



Einsatzmöglichkeit von Bussen mit alternativen Antrieben in Gummersbach

Machbarkeitsstudie

Kooperationspartner

OVAG Oberbergische Verkehrsgesellschaft mbH
Kölner Str. 237 | 51645 Gummersbach

Auftragnehmer

EMCEL GmbH
Marcel Corneille | Geschäftsführer
Am Wassermann 28 | 50829 Köln

Zusammenfassung

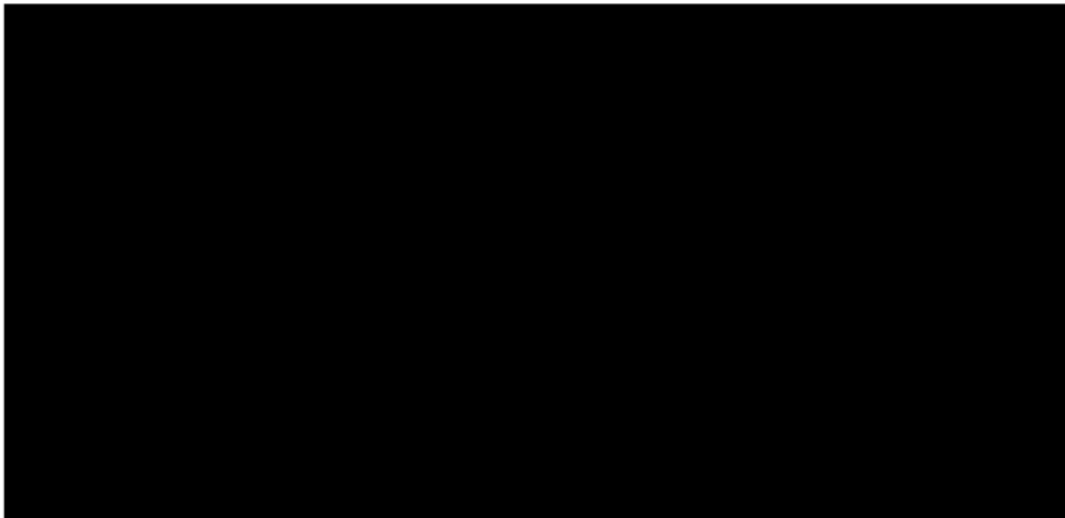
Angesichts der bevorstehenden Einführung von emissionsfreien Bussen, bedingt durch die Beschaffungsquoten der Clean Vehicle Directive, wurden in der vorliegenden Studie die Randbedingungen zum Einsatz von elektrisch angetriebenen Bussen für den Linienbetrieb der Oberbergischen Verkehrsgesellschaft mbH (OVAG) untersucht sowie potenzielle Umstellungspfade erarbeitet.

Aus der Studie gehen die folgenden Erkenntnisse hervor:

- › Für den Einsatz von E-Bussen im öffentlichen Personennahverkehr im Oberbergischen Kreis bietet sich sowohl die Batterietechnologie mit Depotladung als auch die Brennstoffzellentechnologie mit Wasserstoff an.
- › Bei der Einführung von Depotladern können zusätzliche Maßnahmen erforderlich sein, wie beispielsweise zusätzliche Fahrzeuge. Durch die gezielte Zwischenladung entlang der Strecke (z.B. am Gummersbach Hbf.) kann die Anzahl an Zusatzfahrzeugen reduziert werden.
- › Zur Bereitstellung der benötigten Ladeinfrastruktur am Betriebshof Gummersbach muss eine Erweiterung der Anschlussleistung vorgenommen werden. Die aktuell verfügbare Anschlussleistung deckt den Bedarf nur geringfügig.
- › Brennstoffzellenbusse können bereits heute alle Linien ohne Anpassungen im Betrieb und zusätzlichen Fahrzeugbedarf bedienen. Aufgrund der notwendigen Betankungsinfrastruktur ist jedoch die Einstiegshürde höher. Eine Betriebshoftankstelle ist realisierbar. Der Standort Gummersbach bietet hierfür ausreichend Fläche. Für die Inbetriebnahme einer Wasserstofftankstelle wird ein Ausbau der Anschlussleistung ebenfalls notwendig.

- › Eine Betriebshoftankstelle in Gummersbach ermöglicht eine Redundanz zur Betriebshoftankstelle in Wipperfürth. Dies erhöht die Versorgungssicherheit beider BZ-Busflotten.

Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsanalyse wurden Umstellungsszenarien auf 100 % emissionsfreie Antriebe (Depotladung und Brennstoffzelle) miteinander verglichen.



Weiterführend werden auf Basis der Untersuchungsergebnisse zwei mögliche Umsetzungsstrategien zur Einführung einer Mischflotte betrachtet.

Strategie 1:

Umstellung der Busflotte der OVAG auf ca. 90 % Batterietechnik und ca. 10 % Brennstoffzellentechnik:

- › Einsatz der Brennstoffzellenbusse auf den längsten Umläufen zur Minimierung der Anzahl benötigter Zusatzbusse.
- › Einsatz der Depotlader auf den kurzen Umläufen (< 250 km).

>

Strategie 2:

Umstellung der Busflotte der OVAG auf ca. 10 % Batterietechnik und ca. 90 % Brennstoffzellentechnik:

- > Einsatz von Bussen mit Depotladung auf den kurzen Umläufen. Die geforderte Batteriekapazität lässt sich dadurch reduzieren. Entsprechend verringert sich die benötigte Netzanschlussleistung für die Ladeinfrastruktur.
- > Einsatz der Brennstoffzellenbusse auf den restlichen Umläufen.
- > Der Einsatz von zwei Technologien erhöht die Ausfallsicherheit im Betrieb.

>

Bedingt durch die Herausforderung der Netzanschlusskapazität am Standort Gummersbach, sowohl für die Depotladung als auch für die Brennstoffzellentechnologie werden in Vorbereitung der Einführung des ersten E-Busses am Standort folgende Schritte vorgeschlagen:

1. Abstimmung mit dem lokalen Netzbetreiber intensivieren
2. Verlagerung von Fahrzeugen und / oder Infrastrukturen auf weitere Flächen (z.B. weitere Betriebshöfe der OVAG, neue akquirierte Flächen) prüfen, um den Anschlusskapazitäten in Gummersbach zu entlasten

Die Ergebnisse der einzelnen Planungsschritte stellen eine wesentliche Grundlage für die Technologieentscheidung sowie die langfristige Ausrichtung des Standortes dar.

Inhalt


Zusammenfassung	2
1 Einleitung	7
2 Die „Clean Vehicle Directive“-Richtlinie	9
3 Informationen zur E-Bustechnologie	11
3.1 Depotlader (Volllader, Nachtlader)	12
3.2 Gelegenheitslader (Teillader)	13
3.3 Brennstoffzelle	15
3.4 Entwicklung der E-Bus-Technologie	16
3.5 Allgemeine Informationen zu Komponenten und Infrastruktur	18
3.6 Vergleich der Elektrobustechnologien	30
4 Technische Analyse	33
4.1 Ausgangslage	34
4.2 Technische Randbedingungen für eine Umstellung auf Gelegenheitsladung	36
4.3 Technische Randbedingungen für eine Umstellung auf Depotladung	38
4.4 Technische Randbedingungen für eine Umstellung auf Brennstoffzellentechnik	43
5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	46
5.1 Annahmen	46
5.2 Ergebnisse	49

6	Bewertung der technischen und wirtschaftlichen Analyse	50
7	Erarbeitung eines potenziellen Umstellungsszenarios	53
7.1	Mischflottenkonzept	54
8	Zusammenfassung und Handlungsempfehlung	58
A.	Anhang	61
A.1.	Anmerkungen	61
A.2.	Übersicht Depotlader	62
A.3.	Übersicht BZ-Busse	64
A.4.	Übersicht Hersteller Ladeinfrastruktur – Hardware	65
A.5.	Abkürzungsverzeichnis	66
A.6.	Abbildungsverzeichnis	67
A.7.	Tabellenverzeichnis	69

1 Einleitung

Vor dem Hintergrund der Reduktionsziele für CO₂ und lokale Emissionen im Verkehr wird das Thema der Elektrifizierung des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) immer aktueller. So legte die EU im Frühjahr 2019 neue Richtlinien für die Neubeschaffungen von Bussen fest, welche ab dem Jahr 2021 zu erfüllen sind (siehe Kapitel 2). Um auf die Zukunft und die damit verbundenen Umstellungen vorbereitet zu sein, ist es sinnvoll, sich vermehrt mit dem Thema der Elektromobilität auseinanderzusetzen.

Die OVAG Oberbergische Verkehrsgesellschaft mbH (OVAG) ist das kommunale Verkehrsunternehmen des Oberbergischen Kreises und führt für diesen die Leistungen des ÖPNV im gesamten Kreisgebiet durch. Gemeinsam mit den Tochterunternehmen werden insgesamt über 200 Busse betrieben, die sich auf die vier Standorte Gummersbach, Wipperfürth, Waldbröl und Radevormwald. Durch den Einsatz von alternativen Antriebstechnologien in der Busflotte der OVAG können die lokalen und globalen Emissionen des Verkehrs, insbesondere des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV), deutlich reduziert und somit aktive Maßnahmen zum Klimaschutz umgesetzt werden.

Die OVAG verfolgt mit zukünftig  BZ-Bussen im Bestand am Standort Wipperfürth bereits seit längerer Zeit die Emissionsreduzierung im regionalen ÖPNV. Am Standort Gummersbach soll die weitere Umstellung auf alternative Antriebe erfolgen. Hierdurch kann die OVAG sowohl die gesetzlichen Vorgaben erfüllen als auch das Image des Oberbergischen Kreises, in Bezug auf einen umweltfreundlichen und nachhaltigen Tourismus weiter stärken.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wird eine Analyse des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) im Oberbergischen Kreis, ausgehend vom Betriebshof

der OVAG in Gummersbach, durchgeführt. Diesem Standort sind ■ Busse zuzuordnen. Ziel der Studie ist es den betrieblichen, infrastrukturellen und finanziellen Aufwand für die Einführung und den Betrieb von Elektrobussen zu ermitteln und darzustellen. Es werden dabei folgende Punkte herausgestellt:

- › Einführung zum Thema Elektrobustechnologie
- › Übersicht der Rahmenbedingungen
- › Analyse der technischen Randbedingungen (u.a. Liniennetz, Fahrpläne, lokale Gegebenheiten)
- › Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Total-Cost-of-Ownership (TCO)
- › Bewertung der technischen und wirtschaftlichen Umsetzbarkeit
- › Erarbeitung eines potenziellen Umstellungsszenarios

2 Die „Clean Vehicle Directive“-Richtlinie

Im Frühjahr 2019 beschloss das EU-Parlament die Änderung der Richtlinie 2009/33/EC über die Förderung sauberer Fahrzeuge im ÖPNV. Der Beschluss bezieht sich auf einzuhaltende Quoten für die Neubeschaffung von Bussen. Die Richtlinie trat am 2. August 2019 in Kraft. Im Mai 2021 hat der Deutsche Bundestag einen Gesetzesentwurf zur Umsetzung der Richtlinie in deutsches Recht beschlossen.

Die Richtlinie verpflichtet die EU-Mitgliedstaaten, bestimmte Quoten bei der Neubeschaffung von Bussen im öffentlichen Personennahverkehr zu erfüllen. So sollen im Zeitraum 2021 bis 2025 in Deutschland 45 % der neu beschafften Busse sogenannte „saubere Busse“ sein, und im Zeitraum von 2026 bis 2030 sind 65 % zu erfüllen. Darüber hinaus sollen 50 % dieser „sauberen Busse“ (lokal) emissionsfrei betrieben werden.

Die EU definiert „saubere Busse“ in der Richtlinie 2014/94/EU als Busse, die mit „alternativen Kraftstoffen“ angetrieben werden. Diese Kraftstoffe dienen zur Reduzierung der CO₂-Emissionen. Hierzu zählt die EU folgende Energieträger:

- › Elektrizität
- › Wasserstoff
- › Nachhaltige Biokraftstoffe (i. S. d. Richtlinie 2009/28/EG), z. B. Biodiesel
- › Synthetische und paraffinhaltige Kraftstoffe, z.B. E-Fuels oder HVO 100
- › Erdgas, einschließlich Biomethan CNG und LNG
- › Flüssiggas (LPG)
- › Plug-in-Hybrid

Des Weiteren werden die Nullemissionsbusse als Fahrzeuge definiert, die mit den oben aufgelisteten Kraftstoffen betrieben werden und darüber hinaus

entweder keinen Verbrennungsmotor nutzen oder einen Verbrauch von weniger als 1 g CO₂/kWh bzw. von 1 g CO₂/km vorweisen können. Diese Werte erreichen derzeit ausschließlich die Energieträger Elektrizität und Wasserstoff.

Die Abbildung 2-1 veranschaulicht die festgelegten Quoten der EU für Deutschland.

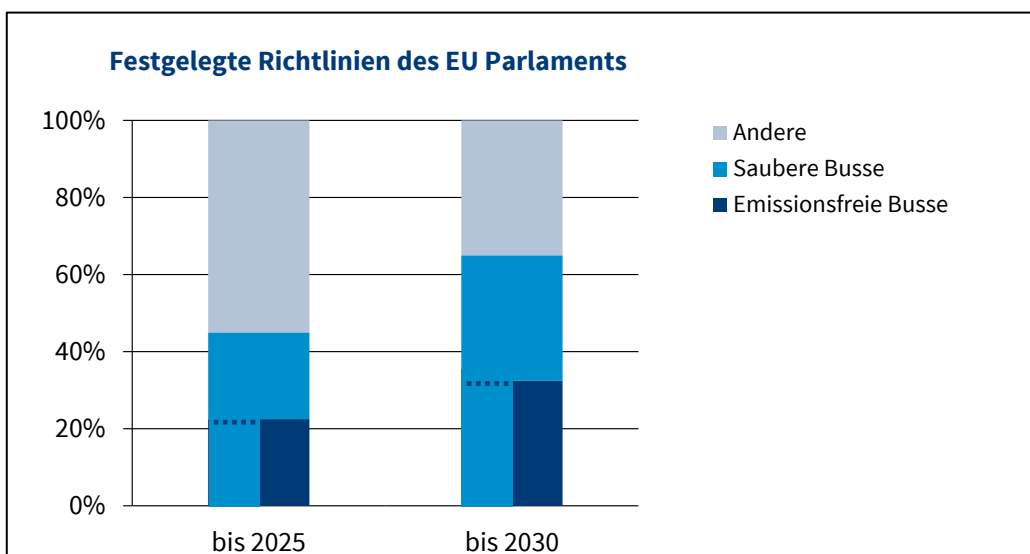


Abbildung 2-1 Festgelegte Quoten für die Neubeschaffung von ÖPNV-Bussen in Deutschland

3 Informationen zur E-Bustechnologie

E-Busse fahren leise, vibrationsarm und lokal emissionsfrei.¹ Damit tragen sie erheblich zur Verringerung der Lärm- und Abgasbelastung bei. Der primäre Antrieb der E-Busse ist ein Elektromotor, welcher von einer Hochvoltbatterie mit Strom versorgt wird. Die Verschaltung der Antriebstechnik ist vereinfacht in Abbildung 3-1 dargestellt.

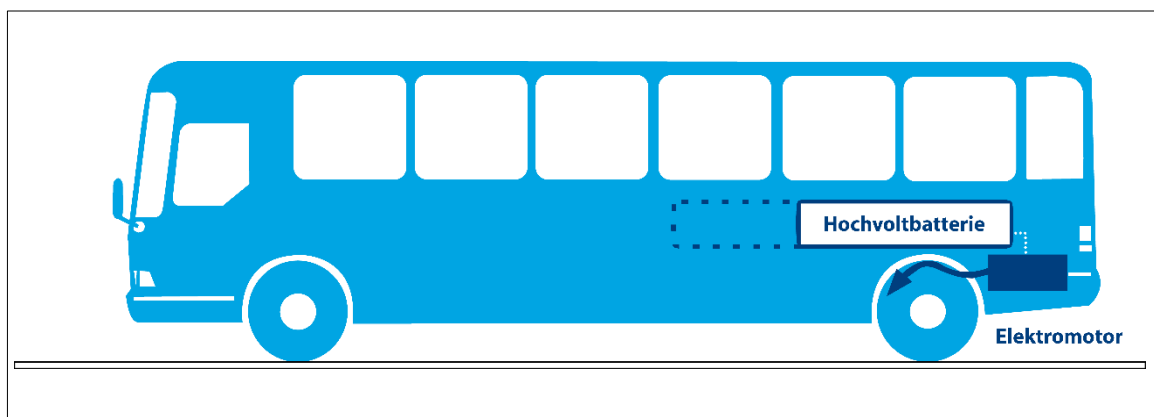


Abbildung 3-1: Darstellung eines E-Bus-Antriebs

Das Laden der Hochvoltbatterie kann mit unterschiedlichen Ladestrategien realisiert werden. In diesem Bericht werden folgende Arten von E-Bussen unterschieden:

1. Batteriebusse mit Depotladung (auch Volllader bzw. Nachtlader genannt)
2. batteriebusse mit Gelegenheitsladung (auch Teillader genannt)
3. Brennstoffzellenbusse (BZ-Busse)

¹ In diesem Bericht werden die Begriffe „emissionsfrei“ und „Nullemission“ synonym verwendet. Eine Definition dazu ist im Anhang zu finden.

3.1 Depotlader (Vollader, Nachtlader)

Der Batteriebus als Depotlader ist ein rein elektrisch angetriebenes Fahrzeug. Die Antriebsleistung erfolgt über einen Elektromotor, z.B. einen Radnabenmotor. Die dafür notwendige Energie wird aus einer Batterie mit einer Speicherkapazität von etwa 300 – 600 kWh bereitgestellt, was eine sichere Reichweite von ganzjährig bis zu 250 km ermöglicht. Die Ladung der Batterien erfolgt in der Regel konduktiv auf 100 % („voll“) mittels Depot- bzw. Nachtladung. Dadurch ist der Bus im Rahmen seiner Reichweite flexibel auf unterschiedlichen Linien einsetzbar.

