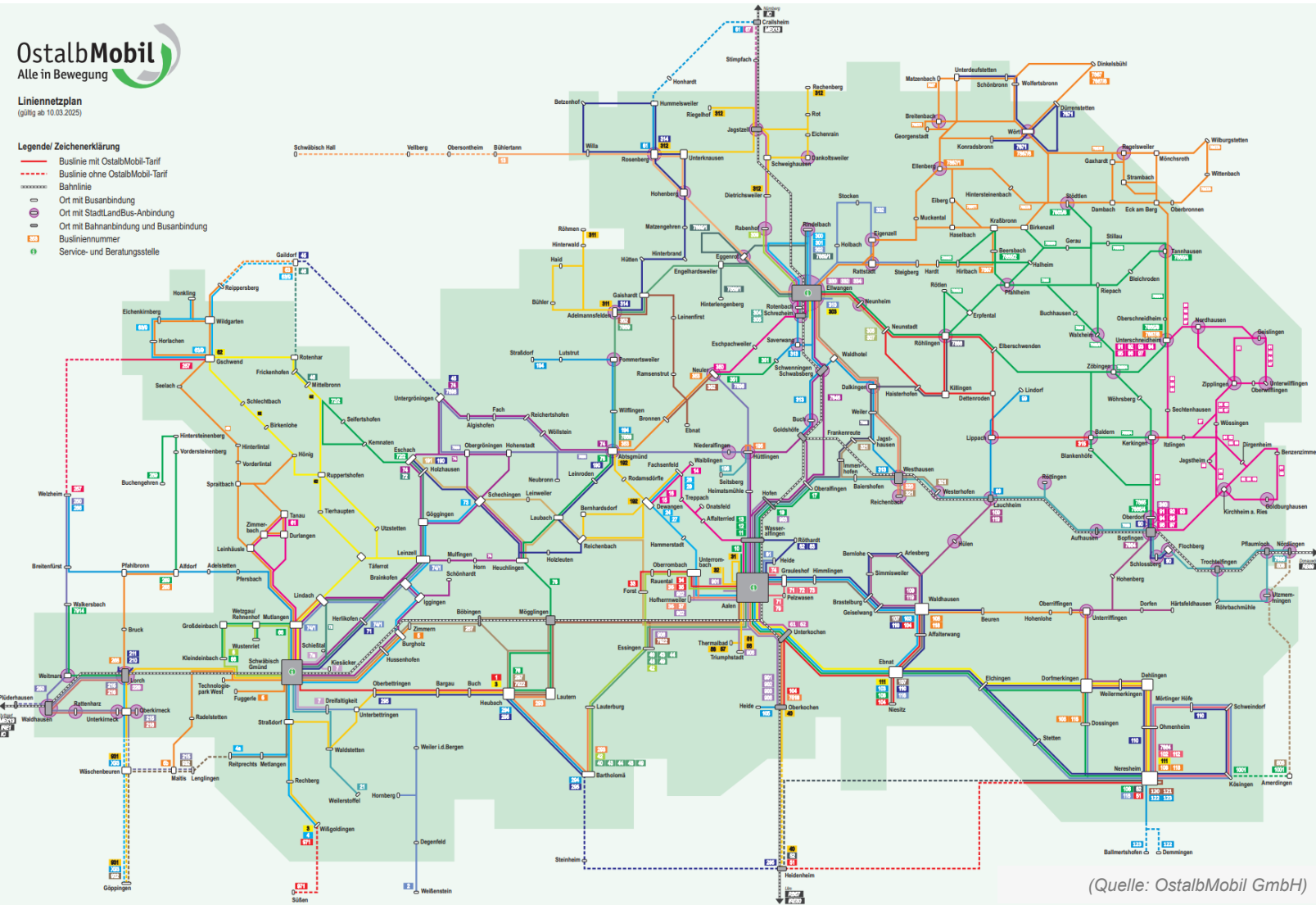




Liniennetzplan
(gültig ab 10.03.2025)

Legende/ Zeichenerklärung

- Buslinie mit OstalbMobil-Tarif
- Buslinie ohne OstalbMobil-Tarif
- Bahnlinie
- Ort mit Busanbindung
- Ort mit StadtLandBus-Anbindung
- Ort mit Bahnbindung und Busanbindung
- Busliniennummer
- + Service- und Beratungsstelle



(Quelle: OstalbMobil GmbH)

Machbarkeitsstudie Elektrifizierung des ÖPNV im Ostalbkreis

Dezember 2025

Abschlussbericht

Machbarkeitsstudie Elektrifizierung des ÖPNV im Ostalbkreis

Studie erstellt im Auftrag von

**Landratsamt Ostalbkreis, Dezernat VII Ordnung, Verkehr
und Veterinärwesen**



OSTALBKREIS

in Zusammenarbeit mit

**Verkehrsunternehmen des Verkehrsverbunds OstalbMobil
GmbH**



gefördert vom

Bundesministerium für Digitales und Verkehr



Kunde: Landratsamt Ostalbkreis

Titel: Machbarkeitsstudie Elektrifizierung des ÖPNV im Ostalbkreis

Version Projektbericht: V1.1

Datum Projektbericht: 31.12.2025

©2025 Sphera. Alle Rechte vorbehalten.

Im Namen der Sphera Solutions GmbH

Erstellung des Dokuments durch:

Dr. Julia Zeulner
Sustainability Consultant

jzeulner@sphera.com
Phone +49 (711) 21760856

Diego Olaya
Sustainability Consultant

dolayapinto@sphasolutions.com
Phone +49 (711) 21760813

Qualitätskontrolle durchgeführt von:

Dr. Michael Faltenbacher
Director Sustainability Consulting, Team Lead Mobility

mfaltenbacher@sphasolutions.com
Phone +49 172 9335794

Unter der Leitung von:

Dr. Michael Faltenbacher
Director Sustainability Consulting, Team Lead Mobility

mfaltenbacher@sphasolutions.com
Phone +49 172 9335794

Dieser Bericht wurde von Sphera Solutions GmbH ("Sphera") mit angemessenen Fachkenntnissen und Sorgfalt im Rahmen der Vertragsbedingungen zwischen Sphera und dem Kunden erstellt. Sphera ist gegenüber dem Kunden oder anderen Personen nicht verantwortlich für Angelegenheiten, die außerhalb des für dieses Projekt vereinbarten Umfangs liegen.

Sphera lehnt jegliche Verantwortung gegenüber Dritten ab, denen dieser Bericht oder ein Teil davon zur Kenntnis gebracht wird. Jeder, der sich auf die Angaben in diesem Bericht stützt, tut dies auf eigenes Risiko. Interpretationen, Analysen oder Aussagen jeglicher Art, die von Dritten auf der Grundlage dieses Berichts gemacht werden, liegen außerhalb der Verantwortung von Sphera.

Wenn Sie Vorschläge, Beschwerden oder sonstiges Feedback haben, kontaktieren Sie uns bitte unter: servicequality@sphera.com.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	9
1. Einführung	10
1.1 Ausgangssituation.....	10
1.2 Ziel der Studie.....	10
1.3 Vorgehensweise	11
2. AP1: Grundlagenermittlung	14
2.1 Marktrecherche zu Technologieentwicklungen sowie zur Entwicklung entsprechender Anschaffungs- und Betriebskosten.....	14
2.1.1 Technologie- und Marktüberblick zu batterieelektrischen Bussen	14
2.1.2 Technologie- und Marktüberblick wasserstoffbetriebene Busse	17
2.1.3 Entwicklung von Anschaffungs- und Betriebskosten	20
2.1.4 Angebotsentwicklung beispielhafter Hersteller	22
2.2 Entwicklung der Strom- und Wasserstoffpreise	23
2.3 Rechtliche Rahmenbedingungen	25
2.3.1 Pflichten des SaubFahrzeugBeschG für Verkehrsunternehmen im Ostalbkreis	26
2.3.2 Betrieb von Hochvolt- und Wasserstoffbussen im ÖPNV	27
2.4 Finanzierungs- und Fördermöglichkeiten	28
2.5 Best-Practice-Grundlagen für einen erfolgreichen Transformationsprozess	30
3. AP2: Technische Machbarkeit auf Umlaufebene	33
3.1 Bestandsaufnahme aktueller Betrieb.....	33
3.2 Mittlerer Fahrenergiebedarf.....	35
3.3 Energiespeicherkapazität batterieelektrische und wasserstoffbetriebene Busse	37
3.4 Ermittlung umstellbarer Umläufe	38
3.5 Technische Machbarkeit je Umlauf bzw. Gefäß	41
4. AP3: Bedarfsanalyse und Mehrkostenbetrachtung.....	43
4.1 Ermittlung der Anschlussleistung je Betriebshof sowie Möglichkeiten zur Lastgangoptimierung.....	43
4.2 Flächenbedarf von Ladeinfrastruktur sowie Umrüstungspotenzial vorhandener Betriebshöfe.....	44
4.3 Alternative Betriebskonzepte für Ladeinfrastruktur	46
4.4 Synergien und Potenziale für lokalen Wasserstoffbezug	50
4.5 Abschätzung des THG-Reduktionspotenzials	52

4.6	Abschätzung Mehrkosten durch Umstellung auf ZEV.....	55
4.7	Varianzanalyse	61
5.	AP4: Gesamtdarstellung für den Ostalbkreis.....	62
5.1	Infrastrukturbedarf des Ostalbkreis	62
5.2	Roadmap zur Technologieumstellung	66
5.3	Abschätzung des Gesamt-THG-Reduktionspotenzials für den Ostalbkreis	68
5.4	Abschätzung der Gesamt-Mehrkosten für den Ostalbkreis.....	69
5.5	Handlungsempfehlungen für den Transformationsprozess.....	73
5.6	Fazit.....	77
	Literaturverzeichnis	79
	Anhang	81
	Anhang A: Kurzdarstellung Ladesysteme für batterieelektrische Busse.....	81
	Anhang B: Einsparpotenziale THG-Emissionen (übrige Buskonfigurationen)	83

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Preisprognose Diesel (2025 bis 2040).....	24
Abbildung 2: Strompreisprognose für den Ostalbkreis (2025 bis 2040); links: mit Infrastrukturkosten, rechts: ohne Infrastrukturkosten	24
Abbildung 3: Preisprognose Wasserstoff (2025 bis 2040)	25
Abbildung 4: Standorte der untersuchten Busunternehmen im Ostalbkreis	33
Abbildung 5: Derzeitige Busflotte (links) und untersuchte Umläufe (rechts) innerhalb der vorliegenden Machbarkeitsstudie	34
Abbildung 6: Durchschnittliche Umlauf- (links) und Kursgesamtlänge (rechts) nach Gefäßgröße.....	35
Abbildung 7: Mittlerer Dieserverbrauch der untersuchten Busflotte	36
Abbildung 8: Mittlerer Strom- und Wasserstoffverbrauch der untersuchten Busflotte	37
Abbildung 9: Darstellung der technischen Machbarkeit für batterieelektrische Fahrzeuge für einen beispielhaften Betriebshof mit dazugehörigen Umläufen für einen Referenztag.....	40
Abbildung 10: Darstellung der technischen Machbarkeit für wasserstoffbetriebene Fahrzeuge für einen beispielhaften Betriebshof mit dazugehörigen Umläufen für einen Referenztag.....	40
Abbildung 11: Technische Machbarkeit für eine Umstellung auf batterieelektrische Fahrzeuge	41
Abbildung 12: Technische Machbarkeit für eine Umstellung auf wasserstoffbetriebene Fahrzeuge	42
Abbildung 13: Lastgang eines beispielhaften Betriebshofs an einem Referenztag (Depotladung)	44
Abbildung 14: Beispielhaft Betriebshoferweiterung um 17 Ladespuren für BEV-Fahrzeuge	46
Abbildung 15: Satellitenbild des Standortes Bopfingen, Bahnhofplatz (ZOB), mit Potenzialflächen für einen öffentlichen Ladehub	50
Abbildung 16: Ausschnitt des Liniennetzplans der OstalbMobil GmbH (Quelle: OstalbMobil GmbH)	50
Abbildung 17: THG-Emissionen pro gefahrenen Kilometer (Solo (12 m), OEM 2)	53
Abbildung 18: THG-Reduktionspotenzial entsprechend der Jahresfahrleistung aller untersuchten Umläufe	55
Abbildung 19: Gesamtkosten pro Kilometer nach Antriebstechnologie (Diesel, BEV, H2) und Gefäßgröße bezogen auf die Fahrleistung (ohne Personalkosten) sowie den anteiligen Mehrkosten für ZEV gegenüber Dieseln, ohne Förderung	58
Abbildung 20: Gesamtkosten pro Jahr nach Flottenszenarien und Gefäßgröße sowie den anteiligen Mehrkosten für ZEV gegenüber Dieseln (ohne Förderung)	59
Abbildung 21: Einfluss des beispielhaften Förderszenarios auf die Gesamtkosten pro Kilometer am Beispiel der Gefäßgröße "Solo (12 m)"	59
Abbildung 22: Gesamtkosten pro Jahr nach Flottenszenarien und Gefäßgröße sowie den anteiligen Mehrkosten für ZEV gegenüber Dieseln (mit Förderung)	60
Abbildung 23: Varianzanalyse der Mehrkosten eines BEV bzw. FCV gegenüber dem Dieselfahrzeug (Bsp. Solo (12 m)).....	61
Abbildung 24: Lokalisierung externer Lade- und Tankinfrastruktur im Ostalbkreis.....	64

Abbildung 25: Fahrzeugneubeschaffungsbedarf zwischen 2026 und 2037 (ohne Flottenzuwachs)	66
Abbildung 26: Roadmap zur Technologieumstellung - Flottenzusammensetzung je Antriebstechnologie im Ostalbkreis von 2026 bis 2037 (ohne Flottenzuwachs) ..	67
Abbildung 27: Flottenanteil nach Antriebstechnologie von 2026 bis 2037 (links: Szenario OAK A, rechts: Szenario OAK B, ohne Flottenzuwachs)	67
Abbildung 28: Gesamt-THG-Reduktionspotenzial für den Ostalbkreis (links: Szenario OAK A, rechts: Szenario OAK B; ohne Flottenzuwachs)	68
Abbildung 29: Merkkosten im Betrachtungszeitraum 2026 bis 2027, Szenario OAK A.....	71
Abbildung 30: Merkkosten im Betrachtungszeitraum 2026 bis 2027, Szenario OAK A, inkl. Förderszenario	71
Abbildung 31: Merkkosten im Betrachtungszeitraum 2026 bis 2027, Szenario OAK B.....	72
Abbildung 32: Merkkosten im Betrachtungszeitraum 2026 bis 2027, Szenario OAK B, inkl. Förderszenario	72
Abbildung 33: THG-Einsparpotenziale Mini (PKW)	83
Abbildung 34: THG-Einsparpotenziale Mini (Sprinter)	83
Abbildung 35: THG-Einsparpotenziale Solo (> 12 m)	84
Abbildung 36: THG-Einsparpotenziale Doppeldecker.....	84
Abbildung 37: THG-Einsparpotenziale Gelenk (18 m).....	85

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Unterscheidung von Bussen des ÖPNV.....	14
Tabelle 2: TechnologieKennzahlen batterieelektrischer Busse (Quelle: Sphera, (1))	17
Tabelle 3: TechnologieKennzahlen wasserstoffbetriebener Busse (Quelle: Sphera, (2))	19
Tabelle 4: Überschlägige Kosten für Batteriebusse (Quelle: Sphera, (1), (3)).....	21
Tabelle 5: Überschlägige Kosten für Brennstoffzellenbusse (Quelle: Sphera, (2), (3)).....	21
Tabelle 6: Übersicht über relevante Förderprogramme	29
Tabelle 7: Verteilung der Neigungsklassen im Landkreis Ostalbkreis.....	35
Tabelle 8: Übersicht angenommener Batteriekapazitäten je Gefäßgröße basierend auf verschiedenen Herstellern (OEM 1, OEM 2) bzw. Zukunftsprognose (OEM Zukunft)	38
Tabelle 9: Übersicht angenommener Wasserstofftankkapazitäten je Gefäßgröße basierend auf verschiedenen Herstellern (OEM 1, OEM 2)	38
Tabelle 10: Übersicht technische Machbarkeit nach Antriebstechnologien (Gesamtbetrachtung über alle untersuchten VUs); Anteile der machbaren Umläufe	42
Tabelle 11: Aggregierte Ergebnisse der Lastgangoptimierung über alle Betriebshöfe	43
Tabelle 12: Typische Flächenanforderungen der Ladeinfrastruktur anhand einzelner Komponenten	44
Tabelle 13: Vor- und Nachteile alternativer Konzepte zum Betrieb von Ladeinfrastruktur.....	49
Tabelle 14: Überblick der gemittelten Eingangsdaten zur Berechnung der THG- Einsparpotenziale, dargestellt je Gefäßgröße	52
Tabelle 15: THG-Reduktionspotenziale pro Kilometer je Gefäßgröße (Durchschnitt über alle analysierten Umläufe)	54
Tabelle 16: Annahmen Fahrzeugbeschaffung	56
Tabelle 17: Annahmen Ersatzkomponenten.....	56
Tabelle 18: Annahmen Energieversorgungsinfrastruktur	57
Tabelle 19: Mehrkosten pro Jahr nach Flottenszenarien für die untersuchte OAK-Flotte gegenüber dem Diesel-Referenzszenario, ohne Förderung (o. F.) und mit Förderung (m. F.).....	60
Tabelle 20: Umstellungspotenzial der untersuchten OAK-Flotte auf BEV.....	63
Tabelle 21: Umstellungspotenzial der untersuchten OAK-Flotte auf FCV.....	65
Tabelle 22: Abschätzung des THG-Reduktionspotenzials für die gesamte OAK-Flotte (100%- Flotte)	69
Tabelle 23: Übersicht von Ladesystemen für batterieelektrische Busse	81

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
BEV	(<i>engl.</i>) Battery Electric Vehicle (<i>dt.</i> , <i>batterieelektrisches Fahrzeug</i>)
BZ	Brennstoffzelle
BZ-REX	Brennstoffzellenfahrzeug mit Range Extender
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ e	(<i>engl.</i>) CO ₂ equivalents (<i>dt.</i> , <i>CO₂-Äquivalente</i>)
CVD	(<i>engl.</i>) Clean Vehicles Directive (<i>dt.</i> , <i>Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz</i>)
DFZ	Dieselfahrzeuge
EE	Erneuerbare Energien
FVC	(<i>engl.</i>) Fuel Cell Vehicle (<i>dt.</i> <i>Brennstoffzellenfahrzeug</i>)
H ₂	Wasserstoff
HV-Batterie	Hochvolt-Batterie
HVO	(<i>engl.</i>) Hydrotreated Vegetable Oil (<i>dt.</i> , <i>Hydriertes Pflanzenöl</i>)
LIS	Ladeinfrastruktur
OEM	(<i>engl.</i>) Original equipment manufacturer (<i>dt.</i> , <i>Hersteller</i>)
ÖPNV	Öffentliche Personennahverkehr
SoC	State-of-Charge (Ladezustand der HV-Batterie)
SoH	State-of-Health (Alterungsbedingte Restkapazität bezogen auf ursprüngliche Nennkapazität)
THG	Treibhausgase
VU	Verkehrsunternehmen
WBO	Verband Baden-Württembergischer Omnibusunternehmer e.V.
WtW	Well-to-Wheel (auch W2W, gesamte Prozesskette zur Herstellung von Energie für den Transportbereich (Kraftstoff, Strom, Wasserstoff))
ZEV	(<i>engl.</i>) Zero Emission Vehicle (<i>dt.</i> , <i>emissionsfreie Busse</i>)
ZOB	Zentraler Omnibus-Bahnhof

1. Einführung

1.1 Ausgangssituation

Der Ostalbkreis, einer der flächen- und einwohnerstärksten Landkreise Baden-Württembergs, unterstützt eine umfassende Umstellung des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) auf emissionsfreie Antriebe. Neben dem Ziel der Verdopplung der Fahrgastnachfrage und der Etablierung eines flächendeckenden und zuverlässigen ÖPNV-Angebots möchte der Ostalbkreis als Aufgabenträger für den öffentlichen Verkehr gemeinsam mit den Verkehrsunternehmen im Landkreis die Mobilitätswende gestalten und in diesem Zuge in den kommenden Jahren die Busflotten weitgehend auf emissionsfreie Antriebe umstellen. Die gesamte Busflotte im Ostalbkreis umfasst über 250 Busse verschiedener Größe, die von rund 20 Verkehrsunternehmen, inklusive Subunternehmer, betrieben werden. Die Umstellung der Busse auf emissionsfreie Antriebe stellt somit einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz im Ostalbkreis dar.

