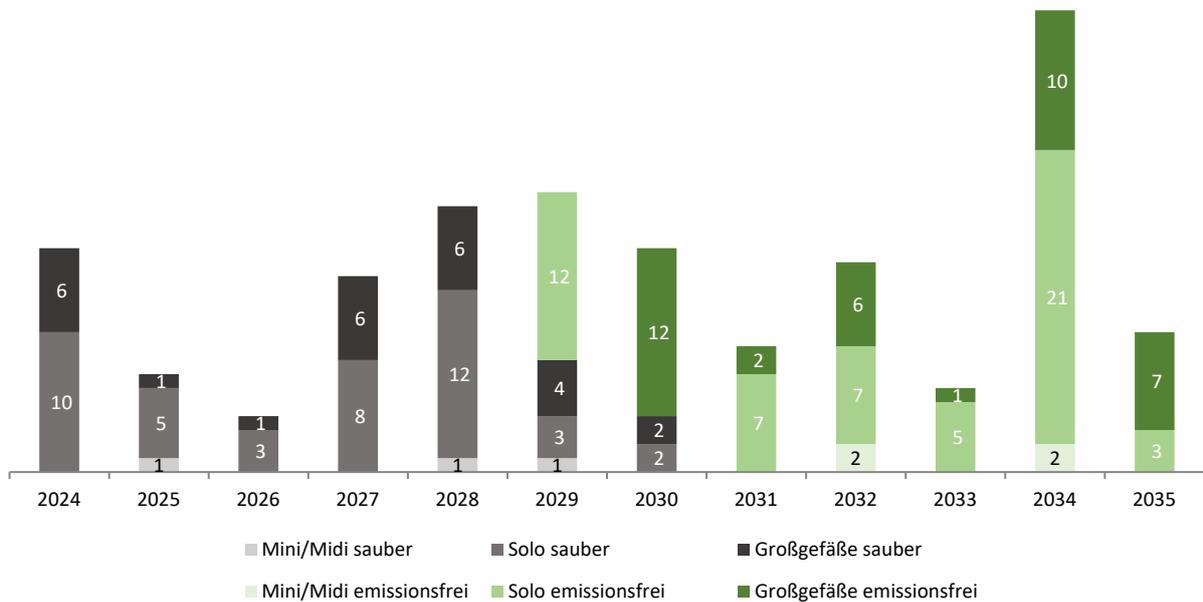


Abbildung 72: Entwicklung der regiobus Fuhrparkstruktur innerhalb des CVD++-Szenarios

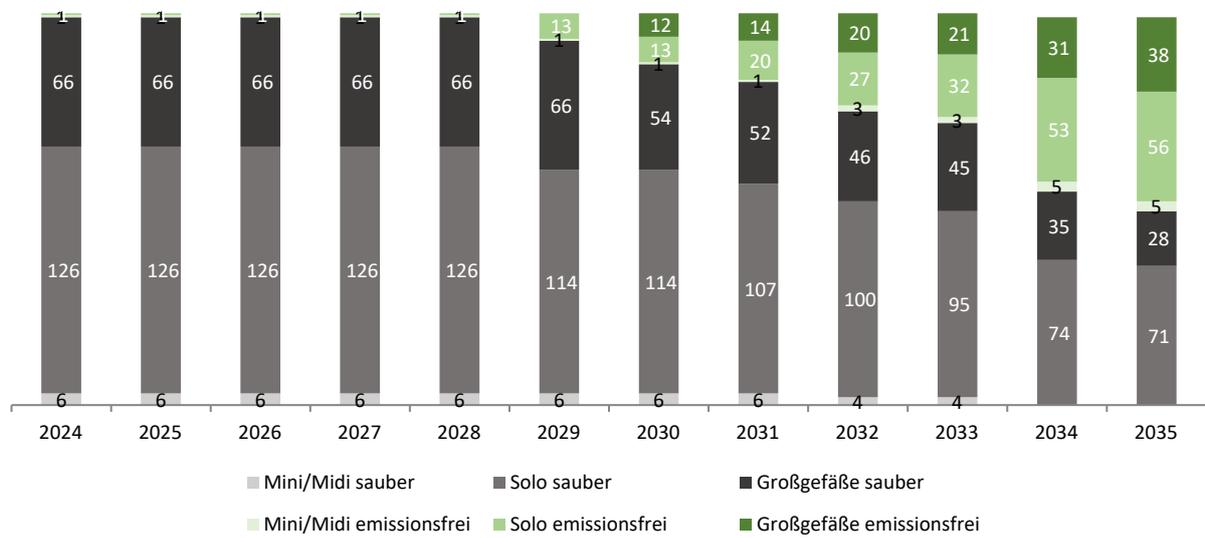
#### 4. Umstellungsszenario 4: Vollumstellungsszenario (100%ige Neubeschaffung von E-Bussen)

Das vierte Umstellungsszenario sieht die emissionsfreie Umsetzung der Beschaffungsquoten gemäß CVD ab dem Jahr 2026 vor. Ab dem Jahr 2031 erfolgt die ausschließlich emissionsfreie Neubeschaffung von Solo- und Gelenkbussen im Stadt- und Überlandverkehr. Das Vollumstellungsszenario bietet den schnellsten Pfad in die Elektromobilität bei regiobus. Die letzten Diesel-Solobusse könnten bereits im Jahr 2044 ausgeflottet werden.



**Abbildung 73: Beschaffungen der regiobus bis zum Jahr 2035 für eine reine Batteriebusflotte im Vollumstellungsszenario**

Bereits im Jahr 2031 könnten so 17 % der Busse der regiobus mit einem emissionsfreien Antrieb ausgestattet sein. Im Jahr 2035 würde dieser Anteil auf ca. 51 % steigen und ab dem Jahr 2034 könnte die regiobus ausschließlich emissionsfreie Busse im Stadtverkehr einsetzen. Diese Umstellungsstrategie sorgt für ein schnelles Wachstum des E-Bus-Anteils und ermöglicht dennoch eine sinnvolle sukzessive Partizipation an der laufenden technischen Entwicklung der E-Busse durch die kontinuierliche Beschaffung. Die folgende Abbildung zeigt die Entwicklung der Fuhrparkstruktur bis zum Jahr 2035.



**Abbildung 74: Entwicklung der regiobus Fuhrparkstruktur bis zum Jahr 2035 für eine reine Batteriebusflotte im Vollumstellungsszenario**

## H. Ökonomische Betrachtung

Alle bisher erarbeiteten Maßnahmen und Szenarien der geplanten Flottentransformation werden nun abschließend zusammengeführt und betriebswirtschaftlich bewertet. Das übergeordnete Ziel ist es, die Aufwendungen der unterschiedlichen Migrationspfade für den Untersuchungszeitraum zwischen den Jahren 2024 und 2035 gegenüber einem fortgeschriebenen Status quo in Form eines Bezugsszenarios „100% Diesel“ zu vergleichen. Diese Fortschreibung ist indessen rein fiktiv und berücksichtigt nicht die rechtlichen Anforderungen der CVD und ist folglich auch nicht legal umsetzbar.

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

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

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

**Tabelle 47: Kostenstruktur auf Funktionsbereichsebene**

Aus der Gewinn- und Verlustrechnung (GuV) und der dazugehörigen Kostenstellenrechnung der regiobus für das Geschäftsjahr 2023 wurden die entsprechenden Aufwendungen der einzelnen Funktionsbereiche für die Darstellung eines Status quo abgeleitet. Dies dient insbesondere als Basis zur Fortschreibung der Aufwendungen nach Funktionsbereichen hinsichtlich der beiden betrachteten Szenarien.

Im Vorfeld der eigentlichen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden zunächst die anzusetzenden Prämissen und Eingangsdaten definiert und quantifiziert. Diese lassen sich hinsichtlich der Blöcke „Investitionen“ und „Betrieb“ unterscheiden. Es wurden hierbei alle betrieblichen Funktionsbereiche identifiziert, in denen sich die anfallenden Aufwendungen im Zuge der Flottentransformation

nach Art und Umfang verändern. Alle fahrzeug-, ladeinfrastruktur- und werkstattbezogenen Investitionsausgaben lassen sich dagegen dem Block Investitionen zuordnen. Die Investitionen für die Fahrzeuge und die Ladeinfrastruktur werden hierbei unter dem Funktionsbereich Fahrzeugvorhaltung zusammen erfasst. Die werkstattbezogenen Investitionen werden dagegen dem Funktionsbereich Instandhaltung zugeordnet.

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

## I. Prämissen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

### 1. Investitionen

#### a) Fahrzeuge

Die **Anschaffungspreise** konventioneller Diesel- und batterieelektrischer Busse unterscheiden sich zum derzeitigen Stand noch um den einen Faktor  $>2$ . Aus den Daten der regiobus gehen aktuelle Anschaffungskosten für konventionelle Dieselfahrzeuge als Solo-Fahrzeug in Höhe von etwa 284 T€ und für Gelenkfahrzeuge mit gleichem Antrieb von gut 378 T€ hervor. Diese Anschaffungskosten der Dieselfahrzeuge werden mit 1,5 % p. a. fortgeschrieben. Mit Blick auf das aktuelle Batteriebusangebot und Informationen zu Anschaffungskosten aus vergleichbaren Projekten liegen aktuell die Preise für einen Solo-Batteriebus bei ca. 600 T€ und für einen Gelenk-Batteriebus bei ca. 850 T€. Diese Investitionsmehrkosten können ggf. durch eine entsprechende Förderung reduziert werden.

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

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

## **b) Lade- bzw. Betankungsinfrastruktur**

Der Aufbau der Ladeinfrastruktur wird, wie im Abschnitt D.I dargestellt, in mehreren Stufen empfohlen. Die hierbei anfallenden Investitionsausgaben für die vorbereitenden Elektroinstallationen (für Transformatoren, Ladegeräte und Gehäuse, Verkabelungen), die Elektroinstallationen pro Fahrzeug bzw. Ladepunkt (LP) (Ladestecker bzw. Ladehauben, Kabel, Software) und die anfallenden Tiefbau- und Stahlarbeiten. Die Abschreibung der Elektroinstallationen pro Fahrzeug erfolgt über zehn Jahre, alle übrigen Bestandteile der Ladeinfrastrukturkosten erfolgt über 20 Jahre. Bei dem Ausbau der Ladeinfrastruktur werden zunächst ausschließlich die Standorte Stahnsdorf und Bad Belzig betrachtet. Insbesondere beim Vollumstellungsszenario werden ab 2030 weitere Flächen erforderlich. Hierfür können die Betriebsstätten Brandenburg und Bad Belzig herangezogen werden.

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

## **c) Werkstattinfrastruktur**

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

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

Grundlegend werden folgende weitere Ausstattungen der Werkstatt erforderlich:

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

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

## 2. Betriebsbezogene Aufwendungen

### a) Treibkraft

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

Des Weiteren wurden HVO100-Kraftstoffpreise der regiobus im Status quo erhoben. Für die Betrachtungen innerhalb des Untersuchungszeitraums bis zum Jahr 2035 wurden die Preise pro Einheit dynamisiert fortgeschrieben. Hinsichtlich der HVO100-Preise wurden zusätzlich die Entwicklung und Auswirkung der CO<sub>2</sub>-Steuer und die dynamischen Preisentwicklungen 2023 berücksichtigt. Darüber hinaus wurden für die Traktionsenergie der Batteriebusse branchenübliche Strompreise angesetzt. Hierbei wurde die Reduzierung der EEG-Umlage für den Betrieb von Elektrobusen gemäß § 65a EEG 2021 berücksichtigt. Die folgende Tabelle zeigt auszugsweise die angesetzten Preise der Treibkraft pro Einheit. Es handelt sich hierbei um Werte mit einem Datenstand aus dem zweiten Quartal des Jahres 2023. In der Zwischenzeit können sich Änderungen in Bezug auf die vorherrschenden Marktpreise der Treibstoffe ergeben.

Jahr	Treibstoffkosten HVO100 je l	Fahrstromkosten je kWh	Wasserstoffkosten je kg
2024	1,35 €	0,26 €	8,10 €
2025	1,37 €	0,26 €	8,22 €
2030	1,47 €	0,28 €	8,86 €
2035	1,59 €	0,30 €	9,54 €

Tabelle 48: Auszug der fortgeschriebenen Preise (netto) für Fahrstrom, Wasserstoff und HVO100

### b) Instandhaltung

Aufgrund der bisherigen Erfahrungen lässt sich in Bezug auf die Wartung und Instandhaltung eine leichte Verringerung der anfallenden Kosten für Verschleißteile und wiederkehrende Instandhaltungsaufgaben bei batterieelektrischen Bussen gegenüber HVO100-Bussen feststellen. Batteriebusse besitzen insgesamt weniger wartungsintensive, mechanisch verschleißende Teile, insbesondere in Bezug auf den Antriebsstrang. Aus diesem Grund wird für die neu eingeflotteten Batteriebusse eine kaufmännisch vorsichtige Reduktion der Instandhaltungsaufwendungen von 5 % gegenüber den heutigen Kosten der regiobus für HVO100-Busse angesetzt.

So ergeben sich zwar geringere Aufwendungen in Bezug auf die Instandhaltung und Wartung von Batteriebusen, jedoch fällt nach einer gewissen Nutzungsdauer mit einem erforderlichen **Batterietausch** eine kostenintensive batteriebuspezifische Instandhaltungsmaßnahme an. Dieser fällt, je nach Nutzungsprofil und Systemauslegung, erfahrungsgemäß nach fünf bis sieben Einsatzjahren

an. Für die Betrachtungen im Rahmen dieser Studie wurde eine Standzeit von sechs Jahren angesetzt. Je nach Szenario wären die ersten Batterien demnach erstmalig im Jahr 2031 zu ersetzen. Für den Ersatz der Traktionsbatterien werden zusätzlich zu den übrigen Instandhaltungsaufwendungen einmalige Aufwendungen in Höhe von 100 T€ für Solo-Batteriebusse und 150 T€ für Gelenk-Batteriebusse angesetzt.

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

### **c) Fahrdienst**

Da bei keinem der Szenarien Fahrzeugmehrbedarfe im Betrachtungszeitraum induziert wurden, fallen die Aufwendungen im Bereich Fahrdienst über die Jahre hinweg identisch aus.

Alle anfallenden Personalaufwendungen werden mit 3,0 % p. a. fortgeschrieben.

### **d) Sonstiges**

Für die geplante Flottentransformation sind Schulungen des Fahr- und Werkstattpersonals erforderlich. Für die Schulung des Fahrpersonals werden Schulungskosten von 300 € pro Mitarbeiter angenommen. Für das Werkstattpersonal wird eine Hochvoltschulung berücksichtigt, die mit 1.500 € pro Mitarbeiter angesetzt wird. Insgesamt werden somit Schulungskosten von ca. 141 T€ berücksichtigt.

