

# Dokumentation

der „Machbarkeitsstudie zur Einsatzmöglichkeit von Bussen mit emissionsfreien Antrieben im Landkreis Roth“

**Erstellt von:**

eebc European Electrical Bus Company GmbH

Bessie-Coleman-Straße 7

60549 Frankfurt am Main

und

PricewaterhouseCoopers GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft

Georg-Glock-Straße 22

40747 Düsseldorf

**Auftraggeber:**

Landratsamt Roth

91152 Roth

**Version:**

Version 2 erstellt am 12.12.2024

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Digitales  
und Verkehr

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Inhalt

<b>INHALT .....</b>	<b>I</b>
<b>I EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>II UMSETZUNG UND ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNG .....</b>	<b>2</b>
1 AP 1: Grundlagenermittlung .....	2
2 AP 2: Entwicklung von Einsatzkonzepten .....	3
2.1 Methodik .....	3
2.1.1 Umlaufuntersuchung .....	3
2.1.2 Umlaufverkettung .....	3
2.1.3 Umlaufanpassung .....	4
2.1.4 Berechnungsgrundlage und Prämissen .....	5
2.1.5 Grafische Darstellungen .....	9
2.2 Umlaufanalyse - Einzelumläufe .....	13
2.2.1 Einzelumlaufanalyse Datensatz Röhler (zu LB 2 und LB 4) – Fokusthema LB 4 .....	13
2.2.2 Einzelumlaufanalyse – weitere Linienbündel .....	16
2.2.3 Einzelumlaufanalyse - Bewertung .....	18
2.3 Umlaufanalyse – Fahrzeugtagesumläufe .....	19
2.3.1 Umlaufverkettung .....	19
2.3.2 Fahrzeugtagesumlaufanalyse und direktes Einsatzpotenzial – Datensatz Röhler (zu LB 2 und LB 4) – Fokusthema LB 4 .....	21
2.3.3 Fahrzeugtagesumlaufanalyse und direktes Einsatzpotenzial – weitere Linienbündel .....	23
2.3.4 Fahrzeugtagesumlaufanalyse –Bewertung .....	25
2.4 Skalierung der Ergebnisse .....	27
2.5 Technologieempfehlung .....	30
2.5.1 Umstellungspotenzial pro Linienbündel bei Neuvergabe .....	32
2.5.2 Abschließende technische Technologieempfehlung .....	36
3 AP 3: Infrastruktur .....	37
3.1 Methodik .....	37
3.2 Lastgangoptimierung .....	38
3.2.1 Lastgangoptimierung – Fokusthema LB 4 .....	39
3.2.2 Lastgangoptimierung – weitere Linienbündel .....	41
3.3 Technische Gestaltung der Ladeinfrastruktur .....	42
3.3.1 Aufbauprinzip .....	43
3.3.2 Modularität .....	45
3.3.3 Kooperationsfähigkeit .....	48
3.3.4 Wichtigkeit kleiner Modulgrößen im Systemverbund .....	49
3.3.5 Schnittstellenausführung .....	51
3.3.6 Abstellkonzept .....	52
3.3.7 Lademanagementsysteme .....	54
3.4 Infrastrukturkonzept .....	57
3.4.1 Modulbaukasten .....	57
3.4.2 Konzeptentwurf pro Depot .....	58
3.5 Exkurs: Technische Gestaltung H <sub>2</sub> -Tankanlagen .....	66

4	AP 4: Kosten-Nutzen-Analyse .....	68
4.1	Migrationspfade .....	69
4.1.1	Linienbündel 01 (Rohr) .....	72
4.1.2	Linienbündel 02 (Georgensgmünd und Röttenbach) .....	73
4.1.3	Linienbündel 03: Teilnetz 1 und Teilnetz 2 .....	74
4.1.4	Linienbündel 03: Teilnetz drei (Hilpoltstein, Thalmässing und Greding) .....	75
4.1.5	Linienbündel 04 (Stadtverkehr Roth-Büchenbach) .....	76
4.1.6	Linienbündel 06 (Wendelstein, Schwanstetten, Rednitzhembach) .....	77
4.1.7	Linienbündel 07 (Spalt, Abenberg, Kammerstein (Neukonzept inkl. TL 2) .....	78
4.2	Vorgehen der Kosten-Nutzen-Analyse.....	79
4.3	Prämissen.....	81
4.3.1	Investitionen.....	81
4.3.2	Betriebsbezogene Aufwendungen .....	83
4.4	Ableitung der Ist-Kosten .....	86
4.5	Ergebnisse der Kaufmännischen Bewertung der Dekarbonisierung der Flotte.....	87
4.5.1	Ergebnisse im Linienbündel 01 (Rohr).....	89
4.5.2	Ergebnisse im Linienbündel 02 (Georgensgmünd und Röttenbach) .....	90
4.5.3	Ergebnisse im Linienbündel 03 (Hilpoltstein, Heideck, Greding, Thalmässing und Allersberg) .....	92
4.5.4	Ergebnisse im Linienbündel 04 (Roth und Büchenbach) .....	94
4.5.5	Ergebnisse im Linienbündel 06 (Wendelstein, Schwanstetten und Rednitzhembach).....	96
4.5.6	Ergebnisse im Linienbündel 07 (Spalt, Abenberg und Kammerstein).....	99
4.6	Gegenüberstellung und Fazit der Kostenanalyse .....	101
4.7	Ökologische Bewertung der Antriebsumstellung .....	102
4.8	Betreibermodelle Ladeinfrastruktur .....	105
5	AP 5: Handlungsempfehlungen für den Landkreis Roth.....	108
5.1	Zusammenfassung .....	108
5.2	Technische Handlungsempfehlung.....	109
5.3	Empfehlung einer betrieblich und wirtschaftlich vorzugswürdigen Antriebstechnologie für die Umstellung auf alternative Antriebe im Landkreis Roth .....	111
5.4	Umsetzungsplanung und Optionen für die Flottendekarbonisierung im Landkreis Roth .....	112
5.5	Fördermöglichkeiten für den Landkreis Roth .....	116
5.5.1	Förderung von Fahrzeugen.....	116
5.5.2	Förderung der Lade- und Tankinfrastruktur .....	117
5.5.3	Rahmenbedingungen und Förderzeiträume .....	117
6	AP 6: Detailbetrachtung Linienbündel 4 .....	118
7	AP 7: Mitarbeiterqualifikation .....	119
<b>III</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>122</b>
8	Anhang: Energieverbrauchsgraphen Einzelumläufe.....	122
9	Anhang: Lastgangoptimierungen (Graphen) .....	128
10	Grundlagen.....	135
10.1	Batterieelektrische Fahrzeuge .....	135
10.1.1	Ladestrategien für batterieelektrische Busse .....	137
10.1.2	Aufbau der Ladeinfrastruktur .....	139

10.1.3	Ladeschnittstellen .....	141
10.1.4	Nachladung über partielle Oberleitungen .....	144
10.1.5	Ladeinfrastruktur im Depot .....	146
10.1.6	Ladeinfrastruktur auf Linie .....	148
10.2	Brennstoffzellenfahrzeuge.....	149
10.2.1	Brennstoffzellen-Hybridbus.....	150
10.2.2	Wirkungsgrad und Nutzungspotential.....	152
10.2.3	Wasserstoff-Tankstellen.....	153
10.2.4	Wasserstoff-Farbenlehre.....	155
10.3	Emissionsbehaftete Antriebskonzepte für Omnibusse.....	156
10.3.1	Diesel-Hybridfahrzeuge .....	156
10.3.2	Diesel-Plug-In-Hybridbus .....	158
10.3.3	Erdgasbus .....	158
10.4	Einschätzung der Marktentwicklung .....	159
10.5	Marktüberblick .....	162
10.5.1	Übersicht des verfügbaren Fahrzeugangebots.....	164
10.6	Regulatorische und rechtliche Rahmenbedingungen .....	166
10.6.1	Clean Vehicles Directive bzw. Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz.....	166
10.6.2	Verordnung (EU) 2024/1610 .....	168

## I Einleitung

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

Als Aufgabenträger für den Bus-ÖPNV steht auch der Landkreis Roth vor der Fragestellung wie die geltenden Anforderungen im Zuge der Neuvergabe von Verkehrsleistungen zum Ende der Dekade erfüllt werden können. Dabei gilt es im Wesentlichen die wirtschaftlichste Alternative zur Flottendekarbonisierung zu identifizieren. Hierfür stehen verschiedene technische Optionen zur Verfügung, deren Eignung wiederum abhängig von den Einsatzprofilen vor Ort ist.

Aus Blickwinkel des Aufgabenträgers gilt es dabei die Herausforderung auf einer höheren Betrachtungsebene zu begegnen, als es beispielsweise für Betreiber von Fahrzeugflotten der Fall ist. Um die Analyse dennoch nicht losgelöst von der Betreiberseite zu durchlaufen, wird Linienbündel 4 (Roth-Büchenbach) als Fokusthema in einer tiefergehenden Detailbetrachtung analysiert.

Im Rahmen der technischen Untersuchung wird geklärt, welche Linienbündel für die Umstellung auf emissionsfreie Antriebe geeignet sind und ob einzelne Linienbündel besonders geeignet sind. Dafür werden Umlaufdaten der aktuellen Betreiber ausgewertet und mit dem *eebc route analyzer* hinsichtlich der zu erwartenden Energieverbräuche mit verschiedenen emissionsfreien Antriebstechniken bewertet. Darauf aufbauend wird die erforderliche Infrastruktur ins Auge gefasst und ein Infrastrukturkonzept für die Realisierung entworfen. Selbstverständlich geht daraus auch hervor, welche Anschlussleistungen für eine perspektivische Vollumstellung des jeweiligen Linienbündels an den zugeordneten Betriebshöfen erforderlich ist.

Über die kommerzielle Analyse werden die technischen Aspekte und Alternativen auf das letztlich entscheidende Bewertungskriterium zusammengeführt. Da alle technischen Alternativen per Definition das Hauptkriterium Emissionsfreiheit erfüllen müssen, sind abschließend die verbundenen monetären Aufwendungen ausschlaggebend, um die für den Landkreis am besten geeignete Dekarbonisierungsstrategie zu identifizieren.

Die vorliegende Dokumentation ist an den vorgegebenen Arbeitspaketen ausgerichtet, wobei AP 6 (Detailbetrachtung LB 4) aufgrund der Nachvollziehbarkeit in die Arbeitspakete 2 bis 5 integriert wird. Entsprechende Abschnitte sind als Fokusthema gekennzeichnet. In Summe wurden folgende Arbeitspakete bearbeitet:

- AP 1: Grundlagenermittlung
- AP 2: Entwicklung von Einsatzkonzepten
- AP 3: Infrastruktur
- AP 4: Kosten-Nutzen-Analyse
- AP 5: Handlungsempfehlungen (und Abschlussbericht)
- AP 6: Detailbetrachtung LB 4
- AP 7: Mitarbeiterqualifikation

## II Umsetzung und Ergebnisse der Untersuchung

Teil der Untersuchung ist die vertiefte Betrachtung von Linienbündel 4 (Stadtverkehr Roth-Büchenbach), die nominell AP 6 zugeordnet ist. Aus Gründen der Nachvollziehbarkeit sind die einzelnen Aspekte der Detailuntersuchung hier in die weiteren Arbeitspakete eingebunden und als „Fokusthema“ gekennzeichnet.

### 1 AP 1: Grundlagenermittlung

Vor Beginn der analytischen Arbeitspakete 2 bis 7 wurden die notwendigen Eingangsdaten erhoben, geprüft und bei Bedarf für die weitere Bearbeitung aufbereitet. Die Datensätze wurden im Verlauf der Bearbeitung verarbeitet und sind hier nicht weiter thematisiert.

## 2 AP 2: Entwicklung von Einsatzkonzepten

### 2.1 Methodik

#### 2.1.1 Umlaufuntersuchung

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

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

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

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

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

#### 2.1.2 Umlaufverkettung

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

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

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

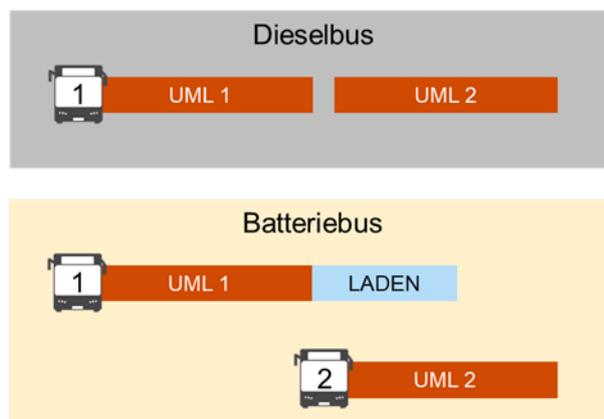


Abb. 1: Schema Umlaufverknüpfung

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 Standardwert bei Ladung über die CCS 2.0 Schnittstelle entspricht.

### 2.1.3 Umlaufanpassung

Im Zuge der Detailuntersuchung von Linienbündel 4 (Fokusthema) werden Umläufe angepasst, um diese auf die Reichweitenpotentiale batterieelektrischer Busse anzupassen. Ziel ist es, lange Umläufe zu verkürzen und stattdessen ungenutzte Busse aus dem Depot in den Einsatz zu bringen. Dabei soll die notwendige Anzahl der Batteriebusse nach Anpassung im Idealfall der heutigen Anzahl an Dieselnissen entsprechen.

Reichweitenkritische Umläufe werden bei Bedarf ausschließlich an Wendestellen aufgetrennt oder „gebrochen“. Zwischen Brechpunkt und Depot wird eine zusätzliche Transferfahrt bilanziert, um den zusätzlichen Energiebedarf für das Einrücken ins Depot zu berücksichtigen. Wenn dieselbe Transferstrecke aus der Umlaufliste entnommen werden kann, wird die entsprechende Strecke

angesetzt. Andernfalls werden Transferstrecke und Fahrtdauer über Google Maps (Pkw Daten, aufgerundet) erhoben.

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

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

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

#### 2.1.4 Berechnungsgrundlage und Prämissen

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

##### Fahrzeuggestattung (Traktionsbatterie)

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

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

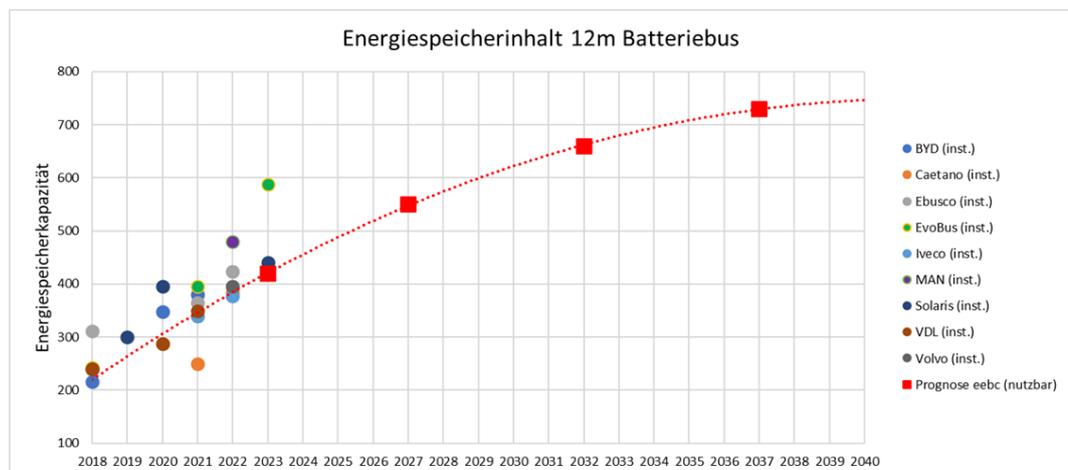


Abb. 2: Beispiel Entwicklungsprognose Batterietechnik (inst. = installiert)

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

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

<i>Fahrzeugtyp</i>	<i>Kapazität bis 2027</i>	<i>Kapazität 2028-2032</i>	<i>Kapazität 2033-2037</i>	<i>Kapazität 2038-2042</i>
Solobus 12m	400 kWh	480 kWh	580 kWh	640 kWh
Solobus 15m	250 kWh	300 kWh	360 kWh	400 kWh
Gelenkbus	470 kWh	565 kWh	680 kWh	750 kWh
Kleinbus	95 kWh	115 kWh	140 kWh	155 kWh

*Tab. 1: 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.

### **Ladetechnik**

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

Aufgrund der Strombegrenzung auf maximal 200 A (Ladestecker und Ladekabel) 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. Für Depotladung wird dieser Leistungswert auch für Ansätze mit Pantographen angesetzt.

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

### **Unterscheidung Betrachtungsbasis (Umlauf- oder Verkehrsvertragsdaten)**

Die verfügbaren Umlaufdaten spiegeln die laufenden Verkehrsverträge nicht eindeutig wider, da beispielsweise auch Fahrten aufgeführt sind, die nicht den hier betrachteten Linienbündeln zuzuordnen sind.

Der Analyseprozess beginnt zwingend mit einer Untersuchung auf Umlaufebene, die im Verlauf auf die konkreten Zahlen der Verkehrsverträge skaliert werden (Vgl. Kapitel 2.4 *Skalierung der Ergebnisse*). Zur besseren Unterscheidung der Betrachtungsbasis wird einleitend im umlaufbasierten Teil der Untersuchung folgende Bezeichnung für die Datensätze gewählt.

- Datensatz Röhler (zu LB 2 und LB 4)
- Datensatz Rombs (zu LB 3)
- Datensatz OVF (zu LB 6)
- Datensatz Ehard (zu LB 7 – TN2)
- Datensatz 605/607 (zu LB 7 – TN 1)

Im weiteren Verlauf, nach Skalierung der Ergebnisse auf die Daten der Verkehrsverträge, erfolgt die Bezeichnung über die Angabe der Linienbündel.

### **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. Da die Umlauflisten spezifisch pro Betreiber bzw. Linienbündel vorliegen, werden folgende Betriebstage ausgewählt:

- Datensatz Röhler (zu LB 2 und LB 4): Montag bis Freitag (Schule)
- Datensatz Rombs (zu LB 3): Mittwoch (Schule)
- Datensatz OVF (zu LB 6): Freitag (Schule)
- Datensatz Ehard (zu LB 7 – TN2): Donnerstag (Schule)
- Datensatz 605/607 (zu LB 7 – TN 1): Freitag (Schule)

## Einsatzumfeld

Die Topografieeinschätzung im Einsatzgebiet ist moderat bis anspruchsvoll. Der Verbrauchswert für den Traktionsbetrieb (Fahrleistung ohne Klimatisierung) wird gegenüber dem Einsatz in der Ebene erhöht angesetzt, um ein konservatives Bewertungsschema zu verfolgen. Die Wertevorgabe erfolgt linienspezifisch auf Basis der kundenseitigen Topografieeinschätzung.

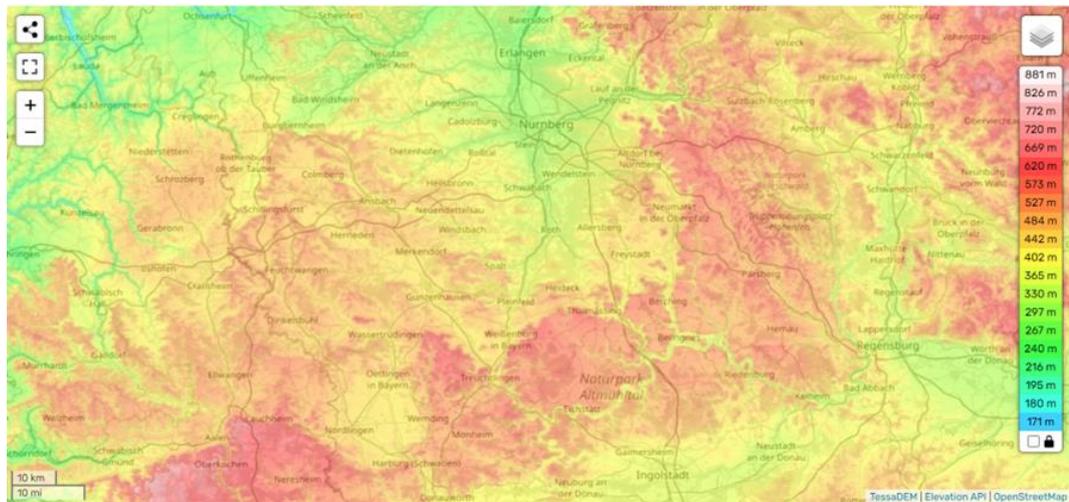


Abb. 3: Topografische Karte Landkreis Roth [Quelle: <https://de-de.topographic-map.com>]

## 2.1.5 Grafische Darstellungen

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

### Machbarkeitsdarstellung Umläufe Batteriebus

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

Im Beispiel ist kein konkreter 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 in Kapitel 2.1.4 *Berechnungsgrundlage und Prämissen* dargestellt. Die Interpretation der Grafiken entspricht weiterhin dem hier beschriebenen Schema.

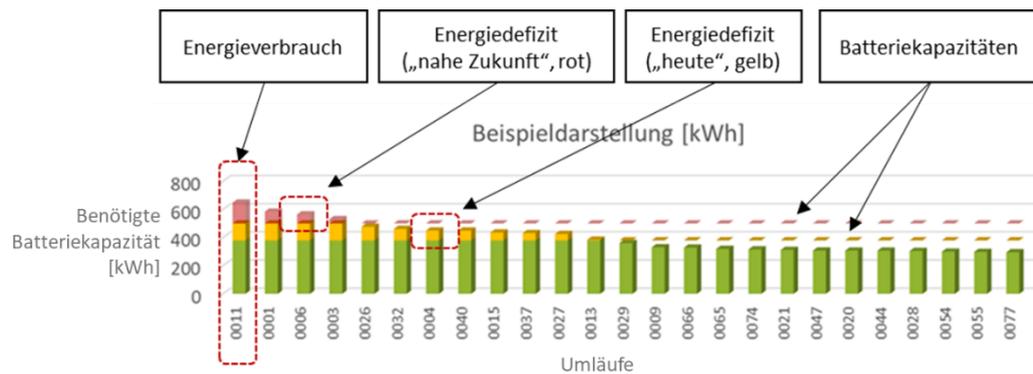


Abb. 4: Darstellung Energieverbrauch verschiedener Umläufe (im Bsp. Energieverbrauch = Stromverbrauch)

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 (Energienmengen / „Stromverbrauch“) sind in den Zeitintervallen machbar, deren Grenzwert nicht überschritten wird. Wenn ein Balken den Grenzwert erreicht, gilt er in dem Zeitintervall des Grenzwerts als ‚kritisch‘.

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

### Machbarkeitsdarstellung Umläufe Batteriebus mit vertauschten Achsen

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

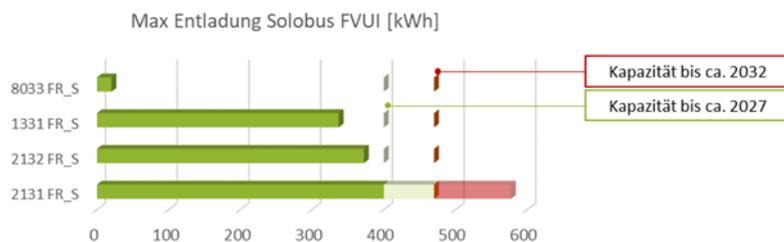


Abb. 5: Darstellung Energieverbrauch verschiedener Umläufe mit vertauschten Achsen (Praxisbeispiel)

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

## Umlaufübersicht

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



Abb. 6: Umlaufübersicht Beispieldarstellung (hier: Solobusse BEV Depot BSO)

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

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

## Lastgang

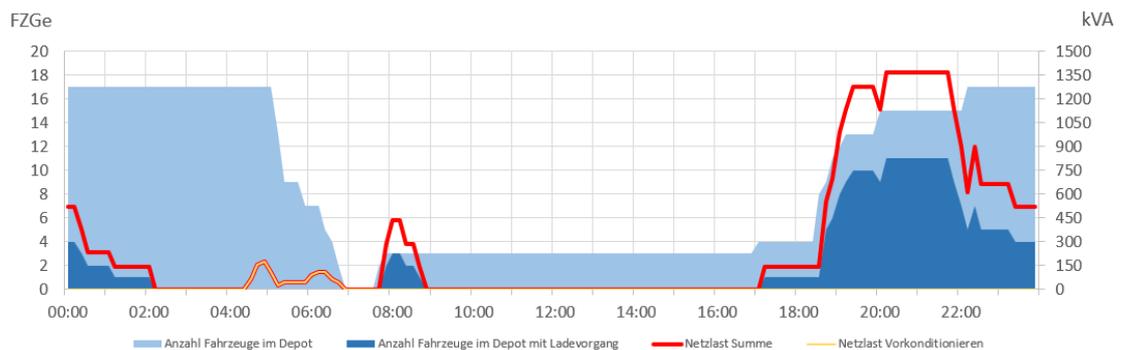


Abb. 7: Darstellung Lastgang

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 (im Beispiel maximal 17 Fahrzeuge). 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 Ladeinfrastruktur gelegt wird. Die Umläufe selbst erfolgen „am Tag“, während die Ladung in die Nachtstunden entfällt.

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

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

## 2.2 Umlaufanalyse - Einzelumläufe

Im ersten Arbeitsschritt werden Einzelumläufe als kleinste Bewertungsinstanz in Fokus gesetzt. Einzelumläufe sind dabei als umlaufende Fahrstrecke definiert, die sowohl von einem Depot<sup>1</sup> starten als auch in einem Depot enden. Im Anwendungsfall starten und enden Einzelumläufe grundsätzlich in demselben Depot. Ein Fahrzeug kann in einem Fahrzeugtagesumlauf grundsätzlich mehrere Einzelumläufe absolvieren, wenn diese zeitlich hintereinander gestaffelt werden können (Umlaufverkettung).

### Anmerkung

Umlaufdaten liegen pro Betreiber vor und sind über den Auftraggeber beigestellt worden. Teilweise sind in den Umlaufdaten Datenbestandteile enthalten, die nicht dem jeweiligen Linienbündel zugeordnet sind. In Abstimmung zwischen Auftragnehmer und -geber erfolgt die Bewertung auf Basis der beigestellten Umläufe. Unter der Annahme, dass ein linienbündelspezifischer Fahrzeugeinsatz vergleichbare Umlaufgestaltungen pro Betreiber aufweist, erfolgt in späteren Abschnitten eine Skalierung der Ergebnisse.

### 2.2.1 Einzelumlaufanalyse Datensatz Röhler (zu LB 2 und LB 4) – Fokusthema LB 4

In den Umlaufdatensätzen des Betreibers Röhler sind Umlaufdaten aus LB 4, LB 2 und anderen Linienbündeln enthalten, die nicht voneinander getrennt werden können. Die Bewertung erfolgt hier zunächst in Summe über beide Linienbündel.



Solobusse sind mit zwei Varianten im Fuhrpark, die im Verlauf der Untersuchung anhand der Fahrzeuglänge unterschieden werden. Standard-Solobusse mit ca. 12 m Länge (abgekürzt als SL) stellen den in allen Linienbündeln am häufigsten auftretenden Fahrzeugtyp dar. Dreiachser-Varianten werden hier als „S+“ oder „SL15“ abgekürzt und sind in deutlich geringerem Umfang im Fuhrpark vertreten. Darüber hinaus sind als weitere Fahrzeugtypen Gelenkbusse (GL) und Kleinbusse (KB) im Liniennetz im Einsatz.

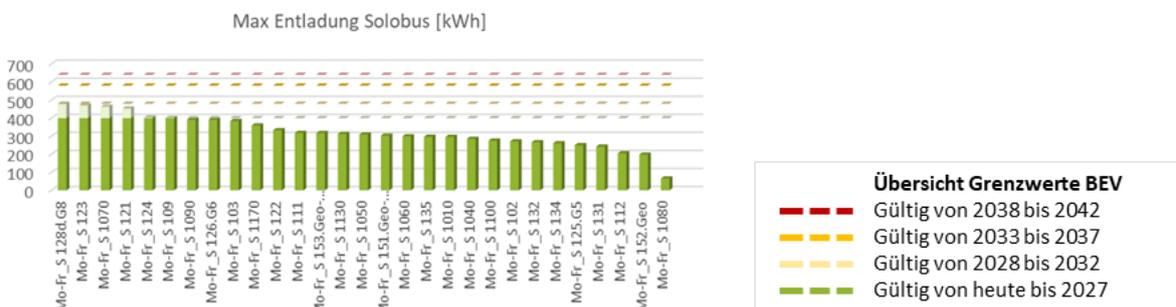


Abb. 8: Maximale Batterieentladung Einzelumläufe Datensatz Röhler – Solobusse 12m (BEV)

<sup>1</sup> Der Begriff Depot wird hier als Sammelbegriff für Abstellplätze und Betriebshöfe gewählt

Mit Blick auf die Solobusse wird ersichtlich, dass ein Großteil der Einzelumläufe (ca. 79 %) bereits mit aktueller BEV-Technik als machbar bewertet werden können. Mit der ab 2028 antizipierten technischen Entwicklung werden bereits alle Einzelumläufe als machbar bewertet.

Auch für die weiteren Fahrzeugtypen kann eine positive Bewertung für die BEV-Technik gezogen werden. Solobusse (15 m) und Kleinbusse werden nach Stand der Technik bereits vollständig als unkritisch bewertet.



Abb. 9: Maximale Batterieentladung Einzelumläufe Datensatz Röhler – weitere Fahrzeugtypen (BEV)

Die Gelenkbusumläufe weisen ebenfalls zwei Umläufe auf, die spätestens ab 2028 als machbar bewertet werden. Lediglich ein Umlauf kann erst mit ab 2038 antizipierter Technik als machbar bewertet werden. Sofern eine frühere vollständige Flottenumstellung zur Debatte steht, sind geringfügige Umlaufanpassungen für Gelenkbus-Teilflotten erforderlich.

Mit Blick auf die FCEV-Technik zeigen sich die aktuell vorherrschenden Reichweitenvorteile der Wasserstofftechnik gegenüber aktuellen Batterieantrieben. Einzelumläufe für Solobusse (12 m) und Gelenkbusse sind mit marktüblichen Speicherkapazitäten unkritisch.

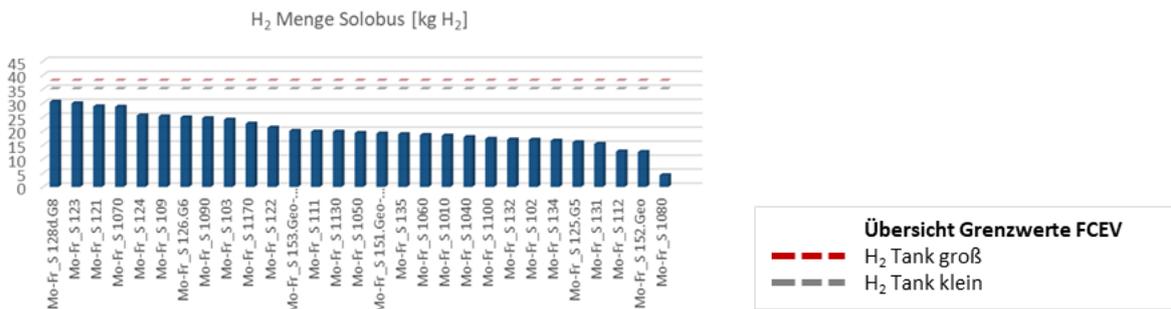


Abb. 10: Maximale Batterieentladung Einzelumläufe Datensatz Röhler – Solobusse 12m (FCEV)

Für die Fahrzeugtypen Solobus (15 m) und Kleinbusse muss das verfügbare Marktangebot namhafter Europäischer Hersteller in die Betrachtung eingebunden werden. Für Kleinbusse sind aktuell keine Modelle am Markt, über die belastbare Werte für H<sub>2</sub>-Speicher abgeleitet werden können. Auch wenn der Energiebedarf grundsätzlich prognostizierbar ist, fehlt ein Bemessungswert, um den „Verbrauch“ pro Umlauf mit möglichen Speicherkapazitäten zu

vergleichen. Entsprechend müssen alle Kleinbusumläufe pauschal als nicht machbar bewertet werden, was über das Warnsymbol verdeutlicht wird.

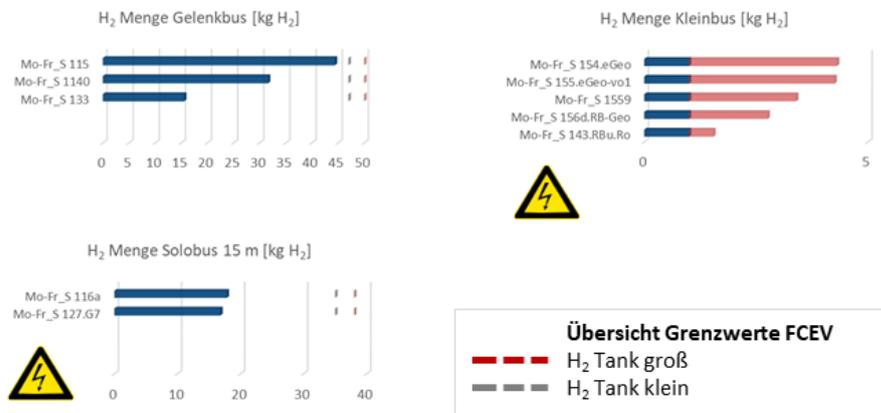


Abb. 11: Maximale Batterieentladung Einzelumläufe Datensatz Röhler – weitere Fahrzeugtypen (FCEV)

Für Solobusse (15 m) kann eine Bewertung unter Vorbehalt erfolgen. Auch wenn hier kein konkretes Marktangebot vorliegt, kann als Speicherkapazität der Grenzwert der Standardausführung (Solobus 12 m) angesetzt werden. Sofern ein Marktangebot existent wird, sollte die Speicherkapazität mindestens dem zweiachsigen Solobus entsprechen. Der Energiebedarf ist in diesem Kontext selbstverständlich auf die Fahrzeuggröße angepasst. Über das Warnsymbol wird auch hier verdeutlicht, dass die Aussage unter Vorbehalt steht und nur gilt, wenn ein entsprechendes Fahrzeug am Markt verfügbar ist.

Tabellarisch zusammengefasst ergibt sich die folgende Bewertungsübersicht für Einzelumläufe im Datensatz Röhler (zu LB 2 und LB 4):

		Anzahl machbarer Umläufe BEV – FCEV im Vergleich								Langfristig kritisch	
		Heute		ab 2028		ab 2033		ab 2038			
Solobus 12m (29 Umläufe)	BEV	23	79%	29	100%	29	100%	29	100%	0	0%
	FCEV	29	100%	29	100%	29	100%	29	100%	0	0%
Gelenkbus (3 Umläufe)	BEV	1	33%	2	67%	2	67%	3	100%	0	0%
	FCEV	3	100%	3	100%	3	100%	3	100%	0	0%
Solobus 15m (2 Umläufe)	BEV	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	0	0%
	FCEV	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	0	0%
Kleinbus (5 Umläufe)	BEV	5	100%	5	100%	5	100%	5	100%	0	0%
	FCEV	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	5	100%

Tab. 2: Übersicht Machbarkeit Einzelumläufe BEV und FCEV – Datensatz Röhler (zu LB 2 und LB 4)

## 2.2.2 Einzelumlaufanalyse – weitere Linienbündel

Aus Übersichtsgründen sind die Ergebnisse der Einzelumlaufanalyse hier ausschließlich tabellarisch dargestellt. Die grafischen Darstellungen sind in den Anhang ausgegliedert (Vgl. Kapitel 8 *Anhang: Energieverbrauchsgraphen Einzelumläufe* ab Seite 122).

### Datensatz Rombs (zu LB 3)

		Anzahl machbarer Umläufe BEV – FCEV im Vergleich								Langfristig kritisch	
		Heute		ab 2028		ab 2033		ab 2038			
Solobus 12m (19 Umläufe)	BEV	18	95%	19	100%	19	100%	19	100%	0	0%
	FCEV	19	100%	19	100%	19	100%	19	100%	0	0%
Solobus 15m (2 Umläufe)	BEV	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	0	0%
	FCEV	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	0	0%

Tab. 3: Übersicht Machbarkeit Einzelumläufe BEV und FCEV – Datensatz Rombs (zu LB 3)

### Datensatz OVf (zu LB 6)

		Anzahl machbarer Umläufe BEV – FCEV im Vergleich								Langfristig kritisch	
		Heute		ab 2028		ab 2033		ab 2038			
Solobus 12m (19 Umläufe)	BEV	16	84%	17	89%	18	95%	19	100%	0	0%
	FCEV	18	95%	18	95%	18	95%	18	95%	1	5%
Gelenkbus (4 Umläufe)	BEV	4	100%	4	100%	4	100%	4	100%	0	0%
	FCEV	4	100%	4	100%	4	100%	4	100%	0	0%
Kleinbus (3 Umläufe)	BEV	1	33%	3	100%	3	100%	3	100%	0	0%
	FCEV	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	3	100%

Tab. 4: Übersicht Machbarkeit Einzelumläufe BEV und FCEV – Datensatz OVf (zu LB 6)

**Datensatz Ehard (zu LB 7 – TN 2)**

		Anzahl machbarer Umläufe BEV – FCEV im Vergleich								Langfristig kritisch	
		Heute		ab 2028		ab 2033		ab 2038			
Solobus 12m (4 Umläufe)	BEV	4	100%	4	100%	4	100%	4	100%	0	0%
	FCEV	4	100%	4	100%	4	100%	4	100%	0	0%
Solobus 15m (3 Umläufe)	BEV	2	67%	2	67%	3	100%	3	100%	0	0%
	FCEV	3	100%	3	100%	3	100%	3	100%	0	0%
Kleinbus (1 Umlauf)	BEV	0	0%	0	0%	1	100%	3	100%	0	0%
	FCEV	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	3	100%

Tab. 5: Übersicht Machbarkeit Einzelumläufe BEV und FCEV – Datensatz Ehard (zu LB 7 – TN 2)

**Datensatz 605/607 (zu LB 7 – TN 1)**

		Anzahl machbarer Umläufe BEV – FCEV im Vergleich								Langfristig kritisch	
		Heute		ab 2028		ab 2033		ab 2038			
Solobus 12m (4 Umläufe)	BEV	3	43%	4	57%	6	86%	7	100%	0	0%
	FCEV	6	86%	6	86%	6	86%	6	86%	1	14%
Solobus 15m (1 Umlauf)	BEV	1	100%	1	100%	1	100%	1	100%	0	0%
	FCEV	1	100%	1	100%	1	100%	1	100%	0	0%

Tab. 6: Übersicht Machbarkeit Einzelumläufe BEV und FCEV – Datensatz 605/607 (zu LB 7 – TN 1)

### 2.2.3 Einzelumlaufanalyse - Bewertung

Auf Basis der Einzelumlaufanalyse zeigt sich insgesamt ein sehr positives Bild. Grundsätzlich weisen sowohl die Berechnungen mit BEV- als auch mit FCEV-Technik hohe Anteile machbarer Einzelumläufe auf. Dies wird bei Betrachtung aller Datensätze in Summe besonders deutlich.

		Anzahl machbarer Umläufe BEV – FCEV im Vergleich								Langfristig kritisch	
		Heute		ab 2028		ab 2033		ab 2038			
Solobus 12m (78 Umläufe)	BEV	64	82%	73	94%	76	97%	78	100%	0	0%
	FCEV	76	97%	76	97%	76	97%	76	97%	2	3%
Gelenkbus (7 Umläufe)	BEV	5	71%	6	86%	6	86%	7	100%	0	0%
	FCEV	7	100%	7	100%	7	100%	7	100%	0	0%
Solobus 15m (8 Umläufe)	BEV	7	88%	7	88%	8	100%	8	100%	0	0%
	FCEV	8	100%	8	100%	8	100%	8	100%	0	0%
Kleinbus (9 Umläufe)	BEV	6	67%	8	89%	9	100%	9	100%	0	0%
	FCEV	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	9	100%

Tab. 7: Übersicht Machbarkeit Einzelumläufe BEV und FCEV – alle Datensätze

Für eine valide Machbarkeitsbewertung muss die Betrachtungsebene angehoben werden, indem Fahrzeugmengen statt Einzelumläufe in Fokus gesetzt werden. Dies erfolgt im Folgekapitel unter der Überschrift Fahrzeugtagesumläufe.

Auf Basis der Einzelumläufe kann bereits festgehalten werden, dass die Abweichungen zwischen BEV- und FCEV-Technik überschaubar ausfallen. Trotz aktueller Reichweitenvorteile für FCEV sind ein Großteil der BEV-Einzelumläufe bereits heute als machbar bewertet. Über die Zeitachse nähern sich beide Technologien weiter an, so dass mit ab 2038 antizipierter Technik beide Technologien auf Augenhöhe rangieren. Bereits mit der nächsten angesetzten BEV-Entwicklungsstufe (ab 2028) weichen die Anzahlen machbarer Umläufe nur sehr geringfügig voneinander ab.

In der technologieoffenen Betrachtung wirkt sich letztlich weniger die Systemperformance auf die Machbarkeitsbewertung aus als das Marktangebot. Kleinbusse mit FCEV-Technik sind nicht am Markt präsent, so dass keine valide Bewertung erfolgen kann. Dies gilt zwar auch für Solobusse in der 15 m Ausführung, jedoch kann hier eine Bewertung unter Vorbehalt erfolgen. Indem Speicherkapazitäten entsprechend der 15 m Variante angesetzt werden, kann abgeleitet werden, dass die Umläufe theoretisch mit FCEV-Technik machbar sind. Es ist anzunehmen, dass in 15 m Ausführung mindestens die Speicherkapazitäten der Standardausführung realisiert werden. Sofern entsprechende Modelle am Markt platziert werden, kann angenommen werden, dass diese für einen flächendeckenden Einsatz in den betrachteten Linienbündeln geeignet sind.

## 2.3 Umlaufanalyse – Fahrzeugtagesumläufe

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

Die Ergebnisse der Fahrzeugtagesumlaufanalyse werden tabellarisch, vergleichbar mit den Ergebnissen der Einzelumlaufanalyse, dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Werteangaben hier Fahrzeugmengen und nicht Anzahlen von Einzelumläufen repräsentieren. Zur Verdeutlichung werden die Tabellen hier mit einer abweichenden Farbgebung gegenüber dem vorherigen Unterkapitel aufgeführt.

### Anmerkung

Für die Bewertung der Einzelumläufe ist die Zuordnung zu Depots zunächst irrelevant. Die Verkettung von Einzel- zu Fahrzeugtagesumläufen kann jedoch nur erfolgen, wenn beide Einzelumläufe demselben Depot zugeordnet sind (Ankunftsort erster Umlauf = Startort zweiter Umlauf). Entsprechend wird im Folgenden das zugeordnete Depot vermerkt, wenn laut Umlauflisten mehrere Depots pro Linienbündel relevant sind.

### Anmerkung

#### **Bewertung von 15 m Solobussen mit Brennstoffzellentechnik**

Für Solobusse (15 m) mit Brennstoffzellentechnik ist kein belastbares Marktangebot bekannt. Aufgrund der technischen Ähnlichkeit zum 12 m Ausführung ist die Bewertung auf theoretischer Ebene jedoch möglich. Um das Bewertungsbild technologieoffen zu halten, werden in diesem Unterkapitel die Bewertungen von 15 m FCEV-Bussen in Klammern gesetzt und entsprechend der theoretischen Bewertung als machbar oder nicht machbar gezählt.

Im Rahmen der abschließenden Bewertung (Technologieempfehlung) muss hingegen angenommen werden, dass 15 m FCEV-Busse nicht am Markt verfügbar sind, um den konservativen Bewertungsprozess aufrecht zu erhalten. Aufgrund der vergleichsweise geringen Fahrzeugmenge hat dieser Detailaspekt keinen nennenswerten Einfluss auf das Gesamtergebnis.

### 2.3.1 Umlaufverkettung

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

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

absolvieren. Für das Dieselreferenzmodell muss also keine Tankzeit zwischen den Einzelumläufen gewährleistet sein.

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

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

Um die Auswirkung auf der Zeitachse darzustellen, wird im Folgenden das direkte Einsatzpotenzial für BEV und FCEV bestimmt. Das direkte Einsatzpotenzial entspricht dabei der Fahrzeugmenge, die zum jeweiligen Zeitpunkt ohne jegliche Sondermaßnahmen auf emissionsfreie Antriebe umgestellt werden kann<sup>2</sup>. Abseits der zwingend erforderlichen Lade- oder Tankinfrastruktur sind keine weiteren Maßnahmen, wie Umlaufanpassungen, erforderlich.

---

<sup>2</sup> Auch als „Eins-zu-Eins-Ersatz“ bezeichnet

### 2.3.2 Fahrzeugtagesumlaufanalyse und direktes Einsatzpotenzial – Datensatz Röhler (zu LB 2 und LB 4) – Fokusthema LB 4

In den Umlauflisten im Datensatz Röhler (zu LB 2 und LB 4) sind für Solo- und Gelenkbusse bereits Fahrzeugtagesumläufe, ohne die Möglichkeit weitere Umläufe zu verketteten, aufgeführt. Entsprechend sind die Ergebnisse hier identisch zu denen der Einzelumlaufanalyse, wobei jeder Umlauf einem Fahrzeug entspricht.



Lediglich für Kleinbusse besteht die Möglichkeit die fünf Einzelumläufe in drei Fahrzeugtagesumläufe zu verketteten.

		Anzahl machbarer Fahrzeuge BEV – FCEV im Vergleich										
		Anzahl Diesel	Heute		ab 2028		ab 2033		ab 2038		Langfristig kritisch	
Solobus 12m	BEV	29	23	79%	29	100%	29	100%	29	100%	0	0%
	FCEV		29	100%	29	100%	29	100%	29	100%	0	0%
Gelenkbus	BEV	3	1	33%	2	67%	2	67%	3	100%	0	0%
	FCEV		3	100%	3	100%	3	100%	3	100%	0	0%
Solobus 15m	BEV	2	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	0	0%
	FCEV		(2)	100%	(2)	100%	(2)	100%	(2)	100%	(0)	0%
Kleinbus	BEV	3	3	100%	3	100%	3	100%	3	100%	0	0%
	FCEV		0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	3	100%

Tab. 8: Übersicht Machbarkeit Fahrzeugtagesumläufe BEV und FCEV – Datensatz Röhler (zu LB 2 und LB 4)

#### 2.3.2.1 Weitere Optimierungspotenziale im Datensatz Röhler (zu LB 2 und LB 4)

Die aktuellen Verkehrsverträge der hier relevanten Linienbündel enden Dezember 2029 (LB 4) beziehungsweise Dezember 2030 (LB 2). Bei einer Neuvergabe ist entsprechend davon auszugehen, dass die für ab 2028 antizipierte Technik zur Verfügung steht.

Das technologisch anspruchsvollste Szenario ist eine hypothetische Vollumstellung der Linienbündel zum Umstellungszeitpunkt. Dafür muss sichergestellt sein, dass alle Fahrzeugeinsätze mit ‚ab 2028‘ antizipierter Technik machbar sind.

Wie aus dem direkten Einsatzpotenzial ersichtlich wird, sind zu diesem Zeitpunkt bereits nahezu alle Fahrzeugeinsätze machbar. Die einzigen Ausnahmen sind Gelenkbusse mit BEV-Technik und Kleinbusse mit FCEV-Technik.

Während für Kleinbusse keine Optimierungspotentiale bestehen, außer alternative Fahrzeuggrößen einzusetzen, können die Gelenkbuseinsätze grundsätzlich durch eine Umlaufanpassung optimiert werden.

In Bezug auf die Umlaufoptimierung muss berücksichtigt werden, dass die vorliegenden Umlaufdaten Teilstrecken aus den Linienbündeln 2 und 4 sowie aus anderen Linienbündeln enthalten, die nicht pro Linienbündel differenziert werden können.

Unter der Prämisse, dass alle in den Umlauflisten enthaltenen Linienbündel (wie aktuell) an denselben Betreiber vergeben werden, kann eine Umlaufanpassung erfolgen. Inwiefern dies auf ein isoliert betrachtetes Linienbündel 4 übertragbar ist, müsste auf Basis linienbündelspezifischer Umlaufdaten untersucht werden.

Im Rahmen der Analyse wurde eine Umlaufanpassung für die vorliegenden Umlaufdaten ausgeführt. Ohne Fahrzeugmehrbedarf und bei überschaubaren Personalaufwendungen für die Ablösefahrten, konnten alle Gelenkbusumläufe für das Technikintervall ab 2028 machbar gestaltet werden. Für die weitere Betrachtung wurde jedoch abgestimmt, dass bei linienbündelspezifischer Betrachtung alle Gelenkbusumläufe direkt als ‚machbar‘ bewertet werden sollen. Ohne die Linienanteile aus weiteren Linienbündeln, wird der zunächst kritische Umlauf deutlich verkürzt, so dass die Reichweite als unkritisch bewertet werden kann.

### 2.3.3 Fahrzeugtagesumlaufanalyse und direktes Einsatzpotenzial – weitere Linienbündel

#### Datensatz Rombs (zu LB 3)

		Anzahl machbarer Fahrzeuge BEV – FCEV im Vergleich										
		Anzahl Diesel	Heute		ab 2028		ab 2033		ab 2038		Langfristig kritisch	
<b>Depot Thalmässing</b>												
Solobus 12m	BEV	10	9	90%	10	100%	10	100%	10	100%	0	0%
	FCEV		10	100%	10	100%	10	100%	10	100%	0	0%
Solobus 15m	BEV	2	2	100%	2	100%	2	100%	2	100%	0	0%
	FCEV		(2)	100%	(2)	100%	(2)	100%	(2)	100%	(0)	0%
<b>Depot ELKO</b>												
Solobus 12m	BEV	5	5	100%	5	100%	5	100%	5	100%	0	0%
	FCEV		5	100%	5	100%	5	100%	5	100%	0	0%
<b>Depot Weißenburg</b>												
Solobus 12m	BEV	1	1	100%	1	100%	1	100%	1	100%	0	0%
	FCEV		1	100%	1	100%	1	100%	1	100%	0	0%

Tab. 9: Übersicht Machbarkeit Fahrzeugtagesumläufe BEV und FCEV – Datensatz Rombs (zu LB 3)

### Datensatz OVf (zu LB 6)

		Anzahl machbarer Fahrzeuge BEV – FCEV im Vergleich										
		Anzahl Diesel	Heute		ab 2028		ab 2033		ab 2038		Langfristig kritisch	
Solobus 12m	BEV	18	15	83%	16	89%	17	94%	18	100%	0	0%
	FCEV		17	94%	17	94%	17	94%	17	94%	1	5%
Gelenkbus	BEV	4	4	100%	4	100%	4	100%	4	100%	0	0%
	FCEV		4	100%	4	100%	4	100%	4	100%	0	0%
Kleinbus	BEV	3	1	33%	3	100%	3	100%	3	100%	0	0%
	FCEV		0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	3	100%

Tab. 10: Übersicht Machbarkeit Fahrzeugtagesumläufe BEV und FCEV – Datensatz OVf (zu LB 6)

### Datensatz Ehard (zu LB 7 – TN 2)

		Anzahl machbarer Fahrzeuge BEV – FCEV im Vergleich										
		Anzahl Diesel	Heute		ab 2028		ab 2033		ab 2038		Langfristig kritisch	
Solobus 12m	BEV	4	4	100%	4	100%	4	100%	4	100%	0	0%
	FCEV		4	100%	4	100%	4	100%	4	100%	0	0%
Solobus 15m	BEV	3	2	67%	2	67%	3	100%	3	100%	0	0%
	FCEV		(3)	100%	(3)	100%	(3)	100%	(3)	100%	(0)	0%
Kleinbus	BEV	1	0	0%	0	0%	1	100%	1	100%	0	0%
	FCEV		0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	1	100%

Tab. 11: Übersicht Machbarkeit Fahrzeugtagesumläufe BEV und FCEV – Datensatz Ehard (zu LB 7 – TN 2)

Datensatz 605/607 (zu LB 7 – TN 1)

		Anzahl machbarer Fahrzeuge BEV – FCEV im Vergleich								Langfristig kritisch		
		Anzahl Diesel	Heute		ab 2028		ab 2033		ab 2038			
Solobus 12m	BEV	7	3	43%	4	57%	6	86%	7	100%	0	0%
	FCEV		6	86%	6	86%	6	86%	6	86%	1	14%
Solobus 15m	BEV	1	1	100%	1	100%	1	100%	1	100%	0	0%
	FCEV		(1)	100%	(1)	100%	(1)	100%	(1)	100%	(0)	0%

Tab. 12: Übersicht Machbarkeit Fahrzeugtagesumläufe BEV und FCEV – Datensatz 605/607 (zu LB 7 – TN 1)

2.3.4 Fahrzeugtagesumlaufanalyse –Bewertung

Aufgrund der sehr geringen Anzahl möglicher Umlaufverkettungen entspricht der Großteil aller Einzelumläufe einem Fahrzeugtagesumlauf. Konkret sind für die Erfüllung der 102 Einzelumläufe insgesamt 96 Fahrzeuge verschiedener Typen erforderlich.

		Anzahl machbarer Fahrzeuge BEV – FCEV im Vergleich								Langfristig kritisch		
		Anzahl Diesel	Heute		ab 2028		ab 2033		ab 2038			
Solobus 12m	BEV	74	60	81%	69	93%	72	97%	74	100%	0	0%
	FCEV		72	97%	72	97%	72	97%	72	97%	2	3%
Gelenkbus	BEV	7	5	71%	6	86%	6	86%	7	100%	0	0%
	FCEV		7	100%	7	100%	7	100%	7	100%	0	0%
Solobus 15m	BEV	8	7	88%	7	88%	8	100%	8	100%	0	0%
	FCEV		(8)	100%	(8)	100%	(8)	100%	(8)	100%	(0)	0%
Kleinbus	BEV	7	4	57%	6	86%	7	100%	7	100%	0	0%
	FCEV		0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	7	100%

Tab. 13: Übersicht Machbarkeit Fahrzeugtagesumläufe BEV und FCEV – Alle Datensätze

Entsprechend fällt die Bewertung hier identisch zur Bewertung auf Basis der Einzelumläufe aus: Beide Technologien BEV und FCEV rangieren auf Augenhöhe und sind gut für einen

Technologiewechsel geeignet, sofern ein ausreichendes Marktangebot vorhanden ist. Während dies für BEV über alle Fahrzeugtypen der Fall ist, ist das Marktangebot bei FCEV auf Solobusse in 12 m Ausführung und Gelenkbusse beschränkt. Somit sind FCEV nur für einen Teil der Fahrzeugflotte geeignet. Hierbei gilt jedoch, dass aufgrund des großen Anteils an Solobussen (12 m) in der Gesamtflotte die Erfüllung der CVD-Vorschriften unkritisch erscheint.

#### *Anmerkung*

Auch wenn die Breite des Marktangebots für die Machbarkeitsbewertung nur eine untergeordnete Rolle spielt, sollte berücksichtigt werden, dass für BEV ein insgesamt größeres Angebot besteht. Für den Anwender bedeutet dies eine größere Auswahlmöglichkeit am Markt.