In Anbetracht der Dringlichkeit der Umstellung, nicht zuletzt im Kontext der ambitionierten Klimaschutzziele des Landes Baden-Württemberg, die die Klimaneutralität des Landes bis 2040 vorsehen, hat der Landkreis das Beratungsunternehmen Sphera Solutions GmbH engagiert, um im Rahmen einer Machbarkeitsstudie konkrete Umsetzungskonzepte zu entwickeln, die die technische Realisierbarkeit sowie damit verbundene Kosten berücksichtigen.

Gefördert wird die Machbarkeitsstudie durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr im Rahmen der Förderrichtlinie „Richtlinie zur Förderung alternativer Antriebe von Bussen im Personenverkehr“ vom 07.09.2021.

1.2 Ziel der Studie

Die Machbarkeitsstudie zielt auf die Entwicklung einer praxisorientierten Strategie zur Transformation der Busflotte ab, die mit den Klimaschutzzielen des Landes Baden-Württemberg vereinbar ist. Sie soll dabei Busunternehmer und Landkreisverwaltung gleichermaßen bei der Konzeption der Umstellung auf alternative Antriebe einschließlich der benötigten Lade- und Tankinfrastruktur unterstützen und soll dabei aufzeigen, mit welchen technischen, wirtschaftlichen und betrieblichen Bedingungen der Umstieg auf emissionsfreie Antriebe bis 2037 einhergehen kann. Die Untersuchung erfolgt dabei technologieoffen für batterieelektrische und wasserstoffbetriebene Antriebe.

Aktuell erbringen über 250 Busse – betrieben überwiegend von familiengeführten kleinen und mittelständischen Verkehrsunternehmen – jährlich rund 11,7 Millionen Fahrplankilometer im Kreis. Die Studie soll diesen Bestand systematisch analysieren und dabei konkrete Lösungen für die Umstellung auf alternative Antriebe liefern. Daher liegt ein besonderer Fokus auf der praktischen Umsetzbarkeit der erarbeiteten Maßnahmen: Die Studie soll nicht nur die theoretischen Modellrechnungen liefern, sondern ebenso umsetzbare Lösungen für die Verkehrsunternehmen im Kreis bieten – abgestimmt auf deren Größe, Betriebsstrukturen, technologische Voraussetzungen und möglichen Synergien. Anhand der Analyse der aktuellen Umläufe soll die technische Machbarkeit und der Finanzierungsbedarf – unter Berücksichtigung möglicher Förderprogramme – zur Etablierung der bis 2037 umstellbaren Verkehre im Landkreis abgeschätzt werden.

Die zentrale Fragestellung der Studie lautet somit:

„Unter welchen Bedingungen und mit welchem Kostenaufwand kann der Transformationsprozess zu emissionsfreien Antrieben bei den Busbetrieben im Ostalbkreis erfolgreich vollzogen werden?“

1.3 Vorgehensweise

Im Fokus der Studie stehen die nachfolgend beschriebenen vier Arbeitspakete (AP) Grundlagenermittlung (AP1), technische Machbarkeit der Umstellung auf Umlaufebene (AP2), Bedarfsanalyse und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (AP3) sowie Gesamtdarstellung für den Ostalbkreis (AP4).

AP1: Grundlagenermittlung

Neben einer Marktrecherche zu aktuell verfügbaren Technologien und Fahrzeugmodellen im Bereich „Nullemissionsbusse“ sowie der gleichzeitigen Abschätzung von Anschaffungs- und Betriebskosten, werden die wesentlichen rechtlichen Rahmenbedingungen für Beschaffung und Betrieb dargelegt. Ebenso werden die derzeit verfügbaren und künftig absehbaren Finanzierungs- und Fördermöglichkeiten bei eigenwirtschaftlichen Verkehren zusammengestellt. Um den Busbetrieben neben der Darstellung der Machbarkeit eine Hilfestellung für die Umstellung auf alternative Antriebe zu geben, werden die zu schaffenden Rahmenbedingungen und möglichen Lösungsansätze für einen erfolgreichen Transformationsprozess in allgemeiner Form als Best-Practice-Dokumentation dargestellt. Um einen aktuellen Bezug zu einem regionalen Verkehrsunternehmen herzustellen, wird u. a. die kürzlich erfolgte Umstellung auf batterieelektrische Busse beim Verkehrsunternehmen OVA-Omnibus-Verkehr Aalen, Dipl.-Ing. Rau GmbH & Co. KG skizziert.

AP2: Technische Machbarkeit der Umstellung auf Umlaufebene

Anhand aktueller Umlaufpläne wird die technische Machbarkeit für eine Umstellung des jeweils eingesetzten Fahrzeugs auf eine emissionsfreie Antriebstechnologie überprüft.¹ Mittels der eingesetzten Gefäßgrößen und jeweils mittleren Dieserverbrauchs wird der mittlere Fahrenergiebedarf für emissionsfreie Antriebe abgeschätzt und auf den entsprechenden Verbrauch von Strom bzw. Wasserstoff (H₂) umgerechnet. Neben der Analyse der Umläufe erfolgt eine Bestandsaufnahme des aktuellen Betriebs. Damit kann die verfügbare Ladezeit und ggf. Möglichkeiten der Zwischenladung für jedes Fahrzeug ermittelt werden. Für die batterieelektrischen Busse wird ein wärmepumpenbasiertes Fahrzeugklimatisierungskonzept in Kombination mit einer flüssigkraftstoffbasierten Zusatzheizung für tiefe Temperaturen berücksichtigt (Worst Case).

Mit den verfügbaren Daten wird zunächst die mögliche Umstellung auf batterieelektrische Fahrzeuge (*engl.*, *Battery Electric Vehicle, BEV*) überprüft, da dies in aller Regel die technisch einfachere und auch häufig wirtschaftlichere Lösung darstellt. Sollte der Einsatz batterieelektrischer Fahrzeuge aufgrund zu langer Umläufe oder ungenügender Ladezeit nicht möglich sein, wird die Möglichkeit für den Einsatz von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen (*engl.*, *Fuel Cell Vehicle, FCV*) untersucht.

AP3: Bedarfsanalyse und Mehrkostenbetrachtung

Anhand der in AP2 ermittelten Abschätzung, mit welcher Technologie-/ Fahrzeugkonfiguration welche Umläufe bedienbar sind, wird der Infrastrukturbedarf für die Flottenumstellung ermittelt. Dazu wird zunächst die Möglichkeiten zur Lastgangoptimierung (Ladezeitoptimierung, Reduzierung der max. benötigten Ladeleistung etc.) abgeschätzt. Anschließend werden anhand des ggf. optimierten Energiebedarfs die Kriterien beschrieben, die bei der Infrastrukturauslegung

¹ Es werden aktuelle Umlauf- bzw. Fahrpläne von den Verkehrsunternehmen ausgewertet, die im Rahmen der Studie ihre spezifischen Betriebsdaten zur Verfügung gestellt haben.

für den einzelnen Betriebshof zu berücksichtigen sind. Für alle untersuchten Betriebshöfe wird zudem mit dem zuständigen Netzbetreiber geklärt, ob die notwendige Anschlussleistung zur Verfügung gestellt werden kann.

Anhand dieser Angaben wird die Möglichkeit zur Umrüstung der vorhandenen Betriebshöfe, d. h. die Eignung der Standorte zur Errichtung der erforderlichen Lade- und Tankinfrastruktur bewertet sowie, sofern möglich, eine erste beispielhafte Verortung der einzelnen Ladeinfrastrukturkomponenten unter Berücksichtigung der bestehenden Busabstellung durchgeführt. Die Möglichkeit der Nutzung einer Wasserstofftankstelle wird berücksichtigt, sofern auf einem Betriebshof oder im direkten Umkreis (innerhalb max. 10 km Straßenentfernung) mindestens 10 Fahrzeuge auf Wasserstoff umgestellt werden sollen. Kleinere Fahrzeugzahlen führen in der Regel zu einem unrentablen Betrieb der Tankstelle. In diesem Fall werden entweder bestehende bzw. bereits geplante Standorte für eine Wasserstofftankstelle berücksichtigt (z. B. mit der im Rahmen von HyExperts II: H2Ostwürttemberg errichteten Wasserstoffherstellungsanlage in Schwäbisch Gmünd) oder anhand von öffentlich verfügbaren Satellitenbildern mögliche Standorte für eine gemeinsame Tankinfrastruktur vorgeschlagen.²

In diesem Zusammenhang werden auch Möglichkeiten für eine unternehmensübergreifende Nutzung der Infrastruktur geprüft und die Vor- und Nachteile eines internen, unternehmensübergreifenden sowie externen Betriebs der Infrastruktur in allgemeiner Form dargestellt.³

Anhand der ermittelten Umstellungsmöglichkeiten werden mittels einer Analyse nach dem Ansatz „Well-to-Wheel (WtW)“⁴ die möglichen Treibhausgas-Einsparungen berechnet. Als Bezugsgröße dient dabei der bereits in AP2 verwendete Dieserverbrauch für die verschiedenen Gefäßgrößen und die ermittelte Jahresfahrleistung.

Unter Berücksichtigung der anzusetzenden Preise für Strom und Wasserstoff werden die voraussichtlichen Mehrkosten der Umstellung für die Betreiber über die nächsten 12 Jahre (entsprechend der mittleren Lebensdauer eines Linienbusses) abgeschätzt. Dabei wird von einer Beschaffung zum aktuellen Zeitpunkt und konstanten Betriebskosten über die Betriebsdauer ausgegangen. Der Einfluss aktueller Fördermöglichkeiten auf die Mehrkosten wird mit einem Förderszenario beispielhaft dargestellt.

Um die Bandbreite der möglichen technischen und wirtschaftlichen Entwicklung darzustellen, wird für vier zentrale Parameter eine Varianzanalyse vorgenommen.

AP4: Gesamtdarstellung für den Ostalbkreis

Die betreiberspezifischen Einzelergebnisse werden zu einer Gesamtdarstellung des Infrastrukturbedarfs (Anzahl Ladepunkte, Netzanschlussleistung, Anzahl Dispenser, Wasserstoffbedarf) für den gesamten Ostalbkreis zusammengefasst.

Anhand des Wasserstoffbedarfs werden die Synergien und Potenziale einer lokalen Versorgung mit Wasserstoff abgeleitet.

² Dazu wird das Vorhandensein einer Freifläche und deren Zugänglichkeit für die beteiligten Betreiber berücksichtigt. Es erfolgen keine weitergehenden Überprüfungen, z. B. hinsichtlich der Eigentumsverhältnisse.

³ Dabei werden grundlegende Möglichkeiten zur Optimierung bei betriebsübergreifender Nutzung aufgezeigt. Die vertragliche Ausgestaltung hinsichtlich Eigentums- und Betriebsmodellen erfordert eine eigene rechtssichere Untersuchung, die nicht Gegenstand dieses Projekts ist.

⁴ Berücksichtigung der gesamten Prozesskette zur Herstellung von Energie für den Transportbereich (Kraftstoff, Strom, Wasserstoff).

Es erfolgt die Aggregation der Ergebnisse für die Reduktion der Treibhausgasemissionen sowie der Mehrkosten auf Kreisebene. Hinsichtlich der Kosten werden die voraussichtlich zu erwartenden zusätzlichen Investitionen auf Kreisebene dargestellt.

Anhand der verfügbaren Informationen zum Alter der Busse und der jeweils anzusetzenden alternativen Antriebsenergie wird eine Roadmap zur Technologieumstellung entwickelt. Damit liegt ein aggregierter Grobfahrplan zur Umstellung des ÖPNV im gesamten Ostalbkreis auf Nullemissionsantriebe vor, der die Komplexität und Dauer der verschiedenen Umstellungsmaßnahmen berücksichtigt.

2. AP1: Grundlagenermittlung

2.1 Marktrecherche zu Technologieentwicklungen sowie zur Entwicklung entsprechender Anschaffungs- und Betriebskosten

Für den ÖPNV relevante Busmodelle können generell nach Größe und Fahrgastkapazität unterschieden werden. Tabelle 1 gibt eine Übersicht zu relevanten Buskategorien sowie deren typische Charakteristika.

Tabelle 1: Unterscheidung von Bussen des ÖPNV

Buskategorien	Länge [m]	Fahrgastkapazität	Charakteristik/Einsatzgebiet
Minibus	4,9	8	PKW (Van, Minivan, 8-Sitzer), geringes Fahrgastaufkommen
	7,4–8,6	28	Sprinter, geringes Fahrgastaufkommen
Midibus	10,6	86	Kleinbusse, Kurzversionen von Standard-Solo-Bussen (12 m), mittleres Fahrgastaufkommen
Solobus	12–14,6	89–121	Standardlinienbus in Städten und Überland
Doppeldeckerbus	14	145	Stadtbus, hohes Fahrgastaufkommen
Gelenkbus	18,0–19,5	120–150 (174)	Hauptverkehrsachsen, hohes Fahrgastaufkommen

Um die verfügbaren batterieelektrischen und wasserstoffbetriebenen Antriebe für die eingesetzten Gefäßgrößen darzustellen, wird eine Marktrecherche der verfügbaren sowie der absehbar verfügbaren Fahrzeugtechnologien durchgeführt. Die Entwicklung der Anschaffungs- und Betriebskosten der Busse wird anhand der letztjährigen Preistendenzen abgeschätzt.

2.1.1 Technologie- und Marktüberblick zu batterieelektrischen Bussen

Batterieelektrische Busse werden ausschließlich mit Strom aus einer Batterie betrieben und können als Voll-lader (Betriebshof-, Depot-, oder Übernachtungsladung), Gelegenheitslader (Gelegenheitsladung bzw. Opportunity Charging) oder auch Puls-lader (Puls-ladung bzw. Flash Charging oder Ultraschnellladung) betrieben werden.

Als **Depotlader** (DL) werden jene Batteriebusse bezeichnet, die zum Nachladen des Energiespeichers die nächtliche oder untertägige Betriebspausen nutzen. Die Ladeinfrastruktur kann bei diesem Konzept auf Nachladeeinrichtungen in den Betriebshöfen beschränkt werden und erfolgt üblicherweise konduktiv per Kabel. Bei ausreichender Standzeit kann die Nachladung „lebensdauerfreundlich“ mit geringer C-Rate⁵ erfolgen. Typische, heute verfügbare Ladestationen können DC-Leistungen⁶ bis 150 kW übertragen (vgl. Tabelle 23). Falls die Standzeit ausreicht, ist zur Reduktion der Netzanschlussleistung und zur Vermeidung von Leistungsspitzen und den damit verbundenen Netzanschlusskosten bzw. Leistungskostenanteil bei den Strombezugskosten eine zeitlich versetzte Ladung von Fahrzeuggruppen empfehlenswert. Die verbauten

⁵ Die C-Rate beschreibt die Lade- oder Entladegeschwindigkeit einer Batterie im Verhältnis zu ihrer Nennkapazität. Hohe C-Raten ermöglichen schnelles Laden, was besonders bei Gelegenheitsladung (z. B. an Endhaltestellen) wichtig ist während niedrige C-Raten schonender für die Batterie sind und verlängern deren Lebensdauer. Mit Blick auf die betriebliche Relevanz ist die C-Rate von Betreibern bei der Ladeinfrastrukturplanung zu berücksichtigen, z. B. ob Schnellladestationen nötig sind.

⁶ Gleichstromleistung

Energiespeicher batterieelektrischer Busse sind abhängig von der Gefäßgröße und der vom Busbetreiber geforderten Reichweite. Aktuelle Angaben zur verbauten Nennkapazität in Abhängigkeit der Gefäßgröße von modernen am Markt verfügbaren Fahrzeugen können Tabelle 2 entnommen werden. Um die Batterie möglichst lebensdauerfreundlich zu nutzen, wird üblicherweise nicht der volle Energieinhalt (SOC – State-of-Charge) für tägliche Fahrten genutzt, sondern lediglich max. 85-90%. Der State of Health (SOH) beschreibt den Gesundheitszustand einer Batterie und ist ein weiterer zentraler Parameter für die Langzeitbewertung von batterieelektrischen Bussen. Viele Hersteller garantieren einen SOH von 80% ihrer Batterien nach 5-8 Jahren Laufzeit. Sowohl SOC als auch SOH müssen beim Einsatz eines batterieelektrischen Busses beachtet werden, damit dieser während seiner gesamten Lebensdauer den Reichweitenanforderungen der täglichen Umläufe genügen kann.

Gelegenheitsladung bedeutet, dass der Energiespeicher nicht nur in den Betriebspausen im Betriebshof nachgeladen wird, sondern auch an den Endhaltestellen (bzw. an Haltestellen mit längeren Wartezeiten). So lassen sich bei gleichem Energiespeicherinhalt deutlich größere Reichweiten erzielen. Um die an den Wendepunkten verfügbare Zeit optimal zu nutzen, müssen jedoch die Laderaten erhöht werden. Nachteilig bei diesem Konzept ist der Bedarf an zusätzlicher Ladeinfrastruktur im Liniennetz (Gleichrichterstation und Übertragungstechnik im öffentlichen Raum), der mit zusätzlichen Kosten verbunden ist.

Als **Pulslander** werden demgegenüber Fahrzeuge verstanden, die auch während des Busbetriebs bei normalen Haltestellenaufenthaltszeiten die Batterie an Unterwegs-Haltestellen nachladen. Dieses kurzzeitige Laden erfordert eine hohe Ladeleistung (< 450 kW) sowie die Notwendigkeit einer hohen Verfügbarkeit der entsprechenden Infrastruktur entlang der Linie (Anzahl an Ladepunkten mit leistungsfähigen Elektroanschlüssen). Daher ist das Prinzip der Pulsladung grundsätzlich nur auf Linien mit sehr vielen Fahrzeugen im Umlauf ökonomisch sinnvoll und ist aufgrund der damit verbundenen Aufwände und Einschränkungen von vornherein als nicht praktikabel für den Ostalbkreis einzustufen.