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

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

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

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

## Richtlinie zur Förderung alternativer Antriebe von Bussen im Personennahverkehr

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

Im Detail waren folgende Bestandteile über diese Förderrichtlinie förderfähig:

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

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

## 2. Förderprogramme EU-Ebene

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

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

## 3. Förderung auf Landesebene

Das Land Brandenburg bietet zum Bearbeitungszeitpunkt der Machbarkeitsstudie keine zielgerichteten Förderprogramme für Verkehrsunternehmen an, welche der CVD unterliegen. In der Vergangenheit hat die regiobus bereits Fördermittel aus der Richtlinie zur Förderung von innovativen

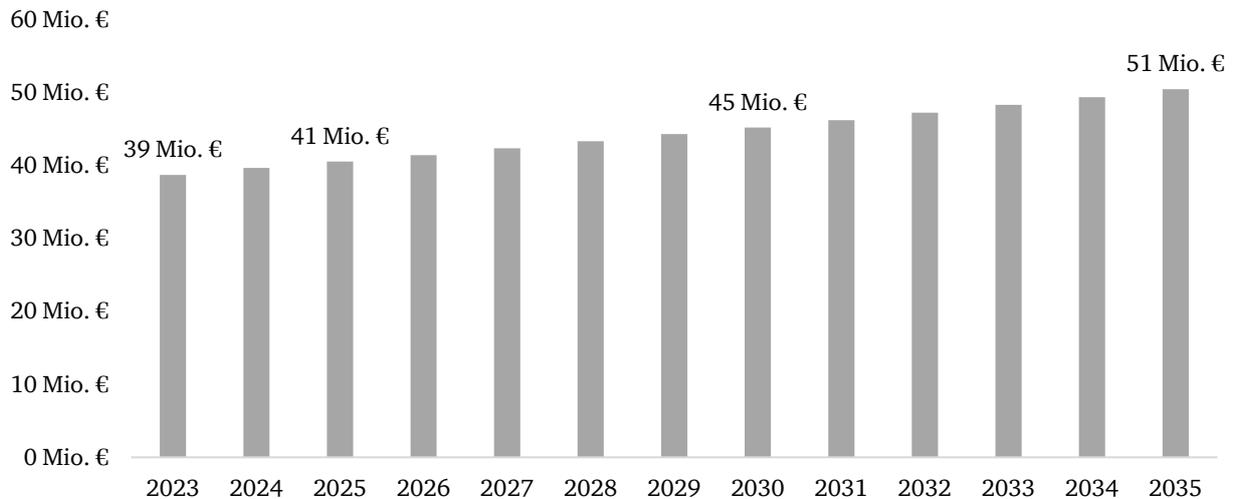
Mobilitätsangeboten und dem zugehörigen Landeswettbewerb des Ministeriums für Infrastruktur und Landesplanung zur Umrüstung von Dieselnissen auf Elektroantrieb im Rahmen der Landesgartenschau 2022 i. H. v. ca. 784.000 € akquirieren können. Eine eigene Richtlinie zur Beschaffung von Bussen mit alternativen Antrieben existiert aktuell nicht. Im Anschluss an die Landtagswahlen im September 2024 könnten unter Umständen neue Förderprogramme Zugang zu dem politischen Diskurs finden.

### **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 vier Umstellungsszenarios (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. Fortschreibung des Status quo als Bezugsgröße**

Die Fortschreibung des Status quo erfolgt entsprechend der dargestellten Prämissen bis zum Jahr 2035. Es handelt sich hierbei um eine Inflationierung der Kostentreiber der regiobus. In dieser Fortschreibung werden weiterhin fiktiv ausschließlich HVO100-Busse beschafft. Ausgehend von einem Status quo im Jahr 2023 mit 39 Mio. € Gesamtaufwendungen steigen diese auf 41 Mio. € im Jahr 2025, auf 45 Mio. € im Jahr 2030 und schließlich auf 51 Mio. € im Jahr 2035 an. Die jährliche Entwicklung der Fortschreibung des Status quo zeigt die folgende Abbildung.



**Abbildung 75: Fortschreibung der Kosten des Status quo bis zum Jahr 2035, regiobus**

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

## 2. Kostenbetrachtungen für eine Umstellung mit Batteriebusen

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die regiobus dargestellt. Hierbei liegt der Fokus auf den Mehrkosten der unterschiedlichen Szenarien für eine Umstellung mit Batteriebusen gegenüber dem fortgeschriebenen Status quo. Eine detaillierte Ergebnisansicht der absoluten Aufwendungen pro Jahr und Szenario kann Anhang 3 entnommen werden.

### a) Mehrkosten der Szenarien

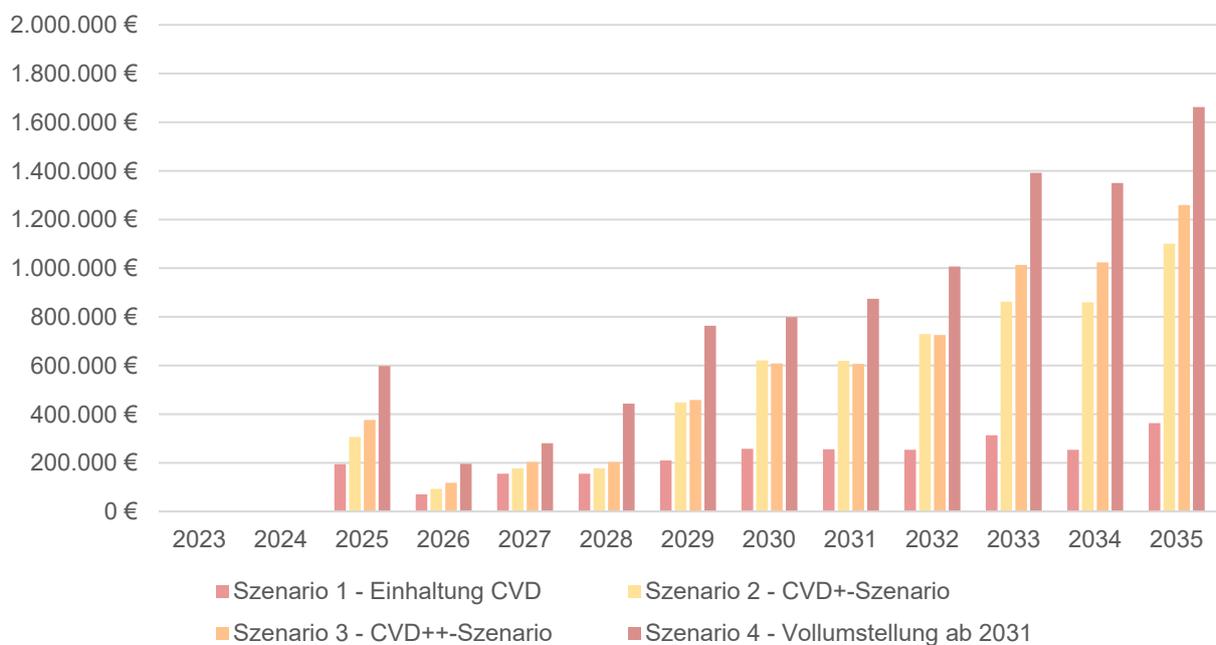
Die Mehrkosten der unterschiedlichen Szenarien bei der Flottenumstellung mit Batteriebusen zeigen bei der regiobus deutliche Unterschiede. Diese sind auf die unterschiedlichen Flottenstärken innerhalb der Szenarien zurückzuführen. Die Mehrkosten des CVD-Szenarios bewegen sich so bei der regiobus nach anfänglichen Kosten für Vorbereitung und Planung bei gut 250 T€ pro Jahr (ab 2030).

Bis zum Jahr 2030 sind die Beschaffungen und Kosten des CVD+-Szenarios im Durchschnitt 84 T€ teurer als im CVD-Szenario. Mit der ausschließlichen Neubeschaffung von Batteriebusen statt „sauberen“ Bussen im Vergleich zum CVD-Szenario steigen die Kosten deutlich an. Im Jahr 2035 entstehen so Mehrkosten in Höhe von 737 T€.

Durch die Integration von Überlandbussen beim CVD++-Szenario sowohl im Bereich Solo- als auch im Bereich Gelenkbus wird ein zusätzlicher Kostenanstieg hervorgerufen. Bis zum Jahr 2030 gibt es keine signifikante Kostenmehrung. Ab 2031 liegen die jährlichen Kosten für das CVD++-Szenario durchschnittlich ca. 91 T€ im Jahr höher als beim CVD+-Szenario, wobei die höheren Kosten vor allem ab dem Jahr 2033 entstehen.

Ab dem Jahr 2031 fallen zudem die ersten Batterietausche an, die die Kosten ab diesem Jahr und in den folgenden Jahren zusätzlich deutlich steigern. Für das Jahr 2035 können so Mehrkosten für das Vollumstellungsszenario unter den angenommenen Prämissen von etwa 400 T€ ggü. dem CVD++-Szenario bzw. 1,7 Mio. € ggü. dem Referenzszenario abgeschätzt werden.

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



**Abbildung 76: Mehrkosten ohne Förderung im Vergleich zum Status quo bis 2035 bei der regiobus (Batteriebusse)**

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

Szenario	Fahrzeuge	LIS & technische Ausstattung	Sonstiges
Szenario 0 - Referenzszenario (keine Umstellung)	55,2 Mio.€	0,0 Mio.€	0,2 Mio.€
Szenario 1 - CVD-Szenario	57,2 Mio.€	1,0 Mio.€	0,4 Mio.€
Szenario 2 - CVD+-Szenario	60,2 Mio.€	1,7 Mio.€	0,6 Mio.€
Szenario 3 - CVD++-Szenario	61,3 Mio.€	2,1 Mio.€	0,7 Mio.€
Szenario 4 - Vollumstellung	62,8 Mio.€	3,2 Mio.€	1,0 Mio.€

Tabelle 49: Investitionskosten nach Szenarien bis 2035, regiobus Batteriebusse ohne Förderung

#### b) Detailbetrachtung der Kosten des Vollumstellungsszenarios

Für das Vollumstellungsszenario soll nun eine Detailbetrachtung hinsichtlich der Funktionsbereiche mit einer Kostensteigerung oder Kostenminderung durchgeführt werden. Hierfür werden das Jahr 2030, also drei Jahre nach Beginn der Umstellung und mit dem Aufbau einer größeren Flottenstärke, sowie das Jahr 2035 bei Vollumstellung näher betrachtet. Die folgende Abbildung zeigt zunächst das Jahr 2030.

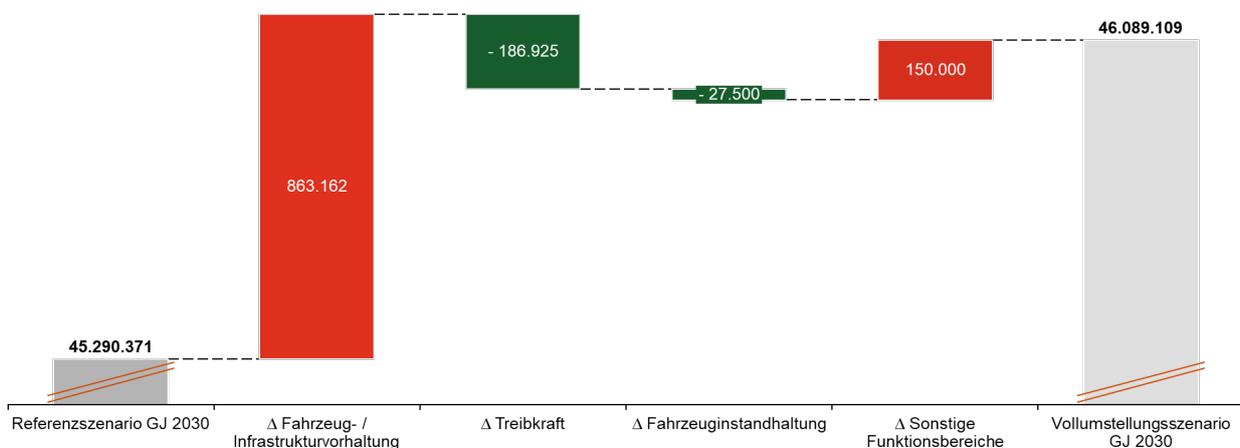
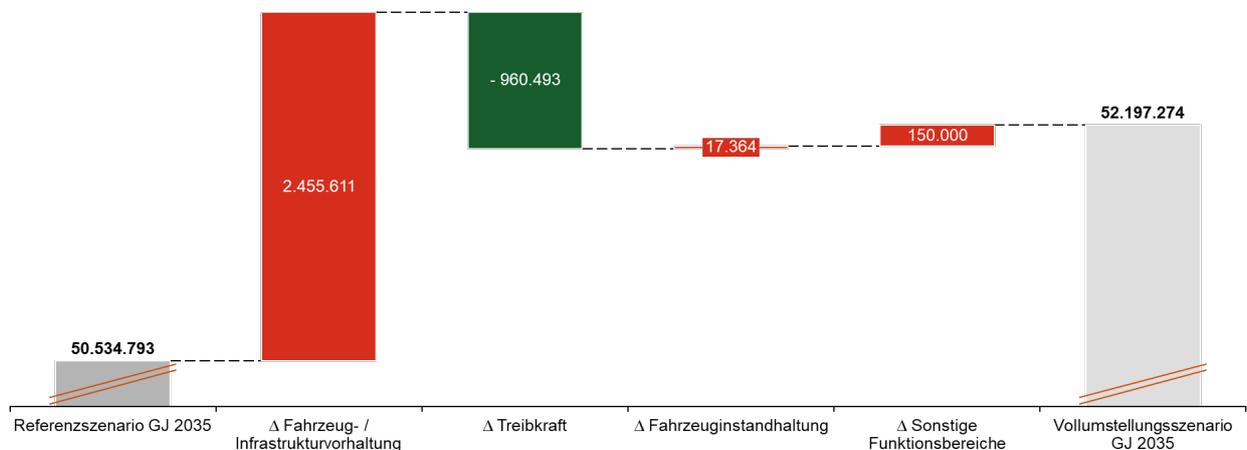


Abbildung 77: Mehrkosten des Vollumstellungsszenarios nach Funktionsbereichen im Jahr 2030, regiobus (Batteriebusse)

Den deutlich größten Block der Kostensteigerung durch die Flottentransformation wird durch den Funktionsbereich Fahrzeug- und Infrastrukturvorhaltung verursacht. Gegenüber dem Referenzszenario entstehen hier durch die höheren Abschreibungen der neu beschafften Batteriebusse und die zusätzlichen Abschreibungen für die entsprechende Ladeinfrastruktur Mehrkosten in Höhe von rund 863 T€. Des Weiteren fallen im Bereich „sonstige Funktionsbereiche“ Mehrkosten von rund 150 T€ an. Diese sind insbesondere auf die Kosten der Vorbereitung und Planung des Ladeinfrastrukturaufbaus zurückzuführen.

Kostenminderungen sind hingegen in den Funktionsbereichen Treibkraft und Fahrzeuginstandhaltung zu verzeichnen. Durch die günstigeren Treibkraftkosten des Fahrstroms gegenüber einem HVO100-Betrieb können so rund 187 T€ in diesem Jahr eingespart werden. Aufgrund des geringeren Wartungsaufwands der Batteriebusse können weitere ca. 28 T€ eingespart werden. Im Funktionsbereich Fahrdienst gibt es zunächst noch keine Veränderungen.

Dies ändert sich jedoch mit der Vollumstellung im Jahr 2035 (siehe folgende Abbildung). Durch die steigende Zahl an Elektrofahrzeugen entstehen auch Mehrkosten in der Instandhaltung. Hierfür fallen zusätzlich ca. 17 T€ (basiert auf dem gegenwärtigen Lohnniveau und einer Fortschreibung von 3 % p. a.) gegenüber dem Referenzszenario an.



**Abbildung 78: Mehrkosten des Vollumstellungsszenarios nach Funktionsbereichen im Jahr 2035, regiobus (Batteriebusse)**

### 3. Kostenbetrachtungen für eine Umstellung mit Brennstoffzellenbussen

Im folgenden Abschnitt liegt der Fokus der Analysen auf den Mehrkosten der unterschiedlichen Szenarien für eine Umstellung mit Brennstoffzellenbussen gegenüber dem fortgeschriebenen Status quo. Eine detaillierte Ergebnisansicht der absoluten Aufwendungen pro Jahr und Szenario kann wiederum Anhang 3 entnommen werden.