## 2.4 Skalierung der Ergebnisse

Auf Basis der beigestellten Umlauflisten ergeben sich Fahrzeugmengen, die gegenüber den Fahrzeugmengen in den aktuellen Verkehrsverträgen abweichen. Um die kommerzielle Bewertung im Verlauf der Untersuchung an den Verkehrsverträgen ausrichten zu können, müssen die Ergebnisse der technischen, umlaufbasierten Bewertung auf die Fahrzeugzahlen der Verkehrsverträge angepasst werden. Das Vorgehen (Skalierung) wurde mit dem Auftraggeber abgestimmt und hat lediglich Einfluss auf die internen Berechnungsabläufe. Die Skalierung soll an dieser Stelle lediglich dokumentiert werden. Der Skalierungsablauf ist für das Verständnis der weiteren Untersuchung nicht zwingend erforderlich.

Die Anpassung der Fahrzeugmenge hat Einfluss auf die Anzahl umstellbarer Einsätze, den erwarteten Jahres-Energiebedarf und mögliche Zusatzaufwendungen bei einer Vollumstellung des jeweiligen Linienbündels zum Zeitpunkt der Neuvergabe.

Der Jahresenergiebedarf wird hier berechnet, indem ein Jahres-Durchschnittsverbrauch pro Kilometer spezifisch pro Linienbündel und Fahrzeugtyp berechnet wird. Über Multiplikation mit den Jahreskilometerangaben aus den Verkehrsverträgen kann der Jahresenergiebedarf hinreichend genau abgeschätzt werden.

Alle weiteren Aspekte werden hier folgend pro Linienbündel zusammengefasst. Aufgrund der technischen Entwicklungsprognose ist der Laufzeitbeginn nach Neuvergabe hier relevant. Die meisten Linienbündel gehen nach Neuvergabe im Technikintervall<sup>3</sup> 2028-2032 in Betrieb. Linienbündel 6 und 7 werden hingegen erst nach 2033 vergeben, so dass hier die (gesteigerten) technischen Parameter aus dem Technikintervall 2033-2037 angesetzt werden.

Der Zusatzaufwand für eine Vollumstellung pro Linienbündel kann ausschließlich für BEV bestimmt werden, da mit Brennstoffzellentechnik die Marktverfügbarkeit eine Vollumstellung vielfach ausschließt.

### Datensatz Röhler (zu LB 2 und LB 4)

Linienbündel 2 und 4 sind in den Umlauflisten zusammengefasst und können nicht separiert werden. Gleichzeitig ist die Fahrzeugmenge nach Umlauflisten deutlich höher als die Fahrzeugmengen in den Verkehrsverträgen, was hier darauf zurückgeht, dass auch Umläufe aus weiteren Linienbündeln in den Datensätzen enthalten sind.

#### Zeitpunkte Betriebsaufnahme nach Neuvergabe:

LB 2 – 2030

LB 4 – 2029

#### Skalierung:

LB 2 erfordert nur den Einsatz von Solobussen (12 m) und Kleinbussen. Laut Umlaufliste sind alle Einsätze dieser Fahrzeugtypen ab 2028 mit BEV machbar. Abgeleitet wird, dass LB 2 ab 2028 voll

---

<sup>3</sup> Aufgrund des Stufenmodells für die technische Entwicklung mit über 5-jährigen Zeiträumen konstant angesetzten Werten ergeben sich Zeitintervalle (hier bezeichnet als Technikintervalle) mit konstanten technischen Parametern, die hier zugrunde gelegt werden.

auf BEV umstellbar ist. Für FCEV ist nur die Solobusflotte umstellbar, da das Marktangebot für Kleinbusse nicht existent ist.

LB 4 stellt das Fokusthema der Untersuchung dar, weshalb die Abstimmung hier tiefer diskutiert wurde als für die weiteren Linienbündel. LB 4 erfordert den Einsatz von Solobussen (12 m) und Gelenkbussen. Analog zu LB 2 wird abgeleitet, dass alle Solobuseinsätze in LB 4 ab 2028 technologieunabhängig ‚machbar‘ sind, da alle Solobuseinsätze in den Umlauflisten unkritisch bewertet werden. Bei Gelenkbussen liegt die Besonderheit vor, dass ein Umlauf 2028 (Umlauf 115) als nicht umstellbar bewertet wird. Dieser weist jedoch Anteile aus einem weiteren LB auf. Nach Abstimmung mit dem Auftraggeber wird angesetzt, dass ein linienbündelreiner Gelenkbusumlauf ähnliche Verbrauchswerte wie der linienbündelreine Umlauf 1140 aufweist. Entsprechend werden beide Gelenkbusumläufe ab 2028 als machbar aufgefasst, so dass das gesamte Linienbündel ab 2028 ohne Mehraufwendungen mit BEV oder FCEV dekarbonisierbar ist.

Mehraufwendung bei BEV-Vollumstellung ab 2028:

Sowohl für LB 2 und LB 4 werden keine Mehraufwendungen erwartet.

**Datensatz Rombs (zu LB 3)**

Die Verkehrsverträge von LB 3 enthalten Fahrzeuge, die in anderen Teilnetzen eingesetzt werden. Aus den Fahrzeugmengen nach Umlauflisten wurde eine Auswahl abgestimmt, die den Verkehrsverträgen entspricht.

Zeitpunkt Betriebsaufnahme nach Neuvergabe:

LB 3 – 2027

Skalierung:

Für LB 3 sind 15 Solobuseinsätze (12 m) und ein Solobuseinsatz in 15 m Ausführung erforderlich. Da alle Fahrzeugtageeinsätze dieser Fahrzeugtypen mit ab 2028 antizipierter Technik als machbar bewertet werden, wird das gesamte Linienbündel 3 ab 2028 als vollständig ohne Mehraufwendungen dekarbonisierbar bewertet. Dies gilt sowohl für BEV als auch für FCEV, wobei bei 15 m FCEV-Bussen die bekannte Einschränkung hinsichtlich des Marktangebots vorliegt.

Mehraufwendung bei BEV-Vollumstellung ab 2028:

Für LB 3 werden keine Mehraufwendungen erwartet.

**Datensatz OVF (zu LB 6)**

Die Fahrzeugmenge nach Umlauflisten ist in LB 6 geringfügig höher als die Fahrzeugmengen in den Verkehrsverträgen.

Zeitpunkt Betriebsaufnahme nach Neuvergabe:

LB 6 – 2034

Skalierung:

Nach Umlaufanalyse sind 18 von 19 Fahrzeugen ab 2033 auf BEV oder FCEV umstellbar. Es wird unterstellt, dass auch bei der reduzierten Fahrzeugzahl (18, entsprechend Verkehrsvertrag) ein

Fahrzeug nicht umstellbar bleibt. Entsprechend wird angenommen, dass 17 von 18 Solobussen direkt umstellbar sind. Die Gelenkbusanzahl nach Umlaufliste entspricht den Verkehrsverträgen (keine Skalierung erforderlich). Für Kleinbusse sind alle Einsätze ab 2033 mit BEV-Technik machbar, so dass angenommen werden kann, dass alle Kleinbusse nach Verkehrsvertrag ebenfalls ab 2033 dekarbonisierbar sind. Mit Brennstoffzellentechnik müssen die Kleinbuseinsätze hingegen vollständig als nicht umstellbar bewertet werden. Für Gelenkbusse ist keine Skalierung erforderlich.

#### Mehraufwendung bei BEV-Vollumstellung ab 2033:

Gelenk- und Kleinbusse: Keine Mehraufwendungen

Solobusse (12 m): Eine Umlaufanpassung erforderlich. Der Fahrzeugmehrbedarf<sup>4</sup> wird mit 0 bis 1 Fahrzeug abgeschätzt, wobei die Tendenz zu 0 Fahrzeugen geht. Der zusätzliche Personalaufwand nach Umlaufanpassung wird mit ca. 45 min am Wochentag abgeschätzt.

#### **Datensätze Ehard (zu LB 7 – TN 2) und 605/607 (zu LB 7 – TN 1)**

Linienbündel 7 werden zwei Umlaufdatensätze zugeordnet. Einerseits der Datensatz des heutigen Betreibers Ehard und andererseits der unter „605/607“ geführte Umlaufdatensatz. Laut Umlaufdaten ergibt sich eine Einsatzflotte von 11 Solobussen (12 m), 4 Solobussen (15 m) und einem Kleinbus. Nach Verkehrsvertrag sind jedoch nur 10 Solobusse (12 m), 3 Solobusse (15 m) und ein Kleinbus erforderlich.

#### Zeitpunkt Betriebsaufnahme nach Neuvergabe:

LB 7 – 2035

#### Skalierung:

Nach Umlaufanalyse sind 10 von 11 Solobussen (12 m) ab 2033 auf BEV oder FCEV umstellbar. Es wird unterstellt, dass auch bei der reduzierten Fahrzeugzahl (10, entsprechend Verkehrsvertrag) ein Fahrzeug nicht umstellbar bleibt. Entsprechend wird angenommen, dass 9 von 10 Solobussen direkt umstellbar sind. Für Solobusse mit 15 m Länge sind alle Einsätze als machbar bewertet, so dass alle drei 15 m Solobusse nach Verkehrsvertrag ebenfalls als machbar bewertet werden. Für den einzelnen Kleinbus ist keine Skalierung erforderlich.

#### Mehraufwendung bei BEV-Vollumstellung ab 2033:

Solobus (15 m) und Kleinbusse: Keine Mehraufwendungen

Solobusse (12 m): Eine Umlaufanpassung erforderlich. Der Fahrzeugmehrbedarf wird mit 0 bis 1 Fahrzeug abgeschätzt, wobei die Tendenz zu 0 Fahrzeugen geht. Der zusätzliche Personalaufwand nach Umlaufanpassung wird mit ca. 45 min am Wochentag abgeschätzt.

---

<sup>4</sup> Mehraufwendungen durch Umlaufanpassung werden hier erfahrungsbasiert abgeschätzt. Belastbare Aussagen können jedoch erst nach Durchführung einer Umlaufanpassung getroffen werden, weshalb hier und im Folgenden teilweise Wertebereiche für Mehraufwendungen angegeben werden. Vielfach kann dabei eine Tendenz ergänzend angegeben werden. Für den Personalaufwand wird angenommen, dass die Fahrzeugablösung 45 Minuten Zusatzaufwand bedeutet (2 Transferstrecken mit 15 Min Dauer zzgl. 15 Min Wartezeit am Ablösepunkt).

## 2.5 Technologieempfehlung

Maßgeblich für die Empfehlung einer Vorzugstechnologie aus technischer Perspektive sind zwei Kriterien: Machbarkeit und Marktangebot. Sofern mehrere Alternativen verfügbar sind, die beide Kriterien erfüllen, sind final kommerzielle Aspekte ausschlaggebend. Diese werden im Verlauf der Untersuchung in die Bewertung aufgenommen.

An dieser Stelle steht zunächst die technische Perspektive im Vordergrund. Ergänzend zu den bisher im Fokus stehenden Technologiealternativen Batteriebus und Brennstoffzellenbus, besteht grundsätzlich die Möglichkeit sogenannte Fahrzeuge mit Brennstoffzellen-Range-Extender einzusetzen.

### *Erläuterung*

Fahrzeuge mit Brennstoffzellen-Range-Extender verfügen neben einer groß dimensionierten Traktionsbatterie über ein Brennstoffzellensystem, das bei Bedarf aktiviert werden kann. Die Traktionsbatterie ist kleiner dimensioniert als bei rein batterieelektrisch angetriebenen Fahrzeugen (Größenordnung 50-75 % ggü. Batterieantrieb). Nach Entladung der Fahrzeugbatterie wird das Brennstoffzellensystem aktiviert, wobei aus dem mitgeführten Wasserstoff elektrische Energie für den Antriebsstrang erzeugt wird. Über die Kombination beider Antriebsarten können deutlich höhere Reichweiten erzielt werden, wofür jedoch sowohl elektrische Lade- als auch Wasserstoff-Tankinfrastruktur erforderlich ist.

Brennstoffzellen-Range-Extender (BZ-REX) werden für dieselben Fahrzeugtypen angeboten, die auch mit üblicher FCEV-Technik verfügbar sind. Insgesamt ist das Marktangebot hier jedoch noch geringer als für FCEV-Fahrzeuge. Mit BZ-REX können die Marktlücken der FCEV-Technik nicht geschlossen werden. Gleichzeitig sind die Ergebnisse der Umlaufuntersuchung für FCEV (und BEV) sehr positiv, so dass die Zusatzreichweiten des BZ-REX nicht erforderlich sind.

Insgesamt kann der Aspekt Machbarkeit für alle Technologiealternativen als positiv bewertet werden. Sowohl Brennstoffzellen- als auch Batterieantriebe weisen hier einen sehr großen Anteil ‚machbarer‘ Einsätze auf. Sondermaßnahmen zur Verbesserung der Ergebnisse (i.d.R. Umlaufanpassungen) sind nur in Sonderfällen erforderlich, wenn beispielsweise ein gesamtes Linienbündel frühzeitig vollständig dekarbonisiert werden soll. Selbst in diesen Fällen beschränkt sich der Anpassungsbedarf auf eine vergleichsweise kleine Menge Fahrzeugeinsätze, so dass von überschaubaren Zusatzaufwendungen ausgegangen werden kann.

Zur Einordnung der Antriebsalternativen sollten die technologiebedingten Wirkungsgrade berücksichtigt werden. Gegenüber dem batterieelektrischen Antriebsstrang muss im Brennstoffzellenprozess Wasserstoff zunächst erzeugt (Elektrolyseur) und anschließend im Fahrzeug wieder zurückgewandelt werden (Brennstoffzelle). Beide Wandlungsprozesse sind stark verlustbehaftet, was sich deutlich auf den Gesamtwirkungsgrad auswirkt.

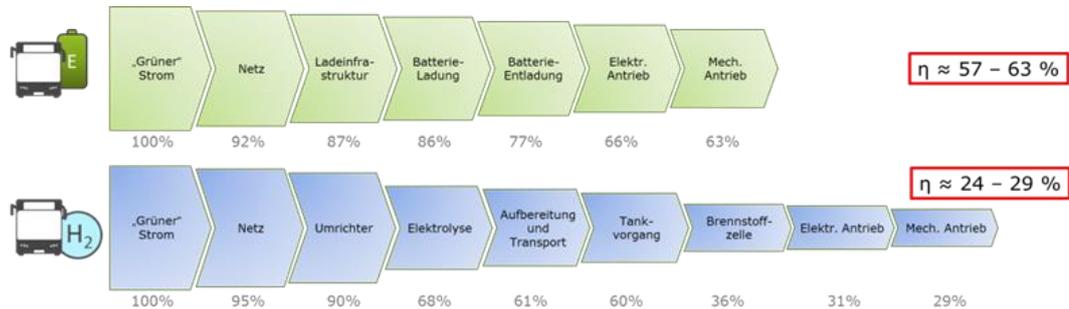


Abb. 12: Wirkungsgrade BEV und FCEV

Im batterieelektrischen System liegt der Gesamtwirkungsgrad bei ca. 60 %, während im Brennstoffzellensystem der Wert bei unter 30 % liegt. Für den emissionsfreien Einsatz müssen beide Antriebsalternativen mit „grünem Strom“ versorgt werden. Aufgrund der höheren Verluste sind brennstoffzellenseitig deutlich höhere Energiemengen („grüner Strom“) erforderlich.

Zusammengefasst ergeben sich die folgenden Pro- und Contra-Argumente für die verfügbaren Technologiealternativen.

	PRO	CONTRA
Batteriebus (BEV)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maximal effizienter Antriebsstrang</li> <li>- Nur elektrische Ladeinfrastruktur erforderlich</li> <li>- Gutes Marktangebot</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aktuell Reichweitennachteile ggü. FCEV (kann betriebliche Anpassungen erfordern wie Umlaufanpassung)</li> </ul>
Brennstoffzellenbus (FCEV)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Heute längere Reichweiten als BEV</li> <li>- Nur H<sub>2</sub> Tanksystem erforderlich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geringerer Wirkungsgrad ggü. BEV</li> <li>- Ggü. BEV höhere Anschaffungskosten für Fahrzeuge und Infrastruktur</li> <li>- Marktangebot beschränkt auf 12 m Solo- und 18 m Gelenkbusse</li> </ul>
Brennstoffzellen-Range-Extender (BZ-REX)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Primäre Nutzung elektrischer Antriebsstrang mit hohem Wirkungsgrad</li> <li>- Sehr lange Reichweiten möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schlechter Wirkungsgrad bei Zuschalten BZ-System</li> <li>- Erfordert sowohl elektrisches Ladesystem als auch H<sub>2</sub> Tanksystem</li> <li>- Ggü. BEV höhere Anschaffungskosten für Fahrzeuge und Infrastruktur</li> <li>- Marktangebot beschränkt auf 12 m Solo- und 18 m Gelenkbusse</li> </ul>

Tab. 14: Pro- und Contra Argumente für Antriebsalternativen

## 2.5.1 Umstellungspotenzial pro Linienbündel bei Neuvergabe

Um die Aussagen in diesem Kapitel zu konkretisieren, wird hier der Zeitpunkt der Neuvergabe (nach Skalierung der Ergebnisse) in Fokus gesetzt. Abhängig vom Umstellungszeitpunkt können abweichende Technikintervalle der Entwicklungsprognose zum Tragen kommen. Für die Linienbündel 6 und 7 (Neuvergabe erst nach 2033) kann beispielsweise eine größere marktverfügbare Batteriekapazität unterstellt werden, als für Vergaben vor 2030.

Da aktuell kein Marktangebot für 15 m FCEV-Busse absehbar ist, wird dieser Fahrzeugtyp analog zu den Kleinbussen hier auch als nicht umstellbar klassifiziert. Die Auswirkung eines Markteintritts im entsprechenden Segment wird jedoch ergänzend erläutert.

Die Umstellungspotenziale zum Zeitpunkt der Neuvergabe sind hier folgend tabellarisch dargestellt. Neben den Techniken BEV und FCEV sind hier auch Fahrzeugmengen im Dieselmotorbetrieb aufgeführt. Die Zahlen können als Referenz- oder Idealwert betrachtet werden, da alle Einsätze im Dieselmotorbetrieb per Definition machbar sind. Der angegebene Mehraufwand bei Vollumstellung ist angegeben, wenn die Vollumstellung mit dem gegebenen Marktangebot möglich ist und bezieht sich auf den Zeitpunkt der Neuvergabe mit entsprechenden technischen Parametern.

LB	Antrieb	Anzahl umstellbarer Busse bei Neuvergabe pro Typ						Mehraufwand bei Vollumstellung			
		Solo 12		Solo 15		Gelenk	Klein		Summe		
2	Diesel	3	--				1	--	4	--	--
	BEV	3	100%				1	100%	4	100%	Kein Mehraufwand. LB ist voll umstellbar
	FCEV	3	100%				0	0%	3	75%	Bewertung nicht möglich (Marktangebot)

Tab. 15: Umstellungspotenzial bei Neuvergabe LB 2 (2030)

LB	Antrieb	Anzahl umstellbarer Busse bei Neuvergabe pro Typ						Mehraufwand bei Vollumstellung			
		Solo 12		Solo 15		Gelenk	Klein		Summe		
3	Diesel	15	--	1	--				16	--	--
	BEV	15	100%	1	100%				16	100%	Kein Mehraufwand. LB ist voll umstellbar
	FCEV	15	100%	0	0%				15	94%	Bewertung nicht möglich (Marktangebot)

Tab. 16: Umstellungspotenzial bei Neuvergabe LB 3 (2027)

LB	Antrieb	Anzahl umstellbarer Busse bei Neuvergabe pro Typ					Mehraufwand bei Vollumstellung
		Solo 12	Solo 15	Gelenk	Klein	Summe	
4	Diesel	14 --		2 --		16 --	--
	BEV	14 100%		2 100%		16 100%	Kein Mehraufwand. LB ist voll umstellbar
	FCEV	14 100%		2 100%		16 100%	Kein Mehraufwand. LB ist voll umstellbar

Tab. 17: Umstellungspotenzial bei Neuvergabe LB 4 (2029)

LB	Antrieb	Anzahl umstellbarer Busse bei Neuvergabe pro Typ					Mehraufwand bei Vollumstellung
		Solo 12	Solo 15	Gelenk	Klein	Summe	
6	Diesel	18 --		4 --	2 --	24 --	--
	BEV	17 94%		4 100%	2 100%	23 96%	1 x Umlauf-Anpassung (s.u.)
	FCEV	17 94%		4 100%	0 0%	21 88%	Bewertung nicht möglich (Marktangebot)

Tab. 18: Umstellungspotenzial bei Neuvergabe LB 6 (2034)

In Linienbündel 6 muss bei Vollumstellung ein Solobusumlauf angepasst werden (gilt hier für BEV und FCEV). Es wird abgeschätzt, dass die Umlaufanpassung ohne Fahrzeugmehrbedarf erfolgen kann. Ein Fahrzeugmehrbedarf von +1 Solobus kann jedoch weder für BEV noch FCEV gänzlich ausgeschlossen werden. Der Personalaufwand pro Ablösefahrt wird mit 45 Min pauschal abgeschätzt.

LB	Antrieb	Anzahl umstellbarer Busse bei Neuvergabe pro Typ					Mehraufwand bei Vollumstellung				
		Solo 12		Solo 15		Gelenk		Klein	Summe		
7	Diesel	10		3			1	14	--		
	BEV	9	90%	3	100%		1	100%	14	100%	1 x Umlauf-Anpassung (s.u.)
	FCEV	9	90%	0	0%		0	0%	10	71%	Bewertung nicht möglich (Marktangebot)

Tab. 19: Umstellungspotenzial bei Neuvergabe LB 7 (2035)

In Linienbündel 7 muss bei Vollumstellung ein Solobusumlauf angepasst werden (gilt hier für BEV und FCEV). Es wird abgeschätzt, dass die Umlaufanpassung ohne Fahrzeugmehrbedarf erfolgen kann. Ein Fahrzeugmehrbedarf von +1 Solobus kann jedoch weder für BEV noch FCEV gänzlich ausgeschlossen werden. Der Personalaufwand pro Ablösefahrt wird mit 45 Min pauschal abgeschätzt.

Wie aus den tabellarischen Übersichten bereits ersichtlich wird, sind mehrere Linienbündel mit BEV-Technik für die Vollumstellung ohne Mehraufwand geeignet. Für die weiteren Linienbündel sind Umlaufanpassungen erforderlich, die aufgrund der zusätzlichen Transferwege Personalmehraufwendungen auslösen. Auch wenn hier ein Fahrzeugmehrbedarf durch die Umlaufanpassungen nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann, wird es als sehr wahrscheinlich angenommen, dass kein Fahrzeugmehrbedarf nach Umlaufanpassung anfällt.

In der folgenden Abbildung sind pro Linienbündel die umstellbaren und (ohne Zusatzmaßnahmen) nicht umstellbaren Fahrzeugmengen aufgeführt. Dabei wird besonders deutlich, dass LB 2, LB 4 und LB 6 zum Zeitpunkt der Neuvergabe als vollständig umstellbar eingeschätzt werden, wenn auf BEV-Technik zurückgegriffen wird.

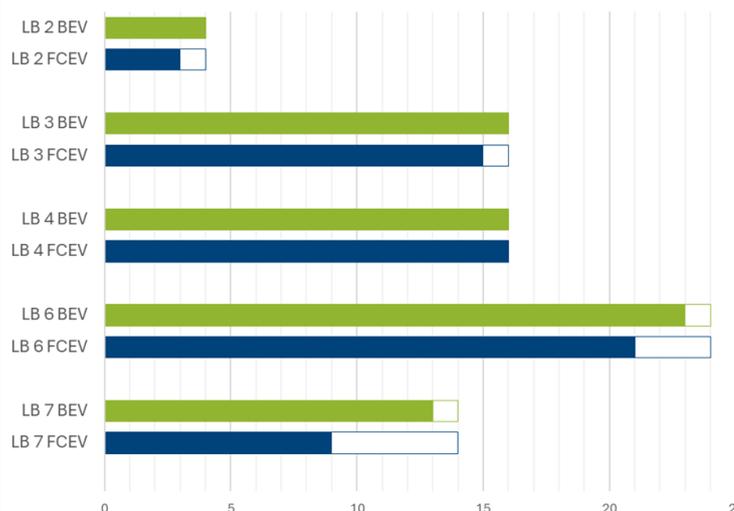


Abb. 13: Übersicht umstellbare Fahrzeugmengen bei Neuvergabe (BEV & FCEV)

Aus der Abbildung wird ebenfalls ersichtlich, dass die Einschätzung für FCEV restriktiver ausfällt. Dies geht weitestgehend auf das für einzelne Fahrzeugtypen mangelnde Fahrzeugangebot zurück. Dennoch ist auch die FCEV-Technik für die Dekarbonisierung der betrachteten Linienbündel auf

technischer Ebene gut geeignet. Für beide Technikalternativen sind die Quotenvorgaben aus der CVD beziehungsweise dem SaubFahrzeugBeschG problemlos erfüllbar.

Das mangelnde Fahrzeugangebot ist die hauptsächliche Ursache für die negative Bewertung einzelner FCEV-Einsätze. Bei Kleinbussen wird es insgesamt als sehr kritisch eingeschätzt, dass ein entsprechendes Marktangebot in absehbarer Zeit vorliegen wird. Da hier auf Brennstoffzellensysteme aus dem Pkw-Sektor zurückgegriffen werden muss, ist es einerseits fraglich, ob passende Basismodelle (Kastenwagen) mit H<sub>2</sub>-Technik überhaupt am Markt platziert werden und andererseits, ob diese Modelle von entsprechenden Anbietern zur Personenbeförderung umgebaut werden. Entsprechend sollte diese Teilflotte in jedem Fall als nicht machbar betrachtet werden. Bei 15 m Solobussen ist ein Marktangebot zumindest denkbar, da die im 12 m Bus eingesetzte Technik auch in einer größeren Fahrzeugvariante verbaut werden kann. Sofern ein Marktangebot eintritt, verschiebt sich die Menge machbarer Fahrzeuge im überschaubaren Umfang. Alle Fahrzeugmengen beziehen sich auf eine Umstellung ohne Sondermaßnahmen wie Umlaufanpassungen.

- BEV: 72 von 74 Bussen umstellbar (≈ 97%)
- FCEV ohne Solobus (15m) am Markt: 64 von 74 Bussen umstellbar (≈ 86%)
- FCEV mit Solobus (15m) am Markt: 68 von 74 Bussen umstellbar (≈ 92%)

In jedem möglichen Fall sind die Abweichungen zwischen den Technologien sehr gering.

Theoretisch bleiben auch Brennstoffzellen-Range-Extender eine Umstellungsoption. Die gegenüber FCEV weiter gesteigerte Reichweite hat jedoch nur marginale Auswirkung auf die Gesamtbewertung. Lediglich zwei Fahrzeugeinsätze (beides Solobusse 12 m in verschiedenen Linienbündeln) mit FCEV-Technik sind nicht ohne Umlaufanpassung umstellbar. Hier ist anzunehmen, dass Brennstoffzellen-Range-Extender die Einsätze auch ohne Umlaufanpassung absolvieren können. Da anzunehmen ist, dass die erforderlichen Umlaufanpassungen ohne Fahrzeugmehrbedarf realisierbar sind, schließt die für Brennstoffzellen-Range-Extender erforderliche doppelte Infrastruktur<sup>5</sup> den Ansatz praktisch aus. Da die anzupassenden Umläufe zwei verschiedenen Linienbündeln zugeordnet sind, müsste die doppelte Infrastruktur sogar an zwei Standorten vorgesehen werden. Da Brennstoffzellen-Range-Extender dieselben Marktlücken aufweisen wie Brennstoffzellenbusse, stellt dieser Ansatz hier ebenfalls keine Verbesserungsoption dar und wird von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

---

<sup>5</sup> Brennstoffzellen-Range-Extender erfordern sowohl elektrische Ladeinfrastruktur als auch H<sub>2</sub>-Tankinfrastruktur

## 2.5.2 Abschließende technische Technologieempfehlung

Beide Technologiealternativen, Batteriebusse und Brennstoffzellenbusse, sind für die Erfüllung der CVD-Quotenvorgaben sehr gut geeignet. Auf einer technischen Ebene sind die Antriebstechniken damit gleichwertig. Brennstoffzellen-Range-Extender können nicht empfohlen werden, da die erforderliche doppelte Tank- und Ladeinfrastruktur in keinem Verhältnis zu den erzielbaren Mehrwerten stehen. Inwiefern BEV oder FCEV die Ideallösung für den Landkreis darstellen, geht letztlich auf die folgende kommerzielle Bewertung zurück.

Batteriebusse erhalten hier dennoch den Status als Vorzugstechnologie, was letztlich auf zwei Gründe zurückgeht. Einerseits ist das Marktangebot deutlich breiter und deckt alle Fahrzeugtypen ab. Im Beschaffungsprozess kann auf eine deutlich breitere Modellvielfalt zurückgegriffen werden. Außerdem ist sichergestellt, dass alle Fahrzeugtypen mit Batterietechnik am Markt platziert sind. Perspektivisch kann also der gesamte Landkreis mit ein und derselben Antriebstechnologie dekarbonisiert werden. Andererseits ist elektrische Ladeinfrastruktur aufgrund der flexiblen Aufbauweise besser für die Integration in bestehende Liegenschaften und ein Mitwachsen im Zuge der Flottenumstellung bzw. des Flottenausbaus geeignet.

Auch wenn der Aspekt keinen Einfluss auf die technische Bewertung hat, kann hier als ‚Pluspunkt‘ vermerkt werden, dass drei Linienbündel für eine Vollumstellung auf BEV ohne jegliche Anpassungsmaßnahmen geeignet sind. Beim Einsatz von FCEV ist lediglich ein Linienbündel für die Vollumstellung geeignet.

In Summe kann festgehalten werden, dass die Argumente für BEV als Vorzugstechnologie nur das Ranking der Technologien beeinflussen. FCEV stehen zwar „nur“ auf dem zweiten Platz, sind aber dennoch technisch sehr gut als Technologiealternative geeignet. Die technische Gleichwertigkeit kann hierbei als Vorteil aufgefasst werden. Sollte es im Zuge einer Detailplanung ersichtlich werden, dass unüberwindbare Infrastrukturherausforderungen vorliegen (z.B. Netzanschluss für Ladesysteme oder Platzbedarf für Tankanlagen), kann auf eine Alternative zurückgegriffen werden.

### 3 AP 3: Infrastruktur

Das Kapitel Infrastruktur nach Vorgabe des AG wird ohne Bezug auf konkrete Liegenschaften bearbeitet. Da die Gestaltungsoptionen für elektrische Ladeinfrastrukturen deutlich größer sind und BEV als Technologieempfehlung angesetzt sind, stehen diese im Fokus des Kapitels. H<sub>2</sub>-Tankanlagen sind hier im Sinne eines Exkurses am Ende des Kapitels behandelt.

Die Bearbeitung basiert auf den beigestellten Umlauflisten, da diese die Energiemengen pro Umlauf vorgeben, was als Eingangsgröße für die Infrastrukturauslegung zwingend erforderlich ist. Aufgrund der Diskrepanz zwischen Umlaufdaten und Fahrzeugmengen nach Verkehrsverträgen ist hier nicht sichergestellt, dass die zugrunde gelegten Fahrzeugzahlen den Vertragsdaten entsprechen.

#### 3.1 Methodik

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 Energieversorgers 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.

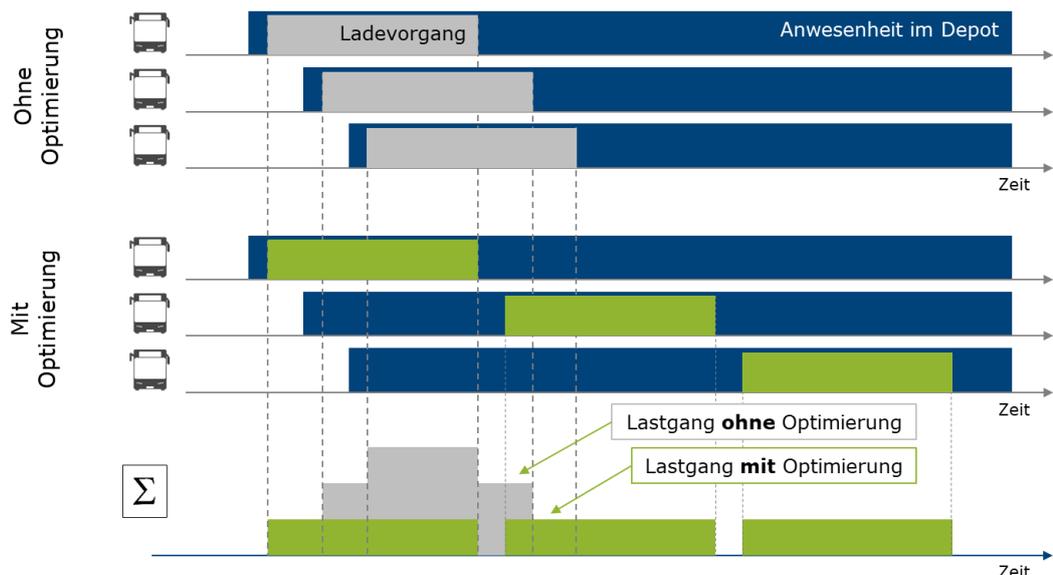


Abb. 14: Prinzip Lastgangoptimierung

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

Aufgrund der Empfehlung für den Einsatz von BEV zur Dekarbonisierung der Linienbündel wird unter Infrastrukturanforderungen elektrische Ladeinfrastruktur thematisiert. Dabei wird einleitend eine Lastgangoptimierung ausgeführt, um einen realistischen Lastverlauf als Auslegungsgrundlage heranzuziehen. Die Lastgangoptimierung bildet dabei das Systemverhalten eines Lademanagementsystems ab, bei dem die einzelnen Ladevorgänge zeitlich gegeneinander verschoben werden, dass die Anforderungen an das Energienetz (Lastspitze) möglichst gering ausfallen.

## 3.2 Lastgangoptimierung

Die Ausführung der Lastgangoptimierung ist unter Methodik beschrieben. Für die Lastgangoptimierung wird ein Betriebstagswechsel ‚Wochentag auf Wochentag‘ angesetzt. Dafür wird angenommen, dass der betrachtete Betriebstag für die Machbarkeitsuntersuchung in derselben Form am Folgetag wiederholt wird. Da die Betriebstage als charakteristisch für einen Wochentag Schule ausgewählt wurden, entspricht dies den Anforderungen eines typischen Wochentags. Unterstellt wird für die Lastgangoptimierung eine vollständig elektrifizierte Flotte.

Damit wird die maximale Fahrleistung und folglich der maximale Energie- beziehungsweise hier Nachladebedarf als Vorgabe definiert. Gleichzeitig werden frühe Abfahrtszeiten eines Wochentages angesetzt, weshalb die Ladungen früh beendet sein müssen.

### *Wichtiger Hinweis*

Das Infrastrukturkonzept ist wie die Lastganganalyse langfristig ausgelegt. Zielgröße ist eine vollständig elektrifizierte Flotte, um einen langfristigen Planungshorizont zugrunde zu legen. Bei bekannter Zielgröße können Zwischenschritte im Sinne von Teilausbaustufen abgeleitet werden. Für die Auslegung wird weitestgehend eine unendliche Batteriegröße unterstellt. Aus Sicht des Ladesystems entspricht dies dem ungünstigsten Fall, bei dem die größte anzunehmende Energiemenge über Nacht nachgeladen wird. In der Praxis ist anzunehmen, dass Teile der Umläufe angepasst werden müssen, wodurch sich ein Teil des Ladebedarf in den Tag verlagert.

Für die Lastganganalyse müssen Umlaufdaten ausgewertet werden. Entsprechend wird hier, analog zu den Analysen in Kapiteln 2.2 und 2.3, auf die Datensätze vor Skalierung entsprechend der Verkehrsverträge zurückgegriffen und die dazugehörige Bezeichnung der Datensätze verwendet.

Aus Übersichtsgründen wird hier die Lastgangoptimierung für das Fokusthema LB 4 im Detail dargestellt. Da die Lastgangoptimierung und Infrastrukturen standortspezifisch sind, wird „Standort Röhler“ als Ausgangspunkt der beigestellten Umläufe zu LB 2, LB 4 und weiteren Linienbündeln kombiniert behandelt. Alle weiteren Lastganggraphen sind im Anhang aufgeführt.

### 3.2.1 Lastgangoptimierung – Fokusthema LB 4

Zunächst steht der Lastgang im nicht optimierten Zustand im Fokus. Der Begriff Lastgang bezeichnet dabei den Zeitverlauf der Netzlast. Die angegebenen Fahrzeugzahlen beziehen sich hier nur auf die Einsatzflotte. Da Reservebusse ersatzweise für Fahrzeuge aus der Einsatzflotte eingesetzt werden, hat dies keinen Einfluss auf den Lastgang.

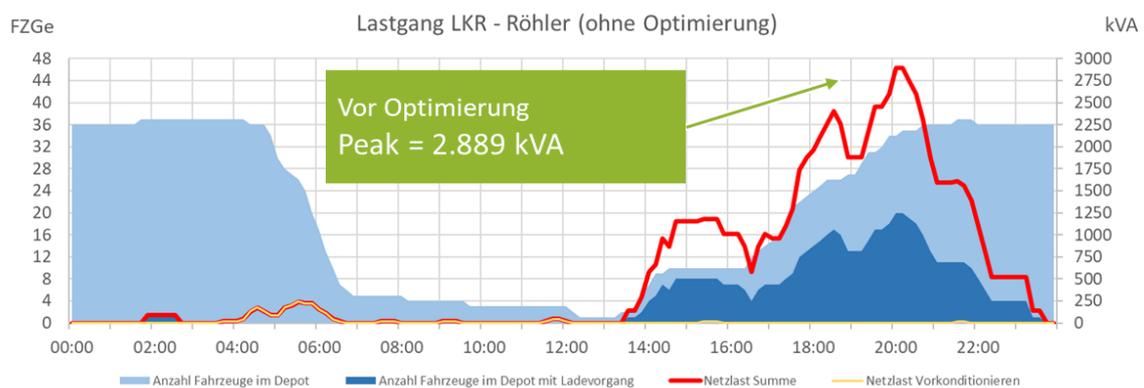


Abb. 15: Lastgang ohne Optimierung Standort Röhler, Datensatz Röhler (zu LB 2 und LB 4)

In der Darstellung zeigt sich ein sehr typischer Lastverlauf für ein nicht optimiertes Ladesystem. In der zweiten Nachthälfte bis in den frühen Nachmittag liegen keine Energiebezüge vor. Die Lastkurve wird hier lediglich von den Vorkonditionierungsvorgängen<sup>6</sup> beeinflusst.

Etwa zwischen 14 und 17 Uhr entsteht eine erste Lastspitze, die von früh einrückenden Fahrzeugen ausgelöst wird. Mittagsspitzen können dabei auch durch Fahrzeuge entstehen, die nach einem Depotaufenthalt einen Folgeumlauf bedienen.

Auffallend ist, dass der Lastverlauf bereits vor Mitternacht wieder auf Null zurückgeht, obwohl die Fahrzeuge bis ca. 6 Uhr morgens im Depot verbleiben. Da alle Ladevorgänge unmittelbar nach Ankunft begonnen werden, kumulieren sich die Leistungswerte zu einem ausgeprägten Lastpeak um ca. 20 Uhr bei ca. 2.890 kVA. Die Fahrzeugbatterien sind entsprechend frühzeitig vollgeladen, so dass kein Leistungsbedarf in der zweiten Nachthälfte vorliegt.

Ziel der Lastgangoptimierung ist es, die Aufenthaltsdauern möglichst effizient für die Fahrzeugladung zu nutzen. Dies wird erreicht, indem die Startzeitpunkte der Ladevorgänge nicht unmittelbar nach Ankunft erfolgen, sondern im Sinne eines Ladeplans strategisch verteilt werden.

<sup>6</sup> Elektrisches Vorheizen der Fahrzeuge über die Ladeinfrastruktur (30 Minuten vor Betriebsbeginn)

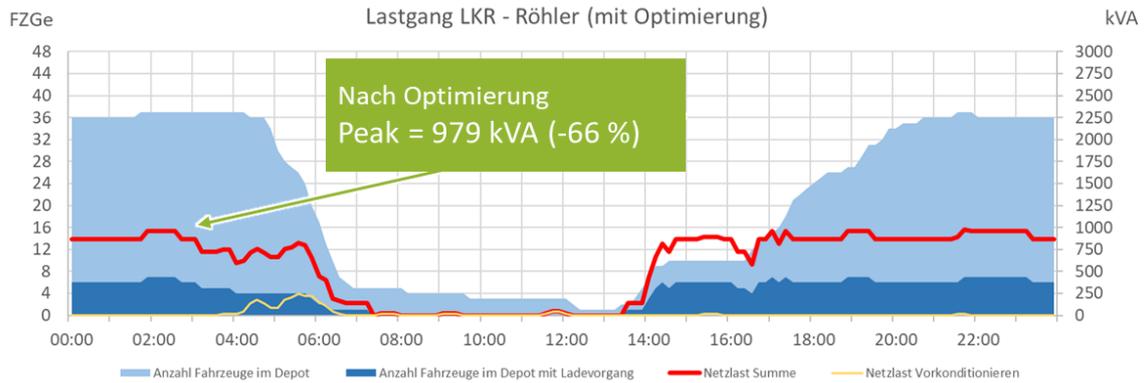


Abb. 16: Lastgang mit Optimierung Standort Röhler, Datensatz Röhler (LB 2 und LB 4)

Im direkten Vergleich werden die Auswirkungen der Optimierung besonders deutlich. Über weite Zeiträume liegt eine konstante Leistungsanforderung an, die unter 1.000 kVA rangiert.

Die Lastspitze konnte im Beispiel um ca. 66 % reduziert werden. Üblicherweise werden für mittlere und größere Depots zwischen Reduktionen zwischen 40 und 60 % erreicht.

Die Reduktion der Lastspitze kann sich tariflich niederschlagen, da vielfach der Strompreis an der maximalen Lastspitze bemessen wird. Ebenso entscheidend ist hier die Auslegung der Netzanbindungskomponenten, die ebenfalls am höchsten Lastwert ausgerichtet werden. Vielfach kann nach Optimierung ein kostenintensiver Netzausbau vermieden oder zumindest deutlich verkleinert werden. Selbst bei sehr großzügigen Netzkapazitäten bedeuten reduzierte Lastspitzen Kosteneinsparpotenziale, indem Transformatoren und andere Komponenten deutlich kleiner dimensioniert werden können.

### 3.2.2 Lastgangoptimierung – weitere Linienbündel

Die Lastgangverläufe (Graphen) aller Standorte sind im Anhang aufgeführt (Vgl. Kapitel 9 *Anhang: Lastgangoptimierungen (Graphen)* ab Seite 128). Aus Übersichtsgründen erfolgt hier eine tabellarische Übersicht.

Depot	Lastspitzen		
	Vor Optimierung	Nach Optimierung	Änderung prozentual
<b>Standort Röhler</b> <i>aus Datensatz Röhler zu LB 2 und LB 4</i>	2.889 kVA	979 kVA	-66 %
<b>Standort Rombs Thalmässing</b> <i>aus Datensatz Rombs (zu LB 3)</i>	1.300 kVA	578 kVA	-56 %
<b>Standort Rombs ELKO</b> <i>aus Datensatz Rombs (zu LB 3)</i>	722 kVA	289 kVA	-60 %
<b>Standort Rombs Weißenburg</b> <i>aus Datensatz Rombs (zu LB 3)</i>	144 kVA	144 kVA	-0 %
<b>Standort OVF</b> <i>aus Datensatz OVF (zu LB 6)</i>	1.246 kVA	722 kVA	-42 %
<b>Standort Ehard</b> <i>aus Datensatz Ehard (zu LB 7 – TN 2)</i>	722 kVA	211 kVA	-71 %
<b>Kein Standort</b> <i>aus Datensatz 605/607 (zu LB 7 – TN 2)</i>	578 kVA	311 kVA	-46 %

*Tab. 20: Ergebnisübersicht Lastgangoptimierung alle Standorte und Linienbündel*

In Summe zeigen sich auch an allen anderen Standorten, dass der Einsatz eines Lademanagementsystems sinnvoll erscheint. Lediglich am Standort Rombs-Weißenburg kann kein Optimierungspotenzial ausgenutzt werden. In diesem Sonderfall geht das darauf zurück, dass am Standort nur ein einziger Ladevorgang in die Bilanz eingeht.

Für Datensatz 605/607 (zu LB 7 – TN 1) gibt es aktuell keinen Standort, da es sich um eine Neuplanung handelt.

### 3.3 Technische Gestaltung der Ladeinfrastruktur

Ladeinfrastrukturen für batterieelektrische Busse sind elektronische Baugruppen, die die notwendige Ladeenergie bereitstellen. Batterieelektrische Busse werden, anders als batterieelektrische Pkw, grundsätzlich über Gleichströme geladen, was auf die Traktionsbatterie (Gleichspannung) zurückgeht, die entsprechend geladen werden muss. Bei Wechselstromladung von Fahrzeugen ist ein sogenanntes On-Board-Ladegerät (AC/DC Wandler) im Fahrzeug verbaut, was im Bussektor aufgrund der zugehörigen Größen und Gewichte nicht verfolgt wird. Die Gleichrichtung erfolgt hier zwingend im Ladegerät.

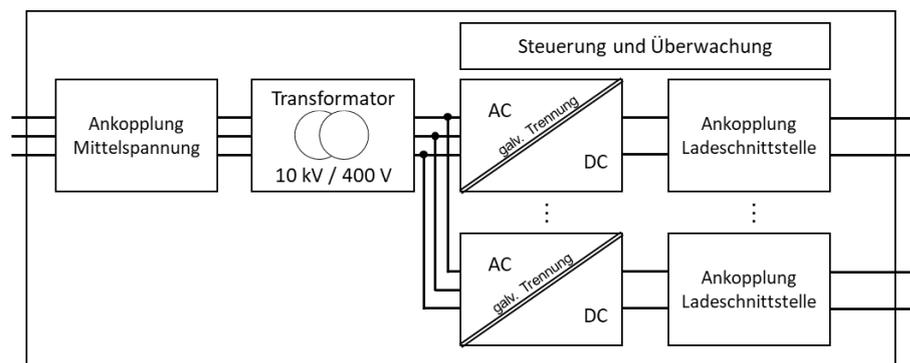


Abb. 17: Schematische Darstellung Hauptkomponenten Ladesystem

Die Gleichrichtung erfolgt aktiv, also derart, dass der Ausgangsstrom auf einen angestrebten Wert geregelt wird. Der Sollwert für den Ladestrom wird vom Batteriemanagementsystems des Fahrzeugs an das Ladegerät übermittelt. Ladesysteme stehen über Kommunikationsschnittstellen sowohl in Verbindung mit dem Fahrzeug als auch mit nachgeschalteten Systemen auf Betriebshofseite. Die fahrzeugseitige Kommunikation wird schnittstellenunabhängig entsprechend des CCS-Standards umgesetzt, so dass die Ladeschnittstelle selbst grundsätzlich austauschbar ist. Betriebshofseitig liegen Quasistandards, wie das Protokoll OCPP vor, um die Anbindung sicherzustellen.

Abhängig von der Anzahl der Ladegeräte liegen unterschiedliche Anforderungen an die Netzanbindung vor. Wie im Schaubild ersichtlich ist, wird der AC/DC Wandler über eine dreiphasige 400 V Spannung (Niederspannung) versorgt, die in allen Liegenschaften verfügbar ist (normales Hausnetz). Sehr geringe Anzahlen von Ladestationen können teilweise ohne weitere Anpassungen an das vorhandene 400 V Netz angebunden werden. Aufgrund der hohen Leistungsaufnahme von Ladesystemen für Busse ist das lokale Niederspannungsnetz jedoch schnell überlastet. Als Faustformel kann man davon ausgehen, dass ab etwa drei Ladestationen eine separate Spannungsversorgung aus dem Mittelspannungsnetz (10/20 kV) erforderlich ist. Die Netzanbindung erfolgt dann über einen entsprechenden Netztransformator. Für sehr große Mengen an Ladestationen (Richtwert über 100 Ladestationen) kann angenommen werden, dass der Anschluss an das Hochspannungsnetz (110 kV) erfolgt, um das Mittelspannungsnetz nicht zu überlasten.

Im Fokus der Untersuchung stehen hier die verschiedenen Gestaltungsmöglichkeiten zwischen Mittelspannungsanschluss und Ladeschnittstelle.

Im Wesentlichen unterscheiden sich Ladesysteme für Batteriebusse hinsichtlich

- Aufbauprinzip
- Modularität
- Kooperationsfähigkeit
- Schnittstellenausführung
- Abstellkonzept
- Lademanagementsysteme

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

### 3.3.1 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-Schnellladesäule, 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.

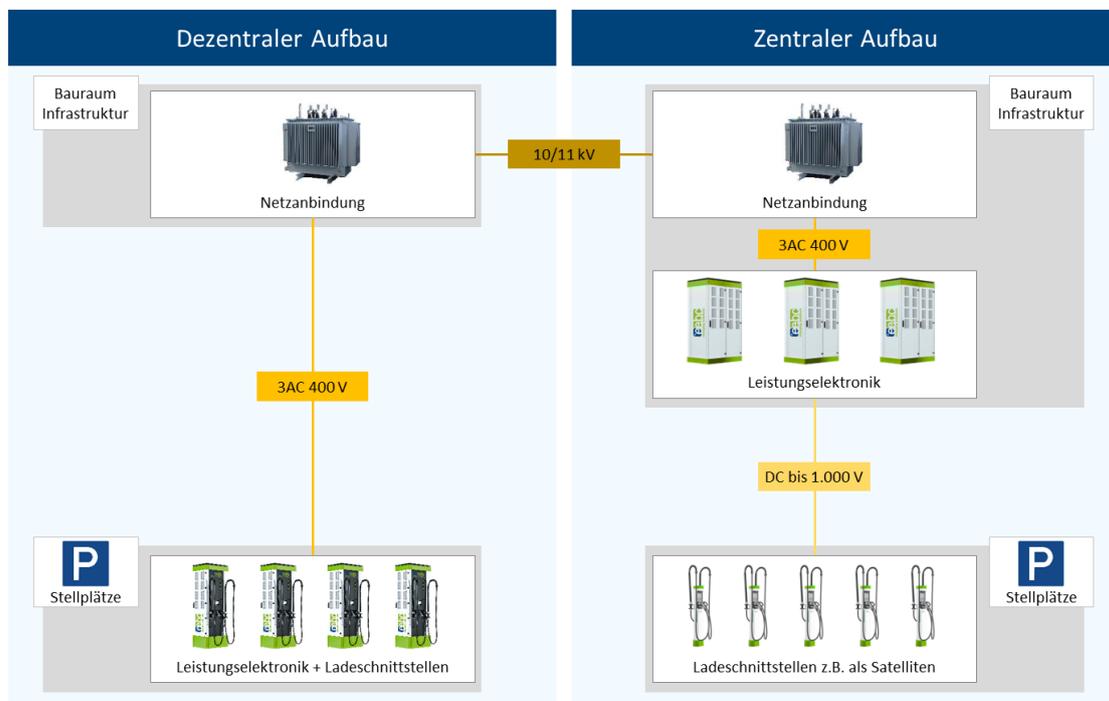


Abb. 18: Dezentraler und zentraler Aufbau von Ladeinfrastrukturen

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 Schnittstellen Ausführungen zur Verfügung, um beispielsweise den Platzbedarf weiter zu reduzieren (Vgl. 3.3.5 *Schnittstellenausführung*).

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

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

Der Hauptvorteil von dezentralen Ladesystemen geht auf die vollintegrierte Struktur zurück. Bei kleinen Systemen kann der Bauaufwand für die Installation sehr überschaubar ausfallen, sofern ein 400 V Netz mit ausreichenden Kapazitäten erreichbar ist. Der Ansatz eignet sich auch sehr gut für temporäre eingesetzte Systeme. Nach Außerbetriebsetzung kann die gesamte Systemeinheit vom Versorgungsnetz getrennt und verkrant werden, um an anderer Stelle weiter verwendet zu werden. Die besonderen Eigenschaften beider Ansätze sind hier wie folgt zusammengefasst und nach einem Ampelfarbensystem von vorteilhaft über neutral bis nachteilig bewertet.

	<i>Dezentraler Aufbau</i>	<i>Zentraler Aufbau</i>
Verluste / Effizienz	Höhere Verluste aufgrund langer AC-Strecken	Geringere Verluste, wenn der Trafo nahe der Elektronik platziert wird
Platzbedarf	Hoher Platzbedarf im Bereich der Stellplätze.	Geringer Platzbedarf am Stellplatz (Bauraum außerhalb erforderlich)
Kooperationsfähigkeit	Teilen von Ladeinfrastruktur nur sehr begrenzt pro Ladesäule möglich	Ermöglicht den Einsatz von Matrix-Ladesystemen
Wartung	Infrastruktur verteilt über das Depot, dafür ein System pro Ort (gut nachvollziehbar)	Wartung am zentralen Ort, jedoch komplexeres System
Bauanforderung	Gering, wenn Spannungsversorgung vorhanden ist.	Flächendeckende Baumaßnahmen mit umfassender Planung
Variabilität	Ladesystem kann mit überschaubarem Aufwand umpositioniert werden.	Umsetzung erfordert vollständige De- und Neumontage

Tab. 21: Gegenüberstellung dezentrale und zentrale Aufbauvarianten

### 3.3.2 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.

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 Wechsellspannung zu einer Gleichspannung. Mehrere Leistungsmodul können parallel betrieben werden, um ein Vielfaches der Modulleistung für die Fahrzeugladung bereitzustellen.



Abb. 19: Leistungsmodul

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

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

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

Modulgröße 150 kW  
Nicht aufteilbar



Abb. 20: 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 Leistungsklasse von 150 kW beziffert ist. Jedes Gehäuse ist mit einer eigenen Ladeschnittstelle ausgestattet. Jeder dieser zwei Ladepunkte kann mit einer Ladeleistung zwischen 0 und 150 kW bedient werden. Eine weitere Aufteilung der Leistung ist nicht möglich, da nur ein einzelnes Modul über die Verschaltungselektronik an die Ladeschnittstelle angebunden werden kann. In diesem Spezialfall entspricht die Verschaltungselektronik einem einfachen Leitungsweg zur Durchleitung der Modulleistung. Der Aufbau ähnelt einer einfachen Pkw-Ladesäule.