Es können unterschiedliche Formen von Ladestationen für batterieelektrische Bussen unterschieden werden, die u. a. angepasst auf Einsatzszenario (Bedarf, Standort, Ladeart), aufzuladendem Fahrzeugtyp und typischer DC-Ladeleistung angepasst sind und unterschieden werden können. Anhang A beinhaltet eine Kurzdarstellung verfügbarer Ladesysteme für batterieelektrische Busse.

Technologische Herausforderungen

Bei Batteriebusen und der zugehörigen Ladeinfrastruktur (LIS) handelt es sich um eine relativ junge Technologie im Vergleich zu den über Jahrzehnten ausgereiften Bussen mit Diesel- oder auch Erdgasverbrennungsmotor. Das heißt, dass die Verfügbarkeit des Gesamtsystems Batteriebus bestehend aus batterieelektrischem Bus und der erforderlichen Ladeinfrastruktur aktuell und voraussichtlich auch in der näheren Zukunft noch nicht vollumfänglich der hohen Verfügbarkeit der etablierten Antriebstechnologien entspricht. Zudem zeigen bisherige Erfahrungen, dass die Umstellung mit weiteren Risiken einhergehen kann, wie z. B. nicht reibungslos funktionierende Ladevorgänge auf dem Betriebshof, gerade in der Anlaufphase, d. h. im ersten Jahr, was direkte Auswirkungen auf die Verfügbarkeit der Busse hat. Auch ist hinsichtlich der Ersatzteilverfügbarkeit mit einer Lernkurve zu rechnen, da die neue Antriebstechnologie hier zusätzliche bzw. andere Ersatzteile erfordert, die gerade in der Einführungsphase noch nicht immer bedarfsgerecht von der eigenen Werkstatt bzw. der Vertragswerkstatt des Herstellers vorgehalten werden. Gerade bei neueren Technologien, bei denen die Produktionszahlen noch geringer als bei den konventionellen Technologien sind und zudem die Lieferketten noch nicht vollumfänglich etabliert sind, kann die Ersatzteilbeschaffung sich im Einzelfall als schwieriger gestalten. Bei Gelegenheitsladern ergeben sich weitere Risiken im Betrieb, wie z. B. ein temporärer Ausfall der Ladeinfrastruktur an einer Endhalte- oder

Wendestelle oder die Nicht-Erreichbarkeit des Ladepunktes aufgrund beispielsweise Belegung durch ein verspätetes Vorgängerfahrzeug oder einen anderen Verkehrsteilnehmer, Bauarbeiten, kurzfristige Verkehrsumleitung aufgrund von Versammlungen/ Demonstrationen oder Einsatz von Rettungskräften etc. Diese sind als beherrschbar anzusehen, solange sie bei der Betriebsplanung entsprechende Reserven in der Reichweitenplanung berücksichtigt werden.

Das Brandrisiko bei Elektrobussen entsteht nicht direkt durch das Fahrzeug selbst, sondern durch die Lagerung und das Laden der HV-Batterie in Depots. Lithium-Ionen-Akkus können durch nicht ordnungsgemäße Herstellung/Montage, Überlastung, oder Beschädigung in Brand geraten und einen unkontrollierbaren „Thermal Runaway“ auslösen, was sich durch ein dichtes Parken der Busse schnell auf andere Fahrzeuge ausbreiten kann. Das Brandrisiko für batterieelektrische Busse ist nach bisherigen Erfahrungen nicht per se höher als bei Verbrennern. Allerdings sind die Bedingungen in E-Bus-Depots, insbesondere die erwähnte hohe Dichte der Fahrzeuge und das Potenzial zur Ausbreitung von Bränden durch die Akkus, ein kritischer Faktor, der spezifische und gut durchdachte Brandschutzmaßnahmen (z. B. Brandabschnitte, die auch versicherungsseitig eingefordert werden können und damit verbunden einen voraussichtlich erhöhten Platzbedarf bei der Abstellung zur Folge haben) und Maßnahmen zu Brandbekämpfung erfordert. Im Falle eines Feuers sind bspw. größere Mengen an Löschwasser für das Löschen bzw. Kühlen der Hochvolt-Batterie (HV-Batterie) notwendig über einen im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen längeren Zeitraum. Das Löschen einer brennenden HV-Batterie ist üblicherweise nur schwer möglich, da das Löschwasser die üblicherweise staub- und wasserdicht verschlossenen Batteriezellen kaum bzw. nicht erreicht. Dadurch ist ein kontrolliertes Abbrennen der HV-Batterie bzw. des Fahrzeugs eine empfohlene Maßnahme zur Brandbekämpfung seitens der DGUV⁷. Für die Eventualität eines Fahrzeugbrandes auf dem Betriebshof ist daher möglichst ein Havarieplatz vorzusehen, der auch das Auffangen und kontrollierte Entsorgen des eingesetzten Löschwassers ermöglicht. Eine weitere Maßnahme ist die Überwachung der Busabstellung mit Sensorik, z. B. Wärmebildkameras und Rauchmeldern, um einen sich anbahnenden HV-Batterie bzw. Fahrzeugbrand möglichst frühzeitig zu erkennen.

Grundsätzlich ist es bei batterieelektrischen Fahrzeugen ratsam, neben der verpflichtenden Sensibilisierung aller Betriebshofmitarbeiter, inkl. Werkstatt- und Fahrpersonal, zu den Themen elektrische Antriebe und Hochspannung, die verantwortlichen Rettungskräfte (z. B. Feuerwehr, Polizei, Sanitäter) über die neuen Antriebstechnologien an den jeweiligen Standorten zu informieren und umfassend zu sensibilisieren. Hierfür könnten bspw. gemeinsame Begehungen und Schulungen zwischen Busbetreibern und Rettungskräften initiiert werden, um im Falle eines Brandfalls sicher und effektiv eine Menschenrettung durchführen zu können.

Die HV-Batterie hat eine endliche Lebensdauer, welche bei derzeit am Markt verfügbaren Bussen vermutlich geringer als die Gesamtfahrzeugslebensdauer sein wird (Lebensdauererwartung derzeit ca. 6-8 Jahre⁸, diese ist stark abhängig vom Nutzungsprofil der Batterie).

Technologiekennzahlen aktuell verfügbarer batterieelektrischer Busse sind Tabelle 2 zu entnehmen.

⁷ Siehe DGUV (2023): FBFHB-024: Hinweise für die Brandbekämpfung von Lithium-Ionen-Akkus bei Fahrzeugbränden.

⁸ Hersteller gewähren mittlerweile bis zu 15 Jahre erweiterte Gewährleistung auf die Batterie, wobei derzeit bei solch langen Gewährleistungszeiträumen noch von einem Tausch der Batterie auszugehen ist, der üblicherweise modular über den Tausch einzelner Batteriepacks erfolgt.

Tabelle 2: TechnologieKennzahlen batterieelektrischer Busse (Quelle: Sphera, (1))

	BEV (Depotlader)		
	Minibus	Solobus (10-15 m)	Gelenkbus
Installierte Kapazität HV-Batterie [kWh]	NMC: 37–148 LFP: 56–113	NMC: 210–588 LFP: 423–449 LTO: 346–485	NMC: 396–640 LFP: 525–595
Leistung E-Motor	< 230 kW	125–167 kW _{nenn} (200–250 kW _{peak})	267–337 kW _{nenn} (250–500 kW _{peak})
Verbrauch (fahrzeugseitig, 20% Auslastung, Jahresmittel) [kWh/km]	LFP: 0,7–1,1	NMC: 0,7–1,5 LFP: 0,9–1,0 LTO: 0,9–1,1	2,1–2,6
Erzielbare Reichweite [km]	100–230	NMC: 300–400 LFP: 450 LTO: 400	NMC: 396–600 LFP: 525
Technologische Reife	Serie		
Verschleiß (Austausch HV-Batterie)	6–8 Jahre		
THG-Emissionen (Lebenszyklus)	++ (bei Verwendung Erneuerbarer Energien)		
Risiken Betrieb – Flexibilität, Komplexität und Anfälligkeit	-/-		
Brandrisiko	o (zusätzliche Brandschutzmaßnahmen)		
Ort der Energiezufuhr	Depot		
Leergewicht [t]	4–9	12–19	15–21

Legende: +/++ *besser als DFZ*
 o *vergleichbar mit DFZ*
 -/- *schlechter als DFZ*
 k. a. D. *keine ausreichenden Daten*

¹ Ein Tausch während der Nutzungszeit eines Busses.

2.1.2 Technologie- und Marktüberblick wasserstoffbetriebene Busse

Wasserstoffbetriebene Busse verfügen in der Regel über einen Hybridantrieb, bei dem, abhängig vom jeweiligen Betriebszustand, die Energie entweder aus der Hochvoltbatterie (HV-Batterie) entnommen oder direkt aus einer Brennstoffzelle (BZ) bezogen und anschließend mithilfe von Elektromotoren in Antriebsleistung umgewandelt wird.

Der zentrale Bestandteil von wasserstoffbetriebenen Bussen ist somit die BZ, in der Wasserstoff mit Sauerstoff aus der Umgebungsluft reagiert. Dabei entsteht elektrische Energie, die einen Elektromotor antreibt, sowie Wasser als einziges Reaktionsprodukt. Der Wasserstoff wird in Hochdrucktanks bzw. Druckgasflaschen (typischerweise mit 350(–700) bar) auf dem Dach des Fahrzeuges gespeichert und der BZ zugeführt. Das Speicherkonzept ähnelt erdgasbetriebenen Bussen.

Wasserstoffbetriebene Busse sind entweder mit einer BZ als Hauptenergiequelle (BZ-Hybrid) ausgestattet oder mit einer BZ als zusätzliche Energiequelle für batterieelektrische Busse als Range Extender (BZ-REX) zur Erhöhung der Reichweite.⁹ Beiden Technologievarianten ist gemein, dass sie eine BZ, einen Drucktank zur Wasserstoffspeicherung und eine HV-Batterie

⁹ Darüber hinaus gibt es wasserstoffbetriebene Busse mit Verbrennungsmotor (Wasserstoffverbrenner, H₂-ICE), die im Rahmen der Studie aufgrund deren nicht vorhandenen Marktreife keine weitere Berücksichtigung finden.

benötigen. Unterscheiden lassen sich die Varianten anhand ihres Anwendungsfalls und der jeweiligen Auslegung der Batteriekapazität und -leistung sowie der BZ-Leistung.

BZ-Hybrid-Busse besitzen eine vergleichsweise klein dimensionierte Batteriekapazität (Solobus, < 40 kWh) und eine höhere BZ-Leistung. Diese liegt bei einem Solobus bei ungefähr 60–85 kW. Diese Art Busse verfügt nicht über einen externen Ladeanschluss, denn der überwiegende Anteil der Antriebsenergie wird aus dem in der BZ umgewandelten Wasserstoff gewonnen. Wasserstoffverbräuche sind im BZ-Hybrid entsprechend höher als im BZ-REX. Die Batterie dient beim BZ-Hybrid Bus lediglich als Zwischenspeicher, welcher Leistungsspitzen abfedern kann und damit einen lebensdauerfreundlichen Betrieb der BZ ermöglicht. Außerdem wird während des Betriebs des Fahrzeugs, wie bei herkömmlichen Hybridfahrzeugen, durch Rekuperation die Bremsenergie beim Bremsvorgang zurückgewonnen und in der Batterie gespeichert.

BZ-REX-Fahrzeuge sind mit einer verhältnismäßig geringeren BZ-Leistung (Solobus, ca. 30 kW) ausgestattet und mit einer hohen Batteriekapazität (Solobus, > 250 kWh). Der überwiegende Teil der Antriebsenergie wird über die Batterie bereitgestellt. Diese kann aber durch die BZ im Betrieb kontinuierlich nachgeladen werden, wodurch die Gesamtreichweite des Fahrzeugs erhöht wird. Bei dieser Technologie sind die Busse neben dem Wasserstoffzugang auch mit einem externen Ladeanschluss ausgestattet. Da der Gesamtwirkungsgrad über den Weg der externen Batterieladung höher ist als die Erzeugung und Re-elektrifizierung von Wasserstoff, sollte eine Betriebsstrategie darauf abzielen, möglichst große Anteile der Strecke rein batterieelektrisch zu ermöglichen (im Rahmen der infrastrukturseitig und operativ verfügbaren Lademöglichkeiten). Beispielsweise kann in Gebieten mit einem topographisch anspruchsvollen Routenprofil oder bei hohen Tagesfahrleistungen der höhere Energiebedarf durch den Einsatz einer BZ zur Stromerzeugung gedeckt werden. Grundsätzlich können BZ-REX-Fahrzeuge sehr effizient genutzt und mit hohem Wirkungsgrad betrieben werden, da die Brennstoffzelle immer im Betriebsoptimum betrieben werden kann.

Die Wasserstoffversorgung kann auf verschiedene Weise erfolgen: Entweder wird komprimierter, flüssiger Wasserstoff per LKW zum Betriebshof geliefert und dort in Tanks gespeichert, oder die Versorgung erfolgt über eine direkte Rohrleitung von einem Wasserstoffproduzenten. Die Betankung der Busse erfolgt über eine betriebshofeigene Tankstelle, alternativ können öffentliche Wasserstofftankstellen genutzt werden. Die vorzuhaltende Wasserstoffmenge beeinflusst die Infrastrukturerfordernisse und sollte aus Platz- und Kostengründen bedarfsgerecht dimensioniert werden.

Technologische Herausforderungen

Während wasserstoffangetriebene Fahrzeuge über höhere Reichweiten als batterieelektrische Busse verfügen, ist die zuverlässige Versorgung mit Wasserstoff zu gewährleisten. Für die Infrastruktur gilt, dass kritische Komponenten, v.a. der Verdichter, redundant ausgelegt werden sollten, da ansonsten bei einem Ausfall dieser Komponente eine Betankung der wasserstoffbetriebenen Busse nur möglich ist, so lange noch ein ausreichender Druck in den Speicherbänken der Tankstelle die Betankung ermöglicht. Dementsprechend ist die Betankungsinfrastruktur so ausfallsicher wie möglich auszulegen. Maßnahmen hierfür sind die bereits erwähnte redundante Auslegung kritischer Komponenten, üblicherweise nach dem n+1 Prinzip, d. h. fällt ein Kompressor oder eine Zapfsäule aus bzw. steht eine planmäßige Wartung an, ist eine entsprechende redundante Alternative vorzuhalten, die einen uneingeschränkten Weiterbetrieb ermöglicht.

Weiterhin ist eine ausreichend große Auslegung der Druckspeicherbänke vorzusehen. So sollten üblicherweise mindestens ein bis zwei Tagesbedarfe in den Druckspeichern verfügbar sein, sodass selbst bei einem vollständigen Ausfall der installierten Kompressoren die Flotte immer noch mindestens ein Tag lang mit Wasserstoff versorgt werden kann. Eine Modularisierung der

einzelnen Anlagenteile ist hier ebenfalls empfehlenswert, damit sichergestellt wird, dass bei erforderlichen Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen der möglichst reibungsfreie Weiterbetrieb parallel zu den Wartungs- bzw. Instandsetzungsarbeiten möglich ist. Generell ist festzuhalten, dass sich im Fall des Energieträgers Wasserstoff geringere Energiemengen zu vertretbaren Kosten und Platzbedarf im Vergleich zu Diesel vorhalten lassen. Während die Dieselmotorspeicherkapazitäten auf Betriebshöfen oft für mehrere Wochen reichen können und auch unterirdisch gelagert werden können, liegen die Wasserstoffmengen, auch mit Blick auf Genehmigungsprozesse im Bereich von wenigen Tagen, je nach Auslegung der Druckspeicherbänke, die zumindest bisher vorzugsweise oberirdisch aufgestellt werden. Die Speicherung in tiefkalter, flüssiger Form erhöht die Lagerkapazität aufgrund der höheren Dichte des flüssigen Wasserstoffs gegenüber gasförmigem Wasserstoff um ein Vielfaches, ist aber auch mit höheren Kosten verbunden.

Von Wasserstoffbussen geht im normalen Betrieb und bei richtigem Umgang kein erhöhtes Brandrisiko im Vergleich zu Batteriebusen aus. Im Falle eines Brandes verfügen die Tanks der wasserstoffangetriebenen Busse über eine Thermosicherung in den Speicherflaschen, die eine kontrollierte Abgabe an die Umgebung ermöglicht und so eine unkontrollierte Verbrennung zu vermeiden. Wasserstoffbrände zeichnen sich durch eine deutlich geringere Strahlungsenergie aus im Vergleich zu bspw. Dieselbränden. Dies hat eine Verringerung der negativen Auswirkungen auf die unmittelbare Umgebung zur Folge. Für die Durchführung von Wartungsarbeiten in Gebäuden und die Fahrzeugabstellung unter Dach sind Wasserstoff-Meldeanlagen inkl. Wasserstoff-Sensoren vorzusehen sowie geeignete Maßnahmen für die ausreichende Belüftung bei Erreichen der ersten von zwei Warnstufen (z. B. Zwangsöffnung der Tore und Dachluken, ggf. Zwangsbelüftung der Halle). Bei Erreichen der zweiten Warnstufe wird das Gebäude vom Stromnetz getrennt, um weitere Zündquellen auszuschließen. Analog zur Werkstatt und Fahrzeugabstellung ist bei der Wasserstoff-Betankungsinfrastruktur auf den gesetzlich vorgeschriebenen Explosionsschutz und die vorgeschriebenen Sicherheitsabstände zu achten. Alle Mitarbeiter sind entsprechend zu schulen.

Die Investitionskosten heutiger wasserstoffbetriebener Busse mit Brennstoffzelle liegen, ähnlich wie bei batterieelektrischen Bussen, ungefähr beim zwei- bis zweieinhalbfachen vergleichbarer konventioneller Dieselfahrzeuge (DFZ). Da Brennstoffzellenbusse üblicherweise sowohl eine HV-Batterie als auch eine Brennstoffzelle haben, werden mit steigender Technologiereife und Produktionszahlen beider Technologien zusätzliche Kostenreduktionen erwartet.

Sowohl die HV-Batterie als auch die Brennstoffzelle haben eine endliche Lebensdauer, wobei für Brennstoffzellen nicht zwingend von einem Tausch der BZ auszugehen ist. Die Lebensdauererwartung der BZ liegt bei 8-12 Jahre, wobei die konkrete Lebensdauer ähnlich wie bei der HV Batterie von den Einsatzbedingungen abhängt.