#### a) Mehrkosten der Szenarien

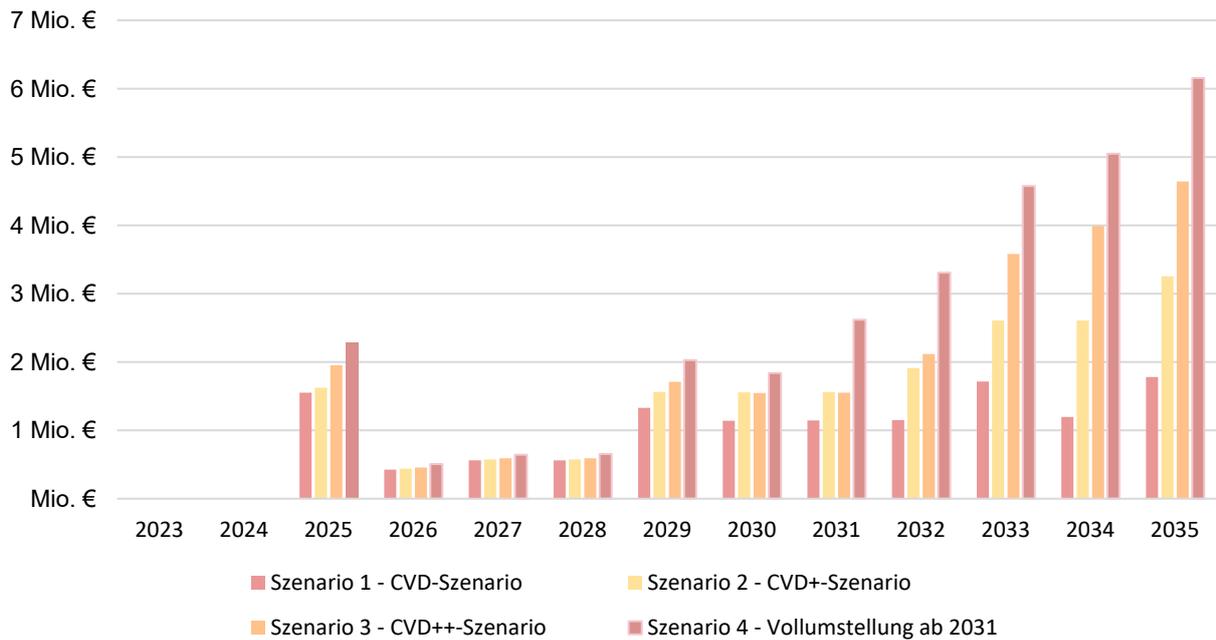
Auch hinsichtlich der Umstellung auf Brennstoffzellenfahrzeuge zeigen sich zwischen den Szenarien deutliche Kostenunterschiede. Im Vergleich zu der Umstellung mit Batteriefahrzeugen ergeben sich insgesamt nochmals deutlich höhere Mehrkosten gegenüber dem fortgeschriebenen Status quo.

Im CVD-Szenario entstehen so Mehrkosten von anfänglich ca. drei Million €, insbesondere für die Vorhaltung bzw. dem Ausbau der ersten Stufe der Betankungsinfrastruktur. Ab dem Jahr 2029 steigen dann die Mehrkosten erwartungsgemäß mit wachsendem Anteil von Brennstoffzellenbussen in der regiobus-Flotte kontinuierlich an. Im Jahr 2035 liegen die Mehrkosten im CVD-Szenario dann bei ca. 1,7 Mio. €.

Für das CVD+-Szenario ergeben sich bis zum Jahr 2024 identische Mehrkosten, mit der abschließlichen Brennstoffzellenbusbeschaffung statt „sauberen“ Bussen ab dem Jahr 2025 steigen diese hingegen dann deutlich an. Im Jahr 2035 ergeben sich so Mehrkosten in Höhe von 1,5 Mio. € im Vergleich zum CVD-Szenario.

Das CVD++-Szenario zeigt bis zum Jahr 2031 lediglich im Bereich der zu schaffenden Betankungsinfrastruktur und des begleitenden Bauleit- und Projektmanagements signifikante Mehrkosten im Vergleich zum CVD+-Szenario. Mit der Anwendung der Beschaffungsquote auf Überlandbusse kommt es ab 2031 zu einem bedeutenden Anstieg der Kosten für Betankungsinfrastruktur, Fahrzeugvorhaltung und Treibkraft. Dadurch werden im Jahr 2035 Mehrkosten i. H. v. 4,7 Mio. erzielt im Vergleich zu dem Referenzszenario.

Auf Grund des deutlich höheren Umstellungstempos im Vollumstellungsszenario liegen hier die Mehrkosten noch einmal deutlich höher. Im ausgebauten Zustand im Jahr 2035 sind Mehrkosten von etwa weiteren 1,5 Mio. €, also ca. 6,2 Mio. €, unter den angenommenen Prämissen zu erwarten. Im Jahr 2033 liegen diese bereits bei etwa 1,0 Mio. € (siehe folgende Abbildung).



**Abbildung 79: Mehrkosten ohne Förderung im Vergleich zum Status quo bis 2035 bei der regiobus (Brennstoffzellenbusse)**

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

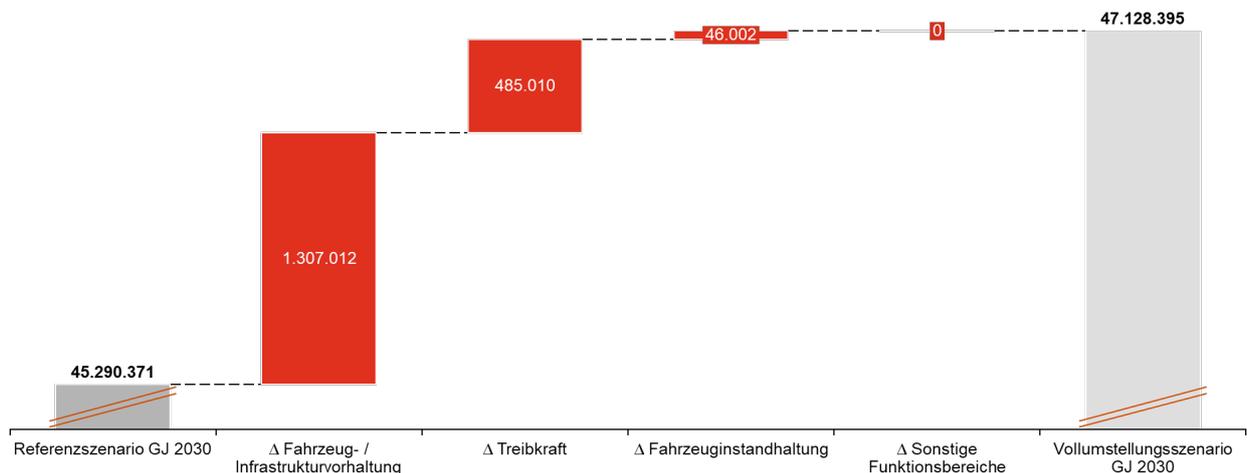
Szenario	Fahrzeuge	TIS & technische Ausstattung	Sonstiges
<b>Szenario 0 - Referenzszenario (keine Umstellung)</b>	55,2 Mio.€	0,0 Mio.€	0,2 Mio.€
<b>Szenario 1 - CVD-Szenario</b>	57,8 Mio.€	4,8 Mio.€	2,5 Mio.€
<b>Szenario 2 - CVD+-Szenario</b>	61,7 Mio.€	5,3 Mio.€	2,6 Mio.€
<b>Szenario 3 - CVD++-Szenario</b>	63,3 Mio.€	6,7 Mio.€	3,2 Mio.€
<b>Szenario 4 - Vollumstellung</b>	65,2 Mio.€	8,2 Mio.€	3,8 Mio.€

**Tabelle 50: Investitionskosten nach Szenarien bis 2035, regiobus Brennstoffzellenbusse**

## b) Detailbetrachtung der Kosten des Vollumstellungsszenarios

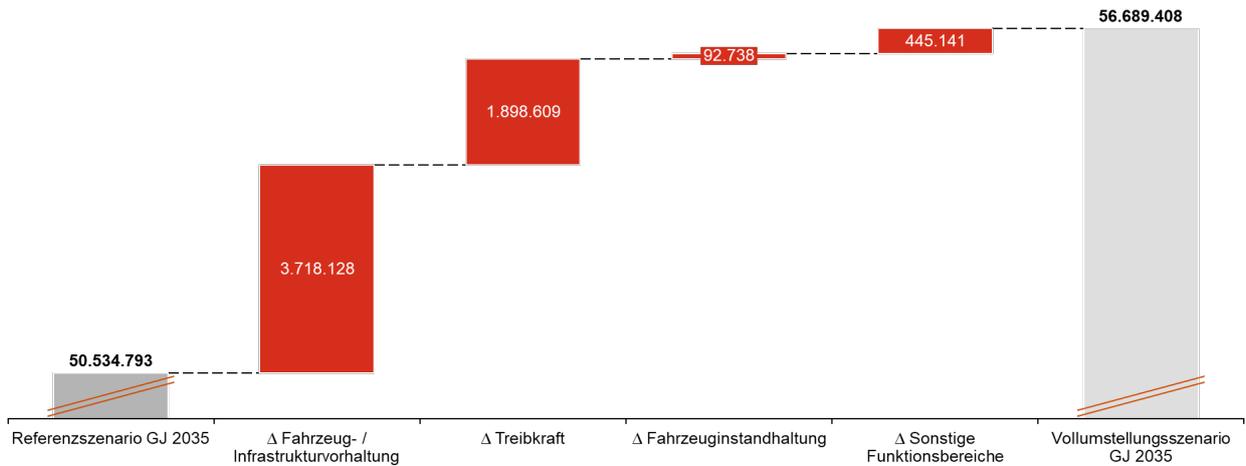
In der Detailbetrachtung des Vollumstellungsszenarios mit Brennstoffzellenbussen zeigen sich zwei wesentliche Kostentreiber. Die Anschaffungskosten der Brennstoffzellenbusse sind deutlich höher als die vergleichbarer HVO100-Busse, aber auch als die von Batteriebussen. Auch die notwendige Betankungsinfrastruktur ist in Relation zur Ladeinfrastruktur für Batteriebusse kostenintensiver. So ergeben sich im Jahr 2030 Mehrkosten für die Fahrzeug- und Betankungsinfrastruktur in Höhe von etwa 1,3 Mio. €. Der zweite wesentliche Kostentreiber ist die Treibkraft. Hier entstehen im Jahr 2030 unter Berücksichtigung der notwendigen Wasserstoffmengen für den Fahrbetrieb und des angesetzten Bezugspreises Mehrkosten in Höhe von 485 T€ im Vergleich zum HVO100-Betrieb.

Unter der Prämisse von leicht geringeren laufenden Instandhaltungskosten ergibt sich eine Kostenminderung von etwa 46 T€ (siehe folgende Abbildung).



**Abbildung 80: Mehrkosten des Vollumstellungsszenarios nach Funktionsbereichen im Jahr 2030 (Brennstoffzellenbusse)**

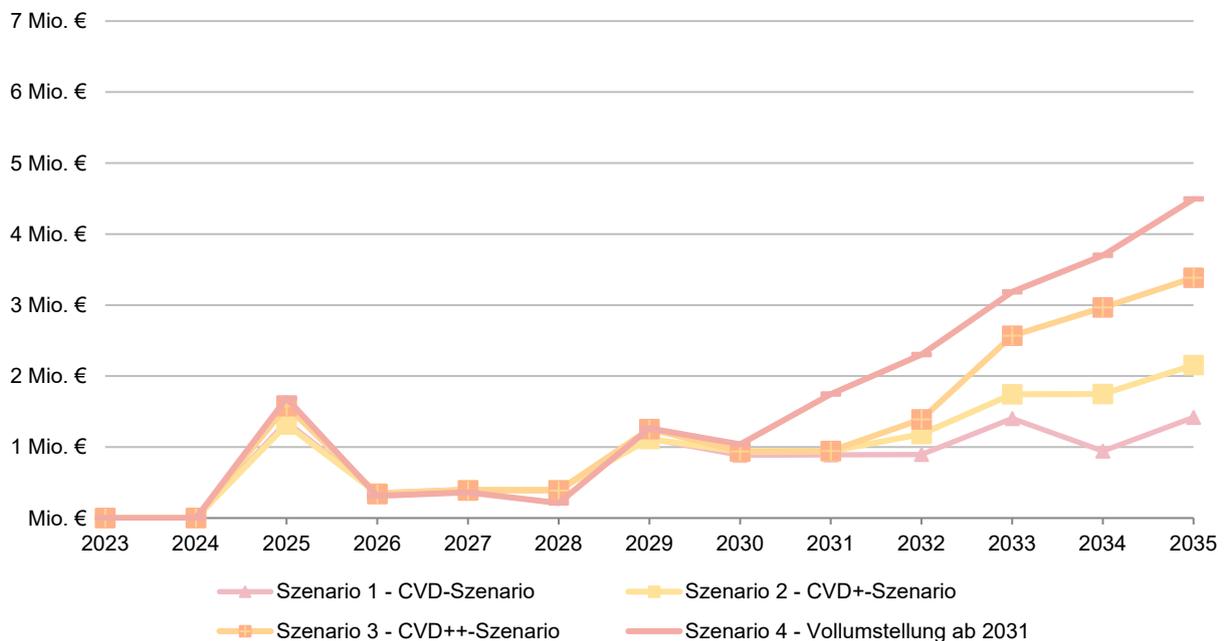
Ähnlich zur Umstellung mit Batteriebussen ändert sich das Bild mit der vollständigen Umstellung, dem zusätzlichen Fahrzeugmehrbedarf und dem vollständigen Ausbau der Betankungsinfrastruktur noch einmal deutlich. So steigen die Mehrkosten der Fahrzeug- und Infrastrukturvorhaltung auf etwa 3,7 Mio. € an und auch die Kosten für den notwendigen Wasserstoffbezug steigen deutlich auf rund 1,9 Mio. €. Durch Instandhaltungsmaßnahmen in Form eines Ersatzes der Brennstoffzellen steigen zudem die Kosten des Funktionsbereiches Fahrzeuginstandhaltung. Auch die Kosten der sonstigen Funktionsbereiche steigen signifikant an. Dies ist insbesondere durch Kosten für das Projektmanagement und die Bauleitplanung der Betankungsinfrastruktur begründet. Die folgende Abbildung stellt die Mehrkosten des Vollumstellungsszenarios nach Funktionsbereichen im Jahr 2035 zusammenfassend dar.



**Abbildung 81: Mehrkosten des Vollumstellungsszenarios nach Funktionsbereichen im Jahr 2035 (Brennstoffzellenbusse)**

#### 4. Gegenüberstellung der Antriebsarten

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



**Abbildung 82: Mehrkosten der Umstellung mit Brennstoffzellenbussen gegenüber der Umstellung mit Batteriebusen**

Im Vollumstellungsszenario liegen die Mehrkosten bei Einflottung der ersten Busse im Jahr 2029 bereits bei ca. 1,3 Mio. €. Die Mehrkosten steigen dann deutlich auf etwa 2,3 Mio. € im Jahr 2032 an. Im Jahr 2035 ist die Flottentransformation mit Brennstoffzellenbussen dann etwa 4,5 Mio. € teurer als mit Batteriebusen. 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.

## I. Ökologische Betrachtung

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<sub>2</sub>-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 HVO100-Busse in den jeweiligen Flotten.

Für die vier betrachteten Szenarien werden folgend die möglichen CO<sub>2</sub>-Einsparungen durch die Substitution von HVO100-Bussen durch emissionsfreie E-Busse dargestellt. Hierbei werden folgende Prämissen berücksichtigt:

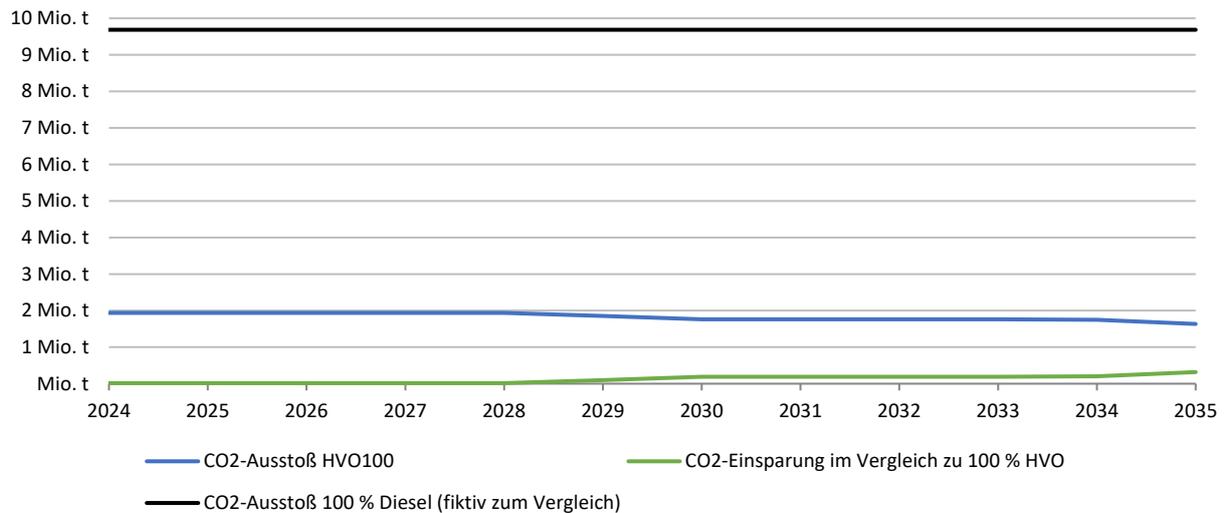
- erforderlicher Fahrstrom und Wasserstoff aus erneuerbaren Bezugsquellen:
  - grüner Strom aus erneuerbaren Quellen (Tarif),
  - grüner Wasserstoff erzeugt aus grünem Strom (Einkauf),
- pro verbrauchtem Liter HVO100 werden 0,51 kg CO<sub>2</sub> emittiert.