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

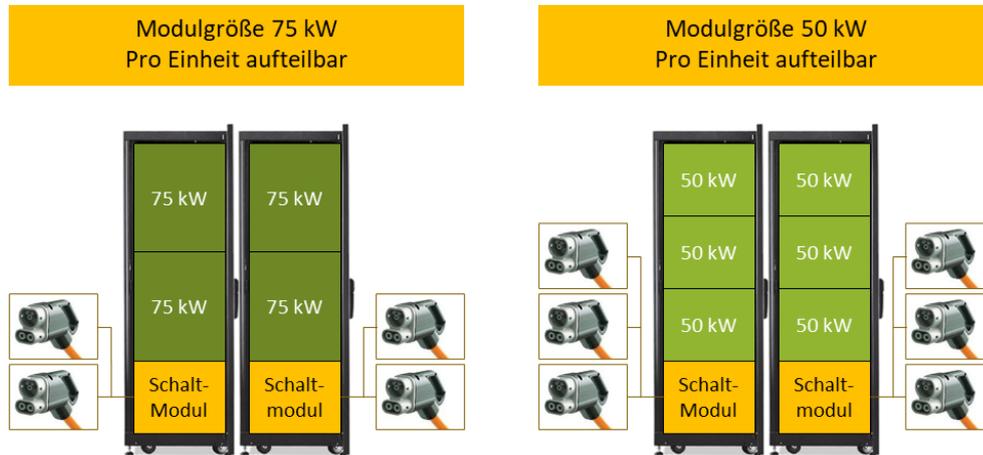


Abb. 21: Modulare Systeme 2 x 2 x 75 kW und 2 x 3 x 50 kW

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<sup>7</sup> 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 pro 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 x 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

Tab. 22: Übersicht Verschaltungsmöglichkeiten bei verschiedenen Modulgrößen

<sup>7</sup> Grundsätzlich können auch weitere Ladepunkte (variantenunabhängig) vorgesehen werden. Hier wird dem Verständnis halber immer eine Ladeschnittstelle pro Modul angenommen. Zusätzliche Ladepunkte können sinnvoll sein, um dieselbe Ladeinfrastruktur nacheinander für die Ladung an mehreren Fahrzeugen zu nutzen, was hier zunächst nicht im Vordergrund steht.

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.

Die nebenstehende 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.

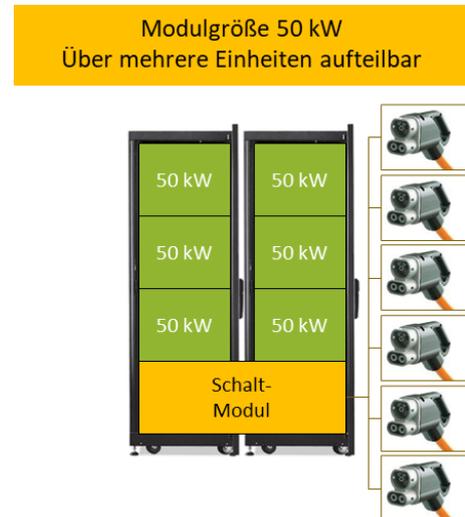


Abb. 22: Modulares System 1 x 6 x 50 kW

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 angebotenen Ladeschnittstellen weiterreichen. Angenommen es werden zwei Systeme mit einer Modulleistung von 3 x 50 kW betrachtet. 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 den LK Roth 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
- Wartungs- und Reparaturvorteile durch möglichst kleine und kostengünstige Tauschkomponenten zu erzielen

### 3.3.3 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.

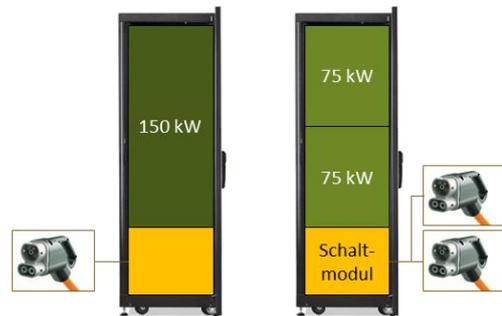


Abb. 23: Dedizierte Ladesysteme (Beispiel)

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 Infrastrukturmengen pro Bus mündet.

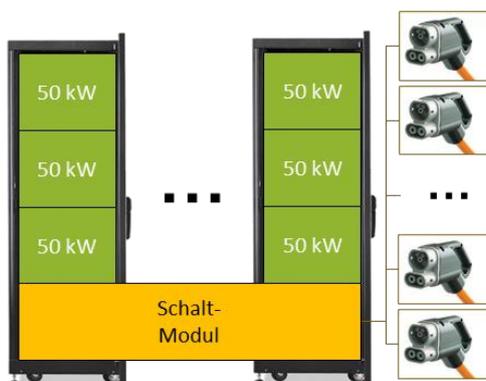


Abb. 24: Kooperatives Ladesystem (Beispiel)

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>8</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.

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.

### 3.3.4 Wichtigkeit kleiner Modulgrößen im Systemverbund

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

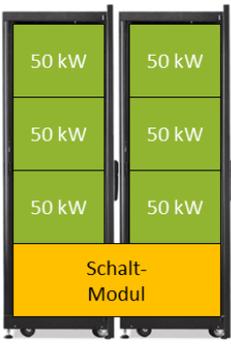
In diesem Kontext wird jedoch häufig vernachlässigt, dass es durchaus relevante Lastanforderungen mit wesentlich kleineren Leistungswerten gibt. Betont werden soll hier insbesondere das sogenannte Vorkonditionieren, also das elektrische Vorheizen der Fahrzeuge vor Betriebsbeginn, um diesen Energieaufwand 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.

---

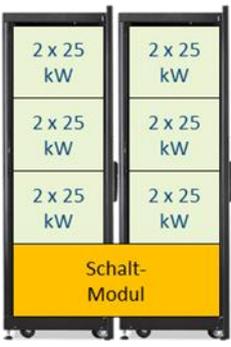
<sup>8</sup> In der Praxis kann in der Regel eine Ladeinfrastruktur mit 40-50 % der Leistung einer Ladeinfrastruktur umgesetzt werden, die für eine Ladesäule ohne Modularität und Kooperationsfähigkeit erforderlich wäre. Das Kosteneinsparpotenzial ist von diversen Einflussfaktoren (Hersteller, genaue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

Ladesystem: 6 x 50 kW = 300 kW			Leistungsanforderung Fahrzeug			
	Module	Leistung blockiert	Leistung angefordert	Leistung erhalten	Bus Nummer	
	50 kW	50 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					

Tab. 23: 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			
	Module	Leistung blockiert	Leistung angefordert	Leistung erhalten	Bus Nummer	
	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	150 kW	↔	130 kW	130 kW	Bus 4
	25 kW					
	25 kW					
	25 kW					
	25 kW					
	25 kW					
	25 kW	frei		25 kW Reserve		

Tab. 24: 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.

### 3.3.5 Schnittstellenausführung

Für die Netzanbindung wird im Anwendungsfall des LK Roth angenommen, dass ein Anschluss an das Mittelspannungsnetz erforderlich ist und ein entsprechender Transformator vorgesehen werden muss. Auf Basis der notwendigen Anzahl an Ladepunkten pro Depot ist eine Versorgung aus einem vorhandenen 400 V Netz extrem unwahrscheinlich.

Für die informationstechnische Anbindung des Ladesystems an Back-End Strukturen muss eine entsprechende Schnittstelle vorgesehen werden. Dies ist marktüblicher Standard und wird über das Open Charge Point Protocol (OCPP) gewährleistet, das in vielen Fällen um herstellerspezifische Cloudlösungen ergänzt wird.

Hinsichtlich der Ladeschnittstelle gibt es aktuell zwei denkbare Alternativen: Ladestecker oder Pantograph. Der CCS Typ 2 Ladestecker ist die Standardlösung für Depotladungsanwendungen und erlaubt Ladeströme bis 200 A, was bei gängigen Batteriespannungen einer Ladeleistung von 130 bis 150 kW entspricht. Diese Leistungswerte sind üblicherweise ausreichend für den Systementwurf. Alternativ können Pantographensysteme vorgesehen werden, die höhere Ladeleistungen erlauben. Leistungswerte bis 300 kW sind im Allgemeinen unkritisch, bewirken jedoch eine schnellere Batteriealterung. Sofern keine zeitkritischen Anwendungen vorliegen, ist es auch bei Pantographenladung über Nacht sinnvoll, einen Leistungswert in der Größenordnung von 150 kW anzustreben.

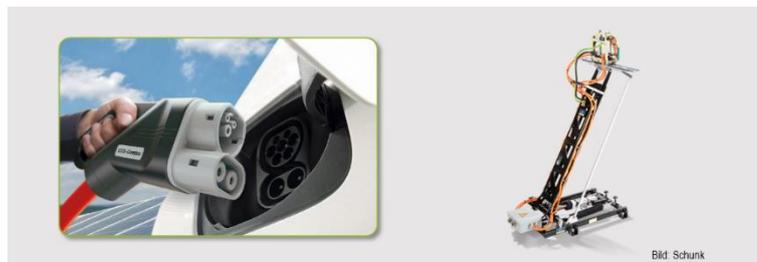


Abb. 25: CCS Typ 2 Stecker und Pantograph

Pantographen werden zwar in verschiedenen Ausführungsformen angeboten, jedoch ist die im Bild dargestellte (dachmontierte) Ausführung marktdominierend und wird von Busherstellern weitläufig angeboten. Es gilt jedoch zu beachten, dass üblicherweise aufgrund des notwendigen Bauraums auf dem Fahrzeugdach die Batteriekapazität reduziert werden muss. Für die Untersuchung wird eine Ladung per Ladestecker als kostengünstigste Lösung angesetzt, da keine Motivatoren für eine Pantographenladung erkennbar sind.

Ladestecker können auf verschiedenen Ordnungs- oder Bediensystemen aufbauen. Neben der aus dem Pkw-Sektor bekannten Ausführung als Wallbox stehen insbesondere die Typen Ladesäule und Deckenabroller im Fokus. Die Art der Ausführung ist für die weitere Untersuchung unerheblich und erfolgt abhängig vom Installationsort.



Abb. 26: Ladesäule und Deckenabroller für CCS-Schnittstellen

### 3.3.6 Abstellkonzept

Da das Abstellkonzept in der Regel durch die vorherrschenden Platzverhältnisse vorgegeben ist, geht es hier in erster Linie um die daraus resultierenden Anforderungen an das Ladebeziehungswise Betriebshofmanagement. Das platzeffizienteste Abstellkonzept ist die Blockaufstellung mit mehreren parallelen Spuren und Stellplätzen hintereinander, die insbesondere bei Depots mit Dieselnbussen weit verbreitet ist. Im Umfeld batterieelektrischer Fahrzeuge kann dies besondere Herausforderungen beinhalten.

Die Fahrzeuge befahren die Stellflächen unabhängig vom Ladestand der Batterie, ausschließlich abhängig von der Ankunftsreihenfolge, wenn keine Managementeingriffe erfolgen. Im Beispiel rückt das erste Fahrzeug mit stark entladener Batterie ein, während das zweite Fahrzeug einen hohen Ladezustand aufweist.

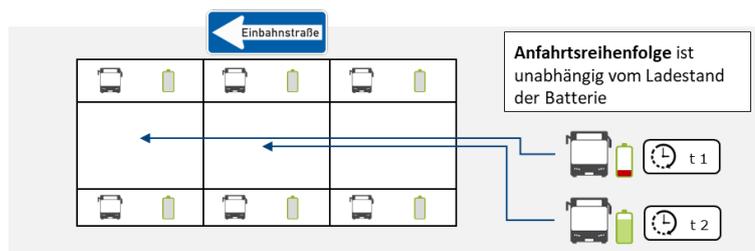


Abb. 27: Blockaufstellung vs. BEV: Beispieldarstellung – Ankunft

Sofern dieser Umstand nicht vom Lademanagement erkannt und durch Gegenmaßnahmen kompensiert wird, ist das zweite Fahrzeug vor dem ersten Fahrzeug in der Abstellung vollgeladen.

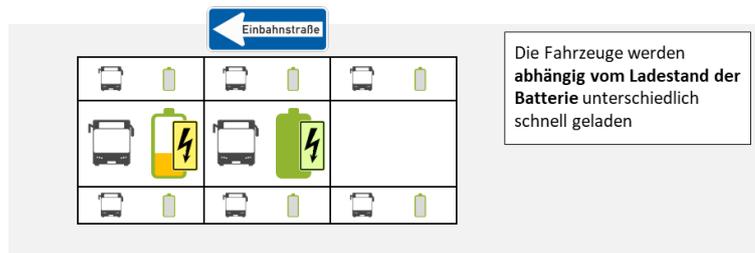


Abb. 28: Blockaufstellung vs. BEV: Beispieldarstellung – Vollladung erstes Fahrzeug

Sofern die Fahrzeuge nicht unmittelbar benötigt werden, ist dieser Umstand zunächst unkritisch. Sofern jedoch für einen Folgeumlauf ein vollgeladenes Fahrzeug benötigt wird, kann nicht auf das Fahrzeug im mittleren Stellplatz zugegriffen werden, da die Ausfahrt blockiert ist. Ein Rangieren ist zwar grundsätzlich möglich, jedoch muss hierfür auch der Ladevorgang unterbrochen werden.

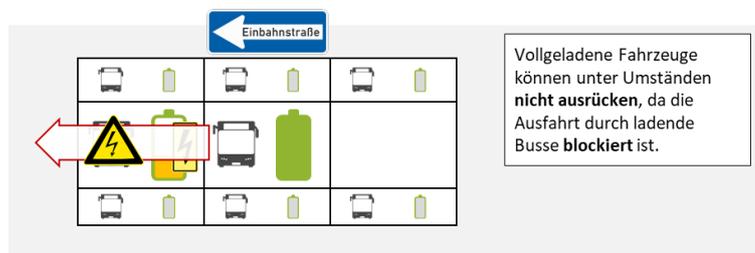


Abb. 29: Blockaufstellung vs. BEV: Beispieldarstellung – Blockierte Ausfahrt

Im Text oben sind die Eingriffsmöglichkeiten von Managementsystemen bereits aufgeführt. In erster Instanz kann die An- und Abfahrtsreihenfolge in Verbindung mit dem Ladebedarf optimiert werden. Dies ist bei kleineren Flotten auch durch eine feste Zu- und Abfahrtsreihenfolge realisierbar. Bei größeren Flotten können Betriebshofmanagementsysteme die Stellplätze automatisiert zuweisen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, eine priorisierte Ladung der vorderen Fahrzeuge in der Abstellung über ein Lademanagementsystem sicherzustellen. Hierbei gilt es jedoch zu beachten, dass die Wirkung der Priorisierung stark von den Ladezuständen abhängt. In jedem Fall muss für Blockaufstellungen beachtet werden, dass die Fahrzeuge nicht nur rechtzeitig geladen werden müssen, sondern auch ungehindert abfahren können. Abhängig von der Flottengröße kann dies in der Regel über geeignete und konsequent umgesetzte Betriebsanweisungen umgesetzt werden. Hierbei wird im Ladeplan die Ankunft und Abfahrt so berücksichtigt, dass später keine Konflikte entstehen. In großen Betriebshöfen sollte die Belegung der Ladeplätze softwaretechnisch organisiert oder zumindest überwacht werden. Für den Anwendungsfall ist anzunehmen, dass eine feste Belegungsreihenfolge der Ladeplätze ausreichend ist. Jedoch muss dieser Umstand in letzter Instanz bewertet werden, wenn die Eigenschaften des Depots bekannt sind.

Der Nutzen von einer softwaregestützten Zuweisung der Ladeplätze kann nicht an einer konkreten Flottenzahl festgemacht werden. Dies ist letztlich auch abhängig von Randbedingungen, wie der Umlauf- und Fahrplangestaltung, dem Aufbau des Betriebshofs, den Leistungsreserven des Ladesystems und ähnlichem. Darüber hinaus fehlen konkrete Erfahrungswerte aus der Praxis, da aktuell primär nur kleine Flottenanteile elektrifiziert sind. Als Richtwert kann angenommen werden, dass ab 20 bis 30 Fahrzeugen ein entsprechendes System sinnvoll ist.

Aus ladetechnischer Sicht ist die Schräg- oder Fischgrätenaufstellung das ideale Abstellkonzept, was einen hohen Platzbedarf aufweist. Durch die geometrische Struktur ist eine Zu- und Abfahrt jederzeit möglich, so dass keine besonderen Managementeingriffe notwendig sind und darüber hinaus mögliche Fehler nicht zum Ausfall einer Spur, sondern nur zum Ausfall eines Ladeplatzes führen.

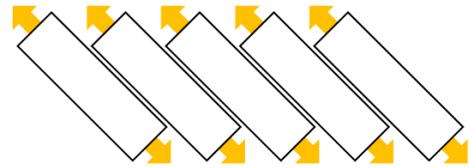


Abb. 30: Schema Schrägaufstellung

Insbesondere Matrix-Ladesysteme können hier maximal effizient ausgenutzt werden. Schrägaufstellung kann entweder, wie im Schaubild, so ausgeführt sein, dass der Parkplatz in Fahrtrichtung verlassen wird, oder, wenn zwei Spuren einander gegenüberstehen, dass der Parkplatz rückwärts verlassen werden muss. Im zweiten Fall wäre zumindest bei Gelenkbussen ein Einweiser oder zusätzliche technische Lösungen erforderlich.

In Bezug auf Nutzung durch Dritte steigt das Risiko von Fehlnutzungen und Ausfällen. Ein nicht rechtzeitig entferntes Fahrzeug kann in Blockaufstellung zum Ausfall einer kompletten Ladespur führen. Gleiches gilt für mögliche Unfälle und ähnliches. Es wird in jedem Fall empfohlen, die Ladebereiche für den ÖPNV räumlich von denen weiterer Nutzer zu trennen. Sofern weitere Nutzer hier fest planbare Partner sind, ist eine gemeinsame Nutzung denkbar. Für öffentliche (unbekannte) Nutzer wird hiervon dringend abgeraten.

### 3.3.7 Lademanagementsysteme

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

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



Abb. 31: Schema Kommunikation

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

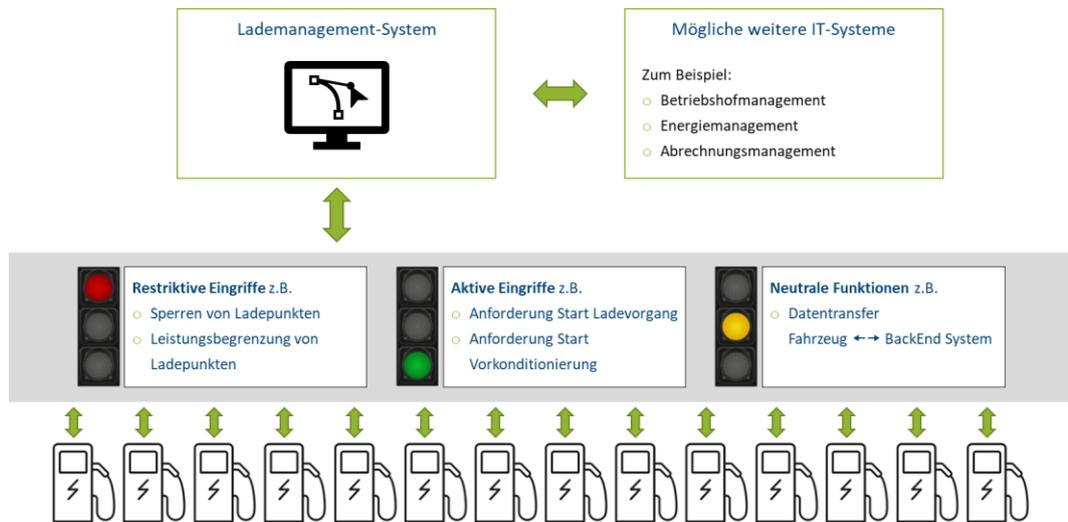


Abb. 32: Lademanagementsystem Informationsebene

In Richtung der Ladeinfrastruktur und Fahrzeuge kann ein Lademanagementsystem Funktionen aus drei Kategorien abdecken:

- Restriktive Eingriffe
 

Restriktive Eingriffe blockieren Funktionen oder den Umfang von Funktionen und Aktionen, die ansonsten ausgeführt werden würden, um die Gesamtheit der Ladevorgänge zu optimieren. Dies betrifft zum Beispiel das zeitweilige Sperren von Ladepunkten oder die Begrenzung von Ladeleistungen an einzelnen Ladepunkten. Selbstverständlich können die Eingriffe auch auf einen größeren Umfang bezogen sein und ganze Systemeinheiten sperren oder limitieren.
- Aktive Eingriffe
 

Aktive Eingriffe lösen Aktionen aus, die ohne einen Eingriff zu diesem Zeitpunkt nicht erfolgen würden. Das Managementsystem versendet in diesem Fall eine Anforderung an das Fahrzeug bestimmte Aktionen einzuleiten. Beispielsweise den Start eines Lade- oder eines Vorkonditionierungsvorgangs. Nach Erhalt der Aufforderung stellt das Fahrzeug seinerseits eine Leistungsanfrage an das Ladesystem, um den Vorgang zu starten.
- Neutrale Funktionen
 

Ergänzend kann das Lademanagementsystem neutrale Funktionen umsetzen, die keine Aktion zur Folge haben. Dies betrifft im Wesentlichen den Austausch diverser Datensätze über die Kommunikationsschnittstelle zum Fahrzeug, um diese an angebundene IT-Systeme weiterzureichen oder in eigenen Softwareroutinen auszuwerten. Grundsätzlich können alle Datensätze aus der Fahrzeugsteuerung übertragen werden. Typische Beispiele sind der Ladestand der Batterie oder Daten aus dem Fehlerspeicher.

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

Die einfachste Kategorie für Lademanagementsysteme wird im Rahmen dieser Untersuchung als Ladeplan bezeichnet. Grundlage sind fest definierte Vorgaben und Zeitpunkte, an denen eine

Funktion ausgeführt wird. Die Routinen werden auf einen überschaubaren Infrastruktumfang begrenzt und bei größeren Gesamtsystemen mehrfach parallel ausgeführt. Mögliche Triggerpunkte bei denen eine Funktion ausgeführt oder gewechselt wird, sind zum Beispiel Beendigungen von Ladevorgängen oder feste Zeitintervalle. Bei einem Triggerevent kann beispielsweise ein neuer Leistungswert vorgegeben werden, ein Ladepunkt gesperrt oder freigegeben werden. Der Ansatz ist am ehesten mit einer Steuerung im Feld der Regelungstechnik vergleichbar. Primär erfolgt die Steuerung hier abhängig von der Zeitachse.

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

## 3.4 Infrastrukturkonzept

### 3.4.1 Modulbaukasten

Das Infrastrukturkonzept für den Landkreis Roth beruht auf einem Modulbaukasten, der für die verschiedenen Depots anforderungsbedingt angepasst wird.

#### Leistungsmodul

Das Leistungsmodul stellt die kleinste Baugruppe des dargestellten Konzepts dar. Wie in Kapitel 3.3 *Technische Gestaltung der Ladeinfrastruktur* im Detail dargestellt, hat der Einsatz kleiner Module entscheidende Vorteile. Wir gehen hier von einem 50 kW Leistungsmodul aus. Dabei wird empfohlen, in der Praxis nach Möglichkeit eine kleinere Größe zu wählen, um Konflikte mit Vorkonditionierungsvorgängen zu minimieren.

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

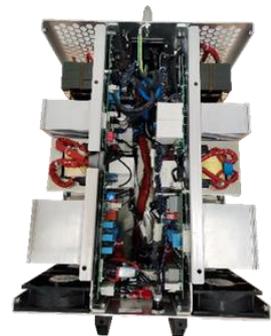


Abb. 33: Leistungsmodul

Das Leistungsmodul sollte ausgangsseitig mindestens einen Spannungsbereich zwischen 300 und 900 V ( $U_{DC}$ ) abdecken und mindestens einen maximalen Ausgangsstrom von 75 A ermöglichen. Das Leistungsmodul sollte außerdem über eine Schnellmontageeinrichtung, zum Beispiel als Einschubsystem, verfügen und innerhalb von wenigen Minuten austauschbar sein, um Stillstandszeiten zu minimieren.

#### Verschaltungsmodul

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

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

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

#### Hinweis

Die hier vorgesehenen Varianten für 8 Ladepunkte können auch mit Verschaltungsmodulen für 4 Ladepunkte umgesetzt werden, wenn die LIS-Einheit ebenfalls als zwei Einheiten mit halbiertes Leistung umgesetzt wird. Zum Beispiel können statt eines 600 kW Systems mit 8 LP zwei 300 kW Systeme mit 4 LP realisiert werden, wenn gewünscht.

### 3.4.2 Konzeptentwurf pro Depot

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

Die Reserveflotte steht bei der Untersuchung von Verkehrsverträgen üblicherweise nicht im Fokus, da diese vom Betreiber vorgehalten wird und nicht (direkt) Teil der abgerechneten Fahrzeugmenge ist. Gleichzeitig sollten auch diese Fahrzeuge an das Ladesystem angebunden sein, um jedem Fahrzeug einen Ladeplatz zuzuordnen und Rangierfahrten zu vermeiden. Um die Reserveflotte abzuschätzen, wird diese pauschal mit 20 % der Einsatzflotte angesetzt.

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

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

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

**Steckbrief Ladeinfrastrukturkonzept Standort Röhler, Datensatz Röhler  
(zu LB 2 und LB 4)**



Parameter für Konzeptionierung		
Max Ladeleistung pro Bus	130 kW (Standard)	
	80 kW (Kleinbusse)	
Lastspitze nach Optimierung	979 kVA	
Maximale Anzahl gleichzeitiger Ladevorgänge (nach Lastgangoptimierung)	7	
Lastreserve	+2 Ladevorgänge (@ 130 kW)	
Lastspitze nach Optimierung inkl. Lastreserve	1.267 kVA	
Empfohlener MS/NS Transformator	1.600 kVA	
Fahrzeuganzahl (+ Reserve)	Solobus (12 m)	29 (+6)
	Solobus (15 m)	2 (+1)
	Gelenkbus	3 (+1)
	Kleinbus	3 (+1)
Konzeptentwurf Ladeinfrastruktur		
1. Systemvariante (für alle Fahrzeugtypen)		
Anzahl	6 Systeme	
Systemleistung	400 kW	
Anzahl Ladepunkte pro System	8	

*Tab. 25: Steckbrief Ladeinfrastrukturkonzept Standort Röhler, Datensatz Röhler (zu LB 2 und LB 4)*

Im Sonderfall Standort Röhler ist zu beachten, dass auf Basis der Datensätze Umlaufdaten, neben den Umläufen aus LB 2 und LB 4, auch Umläufe aus anderen Einsatzgebieten verarbeitet wurden. Entsprechend ist die berücksichtigte Fahrzeugzahl höher als für LB 2 und LB 4 erforderlich.

### Steckbrief Ladeinfrastrukturkonzept Standort Rombs – Thalmässing, Datensatz Rombs (zu LB 3)

Parameter für Konzeptionierung		
Max Ladeleistung pro Bus	130 kW (Standard)	
Lastspitze nach Optimierung	578 kVA	
Maximale Anzahl gleichzeitiger Ladevorgänge (nach Lastgangoptimierung)	4	
Lastreserve	+2 Ladevorgänge (@ 130 kW)	
Lastspitze nach Optimierung inkl. Lastreserve	866 kVA	
Empfohlener MS/NS Transformator	1.250 kVA	
Fahrzeuganzahl (+ Reserve)	Solobus (12 m)	10 (+2)
	Solobus (15 m)	2 (+1)
Konzeptentwurf Ladeinfrastruktur		
1. Systemvariante (für alle Fahrzeugtypen)		
Anzahl	2 Systeme	
Systemleistung	600 kW	
Anzahl Ladepunkte pro System	8	

Tab. 26: Steckbrief Ladeinfrastrukturkonzept Standort Rombs – Thalmässing, Datensatz Rombs (zu LB 3)

### Steckbrief Ladeinfrastrukturkonzept Standort Rombs – ELKO, Datensatz Rombs (zu LB 3)

Parameter für Konzeptionierung		
Max Ladeleistung pro Bus	130 kW (Standard)	
Lastspitze nach Optimierung	289 kVA	
Maximale Anzahl gleichzeitiger Ladevorgänge (nach Lastgangoptimierung)	2	
Lastreserve	+2 Ladevorgänge (@ 130 kW)	
Lastspitze nach Optimierung inkl. Lastreserve	433 kVA	
Empfohlener MS/NS Transformator	630 kVA	
Fahrzeuganzahl (+ Reserve)	Solobus (12 m)	5 (+1)
Konzeptentwurf Ladeinfrastruktur		
1. Systemvariante (für alle Fahrzeugtypen)		
Anzahl	1 System	
Systemleistung	600 kW	
Anzahl Ladepunkte pro System	8	

Tab. 27: Steckbrief Ladeinfrastrukturkonzept Standort Rombs – ELKO, Datensatz Rombs (zu LB 3)

### Steckbrief Ladeinfrastrukturkonzept Standort Rombs – Weißenburg, Datensatz Rombs (zu LB 3)

Parameter für Konzeptionierung		
Max Ladeleistung pro Bus	130 kW (Standard)	
Lastspitze nach Optimierung	144 kVA	
Maximale Anzahl gleichzeitiger Ladevorgänge (nach Lastgangoptimierung)	1	
Lastreserve	+1 Ladevorgang (@ 130 kW)	
Lastspitze nach Optimierung inkl. Lastreserve	289 kVA	
Empfohlener MS/NS Transformator	400 kVA	
Fahrzeuganzahl (+ Reserve)	Solobus (12 m)	1 (+1)
Konzeptentwurf Ladeinfrastruktur		
1. Systemvariante (für alle Fahrzeugtypen)		
Anzahl	1 System	
Systemleistung	400 kW	
Anzahl Ladepunkte pro System	2	

Tab. 28: Steckbrief Ladeinfrastrukturkonzept Standort Rombs – Weißenburg, Datensatz Rombs (zu LB 3)

### Steckbrief Ladeinfrastrukturkonzept Standort OVF, Datensatz OVF (zu LB 6)

Parameter für Konzeptionierung		
Max Ladeleistung pro Bus	130 kW (Standard)	
	80 kW (Kleinbusse)	
Lastspitze nach Optimierung	722 kVA	
Maximale Anzahl gleichzeitiger Ladevorgänge (nach Lastgangoptimierung)	5	
Lastreserve	+2 Ladevorgänge (@ 130 kW)	
Lastspitze nach Optimierung inkl. Lastreserve	1.010 kVA	
Empfohlener MS/NS Transformator	1.250 kVA	
Fahrzeuganzahl (+ Reserve)	Solobus (12 m)	19 (+4)
	Gelenkbus	4 (+1)
	Kleinbus	3 (+1)
Konzeptentwurf Ladeinfrastruktur		
1. Systemvariante (für alle Fahrzeugtypen)		
Anzahl	4 Systeme	
Systemleistung	400 kW	
Anzahl Ladepunkte pro System	8	

Tab. 29: Steckbrief Ladeinfrastrukturkonzept Standort OVF, Datensatz OVF (zu LB 6)

### Steckbrief Ladeinfrastrukturkonzept Standort Ehard, Datensatz Ehard (zu LB 7 – TN 2)

Parameter für Konzeptionierung		
Max Ladeleistung pro Bus	130 kW (Standard)	
	80 kW (Kleinbusse)	
Lastspitze nach Optimierung	211 kVA	
Maximale Anzahl gleichzeitiger Ladevorgänge (nach Lastgangoptimierung)	1	
Lastreserve	+1 Ladevorgang(@ 130 kW)	
Lastspitze nach Optimierung inkl. Lastreserve	355 kVA	
Empfohlener MS/NS Transformator	500 kVA	
Fahrzeuganzahl (+ Reserve)	Solobus (12 m)	4 (+1)
	Solobus (15 m)	3 (+1)
	Kleinbus	1 (+1)
Konzeptentwurf Ladeinfrastruktur		
1. Systemvariante (für Fahrzeugtypen SL12 und SL15)		
Anzahl	1 System	
Systemleistung	400 kW	
Anzahl Ladepunkte pro System	8	
2. Systemvariante (für Fahrzeugtypen SL15 und Kleinbusse)		
Anzahl	1 System	
Systemleistung	200 kW	
Anzahl Ladepunkte pro System	4	

Tab. 30: Steckbrief Ladeinfrastrukturkonzept Standort Ehard, Datensatz Ehard (zu LB 7 – TN 2)

**Steckbrief Ladeinfrastrukturkonzept Standort N.N., Datensatz 605-607 (zu LB 7 – TN 1)**

Parameter für Konzeptionierung		
Max Ladeleistung pro Bus	130 kW (Standard)	
Lastspitze nach Optimierung	311 kVA	
Maximale Anzahl gleichzeitiger Ladevorgänge (nach Lastgangoptimierung)	2	
Lastreserve	+1 Ladevorgang(@ 130 kW)	
Lastspitze nach Optimierung inkl. Lastreserve	455 kVA	
Empfohlener MS/NS Transformator	630 kVA	
Fahrzeuganzahl (+ Reserve)	Solobus (12 m)	7 (+2)
	Solobus (15 m)	1 (+1)
Konzeptentwurf Ladeinfrastruktur		
1. Systemvariante (für Fahrzeugtyp SL12)		
Anzahl	1 System	
Systemleistung	400 kW	
Anzahl Ladepunkte pro System	8	
2. Systemvariante (für Fahrzeugtypen SL12 und SL15)		
Anzahl	1 System	
Systemleistung	400 kW	
Anzahl Ladepunkte pro System	4	

*Tab. 31: Steckbrief Ladeinfrastrukturkonzept Standort N.N., Datensatz 605-607 (zu LB 7 – TN 1)*

### 3.5 Exkurs: Technische Gestaltung H<sub>2</sub>-Tankanlagen

Auch wenn die Empfehlung einer Vorzugstechnologie auf BEV entfällt, sind FCEV eine grundsätzlich realisierbare Alternative, die hier nur kurz umrissen werden soll. Wasserstofftankinfrastruktur ähnelt einer Gastankstelle, wobei verschiedene Ausführungen möglich sind. Für Nutzfahrzeuge mit 350 bar Systemen werden üblicherweise die oberen drei Alternativen des folgenden Schaubilds eingesetzt. Im Gegensatz zur untersten dargestellten Alternative werden keine Flüssiggasspeicher benötigt, die für die im Pkw-Sektor verfolgte 900 bar Technik vielfach eingesetzt werden.

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

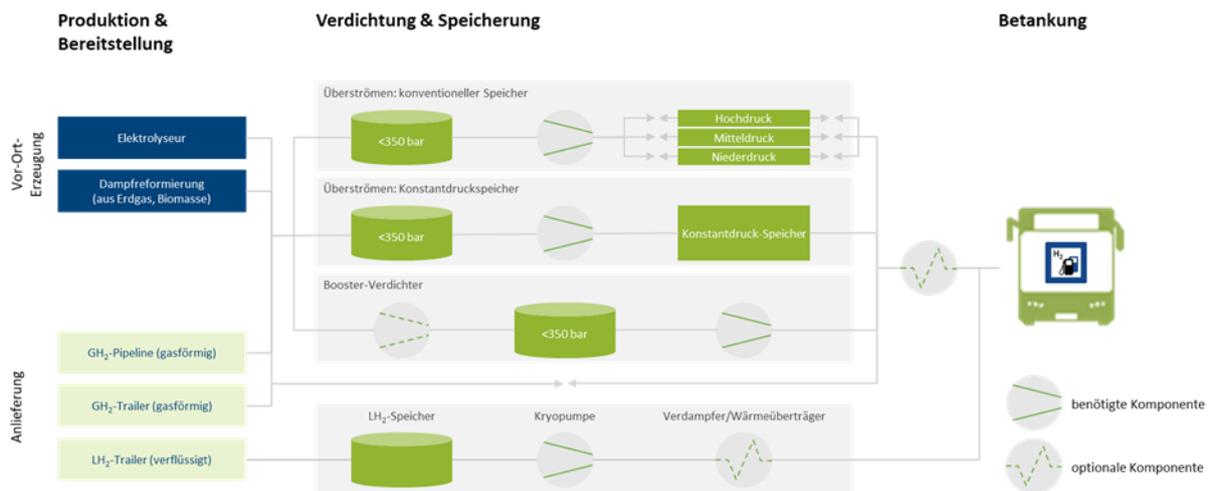


Abb. 34: Schematischer Aufbau Wasserstoff-Tankstelle

Der Platzbedarf einer Wasserstofftankstelle geht auf die zu versorgende Fahrzeuganzahl zurück. Aufgrund des Aufbauprinzips müssen die Bauflächen zusammenhängend ausgeführt sein. Die Grundfläche der erforderlichen Speicher- und Steuerungskomponenten liegt bei grob 10 x 30 m für mittlere Flotten, die wiederum um Zapfstellen (Tankplätze mit Dispenser) sowie Anlieferungspunkte für H<sub>2</sub>-Trailer ergänzt werden müssen.

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

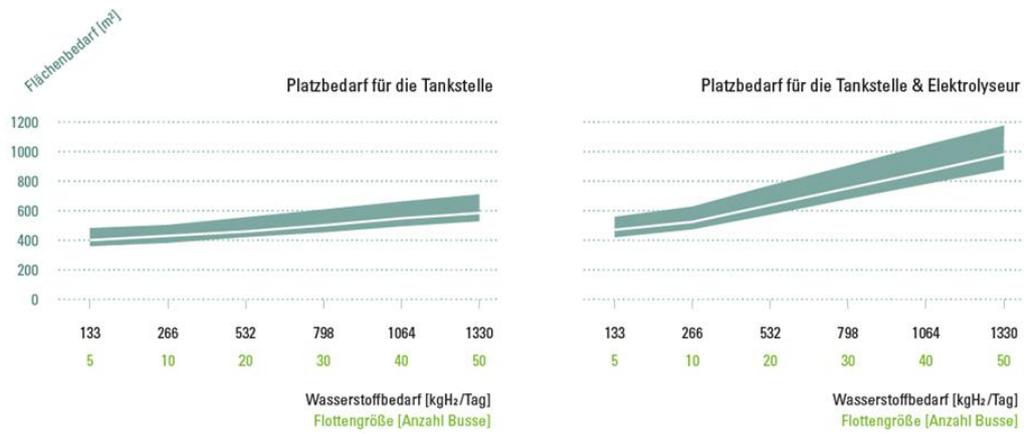


Abb. 35: Platzbedarf Wasserstoff-Tankstelle im ÖPNV [aus NOW GmbH (2018) „Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV“]

## 4 AP 4: Kosten-Nutzen-Analyse

Im Rahmen der Umstellung des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) im Landkreis Roth auf emissionsfreie Antriebe spielt die Kosten-Nutzen-Analyse eine zentrale Rolle. Das AP 4 widmet sich der detaillierten Untersuchung der finanziellen Auswirkungen und der ökologischen Vorteile, die mit der Flottenumstellung auf batterieelektrische Busse (BEV) und Brennstoffzellenbusse (FCEV) verbunden sind.

Ziel dieser Analyse ist es, die zu erwartenden Mehrkosten darzustellen und dabei sowohl einmalige Investitionskosten als auch laufende Betriebskosten zu berücksichtigen. Hierbei werden Investitionen in die Ladeinfrastruktur, Fahrzeuganschaffungen, Personalschulungen sowie Projektmanagement- und Planungskosten einbezogen. Darüber hinaus werden die laufenden Betriebskosten unter Berücksichtigung potenzieller Mehraufwendungen durch einen erhöhten Fahrzeugbedarf und den Parallelbetrieb von Diesel- und Elektrobussen während der Transformationsphase analysiert.

Alle Maßnahmen der Flottenumstellung und deren betriebswirtschaftliche Effekte werden gegenüber einem Referenzszenario kaufmännisch bewertet, welches die Fortschreibung des Status quo im Sinne eines „Weiter so“ mit Dieselmotoren beschreibt. Gegenüber diesem Referenzszenario werden somit für jedes Linienbündel für die Antriebstechnologien Batterie und Brennstoffzelle die Mehrkosten von unterschiedlichen Migrationspfaden ermittelt, die unterschiedliche Umstellungsgeschwindigkeiten abbilden (siehe folgendes Kapitel).

Zusätzlich zur finanziellen Analyse werden die ökologischen Effekte der Flottenumstellung in globaler Betrachtung in Form der Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen dargestellt. Weitere Vorteile der Antriebsumstellung liegen in der lokalen Betrachtung in der Verringerung von Luftschadstoffemissionen und Lärmbelastungen sowie in der Stärkung des umweltfreundlichen Images des ÖPNV.

## 4.1 Migrationspfade

Zur Schaffung einer fundierten Vergleichs- und Entscheidungsgrundlage wurden drei Transformationsszenarien aufgestellt, auch Migrationspfade genannt. Diese Migrationspfade zeigen unterschiedliche Umstellungsgeschwindigkeiten und beziehen sich dabei stets auf die Neuvergabe der Verkehrsleistung eines Linienbündels. Die hinterlegten Szenarien haben den Anspruch, den möglichen Entscheidungsspielraum des LK Roth abzubilden. Bei Neuvergabe der Linienbündel im LK Roth ist mindestens auf die Einhaltung der Quoten des SaubFahrzeugBeschG bzw. der CVD zu achten, die maximal mögliche Umstellung auf emissionsfrei Antriebe wäre hingegen die Vollumstellung ab dem Zeitpunkt der Gültigkeit des jeweiligen Neuvertrags. Zwischen diesen beiden Szenarien sind unterschiedliche Ausprägung denkbar, beispielsweise wie das hier angesetzte Szenario 2 „CVD Plus“. Die angesetzten Szenarien beschreiben also die Erfüllung der CVD-Mindestanforderungen "Einhaltung CVD" (S1), eine Mittelweg-Lösung "CVD Plus" (S2) und die "Vollumstellung" (S3) auf alternative Antriebe.

Szenarien	1. Periode (bis 12/25)			2. Periode (bis 12/30)		
	Diesel	sauber	emissionsfrei	Diesel	sauber	emissionsfrei
Referenzszenario	100,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%
S1: CVD Mindestanforderungen	55,0%	22,5%	22,5%	35,0%	32,5%	32,5%
S2: CVD Plus	55,0%	0,0%	45,0%	35,0%	0,0%	65,0%
S3: Vollumstellung	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%	100,0%

Tab. 32: CVD-Quoten der beiden CVD-Perioden und Szenarien

Das Szenario 1 „Einhaltung CVD“ erfüllt die Mindestanforderungen der CVD-Richtlinien (vgl. Kapitel 10.6 Regulatorische und rechtliche Rahmenbedingungen). Bis Ende 2025 wird ein Anteil von 22,5% der Flotte auf emissionsfreie Antriebe umgestellt. Bis Ende 2030 erhöht sich dieser Anteil auf 32,5%. Weitere 22,5 % (1. Periode) bzw. 32,5 % (2. Periode) müssen hierbei mit „sauberen“ Antrieben betrieben werden, etwa Dieselfahrzeuge mit synthetischem Kraftstoff wie HVO100 („Hydrotreated Vegetable Oils“).



Abb. 36: Beschaffungsquoten der CVD für Busse in den Referenzperioden (eigene Abbildung)

Im Szenario 2 „Mittelweg“ wird (beispielhaft) ein ambitionierterer Ansatz verfolgt. Bis Ende 2025 werden 45% der Flotte auf emissionsfreie Antriebe umgestellt. Bis Ende 2030 steigt dieser Anteil auf 65%, „saubere“ Fahrzeuge kommen hier nicht zum Einsatz.

Im Szenario 3 (Vollumstellung) erfolgt eine vollständige Umstellung der Flotte auf emissionsfreie Antriebe ab dem Jahr der Neuvergabe des jeweiligen Linienbündels. Fahrzeuge mit

konventionellem oder sauberem Antrieb werden nicht berücksichtigt bzw. werden gänzlich durch emissionsfreie Fahrzeuge ersetzt.

Ferner wurde ein Referenzszenario bei den Berechnungen berücksichtigt. Das Referenzszenario „100% Diesel“ bildet dabei eine Fortsetzung des Status quo ab. In diesem Szenario werden weiterhin nur Dieselfahrzeuge beschafft und betrieben. Durch Vergleich der aufgestellten Szenarien mit diesem Bezugsszenario werden die Auswirkungen auf die Kosten sichtbar, die sich im Zuge der Flottentransformation ergeben. Diese Fortschreibung ist indessen rein fiktiv und berücksichtigt in Gesamtbetrachtung aller Linienbündel nicht die rechtlichen Anforderungen der CVD und ist folglich auch nicht rechtssicher umsetzbar.

Die folgenden Abbildungen stellen die Quoten der drei entworfenen Szenarien S1 bis S3 grafisch dar:

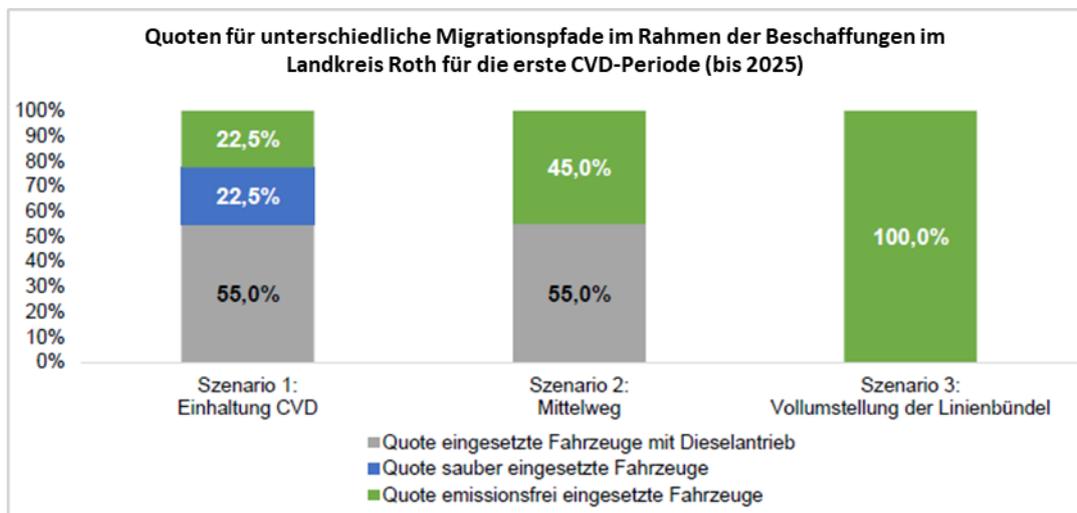


Abb. 37: CVD-Quoten für die erste CVD-Periode im Landkreis Roth (eigene Abbildung)

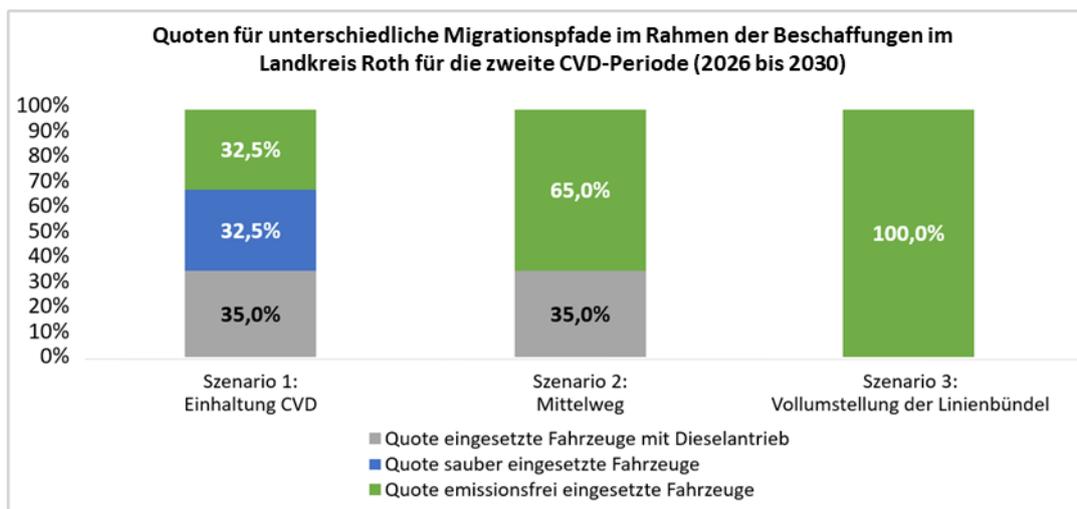


Abb. 38: CVD-Quoten für die zweite CVD-Periode im Landkreis Roth (eigene Abbildung)

Nach den gegenwärtigen Informationen und Planungen werden alle Linienbündel erst nach 2025 vergeben, diese fallen folglich in die zweite CVD-Periode. Das Linienbündel 06 und 07 werden

voraussichtlich im Jahr 2034 bzw. 2035 neu vergeben und damit deutlich nach Ende der 2. CVD-Periode. Inwieweit die CVD für den Zeitraum nach 2030 im Sinne einer Anschlussregelung fortgeführt wird, ist derzeit noch unklar. Hinsichtlich der kürzlich verabschiedeten EU-Richtlinie 2024/1610, die die Hersteller dazu verpflichtet, CO<sub>2</sub>-Emissionen von neu zugelassenen Bussen (Stadt- und Überlandbusse, letztere jedoch mit geringeren Anforderungen) zu reduzieren, ist jedoch zu erwarten, dass sich das Marktangebot ab dem Jahr 2030 sichtbar verändern wird und im Jahr 2034 bzw. 2035 eine Vollumstellung der Linienbündel in Betracht gezogen werden kann. Im Sinne einer transparenten Vergleichsmöglichkeit wurde für diese beiden Linienbündel die Quoten der 2. CVD-Periode für die Darstellung des zweiten Szenarios angewandt. Diese Besonderheit wird in den Handlungsempfehlungen im Rahmen dieser Studie entsprechend berücksichtigt.

Auf Basis der Quoten sowie den Informationen zu Dauer des Verkehrsvertrages, der Anzahl an Fahrzeugen sowie der Aufteilung der Fahrzeuge in die verschiedenen Gefäßgrößen<sup>9</sup> wurden für alle Linienbündel die absoluten Werte der Flottenzusammenstellung ab der Neuvergabe in Form der „Migrationspfade“ berechnet und tabellarisch dargestellt. Dazu wurden die Quoten zum Jahr der Umstellung anteilig auf die Gesamtzahl an Fahrzeugen in der jeweiligen Gefäßgröße berechnet wie hier vereinfacht dargestellt:

### Vereinfachte Darstellung der Berechnung am Beispiel des Linienbündel 01, Szenario 2 (CVD Plus):

<b>Status quo</b>	<b>Berechnung und Ergebnis</b>
<p><i>Fünf (5) Fahrzeuge der Gefäßgröße Solobus - 12 Meter mit konventionellem Antrieb im Linienbündel 01.</i></p>	<p><b>Szenario 2:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 65,0 % für emissionsfreie Antriebe, aufgerundet auf ganze Zahlen zur Bestimmung der Anzahl an Fahrzeuge mit emissionsfreiem Antrieb: → 65,0 % von fünf Fahrzeugen = drei Fahrzeuge mit emissionsfreiem Antrieb</li> <li>• Gesamtmenge Status quo (fünf Fahrzeuge) – emissionsfreie Busse (drei Fahrzeuge) = 2 Dieselfahrzeuge</li> </ul>

Die Migrationspfade liefern Auskunft über die Gesamtzahl an Fahrzeugen pro Linienbündel mit Diesel, sauberen und emissionsfreien Antrieben für alle drei bzw. – unter Einbeziehung des Referenzszenarios – vier Szenarien. Zudem dienen die Migrationspfade als Basis für die weitere Berechnungen, insbesondere von fahrzeug- und betriebsleistungsabhängigen Kosten und verstehen sich somit als „Taktgeber“ der Umstellung. Die Darstellung der sich ergebenden Flottenstärken nach unterschiedlichen Antriebsarten ist zunächst losgelöst von der technischen Machbarkeit zu betrachten. Diese ist anschließend bei der Ableitung der Umstellungsstrategie für die einzelnen Linienbündel einzubeziehen (Frage hier: „welche Linienbündel sollen wann in welchem Maße umgestellt werden?“).

<sup>9</sup> Berücksichtigte Gefäßgrößen sind Kleinbusse, Solobusse mit einer Länge von 12 Metern, Solobusse mit einer Länge von 15 Metern sowie Gelenkbusse.

#### 4.1.1 Linienbündel 01 (Rohr)

Der aktuelle Verkehrsvertrag für das Linienbündel 01 (Rohr) ist bis zum 12.12.2026 gültig, die Neuvergabe erfolgt daher zu Mitte bzw. Ende Dezember 2026 und damit in der zweiten Periode der CVD-Richtlinie. Für die Kostenbetrachtung wurde vereinfachend eine Betriebsaufnahme der Fahrzeuge, die im Rahmen des Neuvertrags einzusetzen sind, auf Anfang des Jahres 2027 terminiert.

Nach aktuellem Stand sind im Linienbündel 01 sieben Fahrzeuge im Einsatz, davon zwei Kleinbusse und fünf Solobusse mit einer Länge von zwölf Metern:

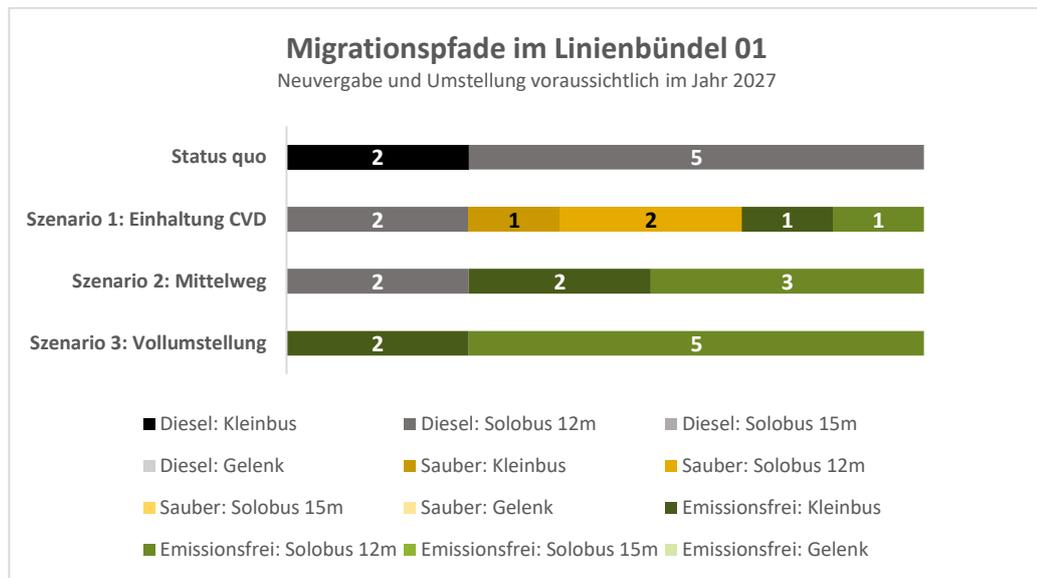


Abb. 39: Migrationspfade im Linienbündel 01 (eigene Abbildung)

#### 4.1.2 Linienbündel 02 (Georgensgmünd und Röttenbach)

Linienbündel 02 (Georgensgmünd und Röttenbach) steht eine Neuvergabe bzw. Umstellung zur zweiten CVD-Periode im Jahr 2030 an. Derzeit sind ein Kleinbus sowie drei 12 Meter-Solobusse im Einsatz.

Eine Besonderheit im diesen Linienbündel stellt der sich bereits im Einsatz befindliche Kleinbus dar.