Technologiekennzahlen aktuell verfügbarer wasserstoffbetriebener Busse sind Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 3: Technologiekennzahlen wasserstoffbetriebener Busse (Quelle: Sphera, (2))

	BZ-Hybrid			BZ-REX		
	Minibus ¹	Solobus	Gelenkbus	Minibus	Solobus	Gelenkbus
Kapazität HV-Batterie [kWh]	k. a. D.	< 40	60–69	k. a. D.	> 300	< 392
Kapazität Wasserstofftank [kg] (Druckniveau ²)	10–20 (350-700 bar)	30–40 (350 bar)	30–40 (350 bar)	10–20 (350-700 bar)	30–40 (350 bar)	30–40 (350 bar)
Leistung Brennstoffzelle [kW]	k. a. D.	70–180	100–180	30	30–60	60–100

Verbrauch [kg H ₂ /100 km]	6–8	7–10	10,5–15	k. a. D.	4–5	8–9
Erzielbare Reichweite [km]	200–300	300–400	300–350	250–300	350–400	350–400
Verschleiß (Austausch HV-Batterie/BZ)	6–8 / 8–12 Jahre					
THG-Emissionen (Lebenszyklus)	++ (bei Verwendung Erneuerbarer Energien)					
Risiken Betrieb - Flexibilität / Komplexität & Anfälligkeit	o / -					
Risiken Brand	o					
Ort der Energiezufuhr	Depot und Strecke (stationär)					
Leergewicht [t]	k.a.D.	ca. 13	18–19	10–12	13–14	18–20

Legende: +/++ *besser als DFZ*
 o *vergleichbar mit DFZ*
 -/-- *schlechter als DFZ*
 k. a. D. *keine ausreichenden Daten*

¹ Aktuell kein Serienfahrzeug verfügbar.

² Standard im ÖPNV: 350 bar, 700 bar bei PKW und leichten Nutzfahrzeugen, um höhere Reichweiten bei begrenztem Bauraum zu ermöglichen.

2.1.3 Entwicklung von Anschaffungs- und Betriebskosten

Die Preisspanne für Batteriebusse sowie wasserstoffbetriebene Busse schwankt je nach Modell und Ausstattung. Den größten Anteil bei den Beschaffungskosten der Busse stellen die Aufwendungen für die Batterie und/oder das Brennstoffzellensystem dar, die gemäß dem gegenwärtigen Stand der Technik während der Nutzungsdauer der Busse mindestens einmal ausgetauscht werden müssen. Die Berücksichtigung der Kosten für die Ersatzbeschaffung ist demnach stets erforderlich. Für Wartungs- und Instandhaltungskosten werden für batterieelektrische Busse leicht niedrigere Wartungsaufwendungen angesetzt, da Instandhaltungs- und Wartungsarbeiten, inkl. Betriebsflüssigkeitswechsel, für die wesentlichen Antriebskomponenten eines Dieselantriebsstranges, wie Verbrennungsmotor und Getriebe, entfallen. Auch ist der Bremsverschleiß niedriger aufgrund der Fähigkeit des elektrischen Antriebsstranges über den Elektromotor zu bremsen, ähnlich einem Retarder beim herkömmlichen Verbrennungsmotor mit dem Unterschied, dass dabei noch Energie rekuperiert werden kann. Für den BZ-Bus sind vergleichbare bis etwas höhere Wartungsaufwendungen gegenüber dem Dieselmotor zu erwarten, da hier gegenüber dem batterieelektrischen Bus noch Wartungsarbeiten am BZ System und der Wasserstoff-Speicheranlage (z. B. regelmäßige Dichtigkeitsprüfung) anfallen. Grundsätzlich ergeben sich Unterschiede bei den Ersatzteilkosten, die für die elektrisch angetriebenen Fahrzeuge tendenziell höher anzusetzen sind. Ebenso sind, sofern vorhanden, Anpassungen an der Werkstatteinfrastuktur erforderlich, z. B. sind Arbeitsstände für Tätigkeiten an Fahrzeugdach-Komponenten erforderlich. Zudem müssen Hilfsmittel zur Handhabung schwerer Lasten (Energiespeicher in Form des Batterie- oder BZ-Systems), geeignete Werkzeuge und Diagnosegeräte sowie persönliche Schutzausrüstungen sowie Arbeitsplätze für elektrische Prüfungen vorhanden sein. Auch die Organisation des Werkstattbetriebs sowie das Management von Verkehrsunfällen oder Störungen müssen entsprechend angepasst werden.

Die Infrastrukturkosten für batterieelektrische Busse fallen höher aus gegenüber Infrastrukturkosten von Dieselmotoren. Auch die Einzelpositionen der Ladeinfrastruktur

unterliegen, noch deutlichen Preisunterschieden und weisen eine starke Abhängigkeit von den lokalen Gegebenheiten am Standort des Betriebshofes auf. Die Anschlusskosten der Ladeinfrastruktur sind vornehmlich von der Verfügbarkeit eines ausreichend leistungsfähigen Nieder-/Mittelspannungsanschlusses¹⁰ abhängig. Zusätzlich sind Baukostenzuschläge zu berücksichtigen sowie Kosten für Planung und Verwaltung.

Die in Tabelle 4 und Tabelle 5 dargestellten Angaben für batterieelektrische und wasserstoffbetriebene Busse sind als überschlägiger Kostenrichtwert zu verstehen, der einen ersten groben Anhaltspunkt für die mit dem Regelbetrieb von Batteriebussen und Wasserstoffbussen in Zusammenhang stehenden Kosten gibt.

Tabelle 4: Überschlägige Kosten für Batteriebusse (Quelle: Sphera, (1), (3))

	BEV (Depotlader)		
	Minibus	Solobus	Gelenkbus
Beschaffungskosten Bus	80.000–270.000 €	400.000–615.000 €	ca. 730.000 €
Beschaffungskosten Batterie ¹	k. a. D.	100.000–180.000 €	160.000–210.000 €
Wartungs- und Instandhaltungskosten ²		o	
Infrastrukturkosten (Ladeinfrastruktur am Standort)	- / - -		
Werkstatt-ausrüstung und Schulungen	<i>Anhaltswerte zu einzelnen Kostenpositionen für Ladeinfrastruktur:</i> <ul style="list-style-type: none"> • Anschlusskosten (zw. 20–600 €/m) und Baukostenzuschlag (ca. 100–150 €/kW) – in Abhängigkeit vom Anschluss an das Nieder-/Mittelspannungsnetz, zzgl. bauliche Umgestaltung • Umspannstation: <ul style="list-style-type: none"> ◦ Mittelspannungstransformator: ca. 75.000–100.000 € • Ladepunkt, inkl. Anschluss (150 kW): ca. 55.000 € • Deckenkran: ca. 70.000 € • Dacharbeitsstand (mobil): ca. 35.000 € • Spezialwerkzeuge für Arbeiten an Hochvoltanlagen, Diagnosegeräte: ca. 10.000 € • Persönliche Schutzausrüstung der Mitarbeiter: k. a. D. • Schulungskosten (Fahren, Werkstattpersonal, Bergen/Abschleppen, etc.): 110 (Fachkundig unterwiesene Person Stufe 1) bis 1.300 € (Fachkundige Person für Hochvoltssysteme (FHV) Stufe 3S) pro Kurs und abhängig von Kursinhalten¹¹ 		

Legende: -/-- schlechter als Diesel
+ / ++ besser als Diesel
o vergleichbar mit Diesel
k. a. D. keine ausreichenden Daten

¹ Ersatzbeschaffung: Ein Tausch während der Nutzungszeit eines Busses. Schätzwert 300 €/kWh.

² Größter Anteil der Wartungs- und Betriebskosten ist nicht antriebspezifisch.

Tabelle 5: Überschlägige Kosten für Brennstoffzellenbusse (Quelle: Sphera, (2), (3))

	BZ-Hybrid		
	Minibus (M1, M2)	Solobus (M3)	Gelenkbus ¹
Beschaffungskosten Bus	ca. 340.000 €	550.000–630.000 €	ca. 800.000 €
Beschaffungskosten BZ ²	k. a. D.	70.000–120.000 € (Schätzung)	

¹⁰ In der Regel können Anschlüsse an bestehende Ringleitungen bis zu einer Gesamtanschlussleistung von 4 MVA hergestellt werden. Darüber hinaus ist ein separater Anschluss an ein Umspannwerk erforderlich.

¹¹ Beispielhafte Kosten der [Dekra Akademie](#).

Beschaffungskosten Batterie³	k. a. D.	12.000–21.000 € (Schätzung)
Infrastrukturkosten (Tankinfrastruktur am Standort)		- / - -
	<i>Anhaltswerte zu einzelnen Kostenpositionen für Tankinfrastruktur (k. a. D.):</i>	
	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Investitionskosten in Abhängigkeit von örtlichen Gegebenheiten, Flottenzusammensetzung, vorzuhaltende Wasserstoffmenge</i> • <i>Anlieferung von flüssigem Wasserstoff: nur rentabel für große Busflotten</i> • <i>Anlieferung via Rohrleitung: sehr teuer, nur rentabel bei geringer Entfernung zum Wasserstoffproduzenten.</i> • <i>Zusätzliche Kosten: Ertüchtigung von Abstellhallen/Werkstätten (Belüftung, Wasserstoffwarnanlage) und Aufrüstung (z. B. Dacharbeitsstände)</i> • <i>Wartungs- und Instandhaltungskosten: 2–5% der Infrastrukturinvestitionskosten (in Abhängigkeit vom abgeschlossenem Service-Vertrag)</i> 	
Werkstatt-ausrüstung und Schulungen		<ul style="list-style-type: none"> • Deckenkran: ca. 70.000 € • Dacharbeitsstand (mobil): ca. 35.000 € • Wasserstoffwarnanlagen, mobile Sensorik • Schulungskosten (ergänzend zum Schulungsmaterial für Batteriebusse: Umgang mit Gasanlagen für Werkstattpersonal, Sensibilisierung bzgl. Wasserstoff)
Wartungs- und Instandhaltungskosten⁴		o/-
Legende:	-/-	<i>schlechter als Diesel</i>
	+ / + +	<i>besser als Diesel</i>
	o	<i>vergleichbar mit Diesel</i>
	k. a. D.	<i>keine ausreichenden Daten</i>

¹ Sehr geringe Datengrundlage.

² Ersatzbeschaffung (ggf.). Lebensdauer der BZ 8-12 Jahre.

³ Ersatzbeschaffung; Lebensdauer HV-Batterie 6-8 Jahre. Schätzwert 300 €/kWh.

⁴ Größter Anteil der Wartungs- und Betriebskosten ist nicht antriebsspezifisch.

2.1.4 Angebotsentwicklung beispielhafter Hersteller

In Reaktion auf verstärkten politischen Druck und das gestiegene Bewusstsein für Luftqualität und Klimaschutz, setzen führende deutsche und europäische Bushersteller verstärkt auf emissionsfreie Antriebe – mit Batteriebussen für Stadtbusse als Schwerpunkt.

Daimler Buses beispielsweise treibt diese Entwicklung mit der Einführung leistungsfähigerer NMC4-Batterien¹² (111 kWh pro Modul) weiter voran. Bereits ab 2026 werden die eCitaro-Modelle mit nochmals längeren Reichweiten auf dem Markt verfügbar sein (Reichweiten Solo lt. Hersteller bis ca. 500 km, Gelenkbus bis ca. 400 km; Ladeleistung steigerbar auf 300 kW). Zugleich sollen ab 2030 keine neuen Diesel-Stadtbusse mehr in Europa verkauft werden, sondern nur noch lokal CO₂-neutrale Stadtbuss-Modelle. Daimler Buses gibt eine Garantie von acht Jahren, optional verlängerbar auf zwölf Jahre, auf sein neues NMC4-Batteriesystem. Zudem bietet der Hersteller ergänzend ein Batterie-Re-Manufacturing (NMC1–NMC3) und einen Austausch mit lt. Hersteller länger haltenden NMC4-Packs ab 2026 an. Das Ziel liegt hier in der Lebenszyklusverlängerung bereits eingesetzter, älterer eCitaro-Busse im Gebrauchtmittelmarkt. Im Bereich der Wasserstoffbusse wird die Weiterentwicklung von v.a. REX-Bussen vorangetrieben, da nach Angaben des Herstellers Strom die günstigere Energiequelle darstellt und daher Wasserstoff eher als die sekundäre Energiequelle gesehen wird.

Auch MAN investiert weiter in den BEV-Antrieb: Der vollelektrische Stadtbus Lion's City 10 E mit einer neuen hauseigenen Batteriegeneration (MAN BatteryPack) wurde für das Modelljahr 2025 vorgestellt. Die weiterentwickelten Lithium-Ionen-Akkus (NMC-Technologie) werden dabei

¹² Im Rahmen der 2024 gestarteten Kooperation mit Daimler Buses übernimmt die BMZ Group (BMZ Poland) die Produktion der NMC4-Batteriesystemen.

vollständig für die Baureihe im MAN-Werk in Nürnberg produziert und versprechen, dass mit einer höheren Energiedichte und einer verbesserten Entladetiefe weniger Batteriepacks¹³ dieselbe oder sogar höhere Reichweiten erzielen. Der Hersteller verzichtet auf konkrete Reichweitenangaben, betont jedoch die höhere Effizienz und das reduzierte Gewicht als entscheidende Vorteile. Dies führt nicht nur zu zusätzlichem Innenraum, sondern soll auch die Wartung vereinfachen und die Betriebskosten senken. MAN gibt an, dass die neuen Batterien eine Lebensdauer von bis zu 14 Jahren oder rund einer Million Kilometer erreichen können. Zudem sollen sich laut Hersteller bis zu 96 Prozent der eingesetzten Materialien recyceln lassen. Dieselebusse werden nach Euro 7 nicht mehr angeboten, wobei die H₂-Technologie als ergänzende Lösung für spezielle Anwendungen weiterhin erforscht werden.

Solaris kündigt ebenfalls Neuentwicklungen an: Neben großen Batteriepaketen (z. B. Solaris Urbino 18 electric mit modularem Antrieb: Solaris High Energy Batterie – NMC-Technologie, bis 800 kWh) inklusive digitaler Batteriepässe bietet das Unternehmen in Kooperation mit dem kanadischen Hersteller Ballard Power Systems Brennstoffzellenbusse an. Solaris ist zur Zeit mit Abstand Marktführer bei BZ Bussen – über 1000 Stadtbusse mit BZ-Antrieb sollen bis 2027 im Einsatz sein (aktuell über 200 FCV-Busse ausgeliefert, über 500 bestellt). Rückrüstprogramme für ältere Fahrzeuge sollen Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit sichern. Dabei bietet der Hersteller ab 2025 einen neuen Retrofit-Service an (Nachrüstung älterer Urbino E-Busse mit modernen Batterieoptionen (LFP, NMC, LTO), Batteriegrößen mit >600 kWh und Reichweiten über 600 km (lt. Herstellerangabe)).

Gefördert durch deutschlandweite Programme für wasserstoffbetriebene und batterieelektrische Busse und das sich daraus ergebende positive Marktumfeld, verfolgen Hersteller und Politik beim Stadtbus eine klare Transformation weg von Dieselantrieben. Während für Stadtbusse die batterieelektrische Technologie dominiert, sehen die Antriebskonzepte für Überland- und Reisebusse zunehmend Hybridkonzepte aus Batterie und Wasserstoff vor – mit dem Ziel, bereits innerhalb der nächsten Dekade nahezu vollständig auf klimaneutrale Lösungen umzusteigen. Die beispielhaft dargestellten Strategien führender europäischer Hersteller verdeutlichen den strategischen Schwenk der Busbranche hin zur Emissionsfreiheit, was in der Konsequenz, zumindest auf mittelfristiger Sicht, den Technologieschwenk weg vom Dieselantrieb für die Verkehrsunternehmen im OAK praktisch unumgänglich macht.

2.2 Entwicklung der Strom- und Wasserstoffpreise

Nachfolgend ist die angenommene Preisentwicklung von Diesel, Strom und Wasserstoff im Bezugszeitraum 2025 bis 2040 dargestellt.

Abbildung 1 zeigt die Preisprognose für Diesel im genannten Bezugszeitraum, inkl. Kraftstoff- und CO₂-Steuer (Umweltkosten innerhalb der Kraftstoffkosten von 60 € pro Tonne CO₂) und exklusive Mehrwertsteuer und Infrastrukturkosten. Die Rohölpreisdaten basieren dabei auf dem World Energy Outlook 2024 der International Energy Agency (IEA). Zusätzlich wird eine Energiesteuerentlastung für den ÖPNV nach § 56 EnergieStG (54,02 € pro 1.000 Liter Diesel) berücksichtigt.

¹³ MAN Lion's City 10 E: 356 kWh (4 Batteriepakete) , MAN Lion's City 12 E: 356 bis 534 kWh (4, 5 oder 6 Batteriepakete), MAN Lion's City 18 E: 534 bis 712 kWh (6, 7 oder 8 Batteriepakete), Ladeleistung: bis zu 150 kW.

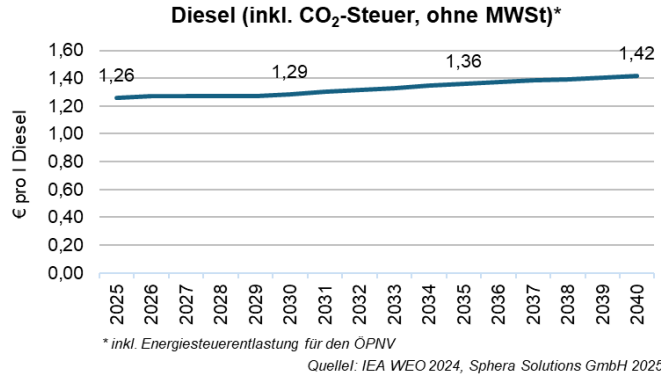


Abbildung 1: Preisprognose Diesel (2025 bis 2040)

Für die Strompreisprognose pro kWh Strom für den Ladevorgang von Bussen (Depotladung), inklusive und exklusive der Ladeinfrastrukturkosten, werden die spezifischen Rahmenbedingungen des Ostalbkreis zugrunde gelegt (Abbildung 2, links inklusive Ladeinfrastrukturkosten und rechts exklusive Ladeinfrastrukturkosten). Die Preiskurven basieren dabei auf der neuesten Marktpreisprognose nach Prognos und berücksichtigt unter anderem die spezifischen Netzkosten, Steuern und Abgaben für die Betriebshofstandorte der untersuchten Verkehrsunternehmen (vgl. Kapitel 3 und Kapitel 4). Die Berechnung der spezifischen Strombezugskosten für den Ostalbkreis erfolgt unter Berücksichtigung der Spitzenlast sowie der jährlich eingekauften Strommenge (entsprechend der Ergebnisse aus Kapitel 3 und 4). Dabei wird eine dynamische jährliche Erhöhung der Netzentgelte um 4% berücksichtigt sowie ein Deckungsbeitrag von 3 ct/kWh. Die Netzentgelte basieren auf den spezifischen Kosten der Netzbetreiber (wie Leistungspreis, Arbeitspreis, Grundpreis und Messpreis), die im Rahmen der Machbarkeitsstudien von Relevanz sind genauso wie die Festsetzung der spezifischen Infrastrukturkosten (Netze ODR GmbH, Stadtwerke Schwäbisch Gmünd GmbH, Stadtwerke Aalen GmbH, vgl. Kapitel 3.1). Zusätzlich fließen Steuern, Abgaben und Umlagen (ohne Sonderabgaben) in die Kalkulation ein. Für einen direkten Vergleich der dargestellten Energiepreise sind die Infrastrukturkosten sinnvollerweise mit zu berücksichtigen.