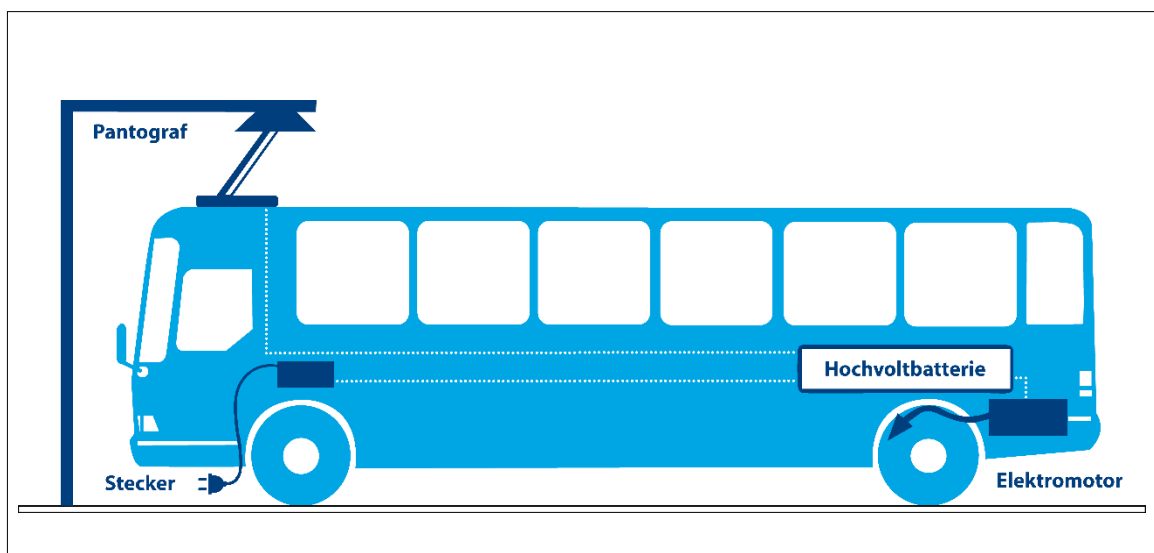


Abbildung 3-2: Funktion des Depotladers

Abbildung 3-2 veranschaulicht die Versorgung des E-Motors an der Antriebsachse mit Strom durch eine Hochvoltbatterie. Die Wiederaufladung der Batterie erfolgt in der Praxis meist über einen Stecker oder einen Pantographen (Stromabnehmer, mit dessen Hilfe sich das Laden im Depot weitgehend automatisieren und damit wesentlich vereinfachen lässt). Der Ladevorgang dauert, abhängig von der freien elektrischen Anschlussleistung im Depot, vier bis acht Stunden. Für diese Ladestrategie ist der Aufbau einer entsprechenden

Ladeinfrastruktur im Depot notwendig. Die Vor- und Nachteile lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- + Niedrige Einstiegshürde
- + Flexibel einsetzbar im Rahmen der Reichweite
- Sichere Reichweite rein elektrisch ca. 250 km
- Ggf. geringere Beförderungskapazität im Vergleich zur Dieseltechnik (bis zu 20 % geringer)

Depotlader bieten die geringste Einstiegshürde aller Nullemissionsantriebe. Dies liegt vor allem an der einfachen Ladeinfrastruktur (per Stecker im Depot). Die Nachteile der Technologie liegen im Wesentlichen an der begrenzten Reichweite der Busse und dem Mehraufwand bei der weiteren Flottenumstellung, da eine ausreichende Ladeleistung im Depot zur Verfügung stehen muss. Aufgrund des Batteriegewichts kann die Beförderungskapazität im Vergleich zur Dieseltechnik geringer sein. In Abhängigkeit des Fahrzeugherstellers und -modells können die Abweichungen bis zu -20 % liegen. Dies und die geringe Reichweite kann gegebenenfalls den Einsatz von Mehrfahrzeugen und dementsprechend zusätzlichen Fahrerinnen und Fahrern erfordern.

3.2 Gelegenheitslader (Teillader)

Wesentliche Unterschiede beim Batteriebus als Gelegenheitslader liegen in der Batteriekapazität und der Aufladung. Die Batterie hat eine typische Kapazität von 90 bis 150 kWh (am Beispiel eines 12 m Busses) und ist somit kleiner und leichter als die des Depotladers. Die Aufladung der Batterie erfolgt auf der Strecke (z.B. an den Endhaltestellen) über einen Pantographen oder ein induktives Ladesystem. In Abbildung 3-3 wird das Prinzip eines Gelegenheitsladers veranschaulicht. Dank der regelmäßigen Zwischenladung (z.B. an den Endhaltestellen) kann der Umlauf theoretisch beliebig lang sein. An den Ladepunkten ist eine

Ladezeit von typischerweise 10 Minuten notwendig. Der Gelegenheitslader ist wegen der festgelegten Ladepunkte jedoch nur eingeschränkt auf anderen Strecken einsetzbar.

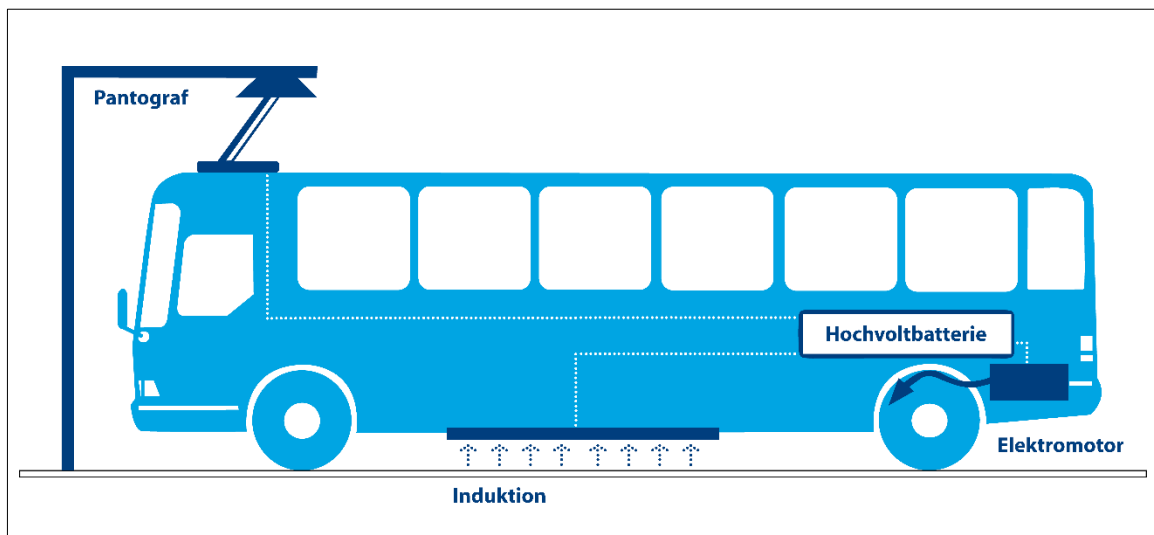


Abbildung 3-3 Funktion eines Gelegenheitsladers

Die Vor- und Nachteile von Gelegenheitsladern sind:

- + Theoretisch unbegrenzte Reichweite auf der Linie
- + Geringere Batteriekapazität als beim Depotlader
- Begrenzte Einsetzbarkeit auf anderen Strecken
- Erhöhter planerischer Aufwand beim Einrichten der Linie
- Ggf. geringere Beförderungskapazität im Vergleich zur Dieselsechnik (bis zu 10 % geringer)

Bei den Gelegenheitsladern stehen dem hohen Reichweitenpotenzial der hohe Aufwand der betrieblichen Neuplanung sowie die eingeschränkte Flexibilität der Busse beim Einsatz auf anderen Linien gegenüber. Je nach Batteriegröße können Gelegenheitslader auch eine geringere Beförderungskapazität (von 0 bis - 10 %) im Vergleich zur Dieselsechnik aufweisen. Dies kann gegebenenfalls den

Einsatz von Mehrfahrzeugen und dementsprechend zusätzlichen Fahrerinnen und Fahrern erfordern.

3.3 Brennstoffzelle

Der BZ-Bus wandelt in einer Brennstoffzelle den Energieträger Wasserstoff in elektrische Energie um. Der erzeugte Strom treibt wiederum den elektrischen Fahrmotor des Busses an. Die im Vergleich zu Batterien von Voll- bzw. Gelegenheitsladern sehr kleine Batterie (typischerweise 20 bis 60 kWh) dient in erster Linie zur Regelung der unterschiedlich abgerufenen Leistungen und zur Rückgewinnung der Bremsenergie (Rekuperation). Übliche Reichweiten für einen Brennstoffzellenbus sind etwa 400 km. Die Betankung erfolgt über eine Wasserstofftankstelle (ähnlich einer Erdgas- oder Dieseltankstelle) und dauert ca. 10 Minuten. Abbildung 3-4 zeigt das Funktionsprinzip eines BZ-Busses (mit dem Wasserstofftank auf dem Dach des BZ-Busses).

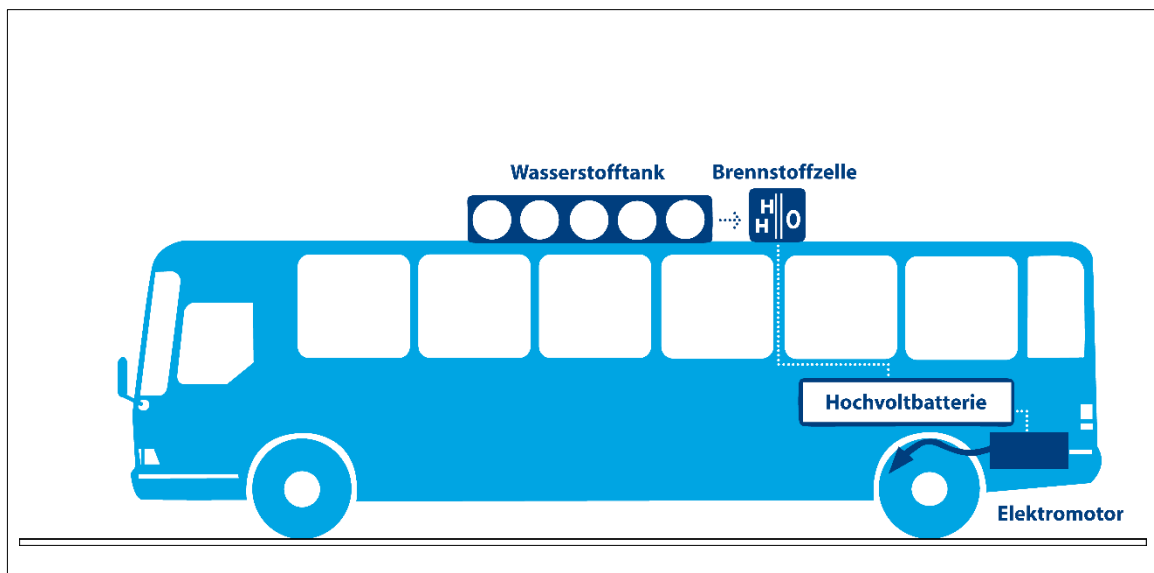


Abbildung 3-4: Funktion des BZ-Busses

Die Vor- und Nachteile von BZ-Bussen sind:

- + Reichweiten bis ca. 400 km
- + Flexibel einsetzbar (wie Diesel- oder Erdgasbus)
- Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur erforderlich
- Ggf. geringere Beförderungskapazität im Vergleich zur Dieseltechnik (bis zu 10 % geringer)

Den hohen Reichweiten dieser Nullemissionstechnologie stehen die Investition in eine Wasserstoffinfrastruktur gegenüber. Jedoch bietet die BZ-Technologie im Vergleich zu Batteriebusen eine erleichterte Umstellung der Gesamtflotte auf Elektromobilität. Aufgrund der Reichweiten und Flexibilität von BZ-Bussen können Dieselbusse betrieblich praktisch eins zu eins ersetzt werden. Zudem verfügen BZ-Busse im Vergleich zur Batterietechnik über weniger schwere Energiespeicher und weisen dementsprechend tendenziell höhere Beförderungskapazitäten als Batteriebusse auf. Nach heutigem Stand der Technik ist jedoch auch bei BZ-Bussen mit einer geringeren Beförderungskapazität von 0 bis -10 % (in Abhängigkeit des Herstellers und des Fahrzeugmodells) im Vergleich zu Dieselsebussen zu rechnen.

3.4 Entwicklung der E-Bus-Technologie

Seit 2018 hat sich die E-Bus-Technologie stetig weiterentwickelt. Die nachfolgende Abbildung 3-5 zeigt eine kurze Zusammenfassung hinsichtlich der technologischen Fortschritte in Bezug auf einen 12-m-Solobus.

		2018		2024
E-Bus 	Stand der Technik	Prototypen, Einzelbusse	↗	Serienproduktion, Umstellung gr. Flotten
	Max. Batteriekapazität Depotlader	ca. 350 kWh	71 % ↗	bis zu 600 kWh (350 kWh heute typisch)
BEV-Bus 	Sichere Tagesfahrleistung Depotlader über alle Jahreszeiten	ca. 150 km	66 % ↗	ca. 250 km*
	Kostenentwicklung Depotlader	ca. 600.000 €/Bus	0 - 8 % = ↘	ca. 550.000 €/Bus
BZ-Bus 	Kostenentwicklung BZ-Bus	ca. 700.000 €/Bus	19 % ↘	ca. 570.000 €/Bus

* Von OEM heute typischerweise über die Lebensdauer eines Busses (10 Jahre) garantiert. Gelenkbusse: (18 m) 200 km

Abbildung 3-5: Entwicklung der E-Bus-Technologie 2018 bis 2024

Während 2018 die ersten Prototypen auf den Markt gekommen sind und im Rahmen von ersten Elektrifizierungsmaßnahmen einzelne Busse umgestellt worden sind, befinden sich die E-Busse (Batterie- und Brennstoffzellenbusse) heute in Serienproduktion. Busbetreiber gehen die Umstellung von großen Flotten an. Emissionsfreie Antriebstechnologien haben sich als Alternative zur Dieselsechnologie etabliert.

Die heute typischerweise zum Einsatz kommenden 350 kWh Batterien stellten 2018 noch die maximale am Markt verfügbare Kapazität für Batteriebusse dar. Bushersteller bieten derzeit schon bis zu 600 kWh Batteriekapazitäten an. Einhergehend mit der Kapazitätsentwicklung haben sich auch die Reichweiten der Depotlader verbessert. Heutzutage sind über alle Jahreszeiten hinweg sichere Reichweiten von ca. 250 km (im Vergleich zu 150 km in 2018) realisierbar.

Die Kosten für Depotlader hingegen sind in den letzten Jahren annähernd konstant geblieben (0 bis - 8 %). Wesentliche Faktoren hierfür sind erhöhten Batteriekapazitäten bei gleichzeitig reduzierten Produktionskosten.

Eine starke Senkung der Produktionskosten konnte hingegen bei den BZ-Bussen erzielt werden, sodass sich die Preise für die BZ-Busse um ca. 20 % seit 2018 reduziert haben. Die Reichweite und Performance von Brennstoffzellenbussen sind dabei konstant geblieben (bis ca. 400 km sichere Reichweite, ca. 10 Minuten für eine Betankung).

3.5 Allgemeine Informationen zu Komponenten und Infrastruktur

Im Folgenden wird auf verschiedene Merkmale der einzelnen Komponenten und der Infrastruktur eingegangen. Hierbei werden vor allem die Besonderheiten der Batterietechnologie sowie der Lade- und Betankungsinfrastruktur betrachtet.

Energieverbrauch

Der Energieverbrauch von Elektrobussen hängt von unterschiedlichen Faktoren ab:

- › Bedienung durch den Fahrer
- › Anzahl der Haltestellen
- › Stau/Verkehr
- › Außentemperatur/Witterung
- › Anzahl der Fahrgäste
- › Höhenprofil der Fahrstrecke (Topographie)
- › Gewicht des Fahrzeugs

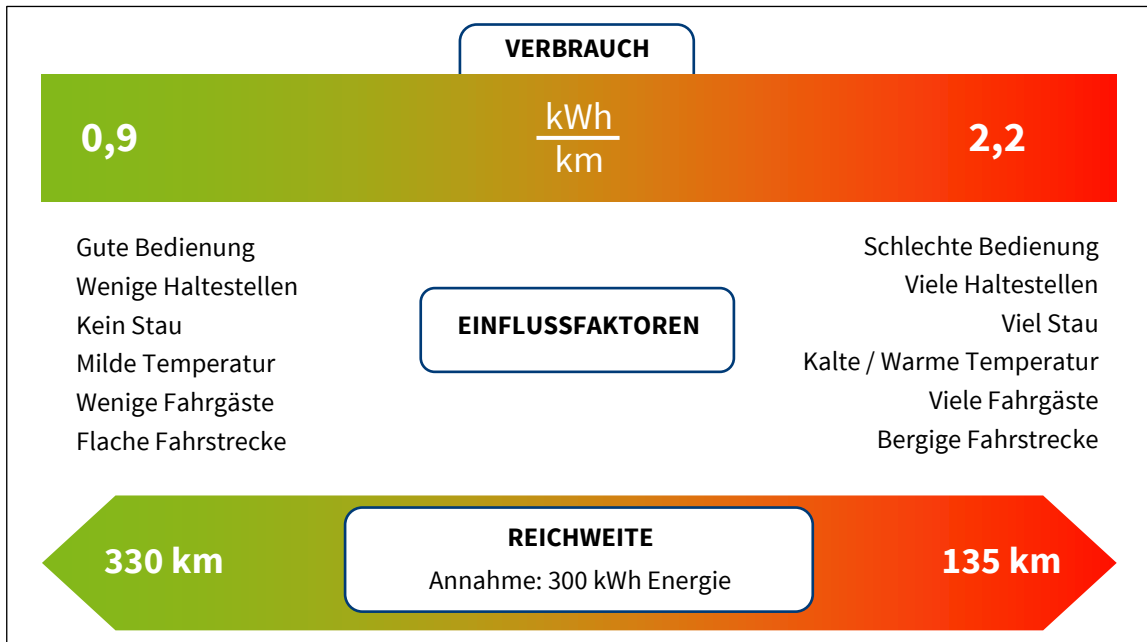


Abbildung 3-6: Beispielhafte Verbräuche und Reichweiten für einen 12-m-Batteriebus

Für einen 12-m-Standardbus schwankt der Verbrauch etwa zwischen 0,9 kWh/km (günstige Bedingungen) und 2,2 kWh/km (ungünstige Bedingungen). Abbildung 3-6 verdeutlicht beispielhaft die Spanne des Energieverbrauchs bei unterschiedlichen Bedingungen.