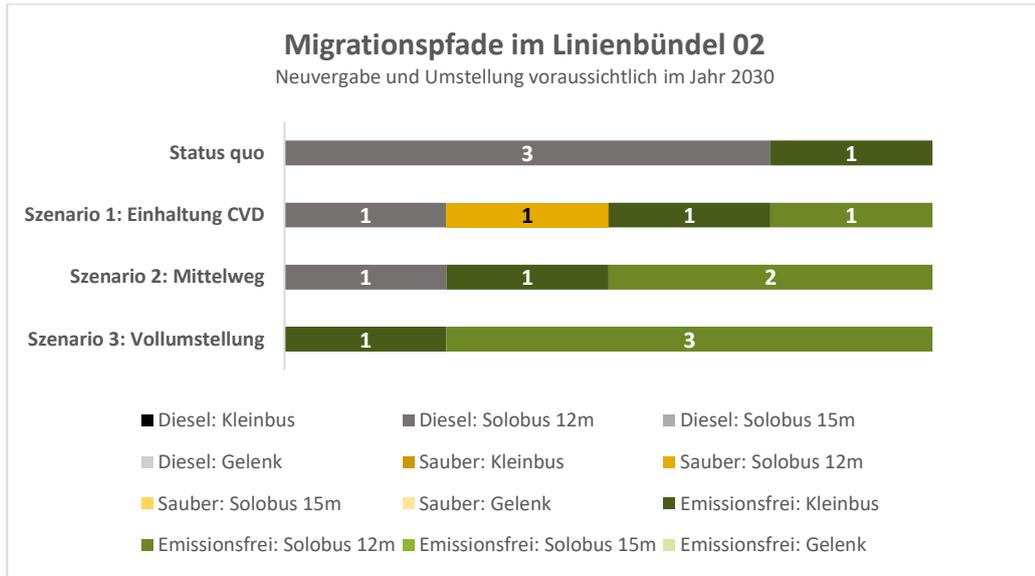


Abb. 40: Migrationspfade im Linienbündel 02 (eigene Abbildung)

### 4.1.3 Linienbündel 03: Teilnetz 1 und Teilnetz 2

Die Buslinien und Leistungen im Linienbündel 03 sind nach gemeinwirtschaftlichen sowie eigenwirtschaftlichen Leistungen zu differenzieren. Die eigenwirtschaftlichen Leistungen sind in den Teilnetzen 1 und 2 angegeben, während die Leistungen mit Bruttovertrag im folgenden Kapitel (Teilnetz 3) berücksichtigt werden.

Im Teilnetz eins und zwei sind nach Angaben des Landkreises Roth 8 Busse im Einsatz. Nach rechnerischer Aufteilung der Fahrzeuge auf Gefäßgrößen analog zur Zusammensetzung der Gefäßgrößen im gesamten Linienbündel wurden hier für den Status quo ein Kleinbus, fünf 12 Meter-Solobusse sowie zwei 15 Meter-Solobusse mit konventionellem Antrieb zur Analyse herangezogen. Gemäß den CVD-Vorgaben und den Quoten der entwickelten Szenarien ergibt dies folgende Flottenumstellungen im Jahr 2028:

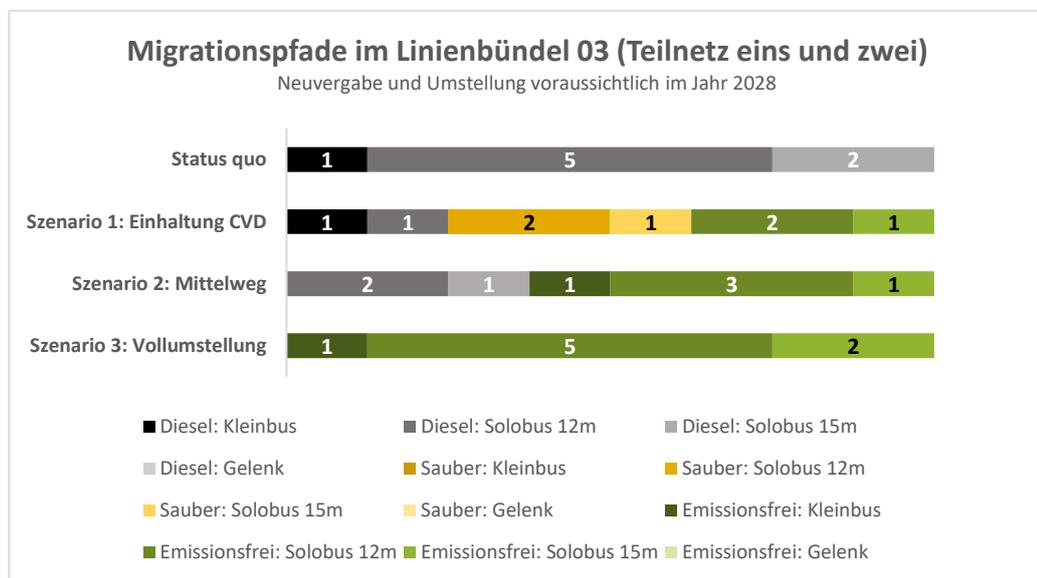


Abb. 41: Migrationspfade im Linienbündel 03 für die Teilnetze eins und zwei (eigene Abbildung)

#### 4.1.4 Linienbündel 03: Teilnetz drei (Hilpoltstein, Thalmässing und Greding)

Im Teilnetz drei sind nach Angaben des Landkreises Roth 16 Busse im Einsatz. Nach rechnerischer Aufteilung der Fahrzeuge auf Gefäßgrößen analog zur Zusammensetzung der Gefäßgrößen im gesamten Linienbündel wurden hier für den Status quo ein Kleinbus, elf 12m-Solobusse, drei 15 m-Solobusse und ein Gelenkbus mit konventionellem Antrieb zur Analyse herangezogen. Gemäß der CVD-Vorgaben und den Quoten der entwickelten Szenarien ergibt dies folgende Flottenumstellungen im Jahr 2028:

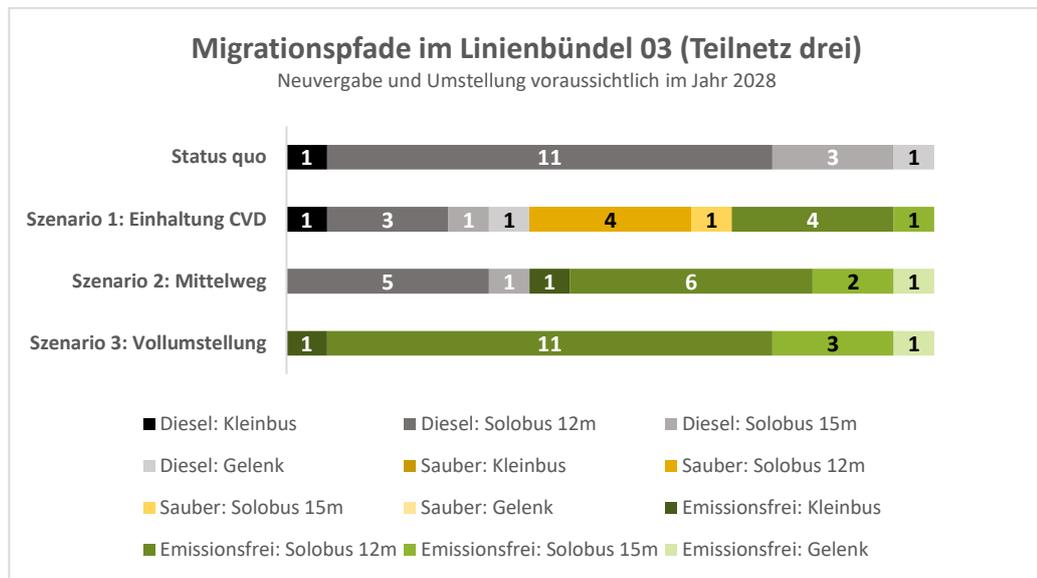


Abb. 42: Migrationspfade im Linienbündel 03 für das Teilnetz drei (eigene Abbildung)

#### 4.1.5 Linienbündel 04 (Stadtverkehr Roth-Büchenbach)

Der aktuelle Verkehrsvertrag für das Linienbündel 04 (Stadtverkehr Roth-Büchenbach) ist bis zum 14.12.2029 gültig, die Umstellung erfolgt daher (wiederum vereinfachend) zu Beginn des Jahres 2030 und in der zweiten Periode der CVD-Richtlinie.

Nach aktuellem Stand sind im Linienbündel 04 16 Fahrzeuge im Einsatz, davon 14 Solobusse mit einer Länge von 12 m und zwei Gelenkbusse:

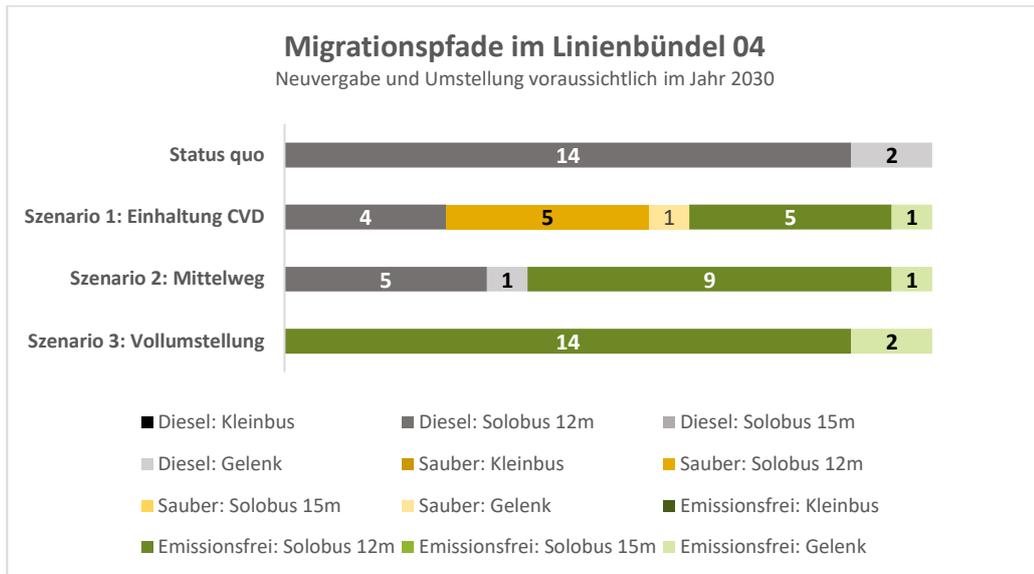


Abb. 43: Migrationspfade im Linienbündel 04 (eigene Abbildung)

#### 4.1.6 Linienbündel 06 (Wendelstein, Schwanstetten, Rednitzhembach)

Im Linienbündel 06 (Wendelstein, Schwanstetten, Rednitzhembach) steht eine Neuvergabe im Jahr 2034 an. Derzeit sind zwei Kleinbusse, 18 12m-Solobusse sowie vier Gelenkbusse im Einsatz, was zu einer Gesamtzahl an 24 Fahrzeugen im Linienbündel führt. Im Sinne der kaufmännischen Vorsicht ist gemäß den technischen Anforderungen und Besonderheiten im Linienbündel anzumerken, dass im Falle einer Vollumstellung (Szenario drei) ein potenzieller Fahrzeugbedarf im Umfang eines zwölf Meter-Solobusses anfällt:

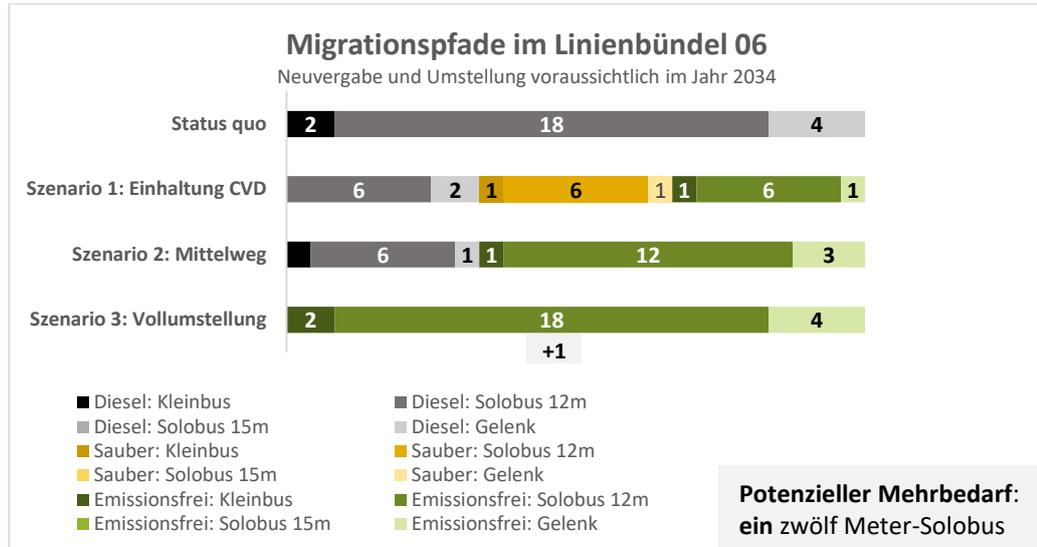


Abb. 44: Migrationspfade im Linienbündel 06 (eigene Abbildung)

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass die Neuvergabe des Linienbündel 06 erst deutlich nach Ende der 2. CVD-Periode (2030) ansteht. Die hier genannten bzw. berechneten Werte für das Szenario 1 entsprechen den Vorgaben der „letzten“, 2. Periode, wenngleich neue Quoten ab dem Jahr 2030 zu erwarten sind. Diese Besonderheit wird in den folgenden Kapiteln entsprechend berücksichtigt.

#### 4.1.7 Linienbündel 07 (Spalt, Abenberg, Kammerstein (Neukonzept inkl. TL 2))

Im eigenwirtschaftlichen Linienbündel 07 (Spalt, Abenberg, Kammerstein (Neukonzept inkl. TL 2)) sind nach Angaben des Landkreises Roth 14 Busse im Einsatz. Diese Anzahl setzt sich aus einem Kleinbus, zehn Solobussen mit einer Länge von 12 m sowie drei Solobussen. Auch in LB 07 ist im Sinne der kaufmännischen Vorsicht von einem potenziellen Mehrbedarf eines Solo-Busses auszugehen. Gemäß den CVD-Vorgaben und den Quoten der entwickelten Szenarien ergibt dies folgende Flottenumstellungen im Jahr 2028:

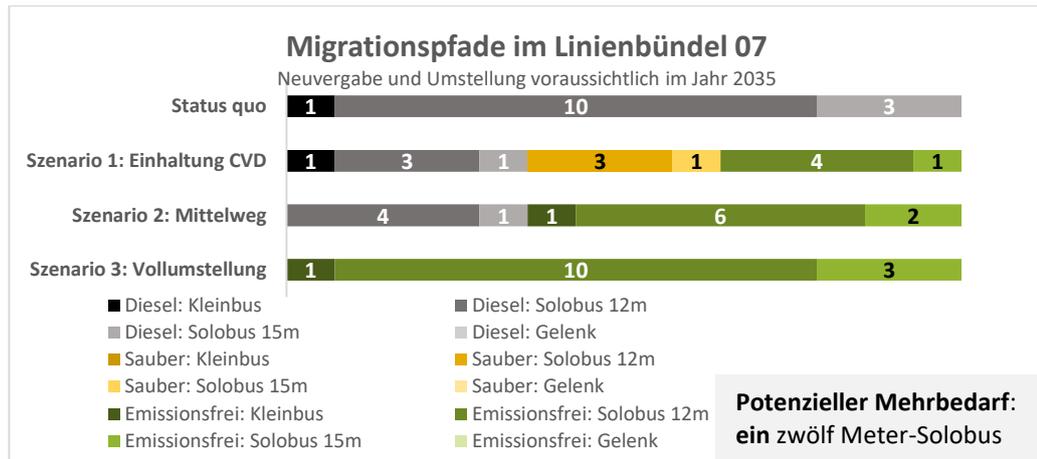


Abb. 45: Migrationspfade im Linienbündel 07 (eigene Abbildung)

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass die Neuvergabe des Linienbündel 07 erst deutlich nach Ende der 2. CVD-Periode (2030) ansteht. Die hier genannten bzw. berechneten Werte für das Szenario 1 entsprechen den Vorgaben der „letzten“, 2. Periode, wenngleich neue Quoten ab dem Jahr 2030 zu erwarten sind. Diese Besonderheit wird in den folgenden Kapiteln entsprechend berücksichtigt.

## 4.2 Vorgehen der Kosten-Nutzen-Analyse

Für die integrierte kaufmännische Bewertung ist eine detaillierte Kostenabschätzung unter Berücksichtigung der bisherigen Ergebnisse und Migrationspfade zu erstellen. Dazu werden alle bisher erarbeiteten Maßnahmen und Szenarien der geplanten Flottentransformation werden nun abschließend zusammengeführt und betriebswirtschaftlich bewertet.



Abb. 46: Vorgehensweise PwC Green Mobility Calculator (eigene Abbildung)

Dazu greifen wir auf das bewährte Instrument des „PwC Green Mobility Calculator“ (GMC) zurück, welches die Darstellung einer sukzessiven Technologieumstellung in Jahresscheiben und entsprechend kumuliert über die Vertragslaufzeit der Linienbündel ermöglicht. Neben den anfallenden laufenden (Betriebs-)Kosten wurden ferner Einmaleffekte wie Infrastruktur-, Management-, Software-, Projekt- und Schulungskosten berücksichtigt. Konkret wurden im GMC die erforderlichen Investitionen in Fahrzeuge und Infrastruktur sowie daraus entsprechende Vorhaltungskosten (Abschreibung, Zinsen, Versicherung bzw. je nach Beschaffungsmodell entsprechende Entgelte) abgeleitet. Ebenso ermittelt wurden die Kosten der Fahrzeug- und Infrastrukturinstandhaltung (Werkstatt- und Wartungspersonal, Material und Fremdleistungen) sowie die Bereitstellungskosten (vor allem Betanken/Laden und Rangieren), die Treibkraftkosten (Strom, Wasserstoff etc. im Vergleich zum Dieselantrieb als Referenz) und die Kosten eines etwaigen Fahrpersonalmehrbedarfs.

Im Rahmen unserer detaillierten Kostenbetrachtung wurden sowohl auf Ist-Kostenwerte des LK Roth als auch insbesondere auf Benchmarkingwerte (auf Grundlage der umfassenden PwC-ÖPNV-Datenbank) zurückgegriffen.

Die wirtschaftliche Betrachtung erfolgt ferner anhand der Kostenstrukturen der Verkehrsunternehmen im Landkreis Roth auf Ebene betrieblicher Funktionsbereiche. Diese Struktur wird in der folgenden Abbildung verdeutlicht.

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

Abb. 47: Kostenstruktur auf Funktionsbereichsebene

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

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

## 4.3 Prämissen

### 4.3.1 Investitionen

#### 4.3.1.1 Fahrzeuge

Die Anschaffungspreise konventioneller Diesel- und batterieelektrischer Busse unterscheiden sich zum derzeitigen Stand noch um den einen Faktor >2. Aus den Daten unserer PwC-Datenbank gehen aktuelle Anschaffungskosten für konventionelle Dieselfahrzeuge als Solo-Fahrzeug in Höhe von etwa 260 T€ und für Gelenkfahrzeuge mit gleichem Antrieb von gut 340 T€ hervor. Diese Anschaffungskosten der Dieselfahrzeuge werden mit 1,5 % p. a. fortgeschrieben. Mit Blick auf das aktuelle Angebot an Batteriebusen 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. 800 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 bis vor kurzem erheblich gefördert und beeinflusst wurde. Die Batteriebusnachfrage erfuhr 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 582 T€ und für Gelenk-Batteriebusse mit 776 T€ angesetzt. Dies entspricht einer vorsichtigen Kostenreduktion von rund 5 % im Vergleich zu den heutigen Anschaffungspreisen.

Für Brennstoffzellenbusse liegen die Anschaffungskosten bei 700 T€ für einen zwölf Meter-Solobus, für ein Gelenkbus mit Wasserstoffantrieb ist derzeit ein Anschaffungspreis von 900 T€ anzusetzen. Analog zum BEV-Antrieb ist auch beim FCEV-Antrieb eine positive Entwicklung, höhere Standardisierung und bessere Wirtschaftlichkeit in den kommenden Jahren zu erwarten, sodass hier ebenfalls eine Kostenreduktion angenommen wird. Ab dem Jahr 2029 liegt der Anschaffungspreis für einen zwölf Meter-Solobus somit bei etwa 679 T€, für einen Gelenkbus bei etwa 873 T€.

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

#### 4.3.1.2 Ladeinfrastruktur

Der Aufbau der Ladeinfrastruktur lässt sich hinsichtlich mehrerer Stufen unterscheiden. 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 müssen sorgfältig geplant und budgetiert werden. Die Abschreibung der Ladepunkte und Ladeelektronik (Stufe 1) erfolgt über zehn Jahre. Die Abschreibung der übrigen Bestandteile der Ladeinfrastrukturkosten erfolgt über 20 Jahre.

Die Stufe eins umfasst Aufwendungen in Höhe von 21.250 € im Zusammenhang mit Tiefbauarbeiten, Kabelwegen und baulichen Anpassungen am Gelände. Für Stufe zwei sind für Trafos inklusive Anpassungen am Gelände, Gebäude für die Ladeinfrastruktur und Verlegung von Kabelwegen in Gebäuden Investitionen in Höhe von 29.750 € zu erwarten. Die Stufe drei umfasst Ladepunkte und Ladeelektronik und voraussichtliche Investitionskosten in Höhe von 34 T€. Insgesamt sind somit Kosten in Höhe von 85 T€ zu erwarten, die Kosten werden mit 1,5 % p. a. dynamisiert.

	<b>2024 (Status quo)</b>
Stufe 1 - Tiefbau, Kabelwege, Gelände	21.250 €
Stufe 2 - Trafos inkl. Gebäude, Gebäude LIS, Kabelwege in Gebäuden	29.750 €
Stufe 3 - Ladepunkte, Ladeelektronik	34.000 €
<b>Summe</b>	<b>85.000 €</b>

*Tab. 33: Prämissen der Anschaffungskosten für Ladeinfrastruktur für BEV-Fahrzeuge*

**Beispielhafte Abschätzung der Ladeinfrastrukturkosten für das Ladeinfrastrukturkonzept Standort Röhler (siehe Steckbrief Kapitel 3.4.2):**

Ausgehend vom Konzeptentwurf für den Standort Röhler zu LB 2 und LB 4 mit 6 Ladeinfrastruktursystemen und je 8 Ladepunkten pro System werden 48 Ladepunkte angesetzt. Die Umstellung der LB erfolgt zum Jahr 2030, die Errichtung der Ladeinfrastruktur sollte also zeitlich spätestens im Jahr 2029 erfolgen. Die erste Abschätzung der Kosten für das gesamthafte Ladeinfrastruktursystem entsprechend der fortgeschriebenen (1,5% p. a.) Stufen 1-3 ergibt folgende Werte:

<b>Abschätzung Anschaffungskosten für 48 Ladepunkte</b>	<b>Kosten (gerundet)</b>
Stufe 1 - Tiefbau, Kabelwege, Gelände	1.100.000 €
Stufe 2 - Trafos inkl. Gebäude, Gebäude LIS, Kabelwege in Gebäuden	1.540.000 €
Stufe 3 - Ladepunkte, Ladeelektronik	1.760.000 €
<b>Summe</b>	<b>4.400.000 €</b>

Zusätzlich fallen bei der Errichtung der Ladeinfrastruktur Kosten für Bauherrenaufgaben und die Bauüberwachung an. Hierfür wurden Kosten in Höhe von 5 % und 10 % der Summe der Investitionskosten angesetzt.

Hinsichtlich der Planung der Infrastruktur für Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) wird von einer vereinfachten Annahme ausgegangen.

Es wird angenommen, dass eine weniger leistungsfähige Ladeinfrastruktur erforderlich ist, um die verschiedenen Aspekte des Fahrzeugbetriebs zu ermöglichen. Dazu gehören die Vorkonditionierung und Klimatisierung der Fahrzeuge sowie das Laden der Pufferbatterien der Brennstoffzellen(-Range-Extender)-Fahrzeuge. Die angesetzten Kosten für die Ladeinfrastruktur

liegen in Höhe der Stufe 3 der Ladeinfrastruktur (siehe Tab. 33: Prämissen der Anschaffungskosten für Ladeinfrastruktur für BEV-Fahrzeuge).

Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass der notwendige Wasserstoff nicht in Eigenregie produziert, gespeichert und betankt wird, sondern von Dritten an externen Tankstellen bereitgestellt wird (= Fremdbezug).

#### 4.3.1.3 Werkstattinfrastruktur

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

Grundlegend werden folgende weitere Ausstattungen der Werkstatt erforderlich:

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

Hierfür werden insgesamt Investitionen in Höhe von 200 T€ angesetzt, deren Abschreibung über zehn Jahre erfolgt. Aufgrund der geringeren Anzahl an Fahrzeugen mit alternativen Antrieben im Szenario der Mindestbefüllung der CVD-Quoten (vgl. Kapitel 4.1, Szenario 1) werden für die Anschaffung der Werkstattausrüstung im Szenario 1 vereinfachend 100 T€ angesetzt.

#### 4.3.2 Betriebsbezogene Aufwendungen

##### 4.3.2.1 Treibkraft

Für die Ermittlung der Treibkraftkosten innerhalb der Szenarien und für die unterschiedlichen Antriebstechnologien der Fahrzeuge werden Treibkraftverbräuche bzw. die Energiebedarfe gemäß den Analysen aus Kapitel 2 angenommen:

<b>Durchschnittsverbrauch pro Kilometer - Pro Umlauf [in kWh/km], BEV</b>				
	Kleinbus	Solobus (12m)	Solobus (15m)	Gelenkbus
<b>Ehard</b>	0,52	1,34	1,71	(keine Angabe)
<b>LB 605/607</b>	(keine Angabe)	1,33	1,66	(keine Angabe)
<b>OVF</b>	0,47	1,29	(keine Angabe)	1,88
<b>Röhler</b>	0,45	1,29	1,55	1,86
<b>Rombs</b>	(keine Angabe)	1,30	1,61	(keine Angabe)
<b>Ø</b>	<b>0,48 kWh/km</b>	<b>1,31 kWh/km</b>	<b>1,63 kWh/km</b>	<b>1,87 kWh/km</b>

Tab. 34: Durchschnittsverbrauch von BEV-Fahrzeugen pro Kilometer und Umlauf für die Verkehrsunternehmen im Landkreis Roth, differenziert nach Gefäßgröße.

Durchschnittsverbrauch pro Kilometer - Pro Umlauf [in kgH <sub>2</sub> /km], FCEV				
	Kleinbus	Solobus (12m)	Solobus (15m)	Gelenkbus
<b>Ehard</b>	0,0333	0,0868	0,1105	(keine Angabe)
<b>LB 605/607</b>	(keine Angabe)	0,0855	0,1067	(keine Angabe)
<b>OVF</b>	0,0299	0,0824	(keine Angabe)	0,1208
<b>Röhler</b>	0,0289	0,0826	0,1002	0,1202
<b>Rombs</b>	(keine Angabe)	0,0843	0,1045	(keine Angabe)
<b>Ø</b>	<b>0,03 kg H<sub>2</sub>/km</b>	<b>0,08 kg H<sub>2</sub>/km</b>	<b>1,63 kg H<sub>2</sub>/km</b>	<b>0,12 kg H<sub>2</sub>/km</b>

Tab. 35: Durchschnittsverbrauch von FCEV-Fahrzeugen pro Kilometer und Umlauf für die Verkehrsunternehmen im Landkreis Roth, differenziert nach Gefäßgröße

Für die Dieselbusse werden Werte aus dem PwC-Benchmarking angenommen und in der Fortschreibung beibehalten.

Des Weiteren wurden Dieselpreis im Status quo erhoben. Für die Betrachtungen innerhalb der Untersuchungszeitraums bis zum Jahr 2045 wurden die Preise pro Einheit dynamisiert fortgeschrieben. Hinsichtlich der Dieselpreise 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.

Die folgende Tabelle zeigt auszugsweise die angesetzten Preise der Treibkraft pro Einheit. Es handelt sich hierbei um abgestimmte Werte mit einem Datenstand aus dem dritten Quartal des Jahres 2024. In der Zwischenzeit können sich Änderungen in Bezug auf die vorherrschenden Marktpreise der Treibstoffe ergeben.

Jahr	Treibstoffkosten Diesel je l	HVO100 je l	Fahrstromkosten je kWh	Wasserstoffkosten je kg
<b>2024</b>	1,40 €	1,61 €	0,27 €	12,99 €
<b>2030</b>	1,63 €	1,88 €	0,29 €	14,21 €
<b>2035</b>	1,79 €	2,06 €	0,32 €	15,30 €
<b>2040</b>	1,96 €	2,25 €	0,34 €	16,49 €

Tab. 36: Auszug der fortgeschriebenen Preise (netto) für Fahrstrom, Wasserstoff, Diesel und HVO 100-Diesel ("sauber")

#### 4.3.2.2 *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 Dieselnissen 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 Reduktion der Instandhaltungsaufwendungen von 10 % gegenüber den Kosten aus dem PwC-Benchmarking für Dieselnisse angesetzt. Für neu eingeflottete Brennstoffzellenbusse wird eine Kostenreduktion von 5 % gegenüber konventionellen Dieselfahrzeugen angesetzt.

So ergeben sich zwar geringere Aufwendungen in Bezug auf die Instandhaltung und Wartung von Batteriebussen, jedoch fällt nach einer gewissen Nutzungsdauer mit einem erforderlichen Batterietausch eine kostenintensive batteriebuspezifische Instandhaltungsmaßnahme an. Dieser fällt, je nach Nutzungsprofil und Systemauslegung, erfahrungsgemäß nach sieben bis zehn Einsatzjahren an. 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. Analog dazu wurde auch ein Tausch der Brennstoffzelle bei FCEV-Fahrzeugen angenommen.

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

#### 4.3.2.3 *Fahrdienst*

Im Linienbündel 06 und 07 ergibt sich – bei vorsichtiger Betrachtung – ein Mehrbedarf von je einem 12 m-Solobus. Die zusätzlichen Personalaufwendungen im Zusammenhang mit dem Mehrbedarf fallen für den ermittelten zeitlichen Dispositionsaufwand vernachlässigbar gering aus. Des Weiteren fällt die voraussichtliche Neuvergabe im Linienbündel 06 (2034) und 07 (2035) deutlich nach Ende der 2. CVD-Periode an. Diese Neuvergabe wird voraussichtlich in einem veränderten Marktumfeld stattfinden, das unter dem Einfluss rechtlicher und technologischer Entwicklungen steht.

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

#### 4.3.2.4 *Sonstiges*

Für die geplante Flottentransformation sind Schulungen des Fahr- und Werkstattpersonals erforderlich, darunter eine Hochvoltschulung für das Werkstattpersonal. 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. Abhängig vom Szenario sind für diese Aspekte Mehrkosten in Höhe von 50 T€ (Szenario 1), 100 T€ (Szenario 2) und 150 T€ (Szenario 3) zu erwarten.

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

#### 4.4 Ableitung der Ist-Kosten

Für die Bewertung der wirtschaftlichen Auswirkungen der Flottentransformation wurden benchmarkbasierte Kostenstrukturen vergleichbarer Verkehrsunternehmen als Berechnungsgrundlage angesetzt und anhand der Ist-Kosten des Landkreises Roth kalibriert. Die vom LK Roth bereitgestellten Kostendaten für fixe Kosten (Fahrzeuge und Overhead) und variable Kosten (Treibkraft und Personal) ergeben einen Kostensatz von 2,85 €/km für das durchschnittliche Leistungsbild über alle Linienbündel im Landkreis Roth. Hierin sind keine Ausgleichsleistungen enthalten. Der vom LK Roth datenseitig bereitgestellte Kostensatz mit Unterscheidung zwischen fixen und variablen Kosten eignet sich jedoch noch nicht, um die Maßnahmen und Effekte der Antriebsumstellung kostenseitig modellieren und berechnen zu können. Aus diesem Grund wurde auf Benchmarkingwerte aus der PwC-Datenbank zurückgegriffen, die auf das Leistungsbild im LK Roth kalibriert wurden. Es ergibt sich somit der folgende Kostensatz:

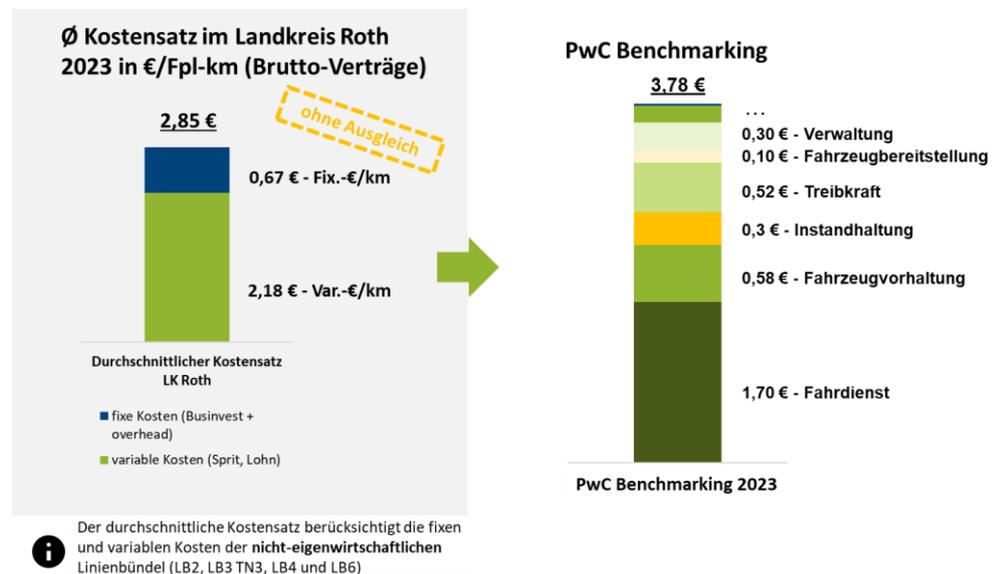


Abb. 48: Ist-Kosten im LK Roth und Kalibrierung mit Benchmarking, Benchmarkingwert differenziert nach Funktionsbereichen (eigene Darstellung)

Der durchschnittliche Kostensatz in Form des PwC-Benchmarking-Wertes wurde daraufhin anhand der Linienbündelspezifischen Kostenstruktur kalibriert. Die resultierenden Kostensätze der einzelnen Linienbündel wurden anschließend mit den zuvor erläuterten Fortschreibungsprämissen jahresweise dynamisiert. Diese Fortschreibung der benchmarkbasierten Ist-Kosten bildet die Kosten des fortgeschriebenen Referenzszenarios ab und liefert die Grundlage der Ermittlung der antriebsbedingten Mehrkosten der Flottenumstellung.

## 4.5 Ergebnisse der Kaufmännischen Bewertung der Dekarbonisierung der Flotte

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für den Landkreis Roth dargestellt. Dies erfolgt getrennt für die unterschiedlichen Antriebsarten, also zunächst für eine reine Batteriebusflotte und anschließend für eine Flotte mit Brennstoffzellenbussen. Im Anschluss an das Ergebnis der Fortschreibung des Status quo in Form des beschriebenen Referenzszenarios werden die Mehrkosten der drei Umstellungsszenarios (CVD-Szenario, mittleres Szenario, Vollumstellungsszenario) aufgezeigt.

Die Kosten möglicher zusätzlicher Betriebsöffnungen sind nicht Bestandteil der folgenden kaufmännischen Bewertung der Flottentransformation im Landkreis Roth und müssen im Rahmen einer Feinplanung ermittelt werden.

Die Fortschreibung des Status quo erfolgt entsprechend der dargestellten Prämissen bis zum Jahr 2040 bzw. für die Linienbündel 06 und 07 aufgrund des späten Zeitpunktes der Neuausschreibung bis zum Jahr 2045. Es handelt sich hierbei um eine Inflationierung der Kostentreiber der Rother Verkehrsunternehmen. In dieser Fortschreibung werden weiterhin ausschließlich Dieselfahrzeuge beschafft. An dieser Stelle sei nochmals auf den fiktiven Charakter dieser Fortschreibung hingewiesen. Auf Grund der Vorgaben der CVD ist eine Umsetzung für alle Linienbündel in Summe in dieser Form nicht möglich. Die Darstellung dient lediglich als Referenz zum Vergleich der drei erarbeiteten Umstellungsszenarios.

Die folgenden zwei Tabellen bieten einen Überblick über die Gesamtkosten des Referenzszenarios sowie die kumulierten Mehrkosten nach Szenario und Linienbündel.

**Hinweis:** in der letzten Zeile „Summe/Durchschnitt BEV“ bzw. „Summe/Durchschnitt FCEV“ sind die Gesamtkosten als Summe und die prozentualen Kostensteigerungen als Durchschnitt angegeben.

Technologie-variante Batterie - jeweils über 10 Jahre -	Kosten Referenz-Szenario	Mehrkosten S1 "CVD-Quoten"		Mehrkosten S2 "Mittelweg"		Mehrkosten S3 "Vollumstellung"	
LB 01 (12/2026)	6,6 Mio.€	0,7 Mio.€	+10,8%	1,8 Mio.€	+27,5%	2,7 Mio.€	+41,2%
LB 02 (09/2030)	8,0 Mio.€	0,6 Mio.€	+8,0%	1,0 Mio.€	+12,1%	1,3 Mio.€	+16,8%
LB 03 Teil 1 + Teil 2 (12/2027)	16,2 Mio.€	1,2 Mio.€	+7,6%	2,0 Mio.€	+12,3%	3,1 Mio.€	+19,4%
LB 03 Teil 3 (12/2027)	22,4 Mio.€	2,8 Mio.€	+12,3%	4,4 Mio.€	+19,4%	6,8 Mio.€	+30,2%
LB 04 (12/2029)	30,0 Mio.€	3,2 Mio.€	+10,6%	4,4 Mio.€	+14,6%	6,5 Mio.€	+21,8%
LB 06 (08/2034)	47,8 Mio.€	2,7 Mio.€	+5,6%	4,9 Mio.€	+10,3%	7,9 Mio.€	+16,4%
LB 7 (08/2035)	32,0 Mio.€	1,7 Mio.€	+5,4%	2,4 Mio.€	+7,6%	3,8 Mio.€	+11,9%
<b>Summe/Ø BEV</b>	<b>163,0 Mio.€</b>	<b>12,9 Mio.€</b>	<b>+8,6%</b>	<b>20,9 Mio.€</b>	<b>+14,8%</b>	<b>32,2 Mio.€</b>	<b>+22,5%</b>

Tab. 37: Übersicht über anfallende Mehrkosten bei der Flottenumstellung auf BEV.

Technologie-variante Wasserstoff - über 10 Jahre -	Kosten Referenz- Szenario	Mehrkosten S1 "CVD-Quoten"		Mehrkosten S2 "Mittelweg"		Mehrkosten S3 "Vollumstellung"	
LB 01 (12/2026)	6,6 Mio.€	0,9 Mio.€	+13,3%	2,6 Mio.€	+38,5%	4,0 Mio.€	+59,9%
LB 02 (09/2030)	8,0 Mio.€	0,9 Mio.€	+11,5%	2,0 Mio.€	+25,4%	2,9 Mio.€	+35,9%
LB 03 Teil 1 + Teil 2 (12/2027)	16,2 Mio.€	3,1 Mio.€	+19,0%	4,2 Mio.€	+25,7%	6,9 Mio.€	+42,5%
LB 03 Teil 3 (12/2027)	22,4 Mio.€	4,4 Mio.€	+19,4%	7,3 Mio.€	+32,4%	11,7 Mio.€	+52,3%
LB 04 (12/2029)	30,0 Mio.€	5,8 Mio.€	+19,3%	8,8 Mio.€	+29,2%	13,7 Mio.€	+45,6%
LB 06 (08/2034)	47,8 Mio.€	5,6 Mio.€	+11,7%	12,1 Mio.€	+25,3%	18,4 Mio.€	+38,4%
LB 7 (08/2035)	32,0 Mio.€	3,6 Mio.€	+11,2%	7,8 Mio.€	+24,5%	13,3 Mio.€	+41,6%
<b>Summe/ Ø FCEV</b>	<b>163,0 Mio.€</b>	<b>24,2 Mio.€</b>	<b>+16,1%</b>	<b>44,7 Mio.€</b>	<b>+29,3%</b>	<b>70,8 Mio.€</b>	<b>+45,6%</b>

Tab. 38: Übersicht über anfallende Mehrkosten bei der Flottenumstellung auf FCEV.

Werden alle Linienbündel im Landkreis Roth (ohne Differenzierung in Linienbündel) betrachtet, so entstehen abhängig von Antriebsart und Szenario durchschnittliche Mehrkosten zwischen 8,6 % und 45,6 %. Durchweg die geringsten Mehrkosten sind bei batterieelektrischen Fahrzeugen zu beobachten, wobei nur das Szenario der Vollumstellung (S3) auf BEV höhere Mehrkosten verursacht (+22,5 %) als die Umstellung auf Brennstoffzellenbusse im Szenario der Mindestbefüllung der CVD-Quoten (16,1 %):

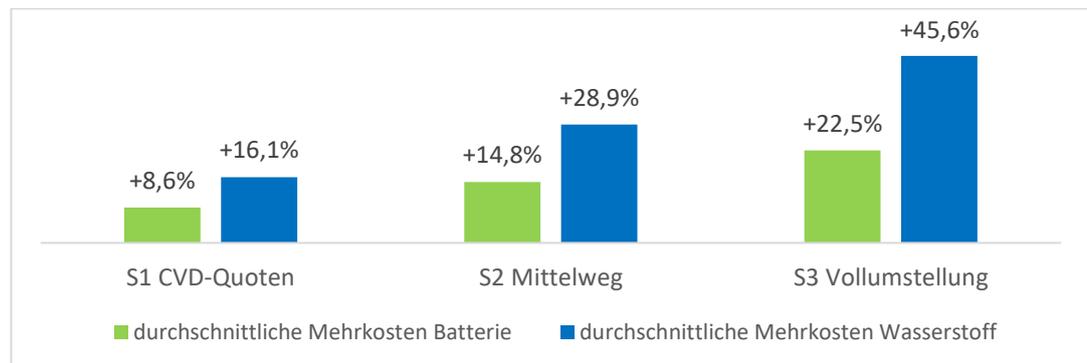


Abb. 49: durchschnittliche Mehrkosten für die Flottendekarbonisierung, differenziert nach Antriebsart und Szenario (eigene Abbildung)

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse und Kostensätze für jedes Linienbündel im Detail vorgestellt.

#### 4.5.1 Ergebnisse im Linienbündel 01 (Rohr)

Im Linienbündel 01 im Raum Rohr sind sieben Busse, darunter zwei Kleinbusse und fünf 12 m-Solobusse, unterwegs und erzielen eine jährliche Betriebsleistung von 137.991 km. Die Betriebsleistung pro Fahrzeug fällt hier folglich gering aus, was Auswirkungen auf die Kostensätze hat.

Ausgehend von einem abgeleiteten benchmarkbasierten Kostensatz von 4,32 € pro Kilometer zum Status quo im Jahr 2023 steigen die Kostensätze im Jahr der Umstellung auf BEV – abhängig vom Szenario – um circa 6 % (Referenzszenario), 20 % (S1), 37 % (S2) oder 52 % (S3):

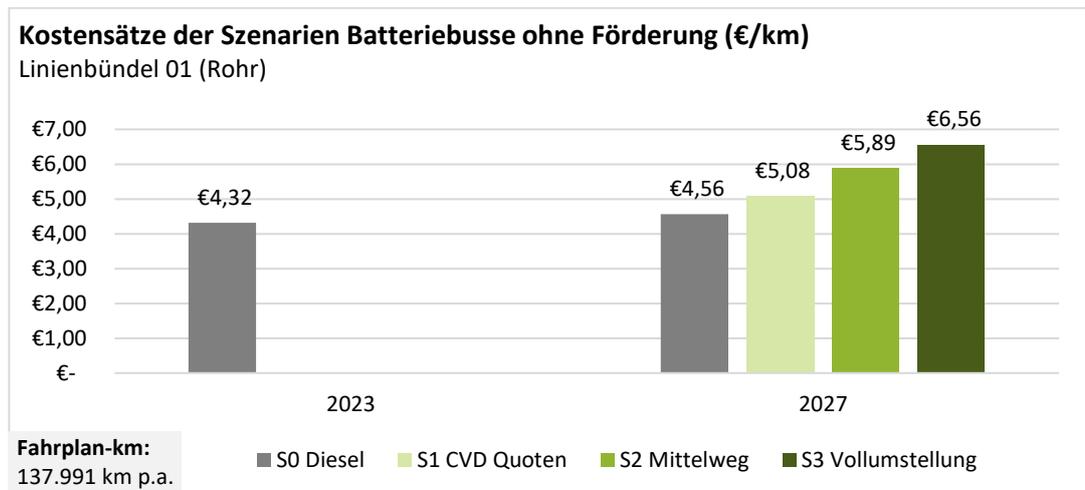


Abb. 50: Kostensätze für BEV-Szenarien im Linienbündel 01 (eigene Abbildung)

Bei der Umstellung auf Brennstoffzellenbusse steigen die Kosten um 4 % (Referenzszenario), 22 % (S1), 49 % (S2) bzw. 71 % (S3):

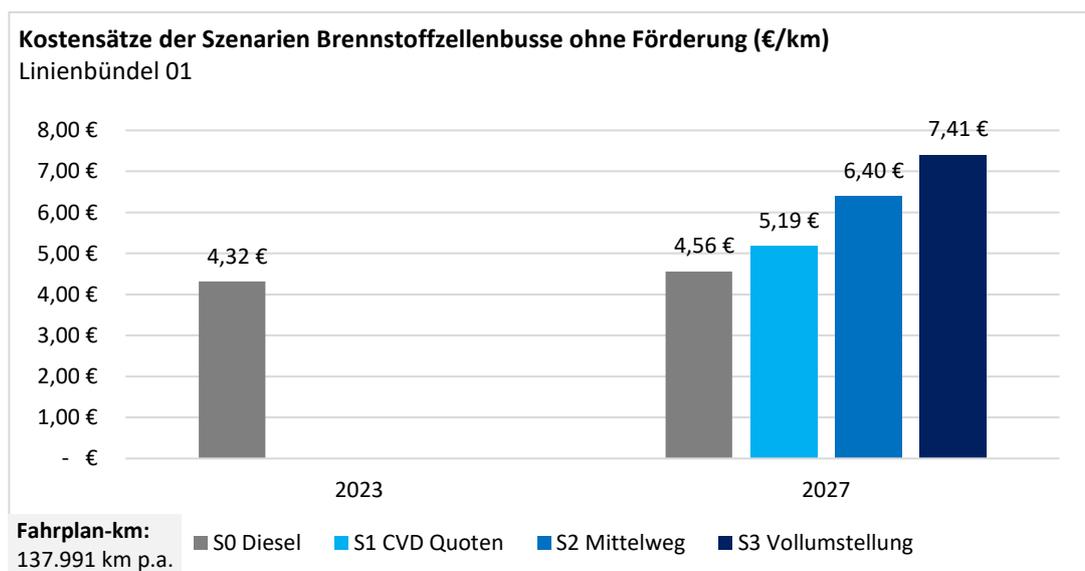


Abb. 51: Kostensätze für FCEV-Szenarien im Linienbündel 01 (eigene Abbildung)

Vergleichende Betrachtung der kumulierten Mehrkosten von BEV- und FCEV-Fahrzeugen gegenüber dem Referenzszenario Linienbündel 01				
	Referenz-szenario	S1	S2	S3
BEV	6,62 Mio. €	+ 717 T€ (10,8 %)	+ 1.820 T€ (27,5 %)	+ 2.725 T€ (41,2 %)
FCEV		+ 882 T€ (13,3 %)	+ 2.552 T€ (38,5 %)	+ 3.967 T€ (59,9 %)

Tab. 39: Mehrkosten von der Flottenumstellung auf BEV und FCEV im Linienbündel 01 im Vergleich

#### 4.5.2 Ergebnisse im Linienbündel 02 (Georgensmünd und Röttenbach)

Im Linienbündel 02 (Georgensmünd und Röttenbach) sind vier Busse, darunter ein elektrisch betriebener Kleinbus und drei 12 m-Solobusse, unterwegs und erzielen eine jährliche Betriebsleistung von 188.042 km.

Ausgehend von einem Kostensatz von 3,62 € pro Kilometer zum Status quo im Jahr 2023 steigen die Kostensätze im Jahr der Umstellung – abhängig vom Szenario – um circa 11 % (Referenzszenario), 20 % (S1), 25 % (S2) oder 31 % (S3):

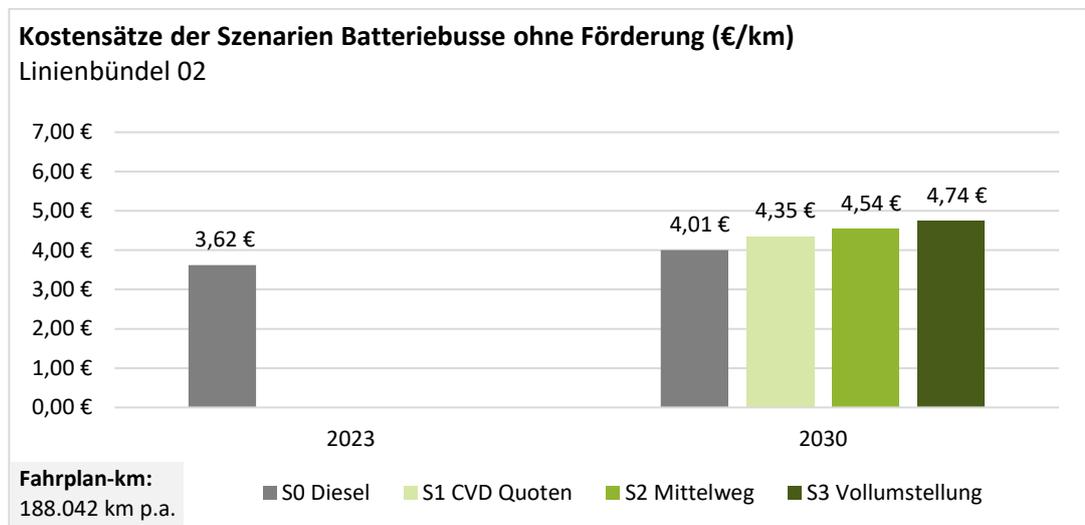


Abb. 52: Kostensätze für BEV-Szenarien im Linienbündel 02 (eigene Abbildung)

Bei der Umstellung auf Brennstoffzellenbusse steigen die Kosten um 13 % (Referenzszenario), 27 % (S1), 43 % (S2) bzw. 55 % (S3):

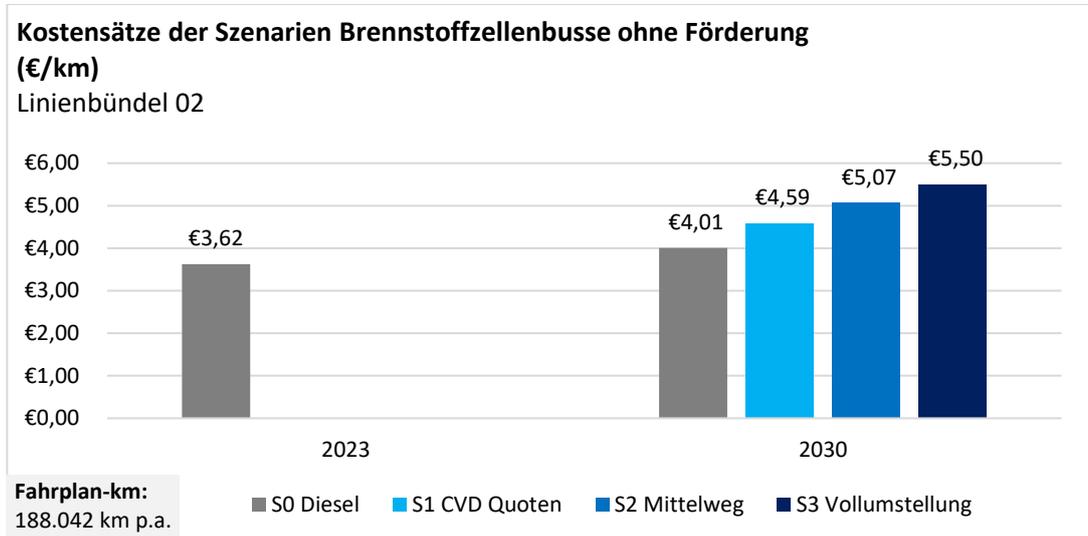


Abb. 53: Kostensätze für FCEV-Szenarien im Linienbündel 02 (eigene Abbildung)

**Vergleichende Betrachtung der kumulierten Mehrkosten von BEV- und FCEV-Fahrzeugen gegenüber dem Referenzszenario**  
Linienbündel 02

	Referenzszenario	S1	S2	S3
<b>BEV</b>	8,00 Mio. €	+ 638 T€ (8,0 %)	+ 971 T€ (12,1 %)	+ 1.345 T€ (16,8 %)
<b>FCEV</b>		+ 920 T€ (11,5 %)	+ 2.028 T€ (25,4 %)	+ 2.867 T€ (35,9 %)

Tab. 40: Mehrkosten von der Flottenumstellung auf BEV und FCEV im Linienbündel 02 im Vergleich

### 4.5.3 Ergebnisse im Linienbündel 03 (Hilpoltstein, Heideck, Greding, Thalmässing und Allersberg)

Das Linienbündel 03 ist in eigenwirtschaftliche Linien (Teilnetz eins und zwei) sowie in durch einen Bruttovertrag finanzierte Buslinien (Teilnetz drei) unterteilt (vgl. Kapitel 4.1.3 und 4.1.4).

Im gesamten Linienbündel werden 24 Busse eingesetzt, davon sind zwei Fahrzeuge Kleinbusse, 16 Busse 12m-Solobusse, fünf Busse 15m-Solobusse und ein Bus ein Gelenkbus. Nach Rücksprache mit dem Landkreis Roth sind hiervon 16 Busse im Teilnetz drei im Einsatz, der Anteil der Gefäßgrößen an den Fahrzeugen innerhalb der Teilnetze wurde – wie in Kapitel 4.1.3 beschrieben – rechnerisch bestimmt. Für eine bessere Vergleichbarkeit werden die beiden Netze getrennt betrachtet.