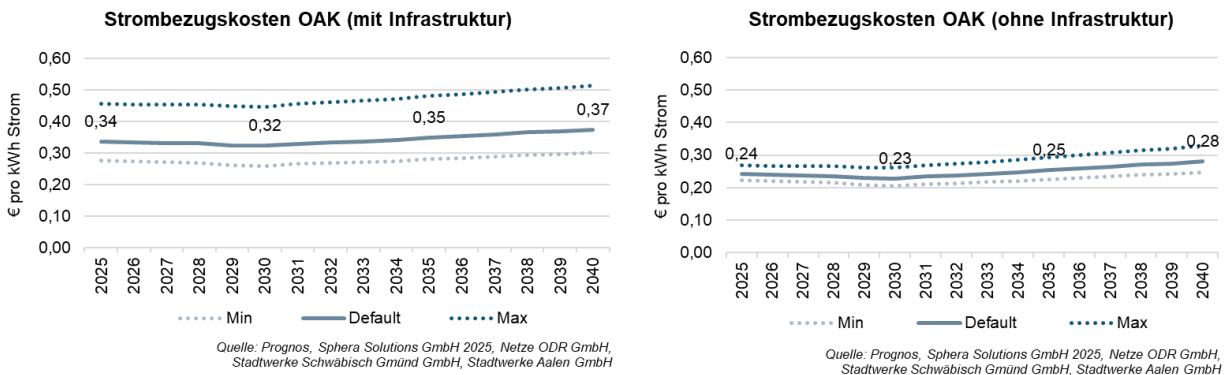


Abbildung 2: Strompreisprognose für den Ostalbkreis (2025 bis 2040); links: mit Infrastrukturkosten, rechts: ohne Infrastrukturkosten

Die Betankung von Wasserstoffbussen erfolgt typischerweise mit komprimiertem gasförmigem Wasserstoff bei einem Betriebsdruck von 350 bar, was dem Standard für Wasserstoff-Schwerlastfahrzeuge entspricht. Die in Abbildung 3 dargestellte Preisentwicklung, inklusive Treibhausgasgutschriften für grünen Wasserstoff (erhöhte THG Quotenerlöse von 120 € pro

Tonne CO₂) und inklusive Infrastrukturkosten, stellt dabei die Bezugskosten für ebendiesen Betriebsdruck dar.

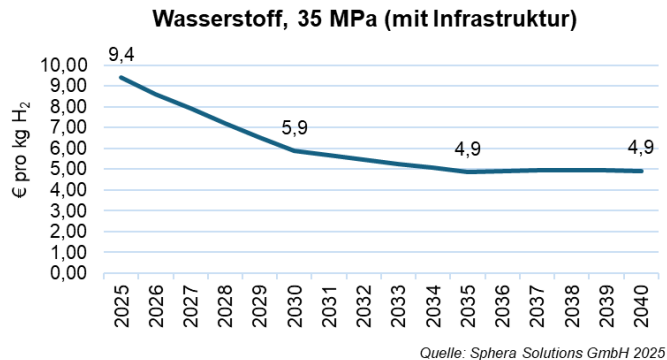


Abbildung 3: Preisprognose Wasserstoff (2025 bis 2040)

2.3 Rechtliche Rahmenbedingungen

Seit dem 2. August 2021 gilt in Deutschland das Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz (SaubFahrzeugBeschG), die europäische Clean Vehicles Directive (CVD), EU-Richtlinie 2019/1161, in nationales Recht überführt. Ziel ist es, die öffentliche Beschaffung und damit die ÖPNV-Busflotten¹⁴ in den nächsten Jahren weitestgehend auf emissionsfreie Antriebe umzustellen, um sowohl das mit dem ÖPNV verbundene Treibhausgaspotenzial zu senken sowie v.a. in Ballungsgebieten die Luftqualität zu verbessern und die Lärmbelastigung zu reduzieren. Hierbei soll das Emissionspotenzial durch den vermehrten Einsatz „sauberer“ und „emissionsfreier“ Busse garantiert werden. Laut SaubFahrzeugBeschG gilt ein Bus als emissionsfrei, wenn er keinen Verbrennungsmotor verbaut hat und lokal praktisch keine CO₂-Emissionen verursacht. Zur Kategorie der emissionsfreien Busse (*engl.*, *Zero Emission Vehicles, ZEV*) zählen:

- Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV),
- Brennstoffzellenfahrzeuge mit Wasserstoff (FCV),
- Oberleitungsbusse und
- Busse mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor, sofern sie weniger als 1 g CO₂/kWh ausstoßen.

Ein Fahrzeug gilt als sauber, wenn es entweder emissionsfrei ist oder emissionsarm, d. h. wenn es mit alternativen Kraftstoffen betrieben wird.¹⁵

Das SaubFahrzeugBeschG verpflichtet des Weiteren öffentliche Auftraggeber dazu, bei der Vergabe von Verkehrsleistungen im ÖPNV verbindliche Mindestquoten für entsprechende

¹⁴ Im Geltungsbereich des Gesetzes befinden sich nur Fahrzeuge der Klasse M3 Klasse 1 (typischerweise Stadtbuss) und der Klasse M3 Klasse A (typischerweise Midibus in Linienbusausführung).

¹⁵ Dazu zählen Kraftstoffe, die Erdöl teilweise ersetzen, CO₂-Emissionen reduzieren und die Umweltverträglichkeit des Verkehrs verbessern. Zu den alternativen Kraftstoffen gehören Elektrizität, Wasserstoff, Biokraftstoffe (gemäß Richtlinie 2009/28/EG), synthetische und paraffinische Kraftstoffe, Erdgas (CNG/LNG, inkl. Biomethan) sowie Flüssiggas (LPG). Ausgeschlossen sind Biokraftstoffe mit hohem Risiko indirekter Landnutzungsänderungen sowie Kraftstoffe, die nicht in reiner Form eingesetzt werden (z. B. Beimischung zu fossilem Diesel). Auch Plug-in-Hybridbusse mit Dieselmotor gelten als „sauber“, sofern sie bestimmte Kriterien erfüllen.

saubere und emissionsfreie Busse (Fahrzeugklasse M3¹⁶) einzuhalten. Diese Quoten sind wie folgt festgelegt:

- Bis 31.12.2025 müssen mindestens 45% der neu beschafften oder im Rahmen neu vergebener Dienstleistungsaufträge eingesetzten Busse als „sauber“ im Sinne des Gesetzes gelten. Davon wiederum müssen mindestens 50% emissionsfrei sein, was einem Anteil von 22,5% emissionsfreier Busse entspricht.
- Ab dem 1.1.2026 steigen die Quoten auf 65% saubere Busse, davon müssen wiederum mindestens 32,5% emissionsfrei sein.

2.3.1 Pflichten des SaubFahrzeugBeschG für Verkehrsunternehmen im Ostalbkreis

Der ÖPNV stellt eine bedeutende Aufgabe des Ostalbkreis dar. Der Geschäftsbereich Nachhaltige Mobilität fungiert gemäß dem ÖPNV-Gesetz als Aufgabenträger. Gemäß dem Regionalisierungsgesetz obliegt dem Ostalbkreis als ÖPNV-Aufgabenträger die Verpflichtung, eine adäquate Bedienung der Bevölkerung mit Verkehrsleistungen im ÖPNV zu gewährleisten. Dies umfasst insbesondere die Planung, Organisation und Finanzierung des öffentlichen Personennahverkehrs. Der Ostalbkreis ist mit der OstalbMobil GmbH, dem Tarifverbund aller Verkehrsunternehmen im Ostalbkreis, durch einen Kooperationsvertrag verbunden. Dieser regelt die Zusammenarbeit zwischen den Gesellschaftern und dem Ostalbkreis als Aufgabenträger für den ÖPNV und die Finanzierung der OstalbMobil GmbH. Als Gesellschafter der OstalbMobil GmbH fungieren dabei der Ostalbkreis (50% Anteil) sowie die im Ostalbkreis tätigen Verkehrsunternehmen (50% Anteil). Diese Struktur macht OstalbMobil zu einem sogenannten Mischverbund, bei dem sowohl der Landkreis als öffentlicher Aufgabenträger als auch die privaten Verkehrsunternehmen als eigenwirtschaftliche Betriebe gemeinsam Verantwortung für die Organisation und Weiterentwicklung des öffentlichen Nahverkehrs tragen.

Aufgrund des Umstandes, dass die Verkehrsbetriebe eigenwirtschaftlich in diesem Verbund agieren und nicht als Sektorenauftraggeber im Sinne des SaubFahrzeugBeschG auftreten, fallen diese derzeit nicht unter die Pflichten des SaubFahrzeugBeschG. Sie können im Rahmen von öffentlichen Ausschreibungen (Vergabeverfahren) jedoch grundsätzlich indirekt von der CVD betroffen sein, da sie bei der Erfüllung der darin festgelegten Vorgaben für saubere Fahrzeuge gefördert werden könnten oder deren Einhaltung als Bedingung für die Teilnahme an der jeweiligen Ausschreibungen definiert sein könnte.

Im Juli 2025 ist der Verband Baden-Württembergischer Omnibusunternehmen e. V. (WBO)¹⁷ der bundesweite Branchenvereinbarung zur Umsetzung des SaubFahrzeugBeschG beigetreten. Ziel der Branchenvereinbarung ist es, die gesetzlich vorgeschriebenen Quoten für saubere und emissionsfreie Busse im öffentlichen Nahverkehr durch ein koordiniertes Vorgehen auf Landesebene zuverlässig zu erfüllen. Zur Begleitung der Umsetzung wurde ein bundesweiter Koordinierungskreis eingerichtet. Dieser analysiert regelmäßig die Daten zur Fahrzeugbeschaffung und spricht Empfehlungen aus, um die Zielerreichung sicherzustellen und die Verkehrswende im ÖPNV zu unterstützen. Hierbei werden die Neuanschaffungen von sauberen Fahrzeugen der eigenwirtschaftlichen Betriebe, die WBO-Mitglieder sind, zwar in der Berichterstattung aufgeführt und so öffentlich gemacht, allerdings tragen sie nicht aus oben genannten Gründen zur Quotenerfüllung entsprechend des SaubFahrzeugBeschG bei.

¹⁶ Reisebusse sind von den Regelungen ausgeschlossen.

¹⁷ Der WBO ist der Berufs- und Arbeitgeberverband für rund 350 Omnibusunternehmen in Baden-Württemberg und vertritt deren wirtschaftliche und politische Interessen.

2.3.2 Betrieb von Hochvolt- und Wasserstoffbussen im ÖPNV

Die Umstellung auf emissionsfreie Antriebstechnologien wie Batterie- und Wasserstoffbusse stellt Busunternehmen vor neue rechtliche, technische und organisatorische Herausforderungen. Die rechtlichen Rahmenbedingungen sind dabei nicht nur formale Vorgaben, sondern haben direkte Auswirkungen auf die Betriebsführung, Investitionsentscheidungen, die Sicherheit im Unternehmen sowie den Schutz von Beschäftigten und Fahrgästen. Sie werden nachfolgend für die Bereiche 1) Arbeitsschutz und Qualifikation, 2) Infrastruktur und Genehmigungen, 3) Betriebsorganisation und Haftung und 4) Strategische Bedeutung kurz dargestellt.

- 1) Arbeitsschutz und Qualifikation: Der Betrieb und die Wartung von Hochvolt- und Wasserstofffahrzeugen unterliegen strengen Arbeitsschutzvorgaben. Die DGUV Information 209-093 „Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvolt-Systemen“ regelt die Qualifikation für Arbeiten an Hochvolt-Systemen. Mitarbeitende müssen je nach Tätigkeit als „Elektrofachkraft für HV-Systeme“ oder „elektrotechnisch unterwiesene Person“ ausgebildet sein. Für Wasserstofftechnologien gelten zusätzliche Anforderungen, insbesondere im Bereich der Infrastruktur und Sicherheit. Die DGUV Information 209-072 „Wasserstoffsicherheit in Werkstätten“ sowie entsprechende VBG-Leitfäden geben Hinweise zur Gestaltung von Tankstellen, Werkstätten und Lagerflächen für Wasserstoffbusse. Dabei sind Schutzmaßnahmen gegen Hochdruck¹⁸, Brandgefahr und Leckagen verpflichtend (4).
- 2) Infrastruktur und Genehmigungen: Die Errichtung von Ladeinfrastruktur für Elektrobusse sowie Wasserstofftankstellen erfordert umfangreiche Genehmigungsverfahren. Insbesondere bei größeren Speichermengen von Wasserstoff (3–30 t) ist ein einfaches Genehmigungsverfahren nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)¹⁹ notwendig. Bei Lagermengen >5t in Verbindung mit anderen Gefahrstoffen ist außerdem noch die Anwendung der Störfallverordnung nach 12. BImSchV zu prüfen. Die Planung und Errichtung elektrischer Anlagen unterliegt den VDE-Bestimmungen²⁰, die als „allgemein anerkannte Regeln der Technik“ gesetzlich verankert sind. Die Planung muss Sicherheitsabstände, Brandschutz, Netzanschlussleistung und Umweltauflagen berücksichtigen (5). Auch die Werkstattausrüstung muss angepasst werden – etwa durch isolierte Arbeitsplätze, Dacharbeitsstände und spezielle Prüfgeräte (4).²¹
- 3) Betriebsorganisation und Haftung: Busunternehmen sind verpflichtet, Gefährdungsbeurteilungen zu erstellen, Betriebsanweisungen zu formulieren, Notfallkonzepte zu erstellen und regelmäßige Unterweisungen durchzuführen. Die Qualifikation der Mitarbeitenden muss dabei regelmäßig überprüft und dokumentiert werden. Die Einhaltung der Vorgaben ist nicht nur sicherheitsrelevant, sondern auch haftungsrechtlich bedeutsam. Verstöße gegen gesetzliche Anforderungen können zu Bußgeldern, Regressforderungen oder strafrechtlichen Konsequenzen führen. Die

¹⁸ Beschäftigte müssen im Umgang mit Hochdrucksystemen (bis zu 500 bar) geschult sein. Die VBG stellt dafür Leitfäden, Checklisten und Musterunterweisungen bereit.

¹⁹ Bei einer Lagermenge von über 3 Tonnen ist das Erlaubnisverfahren nach Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) und Baugenehmigungsverfahren nach Landesbauordnung notwendig, bei der Erzeugung von Wasserstoff vor Ort ein Genehmigungsverfahren nach BImSchG, bei Lagermengen größer 5 Tonnen wirkt die Störfall-Verordnung (21).

²⁰ Siehe hierzu u. a. Normenreihe DIN VDE 0100 "Errichten von Niederspannungsanlagen" oder DIN VDE 0105-100/A1:2017-06 als Berichtigung der DIN VDE 0105-100 „Betrieb von elektrischen Anlagen – Teil 100: Allgemeine Festlegungen“.

²¹ Die VDV-Schrift 825 „Anforderungen an Betriebshöfe und Werkstätten beim Einsatz von Linienbussen mit sauberen und/oder emissionsfreien Antrieben“ sowie die VDV-Schrift 822 „Richtlinie für den Bau von Omnibus-Betriebshöfen“ enthält nähergehende Informationen, die sich aus dem Einsatz von Bussen mit alternativen Antrieben ergeben sowie zum Thema Neu- beziehungsweise Umbau von Betriebshöfen.

Arbeitsschutzgesetzgebung (ArbSchG) und die VDE-Vorschriften (z. B. DIN VDE 0100, 0105-100) bilden hier die Grundlage für den sicheren Betrieb elektrischer Anlagen (4).

- 4) **Strategische Bedeutung:** Die rechtlichen Rahmenbedingungen beeinflussen maßgeblich die strategische Ausrichtung von Busunternehmen. Sie definieren, welche Technologien wirtschaftlich und genehmigungsfähig sind, und geben den Takt für die Umstellung auf emissionsfreie Flotten vor. Förderprogramme wie die Förderrichtlinie „Förderung alternativer Antriebe von Bussen im Personenverkehr“ des BMDV (bzw. Bundesministerium für Verkehr, BMV) sind an die Einhaltung dieser Vorgaben gekoppelt.

Die rechtlichen Rahmenbedingungen sind somit für Busunternehmen ein zentraler Faktor bei der Einführung neuer Antriebstechnologien. Sie sichern nicht nur den rechtskonformen Betrieb, sondern sind auch Voraussetzung für Förderfähigkeit, Mitarbeitersicherheit und langfristige Wirtschaftlichkeit.

2.4 Finanzierungs- und Fördermöglichkeiten

Den Verkehrsunternehmen im Ostalbkreis stehen unterschiedliche Fördermöglichkeiten zur Verfügung, um die Umstellung auf batterieelektrische und wasserstoffbasierte Busse sowie die zugehörige Ladeinfrastruktur im ÖPNV voranzutreiben. Die Förderlandschaft gliedert sich für den Ostalbkreis in drei zentrale Säulen: Bundesförderung, Landesförderung Baden-Württemberg sowie Ladeinfrastrukturförderung durch das Land.

1. Bundesförderung: Alternative Antriebe von Bussen im Personenverkehr

Die Förderung des BMDV (jetzt BMV) umfasst die Beschaffung von batterieelektrischen und wasserstoffbetriebenen Bussen, die Umrüstung konventioneller Fahrzeuge sowie die Errichtung von Lade-, Wasserstofftank- und Wartungsinfrastruktur insofern sie mit der Fahrzeugbeschaffung gekoppelt ist. Diese Förderrichtlinie läuft Ende 2025 aus, das heißt der Förderaufruf vom Juli 2025 war der letzte im Rahmen dieser Richtlinie. An einer Nachfolgeförderrichtlinie wird gearbeitet so das für 2026/27 mit einer Fortsetzung der Bundesförderung gerechnet werden kann.

Nachfolgend werden zur Orientierung die wesentlichen Rahmenbedingungen der Ende 2025 auslaufenden Förderrichtlinie dargestellt. Innerhalb der Laufzeit der Richtlinie gab es mehrere Förderaufrufe. Die Förderquote betrug bis zu 80% der Investitionsmehrausgaben für Fahrzeuge und bis zu 40% für Infrastrukturmaßnahmen. Die Vergabe erfolgt wettbewerblich in einem zweistufigen Verfahren. In der ersten Stufe erfolgt bis zu einem festgelegten Datum die Skizzeneinreichung durch den Antragsteller. In der zweiten Stufe werden max. 80% der Skizzen ausgewählt (abhängig von den verfügbaren Fördermitteln) und die jeweiligen Antragsteller zur formellen Antragstellung eingeladen. Die wettbewerbliche Vergabe erfolgt nach Kriterien wie CO₂-Einsparpotenzial, Elektrifizierungsgrad, Einsatzkontext und Förderbedarf. Antragsberechtigt sind sowohl kommunale als auch private Verkehrsunternehmen, Aufgabenträger des ÖPNV, Leasinggeber mit klar zuordenbaren Kunden, Kommunen, Kreise, Betreiber von Werksverkehren und Flughafenshuttles.

Es ist noch anzumerken, das im Rahmen der geplanten Neuauflage der Busförderung die Förderbedingungen angepasst werden können, so sind beispielsweise eine potenziell niedrigere Förderquote für die Fahrzeuge (z. B. 60%) und/ oder eine über die Zeit abschmelzende Förderquote denkbar. Einen genaueren Zeitplan, bis wann mit einer neuen Förderrichtlinie gerechnet werden kann, gibt es derzeit noch nicht.