Als Richtwert für den Energieverbrauch kann ein Durchschnitt von ca. 1,5 kWh/km angenommen werden. Die Nutzung von Heizung und Klimaanlage hat einen starken Einfluss auf die Energiebilanz des Fahrzeugs. Aus dem hohen Wirkungsgrad des elektrischen Antriebsstrangs resultiert, dass – im Gegensatz zum Verbrennungsmotor – während des Betriebs nur wenig Abwärme erzeugt wird, die zum Heizen des Fahrzeuges herangezogen werden kann (vgl. Abbildung 3-7).

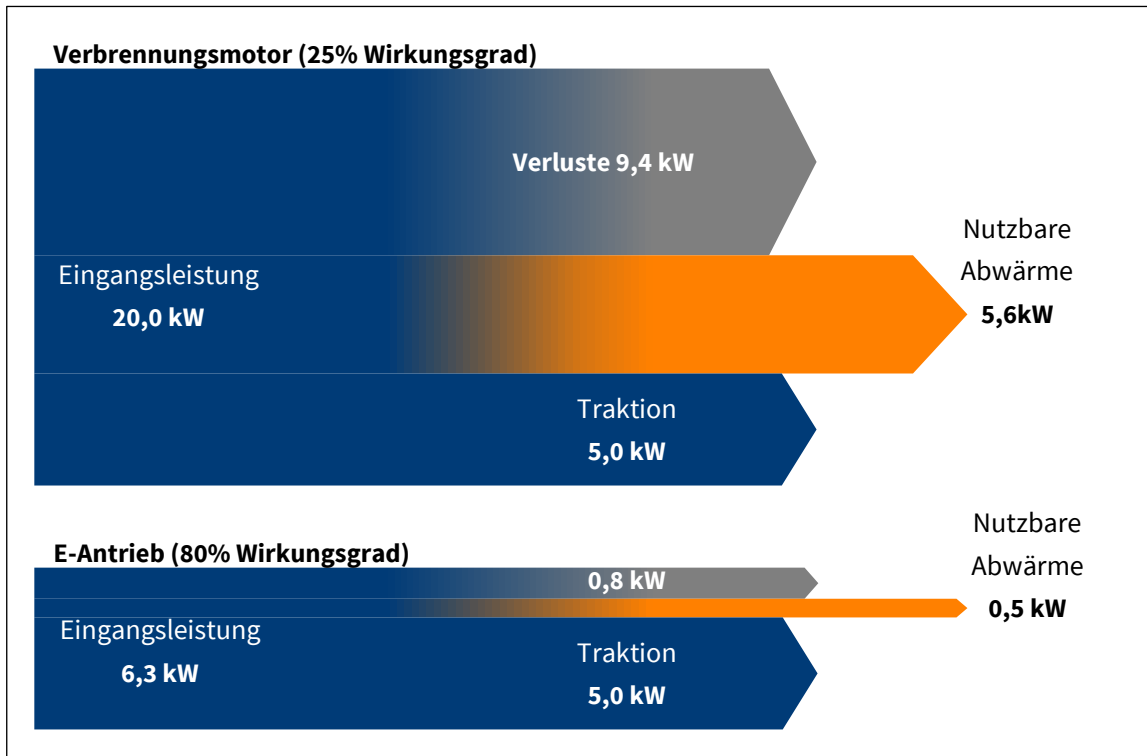


Abbildung 3-7 Vergleich der nutzbaren Abwärme, Verbrennungsmotor vs. E-Antrieb (Beispiel PKW)

Ein Großteil der notwendigen Energie für die Heizung des Fahrgastraums muss aus diesem Grund ebenfalls aus der Antriebsbatterie entnommen werden. Dies erhöht den Gesamtverbrauch im Vergleich zum unbeheizten Betrieb erheblich. Im Gegensatz zu batterieelektrischen Bussen erzeugen BZ-Busse im Zuge der chemischen Reaktion jedoch Abwärme, welche für die Beheizung des Innenraumes genutzt werden kann. Daher bleibt die Reichweite in diesem Fall über alle Jahreszeiten nahezu unverändert.

Für Batteriebusse ist der Einsatz einer mit fossilen Brennstoffen betriebenen Zusatzheizung (typischerweise Dieselheizung) denkbar. Die Reichweite des Batteriebusse ist entsprechend größer, da die Energie für die Innenraumheizung in diesem Fall nicht aus der Batterie, sondern aus der Zusatzheizung entnommen wird. Der Einsatz einer solchen nichtelektrischen Zusatzheizung hat jedoch zur Folge, dass im Winter weiterhin lokale Emissionen ausgestoßen werden. Derzeit sind auch moderne Heizsysteme, die nach dem Prinzip der Wärmepumpe

(Kreisprozess) arbeiten, in elektrisch betriebenen Fahrzeugen vermehrt eingesetzt. Diese Systeme sind energetisch günstiger und beeinflussen daher die Reichweite nicht so stark. Für die Klimatisierung der Busse an heißen Tagen wird eine elektrisch betriebene Klimaanlage eingesetzt. Da es sich bei der Kühlung um einen Kreisprozess handelt, benötigt sie, verglichen mit einer elektrischen Heizung, deutlich weniger elektrische Energie.

Ladeinfrastruktur für Depotladung

Die benötigten Ladegeräte für die Depotladung haben üblicherweise eine Ladeleistung von 40 bis 80 kW. Die Ladeleistung ist abhängig von der Batteriegröße und der Anzahl der Busse, die geladen werden sollen. Außerdem ist die Ladezeit zu berücksichtigen, die für die Aufladung der Batterie zur Verfügung steht. Das Laden der Batterien dauert je nach Typ und Ladekapazität etwa vier bis acht Stunden. Der Zusammenhang zwischen Ladedauer, Batteriegröße und erforderlicher Ladeleistung ist in Abbildung 3-8 dargestellt.

Preise für handelsübliche Ladegeräte liegen bei 20.000 € bis 40.000 €. Bei der Ladung mittels Pantografen entstehen typischerweise höhere Kosten (+ ca. 5.000 € bis + ca. 20.000 € pro Ladepunkt), da hierfür Ladehauben und eine entsprechende Kabelführung zu den Ladestationen erforderlich sind. Im Allgemeinen sind die Kosten für die Ladeinfrastruktur von der Leistung, der Anschlussart sowie den örtlichen Gegebenheiten abhängig.

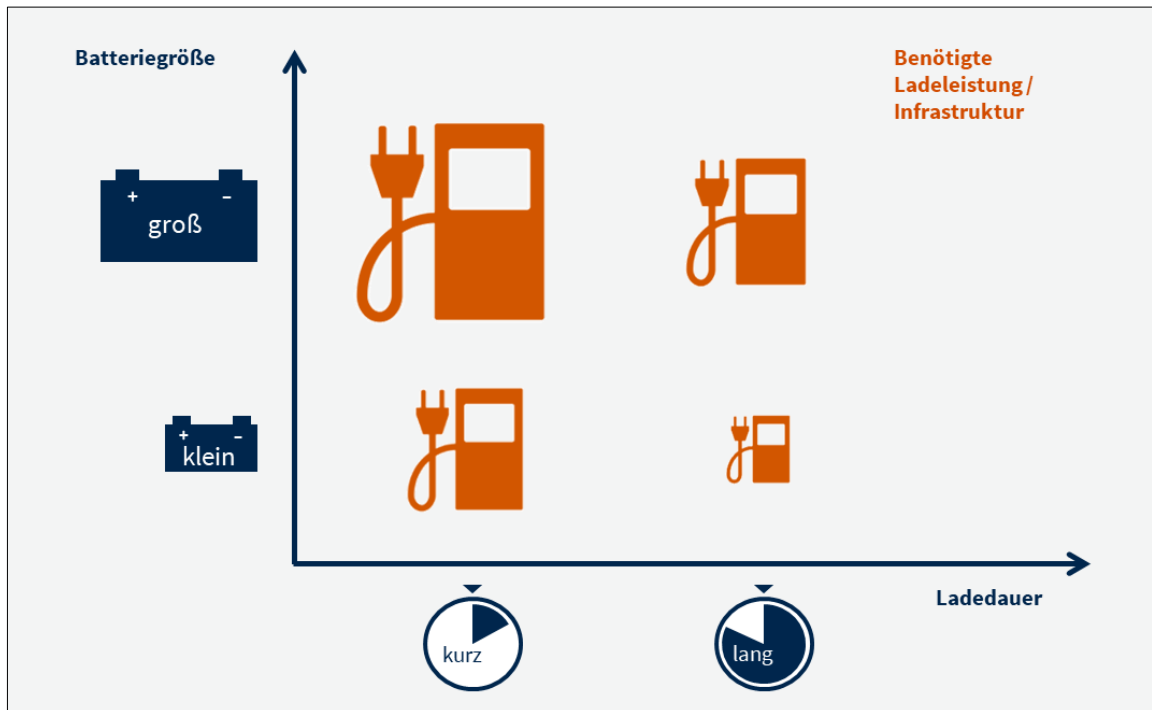


Abbildung 3-8 Abhängigkeit der Ladeleistung von Batteriegröße und Ladedauer

Grundsätzlich gilt: Wird eine kurze Ladedauer gewünscht, ist eine hohe Ladeleistung erforderlich. Auch eine größere Batteriekapazität bedingt die Notwendigkeit einer höheren Ladeleistung (bei konstanter Ladedauer). Die Dimensionierung der Ladeinfrastruktur hängt von der Batteriegröße und von der Ladedauer ab. Bei zunehmender Anzahl von Batteriebusen ist gegebenenfalls ein detailliertes Lademanagement einzuführen, um die Maximallast zu begrenzen oder zu optimieren. Dies kann bedeuten, dass nicht alle Busse zur gleichen Zeit an einem Standort geladen werden, sondern die Ladevorgänge über den Tag verteilt sind. Abbildung 3-9 zeigt schematisch eine zeitliche Verschiebung der Ladevorgänge zur Reduzierung der Maximallast. Eine solche Verteilung der Lasten kann durch ein Lademanagement gewährleistet werden.

Für die optimale Ausnutzung der Infrastruktur (und ggf. eine vergünstigte Stromabnahme) ist die Abstimmung mit den örtlichen Energieversorgern und Verteilnetzbetreibern zu empfehlen.

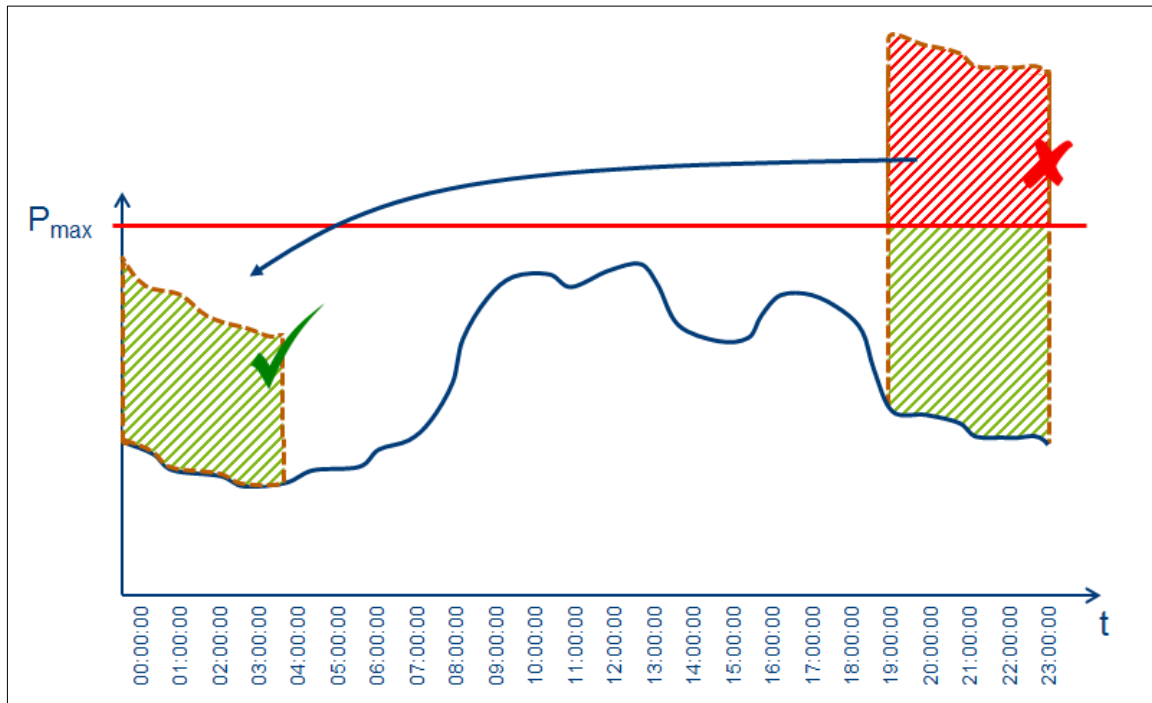


Abbildung 3-9 Lademanagement zur Verteilung ungünstiger Lasten

Ladeinfrastruktur für Gelegenheitslader

Bei der Ladestrategie der Gelegenheitsladung befindet sich die benötigte Ladeinfrastruktur typischerweise auf der jeweiligen Buslinie. Als Leistungsübertragungstechnologie für die Ladeinfrastruktur kommt sowohl die induktive als auch die konduktive Ladung in Betracht:

› Induktive Ladung:

Bei der induktiven Ladung wird die Batterie des Fahrzeugs berührungslos über elektromagnetische Wechselwirkungen zwischen zwei Platten mit integrierten Spulen geladen. Eine dieser Platten wird in den Boden des Fahrzeugs eingebaut (auch „Pick-Up“ genannt), die andere wird in den Boden des Ladeplatzes (z.B. Straße/Haltestelle) integriert. Dadurch sind die optischen Eingriffe in das Straßenbild sehr gering. Der Ladevorgang erfolgt automatisch und schnell.

› **Konduktive Ladung:**

Bei der konduktiven Ladung wird das Fahrzeug an eine Schnellladevorrichtung angeschlossen. Neben der klassischen Variante mit Ladesäule und Ladekabel kommen für Batteriebusse in den letzten Jahren vermehrt automatisierte Lösungen mit Pantografen zum Einsatz. Bei dieser Variante können die Busse in kürzester Zeit nachgeladen werden, ohne dass der Fahrer das Fahrzeug zum Laden verlassen muss.

In der Regel stellt die Ladung mit Hilfe eines Pantografen gegenüber der induktiven Ladung eine deutlich günstigere Variante dar. Für induktive Ladeeinrichtungen sind 30 bis 50 % höhere Investitionskosten als für konduktive Ladeeinrichtungen zu erwarten. Neben den höheren Investitionskosten schneiden auch die Ladeleistungen im Vergleich zu den konduktiven Ladestationen schlechter ab. Aktuell sind Leistungen bis maximal 200 kW am Markt erhältlich. Ladestationen mit Pantografen können hingegen im Alltagsbetrieb schon erfolgreich bis zu 500 kW und mehr laden. Die Induktionsladung scheint zudem im Alltagseinsatz momentan noch fehleranfälliger als die konduktive Ladeinfrastruktur zu sein. Nicht zuletzt ist die unterirdisch zu bauende Ladetechnik planungsseitig aufwendiger zu realisieren. Aus diesen Gründen wird die induktive Ladung hier nicht weiter beschrieben.

Konduktive Ladung über einen Pantografen

Es ist grundsätzlich zwischen zwei Varianten von Pantografen (Stromabnehmer) zu unterscheiden:

1. **Top-down:** Der Pantograf ist in den Lademast integriert und fährt bei der Anfahrt des Busses herunter. Auf dem Busdach befindet sich eine entsprechende Kontaktschiene für die Ankopplung des Pantografen (vgl. Abbildung 3-10).



Abbildung 3-10 Top-Down-Pantograf

2. **Bottom-Up:** Der Pantograf befindet sich auf dem Busdach. Der Lademast trägt in diesem Fall nur den Kollektor (in der Ladehaube). Wird der Ladevorgang gestartet, fährt der Pantograf vom Bus hoch und dockt am Kollektor an (vgl. Abbildung 3-11).



Abbildung 3-11 Bottom-Up-Pantograf

Beide Varianten sind technisch ausgereift. Bezüglich der Positionierung des Masts hat sich die Installation auf der Höhe der ersten Achse technisch und betrieblich als sinnvoll erwiesen. Für die korrekte Positionierung des Busses stehen dem Fahrer zahlreiche Hilfsmittel zur Verfügung, beispielweise farbige Streifen am Bordstein auf der Höhe der vorderen Tür oder eine kleine Straßenschwelle/-senke.

Die wesentlichen Vor- und Nachteile der zwei Varianten sind in Tabelle 3-1 zusammengefasst.

Tabelle 3-1 Vor- und Nachteile der Top-Down- und Bottom-Up-Pantografen-Variante

	Vorteile	Nachteile
Top Down	<ul style="list-style-type: none"> + Leichteres Fahrzeug + Günstigeres Fahrzeug (bietet sich für große Flotten an) + Keine beweglichen Teile auf dem Busdach + Bessere Wetterbeständigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> - Ausfall des Pantografen bedeutet Ausfall der gesamten Flotte (ggf. Redundanzlösung nötig) - Nicht flexibel für automatisierte Ladung im Depot - Teurere Infrastruktur
Bottom-Up	<ul style="list-style-type: none"> + Ausfall des Pantografen bedeutet Ausfall eines Busses + Bietet sich für automatisierte Ladelösungen im Depot an („Ladeschiene“) + Günstigere Infrastruktur 	<ul style="list-style-type: none"> - Mehr Gewicht auf dem Bus (ca. 1 Fahrgast weniger) - Teureres Fahrzeug (bietet sich für kleine Flotte an) - Bewegliche Teile auf dem Busdach

Wasserstoff-Betankungsinfrastruktur

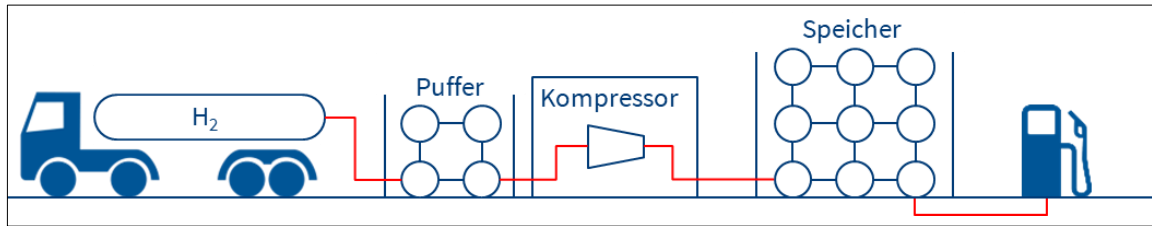
Für die Treibstoffversorgung von Brennstoffzellenfahrzeugen wird eine H₂-Tankstelle benötigt. Die Betankung verläuft nach einem ähnlichen Prinzip wie bei CNG- oder Diesel-Bussen. Sie wird beispielhaft in Abbildung 3-12 gezeigt.