Der Kostensatz von 3,72 € pro Kilometer zum Status quo im Jahr 2023 in den Teilnetzen eins und zwei steigt im Jahr der Umstellung – abhängig vom Szenario – um circa 6 % (Referenzszenario), 16 % (S1), 20 % (S2) oder 28 % (S3):

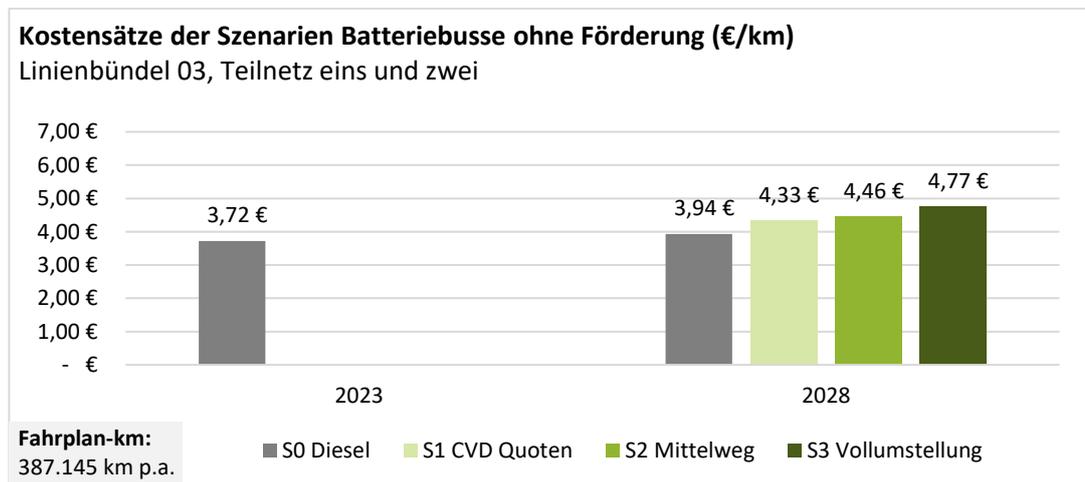


Abb. 54: Kostensätze für BEV-Szenarien im Linienbündel 03, Teilnetz eins und zwei (eigene Abbildung)

Bei der Umstellung auf Brennstoffzellenbusse steigen die Kosten auf den Teilnetzen eins und zwei um 6 % (Referenzszenario), 27 % (S1), 34 % (S2) bzw. 53 % (S3):

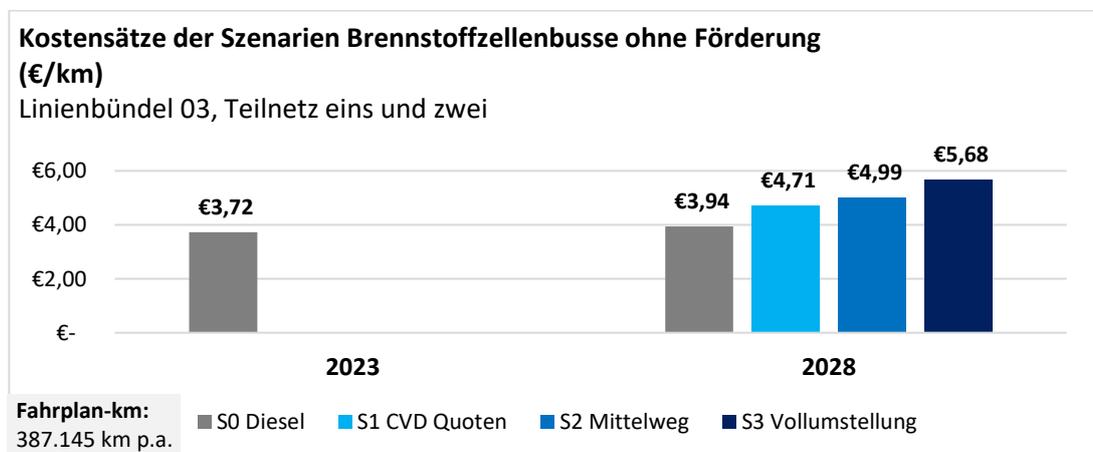


Abb. 55: Kostensätze für FCEV-Szenarien im Linienbündel 03, Teilnetz eins und zwei (eigene Abbildung)

Vergleichende Betrachtung der kumulierten Mehrkosten von BEV- und FCEV-Fahrzeugen gegenüber dem Referenzszenario Linienbündel 03, Teilnetz eins und zwei				
	Referenzszenario	S1	S2	S3
BEV	16,19 Mio. €	+ 1.227 T€ (7,6 %)	+ 1.991 T€ (12,3 %)	+ 3.132 T€ (19,4 %)
FCEV		+ 3.072 T€ (19,0 %)	+ 4.166 T€ (25,7 %)	+ 6.887 T€ (42,5 %)

Tab. 41: Mehrkosten von der Flottenumstellung auf BEV und FCEV im Linienbündel 03, Teilnetz eins und zwei im Vergleich

Im Teilnetz drei steigt der Kostensatz von 4,09 € um 7 % (Referenzszenario), 19 % (S1), 27 % (S2) bzw. 39 % (S3):

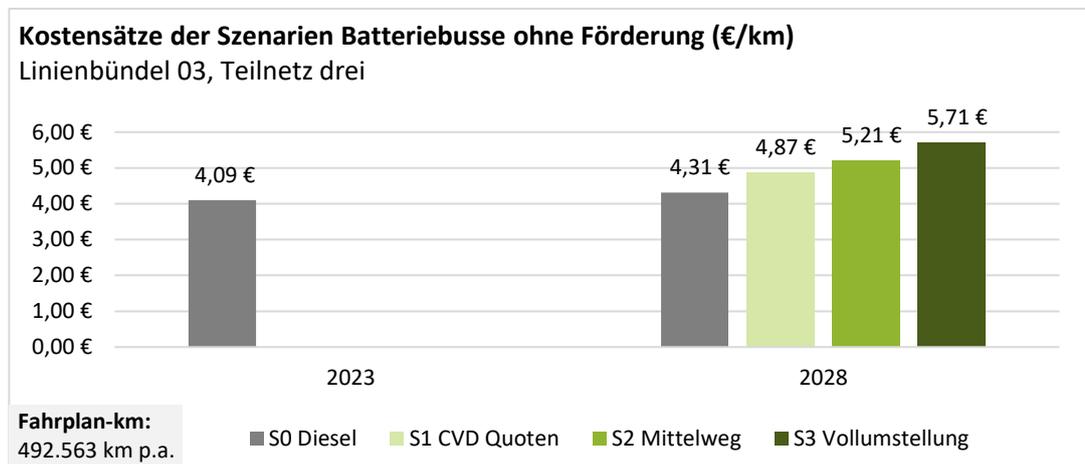


Abb. 56: Kostensätze für BEV-Szenarien im Linienbündel 03, Teilnetz drei (eigene Abbildung)

Bei der Umstellung auf Brennstoffzellenbusse steigen die Kosten im Teilnetz drei um 13 % (Referenzszenario), 27 % (S1), 43 % (S2) bzw. 55 % (S3):

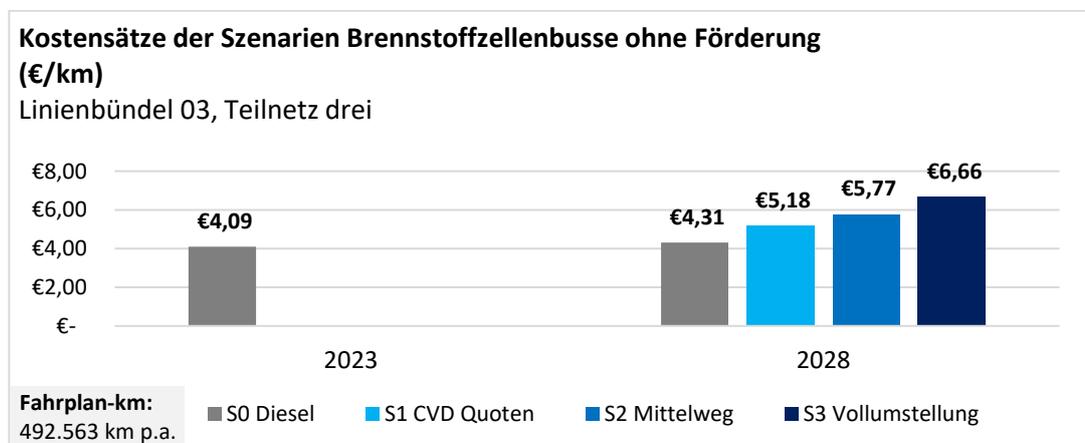


Abb. 57: Kostensätze für FCEV-Szenarien im Linienbündel 03, Teilnetz drei (eigene Abbildung)

Vergleichende Betrachtung der kumulierten Mehrkosten von BEV- und FCEV-Fahrzeugen gegenüber dem Referenzszenario Linienbündel 03, Teilnetz drei				
	Referenzszenario	S1	S2	S3
BEV	22,44 Mio. €	+ 2.752 T€ (12,3 %)	+ 4.357 T€ (19,4 %)	+ 6.775 T€ (30,2 %)
FCEV		+ 4.359 T€ (19,4 %)	+ 7.267 T€ (32,4 %)	+ 11.727 T€ (52,3 %)

Tab. 42: Mehrkosten von der Flottenumstellung auf BEV und FCEV im Linienbündel 03, Teilnetz drei im Vergleich

Die Betriebsleistung im Teilnetz eins und zwei beträgt 387.145 Fahrplan-Kilometer, im Teilnetz drei 492.563 Fahrplan-Kilometer pro Jahr.

#### 4.5.4 Ergebnisse im Linienbündel 04 (Roth und Büchenbach)

Im Linienbündel 04 (Roth und Büchenbach) sind 16 Busse, darunter 14 12m-Solobusse und zwei Gelenkbusse, im Einsatz und erzielen eine jährliche Betriebsleistung von 674.686 Fahrplan-km.

Ausgehend von einem Kostensatz von 3,87 € pro Kilometer zum Status quo im Jahr 2023 steigen die Kostensätze 2030 im Jahr der Umstellung – abhängig vom Szenario – um circa 11% (Referenzszenario), 21 % (S1), 25 % (S2) oder 34 % (S3):

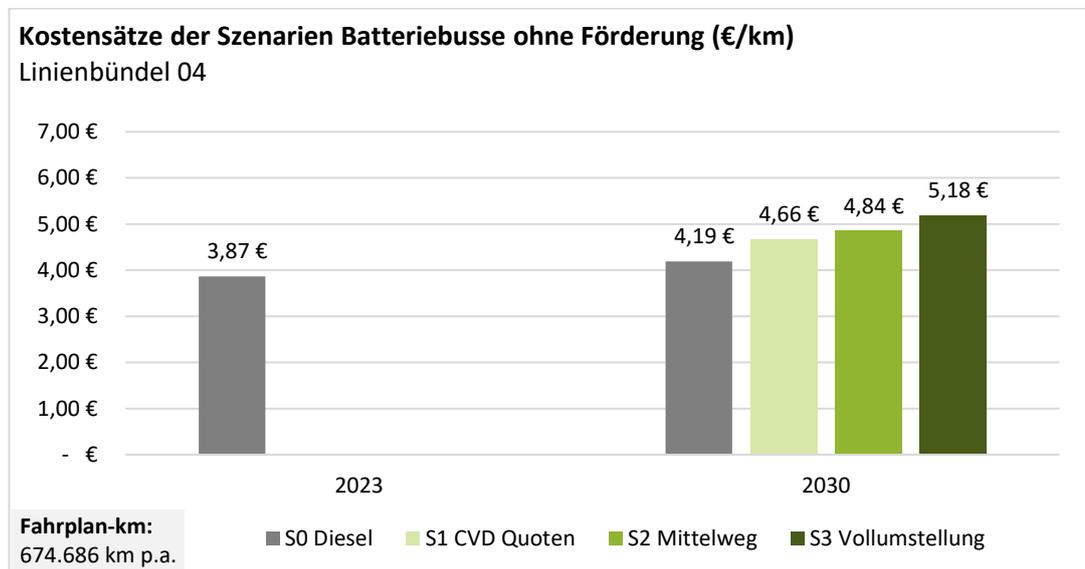


Abb. 58: Kostensätze für BEV-Szenarien im Linienbündel 04 (eigene Abbildung)

Für eine Umstellung auf Brennstoffzellenbusse im Jahr 2030 sind im Vergleich mit dem Kostensatz aus 2023 höhere Kostensätze um rund 8 % (Referenzszenario), 30 % (S1), 41 % (S2) bzw. 60 % (S3) zu erwarten:

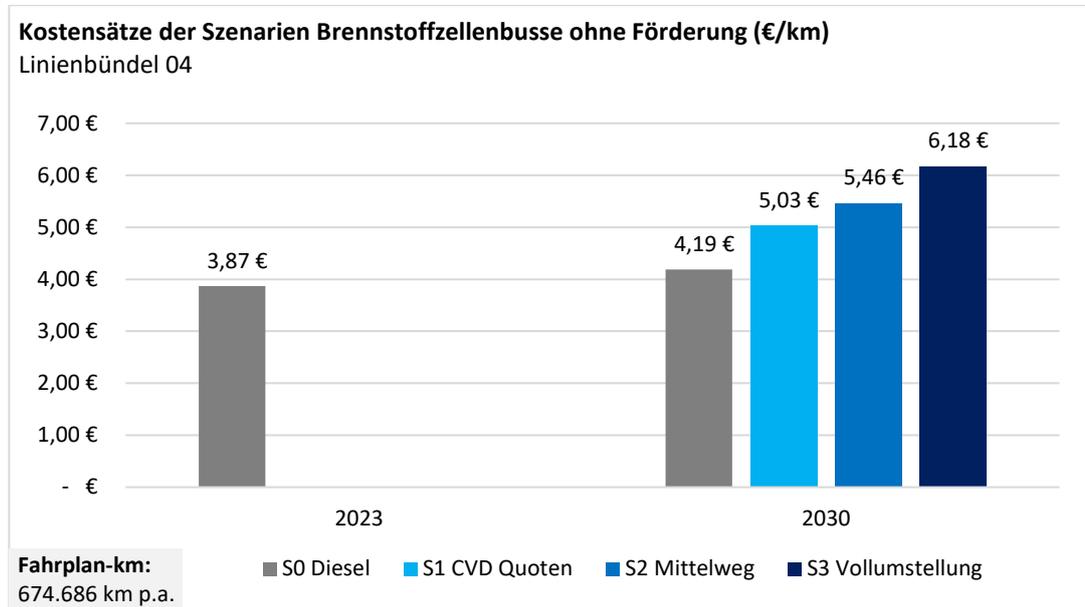


Abb. 59: Kostensätze für FCEV-Szenarien im Linienbündel 04 (eigene Abbildung)

**Vergleichende Betrachtung der kumulierten Mehrkosten von BEV- und FCEV-Fahrzeugen gegenüber dem Referenzszenario**  
Linienbündel 04

	Referenzszenario	S1	S2	S3
<b>BEV</b>	29,97 Mio. €	<b>+ 3.176 T€</b> (10,6 %)	<b>+ 4.377 T€</b> (14,6 %)	<b>+6.542 T€</b> (21,8 %)
<b>FCEV</b>		<b>+ 5.783 T€</b> (19,3 %)	<b>+ 8.755 T€</b> (29,2 %)	<b>+ 13.675 T€</b> (45,6 %)

Tab. 43: Mehrkosten von der Flottenumstellung auf BEV und FCEV im Linienbündel 04 im Vergleich

#### 4.5.5 Ergebnisse im Linienbündel 06 (Wendelstein, Schwanstetten und Rednitzhembach)

Im Linienbündel 06 werden 24 Busse eingesetzt, davon zwei Kleinbusse, 18 12m-Solobusse und vier Gelenkbusse. Die jährliche Betriebsleistung beträgt etwa eine Million Fahrplan-Kilometer.<sup>10</sup>

Ausgehend von einem Kostensatz von 3,78 € pro Kilometer zum Status quo im Jahr 2023 steigen die Kostensätze im Jahr der Umstellung – abhängig vom Szenario – um circa 19 % (Referenzszenario), 27 % (S1), 33 % (S2) bzw. 39 % (S3):

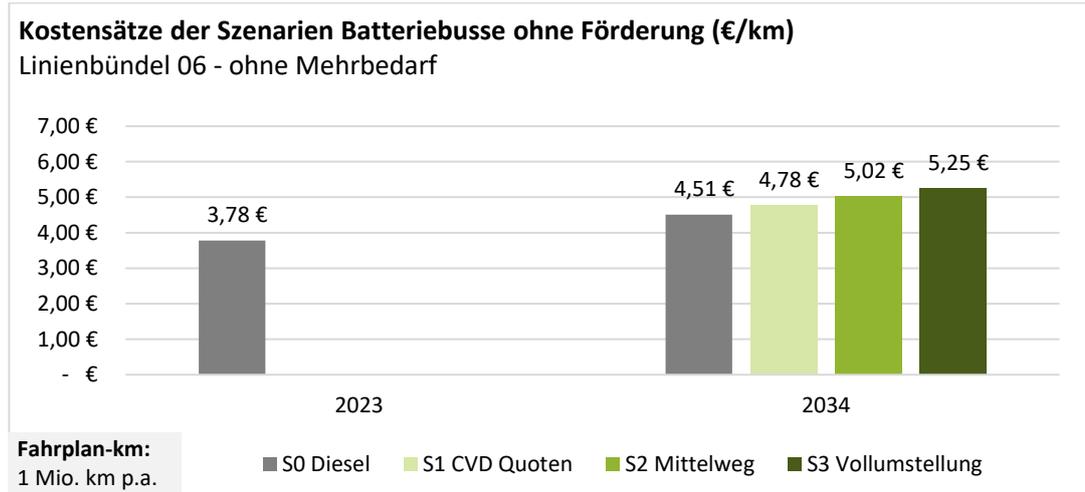


Abb. 60: Kostensätze für BEV-Szenarien im Linienbündel 06, ohne Mehrbedarf (eigene Abbildung)

Im Sinne der kaufmännischen Vorsicht werden auch die Kostensätze bzw. Ergebnisse unter Berücksichtigung eines potenziellen Mehrbedarfs von einem 12 m-Solobus berechnet. In diesem Fall steigt der Kostensatz im Szenario der Vollumstellung um sieben Cent pro Kilometer:

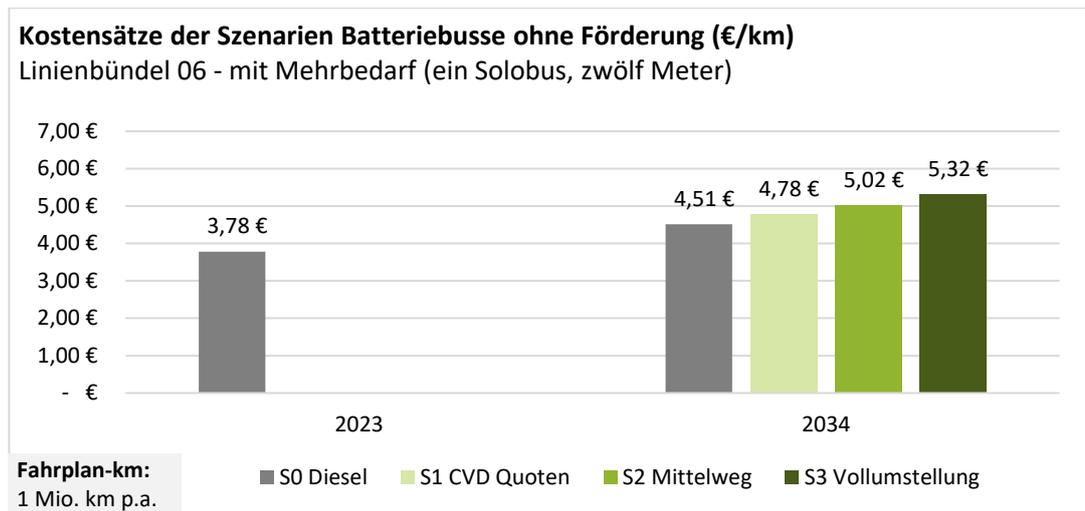


Abb. 61: Kostensätze für BEV-Szenarien im Linienbündel 06, mit Mehrbedarf (eigene Abbildung)

<sup>10</sup> Anmerkung: Annahme des Landkreises Roth.

Sofern ein weiteres BEV-Fahrzeug notwendig wird, steigt der Kostensatz zwischen 2023 und dem Szenario der Vollumstellung um 41 %, d.h. zwei Prozentpunkte mehr als ohne das zusätzliche Fahrzeug.

Werden Wasserstoffbusse erwägt, fallen 2034 im Vergleich zu 2023 um 17 % (Referenzszenario) bzw. 32 % (S1) bzw. 48 % (S2) bzw. 62 % (S3) gestiegene Kostensätze an. Bei einem weiteren Fahrzeug bzw. im Falle des Mehrbedarfs von einem 12 m-Solobus liegt der prozentuale Anstieg des Kostensatzes 2034 seit 2023 für das Szenario der Vollumstellung (S3) bei 64 % bzw. bei acht Cent mehr als im Szenario drei ohne Fahrzeugmehrbedarf:

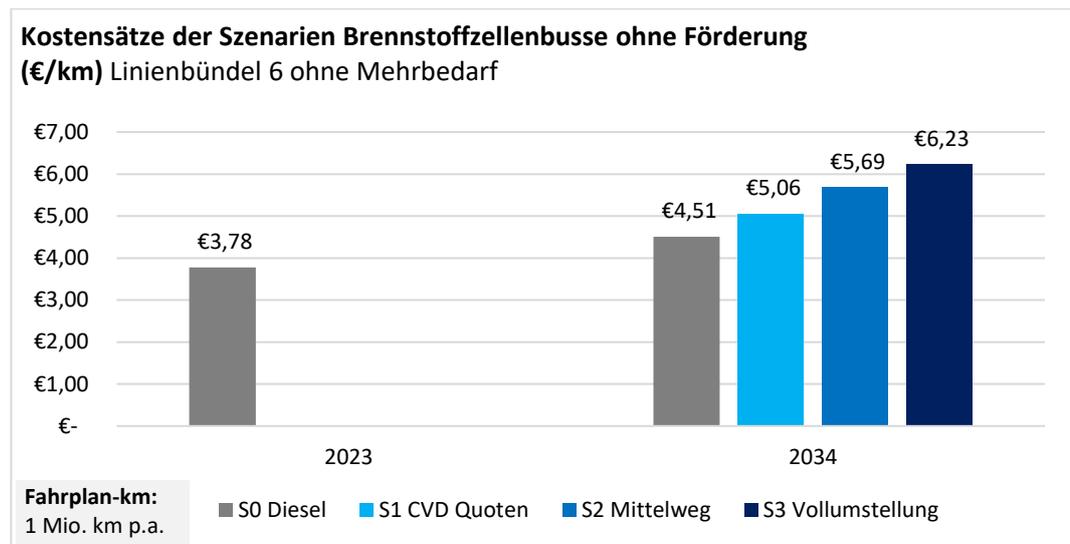


Abb. 62: Kostensätze für FCEV-Szenarien im Linienbündel 06, ohne Mehrbedarf (eigene Abbildung)

Wird ein weiteres Fahrzeug benötigt, so steigt der Kostensatz im Szenario der Vollumstellung um 8 Cent pro Kilometer:

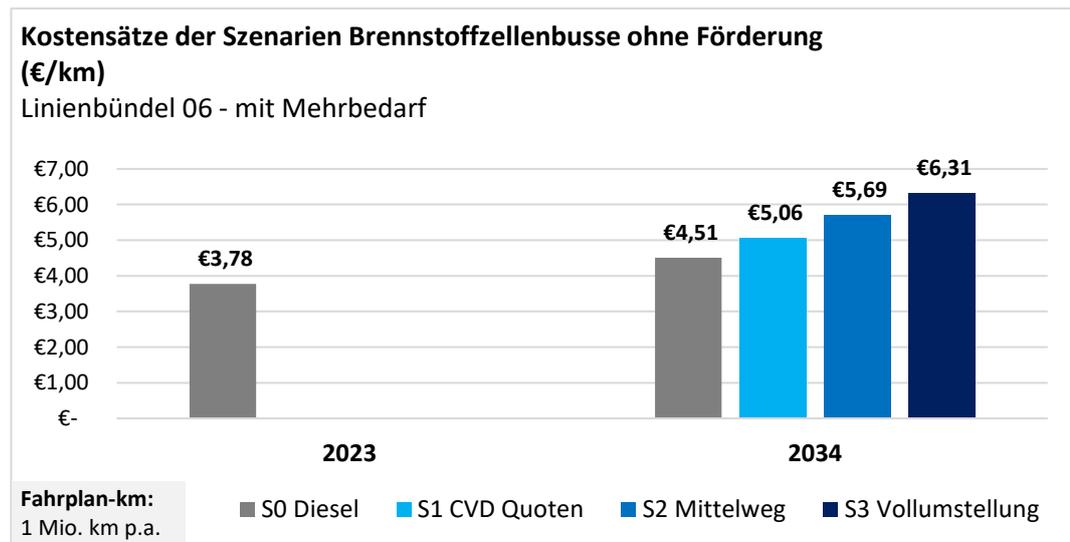


Abb. 63: Kostensätze für FCEV-Szenarien im Linienbündel 06, mit Mehrbedarf (eigene Abbildung)

Vergleichende Betrachtung der Mehrkosten von BEV- und FCEV-Fahrzeugen gegenüber dem Referenzszenario				
Linienbündel 06, ohne Mehrbedarf				
	Referenzszenario	S1	S2	S3
BEV	47,80 Mio. €	+ 2.665 T€ (5,6 %)	+ 4.926 T€ (10,3 %)	+ 7.144 T€ (14,9 %)
FCEV		+ 5.576 T€ (11,7 %)	+ 12.086 T€ (25,3 %)	+ 17.605 T€ (36,8 %)
Linienbündel 06, mit Mehrbedarf (ein 12m-Solobus)				
BEV	47,80 Mio. €	+ 2.665 T€ (5,6 %)	+ 4.926 T€ (10,3 %)	+ 7.851 T€ (16,4 %)
FCEV		+ 5.576 T€ (11,7 %)	+ 12.086 T€ (25,3 %)	+ 18.362 T€ (38,4 %)

Tab. 44: Mehrkosten von der Flottenumstellung auf BEV und FCEV im Linienbündel 06 im Vergleich

Hinweis: Aufgrund der voraussichtlichen Neuvergabe des Linienbündels deutlich nach Ende der 2. CVD-Periode und zu erwartende Verschärfungen bei der Quote (vgl. Kapitel 0) sind bis zum neuen Verkehrsvertrag erhebliche Abweichungen bei den Ergebnissen möglich.

#### 4.5.6 Ergebnisse im Linienbündel 07 (Spalt, Abenberg und Kammerstein)

Im Linienbündel 07 in Spalt, Abenberg und Kammerstein sind 14 Busse, darunter ein Kleinbus, 10 12m-Solobusse und zwei 15m-Solobusse, im Einsatz und erzielen eine jährliche Betriebsleistung von 675.000 Fahrplan-km.

Ausgehend von einem Kostensatz von 3,66 € pro Kilometer zum Status quo im Jahr 2023 steigen die Kostensätze 2030 im Jahr der Umstellung – abhängig vom Szenario – um circa 22 % (Referenzszenario), 29 % (S1), 32 % (S2) bzw. 38 % (S3):

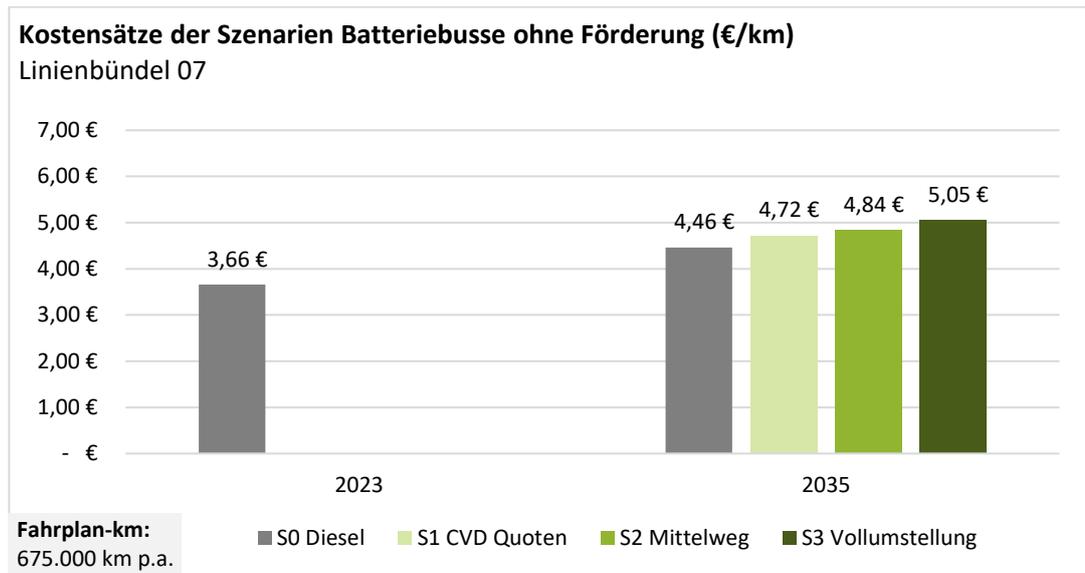


Abb. 64: Kostensätze für BEV-Szenarien im Linienbündel 07 (eigene Abbildung)

Für eine Umstellung auf Brennstoffzellenbusse im Jahr 2035 sind im Vergleich mit dem Kostensatz aus 2023 höhere Kostensätze um rund 19 % (Referenzszenario), 33 % (S1), 49 % (S2) bzw. 71 % (S3) zu erwarten:

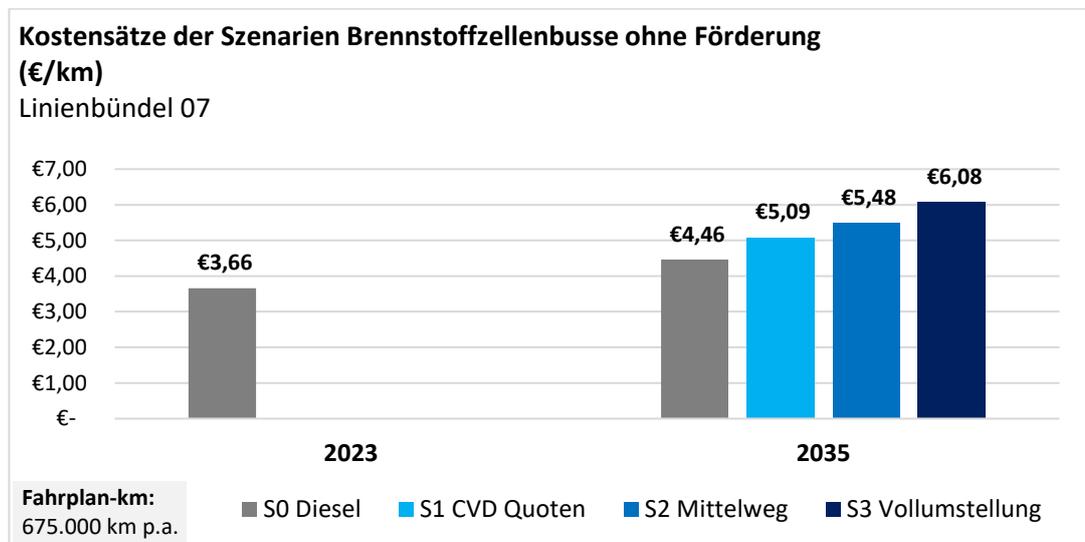


Abb. 65: Kostensätze der FCEV-Szenarien im Linienbündel 07 (eigene Abbildung)

Vergleichende Betrachtung der Mehrkosten von BEV- und FCEV-Fahrzeugen gegenüber dem Referenzszenario Linienbündel 07				
	Referenzszenario	S1	S2	S3
BEV	31,99 Mio. €	+ 1.714 T€ (5,4 %)	+ 2.439 T€ (7,6 %)	+ 3.815 T€ (11,9 %)
FCEV		+ 3.576 T€ (11,2 %)	+ 7.836 T€ (24,5 %)	+ 13.304 T€ (41,6 %)

Tab. 45: Mehrkosten von der Flottenumstellung auf BEV und FCEV im Linienbündel 07 im Vergleich

## 4.6 Gegenüberstellung und Fazit der Kostenanalyse

In den vorangegangenen Kapiteln wurden für alle Szenarien und Linienbündel die Kostensätze sowie kumulierten Gesamtkosten für die Umstellung auf batterieelektrische sowie Brennstoffzellenbusse analysiert und verglichen. Hierbei lassen sich folgenden Erkenntnisse ableiten:

1. Die Flottentransformation auf emissionsfreie Antriebe (batterieelektrische und Brennstoffzellenbusse) ist grundsätzlich mit deutlichen Mehrkosten verbunden.
2. Insgesamt ist jedoch festzustellen, dass auch im Falle des fiktiven Referenzszenarios („Weiter so Diesel“) der straßengebundene ÖPNV im Landkreis Roth teurer wird.
3. In allen Linienbündeln ist die Umstellung auf batterieelektrische Busse im Vergleich zur Umstellung auf Brennstoffzellenbusse hinsichtlich der entstehenden Mehrkosten günstiger.
4. Im Falle eines Wasserstoffpreises von ca. 1,50 €/kg kann Kostenparität zu den batterieelektrischen Szenarien erreicht werden.
5. Die Umstellung auf batterieelektrische Antriebe ist hinsichtlich der Kapitalkosten im Vergleich zu Dieseln zwar teurer, es besteht jedoch ein Einsparpotenzial hinsichtlich der Betriebskosten. Batteriebusse sollten deshalb auf Linienbündeln eingesetzt werden, auf denen sie hinreichend (im Einklang mit der technischen Machbarkeit) genutzt werden.
6. Die Technologievariante Wasserstoff ist sowohl hinsichtlich der Investitions- als auch in Bezug auf die Betriebskosten deutlich teurer als die Technologievariante Batterie. Ein Einsparpotenzial hinsichtlich der Betriebskosten besteht bei Brennstoffzellenbussen unter den gegebenen Prämissen auf Grund der schlechteren Energieeffizienz und der hohen Wasserstoffpreise – anders als bei Batteriebussen – nicht.

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse zeigen deutliche Mehrkosten des Wasserstoff-Antriebs gegenüber dem Batterie-Antrieb. Dies ist neben höheren Investitionskosten (insbesondere für Fahrzeuge) vor allem auch mit den höheren Betriebskosten in Bezug auf die Treibenergie zu begründen. Der H<sub>2</sub>-Antrieb weist einen schlechteren Wirkungsgrad auf.

Die Technologievariante Wasserstoff ist somit aus wirtschaftlicher Sicht nur dann zu empfehlen, wenn es aus aufgrund anderer Randbedingungen keine Alternative gibt. Dies betrifft insbesondere die Energieversorgung der Standorte. Dies muss jedoch im Einzelfall im Rahmen einer Feinplanung geprüft werden.

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurde die Fragestellung untersucht: „Wie teuer muss ein kg Wasserstoff im Falle eines Fremdbezugs (keine Eigenerzeugung) sein, damit die Mehrkosten des Wasserstoffantriebs gleichauf zum Batterieantrieb (Kostenparität) liegen?“

Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsanalyse für den Einsatz von Wasserstoffbussen in den Linienbündeln des Landkreises Roth wurde ein Wasserstoffpreis von ca. 1,50 €/kg als notwendig ermittelt, um eine Kostenparität zwischen batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) und Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV) zu erreichen. Diese Bestimmung erfolgte mithilfe einer Sensitivitätsanalyse, die sich mit der Frage des externen Bezugs von Wasserstoff beschäftigte. Dabei wurde auch angenommen, dass ausreichend Wasserstoff-Tankstellen im LK Roth vorhanden sind.

## 4.7 Ökologische Bewertung der Antriebsumstellung

Im Zuge der Betrachtung von Kosten und Nutzen soll hierbei insbesondere der ökologische Nutzen in Form der Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen bemessen werden. Dies fußt insbesondere auf den politischen Kontext hinsichtlich der CVD-Richtlinie, die primär darauf abzielt, „die Emissionen im Verkehrsbereich zu reduzieren“: „Durch den Beitrag zur Verringerung der CO<sub>2</sub>- und Luftschadstoffemissionen werden die politischen Ziele in den Bereichen Umwelt- und Klimaschutz gestärkt und die öffentliche Verwaltung wird ihrer Vorbildfunktion gerecht.“ (BMDV, 2024)<sup>11</sup>

Mithilfe von Berechnungen auf Basis von Zahlen des Instituts für Energie- und Umweltforschung (ifeu), die PwC in der Vergangenheit im Rahmen einer Begleituntersuchung zur Förderung von Elektrobussen im ÖPNV für das BMU erheben konnte, können Emissionen anhand der Werte in Gramm CO<sub>2</sub> pro Kilometer (Emissionsfaktor HVO100 (sauberer Kraftstoff) entsprechend europäischer Verordnung Vorgabe mind. 50 % geringer) berechnet bzw. angenähert werden, um die eingesetzten Technologien aus ökologischer Sicht bewerten zu können.<sup>12,13</sup>

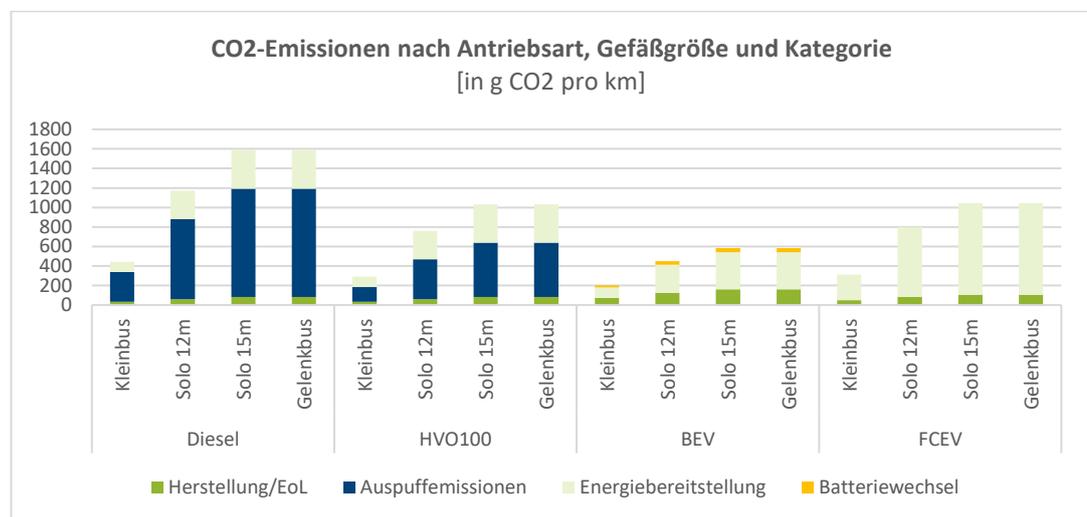


Abb. 66: CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Antriebsart, Gefäßgröße und Emissionskategorie für konventionelle Diesel-, HVO100-, batterieelektrische und brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge (eigene Abbildung)

Die in der Abbildung oben angeführten Werte umfassen die Klimabilanzen von 12 m-Solo- und 18 m-Gelenkbussen. Die Basismodelle sind Fahrzeuge mit einem konventionellen Dieselantrieb mit

<sup>11</sup> vgl. <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/clean-vehicles-directive-faq.html>

<sup>12</sup> Anmerkung: die Daten des ifeu umfassen Werte für 12 m-Solo- und Gelenkbusse. Emissionswerte für Kleinbusse wurden mithilfe zweier Faktoren berechnet, die Emissionen des 15 m-Solobusses wurden im Sinne einer vorsichtigen Berechnung mit den Werten eines Gelenkbusses abgeschätzt.

<sup>13</sup> Anmerkung: die Werte für den 15 m-Solobus mit einem Wasserstoffantrieb wurde mathematisch berechnet, derzeit ist kein nennenswertes, kommerzielles Angebot an Fahrzeugen vorhanden.

einem Leergewicht von 11,5 Tonnen in der Solobus und 17,1 Tonnen in der Gelenkbusvariante, bei Fahrzeugen mit alternativen Antrieben wurden etwaige Zusatzgewichte, beispielsweise durch eine Batterie oder einen Wasserstofftank, beim Leergewicht entsprechend berücksichtigt. Ebenso berücksichtigt wurden Unterschiede hinsichtlich der Reichweite der Fahrzeuge (und ggf. notwendigen Fahrzeug-Mehrbedarf), Emissionen im Zusammenhang mit Infrastruktur und die Klimaauswirkungen aus der Bereitstellung und Herstellung von Treibstoff bzw. Energie.<sup>14</sup> Die Energiebereitstellung für elektrifizierte Fahrzeuge ist maßgeblich durch den deutschen Strommix beeinflusst.

Auf Basis der Emissionswerte pro Kilometer können die eingesparten CO<sub>2</sub>-Emissionen in Tonnen über alle Linienbündel sowie über einen Zeitraum über zehn Jahre abgeschätzt werden. Hierzu werden für jedes Linienbündel die Fahrzeuganzahl, die Aufteilung auf Gefäßgrößen sowie die zuvor errechneten, umzustellenden Fahrzeuge bzw. Migrationspfade (siehe Kapitel 4.1) herangezogen. Auf Basis der Anteile der Gefäßgrößen wurden zum Zwecke des Vergleichs von Antriebsarten und Szenarien für alle Linienbündel und Szenarien rechnerisch die Anteile der vier Gefäßgrößen Klein-, 12 m-Solo-, 15 m-Solo- und Gelenkbus an der Betriebsleistung bestimmt.

Die folgende Abbildung stellt die Zusammensetzung der abgeschätzten CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Antriebsarten BEV und FCEV für jedes Szenario dar und vergleicht diese Werte mit dem (hypothetischen) Referenzszenario:

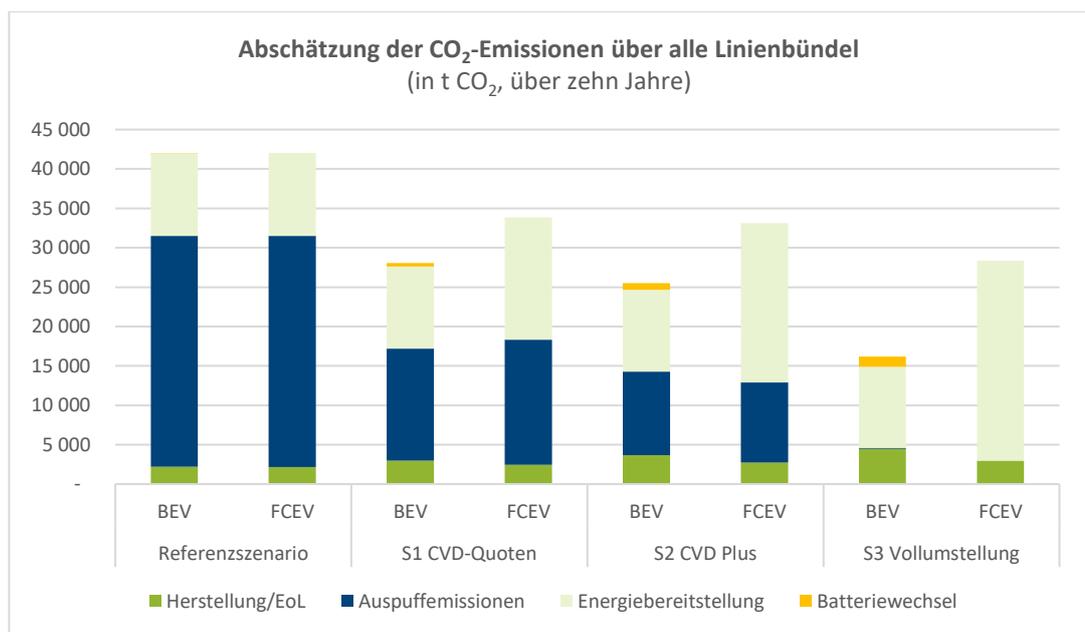


Abb. 67: Abschätzung der CO<sub>2</sub>-Emissionen über alle Linienbündel, differenziert nach Szenarien und Art des eingesetzten alternativen Antriebes (eigene Abbildung)

<sup>14</sup> gemäß Begleituntersuchung zur Förderung von Elektrobussen im ÖPNV im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (PwC, ifeu, CP/COMPARTNER, prgnos und eebc)

Zentrale Erkenntnisse sind hierbei:

- insbesondere emissionsfreie Fahrzeuge verursachen hinsichtlich der Herstellung, End-of-life und Energiebereitstellung höhere Emissionen als konventionelle Dieselfahrzeuge – mit steigendem Anteil emissionsfreier Busse steigen die in diesen Kategorien verursachten Emissionen;
- Auspuffemissionen werden bei emissionsfreien Fahrzeugen keine erzeugt (saubere Fahrzeuge: 50 % der Auspuffemissionen von konventionellen Dieselfahrzeugen), die Einsparungen hier sind signifikant und sorgen für sinkende Gesamtemissionen bei steigendem Anteil von sauberen und insbesondere emissionsfreien Fahrzeugen;
- bei BEV-Fahrzeugen entstehen zusätzlich Emissionen durch den Batteriewechsel, diese tragen aber nur unwesentlich zu den Gesamtemissionen bei;
- die höchsten Emissionseinsparungen können mit einer Vollumstellung auf batterieelektrische Fahrzeuge erzielt werden.

Es bleibt zu beachten, dass diese Werte zum Vergleich der Antriebsarten herangezogen werden können, jedoch keine verlässlichen Aussagen über die konkrete Menge an Emissionen liefern können. Gründe hierfür sind insbesondere die Abhängigkeit des Verbrauches von verschiedenen Faktoren (beispielsweise Fahrweise), die konkrete Aufteilung der Betriebsleistung auf Gefäßgrößen sowie der Umstand, dass auf Grund fehlender Untersuchungen hinsichtlich der Emissionen bei Klein- und 15 m-Solobussen Annahmen getroffen werden mussten.

Das Referenzszenario weist keine Unterschiede hinsichtlich BEV und FCEV auf, da dieses nur zum Zwecke des Vergleichs mit dem aktuellen Status quo herangezogen wird.

## 4.8 Betreibermodelle Ladeinfrastruktur

In diesem Abschnitt werden die verschiedenen Möglichkeiten der Ausgestaltung von Betreibermodellen für Ladeinfrastruktursysteme beschrieben und vorgestellt. Der Fokus liegt dabei auf den verschiedenen Rollen, die sowohl Aufgabenträger als auch Verkehrsunternehmen in diesem Kontext einnehmen können. Daraus ergeben sich im Grunde vier mögliche Varianten, wie Beschaffung, Aufbau und Betrieb der Ladeinfrastruktur bewerkstelligt und die Verantwortlichkeiten unter den involvierten Parteien verteilt werden können. Die Fahrzeugflotte und deren Ausgestaltung werden für diese Betrachtung außer Acht gelassen.

### **Variante 1; „Eigenständige Finanzierung, Aufbau und Betrieb durch Verkehrsunternehmen“**

Die erste Variante stellt den bisher klassischen und weit verbreiteten Anwendungsfall im ÖPNV dar. Der Aufbau und der Betrieb der Ladeinfrastruktur versteht sich dabei als ein wesentlicher Bestandteil der Vergabe von Verkehrsleistungen durch den Aufgabenträger. Die Finanzierung der Ladeinfrastruktur erfolgt dabei nach erfolgreich abgeschlossenem Vergabeverfahren für die Verkehrsleistung durch das entsprechende Verkehrsunternehmen. Die Kosten des Aufbaus und Betriebs der Ladeinfrastruktur werden zusätzlich zu den weiteren Kostenpositionen für die Erbringung der Verkehrsleistung im Angebot seitens der Verkehrsunternehmen eingepreist und nach erfolgter Beauftragung entsprechend laufend mit dem Bestellerentgelt vergütet. Darunter fallen zum einen die Investitions- und Kapitalkosten für den Aufbau der Ladeinfrastruktur und zum anderen die Kosten für den Betrieb der Ladeinfrastruktur (Wartung, Instandhaltung etc.).

Die Konzeptionierung, der Aufbau und der Betrieb der Ladeinfrastruktur erfolgt dabei in Regie und Verantwortung des Verkehrsunternehmens üblicherweise auf dessen eigenen Betriebsflächen. Hinsichtlich der Rollenverteilung fungiert in dieser Variante das Verkehrsunternehmen als Ladesäulenbetreiber und entscheidet demnach über die Wahl der Netzwerk- und Softwarearchitektur. Je nach Konzeptionierung und Dimensionierung des Ladeinfrastruktursystems kann so auch die räumliche und technische Zugänglichkeit für die Fahrzeuge Dritter gewährt werden. Dies können beispielsweise andere Verkehrsunternehmen sein, die Verkehrsleistungen auf weiteren Linienbündeln des Aufgabenträgers erbringen oder auch Fahrzeuge privater Flotten (z. B. eines Taxiunternehmens). Insbesondere im Hinblick auf die Gewährleistung eines störungsfreien Fahrbetriebs wird die Nutzung der Ladeinfrastruktur üblicherweise jedoch vordergründig für den Betrieb der eigenen Flotte vorgesehen. In dieser Variante trägt das Verkehrsunternehmen sowohl das wirtschaftliche als auch das technologische und betriebliche Risiko für das Ladeinfrastruktursystem vollständig. Die Ladeinfrastruktur bleibt jedoch auch nach dem Ende des Dienstleistungsauftrags vollständig im Eigentum des Verkehrsunternehmens. Der Aufgabenträger hat in der Regel keinen Zugriffsanspruch. Im Falle der Vergabe an einen Neubetreiber nach 8-10 Jahren muss ggf. der Aufbau und Betrieb der erforderlichen Ladeinfrastruktur wiederholt vergeben werden. Das Verkehrsunternehmen wird in der Regel versuchen, die kompletten Kosten für die Ladeinfrastruktur während der Vertragslaufzeit zu amortisieren.

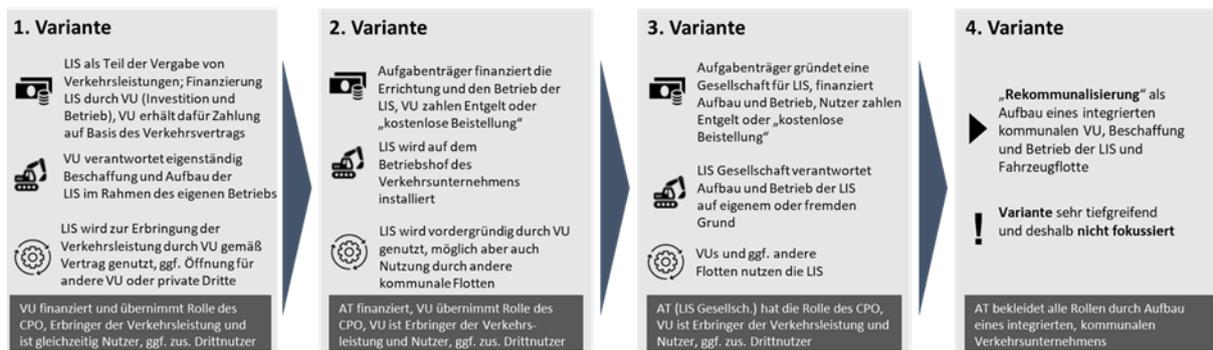


Abb. 68: Grundlegende Betreibermodelle

### Variante 2: „Finanzierung durch den Aufgabenträger“

Eine zweite Variante eines möglichen Betreibermodells berücksichtigt eine andere Form der Finanzierung der Investitionen in das Ladeinfrastruktursystem. Die Finanzierung wird hier unmittelbar durch den Aufgabenträger übernommen. Verkehrsunternehmen müssen die Kosten für das Ladeinfrastruktursystem somit gegenüber dem Aufgabenträger im Rahmen der Vergabe nicht einpreisen. Diese Variante verlagert das wirtschaftliche Risiko und den notwendigen Liquiditätsbedarf von den Verkehrsunternehmen zum Aufgabenträger. Geringere Finanzierungskosten des Aufgabenträgers können so einen positiven Effekt auf die Wirtschaftlichkeit der Verkehrsleistungserbringung haben und ggf. den Wettbewerb stärken.

Der Aufbau und Betrieb des Ladeinfrastruktursystems kann dabei auf den privaten Betriebsflächen des Verkehrsunternehmens erfolgen. Das betriebliche Risiko trägt somit weiterhin das Verkehrsunternehmen. Hinsichtlich der Konzeptionierung, Dimensionierung und der Frage zum Einbezug weitere Nutzergruppen müssen sich Verkehrsunternehmen und Aufgabenträger entsprechend abstimmen und klare Regelungen vereinbaren. Hier spielt die Zugänglichkeit der Betriebsflächen eine wesentliche Rolle (v. a. dingliche Nutzungsrechte an Grundstücken). Darüber hinaus kann auch eine schuldrechtliche Vereinbarung über die Pflicht zur Übertragung der Infrastruktur an einen eventuellen Neubetreiber notwendig werden, wenn der Betreiber der Verkehrsleistungen wechselt.

Für die Abrechnung der Kosten für die Ladeinfrastruktur bestehen für den Aufgabenträger unterschiedliche Möglichkeiten. Im Zuge einer kostenlosen Beistellung der Infrastruktur erhebt der Aufgabenträger kein Entgelt für deren Nutzung. Sofern die Ladeinfrastruktur weiteren Nutzergruppen zugänglich gemacht werden soll, kann auch die Abrechnung über ein Nutzungsentgelt in Betracht gezogen werden. Dieses Nutzungsentgelt kann sowohl für alle Nutzer als auch ausschließlich für Drittnutzer und somit parallel zur kostenlosen Beistellung erhoben werden. Denkbar ist auch ein Abrechnungsmodell, das neben einem Nutzungsentgelt auch ein Entgelt für den tatsächlich bezogenen Fahrstrom enthält (im Sinne eines „Pay-Per-Use“-Modells).

Denkbar ist in diesem Kontext auch die Vergabe von Aufbau und Betrieb des Ladeinfrastruktursystems an ein drittes Unternehmen durch den Aufgabenträger. In diesem Fall würde das Verkehrsunternehmen als Betreiber der Fahrzeuge Ladedienstleistungen des Ladeinfrastrukturbetreibers beziehen. Der Ladeinfrastrukturbetreiber erhält hierfür ein entsprechendes Entgelt vom Aufgabenträger. Die Verortung der Ladeinfrastruktur ist zum einen auf Flächen des Ladeinfrastrukturbetreibers denkbar. Dies würde die Zugänglichkeit für Drittnutzer erhöhen, je nach Lage jedoch auch zeitgleich den betrieblichen Aufwand des Verkehrsunternehmens. Zum anderen besteht auch die Möglichkeit, die Betriebsflächen der Verkehrsunternehmen hierfür zu nutzen.

### Variante 3: „Infrastrukturgesellschaft des Aufgabenträgers“

In einer dritten möglichen Variante gründet der Aufgabenträger eine eigene Gesellschaft speziell für den Ladeinfrastrukturbetrieb. Dabei übernimmt der Aufgabenträger über diese Gesellschaft die Finanzierung sowie den Aufbau und den Betrieb der Ladeinfrastruktur und behält über den gesamten Prozess die Verantwortung. Die Errichtung der Ladeinfrastruktur kann auf eigenen oder fremden, aber zugänglichen, Grundstücksflächen erfolgen. Verkehrsunternehmen und ggf. andere Flotten nutzen die Ladeinfrastruktur der Gesellschaft und zahlen dafür ein entsprechendes Nutzungsentgelt. Denkbar ist aber auch hier eine kostenlose „Beistellung“ im Rahmen der Verkehrsleistungserbringung. Der Aufgabenträger agiert somit unabhängig von den Verkehrsunternehmen und behält somit eine hohe Flexibilität hinsichtlich zukünftiger Entscheidungen und Geschäftsentwicklungen, wie bspw. der zukünftigen technologischen Ausrichtung oder zukünftiger ÖPNV-Betreiber. Nicht zuletzt für die Gründung der Infrastrukturgesellschaft und die Übernahme von Risiken bewirkt dies im Umkehrschluss jedoch auch einen zusätzlichen finanziellen und organisatorischen Aufwand. Positiv können sich auch hier vorteilhaftere Finanzierungsbedingungen des Aufgabenträgers bzw. der Ladeinfrastrukturgesellschaft auswirken. Die Ladeinfrastrukturgesellschaft übernimmt vollständig die betrieblichen, technologischen und wirtschaftlichen Risiken des Aufbaus und Betriebs der Ladeinfrastruktur. Für die Integration von Diensten wie Backendsystemen von Dritten für die Gewährleistung dieses breiten Softwareangebots besteht für den Aufgabenträger und die Ladeinfrastrukturgesellschaft die Möglichkeit von längerfristigen oder dauerhaften Kooperationen mit Drittanbietern. Verkehrsunternehmen übernehmen dann die reine Rolle der Erbringung der ÖPNV-Verkehrsleistung.