2. Landesförderung Baden-Württemberg: LGVFG und Busförderprogramm

Baden-Württemberg fördert über das Landesgemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz (LGVFG) im Rahmen jährlicher Förderaufrufe den Ausbau nachhaltiger ÖPNV-Infrastruktur und die Anschaffung emissionsfreier Busse. Die Fördermittel werden jährlich vergeben, wobei die

Anmeldung bis zum 31. Oktober des Vorjahres erfolgen muss. Die Förderquote beträgt bis zu 50% der Bau- und Grunderwerbskosten, bei besonders klimafreundlichen Maßnahmen oder barrierefreien Projekten sogar bis zu 75%. Förderfähig sind unter anderem Ladeinfrastruktur an Haltestellen, Betriebshöfe, Busbahnhöfe sowie multimodale Knotenpunkte. Im Rahmen der Busförderung wird die Beschaffung von vorrangig Linien- und Bürgerbusse mit Batterie- oder Brennstoffzellenantrieb mit bis zu 75%²² der förderfähigen Mehrkosten gefördert (6).

3. Charge@BW: Ladeinfrastrukturförderung Baden-Württemberg

Mit dem Landesprogramm Charge@BW 2025²³ fördert Baden-Württemberg den Ausbau der Ladeinfrastruktur. Die Förderung richtet sich an Unternehmen, Kommunen, gemeinnützige Organisationen sowie Wohnungseigentümergeinschaften und umfasst sowohl öffentlich zugängliche als auch nichtöffentliche Ladepunkte. Ein Schwerpunkt liegt auf intelligentem Lademanagement zur effizienten Steuerung und Netzstabilität. Bezuschusst werden bis zu 2.500 € pro Ladepunkt sowie Kosten für Planung, Installation, Netzanschluss und Software. Öffentliche Einrichtungen erhalten bis zu 60% Förderung, Unternehmen bis zu 40%. Voraussetzung sind technische Standards wie mindestens 11 kW Ladeleistung, Eichrechtskonformität und Backend-Fähigkeit. Die Antragstellung erfolgt digital, die Umsetzung muss in der Regel innerhalb von 12 Monaten erfolgen. Charge@BW kann mit Bundes- und Kommunalprogrammen kombiniert werden. Verkehrsunternehmen des ÖPNV können das Charge@BW-Förderprogramm grundsätzlich nutzen, da sie typischerweise als entweder als privatwirtschaftliche oder kommunale Unternehmen oder Körperschaften des öffentlichen Rechts antragsberechtigt sind. Sie können öffentlich zugängliche Ladepunkte oder auch vorbereitende Elektroinstallationen beantragen (7).

Tabelle 6 zeigt eine Übersicht der für die Verkehrsunternehmen im Ostalbkreis relevanten Förderinstrumente, Förderquoten und zusätzliche Bedingungen. Die Kombination aus Bundes-, Landes-Förderung ermöglicht eine solide finanzielle Unterstützung für die Umstellung auf emissionsfreie Busse und den Aufbau der notwendigen Infrastruktur. Die Programme sind strategisch aufeinander abgestimmt und sollen sowohl Zuschüsse als auch Planungssicherheit für langfristige Investitionen bieten.

Tabelle 6: Übersicht über relevante Förderprogramme

Förderprogramm	Förderquote Fahrzeuge	Förderquote Infrastruktur	Besonderheiten
BMV (Bund)¹	bis 80% ² der Mehrkosten	bis 40% + 10 bis 20% Bonus für KMU ³	Wettbewerblig, EU-Kofinanzierung
LGVFG (Land BW)	bis 75% der Mehrkosten ³	bis 75% (zuwendungsfähiger Investitionskosten)	Fokus: Barrierefreiheit & Klimaschutz
Charge@BW	–	bis 40% für Unternehmen/private Antragsteller, bis 60% für öffentliche Einrichtungen (max. 2.500 € pro Ladepunkt, max. 250 Ladepunkte)	Ladeinfrastruktur in BW, Inbetriebnahme 12 Monate nach Zuwendungsbescheid, spez. techn. Mindeststandards der Ladepunkte, mind. 3 Jahre zweckentsprechende Nutzung

¹ Aktuelle Förderrichtlinie für alternative Antriebe von Bussen im Personenverkehr läuft zum 31.12.2025 aus. Die Angaben gelten für die genannte Richtlinie. An einer Neuauflage der Förderrichtlinie wird gearbeitet, wobei die Förderbedingungen abweichen können.

² Geltende Preisobergrenzen, z. B.: Dieselbus (12 m): 311.000 €, Batteriebus: 570.000 €, Wasserstoffbus: 590.000 €, Umrüstung Batterie: 340.000 €

³ Beihilfeintensität für kleine Unternehmen 75%, für mittlere und für große Unternehmen 70%.

²² Für kleine Unternehmen beträgt die Beihilfeintensität 75%, für mittlere und für große Unternehmen 70%.

²³ Charge@BW 2025 ist Teil der Klimaschutzziele Baden-Württembergs und leistet ein Beitrag zur Umsetzung der EU-Gebäuderichtlinie und des GEIG (Gebäude-Elektromobilitätsinfrastruktur-Gesetzes) auf Landesebene.

2.5 Best-Practice-Grundlagen für einen erfolgreichen Transformationsprozess

Einführung von batterieelektrischen Bussen bei der OVA in Aalen

Die OVA Omnibus-Verkehr Aalen GmbH hat 2025 einen großen Teil ihrer Busflotte auf batterieelektrische Fahrzeuge umgestellt und die benötigte Ladeinfrastruktur im Rahmen eines umfangreichen Umbaus des OVA-Betriebshofs in Aalen (zentraler Verknüpfungspunkt, vgl. (8)) geschaffen. Bereits 2021 wurde mit der Stadtwerke Aalen GmbH Kontakt aufgenommen, um die absehbar erforderliche Netzanschlussleistung zu reservieren. Seit 2021, mit Einführung des ersten Elektrobusses, bezieht die OVA außerdem ausschließlich Strom aus Erneuerbaren Energien (EE). Im Jahr 2022 beteiligte sich die OVA erfolgreich am Förderaufruf des BMDV. Im Jahr 2023 wurden die Ausschreibungen für die Beschaffung von 20 E-Bussen (Solobusse, 12 m) sowie die zugehörige Ladeinfrastruktur initiiert und danach mit dem Umbau des Betriebshofs begonnen. Die eigentliche bauliche Realisierung konnte somit innerhalb von weniger als zwei Jahren umgesetzt werden.

Die OVA setzt bei ihrem Transformationsprozess auf eine Kombination aus modernen E-Bussen (20 12-m-Elektro-Linienbusse), intelligenter Ladeinfrastruktur (zwei Trafos, vier Ladegeräte, 22 Ladepunkte mit intelligenter Softwaresteuerung) und betrieboptimierter Linienplanung, um Reichweiten und Ladezyklen effizient zu gestalten. Es wurden zwei getrennte Trafostationen am Standort errichtet. Die bewusste Aufteilung auf zwei Trafostationen und eine gewisse Überdimensionierung der kombinierten Trafokapazität schafft nicht nur Redundanz (Ausfallsicherheit), sondern soll auch eine potenzielle Umstellung der restlichen Dieselflotte ohne großen Mehraufwand in Zukunft ermöglichen.

Die Nähe des Standorts zum ZOB in Aalen, welcher von den meisten Linien des Unternehmens angefahren wird, hat für das Unternehmen den Vorteil, dass über die Hälfte der Flotte innerhalb ihrer Umläufe tagsüber zwischengeladen werden können. Dies führt nicht nur zur Minimierung von Leerfahrten (betrieboptimierte Linienplanung) sondern ist auch dem betriebseigenen Lademanagement zuträglich. So kann der Strombedarf eines Teils der Flotte untertags bezogen werden (günstigerer Strompreis an Sonntagen als Nachts) und das System kann in der Nacht, wenn alle Busse auf den Betriebshof zurückkehren, entlastet werden. Der restliche Teil der Flotte wird dynamisch versetzt innerhalb von Stromniedrigpreisphasen geladen, um die Stromkosten zu optimieren und auch um Lastspitzen zu vermeiden. Dies kann durch den Einsatz einer intelligenten Softwaresteuerung realisiert werden (preis- und zeitoptimiertes Ladekonzept, vollautomatisch gesteuert anhand der Vorgabe bis wann der Bus vollgeladen sein muss und den offiziellen Viertelstundenpreisen an der EPEX-Spot Day Ahead Börse).

Die Umlaufplanung wurde durch die Umstellung der Flotte auf Batteriebusse nicht beeinträchtigt. Mit dem Einsatz der E-Busse geht bisher auch kein Mehrbedarf an Dieselfahrzeugen einher, da die Erwartungen bzgl. Reichweiten mehr als erfüllt werden konnten (wobei von Anfang an auf ausreichende Kapazitätsreserven bei der Einsatzplanung geachtet wurde).

Auf Basis einer eigenständigen Projektvorplanung seitens der OVA wurde die Realisierung der Ladeinfrastruktur in Zusammenarbeit mit einem Generalunternehmen durchgeführt. Obwohl das Generalunternehmerkonzept als grundsätzlich positiv bewertet wurde, gestalteten sich die Abstimmungsprozesse mit dem gewählten Unternehmen und den jeweiligen Gewerken (nicht aus der Region stammend) teilweise als herausfordernd.

Die Hauptmotivation für die Flottenumstellung für die OVA war, den Betrieb zukunftsgerichtet emissionsarm zu gestalten und für die Bevölkerung in der Region die Belastung durch Lärm und Schadstoffemissionen nachhaltig zu reduzieren. Inwieweit die Umstellung sich wirtschaftlich trägt, ist zum jetzigen Zeitpunkt noch schwer einschätzbar. Während die Betriebskosten als günstiger eingeschätzt werden (Energiekosten 30 bis 50% niedriger gegenüber Diesel), werden die Gesamtkosten (TCO) trotz Bundesförderung bei der Beschaffung der Busse und der

Ladeinfrastruktur als leicht höher bewertet. Ein wesentlicher Faktor zur letztendlichen Bewertung der TCO wird der Wiederverkaufswert der Elektrobuse nach der geplanten Nutzungsdauer sein, der sich derzeit noch nicht abschätzen lässt (9).

JIVE und JIVE 2 Projekte zu H2/BZ-Bussen

Die europäischen Projekte JIVE und JIVE 2 gelten als richtungsweisende Leuchtturmprojekte zur Einführung emissionsfreier Mobilität im ÖPNV. Ziel war die großflächige Einführung von Wasserstoff-Brennstoffzellenbussen in europäischen Städten, um deren technische Reife, wirtschaftliche Tragfähigkeit und ökologische Wirkung unter realen Betriebsbedingungen zu evaluieren. Durch die gezielte Förderung technologischer Standards innerhalb der Projekte, wie ein Zielpreis von 625.000 € pro Standardbus, eine Mindestlaufleistung von 150.000 km, Reichweiten von bis zu 500 km unter verschiedenen klimatischen Bedingungen, sowie ein durchschnittlicher Wasserstoffverbrauch von 7,7 kg/100 km wurde die Marktreife der Technologie vorangetrieben. Die Einbindung mehrerer Hersteller und Bus-Typen (Standard-, Gelenk- und Doppeldeckerbusse) förderte die Marktdiversifizierung und technologische Weiterentwicklung. Des Weiteren förderten die Projekte den Aufbau einer leistungsfähigen Wasserstoffinfrastruktur, einschließlich großvolumiger Tankstellen mit hoher Verfügbarkeit. Dies ermöglichte nicht nur den zuverlässigen Betrieb der Fahrzeuge, sondern schuf auch die Grundlage für eine skalierbare Wasserstoffmobilität über den ÖPNV hinaus.

Die Einführung von wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellenbussen in Baden-Württemberg erfolgte exemplarisch in den Städten Stuttgart, Mannheim und Heidelberg, die sich aktiv an der Einführung von Brennstoffzellenbussen beteiligten. Die Stuttgarter Straßenbahnen AG (SSB) integrierte Wasserstoffbusse in den Linienbetrieb und errichtete eine Wasserstofftankstelle auf dem Betriebshof in Stuttgart-Gaisburg. Die Stadt nutzte die Gelegenheit, um Erfahrungen mit emissionsfreier Mobilität zu sammeln und die Technologie in den städtischen Verkehrsalltag zu überführen. Die Rhein-Neckar-Verkehr GmbH (rnv) will bis zum Jahr 2032 ihren Fuhrpark vollständig auf lokal emissionsfreie Antriebe umgestellt haben. In Mannheim und Heidelberg wurden in diesem Zusammenhang im Oktober 2022 40 Brennstoffzellen-Range-Extender-Busse (BZ-REX) durch die rnv erfolgreich in den ÖPNV im Rahmen der regulären Flottenerneuerung integriert.²⁴

H2-WANDEL

H2-WANDEL ist ein Kooperationsprojekt in der Region Mittlere Alb-Donau-Ostwürttemberg. Im Mittelpunkt steht der Aufbau eines technologischen Ökosystems, in dem grüner Wasserstoff produziert, verteilt und genutzt wird. Das Vorhaben wird vom Land Baden-Württemberg sowie der Europäischen Union über das EFRE-Programm mit rund 33 Millionen Euro gefördert. Für die Umsetzung arbeiten Partner aus Wirtschaft, Wissenschaft, Politik und Verwaltung eng zusammen. Geplant sind unterschiedliche Leuchtturmprojekte, die zeigen sollen, wie Wasserstoff als Energieträger praktisch erlebbar wird. Die Leuchtturmprojekte setzen unterschiedliche Schwerpunkte: Sie sollen die Wasserstofftechnologie in verschiedenen Bereichen etablieren, neue Anwendungsfelder erschließen und die Akzeptanz sowie den Einsatz von grünem Wasserstoff in der Region nachhaltig steigern. Ein Leuchtturmprojekt stellt der Wasserstoff-Technologie- und Industriepark in Schwäbisch Gmünd "H2-Aspen" dar, welcher durch die Stadt Schwäbisch Gmünd gemeinsam mit dem Ostalbkreis geplant wird. Der Fokus dieses Projekts liegt auf der Produktion von grünem Wasserstoff. Der im Rahmen des Projekts errichtete Elektrolyseur verfügt über eine Nettoleistung von 10 MW und wird von Lhyfe S.A. betrieben. Der 10 MW Elektrolyseur wird mit einer Produktionsleistung von 3.800 kg Wasserstoff pro Tag die größte Anlage in Süddeutschland sein. Zudem ist die Errichtung einer Wasserstoff-Tankstelle vor

²⁴ Die Umstellung erfolgte im Rahmen des Projekts [„H2Rhein-Neckar“](#).

Ort geplant. Die geplante Versorgung mit grünem Wasserstoff könnte für die Busflotte im Ostalbkreis ein Hebel sein, einen Teil der Dieselflotte auf Wasserstoffbusse umzustellen.

Sowohl aus den Erkenntnissen der JIVE-Projekte als auch aus Einzelinitiativen, wie dem OVA Beispiel, können notwendige Grundlagen für die erfolgreiche Umstellung auf emissionsfreie Busantriebe – sei es batterieelektrisch oder wasserstoffbasiert – abgeleitet werden:

Technisch-infrastrukturelle Grundlagen

- Lade- bzw. Betankungsinfrastruktur mit hoher Verfügbarkeit (Reserven und Redundanz) und ausreichender Kapazität
- Netzintegration und Lastmanagement zur Vermeidung von Spitzenlasten
- Digitale Flottensteuerung zur Optimierung von Lade-/Tankzeiten und Umläufen
- Schaffung von ausreichenden Werkstatt- und Wartungskapazitäten für neue Fahrzeugtechnologien

Wirtschaftliche und regulatorische Rahmenbedingungen

- Nutzung von Förderprogrammen zur Deckung der Investitionsmehrkosten (z. B. Bundesförderung für klimafreundliche Busse oder Landesförderprogramme)
- Langfristige Finanzierungsmodelle für Betrieb und Infrastruktur
- Berücksichtigung von Lebenszykluskosten statt reiner Anschaffungskosten

Organisatorische und personelle Grundlagen

- Kooperation und enge Abstimmung mit Energieversorgern und Technologiepartnern für eine erfolgreiche Einführung von E-Bussen
- Change-Management zur Begleitung des Transformationsprozesses
- Schulungskonzept für Qualifizierung des Fahr- und Werkstattpersonals
- Kommunikation und Öffentlichkeitsarbeit zur Akzeptanzförderung

3. AP2: Technische Machbarkeit auf Umlaufebene

3.1 Bestandsaufnahme aktueller Betrieb

Anhand der aktuellen, von den Verkehrsunternehmen zur Verfügung gestellten Umlauf- und Fahrpläne werden im Rahmen der Machbarkeitsstudie die Aktivitäten acht verschiedener Busunternehmen im Ostalbkreis untersucht. In Summe kann durch die Auswahl der Busunternehmen und der jeweils spezifischen Busflottengröße eine Abdeckungsrate von ca. 75% der aktuell im Ostalbkreis zur Bedienung des aktuellen ÖPNV Angebotes eingesetzten Busflotte erzielt werden. Nachfolgend werden die Rahmendaten der untersuchten Busflotte im Ostalbkreis aggregiert über die berücksichtigten Verkehrsunternehmen dargestellt.

Betriebshöfe und Abstellungen

Abbildung 4 zeigt in der Übersicht die Standorte der einzelnen Betriebshöfe und Abstellungen der untersuchten Busunternehmen im Ostalbkreis. In Summe werden 11 Betriebshöfe und 11 Abstellungen genutzt. Die Betriebshöfe sind dabei im Besitz der jeweiligen Verkehrsunternehmen, wohingegen es sich bei den Abstellungen entweder um private, teilweise angemietete Flächen, handelt oder um öffentliche Flächen. Drei verschiedene Netzbetreiber versorgen die Betriebshöfe derzeit mit Strom, wobei das Unternehmen Netze ODR GmbH als Verteilernetzbetreiber bei 9 Betriebshöfen fungiert. Die Netzbetreiber Stadtwerke Schwäbisch Gmünd GmbH sowie Stadtwerke Aalen versorgen jeweils einen Betriebshof.