Bezogen auf die Durchschnittsverbräuche pro Fahrzeug im Jahr 2024 ergibt dies die nachfolgend dargestellten Einsparungen.

RBPM	Ø HVO100-Verbrauch in Litern pro Jahr und Fahrzeug	Einsparpotenzial in t CO <sub>2</sub> pro Jahr und Fahrzeug
Solobus	19.637	12,0
Gelenkbus	22.823	13,2

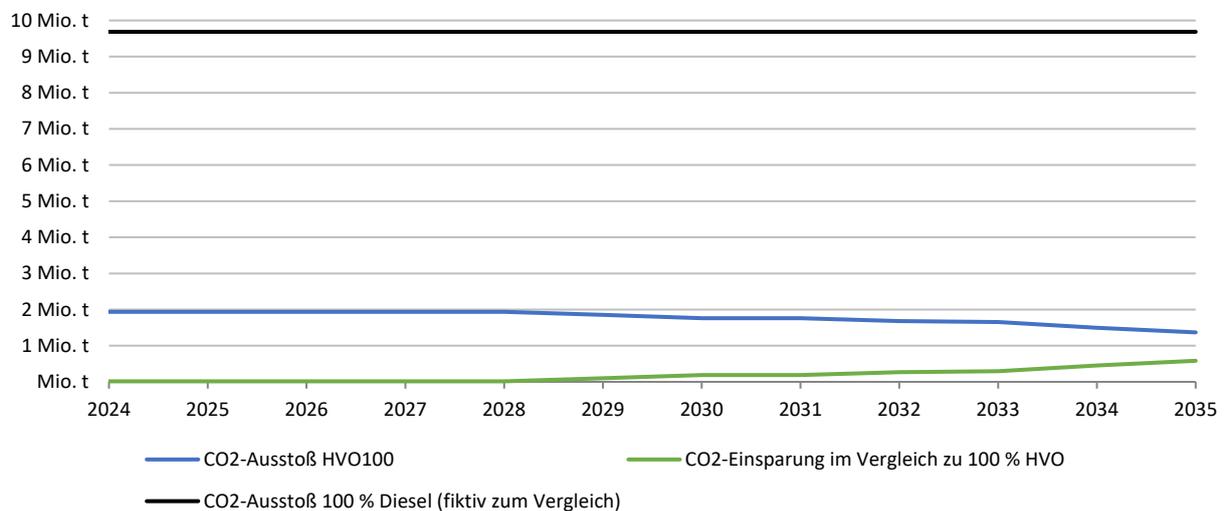
**Tabelle 51: CO<sub>2</sub>-Einsparpotenziale bezogen auf die Durchschnittsverbräuche nach Fahrzeugart, regiobus**

Übertragen auf die entsprechende Fuhrparkstruktur der dargestellten Szenarien ergeben sich daraus folgende CO<sub>2</sub>-Emissionen bzw. Einsparungen.



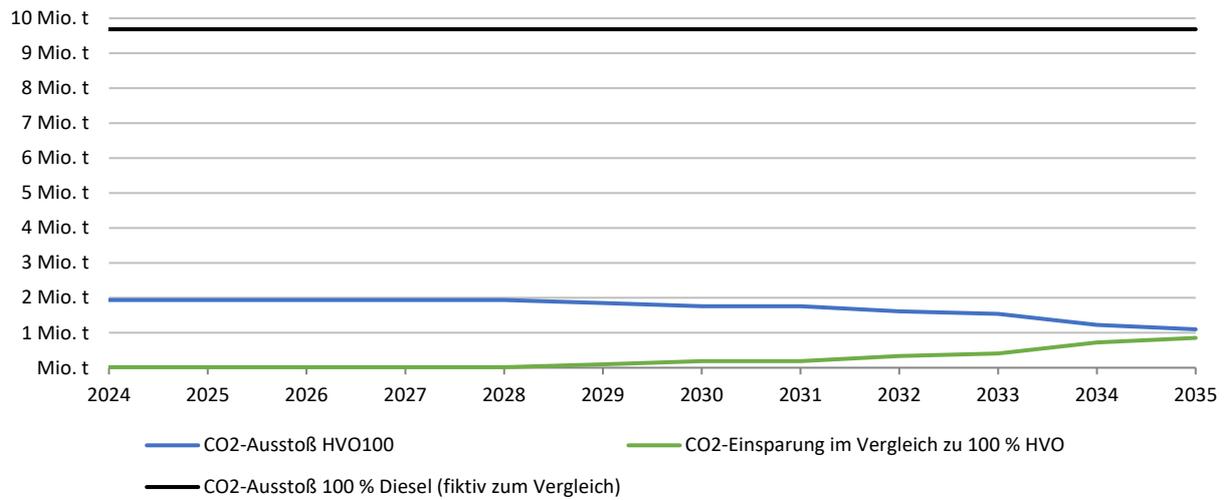
**Abbildung 83: CO<sub>2</sub>-Ausstoß und -Einsparung bei regiobus im CVD-Szenario (in t)**

Im CVD-Szenario reduzieren sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen der regiobus-Busflotte von ursprünglich ca. 1.937 t CO<sub>2</sub> auf bis zu rund 1.635 t CO<sub>2</sub> im Jahr 2035. Somit können durch den Einsatz von emissionsfreien Bussen und HVO100-Kraftstoffen ca. 302 t CO<sub>2</sub> eingespart werden. Der größte CO<sub>2</sub>-Einspareffekt ergibt sich jedoch bereits heute durch den Ersatz von konventionellem Diesel durch HVO100-Kraftstoff (siehe oberste Linie).



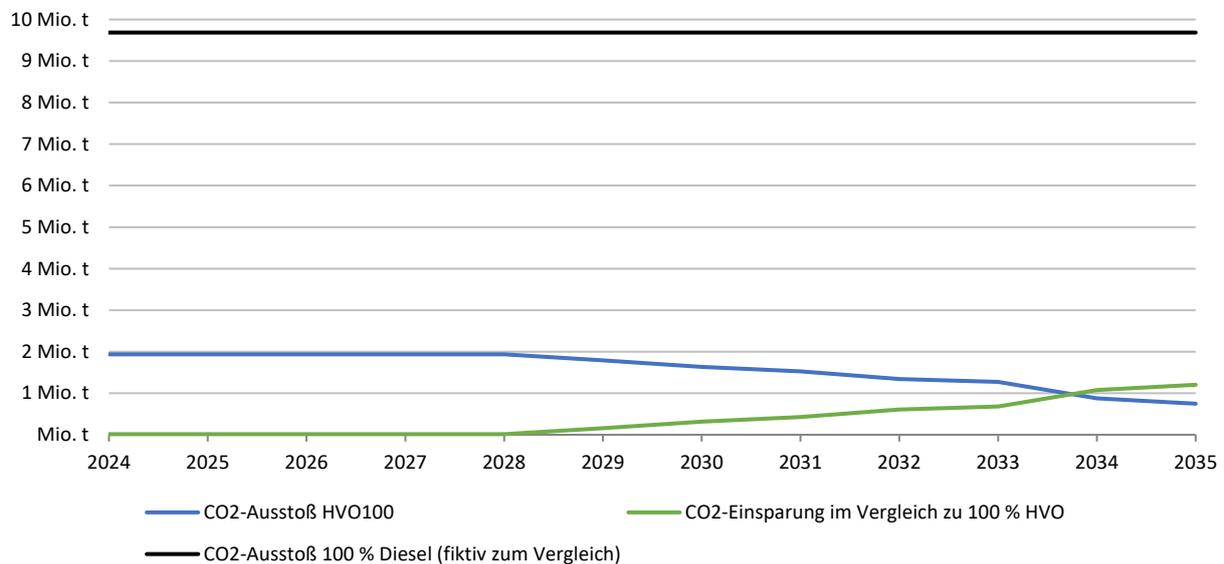
**Abbildung 84: CO<sub>2</sub>-Ausstoß und -Einsparung bei regiobus im CVD+-Szenario (in t)**

Durch die Flottentransformation im zweiten Szenario kann der CO<sub>2</sub>-Ausstoß der regiobus-Flotte bis zum Jahr 2035 auf ca. 71 % des ursprünglichen Wertes gesenkt werden. Im Jahr 2030 ermöglicht die Flottentransformation in diesem Szenario Einsparungen von 176 t CO<sub>2</sub>, im Jahr 2035 sind hingegen Einsparungen von über 569 t CO<sub>2</sub> möglich.



**Abbildung 85: CO<sub>2</sub>-Ausstoß und -Einsparung bei regiobus im CVD++-Szenario (in t)**

Im Dritten Szenario erfolgt eine signifikantere CO<sub>2</sub>-Einsparung durch die Anwendung der CVD-Beschaffungsquoten auf Überlandbusse ab dem Jahr 2031. Durch die Umstellung der Gelenkbusse können höhere Einsparungen pro Fahrzeug aufgrund des durchschnittlich höheren Verbrauchs im Vergleich zu den Solobussen generiert werden. Im Jahr 2033 können so bereits 394 t CO<sub>2</sub> im Vergleich zu 2024 eingespart werden. Bis 2035 wird der CO<sub>2</sub>-Ausstoß um fast die Hälfte reduziert.



**Abbildung 86: CO<sub>2</sub>-Ausstoß und -Einsparung bei regiobus im Vollumstellungsszenario (in t)**

Im Vollumstellungsszenario ist die Flotte der regiobus im Jahr 2042 unter den gesetzten Prämissen vollständig emissionsfrei im Einsatz. Es können somit insgesamt gut 1.937 t CO<sub>2</sub> eingespart werden. Im Jahr 2035 hat sich der CO<sub>2</sub>-Ausstoß der regiobus-Flotte bereits mehr als halbiert.

## **J. Betriebs- und Einsatzkonzept**

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

### **I. Zusammenfassung**

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

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

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

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

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

Die vier erarbeiteten Umstellungsszenarien zeigen verschiedene Migrationspfade zur Einführung von E-Bussen im Landkreis Potsdam-Mittelmark auf. So kann im Vollumstellungsszenario, mit einer ausschließlichen Beschaffung von E-Bussen ab dem Jahr 2031, der Fuhrpark der regiobus vollständig elektrifiziert und im Jahr 2044 emissionsfrei betrieben werden. Im CVD-Szenario wird die Flottenumstellung mit dem geringsten Tempo angegangen. Bei der regiobus wäre die Flotte im Jahr 2046 komplett umgestellt.

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 aktuell keine Förderkulisse für Busse mit alternativen Antrieben existiert. Auch im Falle einer (temporär noch vorhandenen) Förderung der Investitionsmehrkosten kann davon ausgegangen werden, dass die Dekarbonisierung der Verkehrsleistungen im Landkreis Potsdam-Mittelmark grundsätzlich teurer wird.

## **II. Umsetzungskonzept**

Für die Flottentransformation der regiobus stellt die Erfüllung der Beschaffungsquoten der beiden CVD-Perioden bis 2025 bzw. 2030 die ersten beiden Meilensteine dar. Hierfür ist eine erste großflächige Installation von Ladeinfrastruktur erforderlich.

In den Jahren 2024 und 2025 sollten weitere Detailplanungen zur Einführung der alternativen Antriebe vorgenommen werden. Diese Planungen beinhalten insbesondere die Ausgestaltung der Depots aber auch technische Spezifikationen der Fahrzeuge wie beispielsweise die Ladetechnologie (Stecker oder Pantograph). Um ab dem Ende des Jahres 2025 weitere E-Busse bei der regiobus einzuflotten, sollte zudem bereits im Jahr 2024 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 2024 und 2025 die Ausschreibung der Fahrzeuge durchzuführen.

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

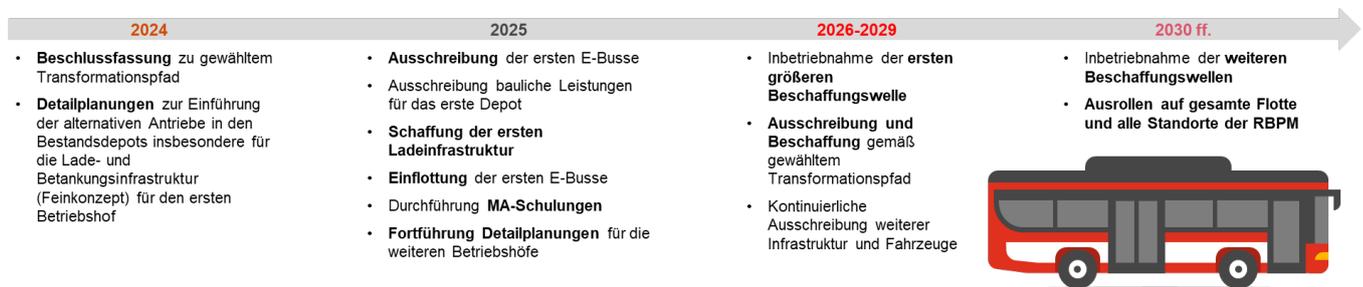


Abbildung 87: Beispielhafter Umsetzungsplan Flottentransformation der regiobus

### III. Empfehlung 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 der regiobus geeignet sind. Um den heutigen Fahrplan mit Batteriebussen abdecken zu können, ist zunächst keine Erweiterung des Fuhrparks erforderlich.

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 G 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. 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 H wurde ermittelt, dass der verstärkte Einsatz von Batteriebussen für jeweils höhere Gesamtkosten sorgt. Die regiobus-Stakeholder (vor allem Landkreis Potsdam-Mittelmark als Aufgabenträger und Anteilseigner) müssen daher letztlich entscheiden, wie schnell die Flottentransformation unter Beachtung der Mehrkosten erfolgen soll.