### Variante 4: „Integriertes, kommunales Verkehrsunternehmen“

Die vierte Variante beschreibt eine Art „Rekommunalisierung“ der gesamten Mobilitätsgestaltung im Landkreis und mündet in der Gründung eines integrierten, kommunalen Verkehrsunternehmens, welches alle Funktionen vereint. Die öffentliche Hand verantwortet in diesem Fall das gesamte Leistungsspektrum in Form eines eigenen Verkehrsunternehmens. Dieses reicht von der Beschaffung und dem Aufbau über den Betrieb der Ladeinfrastruktur bis hin zum Betrieb der Fahrzeugflotte im Rahmen der ganzheitlichen Erbringung der Verkehrsleistung. Diese Variante ist sehr tiefgreifend und hätte ggf. zur Folge, dass die heutigen Verkehrsunternehmen zur Leistungserbringung nicht mehr notwendig sind.

Zur Ermittlung eines für den Landkreis Roth optimalen Betreibermodells muss eine detaillierte Analyse der vorherrschenden Rahmenbedingungen durchgeführt werden. Daneben spielt auch die strategische und politische Ausrichtung des Landkreises eine wesentliche Rolle. Empfehlenswert ist insbesondere, mit potenziellen ÖPNV-Betreibern Potenziale hinsichtlich der Fahrzeugvorhaltung, der Flächenverfügbarkeit und -Zugänglichkeit sowie der Ladeinfrastrukturerrichtung und dem Betrieb zu identifizieren und diese in den Entscheidungsprozess für eine übergeordnete „E-ÖPNV-Strategie“ des Landkreises einfließen zu lassen. Je nach Variante und geplanter Ausgestaltung eines Betreibermodells sind vorab umfangreiche (vergabe-)rechtliche, organisatorische, betriebliche und betriebswirtschaftliche Fragestellungen zu klären.

## 5 AP 5: Handlungsempfehlungen für den Landkreis Roth

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

### 5.1 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 aktuell höchsten technologischen Reifegrad emissionsfreier Bustechnologien aus. Auch in Bezug auf eine angebotsseitige Marktverfügbarkeit ist der Batterieantrieb gegenüber dem Brennstoffzellenantrieb als vorteilhaft zu bewerten. Es kann davon ausgegangen werden, dass dieser Vorsprung in den nächsten Jahren zunächst weiter erhalten bleibt.

Die derzeitige Entwicklung des E-Bus-Marktes zeigt, dass sich der Batteriebus längerfristig zum Standardantrieb unter den alternativen Antrieben entwickeln kann und somit sukzessive den Dieselbus als Standardantrieb 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 in der Regel 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 Infrastruktur ist der Batteriebus in der ganzheitlichen Betrachtung auch kostenseitig gegenüber dem Brennstoffzellenbus vorteilhaft, wenngleich auch hier mit deutlichen Mehrkosten im ÖPNV zu rechnen ist.

Die Analysen der Machbarkeitsstudie zeigen, dass die Dekarbonisierung des ÖPNV im Landkreis Roth im Sinne der rechtlichen Mindestanforderungen aus der Clean Vehicles Directive (CVD) grundsätzlich realisierbar ist. Die drei erarbeiteten Umstellungsszenarien zeigen verschiedene Migrationspfade zur Einführung von E-Bussen im Landkreis auf (vgl. Kapitel 4.1). Die drei dargestellten Migrationspfade der Flottentransformation müssen nun durch die Akteure vor Ort bewertet werden und ein Pfad als Grundlage der Umstellungsstrategie festgelegt werden. Ein langfristiger Transformationspfad führt zu Parallelbetrieb unterschiedlicher Technologien und erhöht die Komplexität des Betriebs.

Ein „freiwilliger“ Einstieg in die Vollumstellung aller Linienbündel erscheint derzeit aufgrund der noch vorhandenen wirtschaftlichen Nachteile und dem parallel erforderlichen Infrastrukturaufbau nicht vorteilhaft.

Eine Kostendegression und damit eine Reduzierung der derzeit deutlich höheren Anschaffungskosten emissionsfreier Fahrzeuge ist mittelfristig zu erwarten. Eine Kostenparität (bezogen auf die Summe aus Investitions- und Betriebskosten) zwischen Diesel- und Batterieantrieb ist ohne Förderung frühestens nach dem Jahr 2030 zu erwarten. Unabhängig von der Antriebstechnologie ist davon auszugehen, dass der ÖPNV ohnehin deutlich teurer wird.

## 5.2 Technische Handlungsempfehlung

Technische Handlungsempfehlungen liegen üblicherweise verstärkt vor, wenn besondere Problemstellungen Lösungsansätze erfordern oder anderweitige Restriktionen vorliegen. Im Betrachtungsfall kann ein sehr positives Fazit gezogen werden. Unabhängig von der Antriebstechnik wird die Erfüllung der CVD-Quotenvorgaben als unkritisch eingeschätzt. Über alle Linienbündel werden deutlich größere Fahrzeugmengen als dekarbonisierbar bewertet als für die Quotenerfüllung erforderlich. Damit rücken technische Aspekte in den Hintergrund, so dass die Handlungsempfehlung primär auf kommerzielle Aspekte zurückgeht.

### Technische Vorzugstechnologie

Aufgrund des besseren Marktangebots und der Möglichkeit elektrische Ladeinfrastruktur (gegenüber H<sub>2</sub>-Tankanlagen) flexibel zu gestalten und in bestehende Liegenschaften zu integrieren, fällt die Auswahl einer Vorzugstechnologie auf Fahrzeuge mit batterieelektrischen Antrieben (BEV). Aufgrund der ebenfalls positiven Bewertung im kommerziellen Rahmen, wird diese Auswahl hier abschließend bestätigt.

Aus rein technischer Perspektive folgt die FCEV-Technik knapp hinter der BEV-Technik und wird ebenfalls als sehr gute Umstellungsoption bewertet.

### Bewertung der Eignung pro Linienbündel

Über die aus AP 2 bekannte Übersicht aller Linienbündel (LB) zum Zeitpunkt der Neuvergabe kann sehr gut deutlich gemacht werden, dass auch zwischen den einzelnen Linienbündel nur geringfügige Unterschiede vorliegen.

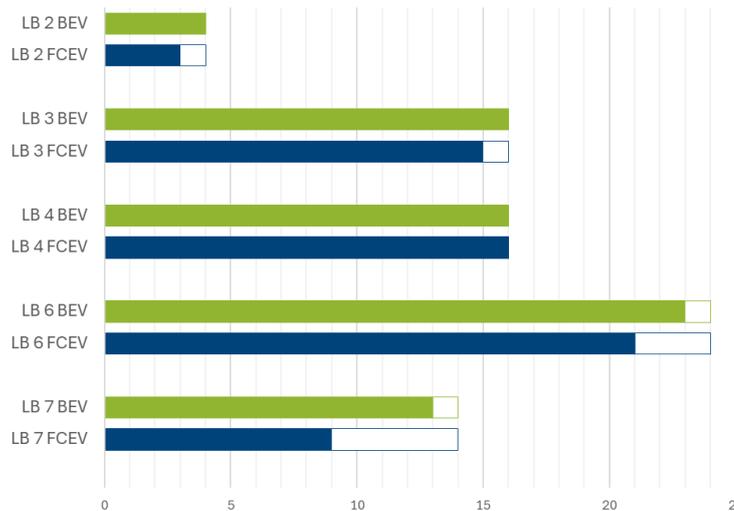


Abb. 69: Übersicht umstellbare Fahrzeugmengen bei Neuvergabe (BEV & FCEV)

In der Abbildung sind in Summe die Mengen umstellbarer Fahrzeuge dargestellt. Als umstellbar werden hier Fahrzeuge mit gesichertem Marktangebot betrachtet, die ohne jegliche Sondermaßnahmen im „Eins-zu-Eins-Ersatz“ einen Dieselbus ersetzen können. Grundlage hierfür ist der antizipierte technische Entwicklungsstand bei Betriebsbeginn nach Neuvergabe.

Für die Vorzugstechnologie (BEV) sind bereits ohne Anpassungsmaßnahmen drei Linienbündel vollständig umrüstbar: LB 2, LB 3 und LB 4. In den Linienbündeln 6 und 7 ist jeweils nur ein einziger Fahrzeugeinsatz nicht ohne Sondermaßnahmen machbar. Mit überschaubaren Umlaufanpassungen sollte auch hier eine Vollumstellung realisierbar sein.

Aus technischer Perspektive sind die aktuell betriebenen Linienbündel gleichwertig und sehr gut für die Dekarbonisierung geeignet. Darüber hinaus liegen keine technischen Argumente vor, die sich auf die Umstellungsstrategie oder Road-Map auswirken.

### Empfehlungen für Detailplanungen

Aus technischer Perspektive sind die nächsten Planungsschritte auf Betreiberebene angesiedelt. Hier sollte adressiert werden, wie die Umstellung konkret angegangen werden kann. Die Machbarkeitsbewertung auf Fahrzeugebene bleibt ebenso wie das Infrastrukturkonzept tragfähig. Im Fokus auf Betreiberebene steht also nicht die Frage „Welche Technik?“, sondern „Wie erfolgt die Integration?“. Dabei steht insbesondere die Infrastruktur im Fokus und wie diese in die bestehenden Grundstücke integriert werden kann. Im Zuge dessen muss ebenfalls erhoben werden, ob an den Standorten ausreichende Netzkapazitäten vorliegen, oder ob ein kostenintensiver Netzausbau möglicherweise die kommerzielle Bewertung zugunsten der FCEV-Technik verschiebt.

Inwiefern der Landkreis Roth mit Detailplanungen konfrontiert wird, hängt von der Gesamtstrategie im Transformationsprozess ab. Sofern ein mit den aktuellen Betreibern eng verzahnter Prozess angestrebt wird, erscheint es sinnvoll die Umsetzung auf Betreiberebene ins Auge zu fassen und entsprechende Detailanalysen auszuführen. Alternativ ist es ebenfalls möglich die Gesamtziele im Rahmen einer Ausschreibung als Vorgabe zu definieren, was den Landkreis von Detailplanungen entbindet.

### Besondere Muss oder Soll-Kriterien für den Umstellungsprozess

Die technische Untersuchung wurde technologieoffen und herstellerunabhängig ausgeführt. Entsprechend sind keine besonderen Kriterien oder Vorgaben angesetzt. Für die Realisierungsphase sind nur ausgewählte Aspekte zu betrachten, die streng genommen ebenfalls nur auf Betreiberebene relevant sind:

- Für die Untersuchung wurde angenommen, dass die batterieelektrischen Fahrzeuge mit Ladesteckern ausgestattet sind. Der Einsatz von Pantographen ist möglich, muss jedoch vor dem Hintergrund der verfügbaren Batteriekapazitäten betrachtet werden. Pantographen konkurrieren in aktueller Bauweise mit Traktionsbatterien um den beschränkten Bauraum auf dem Fahrzeugdach. Entsprechend ist von einer reduzierten Batteriekapazität gegenüber dem Steckeransatz auszugehen.
- Für die Untersuchung wurde die technische Entwicklung der Batteriekapazität antizipiert. Da es sich hier um eine Zukunftsprognose handelt, sollte sichergestellt werden, dass die in Kapitel 2.1.4 *Berechnungsgrundlage und Prämissen* angegebenen Kapazitätsprognosen zum Umstellungszeitpunkt tatsächlich verfügbar sind.

## 5.3 Empfehlung einer betrieblich und wirtschaftlich vorzugswürdigen Antriebstechnologie für die Umstellung auf alternative Antriebe im Landkreis Roth

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Umstellung der 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 im Landkreis geeignet sind. Um den heutigen Fahrplan mit Batteriebussen abdecken zu können, ist kein bis ein relativ geringer Fahrzeugmehrbedarf notwendig. Je nach Betrachtungsweise ist im Sinne der kaufmännischen Vorsicht im Linienbündel 06 und 07 aufgrund geringerer Fahrzeugreichweiten und der entsprechenden Ladezeiten bei batterieelektrischen Fahrzeugen ein weiterer 12 m-Solobus zu berücksichtigen, wenngleich die Neuvergabe in diesem Fall erst im Jahr 2034 ansteht und in der Zwischenzeit technologische Weiterentwicklungen denkbar sind.

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

- geringere Gesamtkosten, sowohl in Hinblick auf Investitions- als auch Betriebskosten,
- ausgereifteres und größeres Fahrzeugangebot am Markt, auch mit breitem Angebotsspektrum auf dem europäischen Markt.

Die Machbarkeitsstudie hat zudem unterschiedliche Migrationspfade für die Flottentransformation im Landkreis aufgezeigt. Das CVD-Szenario bildet dabei das Mindestmaß an Fahrzeugen mit alternativem Antrieb, die durch die Verkehrsunternehmen im straßengebundenen ÖPNV im Rother Landkreis einzusetzen sind. Dabei müssen für die Erfüllung der „emissionsfrei“-Quote Fahrzeuge mit Batterie- oder Brennstoffzellenantrieb beschafft werden. Für die Erfüllung der Teilquote von „sauberen“, aber nicht „emissionsfreien“ Fahrzeugen im Sinne der CVD können beispielsweise auch konventionelle Busse mit Verbrennungsmotor eingesetzt werden, die synthetische Kraftstoffe (z. B. HVO100) verwenden. Werden jedoch ausreichend „emissionsfreie“

Fahrzeuge eingesetzt, um damit die gesamte „sauber“-Quote zu erfüllen, ist der zusätzliche Einsatz synthetischer Kraftstoffe nicht notwendig. Dies kann die Komplexität der eingesetzten Antriebstechnologien senken.

## 5.4 Umsetzungsplanung und Optionen für die Flottendekarbonisierung im Landkreis Roth

Zur Erfüllung der CVD-Quoten ist eine kombinierte Betrachtung der Linienbündel möglich, d.h. Mindestanforderungen können erreicht werden, auch wenn nicht alle Linienbündel individuell die in der CVD angeführten Anteile (vgl. Kapitel 0) erreichen.

Als Entscheidungsgrundlage zum Umstellungsumfang und -tempo der jeweiligen Linienbündel können folgende Kriterien herangezogen werden:

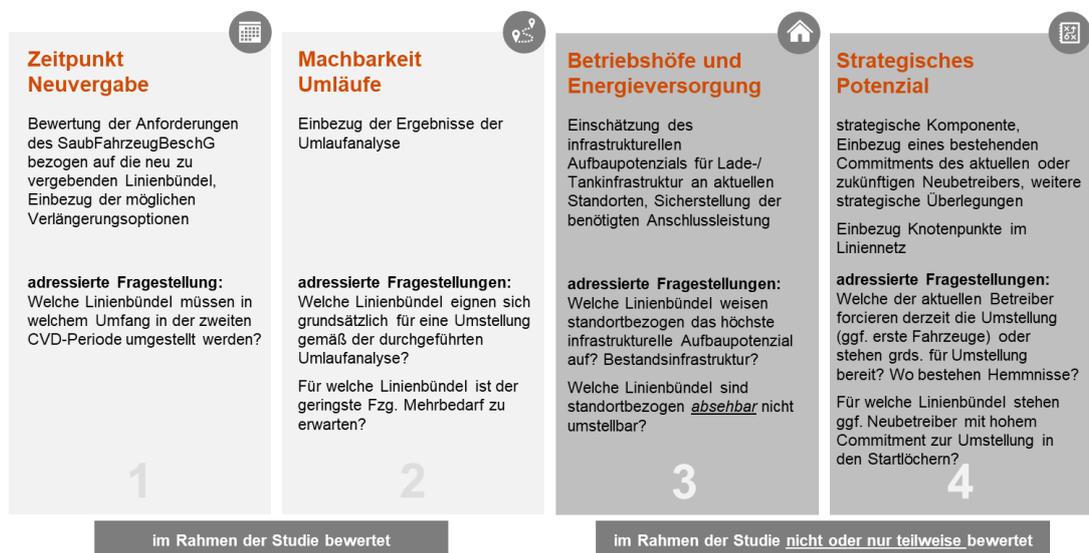


Abb. 70: Kriterien bei der Entscheidung zum Umstellungsumfang und -tempo der Linienbündel im Landkreis Roth

Relevant für die Erfüllung der Anforderungen aus dem SaubFahrzeugBeschG ist das Szenario „CVD Erfüllung Quoten“ sowie die aufgrund der erst nach 2025 stattfindenden Neuvergaben die entsprechenden Quoten aus der zweiten CVD-Periode. Eine Besonderheit sind die Linienbündel 06 und 07, die mit einer voraussichtlichen Neuvergabe im Jahr 2034 bzw. 2035. Die voraussichtliche Neuvergabe der beiden Linienbündel wird in einem sich wandelnden Marktumfeld stattfinden, das durch rechtliche, wirtschaftliche und technologische Entwicklungen geprägt ist.

Im Kontext des gesamten Landkreises müssen daher für die Erfüllung der CVD-Quoten für die in der zweiten Periode neuvergebenen Linienbündel insgesamt mindestens 17 Busse mit emissionsfreien Antrieben eingesetzt werden, weitere 17 Busse müssen sauber (z. B. mit HVO 100) betrieben werden. Die Vorgaben können aus verschiedenen Kombinationen der Linienbündel erfüllt werden.

Für den Landkreis Roth ergeben **beispielsweise** folgende Optionen:

**1. Option 1: Geringste Komplexität und Anzahl an Linienbündeln.**

In dieser Option wird die Anzahl an Linienbündeln, die von der Flottentransformation betroffen sind, so weit wie möglich minimiert. Die Komplexität der Umstellung wird so gering wie möglich gehalten, indem bereits vorhandene Bestrebungen von Verkehrsunternehmen sowie Voraussetzungen für eine effiziente Umsetzung der Flottendekarbonisierung berücksichtigt werden.

**2. Option 2: Flächendeckende Einführung und Einbezug aller Linienbündel.**

In dieser Option werden möglichst alle Linienbündel miteinbezogen bzw. in dieser Option sind nach Möglichkeit alle Linienbündel von der Flottentransformation hin zu Fahrzeugen mit alternativen Antrieben betroffen.

Das jeweilige Einsatzpotenzial (machbare Umläufe) kann je Linienbündel unterschiedlich ausgeschöpft werden, solange die übergeordnete Zielgröße des Landkreises Roth (hier 17 Busse) erreicht wird. Es besteht zudem die Möglichkeit einer Umstellung/Neuzuschnitt der LB, dann auch mit mehreren Betreibern pro LB. Dies gilt es zeitnah zu prüfen. Es ist zudem zu empfehlen, die Umstellungsoptionen im Nachgang der Studie entsprechend der Kriterien 3 (Betriebshof und Energieversorgung) und 4 (strategisches Potenzial) zu bewerten.

Für **Option 1** wurden die **Linienbündel 04** und **02** ausgewählt – Hintergrund hierfür sind die aktuellen Entwicklungen und Voraussetzungen beim Betreiber „Röhler“, die eine einfache Umsetzung der Flottentransformation erwarten lassen.

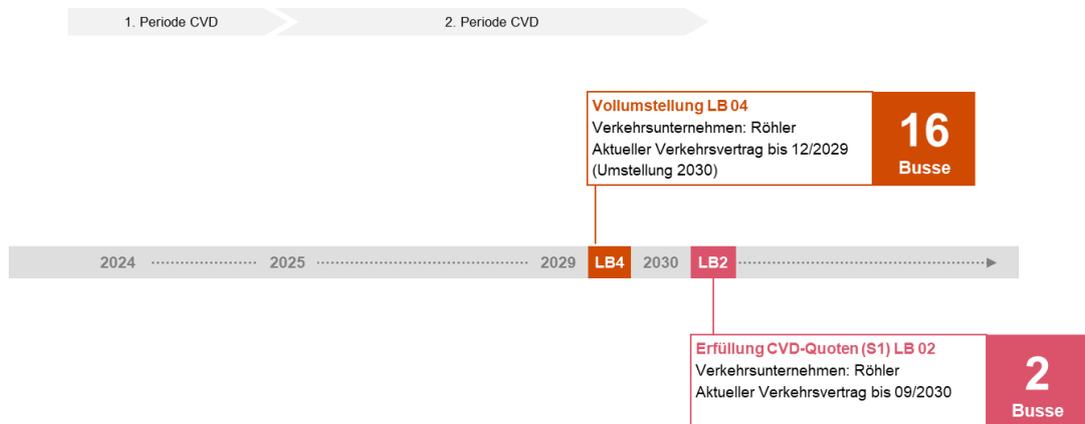


Abb. 71: Option 1 zur Flottenumstellung im Landkreis Roth (eigene Abbildung)

Für die Umsetzungsvariante der möglichst flächendeckenden Einführung (**Option 2**) wurden alle vier Linienbündel (mit Ausnahme der deutlich nach Ende der 2. Periode neu zu vergebenden Linienbündel 06 und 07) im Szenario der Erfüllung der CVD-Mindestquoten berücksichtigt:



Abb. 72: Option 2 zur Flottenumstellung im Landkreis Roth (eigene Abbildung)

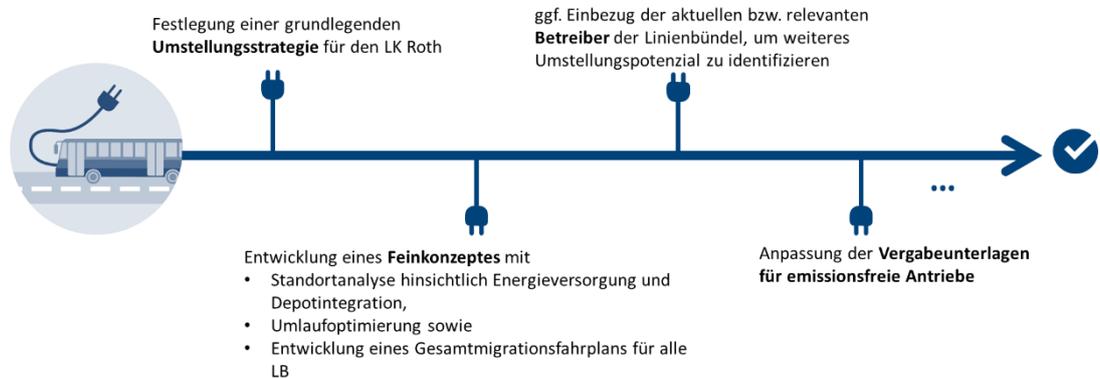
Gemäß den zuvor ermittelten Mehrkosten für die Flottenumstellung sind die zwei Optionen folgendermaßen zu bewerten:

	<b>Option 1</b> Geringste Komplexität und Anzahl an Linienbündeln	<b>Option 2</b> Flächendeckende Einführung
<b>Umstellung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vollumstellung LB 04 (16 Busse)</li> <li>• S1 LB 02 (2 Busse)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• S1 LB 01 (2 Busse)</li> <li>• S1 LB 02 (2 Busse)</li> <li>• S1 LB 03 (8 Busse)</li> <li>• S1 LB 04 (6 Busse)</li> </ul>

Tab. 46: Optionen zur Umsetzung der Flottentransformation im Landkreis Roth in der Übersicht

Empfehlenswert ist zu Beginn eine auf wenige Linienbündel fokussierte Umstellung, die ein hohes Einsatzpotenzial aufweisen. In diesem Zusammenhang ist die **Option 1** zu empfehlen, da diese eine möglichst hohe Effizienz bei der Umsetzung der Flottendekarbonisierung erwarten lässt, **wenngleich die strategische Auswahl der umzustellenden Linienbündel auf weitere Prämissen gestellt werden muss**. Zudem können zusätzliche Synergieeffekte erwartet werden, wenn dasselbe Verkehrsunternehmen beide Linienbündel betreibt. Diese Effekte können jedoch im Rahmen dieser Betrachtung nicht einkalkuliert werden.

Die folgende Grafik stellt die empfohlenen nächsten Schritte auf dem Weg zur Flottendekarbonisierung im Landkreis Roth dar:



*Abb. 73: Handlungsempfehlung bezüglich der nächsten Schritte zur Flottendekarbonisierung im Landkreis Roth (eigene Abbildung)*

Diese Schritte umfassen die Festlegung einer grundlegenden Umstellungsstrategie, die potenziell die aktuellen Betreiber der Linienbündel einbezieht, um weiteres Umstellungspotenzial zu identifizieren. Ein Feinkonzept soll entwickelt werden, das eine Standortanalyse hinsichtlich Energieversorgung und Depotintegration, Umlaufoptimierung sowie die Entwicklung eines Gesamtmigrationsfahrplans für alle Linienbündel beinhaltet. Zudem sollte eine zeitnahe Anpassung der Vergabeunterlagen für emissionsfreie Antriebe erfolgen.

## 5.5 Fördermöglichkeiten für den Landkreis Roth

Der Freistaat Bayern bietet umfassende Fördermöglichkeiten für den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV), die in der Richtlinie für die Gewährung von Zuwendungen des Freistaates Bayern für den ÖPNV (RZÖPNV) geregelt sind. Im Rahmen der RZÖPNV ist auch die Förderung der nachhaltigen Transformation des bayerischen ÖPNV aufgeführt. Hierzu zählen auch die Förderung sowohl der Beschaffung von emissionsarmen und emissionsfreien Fahrzeugen als auch der notwendigen Lade- und Tankinfrastruktur.

### 5.5.1 Förderung von Fahrzeugen

Nach dem zuletzt am 19. Juli 2024 aktualisierten Eckpunktepapier zu den sogenannten „Klimabussen“ sowie den Vollzugshinweisen nach Nr. 33 der RZÖPNV vom 13. Oktober 2023 können Fördergelder für die Neubeschaffung von Fahrzeugen beantragt werden. Im Rahmen des Eckpunktepapiers sind entsprechend der nachfolgenden Tabelle pauschale Fördersätze für die Neubeschaffung in Abhängigkeit der Gefäßgröße und der Art des Antriebs festgesetzt.

Buskategorie	Dieselbusse Euro VI und Mild-Hybrid (2024)	Emissionsarme Antriebe	Emissionsfreie Antriebe
<b>Kleinbusse (6,00 – 7,49 m)</b>	15.000 €	25.000 €	30.000 €
<b>Midibusse (7,50 – 11,49 m)</b>	35.000 €	45.000 €	50.000 €
<b>Standardbusse (11,50 – 12,99 m)</b>	45.000 €	65.000 €	75.000 €
<b>Busse von 13,00 – 13,89 m</b>	50.000 €	75.000 €	80.000 €
<b>Busse von 13,90 – 15,00 m</b>	60.000 €	80.000 €	85.000 €
<b>Gelenkbusse</b>	70.000 €	90.000 €	105.000 €

Tab. 47: pauschale Fördersätze für Fahrzeug-Neubeschaffung nach Nr. 33 der RZÖPNV (13. Oktober 2023)

Ab dem Jahr 2025 entfällt die Förderung von Dieselbussen vollständig. Förderfähig bleiben ausschließlich emissionsarme und emissionsfreie Fahrzeuge.

Zusätzlich zu den pauschalen Förderbeträgen können sowohl private als auch öffentliche Verkehrsunternehmen einen weiteren Zuschuss für die antriebsbedingten Mehrkosten beantragen. Diese anteilige Förderung bezieht sich auf die Differenz zwischen den Anschaffungskosten eines emissionsfreien Fahrzeugs, wie etwa eines Elektrobusses, und eines vergleichbaren Dieselbusses (antriebsbedingte Investitionsmehrkosten). Die Förderhöhe ist abhängig von der Unternehmensgröße und setzt voraus, dass die Fahrzeuge entweder mindestens

500.000 Kilometer oder acht Jahre im bayerischen öffentlichen Linienverkehr eingesetzt werden. Die Förderquoten nach Unternehmensgröße sind der nachfolgenden Darstellung zu entnehmen.

Unternehmensgröße	Förderquote
<b>Großes Unternehmen</b>	30 % der beihilfefähigen Kosten
<b>Mittleres Unternehmen</b>	50 % der beihilfefähigen Kosten
<b>Kleines Unternehmen</b>	60 % der beihilfefähigen Kosten

*Tab. 48: Förderquoten nach Unternehmensgröße für antriebsbedingte Mehrkosten im Freistaat Bayern*

### 5.5.2 Förderung der Lade- und Tankinfrastruktur

Neben den Fahrzeugen selbst unterstützt der Freistaat Bayern auch den Ausbau der notwendigen Infrastruktur. Ladestationen und Wasserstofftankstellen für emissionsfreie Busse können unabhängig von der Fahrzeugbeschaffung gefördert werden. Regulär beträgt die Förderquote bis zu 50 % der zuwendungsfähigen Kosten, ergänzt durch eine Komplementärförderung von 5 bis 10 % aus anderen bayerischen Fördertöpfen. Damit ergibt sich eine Gesamtförderquote von 55 bis 60 %.

Auch Photovoltaik-Anlagen und Energiespeicher, die zur Energieversorgung der Ladeinfrastruktur beitragen, sind förderfähig – allerdings nur, wenn der örtliche Energieversorger die Stromversorgung nicht vollständig sicherstellen kann. Generell sind nahezu alle Baukosten und Baunebenkosten sowie eine Pauschale für die Planung mit einigen Ausnahmen förderfähig. Grundsätzlich nicht förderfähig sind hingegen Instandhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen.

### 5.5.3 Rahmenbedingungen und Förderzeiträume

Die RZÖPNV sowie die dazugehörigen Vollzugshinweise gelten zunächst bis Ende bzw. Mitte des Jahres 2027. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass das Land Bayern explizit darauf verweist, dass die tatsächliche Bewilligung und Höhe der Förderung von der aktuellen Verfügbarkeit von Haushaltsmitteln abhängt und somit nicht garantiert ist. Es ist zu empfehlen, im Rahmen der Antragstellung und Feinkostenplanung eine sorgfältige juristische Prüfung der förderfähigen und nicht-förderfähigen Kosten durchzuführen. Bei konkreten Rückfragen bezüglich der Förderung steht das Referat 62 des Bayerischen Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr als Ansprechpartner zur Verfügung.

## 6 AP 6: Detailbetrachtung Linienbündel 4

AP 6 wurde der Übersicht halber in die vorangestellten Arbeitspakete integriert. Hier wurde stellenweise eine Betrachtung mit erhöhter Detailstufe ausgeführt, was an den Ergebnissen jedoch nicht erkennbar ist. Die Gesamtbewertung gilt auch in LB 4 vollumfänglich.

Im Gegensatz zu den weiteren Linienbündeln wurde die Einbindungsmöglichkeit elektrischer Ladeinfrastruktur in das zugeordnete Depot untersucht. Hierbei gilt es zu beachten, dass der Betriebshof der Firma Röhler bereits explizit für die Unterbringung aufgebaut wurde. Bereits im Planungsprozess wurden die Anforderungskriterien berücksichtigt, so dass die Integration von Ladeinfrastruktur ohne erkennbare Problemstellungen möglich ist.

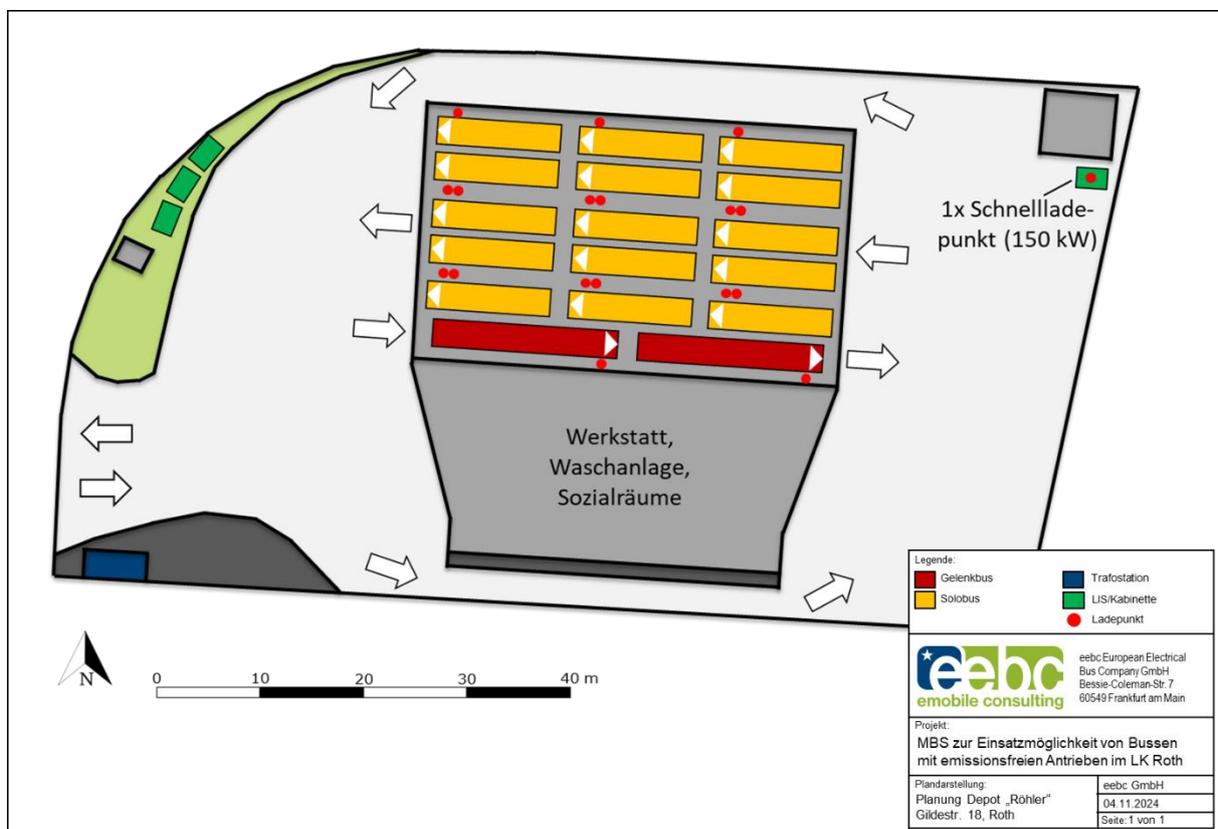


Abb. 74: Betriebshofintegration Ladeinfrastruktur LB 4 (Standort Röhler)

Am Standort steht aktuell ein Netzanschluss mit einer Kapazität von maximal 630 kVA zur Verfügung. Dieser kann seitens des Energienetzbetreibers auf 1.300 kVA erweitert werden. Wie im Zuge des Konzeptentwurf der Ladeinfrastruktur berechnet wurde, ist die Anschlusskapazität ausreichend für die zu erwartende Netzlast inklusive Lastreserve (ca. 1.270 kVA).

## 7 AP 7: Mitarbeiterqualifikation

Die Notwendigkeit der Mitarbeiterqualifikation leitet sich aus dem deutschen Arbeitsschutzrecht ab. Die in den Verordnungen, Unfallverhütungsvorschriften, technischen Regeln und Normenwerken sowie den berufsgenossenschaftlichen Informationen detailliert aufgeführten Pflichten des Arbeitgebers müssen in geeigneter Weise im Betrieb umgesetzt werden.

Mangelhafte oder falsche Qualifikation von Mitarbeitern für Arbeiten an elektrischen Anlagen kann eine Selbstgefährdung sowie eine Gefährdung von Fahrzeugnutzern und Sachwerten zur Folge haben. In Abhängigkeit von der Organisationsstruktur, der angestrebten Instandhaltungstiefe und den Kenntnissen der Mitarbeiter werden notwendige Qualifikationsstufen mithilfe einer Gefährdungsbeurteilung ermittelt. Die Verwaltungs-Berufsgenossenschaft (VBG) hat dazu bereits 2016 den Leitfaden „Elektromobilität – Arbeiten an Omnibussen mit Hochvolt Systemen“ veröffentlicht. In diesem sind auch hilfreiche Erklärungen zur Erarbeitung eines Qualifizierungskonzeptes enthalten. Die DGUV Information 209-093 „Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltsystemen“ (2021) gibt aktualisierte Mindestanforderungen für Qualifizierungsinhalte vor. Ebenso wurden die Themen rund um den elektrischen Antrieb und die Hochvolt-Batterie in die Neufassung der DGUV Regel 109-009 „Fahrzeug Instandhaltung“ (2023) aufgenommen, von denen sich notwendige Qualifikation sinhalte ableiten lassen. Auch die im Februar 2023 veröffentlichte überarbeitete VDV Schrift 825 „Anforderungen an Betriebshöfe und Werkstätten beim Einsatz von Linienbussen mit sauberen und/oder emissionsfreien Antrieben“ enthält Empfehlungen zur Mitarbeiterqualifikation.

Das mögliche Schulungsspektrum reicht hierbei von Unterweisungen für Reinigungskräfte bis hin zur Qualifizierung von Ausbildern für das Arbeiten unter Spannung und orientiert sich an den potenziellen Gefährdungsquellen alternativer Antriebstechniken (primär Hochvolttechnik).

In folgender Abbildung ist ein Überblick über die erforderlichen Qualifizierungsgrade für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltsystemen aufgeführt.

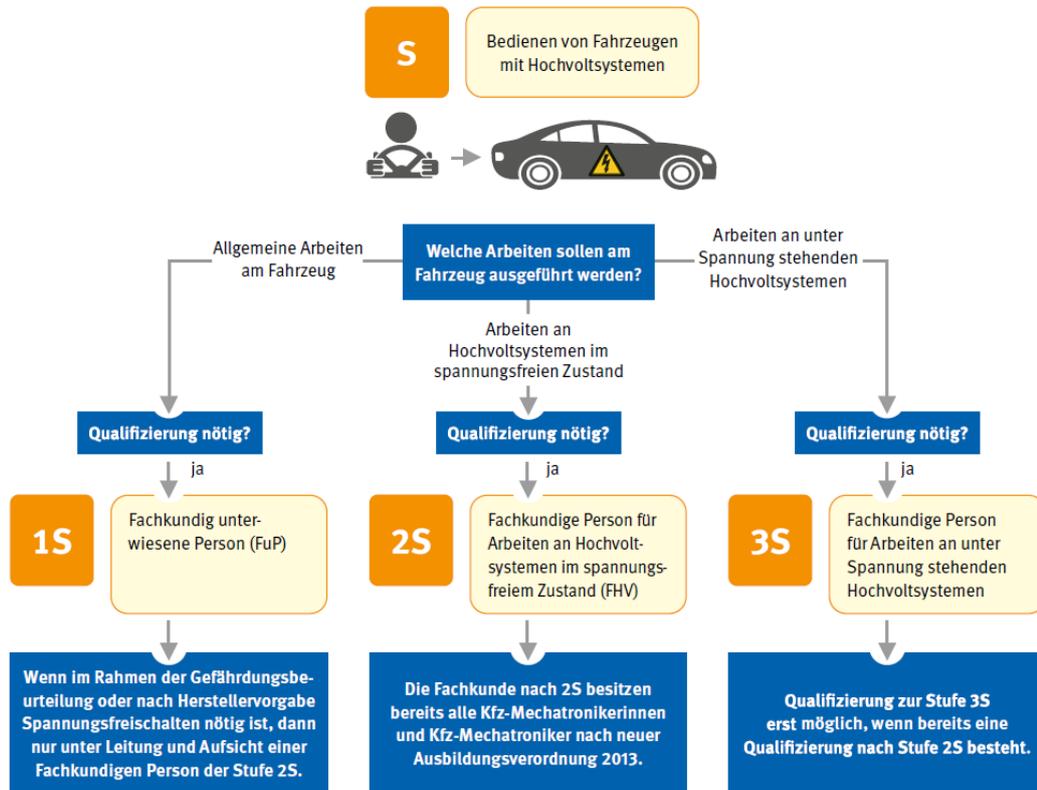


Abb. 75: Bestimmung des erforderlichen Qualifizierungsgrads für Arbeiten an Serienfahrzeugen mit Hochvoltssystemen (Quelle: DGUV 109-009 bzw. DGUV-I 209-093)

Wie an den Qualifikationsbezeichnungen erkennbar ist, richten sich die Schulungen mit niederem Befugnisrang an Reinigungskräfte und den Fahrdienst. Hier steht der sichere Umgang mit den Fahrzeugen im Vordergrund. Hochvoltkomponenten sind nicht zugänglich und stellen keine Gefahr dar.

Höhere Befugnisränge sind auf das Werkstattpersonal ausgerichtet. Hier gibt es diverse Qualifikationsstufen, die abhängig von den Arbeiten im Aufgabenbereich erforderlich sind. Werkstattmitarbeiter ohne Hochvoltqualifikation dürfen Arbeiten am Fahrzeug ausführen, sofern die Arbeitsbereiche nicht Teil des Hochvoltsystems sind. Die Mitarbeiter müssen die Gefahrenbereiche selbstständig erkennen.

Darüber hinaus wird unterteilt in Werkstattmitarbeiter, die Arbeiten am Hochvoltsystem entweder nur im spannungsfreien Zustand oder auch unter Spannung durchführen dürfen. Unter Spannung bedeutet die Durchführung von Fehlersuchen oder Mess- und Prüfvorgängen. Handwerkliche Maßnahmen werden generell im spannungsfreien Zustand ausgeführt. Ausnahme ist hier das Batteriesystem (innerhalb des Batteriecontainers), da sich die Batteriezellen nicht spannungsfrei schalten lassen. In der Regel werden diese Tätigkeiten nicht durch betriebseigenes Werkstattpersonal ausgeführt, sondern durch die Werkstätten der Herstellerfirmen, so dass gerade für kleinere Verkehrsbetriebe keine Notwendigkeit besteht, Personal zur Arbeit an bzw. in Batteriesystemen zu schulen.

Die höchsten Befugnisse haben die verantwortlichen Elektrofachkräfte bzw. die Ausbilder für Arbeiten an HV-Fahrzeugen.

**Hinweis:** Die Durchführung von Schulungen dient nicht nur dem Aufbau von Qualifikation, sondern auch dem Abbau von möglichen Vorbehalten und Ängsten. Vielmals beruhen Unsicherheiten auf Unkenntnis oder Halbwissen zur neuen Technologie. Um alternative Antriebe erfolgreich einzuführen, sollte auch die Belegschaft im Vorfeld umfassend informiert und über die neuen Techniken aufgeklärt werden, selbst wenn dies nicht zwingend vorgeschrieben ist.

Alternative Antriebe stellen nicht nur eine neue mögliche Gefahrenquelle dar, sondern bedeuten auch – zum Beispiel für das Fahrpersonal – eine neue Arbeitsumgebung. Schulungen zum Umgang mit der neuen Technik werden hierfür üblicherweise von den Herstellern der Fahrzeuge bzw. Infrastrukturkomponenten ausgeführt. Im Vordergrund steht hier zunächst der sichere Umgang mit der neuen Technik und etwaige Besonderheiten bei der Nutzung. Darüber hinaus wird häufig das Thema Energieeffizienz verstärkt behandelt. Aufgrund der beschränkten Reichweite der emissionsfreien Fahrzeuge stellt gerade das Thema energieeffiziente Fahrweise eine zusätzliche Möglichkeit der Reichweitenmaximierung dar.

### III Anhang

#### 8 Anhang: Energieverbrauchsgraphen Einzelumläufe

Auf den folgenden Seiten sind die Energieverbrauchsgraphen pro Linienbündel zusammengestellt. Die eingetragenen Grenzwerte für BEV-Technik entsprechen dabei den Entwicklungsprognosen (Vgl. Kapitel 2.1.4 Berechnungsgrundlage und Prämissen).

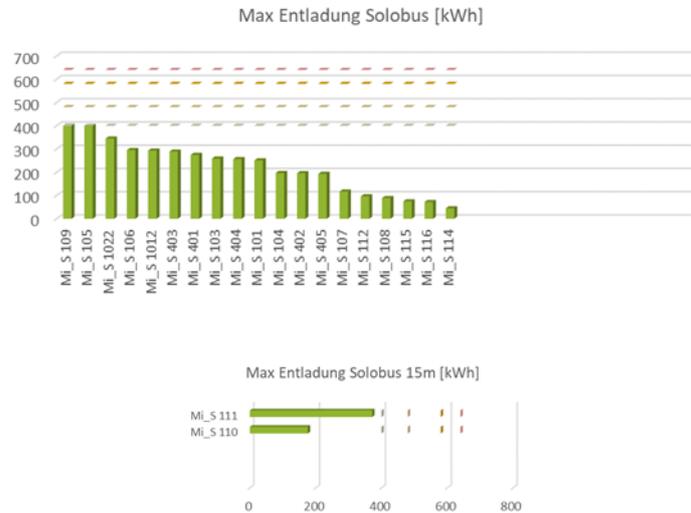
Für FCEV-Technik ist kein valides Entwicklungspotenzial abschätzbar. Entsprechend sind die Grenzwerte nach dem Stand der Technik aufgezeichnet. Um dabei die Marktvarianz abzubilden, wird jeweils ein ‚kleiner‘ und ‚großer‘ Grenzwert vermerkt. Die Werte spiegeln dabei marktübliche Speichergrößen namhafter Europäischer Hersteller ab.

Für FCEV ist das Marktangebot eingeschränkt, weshalb Kleinbusse grundsätzlich als nicht machbar klassifiziert werden müssen. Für Solobusse mit 15 m Fahrzeuglänge sind auch keine FCEV-Modelle am Markt. Die Bewertung kann hier jedoch unter Vorbehalt erfolgen, indem Speichergrößen des 12m Solobusses auch für das größere Pendant angesetzt werden (Analog zur BEV-Technik). Selbstverständlich sind die Verbrauchsparameter auf die Fahrzeuggröße angepasst.

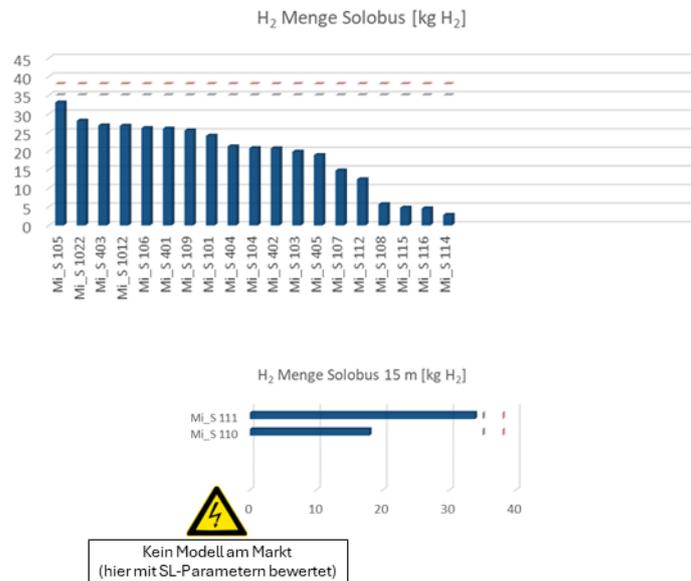
Entsprechend der Beschreibungen in Kapitel 2.1.4 *Berechnungsgrundlage und Prämissen* werden hier die verfügbaren Umlaufdaten ausgewertet.

### Energieverbrauchsgraphen Datensatz Rombs (zu LB 3)

#### Einzelumläufe (BEV)



#### Einzelumläufe (FCEV)

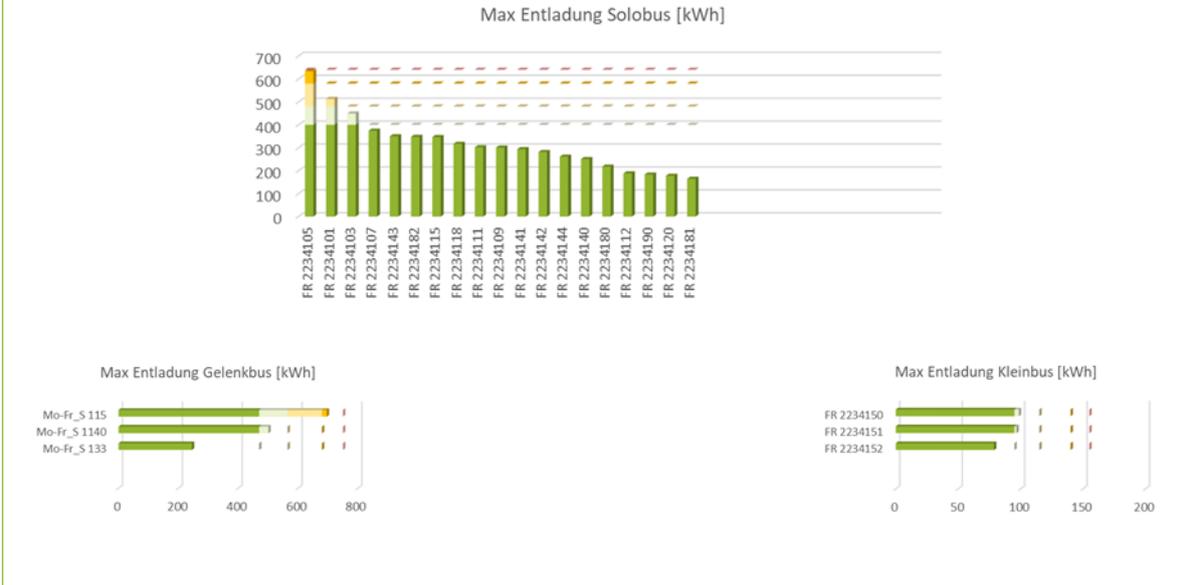


- Übersicht Grenzwerte BEV**
- Gültig von 2038 bis 2042
  - Gültig von 2033 bis 2037
  - Gültig von 2028 bis 2032
  - Gültig von heute bis 2027

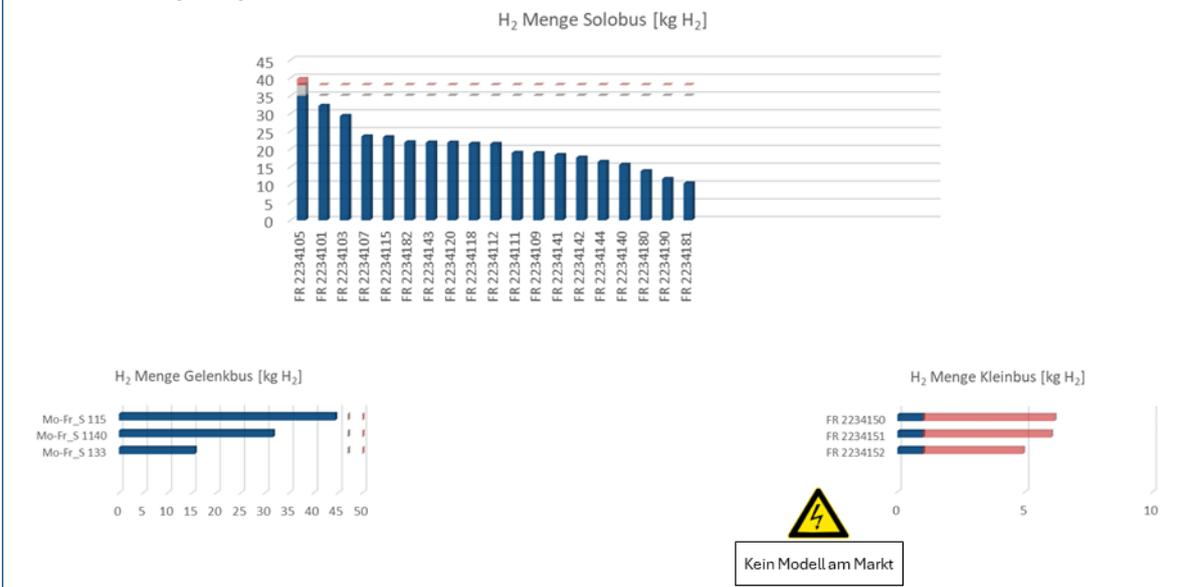
- Übersicht Grenzwerte FCEV**
- H<sub>2</sub> Tank groß
  - H<sub>2</sub> Tank klein

## Energieverbrauchsgraphen Datensatz OVf (zu LB 6)

### Einzelumläufe (BEV)

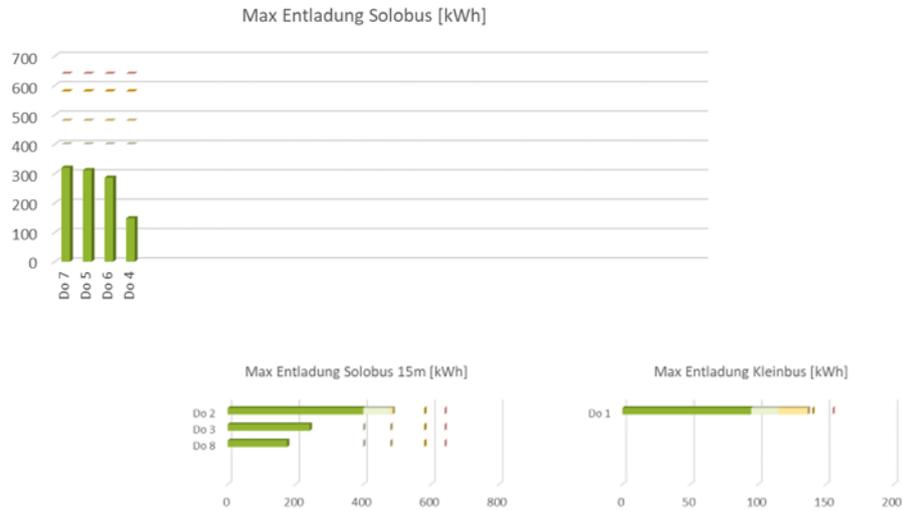


### Einzelumläufe (FCEV)

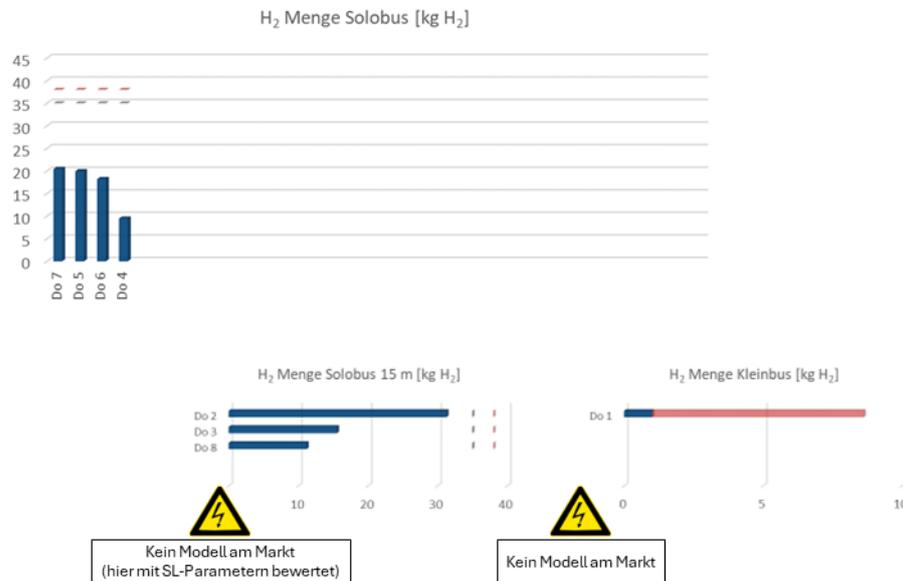


### Energieverbrauchsgraphen Datensatz Ehard (zu LB 7 – TN 2)

#### Einzelumläufe (BEV)



#### Einzelumläufe (FCEV)



#### Übersicht Grenzwerte BEV

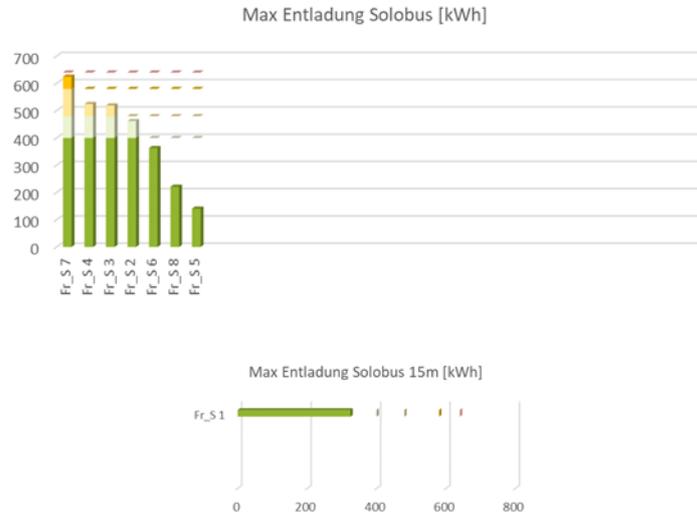
- Gültig von 2038 bis 2042
- Gültig von 2033 bis 2037
- Gültig von 2028 bis 2032
- Gültig von heute bis 2027