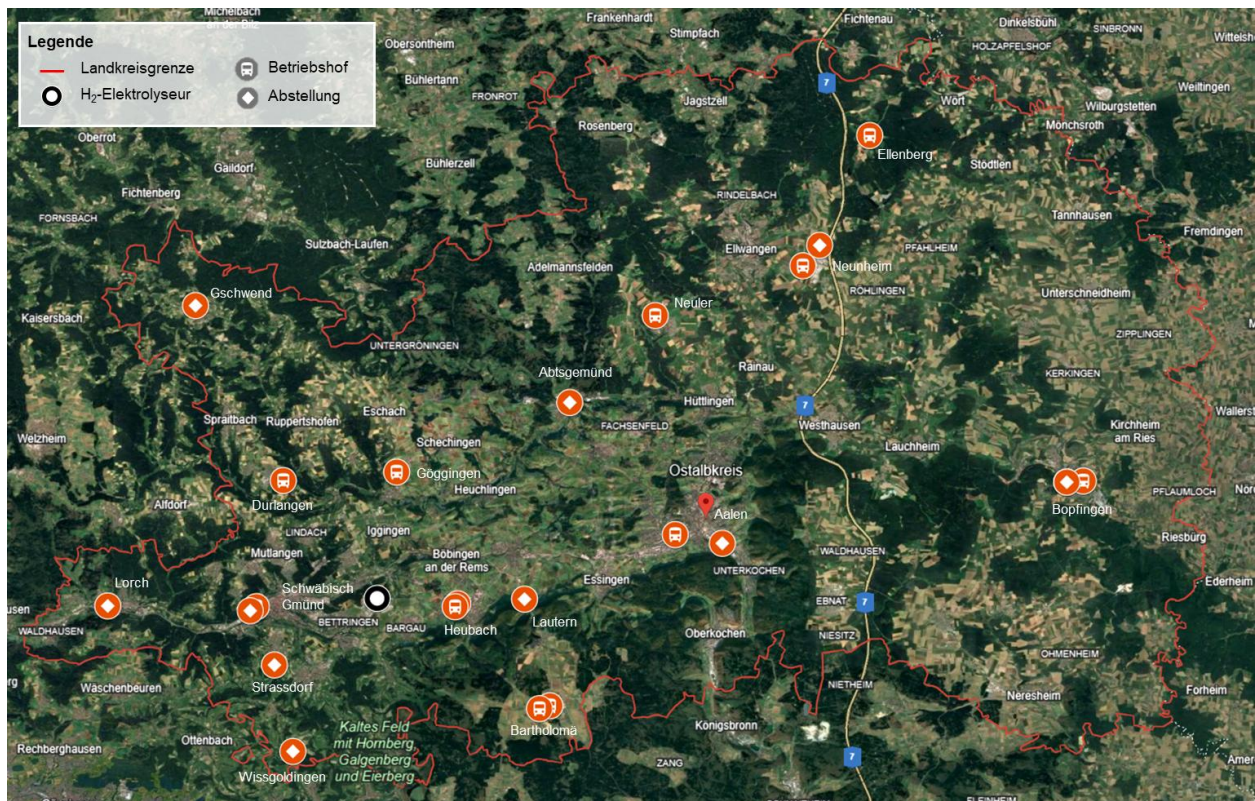


Abbildung 4: Standorte der untersuchten Busunternehmen im Ostalbkreis

Busflotte und untersuchte Umläufe

Bei den acht untersuchten Busunternehmen werden derzeit 211 Busse in sechs verschiedenen Gefäßgrößen eingesetzt. Dabei sind 12-m-Solo-Busse mit einem Anteil von 71% der dominante Fahrzeugtyp. Jeweils 8% der Busse können der Kategorie „Solo (> 12 m)“ sowie „Mini (Sprinter)“ zugeordnet werden. 7% der Busse gehören zur Kategorie „Gelenk (18 m)“ sowie jeweils 3% zu „Doppeldecker (14 m)“ und „Mini (PKW)“.

Bezugsgröße der vorliegenden Machbarkeitsstudie sind allerdings nicht die vorhandenen Fahrzeuge, sondern die Umläufe, die die Busunternehmen mit den Fahrzeugen bedienen. Ein Umlauf umfasst sämtliche an einem Tag gefahrenen Kilometer eines Fahrzeugs von seiner Abfahrt bis zu seiner Rückkehr an den Ausgangspunkt. Ein Umlauf enthält neben den Kursfahrten auch Pausen, Wendezeiten an den Endhaltestellen und eventuell Ein- und Aussetzfahrten von der Abstellanlage zur Linie und zurück. Ein Kurs ist die einzelne, fahrplanmäßige Fahrt auf einer Linie. Für die Machbarkeitsstudie wird ein Referenztag für jedes Umlaufbündel (bzw. jeden Standort eines Verkehrsunternehmens) abgeleitet, an welchem die längsten Umläufe nach Dauer und Strecke gefahren werden (Schulfahrplan an Werktagen, Montag bis Freitag). Durch den Fokus auf einen Referenztag je Verkehrsunternehmen liegt der Fokus der Machbarkeitsstudie insgesamt auf 205 relevanten Umläufen, wobei auch hier die relevante Gefäßgröße, mit welcher die Umläufe aufgrund des Fahrgastaufkommens zu bedienen ist, die Kategorie „Solo (12m)“ mit 76% darstellt. Abbildung 5 stellt die Zusammensetzung nach Gefäßgrößen der derzeitigen Busflotte und der untersuchten Umläufe innerhalb der vorliegenden Machbarkeitsstudie dar. Die Angabe zu den Bussen in Abbildung 5 (links) weicht von der Anzahl der untersuchten Umläufe (rechts) ab, da nicht alle Busse der VUs²⁵ an den jeweiligen Referenztagen eingesetzt werden.

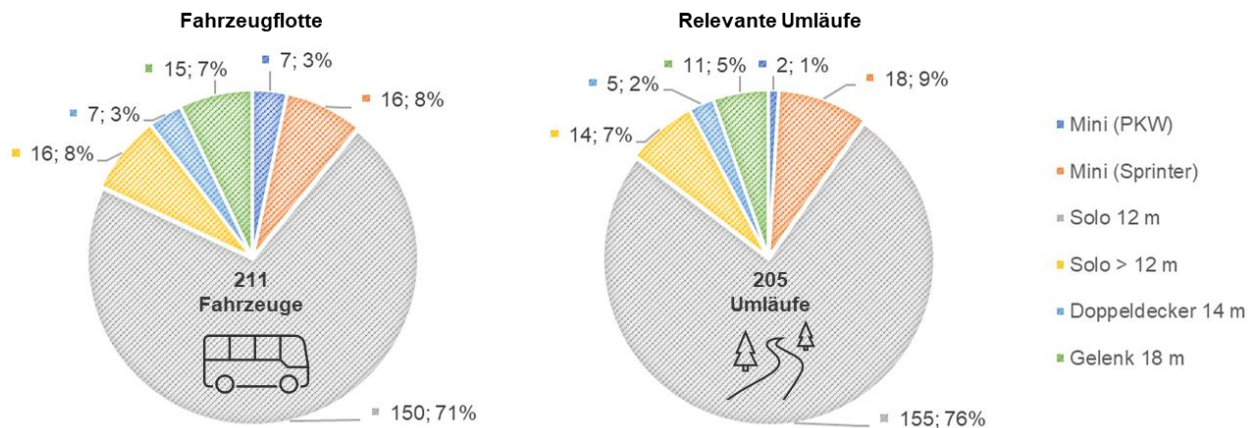


Abbildung 5: Derzeitige Busflotte (links) und untersuchte Umläufe (rechts) innerhalb der vorliegenden Machbarkeitsstudie

Abbildung 6 stellt die durchschnittlichen Umlauf- und Kursgesamtlängen nach Gefäßgrößen dar, inklusive der ermittelten Streuung bezüglich Umlauf- bzw. Kurslänge. Die durchschnittliche Umlauf- und Kurslänge variiert dabei je Gefäßgröße. Während Busse der Größe „Mini (PKW)“ im Durchschnitt 82 km innerhalb eines Umlaufs fahren, fahren 12-m-Solo-Busse 223 km und Gelenkbusse 198 km.

²⁵ Die Anzahl der Fahrzeuge wurde im Rahmen der Bereitstellung der Umlaufdaten an Sphera übermittelt.

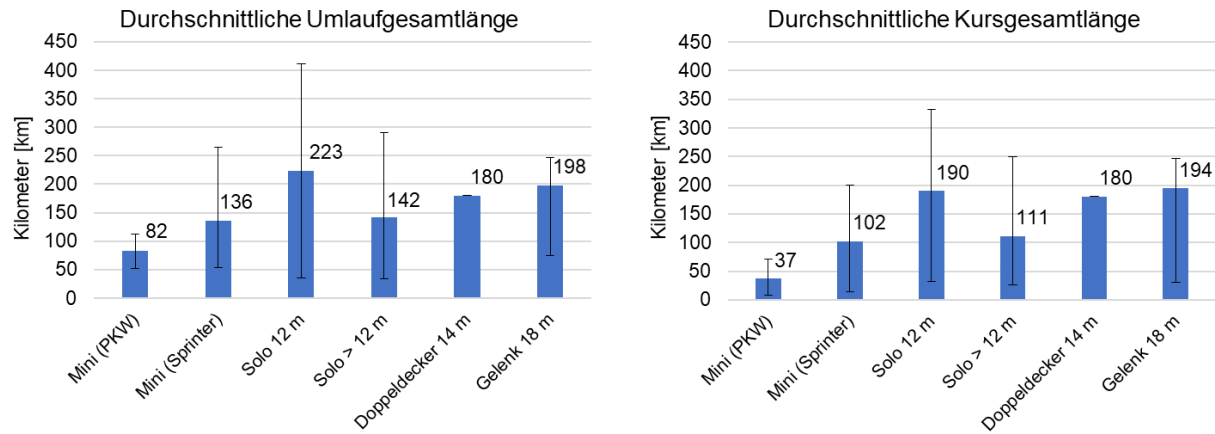


Abbildung 6: Durchschnittliche Umlauf- (links) und Kursgesamtlänge (rechts) nach Gefäßgröße

Über das gesamte Jahr betrachtet liegt die gesamte Fahrleistung der Referenzflotte bei knapp 8,4 Mio. km. Die Nutzungsdauer der Dieselsebuse beträgt durchschnittlich rund 13 Jahre und liegt damit etwas über der angestrebten Höchstnutzungsdauer des Landkreises entsprechend des Nahverkehrsplans Ostalbkreis (8).

Neigungsverteilung

Für die Berechnung der individuellen Verbrauchswerte der Busse wurden eine durchschnittliche Neigungsverteilungen für den Ostalbkreis²⁶ angenommen. Die angenommenen Topographiedaten für den Ostalbkreis sind in Tabelle 7 aufgeführt. In Kombination mit der spezifischen Reisegeschwindigkeit der Busse entsprechend ihrer Umläufe werden die Verbrauchswerte für äquivalente Fahrzeuge mit batterieelektrischem Antrieb und wasserstoffbetriebenem Antrieb berechnet. Die berechneten Energieverbräuche wurden mittels des Abgleichs der berechneten Dieselsebverbrauchsdaten mit den realen Dieselsebverbrauchsdaten, die von den an der Studie beteiligten Verkehrsunternehmen im Rahmen der Datenerhebung bereitgestellt wurden, plausibilisiert bzw. angepasst.

Tabelle 7: Verteilung der Neigungsklassen im Landkreis Ostalbkreis

Neigungsklasse	0%	+/- 2%	+/- 4%	+/- 6%
Anteil [%]	33	39	17	11

3.2 Mittlerer Fahrenergiebedarf

In Abhängigkeit der Gefäßgröße und der Topografiekenndaten des Ostalbkreis (Neigungsverteilung) und Durchschnittsgeschwindigkeit wird der Fahrenergieverbrauch je Busunternehmen und Gefäßgröße im Winterbetrieb als energetischer Worst Case ermittelt.

Für batterieelektrische Busse wird ein wärmepumpenbasiertes Fahrzeugklimatisierungskonzept berücksichtigt, das sich mittlerweile als Standard etabliert hat. Dieses wird bei tiefen Temperaturen mit einer flüssigkraftstoffbasierten Zusatzheizung unterstützt, d. h. im Rahmen der

²⁶ Datengrundlage sind Längsneigungsdaten aller Kreis-, Landes- und Bundesstraßen im Ostalbkreis und wurden vom Regierungspräsidium Tübingen zur Verfügung gestellt.

Studie wird kein rein elektrisches Heizkonzept berücksichtigt, da es sich gezeigt hat²⁷, dass sich für dieses insgesamt nochmals emissionsärmere Konzept bei tiefen Temperaturen (unter -10 °C) doch sehr hohe Reichweiteneinbußen (bis zu 50%) ergeben.

In Abbildung 7 wird für die untersuchte Busflotte in Abhängigkeit der Gefäßgrößen der mittlere Dieselverbrauch dargestellt, inkl. der beobachteten Streuung über die betrachteten Verkehrsunternehmen hinweg.

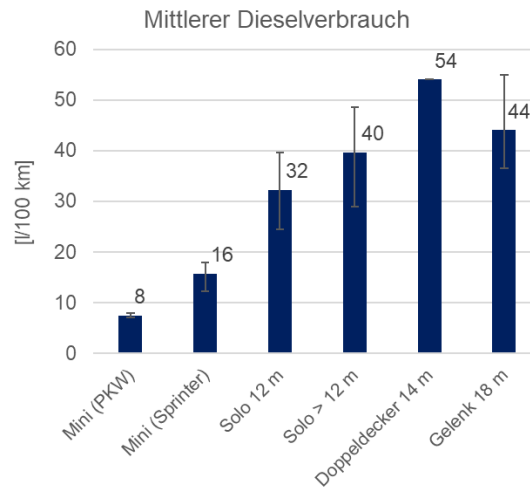


Abbildung 7: Mittlerer Dieselverbrauch der untersuchten Busflotte

Auf Basis des durchschnittlichen Dieselverbrauchs der jeweiligen Gefäßgröße kann der Fahrenergiebedarf für batterieelektrische und wasserstoffbetriebene Busse rechnerisch abgeschätzt werden. Pro Kilometer werden beispielsweise für den Betrieb eines batterieelektrischen 12-m-Solobusses durchschnittlich 1,3 kWh benötigt (Minimaler Verbrauch: 1,0 kWh, maximaler Verbrauch: 1,6 kWh). Der Durchschnittsverbrauch eines äquivalenten Brennstoffzellenbusses (Solo (12 m)) liegt bei 7,9 kg H₂/100 km (Minimaler Verbrauch: 6 kg H₂/100 km, maximaler Verbrauch: 9,8 kg H₂/100 km). Der Referenzwert des äquivalenten Dieselmotors liegt bei durchschnittlich 32 l/100 km. Der ermittelte mittlere Strom- und Wasserstoffverbrauch je Gefäßgröße ist in Abbildung 8 dargestellt.

²⁷ Siehe die von Sphera koordinierte [Begleitforschung Bus](#) für das BMV oder die von PWC im Auftrag des BMWK durchgeführte [Begleituntersuchung](#).

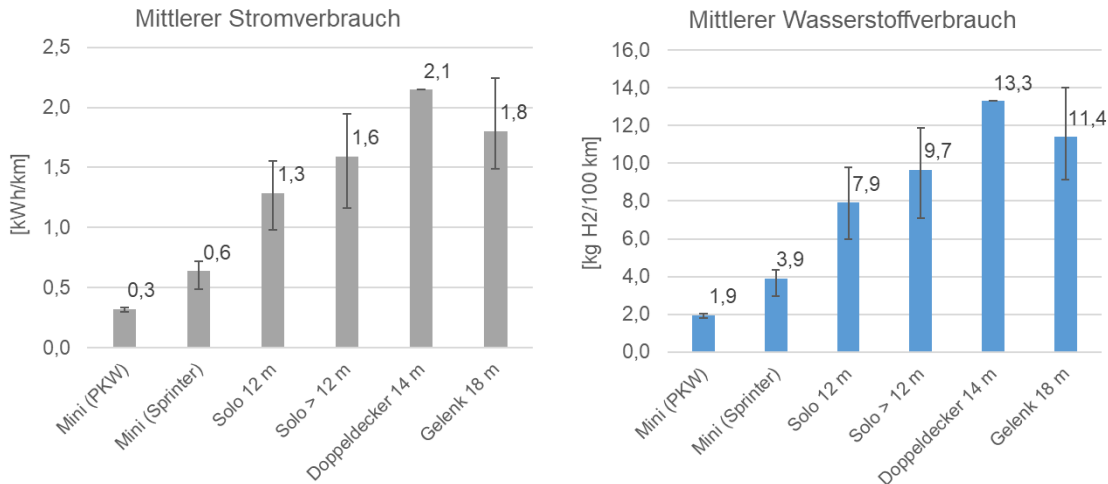


Abbildung 8: Mittlerer Strom- und Wasserstoffverbrauch der untersuchten Busflotte

3.3 Energiespeicherkapazität batterieelektrische und wasserstoffbetriebene Busse

Für batterieelektrische Busse werden insgesamt drei unterschiedliche Szenarien untersucht, die sich jeweils für die jeweilige Gefäßgröße durch eine spezifische Batteriekapazität charakterisieren lassen. Die Größenordnungen der Batteriekapazitäten orientieren sich dabei an Angaben von Herstellern (*engl., Original equipment manufacturer, OEM*) aktuell verfügbarer Busmodelle für den Personennahverkehr. OEM 1, OEM 2 und OEM Zukunft stellen in den Szenarien fiktive Hersteller dar, die batterieelektrische Busse unterschiedlicher Gefäßgrößen anbieten. Während die spezifisch nach Gefäßgröße angenommenen Batteriekapazitäten von OEM 1 (geringere Kapazität) und OEM 2 (höhere Kapazität) den Batteriekapazitäten von momentan am Markt verfügbaren batterieelektrischen Bussen entsprechen, stellt OEM Zukunft eine zukünftige Fahrzeugkonfiguration dar, bei der eine um 15% höhere Batteriespeicherkapazität gegenüber dem OEM-2-Fahrzeug angenommen wird, da auch zukünftig noch von einer weiteren Steigerung der Energiedichte und damit der Speicherkapazität ausgegangen wird²⁸.

Tabelle 8 stellt die angenommenen Batteriekapazitäten je Gefäßgröße basierend auf den drei verwendeten Fahrzeugkonfigurationen (OEM 1, OEM 2, OEM Zukunft) dar. Da bei HV-Batterien zur Steigerung der Lebensdauer extreme Ladezustände (<10%, >90% SoC) vermieden werden sollten, entspricht die angegebene Nennkapazität nicht der tatsächlich nutzbaren Kapazität. Diese liegt üblicherweise im Bereich von 85% der Nennkapazität (SoC), Abweichungen von einem zum anderen Hersteller sind hierbei möglich. Hinzu kommt eine kalendarische Alterung der Batterie, die ebenfalls zu berücksichtigen ist, damit auch am Lebensende der Batterie die benötigten Reichweiten noch zuverlässig erreicht werden. Das Lebensende einer HV-Batterie ist in der Regel erreicht, wenn die Restkapazität der HV-Batterie noch ca. 80% der ursprünglich Nennkapazität beträgt. Zur Bestimmung der nutzbaren Batteriekapazität wurde demnach von einem max. SoC von 85% und einem SoH von 80% ausgegangen (Werte in Klammern in Tabelle 8).

²⁸ So hat beispielsweise Mercedes-Benz für 2026 die nächste Batteriegeneration (NMC4) angekündigt, die gegenüber der aktuellen Batterietechnologie NMC3 eine um 13% höhere Energiekapazität aufweist.

Tabelle 8: Übersicht angenommener Batteriekapazitäten je Gefäßgröße basierend auf verschiedenen Herstellern (OEM 1, OEM 2) bzw. Zukunftsprognose (OEM Zukunft)

Installierte Kapazität (Nutzbar)	Mini (PKW)	Mini (Sprinter)	Solo (12 m)	Solo (> 12 m)	Doppel- decker	Gelenk (18 m)
	[kWh/km]					
OEM 1	75 (51)	88 (60)	480 (326)	540 (367)	472 (321)	550 (374)
OEM 2*	100 (68)	115 (78)	588 (400)	563 (383)	528 (359)	686 (454)
OEM Zukunft	115 (78)	132 (90)	676 (460)	647 (440)	607 (413)	789 (536)

* OEM 2 wird als Referenzszenario für die technische Machbarkeitsanalyse zugrunde gelegt.