Abbildung 3-12 Betankung eines BZ-Busses

Der Wasserstoff kann auf drei verschiedene Arten an der Tankstelle bereitgestellt werden. So kann der Transport entweder per LKW oder über eine Pipeline erfolgen. Darüber hinaus ist es möglich, den Wasserstoff mit Hilfe eines Elektrolyseurs direkt an der Tankstelle zu produzieren. In Abbildung 3-13 ist die Anlieferung durch LKW dargestellt. Die wesentlichen Komponenten und Arbeitsschritte einer Tankstelle mit Wasserstoffanlieferung sind:

- › Anlieferung des H₂ mittels LKW
- › Lagerung des H₂ im Pufferspeicher an der Tankstelle
- › Verdichtung des H₂ auf Nenndruck (350 bar für Busse und 700 bar für PKW)
- › Lagerung des Wasserstoffs im Hochdruckspeicher
- › Kraftstoffabgabe über die Zapfsäule

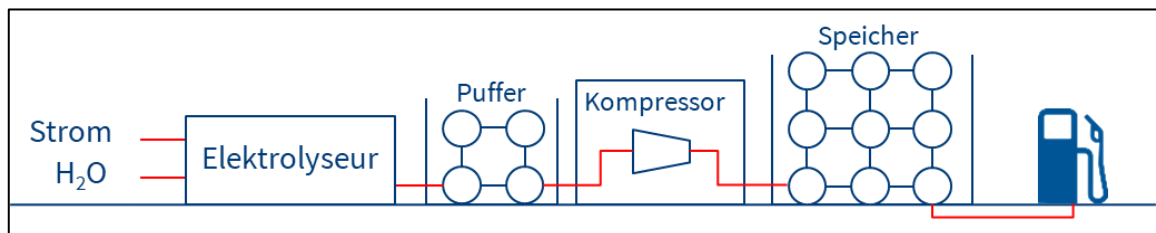
Abbildung 3-13 H₂-Tankstelle mit Wasserstoffanlieferung mittels LKW

Alternativ zur Anlieferung per LKW besteht die Möglichkeit, den Wasserstoff mittels Pipeline zu transportieren. Die dafür benötigten Komponenten und Arbeitsschritte sind wie folgt:

- › Anlieferung des H₂ mittels Pipeline
- › Lagerung des H₂ im Pufferspeicher an der Tankstelle
- › Verdichtung des H₂ auf Nenndruck (350 bar für Busse und 700 bar für PKW)
- › Lagerung des Wasserstoffs im Hochdruckspeicher
- › Kraftstoffabgabe über die Zapfsäule

Es ist auch möglich, den Wasserstoff direkt vor Ort durch ein Elektrolysemodul zu erzeugen (vgl. Abbildung 3-14). Die Komponenten und Arbeitsschritte einer Tankstelle mit Wasserstofferzeugung sind:

- › Erzeugung des H₂ mittels elektrischer Energie und Wasser (im Elektrolyseur)
- › Lagerung des H₂ im Pufferspeicher an der Tankstelle
- › Verdichtung des H₂ auf Nenndruck (350 bar für Busse und 700 bar für PKW)
- › Lagerung des Wasserstoffs im Hochdruckspeicher
- › Kraftstoffabgabe über die Zapfsäule

Abbildung 3-14 H₂-Tankstelle mit Wasserstoffherzeugung vor Ort

Zur Bereitstellung des Wasserstoffs bieten zunehmend mehr Unternehmen Dienstleistungen wie das Betreibermodell an. Hierbei kümmert sich ein externer Betreiber um Bau und Betrieb sowie die Wasserstoffversorgung der Tankstelle und bietet den Wasserstoff zu einem festgesetzten Preis an. Für die Busunternehmen sinken dadurch die Investitionsrisiken. Zudem sind die Treibstoffkosten transparent kalkulierbar.

3.6 Vergleich der Elektrobustechnologien

In diesem Abschnitt werden die E-Bustechnologien einander gegenübergestellt und untereinander sowie mit der Dieseltechnologie verglichen. Aus den erläuterten Einflussfaktoren (auf Energieverbrauch und Batteriekapazität) lassen sich die Vor- und Nachteile der Technologien ableiten.

Vergleich mit Dieseltechnologie

Tabelle 3-2 stellt die spezifischen Eigenschaften der drei untersuchten Bustechnologien im Vergleich zur Dieseltechnologie gegenüber. Die betrachteten Kriterien sind Reichweite, Ladedauer, Streckenplanung und lokale Emissionen.

Tabelle 3-2 Übersicht der Eigenschaften von Elektrobussen

	Depotladung	Gelegenheitsladung	Brennstoffzelle	Diesel
Reichweite	bis 250 km ¹	Unbegrenzt ²	bis 400 km	> 400 km
Ladedauer / Betankungszeit	mehrere Stunden	bis 10 Minuten typischerweise	ca. 10 Minuten	ca. 10 Minuten
Streckenplanung	wie Diesel ⁴	aufwendig	wie Diesel	gewohnt
Lokale Emissionen	Null ⁵ Ja	Null	Null (Wasserdampf)	Ja + Geräuschemissionen

¹ sichere, rein elektrische Reichweite zu allen Jahreszeiten

² je nach Ladeinfrastruktur

⁴ im Rahmen der Reichweite

⁵ 100 % elektrisch inklusive Heizung und Klimaanlage

Vor einer Entscheidung zugunsten einer bestimmten E-Bustechnologie ist eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung empfehlenswert, da die Kosten sehr stark von den linienspezifischen Rahmenbedingungen (Umläufe, Infrastruktur etc.)

abhängen. Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung gilt es unter anderem, die Lebenszykluskosten (TCO) zu vergleichen.

Vergleich der Batteriegrößen

Wie in Kapitel 3.5 aufgezeigt, ist die Größe der Batterie (Batteriekapazität) abhängig von der jeweiligen Antriebstechnologie. Werden die unterschiedlichen Batteriekonzepte hinsichtlich der Batteriegröße miteinander verglichen, wird ersichtlich, dass die Batterie des Depotladers 6- bis 10-mal und die Batterie des Gelegenheitsladers etwa 3- bis 6-mal so groß wie die des Brennstoffzellenbusses ist (vgl. Abbildung 3-15).

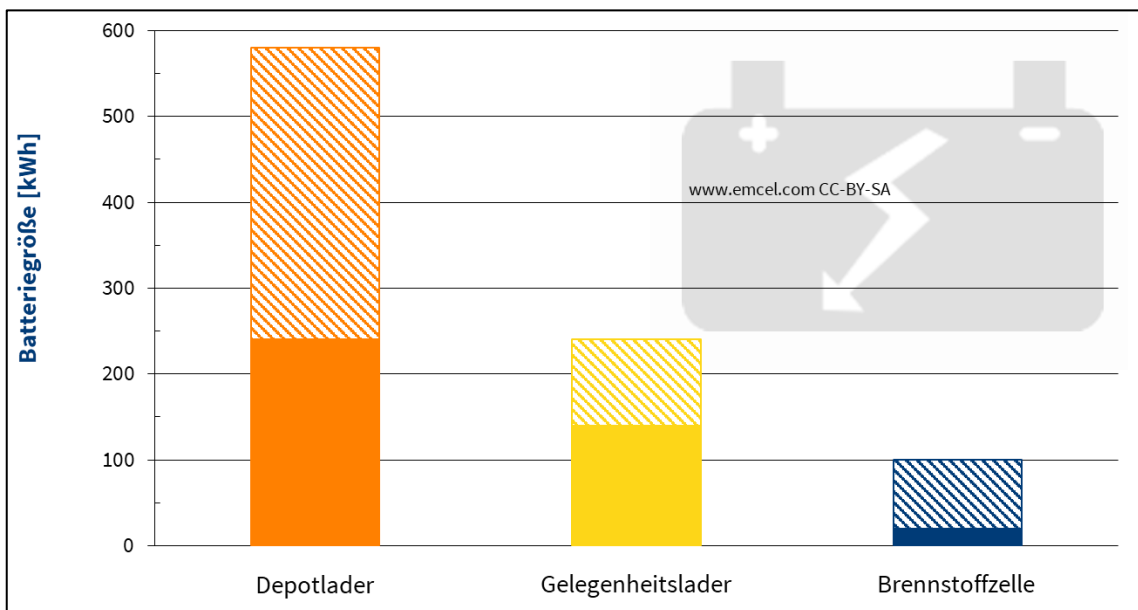


Abbildung 3-15: Typische Batteriegrößen bzw. -kapazitäten der E-Bustechnologien

Umsetzungsaufwand der Technologien

Aufgrund der Unterschiede in der benötigten Infrastruktur der einzelnen Technologien ist der Aufwand für eine Umstellung der Flotte unterschiedlich einzustufen. In Abbildung 3-16 werden die verschiedenen Hürden für den Einstieg

sowie für die gesamte Flottenumstellung in Bezug auf die einzelnen Technologiealternativen illustriert.

Depotlader sind aktuell weit verbreitet, da der Einstieg in die Technologie relativ einfach zu realisieren ist. Daher wird sie in vielen Verkehrsbetrieben für den Einstieg in die Elektromobilität bevorzugt. Die weitere Umstellung der Flotte auf Busse mit Depotladung ist jedoch mit Hindernissen verbunden. In Anbetracht der hohen Ladeleistung, die bei einer Vielzahl von Bussen bereitzustellen ist, muss das Depot in der Regel umfassend umgebaut und erweitert werden.

Der Einstieg in die Elektromobilität mittels Gelegenheitsladung und Brennstoffzellen stellt die Betreiber vor eine große Hürde. Für beide Technologien muss zu Beginn eine deutlich komplexere Infrastruktur als beim Depotlader bereitgestellt werden. Bei der Gelegenheitsladungstechnologie handelt es sich um Ladesäulen, die auf der Strecke errichtet werden müssen. Für die Brennstoffzellenbusse ist das Vorhandensein einer Wasserstofftankstelle notwendig.

Für die weitere Umstellung der Flotte kann die Ladeinfrastruktur für die Gelegenheitsladung schrittweise erweitert werden, was zwar mit einem hohen planerischen Aufwand verbunden ist, aber als „bekannte Hürde“ betrachtet werden kann und damit eine einfache Umsetzung erwarten lässt.

Die bereits errichtete H₂-Tankstelle kann modular erweitert werden. Dies kommt in einem weitaus geringeren Aufwand zum Ausdruck.




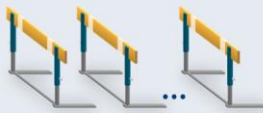


	Einstiegs-/Pilotprojekt	Flottenausbau
Volllader	 <p>Kleine Hürde: Geringer Aufwand bei Test weniger E-Busse</p>	 <p>Hohe Hürde: Hoher Aufwand bei gesamter Flottenumstellung (Umbau Depot)</p>
Teillader	 <p>Hohe Hürde: Hoher Aufwand aufgrund der Ladeinfrastruktur (Stadtplaner) auch bei wenig E-Bussen</p>	 <p>Viele mittlere Hürden: Jede neue Linienumstellung ergibt eine neue Hürde</p>
Brennstoffzelle	 <p>Hohe Hürde: Hoher Aufwand aufgrund der Errichtung der Tankstelle</p>	 <p>Keine bis mittlere Hürde:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Keine weitere Tankstelle nötig • Bestehende Tankstelle wird nur erweitert

Abbildung 3-16: Einstiegshürden der Batterie- und BZ-Bustechnologien

4 Technische Analyse

In diesem Kapitel wird die technische Machbarkeit einer Umstellung auf emissionsfreie Antriebe für den Betriebshof der OVAG in Gummersbach betrachtet. Dabei werden die E-Bus-Technologien Gelegenheitslader, Depotlader und Brennstoffzelle hinsichtlich der Technologieeignung miteinander verglichen.

Unter Berücksichtigung einer langfristigen Umstellung und der damit verbundenen erforderlichen Flexibilitäten im Betriebseinsatz der Busse erfolgt die Analyse anhand verschiedener Szenarien.

- › Umstellung auf 100 % Gelegenheitsladung (GL)
- › Umstellung auf 100 % Depotladung (DL)
- › Umstellung auf 100 % Brennstoffzellentechnik (BZ)

4.1 Ausgangslage

Die Untersuchung basiert auf dem aktuell gültigen Nahverkehrsplan (NVP) und den derzeitigen Umläufen sowie Linieneigenschaften.

Charakteristik des Nahverkehrsplans

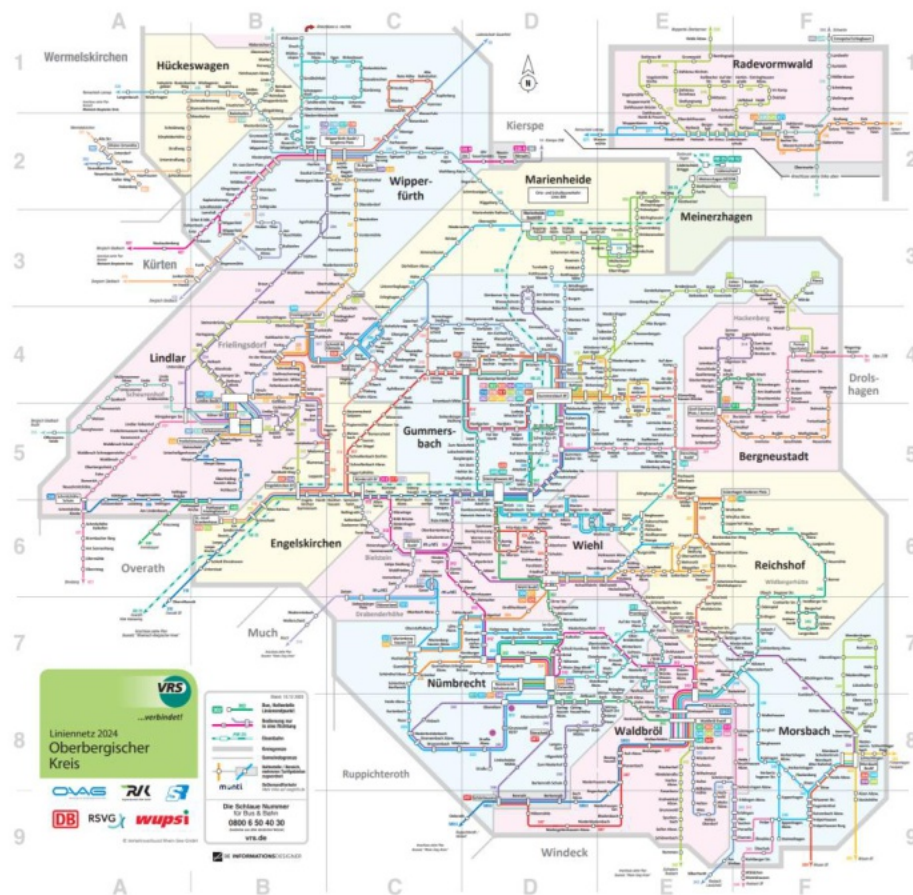
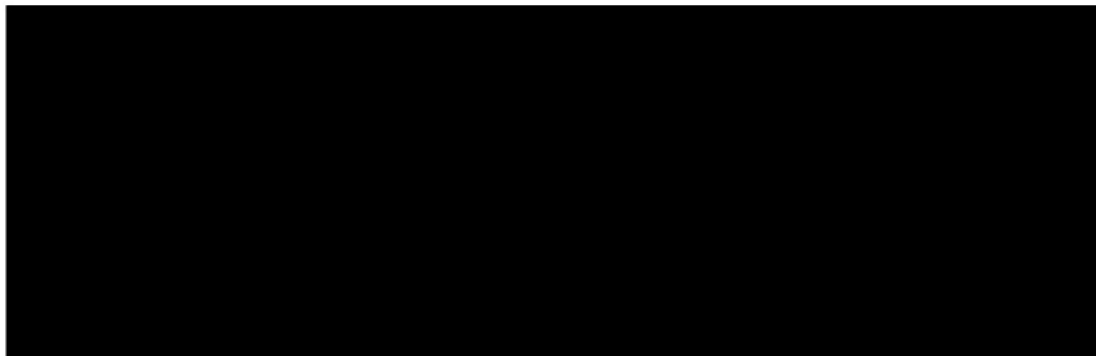


Abbildung 4-1: Netzverkehrsplan Standort Gummersbach im Kontext des Gesamtnetzverkehrsplans der OVAG Oberbergische Verkehrsgesellschaft mbH; Quelle: www.ovaginfo.de

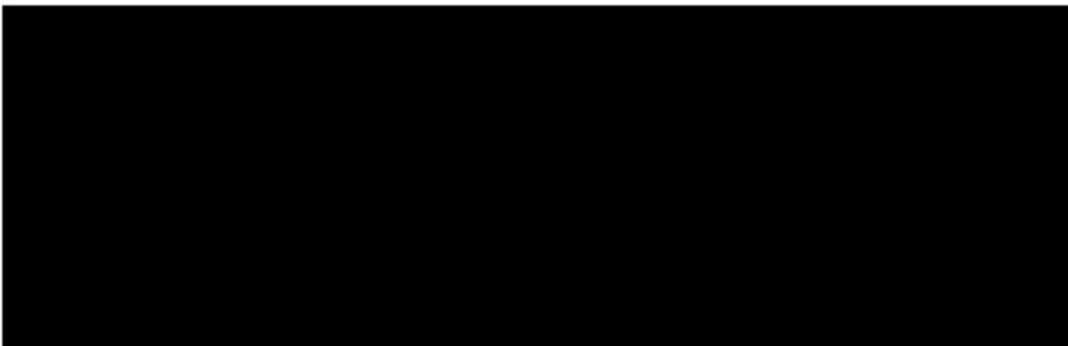
Charakteristik des Betriebshofs

Die Oberbergische Verkehrsgesellschaft mbH betreibt derzeit vier Hauptstandorte in Gummersbach, Wipperfürth, Waldbröl und Radevormwald.

Die standortspezifische technische Analyse wird für den Standort Gummersbach durchgeführt. Abbildung 4-2 gibt eine Übersicht über den Betriebshof in Gummersbach.