#### Übersicht Grenzwerte FCEV

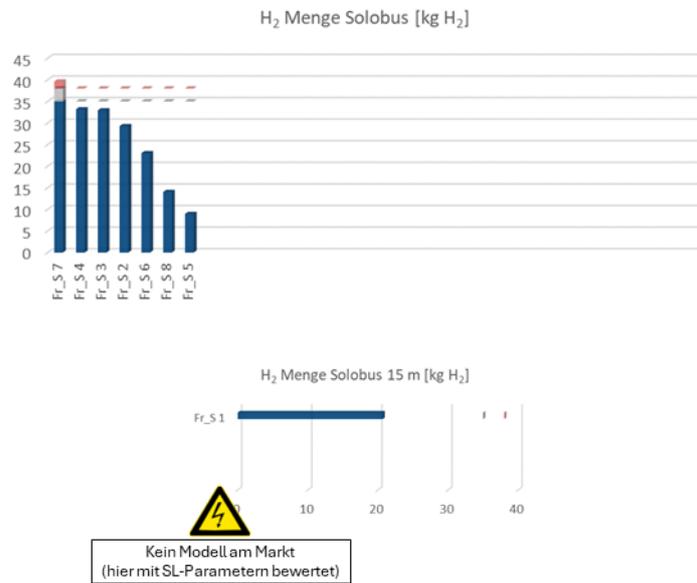
- H<sub>2</sub> Tank groß
- H<sub>2</sub> Tank klein

### Energieverbrauchsgraphen Datensatz 605/607 (zu LB 7 – TN 1)

#### Einzelumläufe (BEV)



#### Einzelumläufe (FCEV)



#### Übersicht Grenzwerte BEV

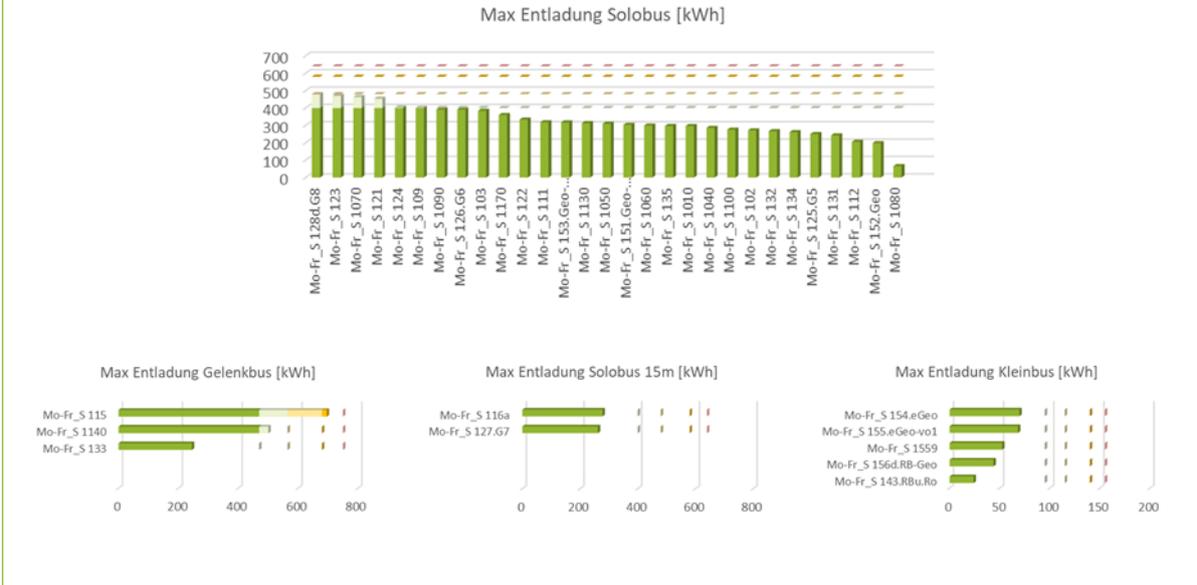
- Gültig von 2038 bis 2042
- Gültig von 2033 bis 2037
- Gültig von 2028 bis 2032
- Gültig von heute bis 2027

#### Übersicht Grenzwerte FCEV

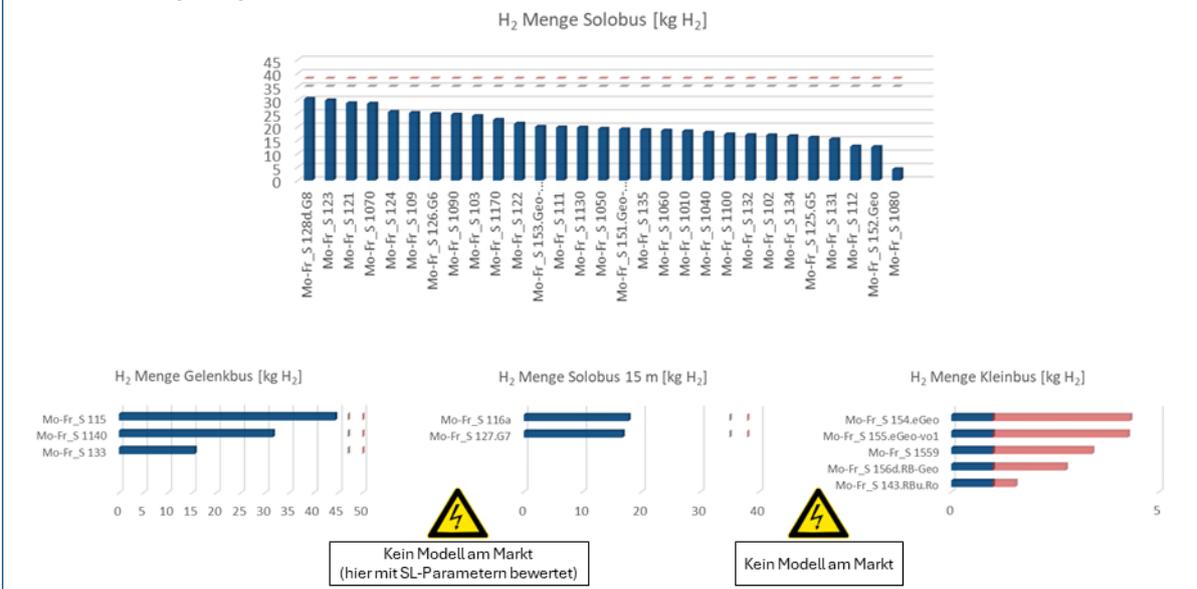
- H<sub>2</sub> Tank groß
- H<sub>2</sub> Tank klein

### Energieverbrauchsgraphen Datensatz Röhler (zu LB 2 und LB 4)

#### Einzelumläufe (BEV)



#### Einzelumläufe (FCEV)



#### Übersicht Grenzwerte BEV

- Gültig von 2038 bis 2042
- Gültig von 2033 bis 2037
- Gültig von 2028 bis 2032
- Gültig von heute bis 2027

#### Übersicht Grenzwerte FCEV

- H<sub>2</sub> Tank groß
- H<sub>2</sub> Tank klein

## 9 Anhang: Lastgangoptimierungen (Graphen)

### Lastgänge mit und ohne Optimierung Standort Röhler, Datensatz Röhler (zu LB 2 und LB 4)

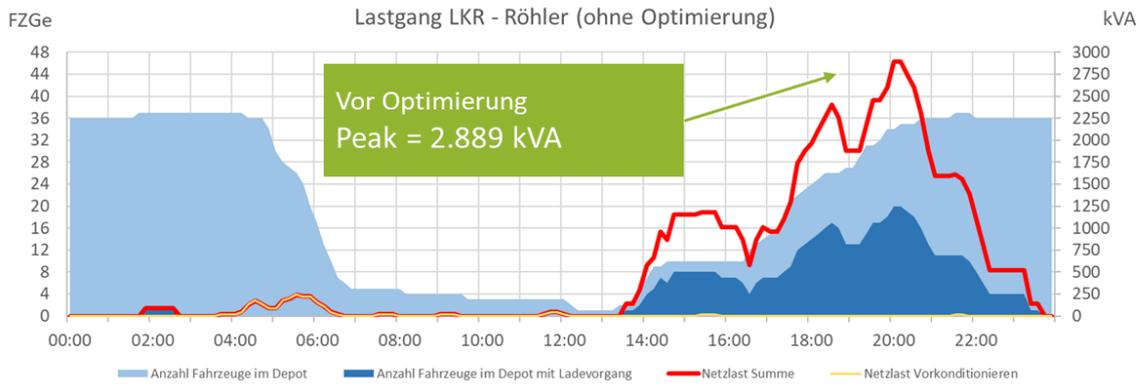


Abb. 76: Lastgang ohne Optimierung Standort Röhler, Datensatz Röhler (zu LB 2 und LB 4)

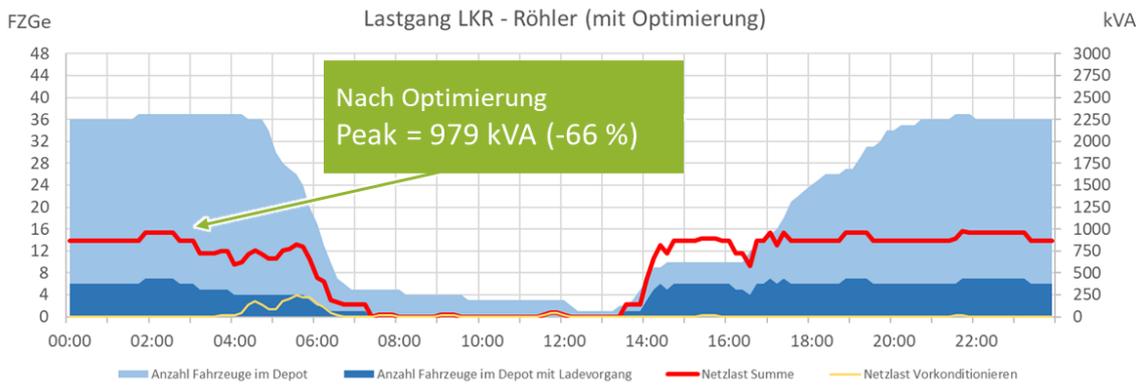


Abb. 77: Lastgang mit Optimierung Standort Röhler, Datensatz Röhler (zu LB 2 und LB 4)

### Lastgänge mit und ohne Optimierung Standort Rombs – Thalmässing, Datensatz Rombs (zu LB 3)

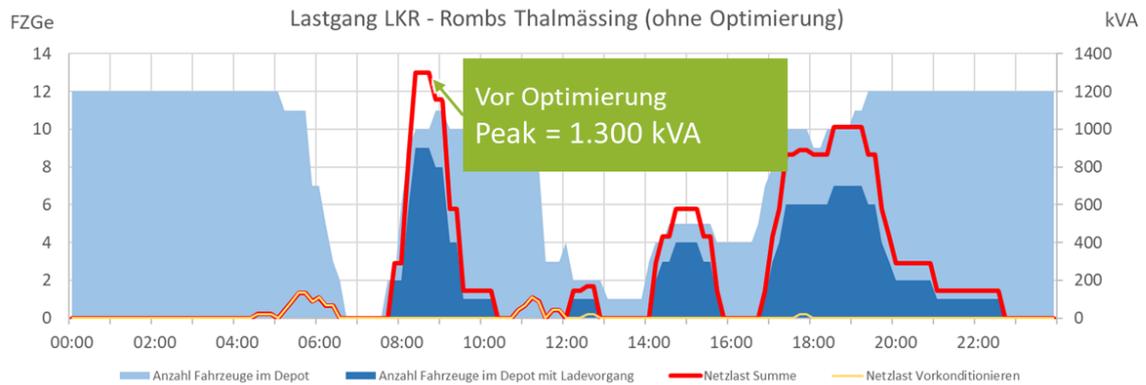


Abb. 78: Lastgang ohne Optimierung Standort Rombs – Thalmässing, Datensatz Rombs (zu LB 3)

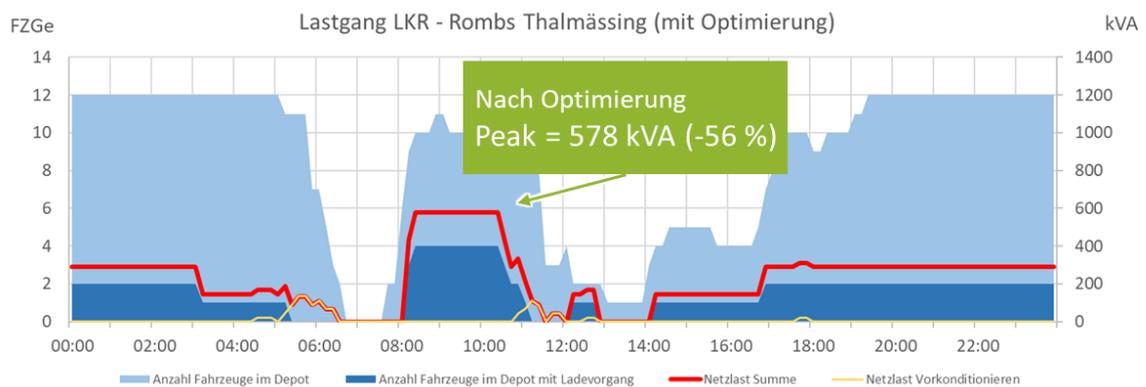


Abb. 79: Lastgang mit Optimierung Standort Rombs – Thalmässing, Datensatz Rombs (zu LB 3)

### Lastgänge mit und ohne Optimierung Standort Rombs – ELKO, Datensatz Rombs (zu LB 3)

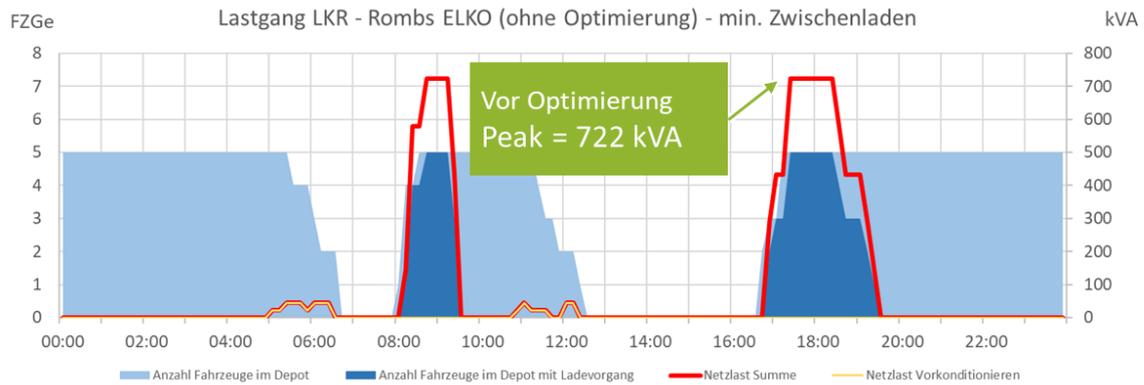


Abb. 80: Lastgang ohne Optimierung Standort Rombs – ELKO, Datensatz Rombs (zu LB 3)

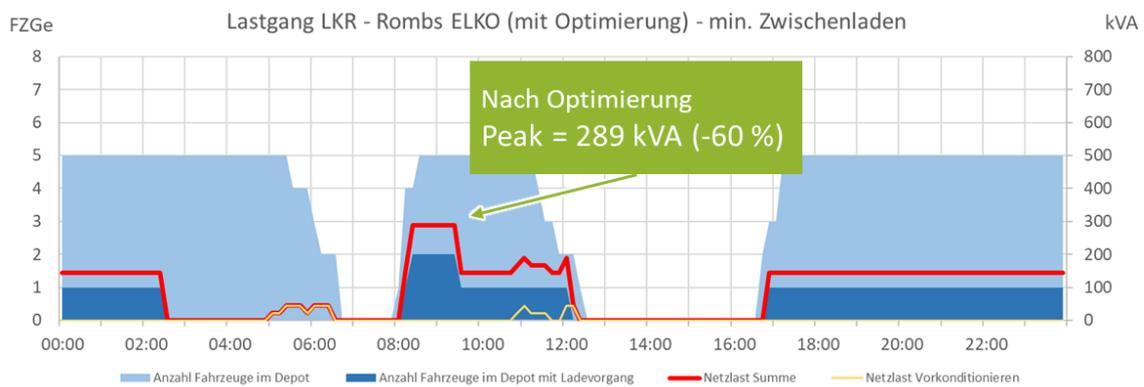
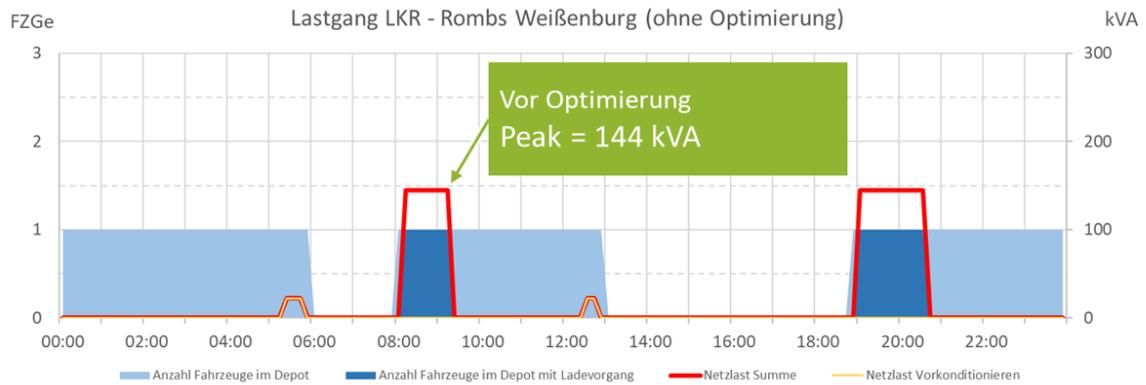
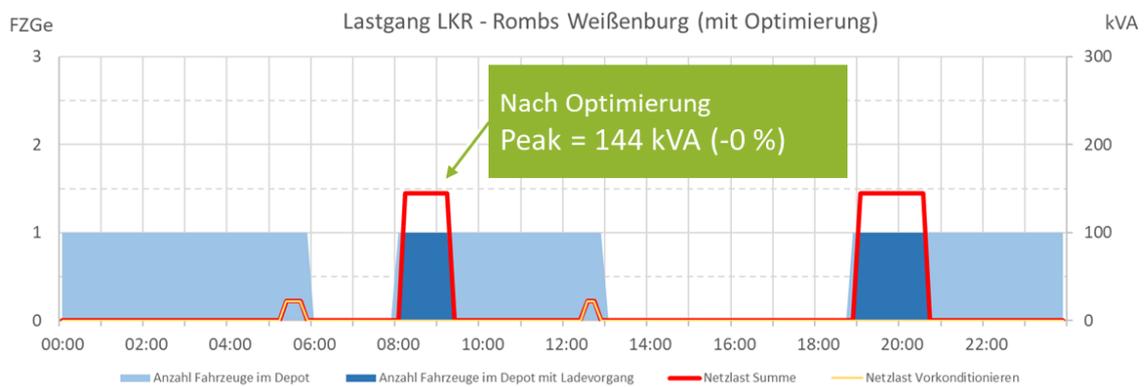


Abb. 81: Lastgang mit Optimierung Standort Rombs – ELKO, Datensatz Rombs (zu LB 3)

**Lastgänge mit und ohne Optimierung Standort Rombs – Weißenburg, Datensatz Rombs (zu LB 3)**



*Abb. 82: Lastgang ohne Optimierung Standort Rombs – Weißenburg, Datensatz Rombs (zu LB 3)*



*Abb. 83: Lastgang mit Optimierung Standort Rombs – Weißenburg, Datensatz Rombs (zu LB 3)*

### Lastgänge mit und ohne Optimierung Standort OVF, Datensatz OVF (zu LB 6)

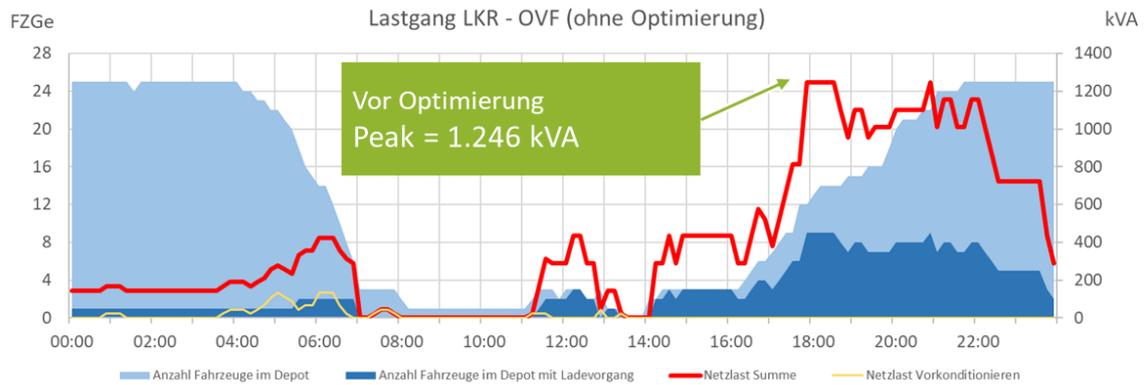


Abb. 84: Lastgang ohne Optimierung Standort OVF, Datensatz OVF (zu LB 6)

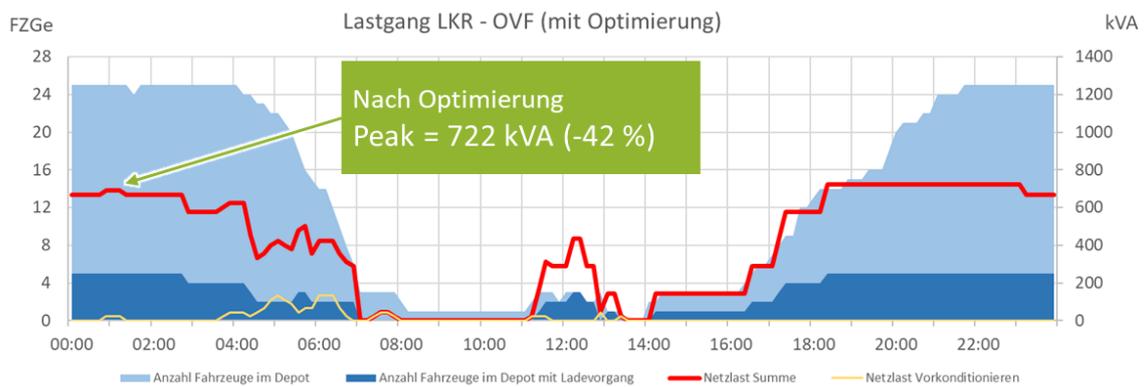
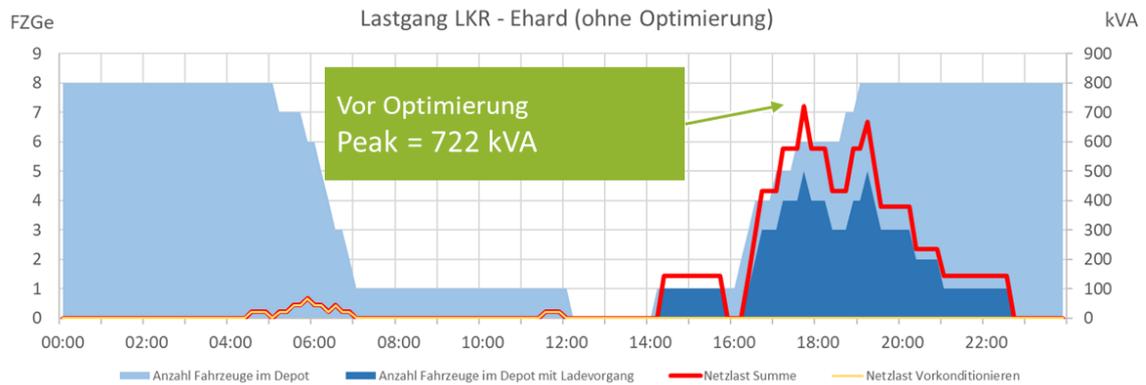
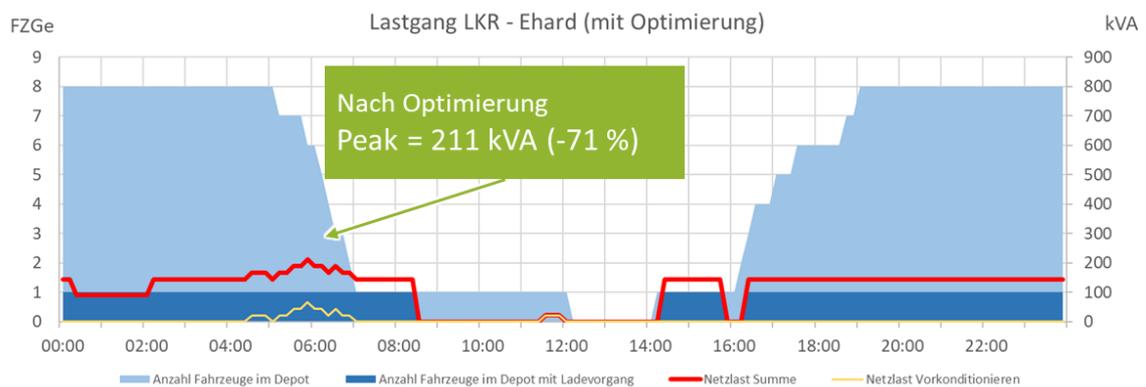


Abb. 85: Lastgang mit Optimierung Standort OVF, Datensatz OVF (zu LB 6)

**Lastgänge mit und ohne Optimierung Standort Ehard, Datensatz Ehard (zu LB 7 – TN 2)**

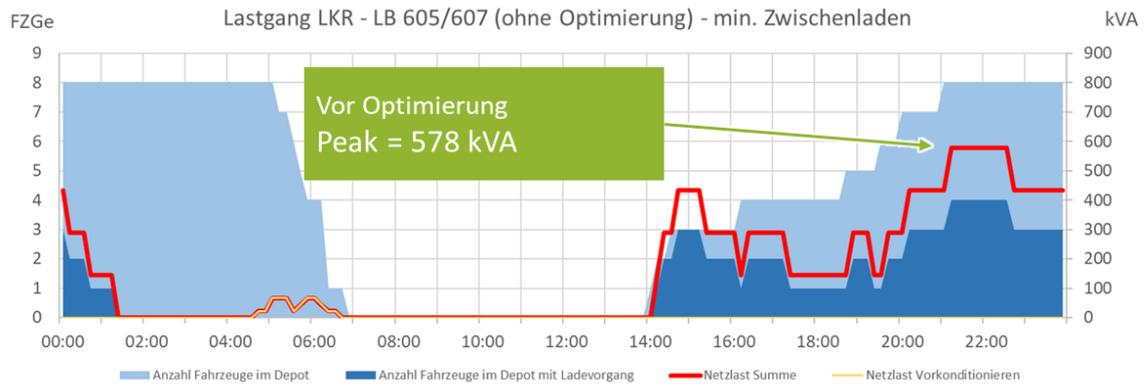


*Abb. 86: Lastgang ohne Optimierung Standort Ehard, Datensatz Ehard (zu LB 7 – TN 2)*

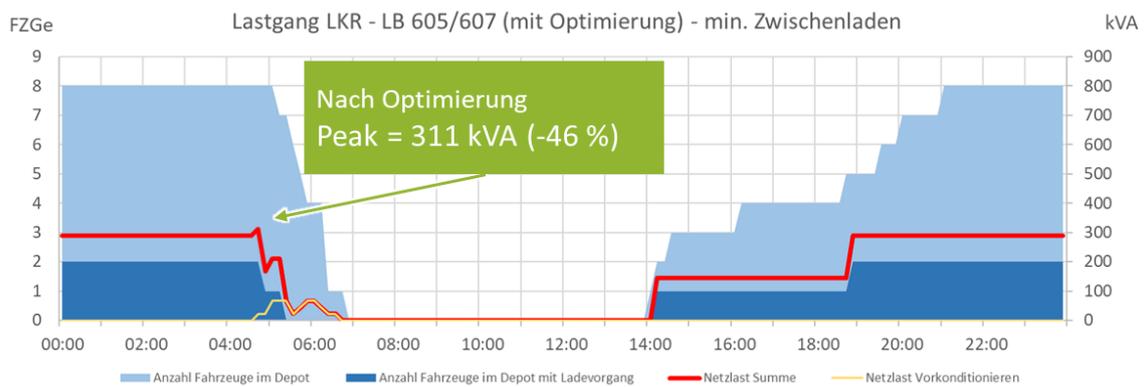


*Abb. 87: Lastgang mit Optimierung Standort Ehard, Datensatz Ehard (zu LB 7 – TN 2)*

**Lastgänge mit und ohne Optimierung Standort N.N., Datensatz 605/607 (zu LB 7 – TN 1)**



*Abb. 88: Lastgang ohne Optimierung Standort N.N., Datensatz 605/607 (zu LB 7 – TN 1)*



*Abb. 89: Lastgang mit Optimierung Standort N.N., Datensatz 605/607 (zu LB 7 – TN 1)*

## 10 Grundlagen

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

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

Dieses Kapitel beschreibt die verschiedenen Fahrzeugkonzepte, vergleicht deren typischen Stärken und Schwächen im allgemeinen Kontext und trifft Aussagen zur Marktverfügbarkeit in Deutschland.

### 10.1 Batterieelektrische Fahrzeuge

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 für alle Typen gleich.

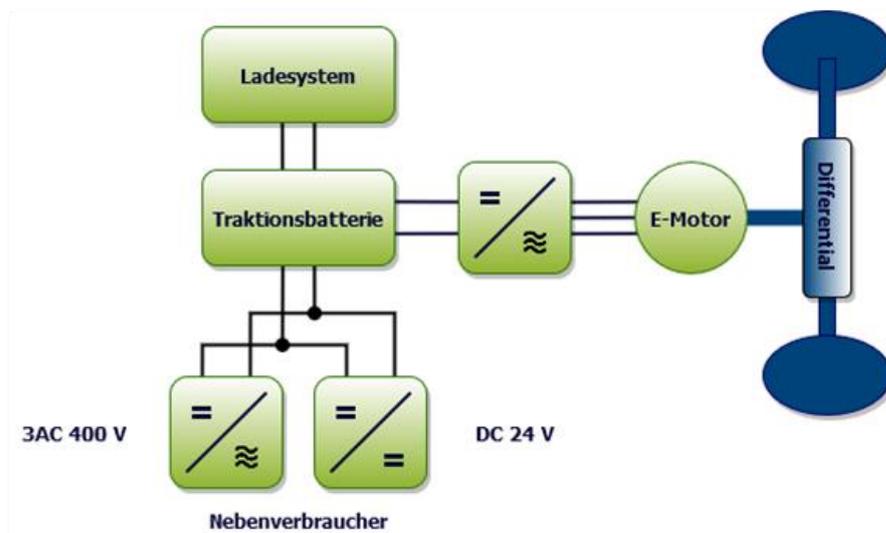


Abb. 90: Antriebstopologie batterieelektrischer Bus

Zentrales Element ist die Traktionsbatterie. Aufgrund der Anforderungen im Fahrbetrieb und der technologischen Entwicklung wird die Traktionsbatterie nahezu ausschließlich 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

Radnaben- 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.

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 Lenkhilfpumpe 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 sog. Energiebatterien, während Strategien für das Laden auf Linie eine sehr leistungsfähige Batterievariante erfordern, die technisch bedingt kleinvolumig ausgelegt wird.

### **Steckbrief Batterietechnik**

Batterien sind elektrochemische Energiespeicher, bei denen Energie über chemische Reaktionen reversibel eingelagert wird. Batterien bezeichnen geschlossene Systeme mit umgebender Elektronik, die die nutzbare Ausgangsspannung nach außen abgeben. Innerhalb einer Batterie können mehrere Module verbaut sein, die wiederum aus einzelnen Zellen bestehen.

Die Energiespeicherung auf Zellebene erfolgt aufgrund der Verschiebung von Lithium-Ionen. Im ungeladenen Zustand sind die Lithium-Ionen im Kathodenmaterial eingelagert, die aus Mischoxiden besteht. Bei Anlegen einer Ladespannung werden Elektronen von der Kathode abgezogen und auf Anodenseite zugeführt. Der zellinterne Separator verhindert einen Elektronenaustausch, so dass Ladungsneutralität über ein Wandern der positiven Lithium-Ionen durch den ionenleitenden Elektrolyten gewährleistet wird. Die Anode besteht in der Regel aus Graphit oder Lithium-Titanat, in dem die gewanderten Ionen eingelagert werden können. Um den Ladungsaustausch zu beschleunigen ist das Elektrolytmaterial auch mit Lithium-Ionen angereichert.

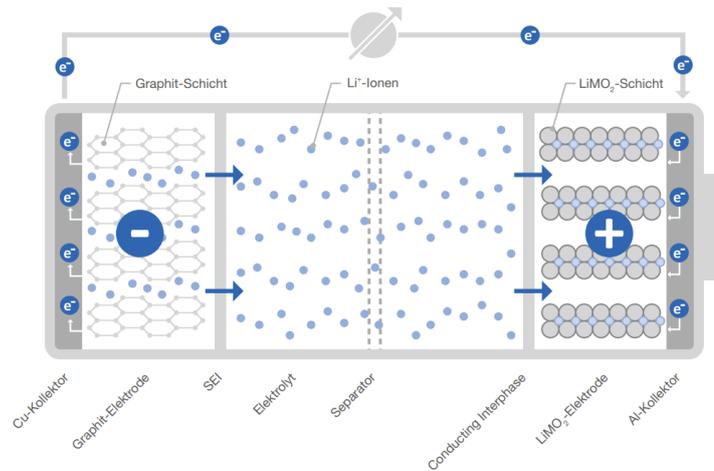


Abb. 91: Zellaufbau-Lithium-Ionen-Batterie [Quelle: Dorrmann et. al., Kompendium: Li-Ionen Batterien Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen]

Der Entladevorgang erfolgt umgekehrt, wobei hier Elektronen von der Anode abgezogen werden, was ein Wandern der Ionen zurück zur Kathode bewirkt.

Im Bus-ÖPNV sind Lithium-Titanat-Oxid (LTO), Nickel-Mangan-Cobalt (NMC) und Lithium-Eisen-Phosphat (LFP) die verbreitetsten Zellchemien. LTO-Batterien sind dabei als typische Leistungsbatterien für ein vielfaches Laden mit hoher Ladegeschwindigkeit ausgelegt, was zu Lasten der speicherbaren Energiemenge geht. Die beiden anderen Varianten als sogenannte Energiebatterien bieten die Möglichkeit, große Energiemengen zu speichern, erlauben jedoch nur geringere Ladegeschwindigkeiten. In Bezug auf das Batterievolumen beziehungsweise das Gewicht wird hier auch von Leistungsdichte bzw. Energiedichte gesprochen.

### 10.1.1 Ladestrategien für batterieelektrische 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.

#### 10.1.1.1 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.

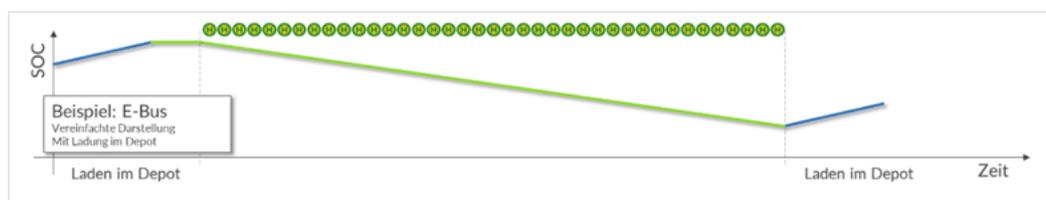


Abb. 92: Vereinfachte Darstellung Betriebstag mit Depotladung

Fahrzeuge, die für diese Variante ausgelegt sind, verfügen in der Regel über eine groß dimensionierte sog. Energiebatterie (350 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.

### 10.1.1.2 Laden auf 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.

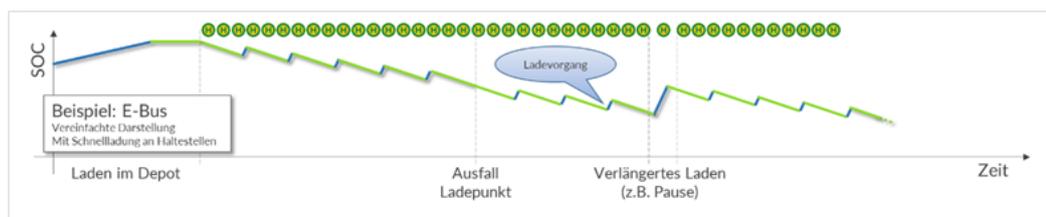


Abb. 93: Vereinfachte Darstellung Betriebstag mit Laden auf Linie

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 sog. 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.

### 10.1.2 Aufbau der Ladeinfrastruktur

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

- Ankopplung an das öffentliche Stromnetz
- Galvanische Trennung zwischen Stromnetz und Fahrzeug
- Umwandlung des Drehstroms in Gleichstrom variabler Spannung
- Kommunikations- und Überwachungsfunktionen
- Zugehörige Managementsysteme

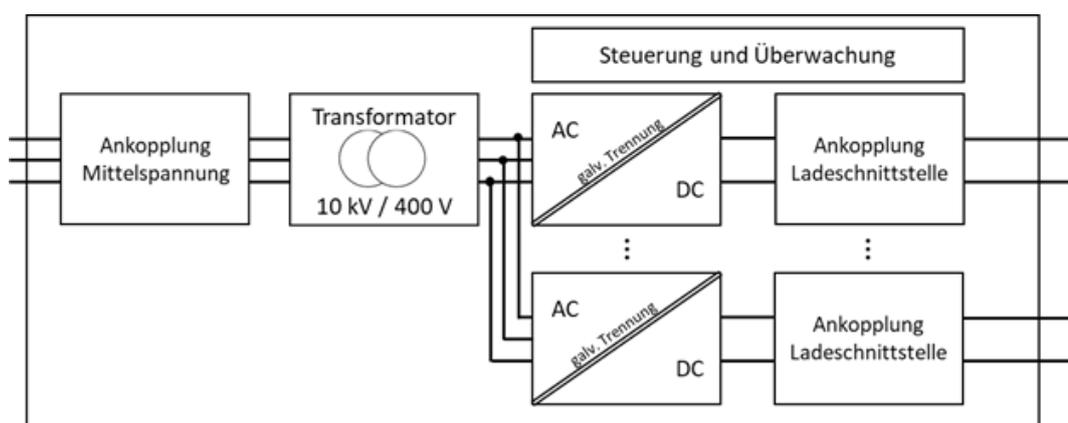


Abb. 94: Schematischer Aufbau der elektrischen Ladeinfrastruktur

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 Ladinfrasturktur 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, wie erwähnt, 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 Einsparpotentiale abgerufen werden.

Das Funktionspotential 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 Batteriebusse 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 alleine darin begründet, dass das Ladeintervall beim E-Bus länger ist als das Betankungsintervall beim Diesibus. Vielmehr ist die Ladezeit selbst eine variable Größe, abhängig vom vorherigen Einsatz, was die Ladeplatzorganisation unter besondere Herausforderungen stellen kann.

### 10.1.3 Ladeschnittstellen

Für die Nachladung batterie-elektrischer Busse im Stand sind aktuell zwei Alternativen marktbeherrschend: Nachladung mittels Steckkontakt (ähnlich dem Pkw-Bereich) oder Nachladung per Pantograph (ähnlich der Straßenbahn).

#### 10.1.3.1 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 200 A (ungekühlt) limitiert. Bei einer angenommenen Batteriespannung von 750 V ergeben sich 150 kW max. Ladeleistung für einen typischen Batteriebus.



Abb. 95: Efacec CCS Ladestation mit Phoenix Contact Stecker auf Typ 2 Basis (Bild: Efacec)

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

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

Typischerweise werden manuelle Steckkontaktlösungen für elektrische Konzepte eingesetzt, die über eine geringe Ladefrequenz verfügen. Die vergleichsweise geringen Kosten rechtfertigen den manuellen Aufwand zum Kontaktschluss. Weit verbreitet ist diese Lösung bei Konzepten mit Depotladung, wobei die Dauer des Kontaktschlusses und Ladezeit (aufgrund vergleichsweise geringer Ladeleistung) eine eher untergeordnete Rolle spielen. Es ist jedoch anzunehmen, dass bei weiterer Verbreitung von E-Mobilität (z.B. flottenweite Anwendung) manuelle Kontaktschlussverfahren für E-Busse nicht zwingend die Ideallösung für die Depotladung darstellen. Hintergrund 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.

### 10.1.3.2 *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 (sog. 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 Busdach wie ein neues Anwendungsfeld scheint, kann auf langjährige Erfahrung und entsprechende Produkte aus der Schienenfahrzeug- und

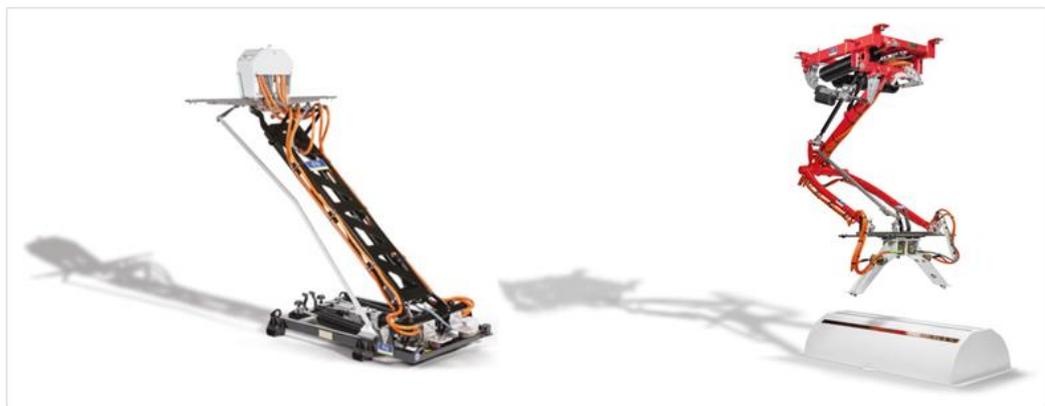
Trolleybustechnik zurückgegriffen werden. Die notwendigen Anpassungen sind technologisch überschaubar, weshalb die eingesetzten Systeme eine hohe Verfügbarkeit aufweisen.

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.



*Abb. 96: Siemens / Volvo Pantograph und Kontaktschienen (Bild: Siemens AG)*

Die Stromleitfähigkeit des Systems ist über die Kontaktfläche des Kohlenstoffmaterials begrenzt. Kohlenstoff verfügt über eine begrenzte Stromtragfähigkeit bis es zum Einbrennen der Kohleschiene kommt. Aktuelle Systeme werden mit bis zu 500 kW Ladeleistung beziffert, wobei in der Regel Leistungen von 200-300 kW praktisch umgesetzt werden. Diese Beschränkung ist i.d.R. auf die Batterie und den genutzten Spannungsbereich zurückzuführen. Da die Leistungsbegrenzung letztlich auf die Stromtragfähigkeit zurückgeht, können höhere Batteriespannungen auch hier höhere Ladeleistungen ermöglichen.



*Abb. 97: Schunk Pantograph SLS 101 und SLS 201 (Bild: Schunk Transit Systems)*

Kontaktstift-Systeme werden i.d.R. vom Busdach nach oben zur Ladestation ausgefahren, wobei auch Systeme in umgekehrter Ausrichtung verfügbar sind und die Kontaktstifte mit dem Lade-Arm von der Ladestation auf das Busdach abgesenkt werden. 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 PE- und Kommunikationskontakt geschlossen wird, bevor die Leistungskontakte schließen. Umgekehrt trennen zunächst die Leistungskontakte und die Erdung des Fahrzeugs 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.

Die Schienen- und Kontaktstiftsysteme gelten als sehr robuste Systeme und zeichnen sich durch eine hohe Verfügbarkeit aus. Die robusten und vergleichsweise günstigen Pantographensysteme eignen sich für einen weiten Anwendungsbereich. Der notwendige Installationsraum ist auf ein Minimum begrenzt. Notwendig sind Leistungselektronik und der Lademast. Die Leistungselektronik kann in einem Gerätehaus der Größenordnung eines Mittelspannungstransformatorhauses untergebracht werden, womit ggf. auch mehrere Lademasten versorgt werden können. Mast und Gerätehaus müssen nicht in unmittelbarer Nähe voneinander aufgebaut sein.

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.

#### 10.1.4 Nachladung über partielle Oberleitungen

Die Nachladung über Oberleitungen ist eine aus dem Trolleybusbetrieb bekannte Technologie. Bei diesem, z.B. auch In Motion Charging oder Duo-Bus genannten System, sind Teilstücke der Buslinie mit Oberleitungen ausgestattet. Während dieser Passagen ist das Fahrzeug über einen Stromabnehmer mit der Gleichspannung auf dem Oberleitungsnetz verbunden, wobei die Traktionsbatterie geladen wird und die Traktionsenergie gleichzeitig direkt aus dem Netz bezogen wird. In oberleitungsfreien Passagen bezieht das Fahrzeug die Traktionsenergie ausschließlich aus der im Fahrzeug installierten Traktionsbatterie.

Auch wenn der partielle Trolleybus hier unter batterieelektrische Fahrzeuge aufgeführt ist, so stellt er doch eine Sonderform der Fahrzeuge dar. Der Antriebsstrang ist identisch zu einem batterieelektrischen Fahrzeug mit entsprechendem Nachladesystem über Oberleitungen. Jedoch sind Fahrzeuge für diese Anwendung als sogenannte doppelt isolierte Fahrzeuge auszulegen. Hintergrund sind entsprechende gesetzliche und normative Richtlinien, da kein permanenter Kontakt zur Erde sichergestellt ist und somit bei einem Einzelfehler die Gefahr des elektrischen Schlags bestehen würde. Auch wenn das Oberleitungsnetz geerdet ist, so kann aufgrund der Fahrzeugbewegung der permanente Kontakt nicht gewährleistet werden (Sprünge der

Kontaktschuhe auf der Leitung). Zur Gewährleistung der zweifachen Isolation müssen alle Systeme im Hochspannungssegment (Motoren, Bremswiderstand, Umrichter, etc.) über zwei separate Isolationsstrecken verfügen oder es wird ein zentraler Leistungs-Trennwandler direkt hinter der Oberleitungseinspeisung verwendet.

Die technischen Wurzeln des partiellen Trolleybusses stecken in der Straßenbahntechnik, weshalb viele Hersteller von Straßenbahnausrüstungen ebenfalls Trolleybusausrüstungen anbieten. Die Produkte und Systeme sind auf entsprechende Betriebsdauern (über 20 Jahre) ausgelegt, was letztlich zulasten von Gewicht und Kosten ermöglicht wird.

Partielle Trolleybusssysteme sind einerseits geeignet für große Verkehrsunternehmen mit vielen elektrischen Linien, die beispielsweise in den Außenbezirken geladen werden und in der Innenstadt oberleitungsfrei betrieben werden sollen. Andererseits bietet es sich an, im Innenstadtbereich, wo viele Linien die gleichen Teilstücke befahren, ein Oberleitungsnetz zu installieren und die Außenbezirke oberleitungsfrei zu befahren. Diese Herangehensweise wird aktuell z.B. in Solingen verfolgt.

Der erste Fall ist an einem optisch ansprechenden Stadtbild ohne Oberleitungen in der Innenstadt ausgerichtet, während der zweite Fall darauf ausgerichtet ist, das notwendige Oberleitungsnetz lokal zu begrenzen und für möglichst viele Einzellinien zu nutzen.



*Abb. 98: Batterie-Oberleitungsbus in Solingen im oberleitungsfreien Betrieb, NRW (Bild: Stadtwerke Solingen)*

Die Einrichtung erfordert ein hohes Investitionsaufkommen und damit eine langfristige Bindung an das System. Die Teilstücke, in denen die Traktionsenergie aus der Oberleitung bezogen wird, zeichnen sich durch eine erhöhte Effizienz aus, da Verluste beim Laden und Entladen der Batterie in diesen Passagen entfallen. Bei entsprechender Ausrichtung beinhalten derartige Systeme ein großes Potential für die Zukunft, da sie über die höchste Energieeffizienz und Leistungskapazität

der dargestellten Systeme verfügen. Die Wirtschaftlichkeit hängt allerdings auch stark von der Entwicklung der Energiekosten ab.

Die Anwendungsbereiche von Systemen mit partieller Oberleitung sind praktisch auf wenige Bereiche reduziert. Einerseits sind Regionen zu nennen, bei denen bereits ein Oberleitungsnetz für Trolleybusse besteht. Hier können im Zuge eines Netzausbaus kostenintensive Weichen und Kreuzungen eingespart werden (zum Beispiel in Zürich realisiert), oder auch Linienabschnitte elektrisch bedient werden, die nicht an das Oberleitungsnetz angebunden sind (siehe Solingen).

Für Neueinführungen sind die Anwendungen auf großflächige Systemeinführungen begrenzt. Für Städte oder Gemeinden mit einem hohen Verkehrs- bzw. Transportaufkommen oder topographisch anspruchsvollen Strecken, jedoch ohne Straßenbahnsysteme, stellt ein solches System eine denkbare Alternative dar. Die Trolleybusse ermöglichen eine hohe Passagierkapazität, weshalb derartige Systeme eine Art Zwischenstufe zwischen Bus- und Straßenbahn ÖPNV darstellen. Wie bei den Passagierkapazitäten rangiert der partielle Trolleybus auch in Hinblick auf Kosten zwischen Bus- und Straßenbahn-ÖPNV. Eine Neueinführung erfordert jedoch einen konsequenten Umstieg auf die Technologie, um die Kosten für die Infrastruktur wirtschaftlich rechtfertigen zu können. Die Einführung einzelner, weniger Trolleybus-Linien ist wirtschaftlich nicht darstellbar.

Jegliche oberleitungsgebundenen Systeme bedürfen einer konkreten Analyse der vorhandenen elektrischen Infrastruktur. Ggf. können vorhandene Unterwerke von Straßenbahn-Oberleitungsanlagen genutzt werden, jedoch ist bei Neueinführung i.d.R. ein großer Aufwand zum Ausbau der elektrischen Infrastruktur notwendig.

#### 10.1.5 Ladeinfrastruktur im Depot

Die klassische Ausführung eines Übernachtladungssystems ist so ausgeführt, dass mehrere Fahrzeuge im Depot gleichzeitig mit vergleichsweise geringer Leistung (50-150 kW) geladen werden können. Aufgrund der geringen Leistung sind entsprechend lange Ladezeiträume erforderlich.

Für die bisher umgesetzten Flottengrößen stellen langsam ladende parallele Ladevorgänge im Depot keine besondere Herausforderung dar, da der Großteil der Beförderungsleistung weiterhin von Dieselnissen erbracht wird. Bei großen E-Bus Flotten muss dieser Systemansatz jedoch im Detail betrachtet werden, da häufig die Betriebspausen am Tag und über Nacht nicht für alle Fahrzeuge ausreichen, um den notwendigen Energiebedarf zu liefern. Hier können Eingriffe in den Betriebsablauf Abhilfe schaffen.

Eine weitere große Herausforderung ergibt sich aus den begrenzten Energienetz-Kapazitäten, die ein gleichzeitiges Laden von 100 Fahrzeugen und mehr häufig nicht ermöglichen. Über ein adäquates Lademanagementsystem kann dieser Engpass typischerweise entspannt werden, indem die Ladevorgänge entsprechend der Ankunfts- und Abfahrreihenfolge zeitlich verteilt werden. Durch den zeitlichen Versatz von Ladevorgängen kann die maximale Netzlast auf ein Minimum reduziert werden. Dies kann einerseits erforderlich sein, um die maximale Netzlast nicht zu überschreiten und andererseits empfohlen, um Bezugskosten einzusparen (Tarifgestaltung in Abhängigkeit von maximaler Netzlast) und Netzanschlusskomponenten kleiner zu dimensionieren.



Abb. 99: Busdepot Indira-Gandhi-Straße der BVG, Berlin (Bild: XCHARGE)

Systembedingt ist jeder E-Bus Stellplatz mit einer Ladeschnittstelle ausgerüstet. Typischerweise ist dies ein Plug-In System nach CCS Standard, der für die typischen Leistungswerte bis zu 150 kW die kostengünstigste Ladeschnittstelle darstellt. Der Ladeanschluss ist dabei oft als sog. Satellit ausgeführt. Ein solcher Satellit ist dabei primär Ordnungssystem und Bedienerinterface. Alternative Ausführungen führen die Stecker über Kabeltrommeln von oben zum Fahrzeug. Die erforderliche Leistungselektronik ist sinnigerweise aus Platzgründen für mehrere Ladepunkte zentral zusammengefasst.



Abb. 100: Depotladesystem mit Pantographen Flughafen Amsterdam-Schipol (Bild: Flughafen Schipol)

Auch andere Ladeschnittstellen sind hier durchaus einsetzbar. Speziell Pantographensysteme bringen Vorteile mit sich, da sie zum einen sehr platzeffizient zu installieren sind, aber auch viele manuelle Fehlerquellen ausschließen. So kann beispielsweise ausgeschlossen werden, dass herumliegende oder hängende Ladekabel durch fahrende Busse beschädigt werden.

Für derartige Systemansätze sind bei Großflottenanwendungen die Faktoren Netzanschlussleistung und Bauraum für Leistungselektronik von entscheidender Bedeutung. Da die gesamte Flotte parallel geladen wird, kommen hier schnell Netzlasten von mehreren Megawatt zustande.

### 10.1.6 Ladeinfrastruktur auf Linie

Das Umsetzungsbeispiel Schnellladen an Haltestellen ist der am weitesten verbreitete Ansatz für dezentrales Laden auf Linie. Ausgewählte Haltestellen werden hierbei mit Ladeinfrastruktur ausgerüstet. Während dem Ladevorgang können Fahrgäste ohne Einschränkung ein- und aussteigen. Idealerweise werden Haltestellen ausgewählt, die es erlauben die Verweildauer auf zwei bis vier Minuten zu steigern, um möglichst viel Energie zu übertragen. Besonders geeignet sind Haltestellen, die von möglichst vielen Linien angefahren werden, da die Infrastruktur so von möglichst vielen Fahrzeugen genutzt werden kann. Ebenso sind Endhaltestellen oder Wendestellen attraktive Installationsorte, da hier oft eine vergleichsweise lange Verweildauer ohne Fahrgäste vorliegt und viel Energie umgesetzt werden kann.