Berlin, den 28. November 2024

PricewaterhouseCoopers GmbH  
Wirtschaftsprüfungsgesellschaft



Maximilian Rohs  
Director



ppa. Hendrik Reinhardt

## K. Anhang

### I. Ergebnisse der Kostenschätzung für die BEV-Szenarien

Szenario 0 - Referenzszenario (keine Umstellung)													
		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Operations	Fahrdienst	15.931 T€	16.409 T€	16.901 T€	17.408 T€	17.930 T€	18.468 T€	19.022 T€	19.593 T€	20.181 T€	20.786 T€	21.410 T€	22.052 T€
	Disposition	159 T€	164 T€	169 T€	174 T€	179 T€	185 T€	190 T€	196 T€	202 T€	208 T€	214 T€	221 T€
	Fahrzeuggestellung	296 T€	305 T€	314 T€	324 T€	334 T€	344 T€	354 T€	365 T€	375 T€	387 T€	398 T€	410 T€
	Überwachung/Steuerung	1.757 T€	1.810 T€	1.864 T€	1.920 T€	1.978 T€	2.037 T€	2.098 T€	2.161 T€	2.226 T€	2.293 T€	2.362 T€	2.433 T€
Vehicle	Fahrzeuginstandhaltung	3.708 T€	3.763 T€	3.820 T€	3.877 T€	3.935 T€	3.994 T€	4.054 T€	4.115 T€	4.177 T€	4.239 T€	4.303 T€	4.367 T€
	Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturvorhaltung	4.540 T€	4.562 T€	4.564 T€	4.602 T€	4.645 T€	4.677 T€	4.612 T€	4.617 T€	4.616 T€	4.616 T€	4.582 T€	4.562 T€
	Treibkraft	6.355 T€	6.450 T€	6.547 T€	6.645 T€	6.745 T€	6.846 T€	6.949 T€	7.053 T€	7.159 T€	7.266 T€	7.375 T€	7.486 T€
Overhead	Marketing/Vertrieb	1.154 T€	1.188 T€	1.224 T€	1.261 T€	1.299 T€	1.337 T€	1.378 T€	1.419 T€	1.462 T€	1.505 T€	1.551 T€	1.597 T€
	Planung	344 T€	354 T€	365 T€	376 T€	387 T€	399 T€	411 T€	423 T€	436 T€	449 T€	463 T€	476 T€
	Verwaltung/Zentrale Dienste	3.728 T€	3.840 T€	3.956 T€	4.074 T€	4.196 T€	4.322 T€	4.452 T€	4.586 T€	4.723 T€	4.865 T€	5.011 T€	5.161 T€
<b>Zwischensumme</b>		<b>37.972 T€</b>	<b>38.846 T€</b>	<b>39.724 T€</b>	<b>40.662 T€</b>	<b>41.628 T€</b>	<b>42.609 T€</b>	<b>43.520 T€</b>	<b>44.527 T€</b>	<b>45.556 T€</b>	<b>46.614 T€</b>	<b>47.668 T€</b>	<b>48.765 T€</b>
Rest	Grundstücke/Gebäude	1.770 T€											
	Sonstige Funktionsbereiche	T€											
<b>Gesamtsumme</b>		<b>39.742 T€</b>	<b>40.616 T€</b>	<b>41.493 T€</b>	<b>42.432 T€</b>	<b>43.398 T€</b>	<b>44.379 T€</b>	<b>45.290 T€</b>	<b>46.297 T€</b>	<b>47.326 T€</b>	<b>48.384 T€</b>	<b>49.438 T€</b>	<b>50.535 T€</b>

Szenario 1 - CVD-Szenario - BEV													
		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Operations	Fahrdienst	15.931 T€	16.409 T€	16.901 T€	17.408 T€	17.930 T€	18.468 T€	19.022 T€	19.593 T€	20.181 T€	20.786 T€	21.410 T€	22.052 T€
	Disposition	159 T€	164 T€	169 T€	174 T€	179 T€	185 T€	190 T€	196 T€	202 T€	208 T€	214 T€	221 T€
	Fahrzeuggestellung	296 T€	305 T€	314 T€	324 T€	334 T€	344 T€	354 T€	365 T€	375 T€	387 T€	398 T€	410 T€
	Überwachung/Steuerung	1.757 T€	1.810 T€	1.864 T€	1.920 T€	1.978 T€	2.037 T€	2.098 T€	2.161 T€	2.226 T€	2.293 T€	2.362 T€	2.433 T€
Vehicle	Fahrzeuginstandhaltung	3.708 T€	3.763 T€	3.820 T€	3.892 T€	3.950 T€	3.997 T€	4.044 T€	4.105 T€	4.166 T€	4.228 T€	4.289 T€	4.336 T€
	Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturvorhaltung	4.540 T€	4.632 T€	4.634 T€	4.672 T€	4.715 T€	4.884 T€	4.989 T€	4.994 T€	4.993 T€	4.992 T€	4.974 T€	5.155 T€
	Treibkraft	6.355 T€	6.450 T€	6.547 T€	6.645 T€	6.745 T€	6.783 T€	6.840 T€	6.942 T€	7.046 T€	7.152 T€	7.250 T€	7.287 T€
Overhead	Marketing/Vertrieb	1.154 T€	1.188 T€	1.224 T€	1.261 T€	1.299 T€	1.337 T€	1.378 T€	1.419 T€	1.462 T€	1.505 T€	1.551 T€	1.597 T€
	Planung	344 T€	354 T€	365 T€	376 T€	387 T€	399 T€	411 T€	423 T€	436 T€	449 T€	463 T€	476 T€
	Verwaltung/Zentrale Dienste	3.728 T€	3.840 T€	3.956 T€	4.074 T€	4.196 T€	4.322 T€	4.452 T€	4.586 T€	4.723 T€	4.865 T€	5.011 T€	5.161 T€
<b>Zwischensumme</b>		<b>37.972 T€</b>	<b>38.917 T€</b>	<b>39.794 T€</b>	<b>40.747 T€</b>	<b>41.713 T€</b>	<b>42.757 T€</b>	<b>43.778 T€</b>	<b>44.783 T€</b>	<b>45.810 T€</b>	<b>46.865 T€</b>	<b>47.921 T€</b>	<b>49.128 T€</b>
Rest	Grundstücke/Gebäude	1.770 T€											
	Sonstige Funktionsbereiche	T€	124 T€	T€	70 T€	70 T€	62 T€	T€	T€	T€	62 T€	T€	T€
<b>Gesamtsumme</b>		<b>39.742 T€</b>	<b>40.811 T€</b>	<b>41.564 T€</b>	<b>42.587 T€</b>	<b>43.553 T€</b>	<b>44.589 T€</b>	<b>45.548 T€</b>	<b>46.553 T€</b>	<b>47.580 T€</b>	<b>48.697 T€</b>	<b>49.691 T€</b>	<b>50.898 T€</b>

Szenario 2 - CVD+ - Szenario - BEV													
		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Operations	Fahrdienst	15.931 T€	16.409 T€	16.901 T€	17.408 T€	17.930 T€	18.468 T€	19.022 T€	19.593 T€	20.181 T€	20.786 T€	21.410 T€	22.052 T€
	Disposition	159 T€	164 T€	169 T€	174 T€	179 T€	185 T€	190 T€	196 T€	202 T€	208 T€	214 T€	221 T€
	Fahrzeuggestellung	296 T€	305 T€	314 T€	324 T€	334 T€	344 T€	354 T€	365 T€	375 T€	387 T€	398 T€	410 T€
	Überwachung/Steuerung	1.757 T€	1.810 T€	1.864 T€	1.920 T€	1.978 T€	2.037 T€	2.098 T€	2.161 T€	2.226 T€	2.293 T€	2.362 T€	2.433 T€
Vehicle	Fahrzeuginstandhaltung	3.708 T€	3.763 T€	3.820 T€	3.892 T€	3.950 T€	3.997 T€	4.044 T€	4.105 T€	4.155 T€	4.213 T€	4.252 T€	4.413 T€
	Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturvorhaltung	4.540 T€	4.654 T€	4.656 T€	4.695 T€	4.737 T€	5.078 T€	5.352 T€	5.357 T€	5.520 T€	5.569 T€	5.782 T€	5.988 T€
	Treibkraft	6.355 T€	6.450 T€	6.547 T€	6.645 T€	6.745 T€	6.783 T€	6.840 T€	6.942 T€	7.006 T€	7.095 T€	7.087 T€	7.115 T€
Overhead	Marketing/Vertrieb	1.154 T€	1.188 T€	1.224 T€	1.261 T€	1.299 T€	1.337 T€	1.378 T€	1.419 T€	1.462 T€	1.505 T€	1.551 T€	1.597 T€
	Planung	344 T€	354 T€	365 T€	376 T€	387 T€	399 T€	411 T€	423 T€	436 T€	449 T€	463 T€	476 T€
	Verwaltung/Zentrale Dienste	3.728 T€	3.840 T€	3.956 T€	4.074 T€	4.196 T€	4.322 T€	4.452 T€	4.586 T€	4.723 T€	4.865 T€	5.011 T€	5.161 T€
<b>Zwischensumme</b>		<b>37.972 T€</b>	<b>38.939 T€</b>	<b>39.816 T€</b>	<b>40.769 T€</b>	<b>41.735 T€</b>	<b>42.951 T€</b>	<b>44.141 T€</b>	<b>45.147 T€</b>	<b>46.286 T€</b>	<b>47.370 T€</b>	<b>48.528 T€</b>	<b>49.865 T€</b>
Rest	Grundstücke/Gebäude	1.770 T€											
	Sonstige Funktionsbereiche	T€	214 T€	T€	70 T€	70 T€	107 T€	T€	T€	T€	107 T€	T€	T€
<b>Gesamtsumme</b>		<b>39.742 T€</b>	<b>40.922 T€</b>	<b>41.586 T€</b>	<b>42.609 T€</b>	<b>43.576 T€</b>	<b>44.828 T€</b>	<b>45.911 T€</b>	<b>46.917 T€</b>	<b>48.056 T€</b>	<b>49.247 T€</b>	<b>50.298 T€</b>	<b>51.635 T€</b>

Szenario 3 - CVD+ +-Szenario - BEV													
		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Operations	Fahrdienst	15.931 T€	16.409 T€	16.901 T€	17.408 T€	17.930 T€	18.468 T€	19.022 T€	19.593 T€	20.181 T€	20.786 T€	21.410 T€	22.052 T€
	Disposition	159 T€	164 T€	169 T€	174 T€	179 T€	185 T€	190 T€	196 T€	202 T€	208 T€	214 T€	221 T€
	Fahrzeuggestellung	296 T€	305 T€	314 T€	324 T€	334 T€	344 T€	354 T€	365 T€	375 T€	387 T€	398 T€	410 T€
	Überwachung/Steuerung	1.757 T€	1.810 T€	1.864 T€	1.920 T€	1.978 T€	2.037 T€	2.098 T€	2.161 T€	2.226 T€	2.293 T€	2.362 T€	2.433 T€
Vehicle	Fahrzeuginstandhaltung	3.708 T€	3.763 T€	3.820 T€	3.892 T€	3.950 T€	3.997 T€	4.044 T€	4.105 T€	4.140 T€	4.191 T€	4.199 T€	4.359 T€
	Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturvorhaltung	4.540 T€	4.680 T€	4.681 T€	4.720 T€	4.763 T€	5.066 T€	5.340 T€	5.345 T€	5.611 T€	5.839 T€	6.267 T€	6.473 T€
	Treibkraft	6.355 T€	6.450 T€	6.547 T€	6.645 T€	6.745 T€	6.783 T€	6.840 T€	6.942 T€	6.926 T€	6.976 T€	6.819 T€	6.842 T€
Overhead	Marketing/Vertrieb	1.154 T€	1.188 T€	1.224 T€	1.261 T€	1.299 T€	1.337 T€	1.378 T€	1.419 T€	1.462 T€	1.505 T€	1.551 T€	1.597 T€
	Planung	344 T€	354 T€	365 T€	376 T€	387 T€	399 T€	411 T€	423 T€	436 T€	449 T€	463 T€	476 T€
	Verwaltung/Zentrale Dienste	3.728 T€	3.840 T€	3.956 T€	4.074 T€	4.196 T€	4.322 T€	4.452 T€	4.586 T€	4.723 T€	4.865 T€	5.011 T€	5.161 T€
<b>Zwischensumme</b>		<b>37.972 T€</b>	<b>38.964 T€</b>	<b>39.841 T€</b>	<b>40.794 T€</b>	<b>41.761 T€</b>	<b>42.938 T€</b>	<b>44.129 T€</b>	<b>45.134 T€</b>	<b>46.282 T€</b>	<b>47.498 T€</b>	<b>48.692 T€</b>	<b>50.024 T€</b>
Rest	Grundstücke/Gebäude	1.770 T€											
	Sonstige Funktionsbereiche	T€	258 T€	T€	70 T€	70 T€	129 T€	T€	T€	T€	129 T€	T€	T€
<b>Gesamtsumme</b>		<b>39.742 T€</b>	<b>40.993 T€</b>	<b>41.611 T€</b>	<b>42.635 T€</b>	<b>43.601 T€</b>	<b>44.837 T€</b>	<b>45.899 T€</b>	<b>46.904 T€</b>	<b>48.052 T€</b>	<b>49.397 T€</b>	<b>50.462 T€</b>	<b>51.794 T€</b>

Szenario 4 - Vollumstellung ab 2031 - BEV													
		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Operations	Fahrdienst	15.467 T€	15.931 T€	16.409 T€	16.901 T€	17.408 T€	17.930 T€	18.468 T€	19.022 T€	19.593 T€	20.181 T€	20.786 T€	21.410 T€
	Disposition	155 T€	159 T€	164 T€	169 T€	174 T€	179 T€	185 T€	190 T€	196 T€	202 T€	208 T€	214 T€
	Fahrzeuggestellung	288 T€	296 T€	305 T€	314 T€	324 T€	334 T€	344 T€	354 T€	365 T€	375 T€	387 T€	398 T€
	Überwachung/Steuerung	1.706 T€	1.757 T€	1.810 T€	1.864 T€	1.920 T€	1.978 T€	2.037 T€	2.098 T€	2.161 T€	2.226 T€	2.293 T€	2.362 T€
Vehicle	Fahrzeuginstandhaltung	3.653 T€	3.708 T€	3.763 T€	3.820 T€	3.892 T€	3.950 T€	3.988 T€	4.027 T€	4.070 T€	4.100 T€	4.150 T€	4.143 T€
	Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturvorhaltung	4.428 T€	4.540 T€	4.757 T€	4.759 T€	4.798 T€	4.853 T€	5.202 T€	5.476 T€	5.654 T€	5.969 T€	6.226 T€	6.811 T€
	Treibkraft	6.229 T€	6.355 T€	6.450 T€	6.547 T€	6.645 T€	6.745 T€	6.739 T€	6.762 T€	6.785 T€	6.739 T€	6.786 T€	6.506 T€
Overhead	Marketing/Vertrieb	1.120 T€	1.154 T€	1.188 T€	1.224 T€	1.261 T€	1.299 T€	1.337 T€	1.378 T€	1.419 T€	1.462 T€	1.505 T€	1.551 T€
	Planung	334 T€	344 T€	354 T€	365 T€	376 T€	387 T€	399 T€	411 T€	423 T€	436 T€	449 T€	463 T€
	Verwaltung/Zentrale Dienste	3.620 T€	3.728 T€	3.840 T€	3.956 T€	4.074 T€	4.196 T€	4.322 T€	4.452 T€	4.586 T€	4.723 T€	4.865 T€	5.011 T€
<b>Zwischensumme</b>		<b>37.000 T€</b>	<b>37.972 T€</b>	<b>39.042 T€</b>	<b>39.919 T€</b>	<b>40.872 T€</b>	<b>41.851 T€</b>	<b>43.021 T€</b>	<b>44.169 T€</b>	<b>45.252 T€</b>	<b>46.413 T€</b>	<b>47.654 T€</b>	<b>48.868 T€</b>
Rest	Grundstücke/Gebäude	1.770 T€											
	Sonstige Funktionsbereiche	T€	T€	403 T€	T€	70 T€	220 T€	351 T€	150 T€	150 T€	150 T€	351 T€	150 T€
<b>Gesamtsumme</b>		<b>38.770 T€</b>	<b>39.742 T€</b>	<b>41.215 T€</b>	<b>41.689 T€</b>	<b>42.712 T€</b>	<b>43.841 T€</b>	<b>45.142 T€</b>	<b>46.089 T€</b>	<b>47.172 T€</b>	<b>48.333 T€</b>	<b>49.776 T€</b>	<b>50.788 T€</b>