Abbildung 4-2: Standortübersicht Betriebshof Gummersbach; Quelle: TIM-online



4.2 Technische Randbedingungen für eine Umstellung auf Gelegenheitsladung

Gelegenheitslader bieten den Vorteil durch Zwischenladungen während der Stand- und Pausenzeiten hohe Reichweiten der Busse zu erzielen. Aufgrund der festen Ladepunkte kann es bei der Gelegenheitsladung jedoch zu einer Einschränkung in Hinblick auf die Flexibilität des Fahrbetriebs kommen. Gelegenheitslader können nur auf Umläufen operieren, die mit entsprechender Ladeinfrastruktur ausgerüstet sind. Auf Grund ihrer geringen Batteriekapazität verfügen sie für andere Umläufe nicht über die nötige Reichweite.

Bedingt durch den heutigen nicht linienreinen Einsatz der Fahrzeuge, erfordert eine vollständige Umstellung auf Gelegenheitsladung, eine komplexe Analyse der Umläufe sowie eine aufwendige Anpassung der Fahr- und Einsatzplanung. Aufgrund der gestreuten Linienplanung bedeutet die Einführung der Gelegenheitslader den Aufbau einer dezentralen Ladeinfrastruktur an einer Vielzahl von Endhaltestellen (z.B. an den Bahnhöfen Overath, Engelskirchen, Runderoth und Lindlar), wodurch sich ein ungünstiges Verhältnis von eingesetzten Fahrzeugen zu erforderlichen Pantographen ergibt.

Des Weiteren umfassen manche Streckenabschnitte zwischen zwei Endhaltestellen (und damit zwischen zwei möglichen Ladepunkte) mehr als 20 km Fahrlänge. Es müssen daher große Batteriekapazitäten eingesetzt werden, welche in direktem Zusammenhang mit höheren Kosten stehen.

Unter Berücksichtigung der aktuellen Umlaufplanung und den damit verbundenen infrastrukturellen, planerischen und finanziellen Aufwänden wird eine 100%ige Einführung von Gelegenheitsladern im weiteren Verlauf der Studie nicht weiter betrachtet.

Die Umstellung einzelner Linien (beispielsweise die Linie 301 oder 310) auf Gelegenheitslader ist jedoch nicht auszuschließen. Der Aufbau einer Ladeinfrastruktur an den Endhaltestellen ermöglicht eine linienweise Elektrifizierung. Allerdings erfordert die aktuelle Einsatzplanung auch hier eine Neuplanung einzelner Umläufe. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Flexibilität im Einsatz der Fahrzeuge verloren geht, da diese nur linienbezogen eingesetzt werden können. Dies wiederum erhöht die Komplexität des Betriebs. Im gesamten Einsatzgebiet der OVAG werden unterschiedliche Fahrzeugtechnologien eingesetzt, für die Reservefahrzeuge vorgehalten und Wartungsinfrastruktur aufgebaut werden müssen.

Im Einzelfall ist eine Bewertung der Aufwände und Kosten für die Planung und Errichtung von Infrastrukturen (beispielsweise Ladepunkte an Endhaltestellen) erforderlich.

4.3 Technische Randbedingungen für eine Umstellung auf Depotladung

Im Folgenden werden sowohl die Längen der heutigen Umläufe als auch der Energie- und Flächenbedarf für eine Umstellung auf Depotlader (100 % elektrisch) analysiert. Der Einsatz von Bussen mit nicht-elektrischer Zusatzheizung (NEZH) wird vor dem Hintergrund der 100%igen Emissionsfreiheit nicht betrachtet.

Analyse der Umlauflängen

Eine Übersicht über die derzeitigen Umlauflängen gibt Abbildung 4-3.

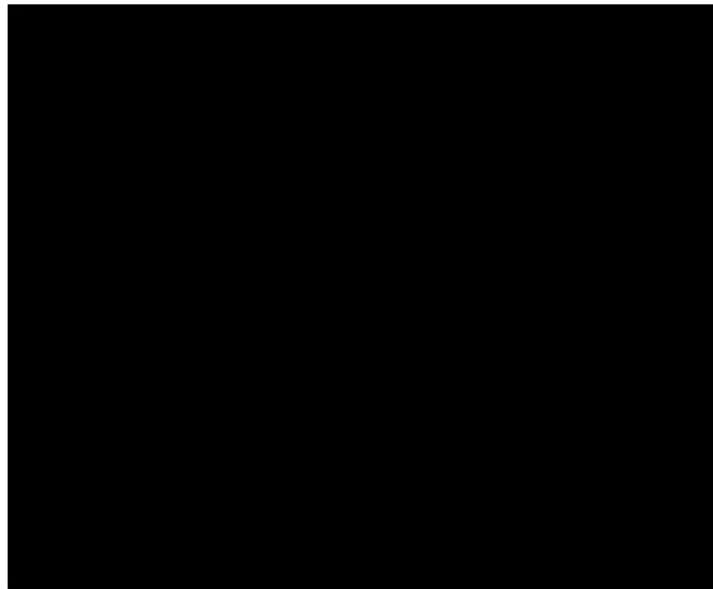
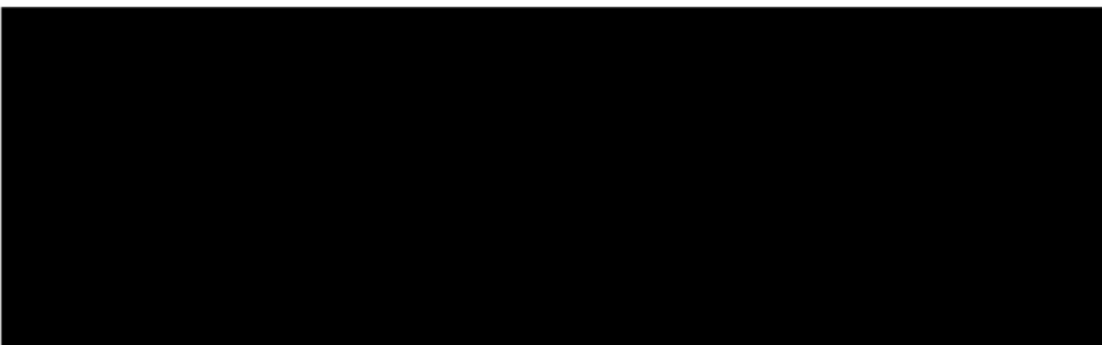
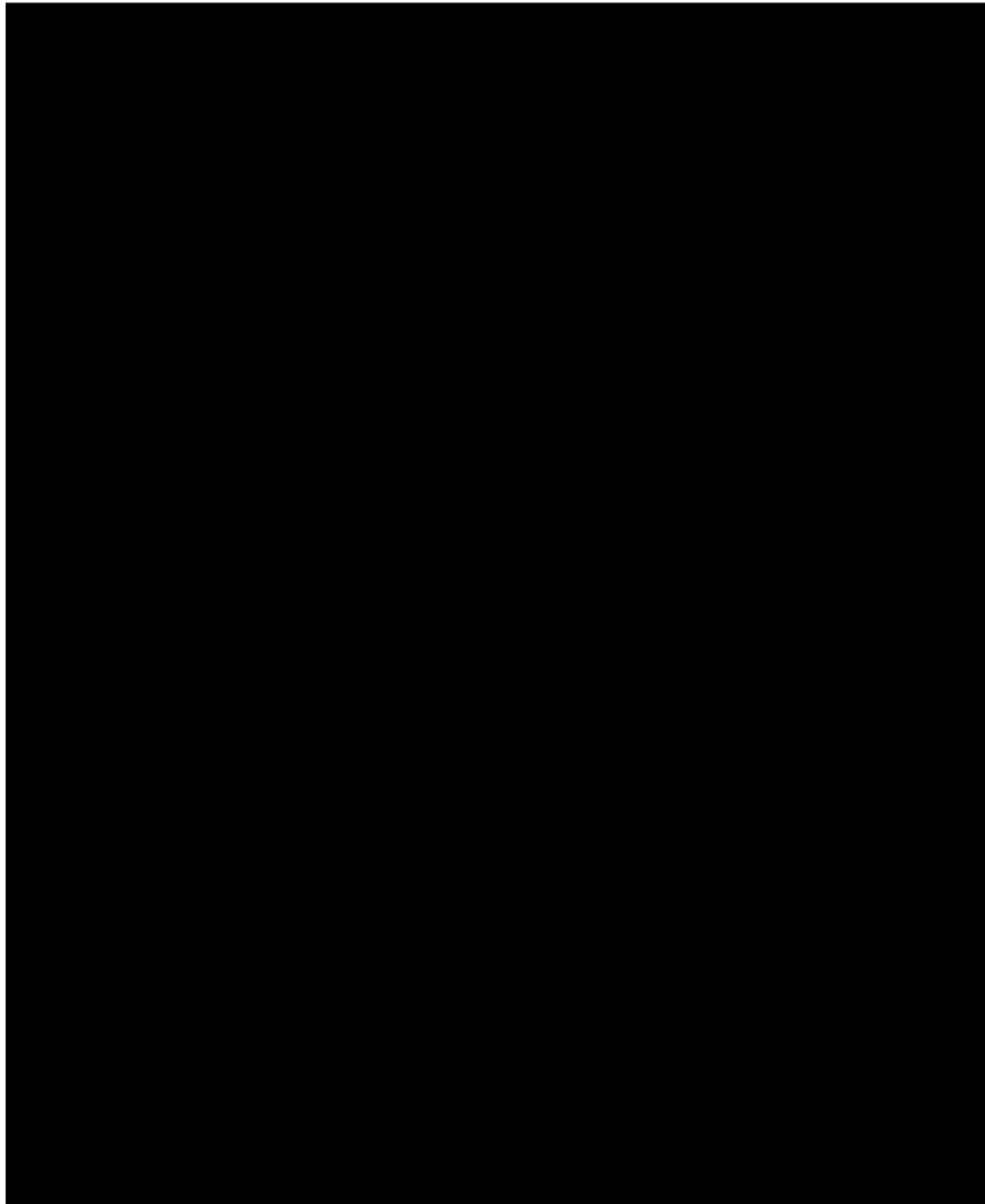


Abbildung 4-3: Umlauflängen in [km/Tag], Umstellung auf Depotladung

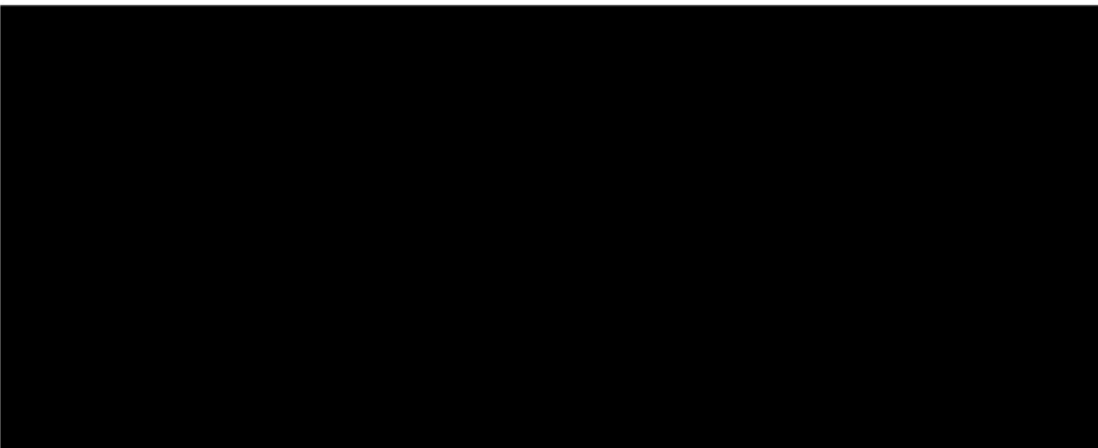




Analyse des Energiebedarfs

Tabelle 4-1 zeigt die Dimensionierung des Netzanschlusses bei vollständiger Umstellung der Flotte auf Depotladung. Zur Reduzierung der maximalen Anschlussleistung bietet sich ein intelligentes Lademanagement an, welches Ladeleistungen und Ladevorgänge in Abhängigkeit des Fahrplans steuert.

Tabelle 4-1: Erforderliche Netzanschlussleistung

The content of this table is completely redacted with a solid black box.The content of this table is completely redacted with a solid black box.

Analyse des Flächenbedarfs

Im Zuge der Technologieumstellung entsteht zusätzlicher Flächenbedarf auf dem Betriebshof. Der Bedarf für die Umstellung auf Depotladung im Vergleich zur heutigen Situation wird im Folgenden ermittelt. Dabei wird die heute genutzte Fläche sowie potenziell zur Verfügung stehende Mehrflächen für die Ladeinfrastruktur auf dem Betriebshof berücksichtigt.

² Einschließlich Leistungsreduzierung durch intelligentes Lademanagementsystem

- › Möglichkeit zur Reduzierung der max. Anschlussleistung – bis zu 30 %
- › Ladeleistung und Ladevorgänge in Abhängigkeit vom Fahrplan gesteuert

Je nach Aufstellungskonzept und Ladestrategie kann ein zusätzlicher Platzbedarf von 15 % bis 30 % für die Aufstellung von Ladegeräten, -säulen, -masten (bei Pantografen), Kabelführung sowie Verteiler- und Sicherungskästen entstehen. Abbildung 4-4 zeigt potenzielle Aufstellungskonzepte für Pantografen und Ladesäulen bei Blockaufstellung.

Beispiel: Pantograf bei Blockaufstellung, bzw. Ladestecker mit Dachmontage



→ ca. +15 % der Fläche notwendig

Beispiel: Ladesäule bei Blockaufstellung, feste Installation neben Busse



→ ca. +30 % der Fläche notwendig

Abbildung 4-4: Aufstellungskonzepte für einen Pantografen und eine Ladesäule bei Blockaufstellung

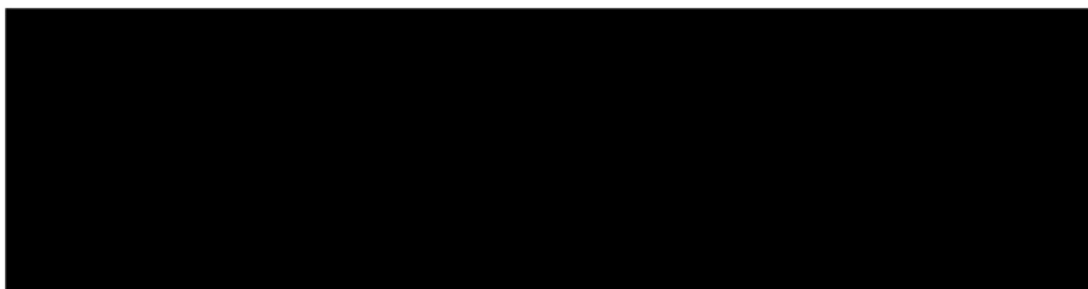


Tabelle 4-2: Flächenbedarf für Ladeinfrastruktur (Depotladung)

³ Basierend auf der VDV 822 – Richtlinie für den Bau von Omnibus-Betriebshöfen. Reine Abstellfläche inkl. Abständen zu weiteren Bussen, ohne Berücksichtigung von Fahrstraßen, Schleppkurven, etc. Faktor 1,3 für Gelenkbusse.

Die auf dem Betriebshof Gummersbach verfügbare Fläche geht aus Abbildung 4-5 hervor.

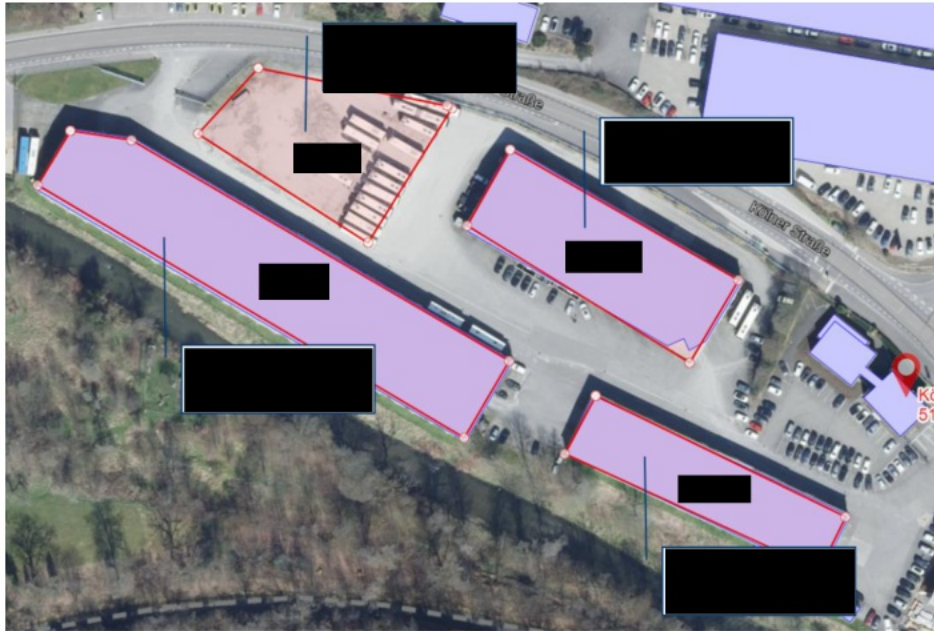
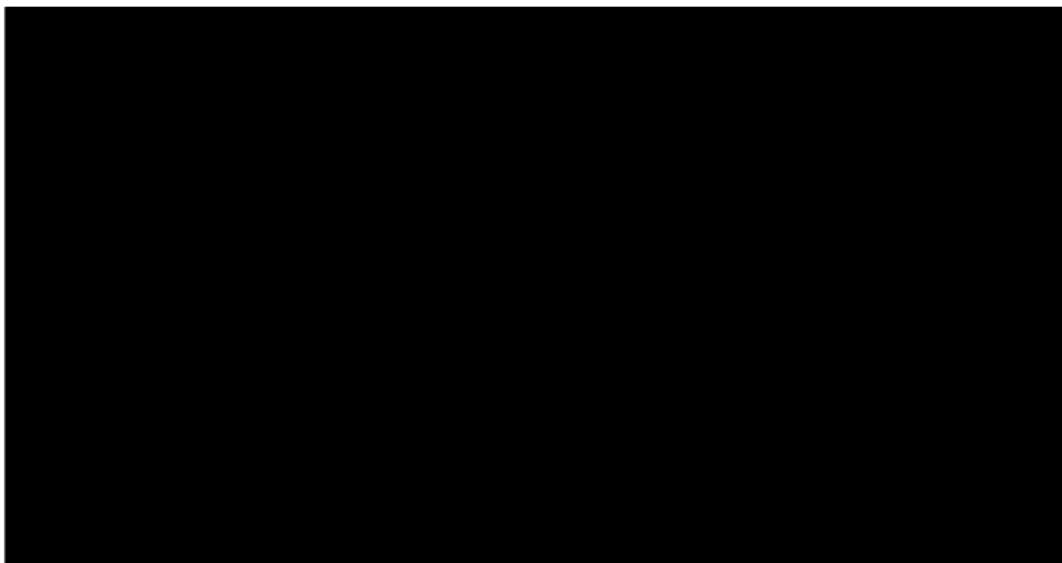


Abbildung 4-5: Übersicht Flächenverfügbarkeit auf dem Betriebshof Gummersbach; Quelle: TIM-online



4.4 Technische Randbedingungen für eine Umstellung auf Brennstoffzellentechnik

Analyse der Umlauflängen

Im Folgenden wird der Umlaufplan hinsichtlich einer Umstellung auf Brennstoffzellentechnik analysiert.