Für diesen Ladeansatz sind Ladeschnittstellen erforderlich, die zum einen viel Leistung übertragen können, und zum anderen schnell und automatisiert verbunden werden können. Pantographensysteme haben sich hier bisher gegenüber induktiven Systemen und aufwendigen Robotiksystemen durchgesetzt. Grund hierfür sind primär Kosten, aber auch die minimale Fehleranfälligkeit gegenüber den anderen Varianten.

E-Busse können im System flexibel eingesetzt werden, sofern sichergestellt ist, dass Ladestationen rechtzeitig angefahren werden können. Die Reichweite solcher Opportunity Charging Fahrzeuge liegt in der Regel bei 60-80 km. Es ist jedoch zu beachten, dass nach längeren Strecken ohne Nachladen entsprechend längere Ladezeiten erforderlich sind. Problematisch sind in diesem Ansatz Ausfälle der Ladeinfrastruktur oder Zufahrtsbeschränkungen (z.B. aufgrund von Baustellen).



Abb. 101: E-Bus Schnelladestation in Münster (Bild: Stadtwerke Münster)

Schnellladesysteme an Haltestellen werden typischerweise durch zentrale Ladesysteme im Depot ergänzt. Diese sind sehr klein dimensioniert (20-40 kW) und primär für das Zell-Balancing und als Energiequelle für Vorkonditionierungsvorgänge ausgelegt.

Für Großflotten ist davon auszugehen, dass besondere Managementsysteme erforderlich sind, um ausreichende Ladezeiträume für sämtliche Fahrzeuge zu ermöglichen. Speziell bei hohen Anforderungen und Verzögerungen im Betriebsablauf gilt es die Fahrzeuge gut zu organisieren, so dass Lade-Haltestellen nicht von zu vielen Bussen gleichzeitig angefahren werden.

## 10.2 Brennstoffzellenfahrzeuge

Fuel-Cell Busse oder Brennstoffzellenbusse (nachfolgend H<sub>2</sub> Bus genannt) sind grundsätzlich Hybridbusse, wobei neben meist 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 vollelektrischen Batteriebusse.

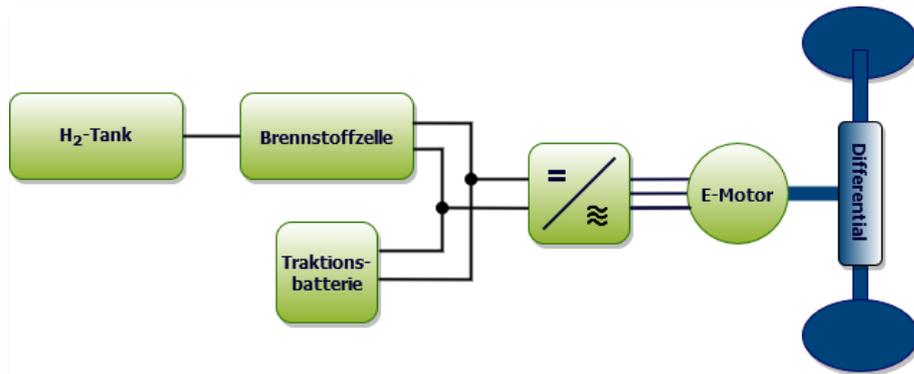


Abb. 102: Antriebstopologie Brennstoffzellenbus

In der Brennstoffzelle (BZ) reagiert Wasserstoff (H<sub>2</sub>) 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<sub>2</sub> 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 75-100 kW elektrisch ist ausreichend, um die auftretenden Lastspitzen im Normalbetrieb eines H<sub>2</sub> Busses abzudecken.

Der Verbrauch eines 12 m H<sub>2</sub> 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 unter guten Bedingungen realistisch.

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

einzigem 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. Bei größerem Marktvolumen werden jedoch hohe Kosteneinsparpotentiale durch Massenproduktion der Brennstoffzelle versprochen. Für den Betrieb stellt sich auch die Frage nach der Wasserstoff-Bezugsquelle. Auch wenn Wasserstoff als Speichermedium für Überschussproduktionen aus erneuerbaren Energiequellen einen realistischen Baustein der Energiewende darstellt, sind die Bezugsquellen aktuell (noch) eingeschränkt. Sofern Wasserstoff nicht als Überschussprodukt der chemischen Industrie bezogen werden kann, muss dieser mit hohen Verlusten erzeugt werden. Dabei ist es entscheidend für den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck auf Basis welcher Energiequelle die Produktion erfolgt.

### 10.2.1 Brennstoffzellen-Hybridbus

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 Brennstoffzellenhybrid-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-Hybridbussen gegenüber Diesel Plug-In Hybridbussen). Aufgrund der elektrischen Lademöglichkeit ist es sinnvoll, den Batteriespeicher größer auszulegen. So kann das Fahrzeug in der Betriebspause elektrische Energie speichern, was sich positiv auf den Wasserstoffverbrauch im Betrieb auswirkt. Das Fahrzeug bleibt darüber hinaus auch komplett ohne elektrisches Nachladen, bei erhöhtem Verbrauch, funktionsfähig. Der schematische Aufbau eines Brennstoffzellen-Hybrid Antriebsstranges ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

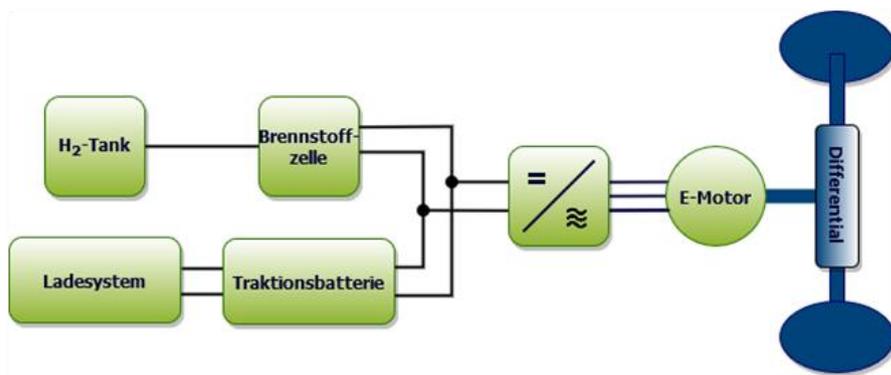


Abb. 103: Antriebstopologie BZ-REX bzw. BZ-Hybrid Bus

Abgesehen von der externen elektrischen Ladeschnittstelle, die üblicherweise als CCS Steckkontakt ausgeführt ist, sind H<sub>2</sub> Busse und H<sub>2</sub> Hybridbusse 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 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.

Hier folgend sind als Beispiel zwei H<sub>2</sub> Busse führender Hersteller aufgeführt, die den H<sub>2</sub> Hybridbussen zuzuordnen sind.



*Abb. 104: Solaris Urbino 12 hydrogen (links) und Van Hool A330 FC (rechts) (Bilder: Hersteller)*

Durch das Zusammenspiel von extern geladenem Batteriespeicher und Brennstoffzelle können Verbrauchswerte für H<sub>2</sub> Hybridbusse 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:

Umlauflänge	Verbrauch pro 100 km H <sub>2</sub> Bus	Verbrauch pro 100 km BZ-REX
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>

Tab. 49: 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.

## 10.2.2 Wirkungsgrad und Nutzungspotential

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

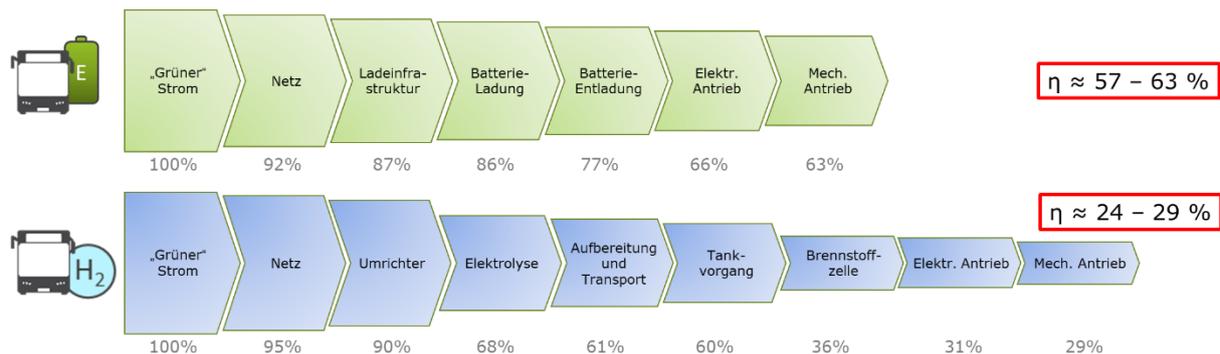


Abb. 105: Wirkungsgradverkettung Batterie- und Brennstoffzellenbus

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.

Es kann angenommen werden, dass Wasserstoffmobilität mittel- bis langfristig zumindest einen Bestandteil der Energiewende im Verkehrssektor darstellt. Speichereigenschaften und Betankungsvorgang sind dem Dieselbus sehr ähnlich und ermöglichen einen vergleichbaren Fahrzeugeinsatz. Insbesondere hochflexible Langstrecken Anwendungen sind für H<sub>2</sub>-Busse prädestiniert. Letztlich ist die Verbreitung auch abhängig von der Kostenentwicklung.

### 10.2.3 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.



*Abb. 106: Tankvorgang eines H<sub>2</sub> Hybrid Busses auf dem ESWE-Betriebsgelände in Wiesbaden (Bild: ESWE)*

Die abgebildete Füllkupplung wird als Schnellbetankungssystem für Busse und LKWs 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.

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 Platzbedarf für eine H<sub>2</sub>-Tankstelle ist nicht unerheblich, wie die nachfolgende Abbildung verdeutlicht.



*Abb. 107: Wasserstoff-Tankstelle auf dem Betriebshof der ESWE Verkehr in Wiesbaden (Bild: ESWE)*

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.

#### 10.2.4 Wasserstoff-Farbenlehre

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  $H_2$  und  $CO_2$  umgewandelt, wobei Emissionen in der Größenordnung von 10 t  $CO_2$  pro 1 t erzeugtem  $H_2$  entstehen.
- Als blauer Wasserstoff wird grauer Wasserstoff bezeichnet, bei dem das erzeugte  $CO_2$  über Abscheidungs- und Speicherverfahren aufgefangen wird, bevor es in die Atmosphäre gelangt. Bilanziell wird blauer Wasserstoff als  $CO_2$  neutral betrachtet. Jedoch wird das Prinzip der  $CO_2$ -Sequestrierung häufig insgesamt sehr kritisch betrachtet, da das  $CO_2$  Problem hier nicht gelöst, sondern verlagert wird.
- Türkiser Wasserstoff wird durch thermische Spaltung von Methan (Methanpyrolyse) gewonnen. Bei diesem Prozess entsteht kein  $CO_2$ , 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

## 10.3 Emissionsbehaftete Antriebskonzepte für Omnibusse

### Hinweis

Das Kapitel beschränkt sich nicht ausschließlich auf Antriebe die in der Clean Vehicles Directive als sauber definiert sind. An dieser Stelle sind der Vollständigkeit halber auch Antriebskonzepte aufgeführt, die den alternativen oder emissionsarmen Antrieben zugeordnet sind, ohne die CVD Vorgaben zu erfüllen.

Als saubere Fahrzeuge nach CVD Vorgaben gelten Erdgasantriebe und Plug-In Hybrid Fahrzeuge mit externer Lademöglichkeit.

### 10.3.1 Diesel-Hybridfahrzeuge

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen parallelen und seriellen Hybridfahrzeugen. Im seriellen Hybridantriebsstrang wird die Energie des primären Energieträgers in elektrische Energie gewandelt und dem Fahrzeugsystem zur Verfügung gestellt. Hinsichtlich der Antriebstopologie lässt sich dies mit einem batterieelektrischen Fahrzeug vergleichen, dessen Ladesystem durch eine elektrische Energiequelle ersetzt wird. Im Fall von diesel-elektrischen Hybridfahrzeugen (im folgendem bezeichnet als Diesel-Hybrid) ist dies eine Kombination von Dieselmotor und elektrischem Generator, wobei die Antriebswellen beider Einheiten mechanisch verbunden sind.

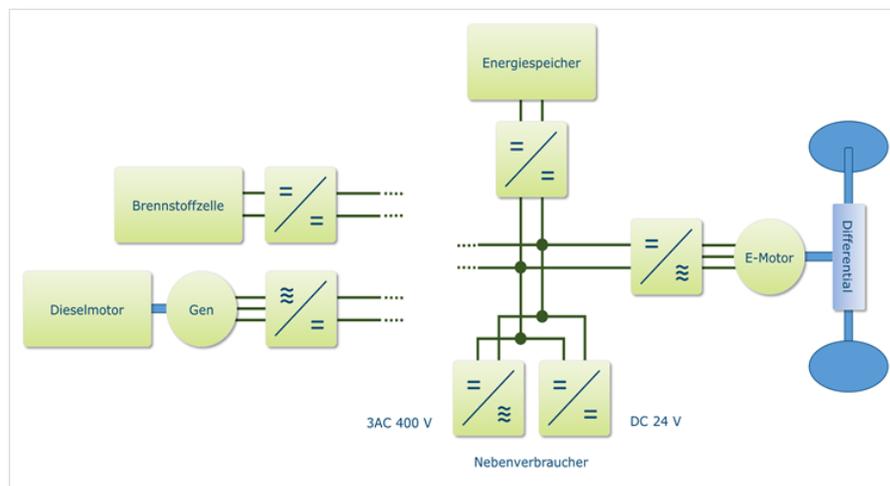


Abb. 108: Antriebstopologie Serielle Hybridfahrzeuge

Der sekundäre Energieträger ist für beide Fälle ein elektrischer (Super-Kondensator) oder elektrochemischer Energiespeicher (Batterie). Dieser ermöglicht es, wie beim batterieelektrischen Bus, die Bremsenergie per Rekuperation elektrisch zu speichern. Gleichzeitig wird der Energiespeicher genutzt, um die dynamischen Leistungsanforderungen des Fahrbetriebs zu glätten (Arbeitspunktoptimierung). Während dem Beschleunigungsvorgang stellt der elektrische Speicher zusätzliche Energie zur Verfügung. Damit soll erreicht werden, dass das primäre Aggregat (Dieselmotor) möglichst statisch betrieben wird. Bei entsprechender Auslegung der Systemelemente entspricht dieser statische Arbeitspunkt dem mittleren Energieverbrauch des Fahrzeuges und gleichzeitig dem Arbeitspunkt mit dem geringsten spezifischen Energieverbrauch

( $I_{\text{Diesel}}/kWh_{\text{el. Energie}}$ ). Damit und mit der Rückgewinnung der Bremsenergie sollen die notwendigen primären Energieträger auf ein Minimum reduziert werden. Durch das Mehrgewicht durch die elektrischen Elemente des Systems treten diese Effekte allerdings nicht immer in der gewünschten Größenordnung ein.

Im parallelen Hybrid-Antriebsstrang kann, im Gegensatz zum seriellen Ansatz, mit beiden Energieträgern direkt mechanische Bewegungsenergie erzeugt werden. Der Energiefluss, sowohl aus dem Verbrennungs- als auch Elektroantrieb, geht ohne Umwege direkt auf das Antriebssystem.

Die überschaubarste Topologie ist in diesem Fall ein Mehrachsantrieb. Der Dieselmotor greift beispielsweise direkt über Getriebe und Differential an der Hinterachse an, während der Elektromotor an der Vorderachse ansetzt und einen zeitweisen Allradantrieb ermöglicht. Diese Variante wird im Pkw-Bereich teilweise verfolgt, wobei der Fokus hier oftmals auf Fahrperformance liegt. Komplexe Systeme greifen zum Beispiel auf Planetengetriebe oder Motor-Generator Kombinationen zurück, die auf eine gemeinsame Antriebswelle wirken.

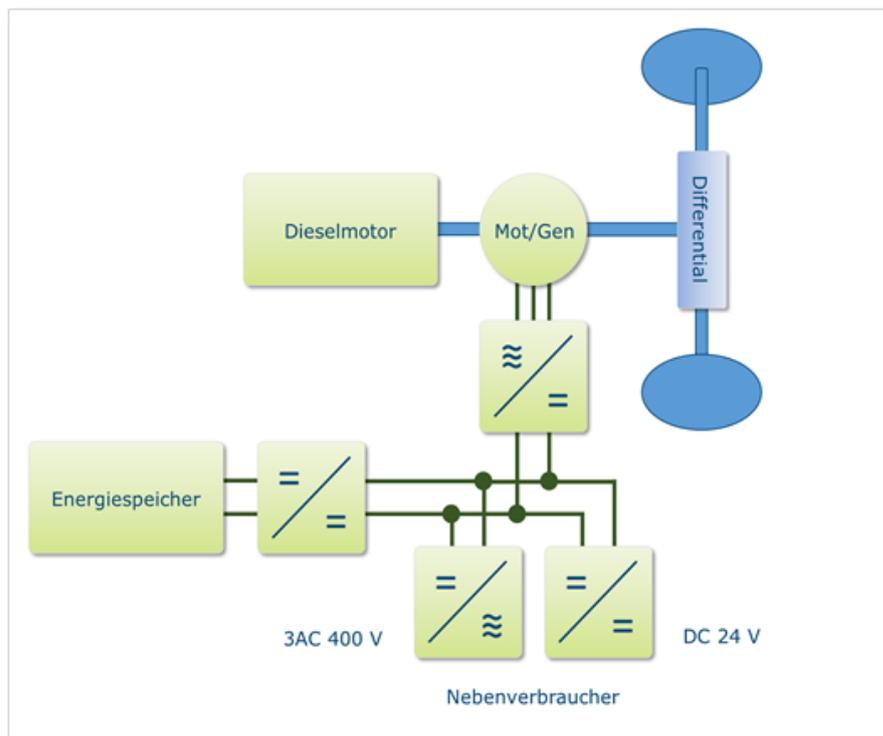


Abb. 109: Antriebstopologie parallele Hybridfahrzeuge

Für alle aufgeführten Varianten kommen verschiedene Arten von Energiespeichern zum Einsatz. In Abhängigkeit der elektrischen Kapazität bzw. der elektrischen Reichweite werden andere Arten von Energiespeichern notwendig. Für Start-Stopp Funktionen und der Unterstützung während der Beschleunigung, sowie der Rückgewinnung von Bremsenergie sind häufig Super-Cap Kondensatoren ausreichend. Diese zeichnen sich durch eine hohe Leistungsdichte und Zyklenfestigkeit aus, verfügen aber nur über eine kleine Energiedichte. Andernfalls kommen Li-Ion Batterien mit geringer Kapazität zum Einsatz. Aufgrund der technologischen Entwicklung im Feld der Hochleistungs-Li-Ionen Batterien sind diese auch im Feld der Hybridanwendungen stark auf dem Vormarsch und verdrängen die Super-Cap Technologie hier mehr und mehr. Fokus der

Hybridantriebe ist es heute weniger, den Arbeitspunkt des Verbrenners konstant einzuregulieren, sondern nennenswerte elektrische Reichweiten umzusetzen. Die dafür erforderlichen Energiebedarfe können nur in Batteriespeichern sinnvoll gespeichert gestellt werden.

### 10.3.2 Diesel-Plug-In-Hybridbus

Der Plug-In Hybrid 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 batterie-elektrischen Fahrzeug mit Range Extender ist hierbei fließend, weshalb die Systeme untereinander so ähnlich sind.

Plug-In Hybridfahrzeuge ermöglichen rein elektrische Reichweiten von 7 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 Dieselbetrieb eingesetzt werden.

### 10.3.3 Erdgasbus

Ein Erdgasbus ähnelt von der Technologie einem Standard-Dieselbus. Statt dem Dieselmotorkraftstoff 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 Bio-Gas kann der ökologische Fußabdruck weiterhin deutlich reduziert werden.

## 10.4 Einschätzung der Marktentwicklung

Während im Feld der reinen Brennstoffzellenbusse keine nennenswerte Entwicklung absehbar ist, wird insbesondere der Batterietechnik ein großes Entwicklungspotenzial zugeschrieben.

Aktuell lassen sich jedoch auch Ansätze beobachten die Brennstoffzellentechnik als Range-Extender für Batteriebusse einzusetzen. Hierbei sind klein dimensionierte Brennstoffzellen und Tanksysteme im Fahrzeug als mitfahrende Stromquelle installiert. Ziel ist es hierbei einerseits primär auf den hocheffizienten elektrischen Antriebsstrang zurückgreifen zu können, indem ein Großteil der Traktionsenergie, wie bei Batteriebussen, über Ladesysteme in der Batterie gespeichert wird. Die im Vergleich stärker verlustbehaftete Brennstoffzellentechnik wird auf sekundärerer Ebene eingesetzt, um die Fahrzeugreichweite zu erhöhen. Inwiefern dieser Ansatz, der sowohl Lade- als auch Tankinfrastruktur sinnvoll ist, muss im Einzelfall entschieden werden. Es kann jedoch angenommen werden, dass dieser Ansatz langfristig gegenüber reinen Brennstoffzellenbussen für sehr herausfordernde Einsätze im Vorteil ist.

Rückblickend hat die Batterietechnik in den letzten Jahren eine rasante Entwicklung durchlaufen. Es wird allgemein von Experten angenommen, dass sich dieser Entwicklungstrend fortsetzt.

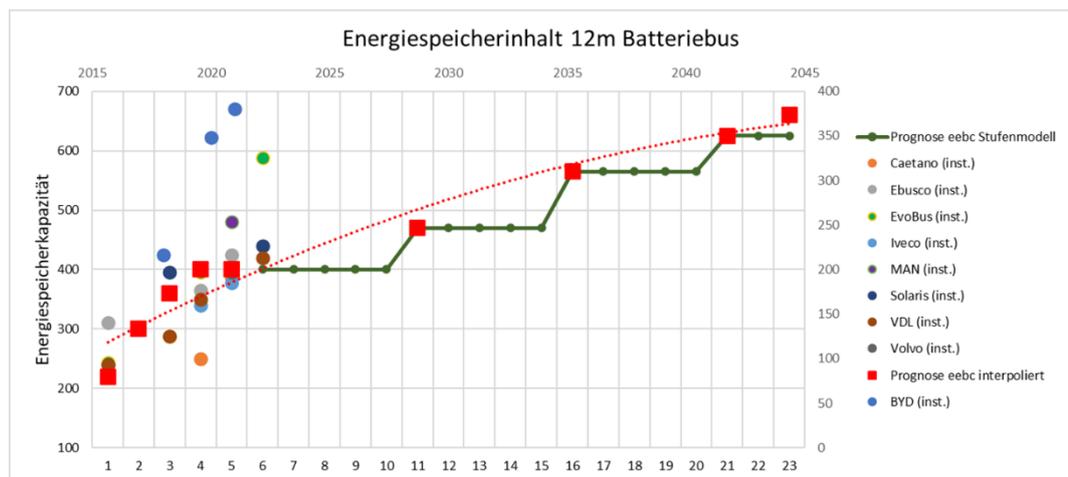


Abb. 110: Entwicklungstrend Batteriespeicher 12 m Busse

Als Grundlage für unsere Untersuchungen unterstellen wir einen Entwicklungstrend, der weitaus geringer ist als andere Expertenmeinungen. Wir setzen einen Kapazitätzuwachs von etwa 50 % über die nächsten 15 Jahre an, wobei auch eine Verdoppelung in diesem Zeitraum nicht absolut unwahrscheinlich ist. Inwiefern sich die Entwicklung in einen nutzbaren Kapazitätzuwachs niederschlägt, ist schwer abzuschätzen. Es ist durchaus wahrscheinlich, dass zukünftig nicht die Kapazität bei gleichbleibenden äußeren Faktoren (Gewicht, Maße, Preis) gesteigert wird, sondern die Kapazität gleichbleibt und stattdessen Gewicht, Maße und Preis optimiert werden. Wir halten eine nutzbare Kapazität von ca. 600 kWh (Solobusse) aktuell als langfristige Zielgröße als realistisch.

Eine große Herausforderung für alle Arten emissionsfreier Antriebe die die vollelektrische Fahrzeugklimatisierung. Insbesondere im Winter steigt der Verbrauch gegenüber einem ungeheizten Fahrzeug sehr stark. Der Einzug von CO<sub>2</sub> Wärmepumpen hat hier für eine deutliche Verbesserung gesorgt. Es ist anzunehmen, dass im Bereich der Klimatisierungstechnik weitere Verbesserungen erzielt werden, wobei kein Entwicklungssprung absehbar ist.

Hinsichtlich der Ladetechnik wird eine Entwicklung in Richtung einer Steigerung der Systemintelligenz erwartet, auch wenn hier noch keine konkreten Konzepte angekündigt sind. Es ist anzunehmen, dass im Zuge der allgemeinen Entwicklung künstlicher Intelligenz, auch hier selbstlernende Prozesse Einzug erhalten werden, um Lademanagementfunktionen zu verbessern. Es wird angenommen, dass die Entwicklung hier darin besteht, die Bedienung zu erleichtern und komplexere Algorithmen automatisch ausführen zu können. Im Zuge einer besseren digitalen Vernetzung ist es hier durchaus denkbar, dass Einflussfaktoren wie Strompreis am Spotmarkt, Wettereinfluss und ähnliches softwareseitig berücksichtigt werden. Hardwareseitig wird angenommen, dass der Schwerpunkt weiter in Richtung kleine, kooperative Moduleinheiten gehen wird, um den Ausnutzungsgrad der Infrastruktur zu erhöhen.

Die Anschaffungspreise konventioneller dieselbetriebener und batterieelektrischer Busse unterscheiden sich zum derzeitigen Stand noch um einen Faktor  $> 2$ . Mit Blick auf das aktuelle Batteriebusangebot und Informationen zu Anschaffungskosten aus laufenden E-Bus-Projekten liegen die Preise für einen Solo-Batteriebus aktuell bei ca. 550.000 € und für einen Gelenk-Batteriebus bei ca. 735.000 €. Diese Investitionsmehrkosten können derzeit 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 in den letzten Jahren in Deutschland und Europa ein exponentielles Wachstum, welches sich in Anbetracht der vorherrschenden Planungen und Vorgaben zur Flotten-elektrifizierung auch in den kommenden Jahren fortsetzen wird. Für die Bushersteller kann diese Entwicklung der Nachfrage eine Kostendegression mit zunehmender Produktionsmenge und Standardisierung bedeuten.

Diese Kostendegression kann sich so zum einen auf Grund von Einsparungen in der Fahrzeugproduktion durch Skaleneffekte ergeben, zusätzlich aber auch durch Einsparungen bei der Beschaffung und grundsätzlich durch Preisminderungen bei Kernkomponenten. Insbesondere für die Komponenten des elektrischen Antriebsstrangs und der Traktionsbatterie werden relevante Kosteneinsparungen bis zum Jahr 2030 erwartet.

Das International Council on Clean Transportation (kurz: ICCT) geht in diesem Kontext beispielsweise von der folgenden Preisentwicklung für die Komponenten von batterieelektrischen Nutzfahrzeugen aus<sup>15</sup>:

---

<sup>15</sup> ICCT (2022): A meta-study of purchase costs for zero-emission trucks

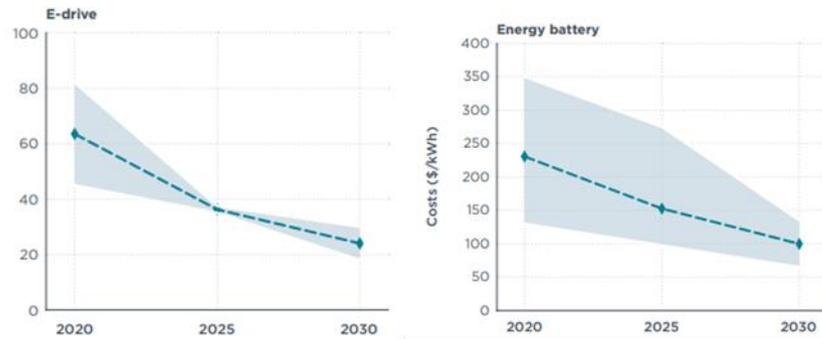


Abb. 111: Entwicklung der Herstellkosten für die Fahrzeugkomponenten elektrischer Antriebsstrang und Traktionsbatterie bei Nutzfahrzeugen (Quelle: ICCT)

Auf Basis u.a. dieser Prognosen für die Kostenentwicklung einzelner Fahrzeugkomponenten lässt sich eine Degressionsfunktion ableiten, die die Entwicklung der Fahrzeuganschaffungskosten für E-Busse mittel- und langfristig beschreibt. Bis zum Jahr 2030 ergibt sich so eine Reduzierung der Anschaffungskosten von ca. 20 % (Solo-Batteriebus ca. 430 T€, Gelenk-Batteriebus ca. 580 T€). Die folgende Grafik zeigt die Auswirkung der prognostizierten Kostendegression auf die Anschaffungspreise.

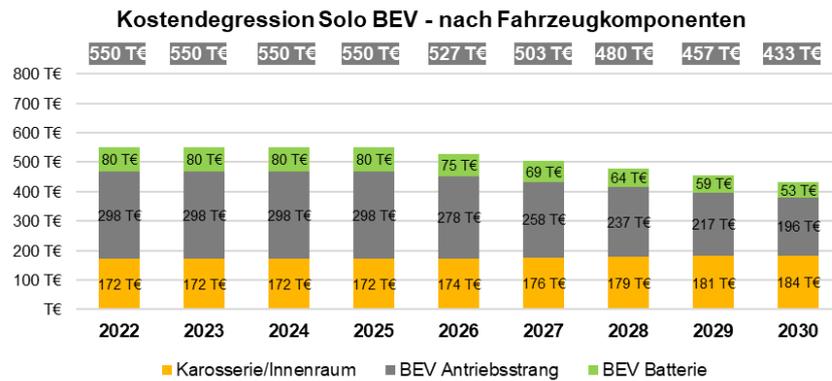


Abb. 112: Prognose der Entwicklung der Anschaffungspreise bis 2030 für Solo-Batteriebus (Quelle: PwC)

Kurzfristig ist indessen erwartbar, dass sich die Anschaffungspreise der E-Busse mit dem Zeitraum der bestehenden Förderungen zunächst nicht wesentlich ändern.

## 10.5 Marktüberblick

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

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

### Elektrobus-Bestand im Ist

Zu Ende des Jahres 2023 befinden sich insgesamt 2.640 Busse mit elektrifizierten Antrieben in Deutschland im Einsatz. Mit Blick auf die Zuwachsraten der letzten drei Jahre lässt sich ein nahezu exponentielles Wachstum feststellen (siehe Abb. 113).

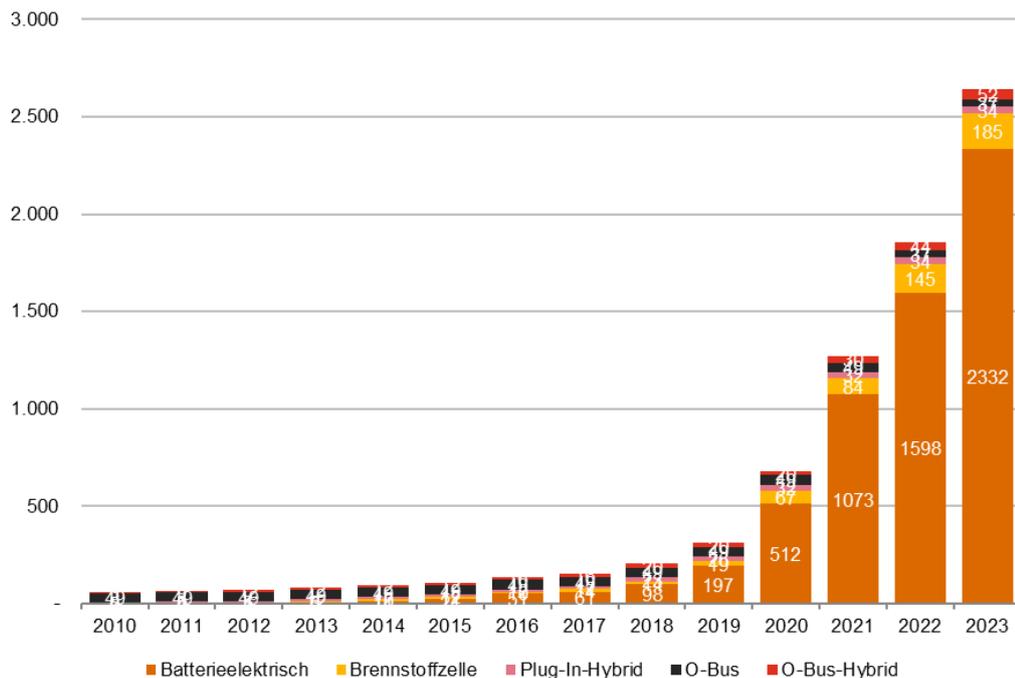


Abb. 113: Elektrobus-Bestand im Ist (Datenstand: 31. Dezember 2023) (n=2.640), Quelle: PwC-E-Bus-Radar

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 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 4,9 % 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 bislang hinzugekommenen 782 Elektrobussen rechnerisch bei rund 17 %. Hierbei ist jedoch auch zu berücksichtigen, dass die Verteilung regionale Unterschiede aufweist. In einigen Regionen und Städten sind sowohl die absoluten Beschaffungszahlen als auch die Anteile wesentlich höher und zeigen die dynamische Entwicklung im Bereich von Elektrobussen.

Die Verteilung des Elektrobus-Bestands nach Antriebsart zeigt, dass der Elektrobus-Bestand deutlich von batterieelektrischen Bussen dominiert wird, obwohl der Bestand zu Beginn der 2010er-Jahre zunächst 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. Der Batteriebus zeigt aber weiterhin das mit Abstand größte Wachstum der vergangenen Jahre. Insgesamt sind folglich sowohl der absolute E-Bus-Bestand als auch dessen Zuwächse im Jahr 2023 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.

**Geplante Entwicklung des Bestands rein elektrisch angetriebener Busse**

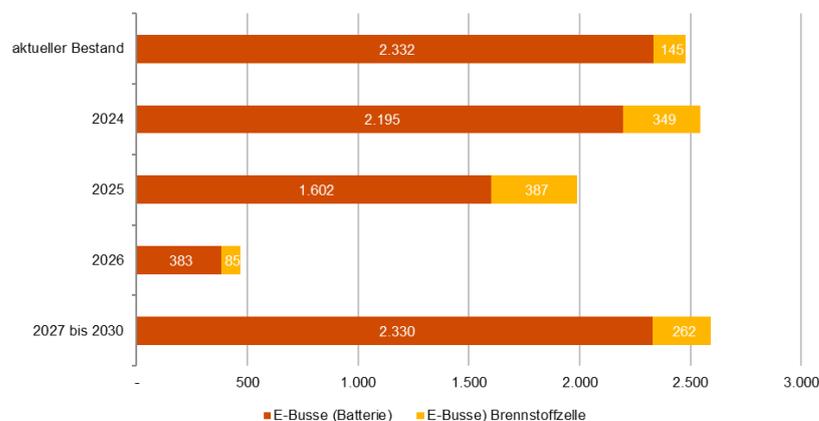


Abb. 114: Geplante Entwicklung des Elektrobus-Bestand bis 2030 (Quelle: PwC-E-Bus-Radar)

## 10.5.1 Übersicht des verfügbaren Fahrzeugangebots

Für die Entwicklung einer Strategie für die Flottentransformation ist es wichtig das absehbar am Markt verfügbare Fahrzeugangebot zu berücksichtigen. Hierunter fallen BEV, HEV/PHEV, FCEV und Trolleybusse. Im Ergebnis liegt somit eine umfassende Übersicht über die am europäischen Markt verfügbaren E-Bus-Modelle und deren Spezifikationen vor. Im Rahmen der Erhebung des Angebotes derjenigen E-Bus-Modelle, die auf dem europäischen Markt verfügbar sind, wurden insgesamt 295 Fahrzeugtypen bzw. -modelle erfasst, wobei nicht immer sämtliche Informationen erhoben werden konnten.

### Antriebsart

Die Auswertung des E-Bus-Marktes hinsichtlich der angebotenen Antriebsarten zeigt aktuell ebenfalls eine deutliche Dominanz des Batteriebusse. Batteriebusse (203 Fahrzeuge) stellen knapp 70 % des gesamten Fahrzeugangebotes dar. Diesel-Mild-Hybrid- und O-Busse repräsentieren die zweitgrößte Gruppe mit 28 Fahrzeugen. FCEV-Busse weisen in der relativen Betrachtung ein geringes Angebot auf (19 Fahrzeuge). Auch E-Busse als Plug-In-Hybride werden auf dem europäischen E-Bus-Markt vergleichsweise selten angeboten (15 Fahrzeuge). Die folgende Abbildung zeigt die Anzahl der E-Bus-Modelle nach Antriebsart im Überblick.

Angebote Fahrzeugmodell nach Antriebsart

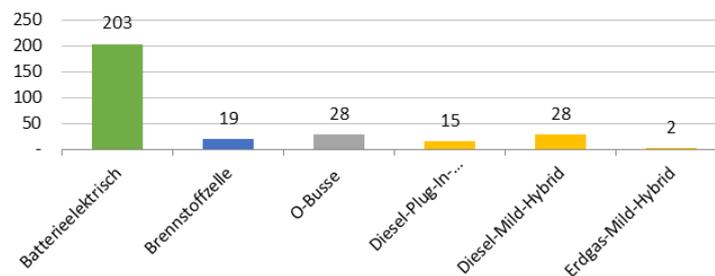


Abb. 115: Angebotene Fahrzeugmodelle nach Antriebsart

### Bauart

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

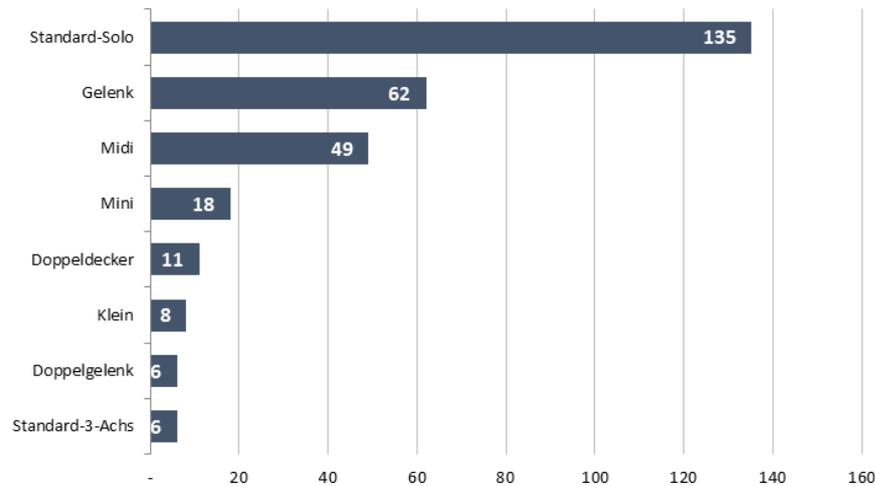


Abb. 116: Anzahl der verfügbaren Fahrzeugmodelle nach Bauart

### Ladestrategie

In Bezug auf das Ladekonzept der erfassten E-Bus-Modelle zeigt sich ebenfalls ein deutlich ausgeprägter Schwerpunkt. Die meisten verfügbaren Fahrzeugmodelle sind Depotlader. 41 Fahrzeugmodelle werden hingegen als Gelegenheitslader angeboten. Es existieren daneben auch BEV-Busse, die ein Mischkonzept aus Depot- und Gelegenheitsladen ermöglichen. Im Gegensatz zu der typischen Gestaltung, also Depotlader mit Energiebatterie und Steckerladung beziehungsweise Gelegenheitslader mit Leistungsbatterie und Pantograph, können diese Varianten mit Energiebatterie und Pantograph geordert werden. Diese machen ca. 10 % der verfügbaren Modelle aus. Die folgende Abbildung zeigt zusammenfassend die Anzahl der angebotenen E-Bus-Modelle nach Ladekonzept.

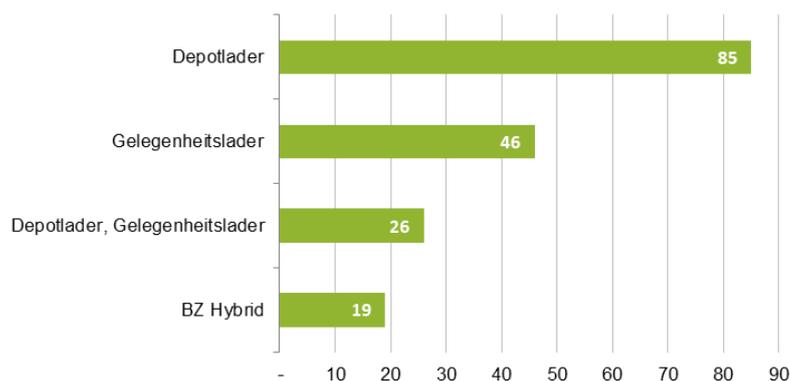


Abb. 117: Anzahl der angebotenen Fahrzeugmodelle nach Ladestrategie

### Batteriekapazität

Hinsichtlich der verfügbaren Batteriekapazität zeigt sich eine zweigeteilte Abhängigkeit. Zum einen ist die Bauart bestimmend für die verfügbare Kapazität der Traktionsbatterie. Gelenkbusse haben demnach, insbesondere aufgrund ihres höheren Energiebedarfes, eine höhere durchschnittliche Batteriekapazität. Zum anderen bestimmt die vorgesehene Ladestrategie der Fahrzeuge die Batteriekapazität. Depotlader weisen somit durchschnittlich eine höhere Batteriekapazität

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

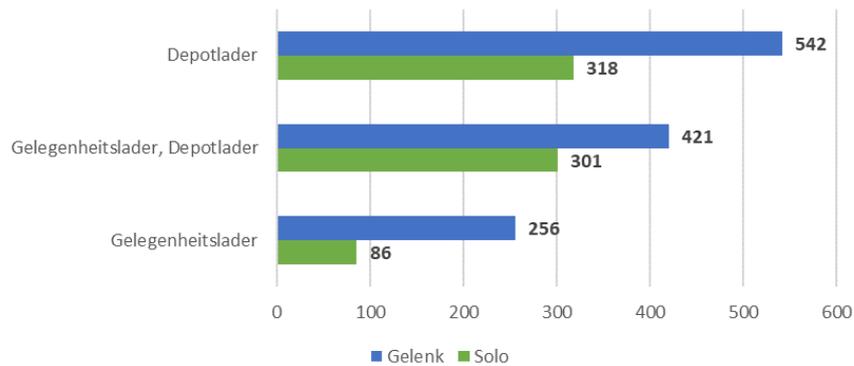


Abb. 118: Verfügbare durchschnittliche Batteriekapazitäten angebotener Batteriebusse nach Ladestrategie und Bauart in kWh

## 10.6 Regulatorische und rechtliche Rahmenbedingungen

Bei der Beschaffung und dem Einsatz von E-Bussen sind diverse (rechtliche) Regelungen zu beachten. Nachfolgend ist eine Auswahl gesetzlicher Vorgaben im Hinblick auf alternative Antriebe aufgeführt:

Beschaffung	Umweltaspekte	Arbeitssicherheit	Sonstiges
Clean Vehicles Directive (CVD)	Richtlinie 2008/50/EG (Saubere Luft)	Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG)	Treibhausgas-minderungsquote (THG-Quote)
Saubere-Fahrzeug-Beschaffungs-Gesetz (SaubFahrzeugBeschG)	Bundes-Immissions-schutzgesetz (BImSchG)	DGUV Information 209-093	
Vergabeverordnung (VGV)	EURO-Abgasnorm (EG-Verordnung Nr. 715/2007)	Betriebssicherheits-verordnung (BetrSichV)	
	Verkehrslärmschutz-verordnung (16. BImSchV)		

Tab. 50: Übersicht gesetzlicher Vorgaben im Hinblick auf alternative Antriebe (Auswahl)

### 10.6.1 Clean Vehicles Directive bzw. Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz

Die zum 1. August 2019 von der EU aktualisierte **Clean Vehicles Directive (CVD)** beinhaltet umfangreiche Vorgaben für die öffentliche Beschaffung von sauberen Straßenfahrzeugen. Hierzu zählen auch Busse (ohne Reisebusse) der Fahrzeugklasse M3 (I und A), also Busse, die im öffentlichen Verkehr eingesetzt werden. Die EU verfolgt damit das Ziel, den Beitrag des

Verkehrssektors zur Erreichung von Umwelt- und Klimazielen zu verbessern. Die Vorgaben umfassen länderspezifische Quoten als Mindestziele für die öffentliche Auftragsvergabe von Bussen und sind erstmalig anwendbar auf Vergabeverfahren mit einer Bekanntmachung ab dem 2. August 2021. Mit dem Saubere Fahrzeuge Beschaffungsgesetz (SaubFahrzeugBeschG), beschlossen durch den Bundestag am 5. Mai 2021 und mit anschließender Zustimmung des Bundesrates, wurde die CVD schließlich in nationales Recht in Deutschland übertragen. Die zeitliche Umsetzung der CVD bzw. des SaubFahrzeugBeschG gliedert sich in zwei Referenzperioden. Referenzperiode 1 bezieht sich auf Vergabeverfahren, deren Beendigung („Zuschlag“) bis zum 31. Dezember 2025 erfolgt, während Vergabeverfahren mit einer Beendigung zwischen dem 1. Januar 2026 und dem 31. Dezember 2030 in die Referenzperiode 2 fallen. Für die beiden Referenzperioden wurden unterschiedliche Beschaffungsquoten hinsichtlich des Anteils von sauberen und emissionsfreien Fahrzeugen an der Gesamtbeschaffung definiert. Für Deutschland gilt, dass in der ersten Periode bis Ende 2025 45 % der neu zu beschaffenden Fahrzeuge „sauber“ und davon mindestens 22,5 % „emissionsfrei“ sein müssen. In der zweiten Periode bis Ende 2030 verschärfen sich die Anforderungen auf 65 % bzw. 32,5 %. Während Fahrzeuge bereits als „sauber“ gelten, wenn sie teilweise mit alternativen Kraftstoffen betrieben werden (z. B. auch dieselbetriebene Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge), müssen „emissionsfreie“ Fahrzeuge weniger als 1g CO<sub>2</sub>/kWh oder weniger als 1g CO<sub>2</sub>/km ausstoßen. Das Kriterium „emissionsfrei“ erfüllen nach aktuellem Stand in der Praxis nur Elektrobusse (mit einer Batterie, Brennstoffzelle, Oberleitung etc.). Zur Einhaltung der CVD bzw. des SaubFahrzeugBeschG sind die öffentlichen Auftraggeber (Gemeinde, Kreis, Zweckverband, AöR) – auch im Kontext der Vergabe öffentlicher Dienstleistungsaufträge („öDA“) - sowie die Sektorenauftraggeber (konzessionierte Verkehrsunternehmen – eigenwirtschaftlich und gemeinwirtschaftlich) verpflichtet. Subunternehmer sind mittelbar über den jeweiligen Verkehrsvertrag/öDA verpflichtet. Das SaubFahrzeugBeschG sieht vor, dass die Einhaltung der Quote auf Ebene der einzelnen Bundesländer sicherzustellen ist. Zudem können sich mehrere Bundesländer hinsichtlich der Einhaltung der Quoten zusammenschließen. Für die erste CVD-Periode beteiligen sich in diesem Sinne 14 Bundesländer (Ausnahme Berlin und Baden-Württemberg) und zahlreiche Spitzen- und Verkehrsverbände an der Branchenvereinbarung zur Umsetzung des SaubFahrzeugBeschG (Bekanntmachung November 2023). Ob es eine Branchenvereinbarung auch für die zweite CVD-Periode geben wird, erscheint unklar.

Grundsätzlich ist der LK Roth als Aufgabenträger bei der Vergabe von Verkehrsleistungen, beispielsweise im Rahmen eines öffentlichen Dienstleistungsauftrags, zur Einhaltung der Vorgaben des SaubFahrzeugBeschG verpflichtet. Dies betrifft alle Verträge, die nach dem 2. August 2021 geschlossen wurden. Bei der Zählweise der Erfüllungskontrolle gibt es unterschiedliche Betrachtungsebenen zwischen dem LK Roth als Aufgabenträger und die Verkehrsunternehmen bzw. Subunternehmer als Sektorenauftraggeber.

Wenn ein neuer öffentlicher Dienstleistungsauftrag abgeschlossen wird, wird ist darauf abzustellen, wie viele Straßenfahrzeuge für die Erbringung der Dienstleistung im Rahmen des betreffenden Auftrags im Referenzzeitraum eingesetzt werden sollen. Anhand dieser (Gesamt-)Anzahl sind die Mindestziele als Quoten, die jeweils eine Anzahl von sauberen Fahrzeugen als Soll bedeuten, zu ermitteln. Dieses Soll ist am Ende des Referenzzeitraums dem Ist gegenüberzustellen.

Die Mindestziele müssen nach dem Wortlaut des Gesetzes am Ende der Referenzperiode erfüllt sein – auch wenn der Vertrag erst gegen Ende der Periode abgeschlossen wurde. Während bei den Verkehrsunternehmen auf die Anzahl der tatsächlich beschafften Fahrzeuge abgestellt wird, ist auf der Ebene des Aufgabenträgers somit auf die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge abzustellen. Subunternehmer sind ebenfalls zu Mindestzielen verpflichtet, wenn sie selbst öffentlicher Auftraggeber oder Sektorenauftraggeber sind und Aufträge erteilen bzw. Verträge abschließen, die dem Gesetz unterliegen. Bezogen auf die Frage bei der Prüfung, ob ein öffentlicher Auftraggeber oder Sektorenauftraggeber die Mindestziele der §§ 5 und 6 SaubFahrzeugBeschG einhält, auch die Fahrzeuge einzubeziehen sind, die von einem Subunternehmer des Auftraggebers (privaten Unternehmern) eingesetzt werden, muss zwischen verschiedenen, in § 3 SaubFahrzeugBeschG genannten Verträgen/Aufträgen differenziert werden.

## 10.6.2 Verordnung (EU) 2024/1610

Im Mai 2024 führte das europäische Parlament sowie der europäische Rat mit der Verordnung (EU) 2024/1610 im Zusammenhang des „Fit for 55“-Pakts verschärfte CO<sub>2</sub>-Emissionsstandards für neue schwere Nutzfahrzeuge und Busse ein. Sie aktualisiert bestehende Vorschriften wie die Verordnungen (EU) 2018/858 und (EU) 2018/956, führt neue Anforderungen ein und passt die Emissionsreduktionsziele für schwere Nutzfahrzeuge und Busse an das ambitioniertere Klimaschutzniveau der EU an, ähnlich wie zuvor für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge.<sup>16,17</sup>

Nach der formellen Verabschiedung durch das Parlament und den Europäischen Rat trat die Verordnung 20 Tage nach Veröffentlichung im EU-Amtsblatt in Kraft und gilt ab dem 1. Juli 2024. Ab diesem Zeitpunkt werden die bisherigen Vorgaben für Fahrzeugbeschaffungen durch öffentliche Auftraggeber (SaubFahrzeugBeschG) und nationale politische Zielsetzungen (Klimaschutzprogramm) durch herstellerseitige Vorgaben verstärkt, die einen klaren Weg zur vollständigen Dekarbonisierung des straßengebundenen ÖPNV mit Bussen aufzeigen.

Die Verordnung regelt, dass Hersteller von Bussen die Emissionen im Zeitraum von 2030 bis 2034 um 45 %, im Zeitraum 2035 bis 2039 um 65 % und ab dem Jahr 2040 um 90 % gegenüber dem Referenzjahr 2025 reduzieren müssen<sup>18</sup>. Für Stadtbusse sind die Vorgaben noch strenger: ab 2030 müssen 90 % der neu zugelassenen Stadtbusse emissionsfrei sein, und ab 2035 müssen alle neuen Stadtbusse emissionsfrei sein. Diese auf die Herstellerseite abzielende Regulierung schafft damit Klarheit hinsichtlich der zukünftigen Antriebsoptionen für Busse, insbesondere für Stadtbusse.

---

<sup>16</sup> vgl. European Free Trade Association (2024): <https://www.efta.int/eea-lex/32024r1610>

<sup>17</sup> vgl. [https://www.ffg.at/sites/default/files/allgemeine\\_downloads/thematische%20programme/Mobilitaet/Neue%20vergaberechtliche%20Verordnung%20zur%20Beschaffung.pdf](https://www.ffg.at/sites/default/files/allgemeine_downloads/thematische%20programme/Mobilitaet/Neue%20vergaberechtliche%20Verordnung%20zur%20Beschaffung.pdf)

<sup>18</sup> vgl. [https://theicct.org/wp-content/uploads/2024/05/ID-130—EU-CO2\\_policy\\_update\\_final.pdf](https://theicct.org/wp-content/uploads/2024/05/ID-130—EU-CO2_policy_update_final.pdf)

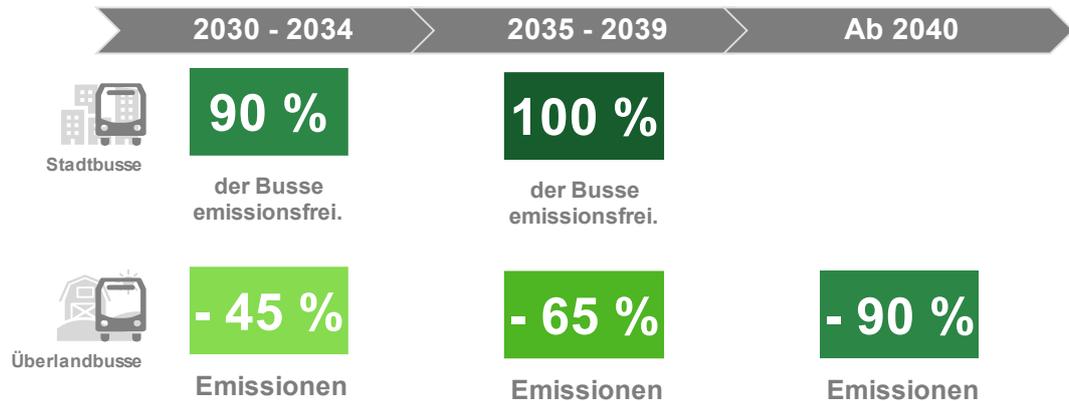


Abb. 119: Richtlinien für CO2-Emissionen für Busersteller für Busse und Stadtbusse (eigene Abbildung)

Aufgrund der Vorgaben der Verordnung (EU) 2024/1610 ist zu erwarten, dass sich das Fahrzeugangebot der Busersteller antriebsseitig deutlich verändern wird. Bei vollständiger Umsetzung der Vorgaben werden Stadtbusse mit Dieselantrieb ab dem Jahr 2035 voraussichtlich nur noch als Gebrauchtfahrzeuge am Markt verfügbar sein und bereits ab 2031 könnten Engpässe bei der Verfügbarkeit auftreten.