## II. Ergebnisse der Kostenschätzung für die FCEV-Szenarien

Szenario 0 - Referenzszenario (keine Umstellung)													
		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Operations	Fahrdienst	15.931 T€	16.409 T€	16.901 T€	17.408 T€	17.930 T€	18.468 T€	19.022 T€	19.593 T€	20.181 T€	20.786 T€	21.410 T€	22.052 T€
	Disposition	159 T€	164 T€	169 T€	174 T€	179 T€	185 T€	190 T€	196 T€	202 T€	208 T€	214 T€	221 T€
	Fahrzeuggestellung	296 T€	305 T€	314 T€	324 T€	334 T€	344 T€	354 T€	365 T€	375 T€	387 T€	398 T€	410 T€
	Überwachung/Steuerung	1.757 T€	1.810 T€	1.864 T€	1.920 T€	1.978 T€	2.037 T€	2.098 T€	2.161 T€	2.226 T€	2.293 T€	2.362 T€	2.433 T€
Vehicle	Fahrzeuginstandhaltung	3.708 T€	3.763 T€	3.820 T€	3.877 T€	3.935 T€	3.994 T€	4.054 T€	4.115 T€	4.177 T€	4.239 T€	4.303 T€	4.367 T€
	Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturvorhaltung	4.540 T€	4.562 T€	4.564 T€	4.602 T€	4.645 T€	4.677 T€	4.612 T€	4.617 T€	4.616 T€	4.616 T€	4.582 T€	4.562 T€
	Treibkraft	6.355 T€	6.450 T€	6.547 T€	6.645 T€	6.745 T€	6.846 T€	6.949 T€	7.053 T€	7.159 T€	7.266 T€	7.375 T€	7.486 T€
Overhead	Marketing/Vertrieb	1.154 T€	1.188 T€	1.224 T€	1.261 T€	1.299 T€	1.337 T€	1.378 T€	1.419 T€	1.462 T€	1.505 T€	1.551 T€	1.597 T€
	Planung	344 T€	354 T€	365 T€	376 T€	387 T€	399 T€	411 T€	423 T€	436 T€	449 T€	463 T€	476 T€
	Verwaltung/Zentrale Dienste	3.728 T€	3.840 T€	3.956 T€	4.074 T€	4.196 T€	4.322 T€	4.452 T€	4.586 T€	4.723 T€	4.865 T€	5.011 T€	5.161 T€
<b>Zwischensumme</b>		<b>37.972 T€</b>	<b>38.846 T€</b>	<b>39.724 T€</b>	<b>40.662 T€</b>	<b>41.628 T€</b>	<b>42.609 T€</b>	<b>43.520 T€</b>	<b>44.527 T€</b>	<b>45.556 T€</b>	<b>46.614 T€</b>	<b>47.668 T€</b>	<b>48.765 T€</b>
Rest	Grundstücke/Gebäude	1.770 T€											
	Sonstige Funktionsbereiche	T€											
<b>Gesamtsumme</b>		<b>39.742 T€</b>	<b>40.616 T€</b>	<b>41.493 T€</b>	<b>42.432 T€</b>	<b>43.398 T€</b>	<b>44.379 T€</b>	<b>45.290 T€</b>	<b>46.297 T€</b>	<b>47.326 T€</b>	<b>48.384 T€</b>	<b>49.438 T€</b>	<b>50.535 T€</b>

Szenario 1 - CVD-Szenario - FCEV													
		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Operations	Fahrdienst	15.931 T€	16.409 T€	16.901 T€	17.408 T€	17.930 T€	18.468 T€	19.022 T€	19.593 T€	20.181 T€	20.786 T€	21.410 T€	22.052 T€
	Disposition	159 T€	164 T€	169 T€	174 T€	179 T€	185 T€	190 T€	196 T€	202 T€	208 T€	214 T€	221 T€
	Fahrzeuggestellung	296 T€	305 T€	314 T€	324 T€	334 T€	344 T€	354 T€	365 T€	375 T€	387 T€	398 T€	410 T€
	Überwachung/Steuerung	1.757 T€	1.810 T€	1.864 T€	1.920 T€	1.978 T€	2.037 T€	2.098 T€	2.161 T€	2.226 T€	2.293 T€	2.362 T€	2.433 T€
Vehicle	Fahrzeuginstandhaltung	3.708 T€	3.763 T€	3.820 T€	3.942 T€	4.000 T€	4.054 T€	4.108 T€	4.168 T€	4.230 T€	4.292 T€	4.355 T€	4.528 T€
	Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturvorhaltung	4.540 T€	4.987 T€	4.989 T€	5.028 T€	5.070 T€	5.270 T€	5.416 T€	5.421 T€	5.420 T€	5.420 T€	5.409 T€	5.651 T€
	Treibkraft	6.355 T€	6.450 T€	6.547 T€	6.645 T€	6.745 T€	6.960 T€	7.232 T€	7.340 T€	7.450 T€	7.562 T€	7.693 T€	8.016 T€
Overhead	Marketing/Vertrieb	1.154 T€	1.188 T€	1.224 T€	1.261 T€	1.299 T€	1.337 T€	1.378 T€	1.419 T€	1.462 T€	1.505 T€	1.551 T€	1.597 T€
	Planung	344 T€	354 T€	365 T€	376 T€	387 T€	399 T€	411 T€	423 T€	436 T€	449 T€	463 T€	476 T€
	Verwaltung/Zentrale Dienste	3.728 T€	3.840 T€	3.956 T€	4.074 T€	4.196 T€	4.322 T€	4.452 T€	4.586 T€	4.723 T€	4.865 T€	5.011 T€	5.161 T€
<b>Zwischensumme</b>		<b>37.972 T€</b>	<b>39.272 T€</b>	<b>40.149 T€</b>	<b>41.152 T€</b>	<b>42.118 T€</b>	<b>43.376 T€</b>	<b>44.661 T€</b>	<b>45.672 T€</b>	<b>46.705 T€</b>	<b>47.767 T€</b>	<b>48.864 T€</b>	<b>50.545 T€</b>
Rest	Grundstücke/Gebäude	1.770 T€											
	Sonstige Funktionsbereiche	T€	1.125 T€	T€	70 T€	70 T€	563 T€	T€	T€	T€	563 T€	T€	T€
<b>Gesamtsumme</b>		<b>39.742 T€</b>	<b>42.167 T€</b>	<b>41.919 T€</b>	<b>42.992 T€</b>	<b>43.959 T€</b>	<b>45.708 T€</b>	<b>46.431 T€</b>	<b>47.442 T€</b>	<b>48.475 T€</b>	<b>50.099 T€</b>	<b>50.634 T€</b>	<b>52.315 T€</b>

Szenario 2 - CVD+-Szenario - FCEV													
		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Operations	Fahrdienst	15.931 T€	16.409 T€	16.901 T€	17.408 T€	17.930 T€	18.468 T€	19.022 T€	19.593 T€	20.181 T€	20.786 T€	21.410 T€	22.052 T€
	Disposition	159 T€	164 T€	169 T€	174 T€	179 T€	185 T€	190 T€	196 T€	202 T€	208 T€	214 T€	221 T€
	Fahrzeuginstandhaltung	296 T€	305 T€	314 T€	324 T€	334 T€	344 T€	354 T€	365 T€	375 T€	387 T€	398 T€	410 T€
	Überwachung/Steuerung	1.757 T€	1.810 T€	1.864 T€	1.920 T€	1.978 T€	2.037 T€	2.098 T€	2.161 T€	2.226 T€	2.293 T€	2.362 T€	2.433 T€
Vehicle	Fahrzeuginstandhaltung	3.708 T€	3.763 T€	3.820 T€	3.942 T€	4.000 T€	4.054 T€	4.108 T€	4.168 T€	4.225 T€	4.286 T€	4.338 T€	4.510 T€
	Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturvorhaltung	4.540 T€	5.002 T€	5.003 T€	5.042 T€	5.085 T€	5.474 T€	5.832 T€	5.836 T€	6.041 T€	6.097 T€	6.400 T€	6.675 T€
	Treibkraft	6.355 T€	6.450 T€	6.547 T€	6.645 T€	6.745 T€	6.960 T€	7.232 T€	7.340 T€	7.598 T€	7.754 T€	8.130 T€	8.485 T€
Overhead	Marketing/Vertrieb	1.154 T€	1.188 T€	1.224 T€	1.261 T€	1.299 T€	1.337 T€	1.378 T€	1.419 T€	1.462 T€	1.505 T€	1.551 T€	1.597 T€
	Planung	344 T€	354 T€	365 T€	376 T€	387 T€	399 T€	411 T€	423 T€	436 T€	449 T€	463 T€	476 T€
	Verwaltung/Zentrale Dienste	3.728 T€	3.840 T€	3.956 T€	4.074 T€	4.196 T€	4.322 T€	4.452 T€	4.586 T€	4.723 T€	4.865 T€	5.011 T€	5.161 T€
<b>Zwischensumme</b>		<b>37.972 T€</b>	<b>39.286 T€</b>	<b>40.163 T€</b>	<b>41.166 T€</b>	<b>42.133 T€</b>	<b>43.580 T€</b>	<b>45.076 T€</b>	<b>46.087 T€</b>	<b>47.468 T€</b>	<b>48.629 T€</b>	<b>50.275 T€</b>	<b>52.020 T€</b>
Rest	Grundstücke/Gebäude	1.770 T€											
	Sonstige Funktionsbereiche	T€	1.183 T€	T€	70 T€	70 T€	592 T€	T€	T€	T€	592 T€	T€	T€
<b>Gesamtsumme</b>		<b>39.742 T€</b>	<b>42.239 T€</b>	<b>41.933 T€</b>	<b>43.007 T€</b>	<b>43.973 T€</b>	<b>45.942 T€</b>	<b>46.846 T€</b>	<b>47.857 T€</b>	<b>49.238 T€</b>	<b>50.991 T€</b>	<b>52.045 T€</b>	<b>53.790 T€</b>

Szenario 3 - CVD++-Szenario - FCEV													
		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Operations	Fahrdienst	15.931 T€	16.409 T€	16.901 T€	17.408 T€	17.930 T€	18.468 T€	19.022 T€	19.593 T€	20.181 T€	20.786 T€	21.410 T€	22.052 T€
	Disposition	159 T€	164 T€	169 T€	174 T€	179 T€	185 T€	190 T€	196 T€	202 T€	208 T€	214 T€	221 T€
	Fahrzeuginstandhaltung	296 T€	305 T€	314 T€	324 T€	334 T€	344 T€	354 T€	365 T€	375 T€	387 T€	398 T€	410 T€
	Überwachung/Steuerung	1.757 T€	1.810 T€	1.864 T€	1.920 T€	1.978 T€	2.037 T€	2.098 T€	2.161 T€	2.226 T€	2.293 T€	2.362 T€	2.433 T€
Vehicle	Fahrzeuginstandhaltung	3.708 T€	3.763 T€	3.820 T€	3.942 T€	4.000 T€	4.054 T€	4.108 T€	4.168 T€	4.219 T€	4.276 T€	4.314 T€	4.486 T€
	Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturvorhaltung	4.540 T€	5.018 T€	5.020 T€	5.059 T€	5.101 T€	5.466 T€	5.823 T€	5.828 T€	6.164 T€	6.766 T€	7.434 T€	7.710 T€
	Treibkraft	6.355 T€	6.450 T€	6.547 T€	6.645 T€	6.745 T€	6.960 T€	7.232 T€	7.340 T€	7.685 T€	7.912 T€	8.501 T€	8.862 T€
Overhead	Marketing/Vertrieb	1.154 T€	1.188 T€	1.224 T€	1.261 T€	1.299 T€	1.337 T€	1.378 T€	1.419 T€	1.462 T€	1.505 T€	1.551 T€	1.597 T€
	Planung	344 T€	354 T€	365 T€	376 T€	387 T€	399 T€	411 T€	423 T€	436 T€	449 T€	463 T€	476 T€
	Verwaltung/Zentrale Dienste	3.728 T€	3.840 T€	3.956 T€	4.074 T€	4.196 T€	4.322 T€	4.452 T€	4.586 T€	4.723 T€	4.865 T€	5.011 T€	5.161 T€
<b>Zwischensumme</b>		<b>37.972 T€</b>	<b>39.303 T€</b>	<b>40.180 T€</b>	<b>41.183 T€</b>	<b>42.149 T€</b>	<b>43.572 T€</b>	<b>45.068 T€</b>	<b>46.079 T€</b>	<b>47.672 T€</b>	<b>49.447 T€</b>	<b>51.657 T€</b>	<b>53.408 T€</b>
Rest	Grundstücke/Gebäude	1.770 T€											
	Sonstige Funktionsbereiche	T€	1.497 T€	T€	70 T€	70 T€	749 T€	T€	T€	T€	749 T€	T€	T€
<b>Gesamtsumme</b>		<b>39.742 T€</b>	<b>42.570 T€</b>	<b>41.950 T€</b>	<b>43.023 T€</b>	<b>43.989 T€</b>	<b>46.091 T€</b>	<b>46.838 T€</b>	<b>47.849 T€</b>	<b>49.442 T€</b>	<b>51.966 T€</b>	<b>53.427 T€</b>	<b>55.178 T€</b>

Szenario 4 - Vollumstellung ab 2031 - FCEV													
		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Operations	Fahrdienst	15.931 T€	16.409 T€	16.901 T€	17.408 T€	17.930 T€	18.468 T€	19.022 T€	19.593 T€	20.181 T€	20.786 T€	21.410 T€	22.052 T€
	Disposition	159 T€	164 T€	169 T€	174 T€	179 T€	185 T€	190 T€	196 T€	202 T€	208 T€	214 T€	221 T€
	Fahrzeuggestellung	296 T€	305 T€	314 T€	324 T€	334 T€	344 T€	354 T€	365 T€	375 T€	387 T€	398 T€	410 T€
	Überwachung/Steuerung	1.757 T€	1.810 T€	1.864 T€	1.920 T€	1.978 T€	2.037 T€	2.098 T€	2.161 T€	2.226 T€	2.293 T€	2.362 T€	2.433 T€
Vehicle	Fahrzeuginstandhaltung	3.708 T€	3.763 T€	3.820 T€	3.942 T€	4.000 T€	4.050 T€	4.100 T€	4.153 T€	4.201 T€	4.258 T€	4.289 T€	4.460 T€
	Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturvorhaltung	4.540 T€	5.068 T€	5.070 T€	5.109 T€	5.164 T€	5.562 T€	5.919 T€	6.540 T€	6.946 T€	7.203 T€	8.004 T€	8.280 T€
	Treibkraft	6.355 T€	6.450 T€	6.547 T€	6.645 T€	6.745 T€	7.042 T€	7.434 T€	7.711 T€	8.113 T€	8.347 T€	9.016 T€	9.384 T€
Overhead	Marketing/Vertrieb	1.154 T€	1.188 T€	1.224 T€	1.261 T€	1.299 T€	1.337 T€	1.378 T€	1.419 T€	1.462 T€	1.505 T€	1.551 T€	1.597 T€
	Planung	344 T€	354 T€	365 T€	376 T€	387 T€	399 T€	411 T€	423 T€	436 T€	449 T€	463 T€	476 T€
	Verwaltung/Zentrale Dienste	3.728 T€	3.840 T€	3.956 T€	4.074 T€	4.196 T€	4.322 T€	4.452 T€	4.586 T€	4.723 T€	4.865 T€	5.011 T€	5.161 T€
<b>Zwischensumme</b>		<b>37.972 T€</b>	<b>39.353 T€</b>	<b>40.230 T€</b>	<b>41.233 T€</b>	<b>42.212 T€</b>	<b>43.746 T€</b>	<b>45.358 T€</b>	<b>47.147 T€</b>	<b>48.864 T€</b>	<b>50.300 T€</b>	<b>52.717 T€</b>	<b>54.474 T€</b>
Rest	Grundstücke/Gebäude	1.770 T€											
	Sonstige Funktionsbereiche	T€	1.781 T€	T€	70 T€	70 T€	890 T€	T€	T€	T€	890 T€	T€	445 T€
<b>Gesamtsumme</b>		<b>39.742 T€</b>	<b>42.904 T€</b>	<b>42.000 T€</b>	<b>43.073 T€</b>	<b>44.052 T€</b>	<b>46.406 T€</b>	<b>47.128 T€</b>	<b>48.917 T€</b>	<b>50.634 T€</b>	<b>52.961 T€</b>	<b>54.487 T€</b>	<b>56.689 T€</b>

### III. Lastgänge

#### 1. BH Bad Belzig

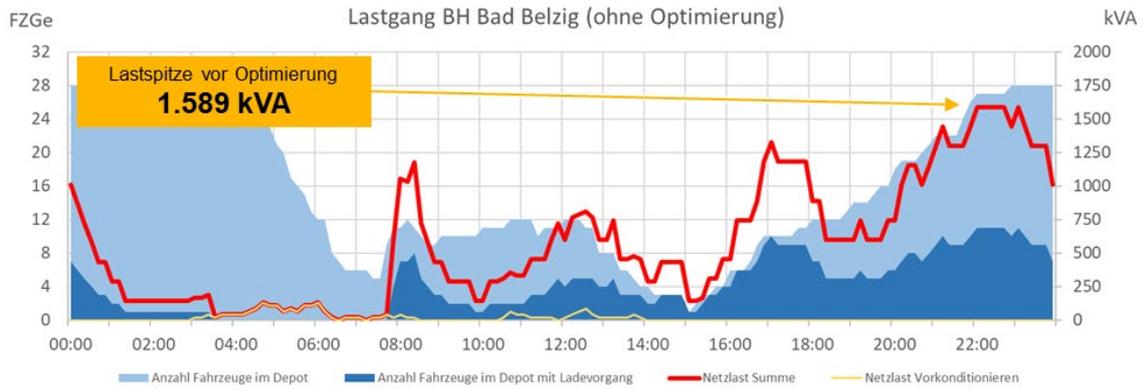


Abbildung 88: Lastgang BH Bad Belzig (ohne Optimierung)