Eine Übersicht über die heutigen Umlauflängen mit Bezug auf die Umstellung der Busflotte auf Brennstoffzellentechnik ist in Abbildung 4-6 dargestellt.

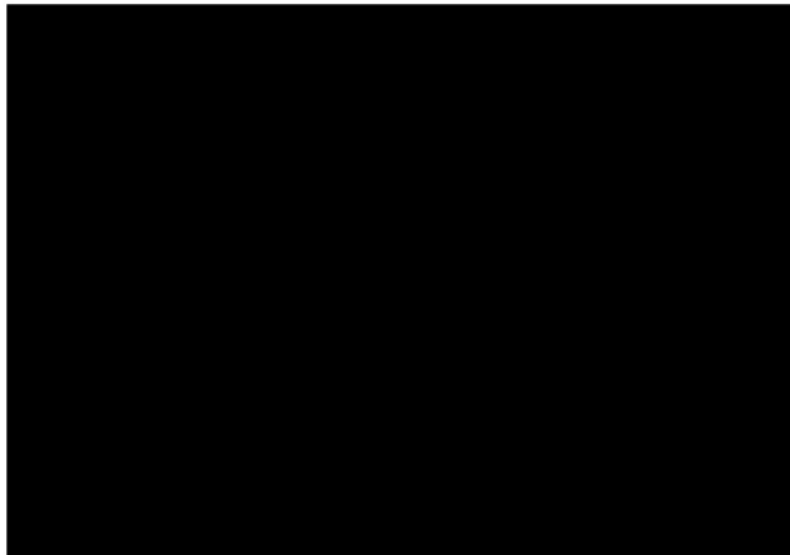


Abbildung 4-6: Umlauflängen in [km/Tag], Umstellung auf Brennstoffzellentechnik

Brennstoffzellen-Busse können das ganze Jahr über eine Reichweite von bis zu 400 km erreichen.

Analyse des Energiebedarfs

Für die Umstellung des Betriebs auf BZ-Busse ist die Errichtung einer Wasserstofftankstelle erforderlich. Wesentliche Stromverbraucher an der Tankstelle

stellen die Kompressoren sowie die Kühleinheiten dar. Entsprechend ist der Strombedarf daher abhängig von der Dimensionierung und erforderlichen Leistung der Tankstelle.

Tabelle 4-3 stellt den Wasserstoffbedarf der OVAG bei einer Flottenumstellung auf 100 % BZ-Busse sowie die benötigte Anschlussleistung der Infrastruktur dar. Der Betrachtung ist eine Versorgung der Tankstelle über ein Wechseltrailer-Konzept zugrunde gelegt.

Tabelle 4-3: Täglicher Wasserstoffbedarf und Netzanschlussleistung Wasserstofftankstelle

The content of the table is redacted with a solid black box.

Bei einer Umstellung der Flotten auf Brennstoffzellentechnologie ist ein frühzeitiger Austausch mit den Netzbetreibern ebenfalls sinnvoll, um eine Erweiterung der verfügbaren Netzanschlussleistung zu besprechen.

Analyse des Flächenbedarfs

In unmittelbarer Nähe des Standorts Gummersbach gibt es derzeit keine H₂-Tankstelle, die eine Versorgung der gesamten Flotte gewährleisten kann. Deshalb ist es für die Umstellung der Busflotte auf 100 % BZ-Busse erforderlich, eine betriebseigene Wasserstofftankstelle zu errichten.


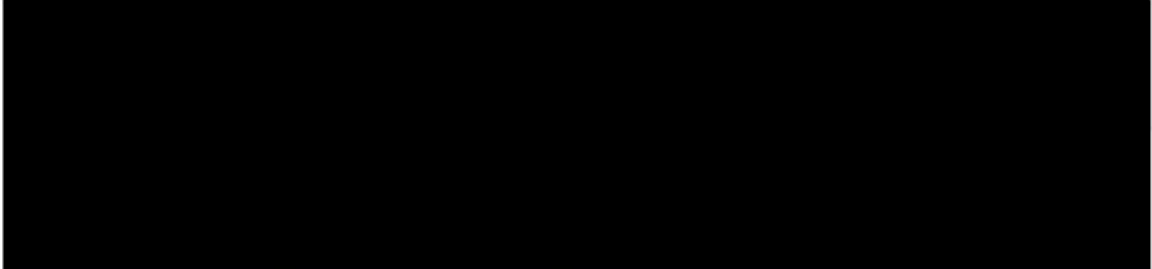
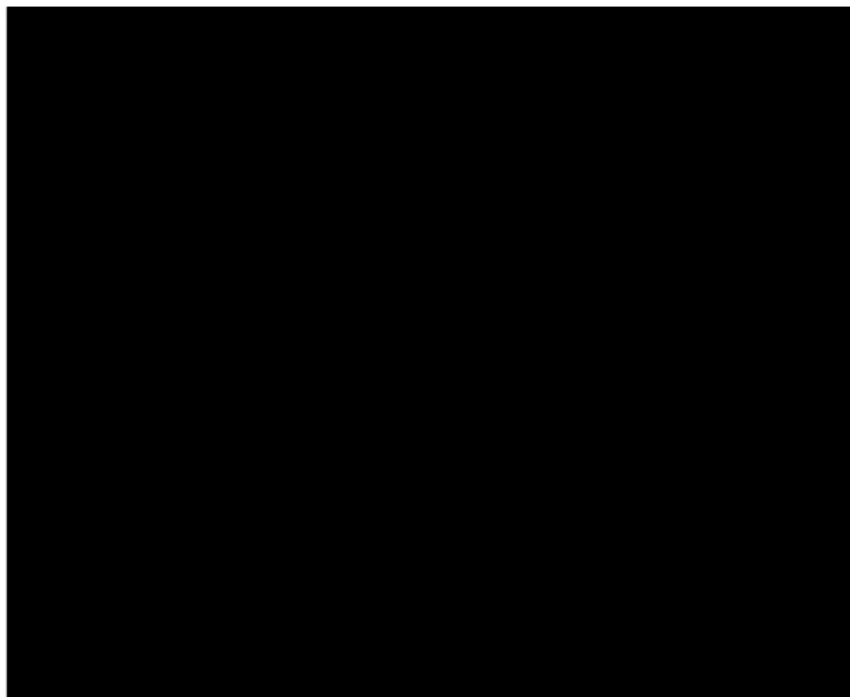
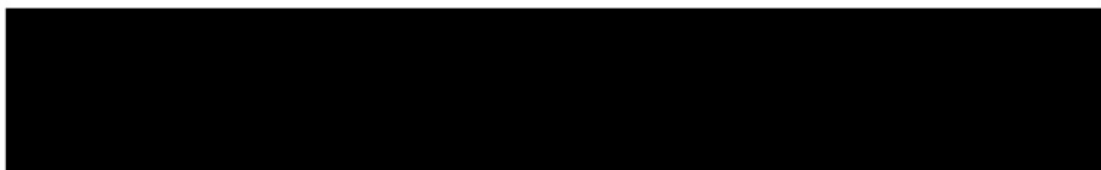
Der Flächenbedarf hierfür wird im Folgenden analysiert. Dieser hängt maßgeblich von den Anforderungen an die Tankstelle und dem Layout ab. Unter Berücksichtigung aller erforderlichen Sicherheits- und Schutzabstände, exklusive Rangier- und Trailerabstellflächen, ergibt sich ein Bedarf von knapp  (siehe Tabelle 4-4).

Tabelle 4-4: Eignung der Standorte – Flächenbedarfe (Zusammenfassung Brennstoffzelle)



Die Angabe beschreibt den Worst Case und somit den maximal benötigten Flächenbedarf. Eine mögliche Aufstellungsplanung der H₂-Tankstelle auf dem Betriebshof Gummersbach ist in Abbildung 4-7 dargestellt.

Abbildung 4-7: beispielhafte Aufstellungsplanung einer H₂-Tankstelle für den Betriebshof Gummersbach

5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Im Folgenden wird eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die Szenarien Umstellung auf 100 % Depotladung bzw. 100 % Brennstoffzellenbusse durchgeführt (inkl. entsprechender Mehrfahrzeugbedarfe). Die Berechnung berücksichtigt sowohl die Investitions- als auch die prognostizierten Betriebskosten und bildet damit die Total-Cost-of-Ownership (TCO) ab. Getroffene Annahmen ergeben sich aus Referenzwerten seitens EMCEL und der OVAG.

5.1 Annahmen

Im Folgenden sind die Annahmen aufgeführt, die der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die Umstellung auf 100 % Depotladung bzw. 100 % Brennstoffzelle zugrunde liegen. Tabelle 5-1 stellt eine Übersicht dar.

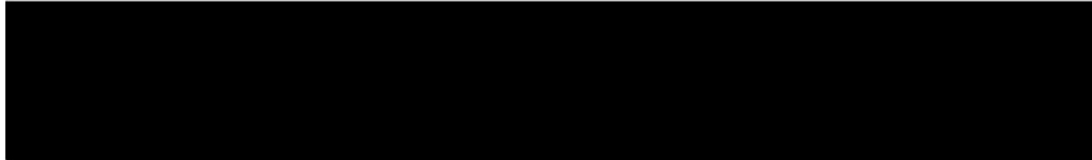
Die Preise bzw. Annahmen sind derzeit am Markt üblich und basieren auf Erfahrungen vergleichbarer Projekte. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass den angegebenen Preisen keine spezifischen Angebote mit einem detaillierten Lastenheft zugrunde liegen.

Die Beschaffungspreise der E-Busse entsprechen den Kosteneinschätzungen der NOW GmbH⁴. Die Kosten für den Energieverbrauch des Betriebs der Busse sowie die Kraftstoffpreise für Wasserstoff und Diesel sind Mittelwerte, die über einen Zeitraum von 20 Jahren prognostiziert wurden.

Die beiden betrachteten Szenarien möglicher Förderquoten sind an die Förderbedingungen der NRW-Förderung bzw. an fiktive typische Förderbedingungen angelehnt und gestalten sich wie folgt:

⁴ Preisobergrenzen im Rahmen des Förderauftrages (06/2023) für die Förderung von Bussen mit klimafreundlichen, alternativen Antrieben im Personenverkehr.

Fördermodell 1



Fördermodell 2

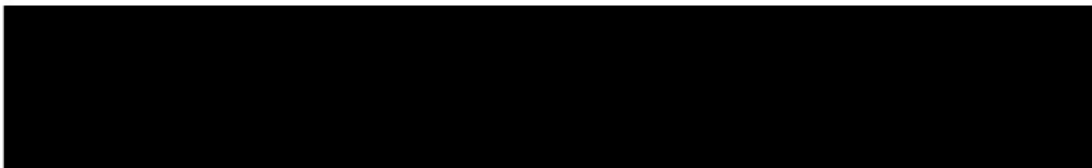


Tabelle 5-1: Annahmen Wirtschaftlichkeitsberechnung (Netto-Preise)

Parameter	100 % Umstellung		
	Brennstoffzelle	Depotladung ⁵	Diesel
Fahrzeug			
Aktuelle ø-Tagesfahrleistung; Betriebstage			
Fahrzeugpreis Solobus 12m			
Fahrzeugpreis Gelenkbus 18m			
Wartungskosten ⁶			
Infrastruktur			
Ladeinfrastruktur			
Wasserstoffinfrastruktur			
Kosten sonstige Infrastruktur (Netzanschluss)			



Energiekosten

Energiekosten	
Jährlicher Erlös aus THG-Quoten-Handel	

Personalkosten

Anzahl Fahrer pro Bus	
-----------------------	--

Lebens- und Abschreibungsdauer

Laufzeit der Fahrzeuge	
Nutzungsdauer der Ladeinfrastruktur	
Nutzungsdauer der Betankungsinfrastruktur	
Nutzungsdauer sonstiger Infrastrukturen (Trafo)	

5.2 Ergebnisse

Abbildung 5-1 stellt die jährlichen Mehrkosten in Prozent [%] für die Umstellung auf emissionsfreie Antriebe im Vergleich zur Referenztechnologie Diesel dar.

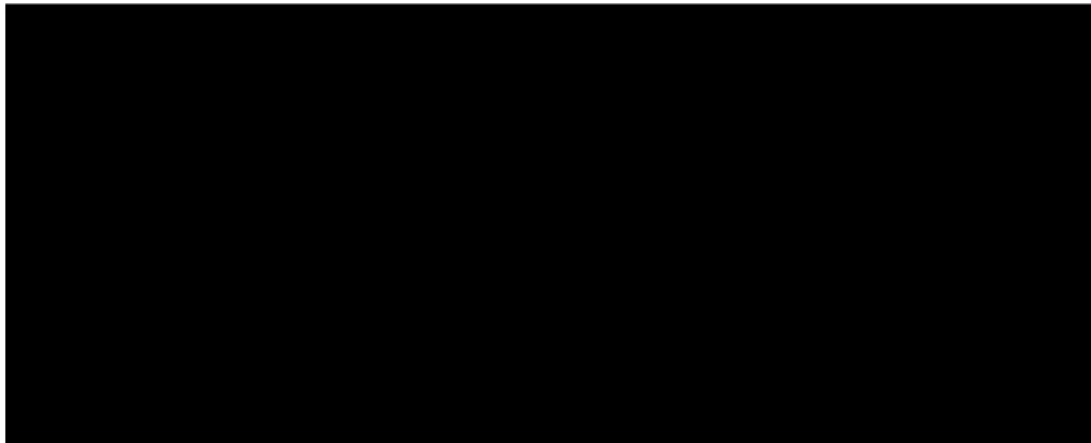


Abbildung 5-1: Jährliche prozentuale Mehrkosten zur Referenztechnologie Diesel

Abbildung 5-2 bildet die Ergebnisse der TCO-Berechnung in absoluten Beträgen [€], unterteilt nach Investitions- und Betriebskosten, ab.

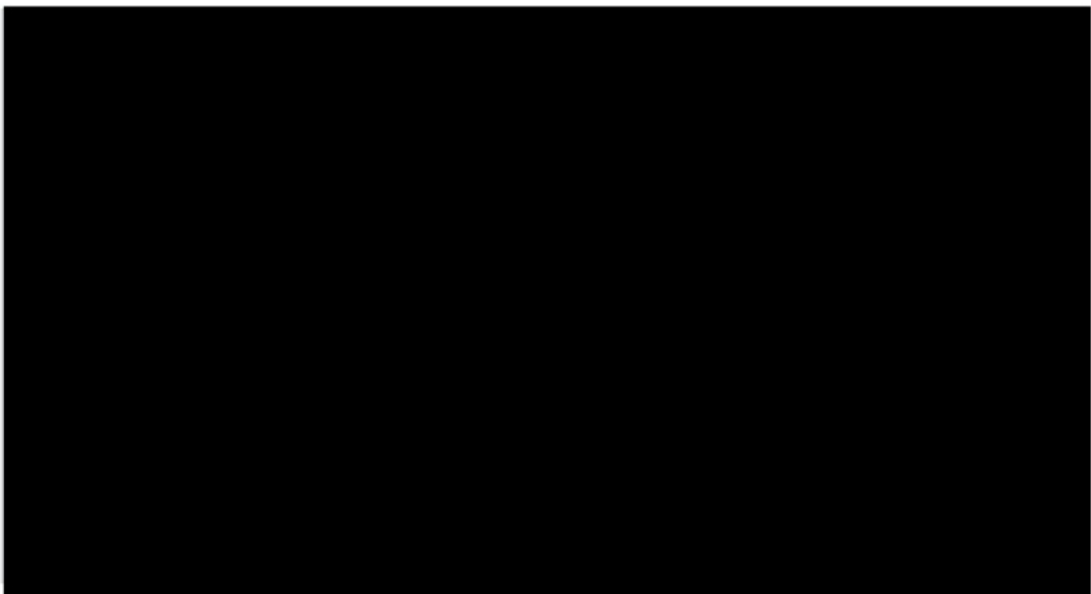


Abbildung 5-2: Jährliche absolute Mehrkosten zur Referenztechnologie Diesel

6 Bewertung der technischen und wirtschaftlichen Analyse

Insgesamt zeigt die technische und wirtschaftliche Analyse, dass sich sowohl die Depotladung als auch die Brennstoffzellentechnologie für eine langfristige Umstellung der Busflotte eignen. Die wichtigsten Erkenntnisse der Studie sind in folgender Bewertungsmatrix (Tabelle 6-1) gegenübergestellt.

Tabelle 6-1: Bewertungsmatrix

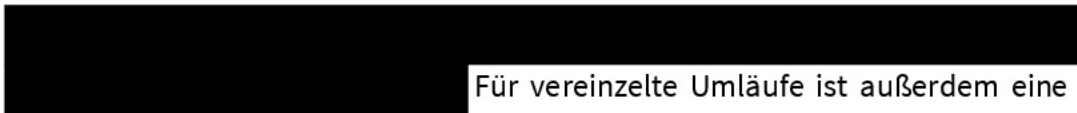
	Brennstoffzelle	Depotladung	Diesel (Referenz)
Aufwand Betriebsumstellung	Eins-zu-Eins-Umstellung	Zusatzbusse, Zusatzfahrer*innen, Umlauftrennung	Referenz
Aufwand Infrastruktur	Bedarf H ₂ -Tankstelle Anschlussleistung im Depot, Mehrflächenbedarf	Bedarf Ladeinfrastruktur (ca. 90 kW/Ladepunkt) Anschlussleistung im Depot, Mehrflächenbedarf	Referenz
Emissionen	Keine lokalen Emissionen	Keine lokalen Emissionen	NO _x - und Feinstaubemissionen
Kosten ⁸			Referenz



⁸ Abhängig vom Fördermodell



BZ-Busse können bereits heute alle Tagesleistungen ohne zusätzlichen Fahrzeugbedarf bedienen. Allerdings ist der Einstieg im Vergleich zur Batterietechnologie mit Depotbeladung mit erhöhtem Infrastrukturaufwand verbunden. Außerdem besteht ein Bedarf an kostengünstigem grünem Wasserstoff.