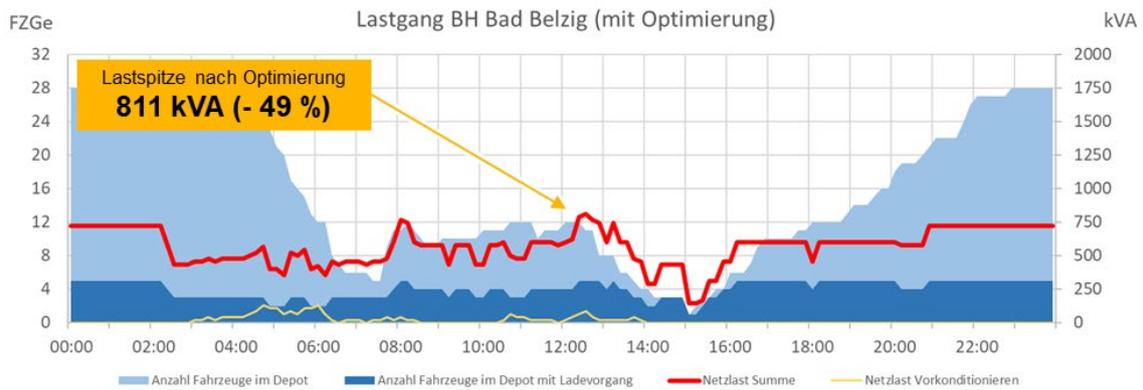


Abbildung 89: Lastgang BH Bad Belzig (mit Optimierung)

## 2. BH Beelitz

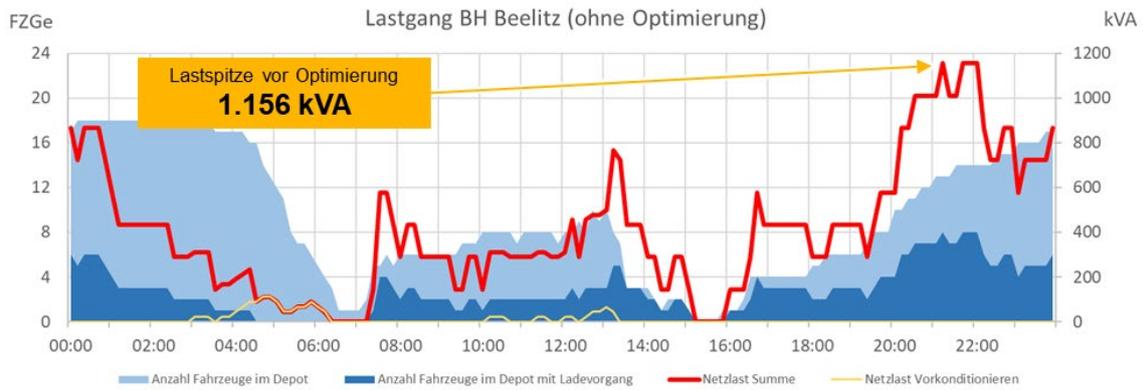


Abbildung 90: Lastgang BH Beelitz (ohne Optimierung)

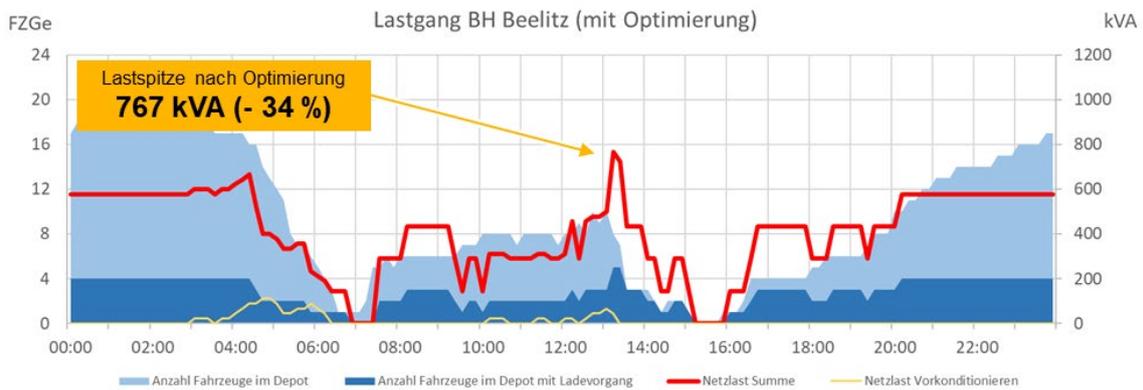


Abbildung 91: Lastgang BH Beelitz (mit Optimierung)

### 3. BH Brandenburg

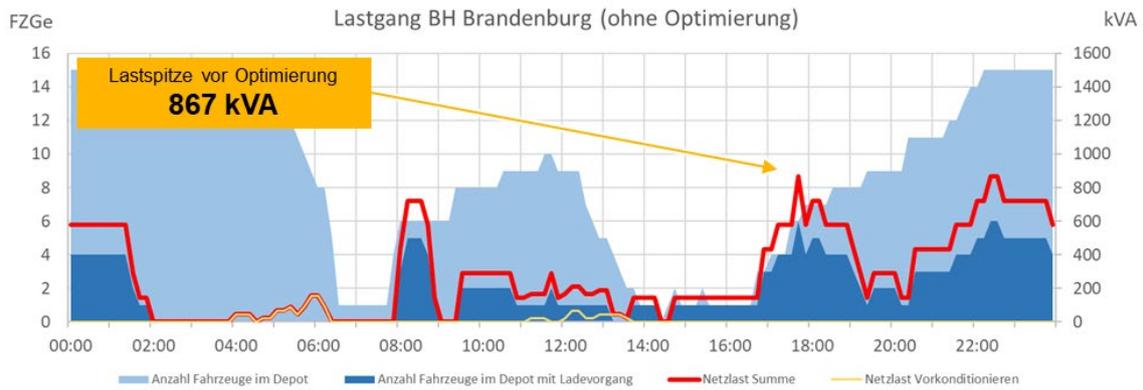


Abbildung 92: Lastgang BH Brandenburg (ohne Optimierung)

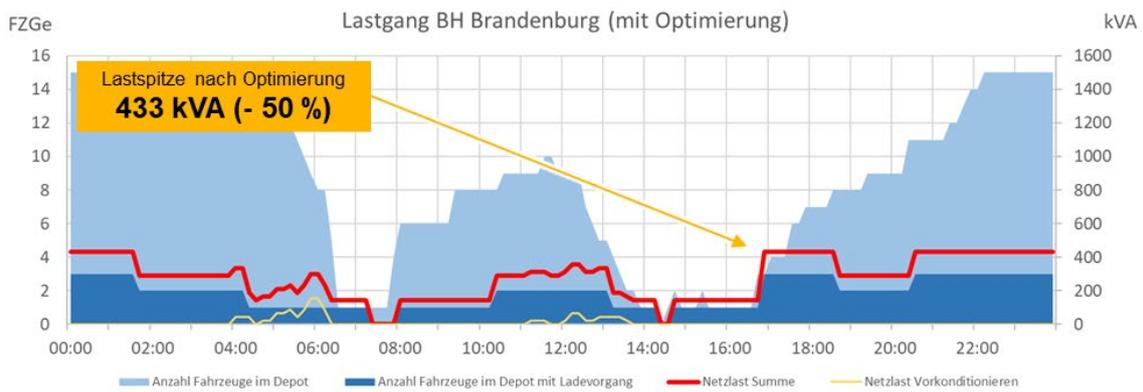


Abbildung 93: Lastgang BH Brandenburg (mit Optimierung)

#### 4. BH Potsdam

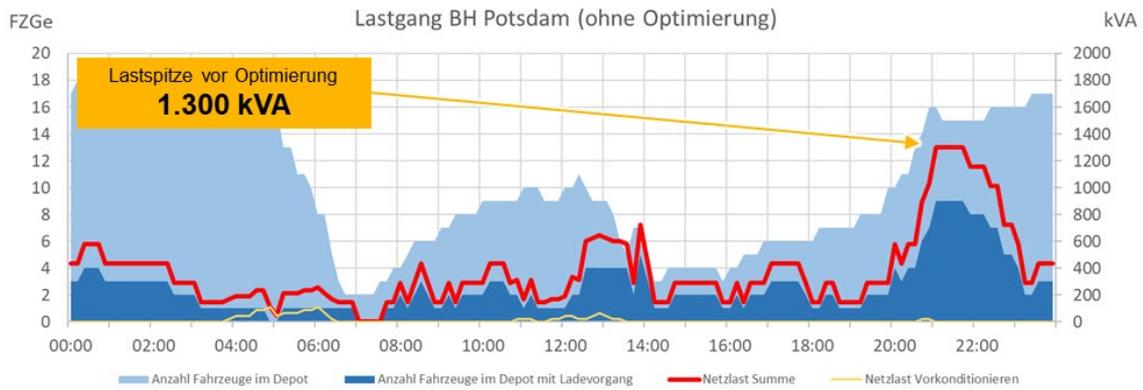


Abbildung 94: Lastgang BH Potsdam (ohne Optimierung)

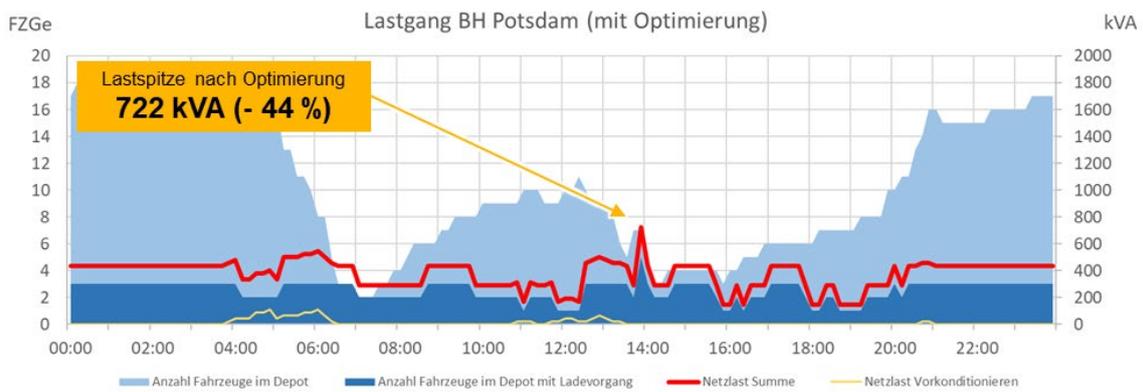


Abbildung 95: Lastgang BH Potsdam (mit Optimierung)

## 5. BH Stahnsdorf

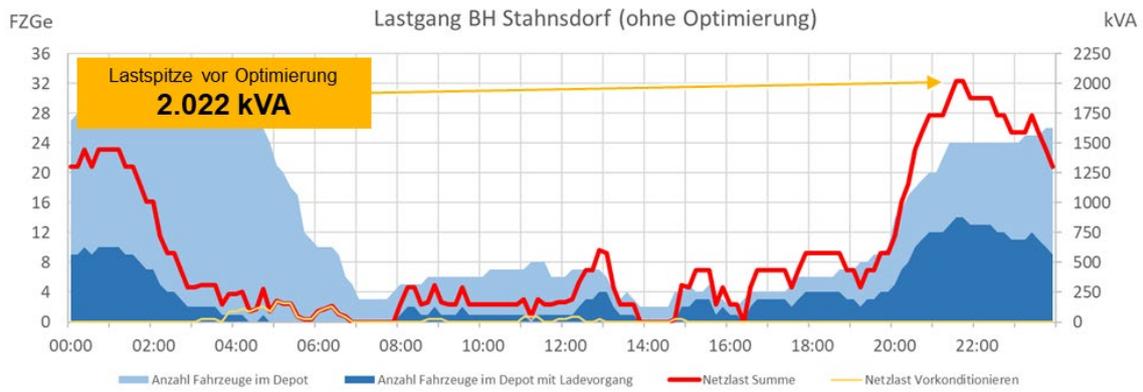


Abbildung 96: Lastgang BH Stahnsdorf (ohne Optimierung)

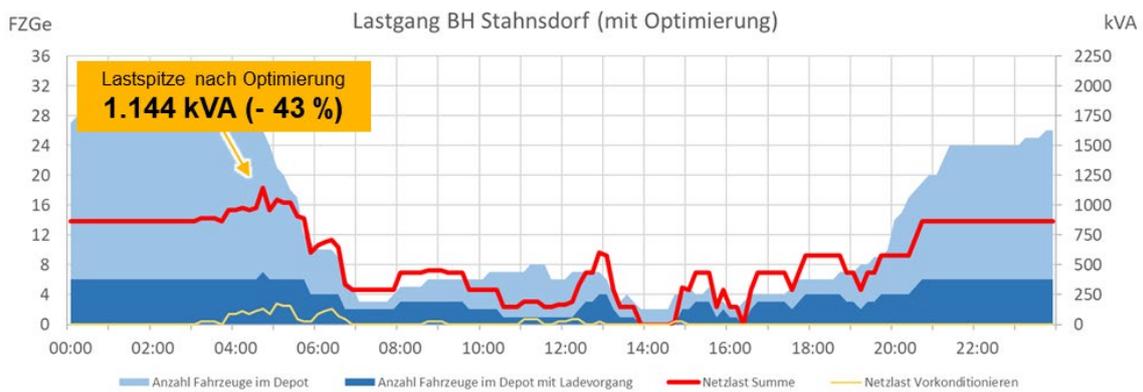


Abbildung 97: Lastgang BH Stahnsdorf (mit Optimierung)

## 6. BH Werder

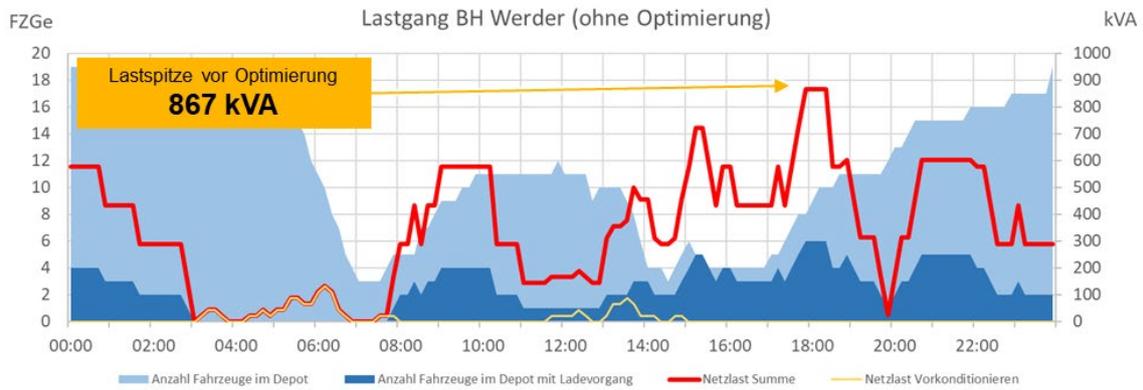


Abbildung 98: Lastgang BH Werder (ohne Optimierung)

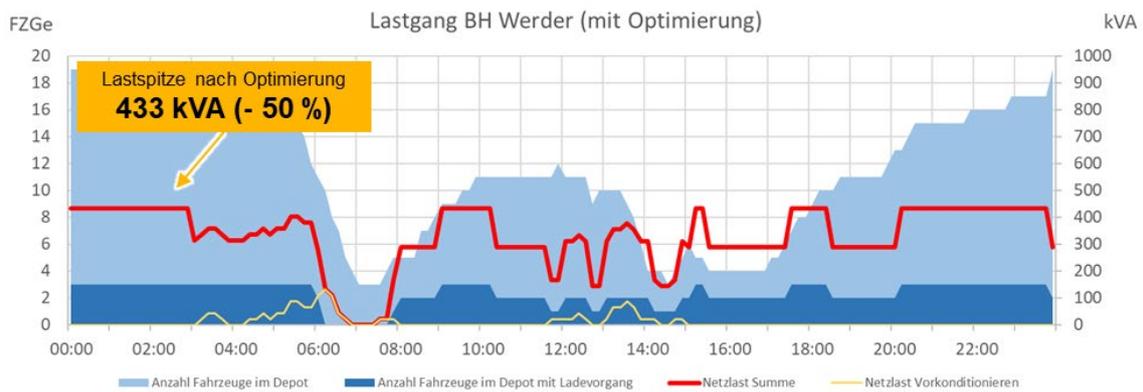


Abbildung 99: Lastgang BH Werder (mit Optimierung)