Für vereinzelte Umläufe ist außerdem eine Umlaufneuplanung zur Ermöglichung von Zwischenladungen in Pausen- und Standzeiten sinnvoll. Zukünftig zu erwartende Entwicklungen in den Batteriekapazitäten können gegebenenfalls mittel- bis langfristig eine Umstellung ohne wesentliche Anpassungen im Betrieb ermöglichen.

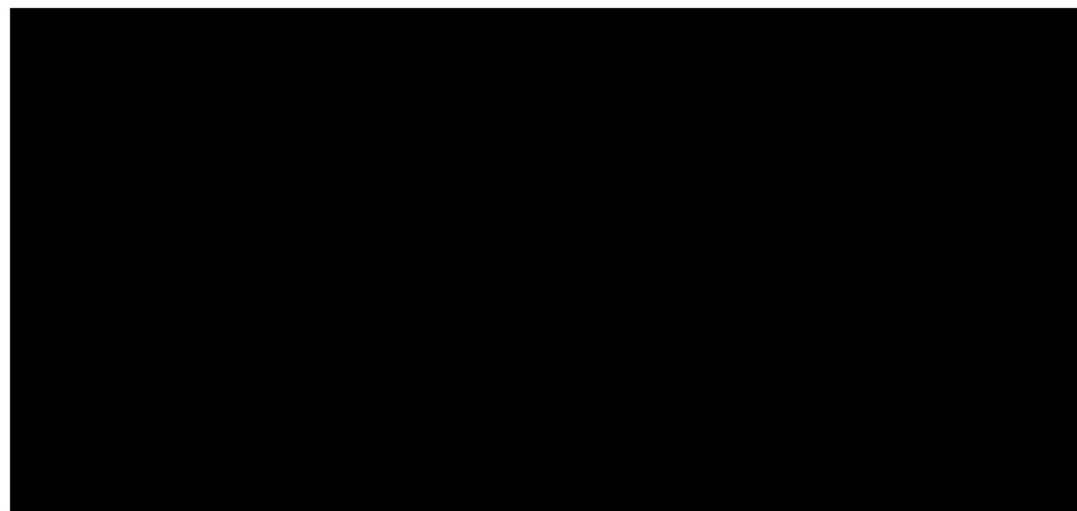
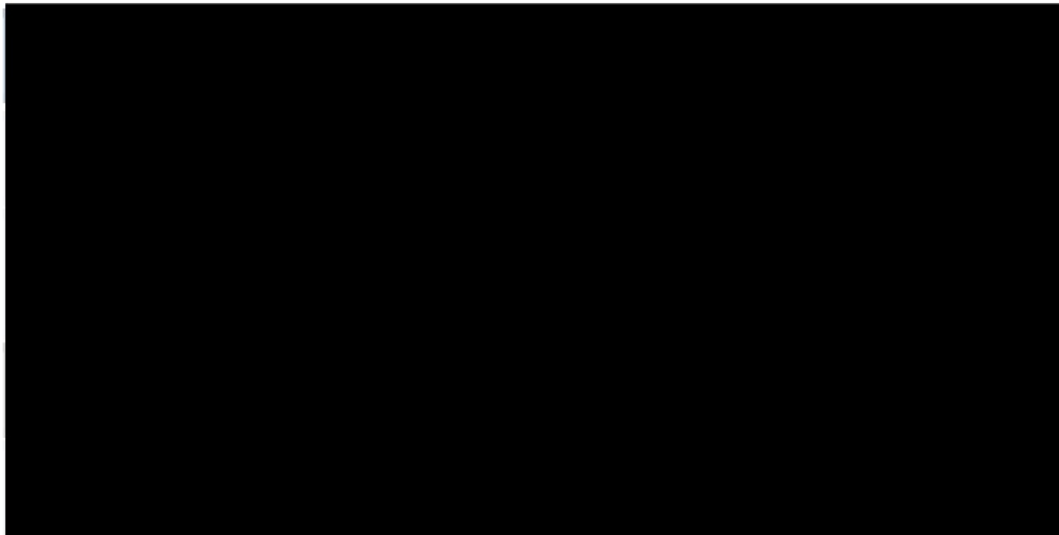
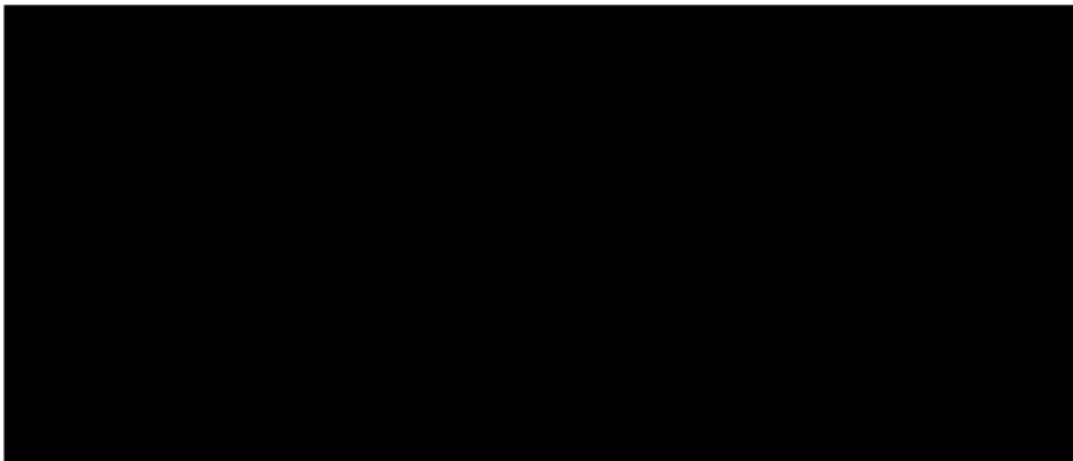


Tabelle 6-2: Zusammenfassung Infrastrukturbedarf



Sowohl eine Umstellung auf Depotladung als auch auf Brennstoffzellentechnik vermeidet lokale Emissionen. Durch die Nutzung von erneuerbarem Strom bzw. grünem Wasserstoff reduzieren sich die Emissionen nicht nur lokal, sondern auch global.



7 Erarbeitung eines potenziellen Umstellungsszenarios

Neben der Möglichkeit, die Busflotte zu 100 % auf eine Antriebstechnologie umzustellen, ist auch denkbar, ein Mischflottenkonzept zu realisieren. Aufgrund der oben dargestellten Erkenntnisse ist für die Busflotte der OVAG die Einführung einer Mischflotte aus Depotladung und Brennstoffzellenbussen denkbar.

Solche Konzepte können ideale Einsatzbedingungen für beide Antriebstechnologien ermöglichen. Auf kürzeren Strecken eignen sich Busse mit Depotladung. Auf längeren Strecken mit einer Länge von mehr als 250 km bieten sich hingegen BZ-Busse an. Mit Hilfe dieses optimierten Einsatzes lässt sich die Anzahl der Zusatzbusse minimieren. Des Weiteren kann durch die Einführung von zwei Antriebstechnologien eine Redundanz in der Flotte geschaffen werden. Die Abhängigkeit von einem Energieträger wird reduziert und dadurch die Ausfallsicherheit im Betrieb erhöht. Mit der Umsetzung eines Mischflottenkonzepts ist außerdem eine Reduktion der benötigten Netzanschlussleistung im Vergleich zu einer Umstellung auf 100 % Depotladung möglich.

Die Einführung von zwei Antriebstechnologien bringt jedoch einen erhöhten Aufwand im Vergleich zur Einführung einer einzigen Technologie mit sich, beispielsweise in Hinblick auf Personalschulung, Werkstattausrüstung und Infrastruktur.

Im Folgenden werden zwei Strategien zur Umsetzung einer Mischflotte betrachtet.

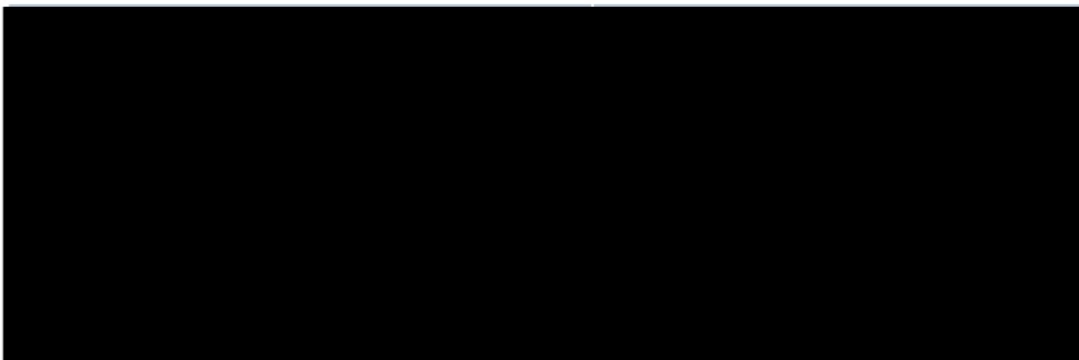
7.1 Mischflottenkonzept

Die Ergebnisse der technischen und wirtschaftlichen Analyse hinsichtlich der Einführung einer Mischflotte werden im Folgenden aufgezeigt. Die zugrunde liegenden wirtschaftlichen Annahmen entsprechen denen aus Kapitel 5, ausgenommen der Kosten für die Ladeinfrastruktur und Wasserstofftankstelle, die sich abhängig von den jeweiligen Flottengrößen und Fahrleistungen ergeben.

Strategie 1: ca. 90 % DL, ca. 10 % BZ

Die erste Strategie beschreibt eine Umstellung der Busflotte auf ca. 90 % Depotladung und ca. 10 % BZ-Busse. Eine wirtschaftlich-technische Einstiegsgröße für BZ-Busse liegt typischerweise bei ca. 10 Fahrzeugen (bedingt durch hohen Investitionskosten für die H₂-Tankstelle, welche bereits ab dem ersten Fahrzeug erforderlich werden). Der Einsatz von Bussen mit Depotladung erfolgt auf kurzen Umläufen (< 250 km), wodurch sich die benötigten Batteriekapazitäten und die Anforderungen an die Ladeinfrastruktur reduzieren lassen. Die BZ-Busse werden auf den Spitzenumlaufängen eingesetzt. Die benötigte Anzahl an Zusatzbussen wird hierdurch reduziert. Tabelle 7-1 gibt eine Übersicht über den erforderlichen Infrastrukturbedarf des Mischflottenkonzepts.

Tabelle 7-1: Infrastrukturbedarf Mischflottenkonzept Strategie 1



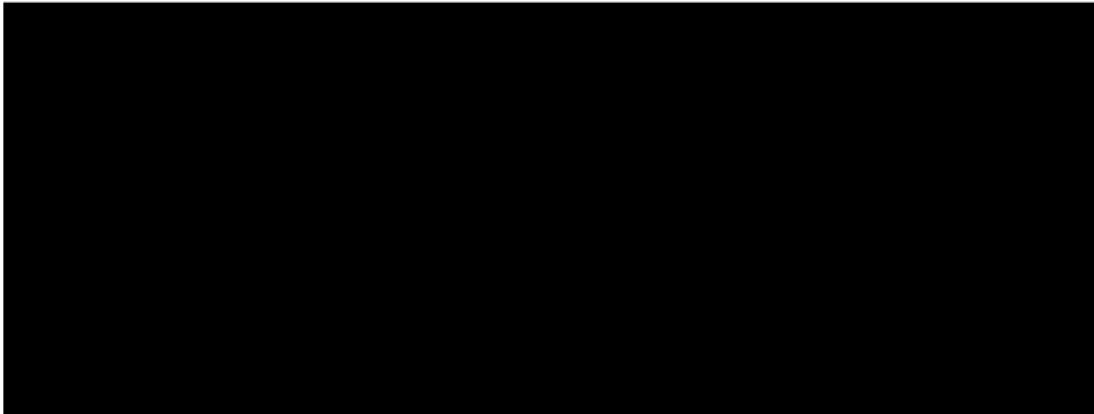


Abbildung 7-1 stellt die jährlichen Mehrkosten in Prozent [%] für die Umstellung auf emissionsfreie Antriebe im Vergleich zur Referenztechnologie Diesel dar.

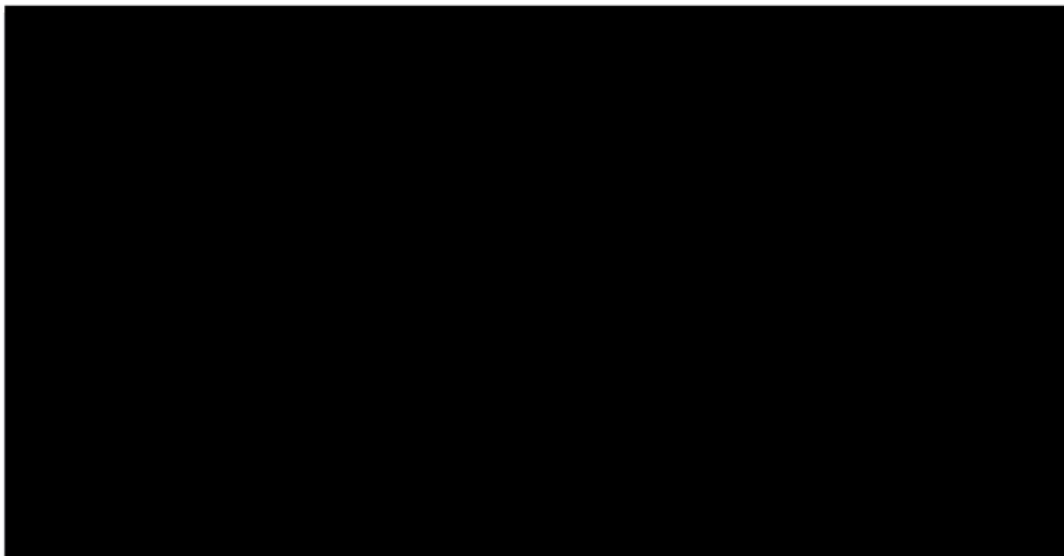
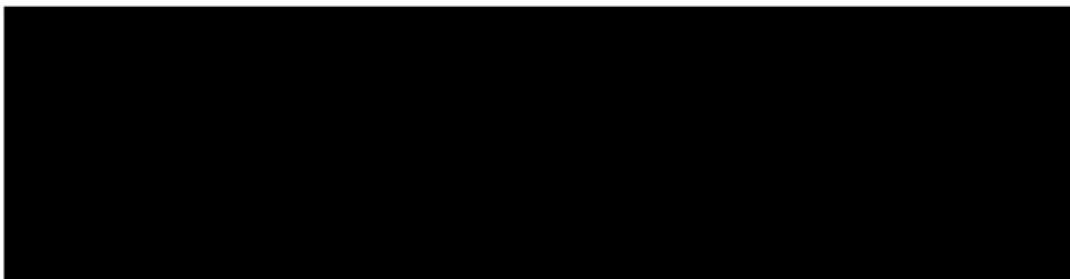


Abbildung 7-1: Prozentuale jährliche Mehrkosten Strategie 1 im Vergleich zur Referenztechnologie Diesel



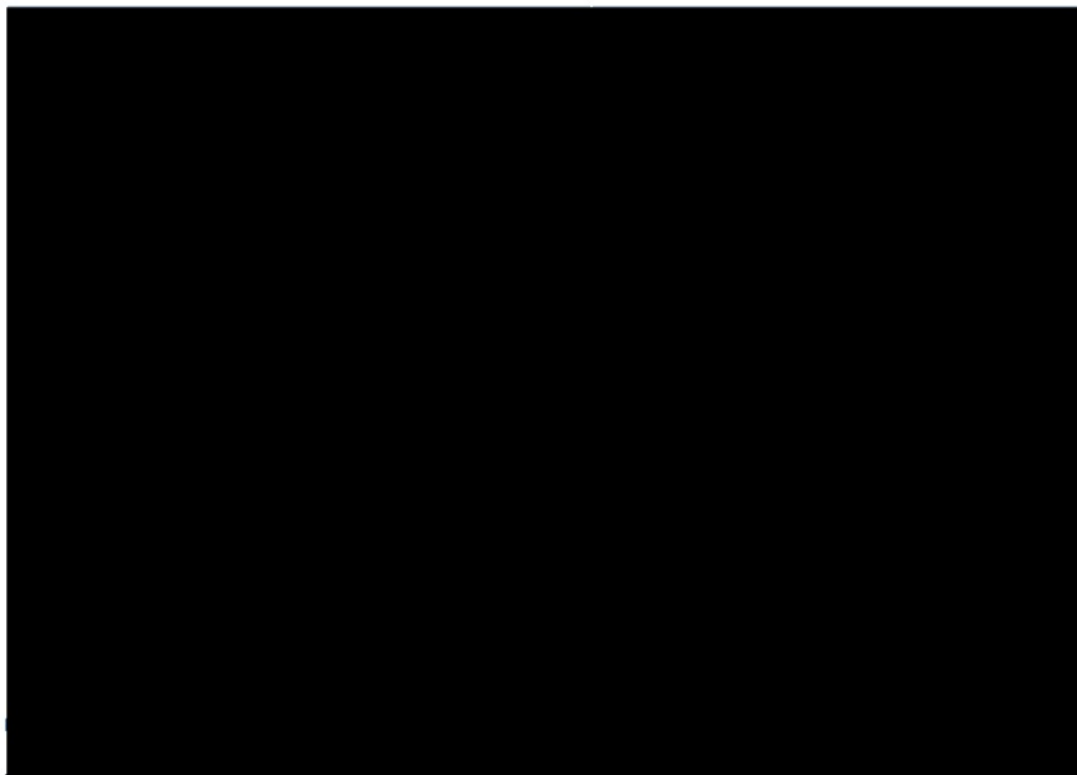
⁹ "Worst Case"-Layout, ohne Maßnahmen zur Flächenreduzierung wie bspw. Brandschutzwände zur Reduzierung von Schutz- und Sicherheitsabständen, etc. Das Flächenlayout einer H2-Tankstelle ist individuell anpassbar.

Strategie 2: ca. 90 % BZ, ca. 10 % DL

Die zweite Strategie betrachtet eine Umstellung der Busflotte auf ca. 90 % Brennstoffzellen und ca. 10 % Depotladung. Dabei erfolgt der Einsatz der Depotlader auf den kürzesten Umläufen, wodurch die benötigte Batteriekapazität reduziert werden kann. Der Einsatz der BZ-Busse erfolgt auf den verbleibenden Umläufen. Hierdurch kann die Anschaffung von Zusatzbussen vermieden werden, da die BZ-Busse über die benötigte Reichweite verfügen, um auch die Spitzenumläufe zu bedienen.

Der Infrastrukturbedarf für die zweite Mischflotten-Strategie ist in Tabelle 7-2 dargestellt.

Tabelle 7-2: Infrastrukturbedarf Mischflottenkonzept Strategie 2



¹⁰ "Worst Case"-Layout, ohne Maßnahmen zur Flächenreduzierung wie bspw. Brandschutzwände zur Reduzierung von Schutz- und Sicherheitsabständen, etc. Das Flächenlayout einer H2-Tankstelle ist individuell anpassbar.

Abbildung 7-2 stellt die jährlichen Mehrkosten in Prozent [%] für die Umstellung auf das Mischflottenkonzept im Vergleich zur Dieselsechnik dar.

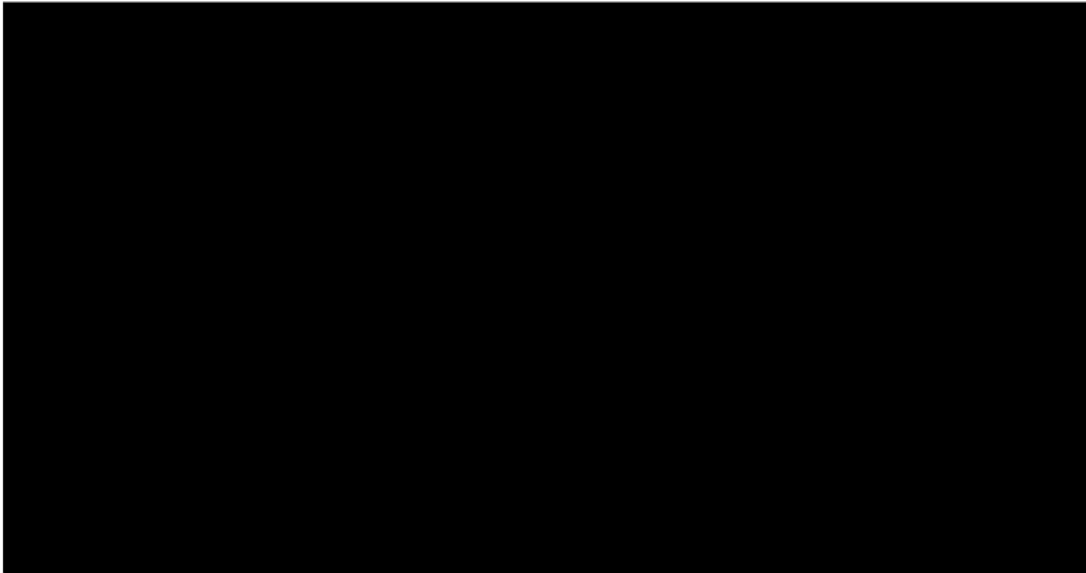
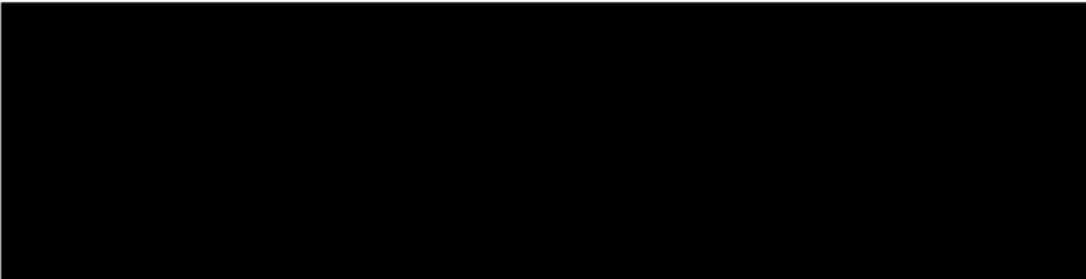


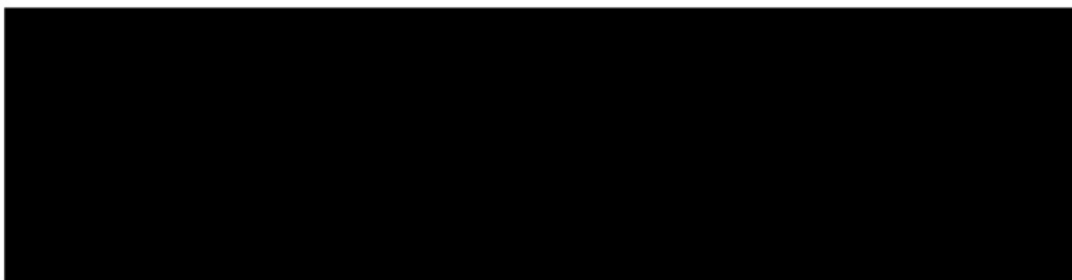
Abbildung 7-2: Prozentuale jährliche Mehrkosten Strategie 2 im Vergleich zur Referenztechnologie Diesel



8 Zusammenfassung und Handlungsempfehlung

Aus betrieblicher Sicht eignen sich für die Elektrifizierung des Standortes Gummersbach sowohl die Depotladung als auch die Brennstoffzellen-Technologie. Eine vollständige Umstellung auf die Depotladung erfordert durch die aktuelle Umlaufplanung und den entsprechenden Umlauflängen einen moderaten Flottenzuwachs von ca. [REDACTED]. Die gezielte Zwischenladung entlang der Strecke, beispielsweise am Gummersbacher Hauptbahnhof, ermöglicht eine Reduktion der Anzahl an Zusatzfahrzeugen. Brennstoffzellen-Busse können heutige Umläufe nahezu vollständig ersetzen. Lediglich ein Umlauf erfordert voraussichtlich eine Zwischenbetankung am Tag oder eine Trennung.

Des Weiteren besteht die Möglichkeit, beide Technologien in einem Mischflottenkonzept zu integrieren, um beispielsweise die Einsatzplanung, die Anzahl an Zusatzfahrzeugen oder die Batteriekapazitäten der Busse zu optimieren.



Die wesentliche Herausforderung des Standortes besteht in der verfügbaren Netzanschlusskapazität. Derzeit stehen maximal 1 MVA Anschlussleistung zur Verfügung. Diese ist langfristig sowohl für den erforderlichen Energiebedarf der Depotlader als auch für den Energiebedarf der H₂-Infrastruktur nicht ausreichend. Auch durch die Einführung eines Mischflottenszenarios lässt sich der Netzanschlussleistungsbedarf nicht ausreichend reduzieren.

Schritte bis zum ersten E-Bus

Vor diesem Hintergrund ergeben sich die folgenden Planungsschritte, die bis zur Einführung der ersten E-Busse am Standort Gummersbach zu empfehlen sind:

1. Abstimmung mit dem Netzbetreiber

Die Abstimmung mit dem lokalen Netzbetreiber ist zeitnah zu intensivieren, sodass folgende Fragen geklärt werden:

- › Wie viel Anschlussleistung ist heute noch ungenutzt und steht zur Verfügung?
- › Wie viel Anschlussleistung kann erweitert werden? Bis wann und ggf. in welchen Stufen kann eine Erweiterung erfolgen?
- › Welche Kosten bringt eine solche Erweiterung mit sich

2. Ausgleichsmöglichkeiten an weiteren Betriebshöfen

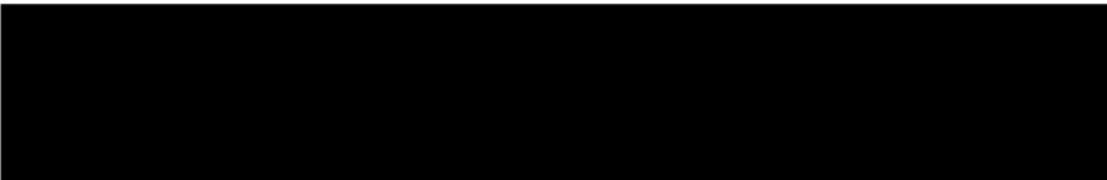
Sofern sich im Rahmen der Abstimmung mit dem Netzbetreiber keine Erweiterung der Netzanschlussleistung realisieren lässt, ist zu prüfen, in welchem Umfang weitere Betriebshöfe der OVAG über Flächen- und Netzanschlusskapazitäten verfügen. Dadurch kann mittel- bis langfristig eine Verlagerung von Fahrzeugen erfolgen, wodurch die erforderlichen Kapazitäten in Gummersbach reduziert werden. Bei der Prüfung sind betriebliche Abläufe und Leerfahrten zu berücksichtigen.

3. Ausgleichsmöglichkeiten durch neue Flächen

Ist eine Nutzung der anderen Betriebshöfe nicht möglich, so ist die Akquisition von neuen Flächen zu prüfen. Diese Flächen können beispielsweise als Abstellflächen für die Depotlader einschließlich der Ladeinfrastruktur oder für die Errichtung einer H2-Tankstelle genutzt werden. Dadurch lässt sich die Netzanschlusskapazität am Betriebshof Gummersbach entlasten.

Auf Basis der Ergebnisse der oben genannten Planungsschritte ist eine Neubewertung der Technologieentscheidung und langfristigen Ausrichtung des Standortes erforderlich. Sofern eine kurzfristige Beschaffung von E-Bussen noch vor endgültiger Klärung der vorangegangenen Aspekte geplant ist, bietet sich die Einführung von Depotladern an. Das Einsatzgebiet weist überwiegend optimale Bedingungen für die Depotladung auf, während die Einstiegshürde vergleichsweise gering ist. Des Weiteren kann die OVAG erste Erfahrungen mit dem Einsatz rein batterieelektrischer Fahrzeuge sammeln und diese beispielsweise mit den Einsatzerfahrungen der Brennstoffzellen-Busse am Standort Wipperfürth vergleichen. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich die Netzanschlusskapazität entsprechend weiter reduziert, sobald die ersten Depotlader eingeführt werden.

Sollte sich keine Möglichkeit zur Reduzierung der erforderlichen Netzanschlussleistung durch die Auslagerung von Fahrzeugen und/oder Infrastrukturen bzw. zur Erhöhung der vorhandenen Netzanschlusskapazität ergeben, ist der Standort Gummersbach nach aktuellem Stand voraussichtlich nicht vollständig zu elektrifizieren.



A. Anhang

A.1. Anmerkungen

In diesem Bericht wird mit den Begriffen „emissionsfrei“ und „Nullemission“ das Fehlen der Emission von Luftschadstoffen beim Betrieb von E-Bussen bezeichnet. Die Begriffe beziehen sich dementsprechend nur auf den Betrieb des elektrischen Antriebsstrangs des Fahrzeugs (Tank-to-Wheel). Folglich werden keine Emissionen erfasst, die durch den Betrieb (Brems- und Reifenabrieb, Geräuschemissionen etc.) und die Produktion der Busse entstehen. In diesem Sinne sind Elektrobusse lokal emissionsfrei, da kein Abgas und somit auch keine Luftschadstoffe ausgestoßen werden.

Alle Preise sind als Richtpreise zu verstehen. Die Preise sind derzeit am Markt üblich. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass den angegebenen Preisen keine spezifischen Angebote mit einem detaillierten Lastenheft zugrunde liegen. (Stand März 2024)

A.2. Übersicht Depotlader

12 m Solobusse

Hersteller	Batteriekapazität [kWh]	Fahrgastkapazität
BYD	bis zu 500	bis ca. 92
Caetano	bis zu 422	bis ca. 88
Daimler Buses	bis zu 588	bis ca. 88
Ebusco	bis zu 525	bis ca. 90
Hess AG	bis zu 610	bis ca. 103
IKARUS	bis zu 314	bis ca. 86
Irizar	bis zu 510	bis ca. 105
IVECO	bis zu 485	bis ca. 90
Karsan	bis zu 449	bis ca. 89
MAN	bis zu 480	bis ca. 88
Otokar	bis zu 350	bis ca. 108
Quantron AG	bis zu 422	bis ca. 95
Scania	bis zu 520	bis ca. 100
Skoda	bis zu 594	-
Solaris	bis zu 528	bis ca. 70
Van Hool	bis zu 588	-
VDL	bis zu 490	bis ca. 110
Volvo	bis zu 470	bis ca. 95
Wrightbus	bis zu 567	bis ca. 88

18 m Gelenkbusse

Hersteller	Batteriekapazität [kWh]	Fahrgastkapazität
BYD	bis zu 563	bis ca. 140
Daimler Buses	bis zu 686	bis ca. 146
Ebusco	bis zu 525	bis ca. 150
Hess AG	bis zu 820	bis ca. 136
Irizar	bis zu 714	bis ca. 145
IVECO	bis zu 624	-
MAN	bis zu 640	bis ca. 120
Otokar	bis zu 560	bis ca. 124
Skoda	bis zu 594	
Solaris	bis zu 800	bis ca. 145
Van Hool	bis zu 686	-
VDL	bis zu 674	bis ca. 153
Volvo	bis zu 565	bis ca. 150

A.3. Übersicht BZ-Busse

12 m Solobusse

Hersteller	Tankkapazität [kg]	Fahrgastkapazität
Arthur Bus	37,5	bis ca. 78
Caetano	37,5	bis ca. 87
Daimler Buses	25	bis ca. 88
IVECO	31,2	-
Karsan	-	bis ca. 95
Otokar	38	bis ca. 82
Safra	35	-
Skoda	39	bis ca. 85
Solaris	37,5	bis ca. 78
Van Hool	38,5	bis ca. 82
Wrightbus	32 / 40 / 50	bis ca. 88

18 m Gelenkbusse

Hersteller	Tankkapazität [kg]	Fahrgastkapazität
Arthur Bus	-	-
Caetano	40	
Daimler Buses	35	bis ca. 128
Solaris	51,2	bis ca. 140
Van Hool	50	-

A.4. Übersicht Hersteller Ladeinfrastruktur – Hardware

Hersteller (Auswahl)
ABB
Ekoenergetyka
Heliox
SBRS GmbH
SIEMENS AG

A.5. Abkürzungsverzeichnis

BEV	Rein batterieelektrisches Fahrzeug (engl.: Battery Electric Vehicle)
BZ	Brennstoffzelle
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
E-Bus	Elektrobus
EU	Europäische Union
km	Kilometer
kWh	Kilowattstunde
TCO	Gesamtkostenbetrachtung (engl.: Total Cost of Ownership)

A.6. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Festgelegte Quoten für die Neubeschaffung von ÖPNV-Bussen in Deutschland	10
Abbildung 3-1: Darstellung eines E-Bus-Antriebs	11
Abbildung 3-2: Funktion des Depotladers	12
Abbildung 3-3 Funktion eines Gelegenheitsladers	14
Abbildung 3-4: Funktion des BZ-Busses	15
Abbildung 3-5: Entwicklung der E-Bus-Technologie 2018 bis 2024	17
Abbildung 3-6: Beispielhafte Verbräuche und Reichweiten für einen 12-m-Batteriebus	19
Abbildung 3-7 Vergleich der nutzbaren Abwärme, Verbrennungsmotor vs. E-Antrieb (Beispiel PKW)	20
Abbildung 3-8 Abhängigkeit der Ladeleistung von Batteriegröße und Ladedauer	22
Abbildung 3-9 Lademanagement zur Verteilung ungünstiger Lasten	23
Abbildung 3-10 Top-Down-Pantograf	25
Abbildung 3-11 Bottom-Up-Pantograf	25
Abbildung 3-12 Betankung eines BZ-Busses	27
Abbildung 3-13 H ₂ -Tankstelle mit Wasserstoffanlieferung mittels LKW	28
Abbildung 3-14 H ₂ -Tankstelle mit Wasserstofferzeugung vor Ort	29
Abbildung 3-15: Typische Batteriegrößen bzw. -kapazitäten der E-Bustechnologien	31
Abbildung 3-16: Einstiegshürden der Batterie- und BZ-Bustechnologien	33
Abbildung 4-1: Netzverkehrsplan Standort Gummersbach im Kontext des Gesamtnetzverkehrsplans der OVAG Oberbergische Verkehrsgesellschaft mbH; Quelle: www.ovaginfo.de	34
Abbildung 4-2: Standortübersicht Betriebshof Gummersbach; Quelle: TIM-online	35
Abbildung 4-3: Umlauflängen in [km/Tag], Umstellung auf Depotladung	38

Abbildung 4-4: Aufstellungskonzepte für einen Pantografen und eine Ladesäule bei Blockaufstellung	41
Abbildung 4-5: Übersicht Flächenverfügbarkeit auf dem Betriebshof Gummersbach; Quelle: TIM-online	42
Abbildung 4-6: Umlauflängen in [km/Tag], Umstellung auf Brennstoffzellentechnik	43
Abbildung 4-7: beispielhafte Aufstellungsplanung einer H ₂ -Tankstelle für den Betriebshof Gummersbach	45
Abbildung 5-1: Jährliche prozentuale Mehrkosten zur Referenztechnologie Diesel	49
Abbildung 5-2: Jährliche absolute Mehrkosten zur Referenztechnologie Diesel	49
Abbildung 7-1: Prozentuale jährliche Mehrkosten Strategie 1 im Vergleich zur Referenztechnologie Diesel	55
Abbildung 7-2: Prozentuale jährliche Mehrkosten Strategie 2 im Vergleich zur Referenztechnologie Diesel	57

A.7. Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1 Vor- und Nachteile der Top-Down- und Bottom-Up-Pantografen-Variante	26
Tabelle 3-2 Übersicht der Eigenschaften von Elektrobussen	30
Tabelle 4-1: Erforderliche Netzanschlussleistung	40
Tabelle 4-2: Flächenbedarf für Ladeinfrastruktur (Depotladung)	41
Tabelle 4-3: Täglicher Wasserstoffbedarf und Netzanschlussleistung	
Wasserstofftankstelle	44
Tabelle 4-4: Eignung der Standorte – Flächenbedarfe (Zusammenfassung Brennstoffzelle)	45
Tabelle 5-1: Annahmen Wirtschaftlichkeitsberechnung (Netto-Preise)	47
Tabelle 6-1: Bewertungsmatrix	50
Tabelle 6-2: Zusammenfassung Infrastrukturbedarf	52
Tabelle 7-1: Infrastrukturbedarf Mischflottenkonzept Strategie 1	54
Tabelle 7-2: Infrastrukturbedarf Mischflottenkonzept Strategie 2	56