## 7. BH Ziesar

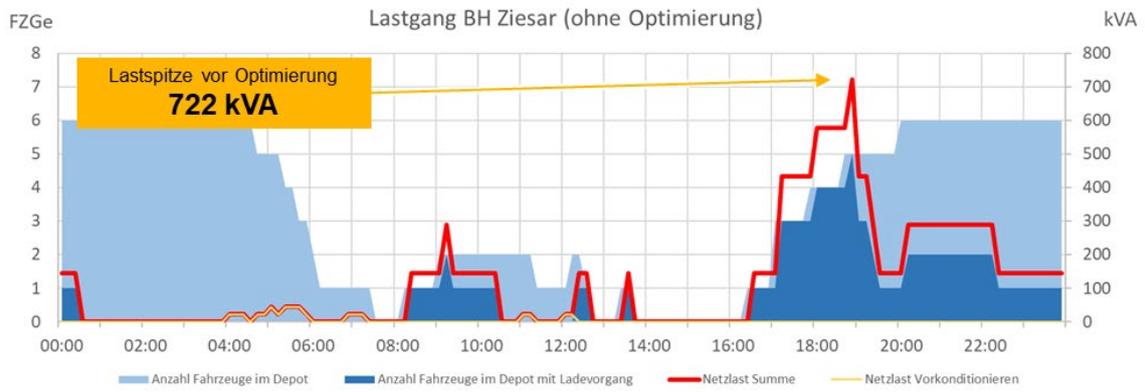


Abbildung 100: Lastgang BH Ziesar (ohne Optimierung)

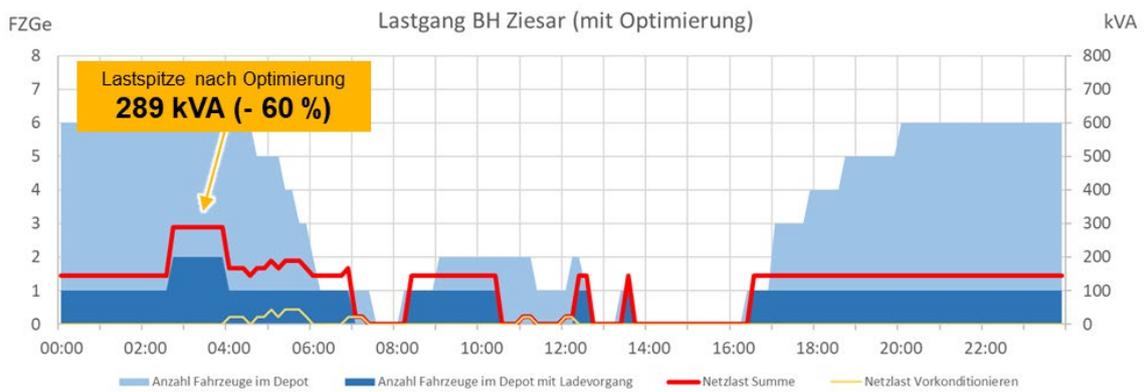


Abbildung 101: Lastgang BH Ziesar (mit Optimierung)

## 8. BH Vetter Wittenberg

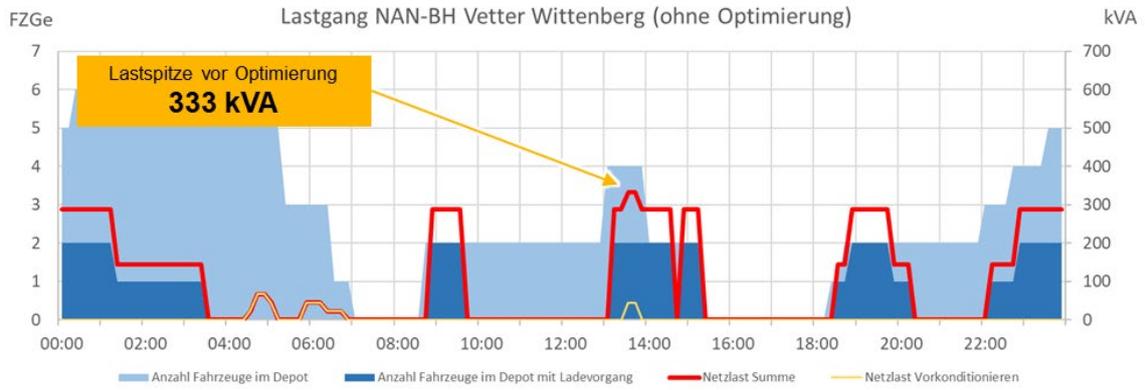


Abbildung 102: Lastgang BH Vetter Wittenberg (ohne Optimierung)

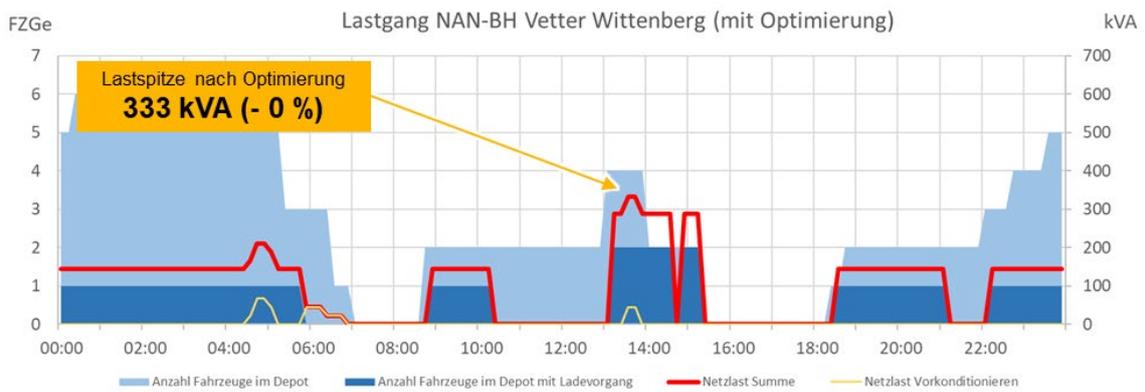


Abbildung 103: Lastgang BH Vetter Wittenberg (mit Optimierung)

## 9. BH Anger Potsdam

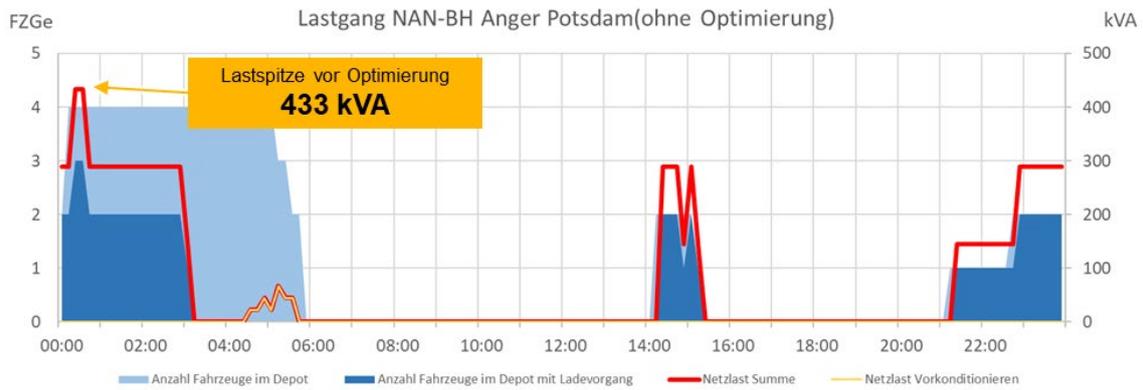


Abbildung 104: Lastgang BH Anger Potsdam (ohne Optimierung)

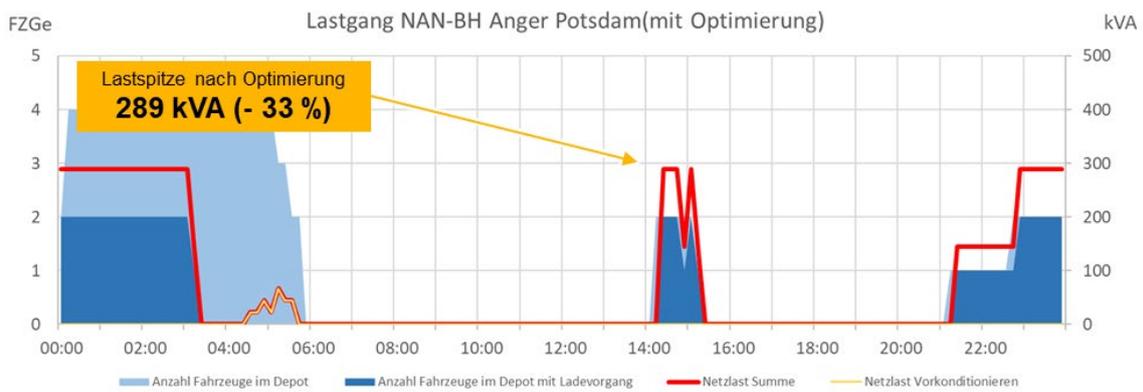


Abbildung 105: Lastgang BH Anger Potsdam (mit Optimierung)

## 10. BH AC Busreisen Potsdam

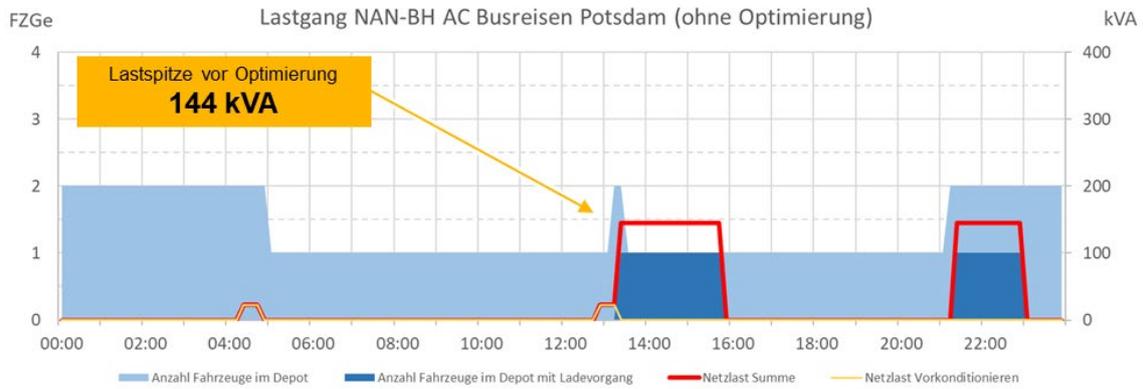


Abbildung 106: Lastgang BH AC Busreisen Potsdam (ohne Optimierung)

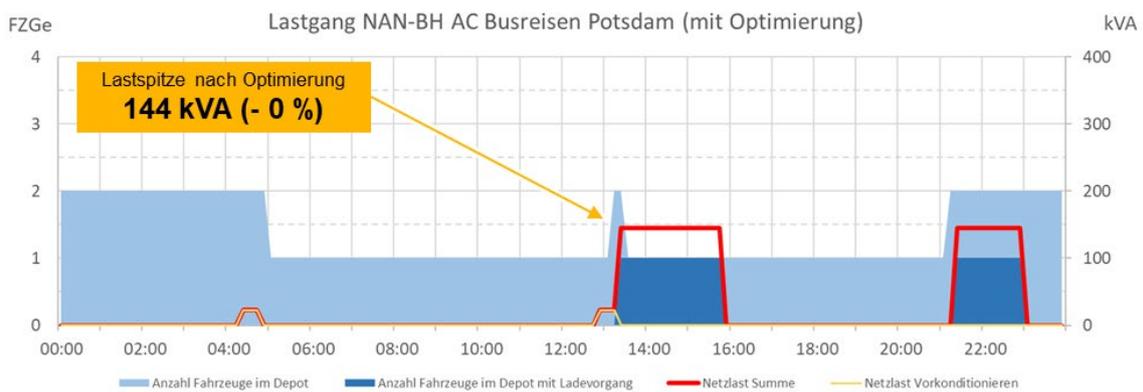


Abbildung 107: Lastgang BH AC Busreisen Potsdam (mit Optimierung)

## 11. BH Kortschlag

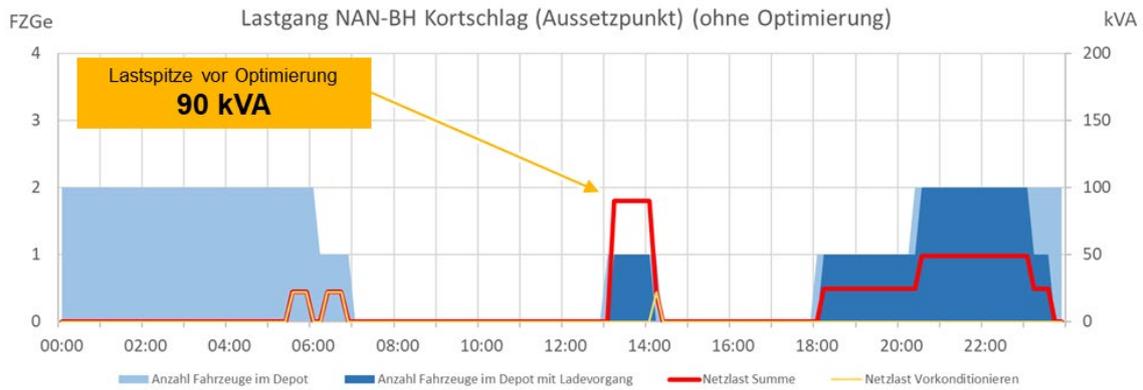


Abbildung 108: Lastgang BH Kortschlag (ohne Optimierung)

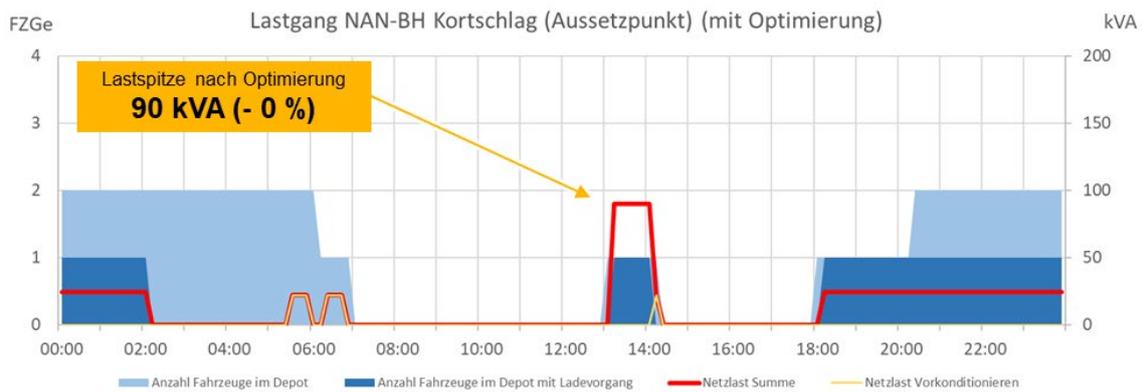


Abbildung 109: Lastgang BH Kortschlag (mit Optimierung)

Dem Betriebshof Kortschlag sind ausschließlich Fahrzeuge vom Typ "Pkw" (8+1 Sitz) zugeordnet. Über Nacht kann die Nachladung mit reduzierter Leistung über eine 22 kW Ladeschnittstelle (AC-Ladung) erfolgen. Lediglich am Tag muss die Nachladung mit erhöhter Leistung über eine DC-Ladeschnittstelle erfolgen, um das Fahrzeug rechtzeitig vollzuladen.