Um die Speicherkapazität von Wasserstofftanks zu erhöhen, können diese entweder volumenseitig vergrößert werden oder der Speicherdruck erhöht werden. Da eine Speicherdruckerhöhung von 350 auf 700 bar mit überproportional steigenden Investitionen sowohl auf der Fahrzeug- als auch der Tankstellenseite verbunden ist, scheidet diese Option zur Kapazitätssteigerung aus. Bezüglich dem Wasserstoff-Tankvolumen ist der verfügbare Bauraum ausschlaggebend. Für wasserstoffbetriebene Busse (BZ) werden daher insgesamt zwei Szenarien untersucht, die die angebotenen Tankkapazitäten verschiedener Hersteller abbilden. OEM 1 stellt dabei einen Hersteller mit kleineren Tankvolumina dar, OEM 2 einen Hersteller mit entsprechend größeren Tankvolumina für die unterschiedlichen Gefäßgrößen. Tabelle 9 stellt die angenommenen Wasserstofftankkapazitäten für die beiden Szenarien (OEM 1 und OEM 2) in Abhängigkeit der untersuchten Gefäßgrößen dar. Da Wasserstofftanks nicht komplett entleert werden sollten (nicht unter 15 bis 20 bar), wird auch hier analog zu den HV-Batterien mit einem nutzbaren Tankinhalt gerechnet – dieser entspricht ca. 95% des Nennvolumens (Werte in Klammern in Tabelle 9).

Tabelle 9: Übersicht angenommener Wasserstofftankkapazitäten je Gefäßgröße basierend auf verschiedenen Herstellern (OEM 1, OEM 2)

Installierter Wasserstofftank (Nutzbar)	Mini (PKW)	Mini (Sprinter)	Solo (12 m)	Solo (> 12 m)	Doppel- decker	Gelenk (18 m)
	[kg/100 km]					
OEM 1	-	-	25 (23,7)	25 (23,7)	27 (25,7)	35 (33,3)
OEM 2*	-	10,5 (10,0)	37,5 (35,6)	37,5 (35,6)	29,4 (27,9)	51,2 (48,6)

* OEM 2 wird als Referenzszenario für die technische Machbarkeitsanalyse zugrunde gelegt.

3.4 Ermittlung umstellbarer Umläufe

Die Grundlage zur Ermittlung der umstellbaren Umläufe bildet der bereits beschriebene Referenztag basierend auf den Schulfahrplänen Montag bis Freitag an Werktagen, da hier die meisten Fahrten und längsten Umläufe (hinsichtlich Zeit und Strecke) zu verzeichnen sind. Dabei wird für die verschiedenen Gefäßgrößen der jeweils mittlere Dieserverbrauch entsprechend des

spezifischen Busunternehmens zugrunde gelegt. Fehlt diese Angabe, wird ein generischer mittlerer Dieserverbrauch angenommen. Für den überwiegenden Teil der untersuchten Umläufe (und Gefäßgrößen) ist diese Angabe vorhanden. Um zu ermitteln, welche Umläufe sich bei den betrachteten Busunternehmen aus technisch-betrieblicher Sicht umstellen lassen, wurden je Busunternehmen für jeden einzelnen Umlauf der Fahrenergiebedarf in kWh elektrischer Energie bzw. kg Wasserstoff ermittelt. Betrachtet wurde der für die Auslegung relevante Worst-Case-Fall, d. h. es wird der energetische ungünstigste Fall (Einsatz im Winter bei niedrigen Außentemperaturen) herangezogen. Dazu wurden die jeweiligen Umlauflängen, und die sich aus der gegebenen mittleren Reisegeschwindigkeit und Topografie ergebenden kilometerbezogenen Verbräuche ermittelt und miteinander multipliziert (siehe Kapitel 0).

Für batterieelektrische Busse wird, wie eingangs erwähnt, ein wärmepumpenbasiertes Fahrzeugklimatisierungskonzept mit flüssigkraftstoffbasierten Zusatzheizung berücksichtigt (s. Kapitel 3.2).

Neben den Umläufen erfolgt eine Bestandsaufnahme des aktuellen Betriebs (Fahrtunterbrechungen mit und ohne Rückkehr ins Depot, Fahrzeugversorgung, etc.). Damit kann die verfügbare Ladezeit und ggf. Möglichkeiten für Zwischenladungen für jedes Fahrzeug bestimmt werden.

Mit den dargestellten Grundlageninformationen wird zunächst die mögliche Umstellung auf batterieelektrische Fahrzeuge überprüft, da dies in aller Regel die technisch einfachere und auch häufig wirtschaftlichere Lösung darstellt. Dabei wird für die Depotladung betriebshofspezifisch eine möglichst geringe Ladeleistung je Ladepunkt angenommen, durch die einerseits möglichst viele Umläufe durch ein batterieelektrisches Fahrzeug bedienbar sind, aber andererseits auch gleichzeitig eine möglichst geringe Spitzenlast am Netzanschluss des Standorts erreicht werden soll. Für die Depotladung wurde im Durchschnitt eine Ladeleistung von ca. 45 kW je Ladepunkt angenommen.²⁹

Abbildung 9 zeigt für einen beispielhaften Betriebshof mit dazugehörigen Umläufen, umgesetzt durch verschiedene Gefäßgrößen, für einen Referenztag beispielhaft das visualisierte Ergebnis der technischen Machbarkeitsanalyse für batterieelektrische Fahrzeuge. Von den dabei dargestellten 21 Umläufen, zusammengesetzt aus 30 Kursen, sind 19 technisch auf Fahrzeuge mit batterieelektrischen Antrieben umstellbar. Bei zwei der Umläufe sind die Umlauflängen zu lang um mit der angenommenen Batteriekapazität realisiert werden zu können (dargestellt in Rot).

²⁹ Innerhalb der Detailanalyse der einzelnen Betriebshöfe wurde die Ladeleistung je Betriebshof so gewählt, dass möglichst viele Umläufe realisiert werden können und gleichzeitig die gesamte Ladeleistung am Standort möglichst niedrig bleibt. Die Bandbreite der gewählten Ladeleistung je Ladepunkt lag über die 8 untersuchten Busunternehmen hinweg zwischen 10 kW und 85 kW.

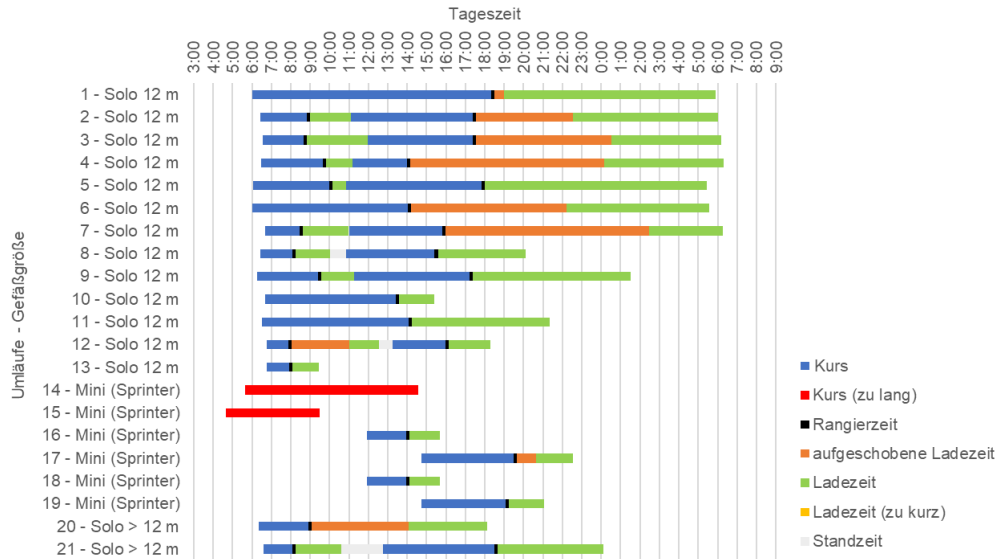


Abbildung 9: Darstellung der technischen Machbarkeit für batterieelektrische Fahrzeuge für einen beispielhaften Betriebshof mit dazugehörigen Umläufen für einen Referenztag

Sollte der Einsatz batterieelektrischer Fahrzeuge aufgrund zu langer Umläufe oder ungenügender Ladezeit nicht möglich sein, wird die Möglichkeit für den Einsatz von wasserstoffbetriebenen Bussen untersucht. Abbildung 10 zeigt, in der gleichen Logik wie Abbildung 9, die grafische Darstellung der technischen Machbarkeitsanalyse für die Umstellung auf wasserstoffbetriebene Fahrzeuge. Für den beispielhaften Standort wären alle Umläufe mit Wasserstoffbussen bedienbar. Das Ergebnis, dass sich alle Umläufe mit BZ Bussen bedienen lassen, ist repräsentativ für diese Technologie und stellt einen der wesentlichen Vorzüge dieser Technologie dar (siehe nachfolgendes Kapitel 3.5).

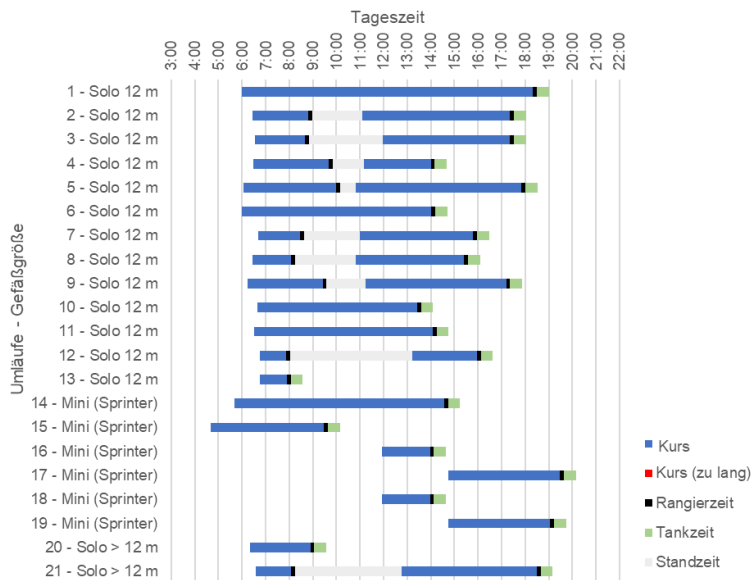


Abbildung 10: Darstellung der technischen Machbarkeit für wasserstoffbetriebene Fahrzeuge für einen beispielhaften Betriebshof mit dazugehörigen Umläufen für einen Referenztag

Um technologiespezifische Ergebnisse zu erhalten, wurde keine Mischung der analysierten Technologien berücksichtigt.

3.5 Technische Machbarkeit je Umlauf bzw. Gefäß

Anhand der bereitgestellten Umlaufpläne wird zunächst die technische Machbarkeit für eine Umstellung auf batterieelektrische Fahrzeuge überprüft. Grundsätzlich ist anzumerken, dass für alle ZEV kein Fahrzeugmehrbedarf sowie keine betrieblichen Anpassungen im Sinne einer angepassten Dienst- und Fahrzeugplanung innerhalb der nachfolgenden Analyse berücksichtigt wurden. Ist ein Umlauf durch das äquivalente ZEV im Rahmen des Technologieszenarios OEM 2 nicht bedienbar, wird er als nicht machbar bewertet. Es sei allerdings anzumerken, dass die Ergebnisse mit den beteiligten Verkehrsunternehmen bilateral diskutiert wurden und dabei verschiedene technische und betriebliche Optionen (z.B. (moderate) Anpassung der Umlaufplanung) konkret erörtert, die eine Umstellung zumindest einzelner Umläufe auf ZEV, die im Sinne der durchgeführten Analyse als nicht-machbar klassifiziert wurden, ermöglichen können.

Abbildung 11 stellt die technische Machbarkeit für eine Umstellung auf batterieelektrische Fahrzeuge nach Gefäßgrößen dar. Auch wenn eigenwirtschaftliche Verkehre nicht unter die CVD Quotenvorgabe für emissionsfreie Busse fallen, wurde die ab 2026 geltende CVD-Quote (32,5%) als Anhaltspunkt mit in die Grafik aufgenommen. Über alle Gefäßgrößen hinweg sind im Ergebnis der Untersuchung theoretisch insgesamt 89% der 205 untersuchten Umläufe mit batterieelektrischen Fahrzeugen bedienbar. Für die am häufigsten eingesetzte Gefäßgröße 12-m-Busse sind 92% der Umläufe mit der Fahrzeugkonfiguration „OEM 2“ machbar. Bei den Gelenkbussen lassen sich alle Umläufe mit batterieelektrischen Bussen bedienen. Für die Kategorie „Mini (Sprinter)“ erweisen sich die verfügbaren Batteriekapazitäten in den Fahrzeugen häufig als zu gering für die Anforderungen der zu bedienenden Umläufe und die damit verbundenen Umlaufdistanz. Daher sind in Bezug auf diese Fahrzeugkategorie nur 56% der Umläufe machbar. Für die Doppeldeckerbusse zeigt sich ein noch deutlicheres Bild. Keiner der Umläufe ist mit heutigen BEV-Bussen bedienbar, wobei die Umläufe rechnerisch mit der für die „OEM Zukunft“ Fahrzeugkonfiguration angenommene Batteriekapazität machbar wären.

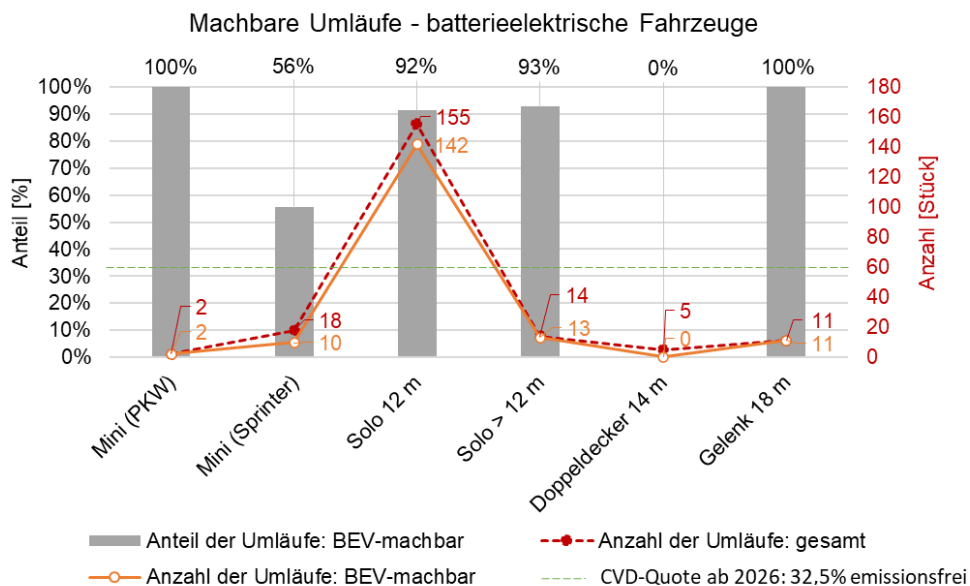


Abbildung 11: Technische Machbarkeit für eine Umstellung auf batterieelektrische Fahrzeuge

Neben der Umstellung auf batterieelektrische Busse wurde auch der Einsatz von wasserstoffbetriebenen Bussen untersucht, der sich gerade auch dann anbieten sollte, sollte der Einsatz batterieelektrischer Fahrzeuge aufgrund zu langer Umläufe oder ungenügender Ladezeit nicht möglich sein. Abbildung 12 stellt die technische Machbarkeit für eine Umstellung auf wasserstoffbetriebene Fahrzeuge nach Gefäßgrößen dar, wiederum inklusive der ab 2026 geltenden CVD-Quote (32,5%). Über alle Gefäßgrößen hinweg sind in Summe 99% der 205 untersuchten Umläufe mit wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen bedienbar. Da kein marktfähiges Fahrzeug für die Kategorie „Mini (PKW)“ verfügbar ist, werden diese Umläufe als nicht machbar bewertet. Zudem existieren für die Kategorien „Solo (> 12 m)“ derzeit keine marktfähigen wasserstoffbetriebenen Busmodelle, weshalb für die Kategorie die Abschätzungen auf Basis der Kategorie „Solo (12 m)“ durchgeführt wurden. Trotz der angenommenen kleineren Tankkapazitäten des kürzeren Fahrzeuges (Solo (12 m)) sind die Umläufe für die Gefäßgröße „Solo (> 12 m)“ machbar.

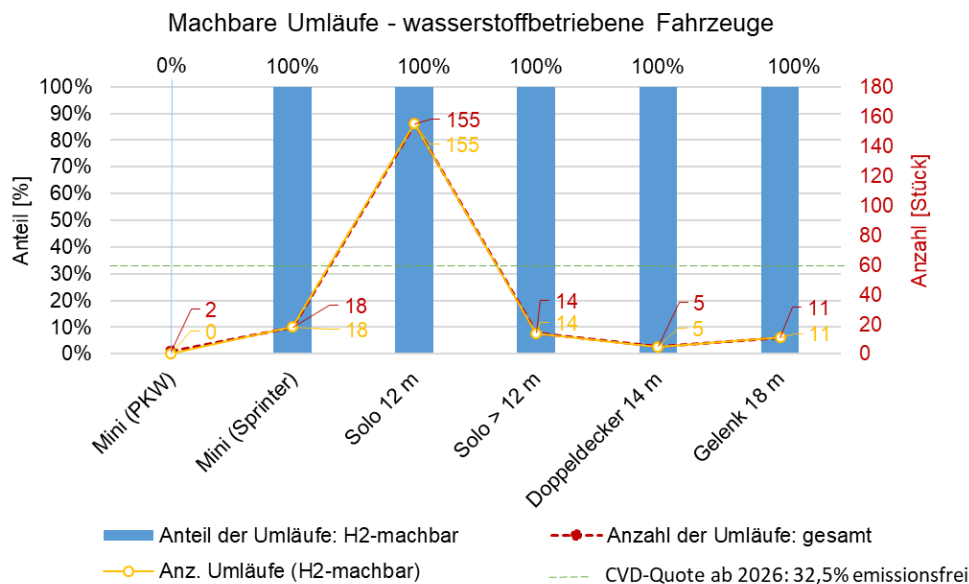


Abbildung 12: Technische Machbarkeit für eine Umstellung auf wasserstoffbetriebene Fahrzeuge

Von den 205 bei den 8 Busunternehmen untersuchten Umläufen können rechnerisch je nach Technologie 178 (BEV, 87%, Abbildung 11) bis 203 (FCV, 99%, Abbildung 12) Umläufe mit emissionsfreien Busse (ZEV) betrieben werden.

Tabelle 10 zeigt zusammenfassend den Anteil der minimal und maximal umstellbaren Umläufe je Antriebstechnologie (BEV und FCV) und Verkehrsunternehmen sowie über die Gesamtflotte aller untersuchten Busunternehmen hinweg. Während mit batterieelektrischen Bussen bereits 80 bis 100% je VU bzw. in Summe 87% aller Umläufe der untersuchten VUs umstellbar sind, sind es mit wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen 80% bis 100% und in Summe 99% aller Umläufe.

Tabelle 10: Übersicht technische Machbarkeit nach Antriebstechnologien (Gesamtbetrachtung über alle untersuchten VUs); Anteile der machbaren Umläufe

Technologie	Technische Machbarkeit der Umläufe mit ZEV		
	Min. je VU	Max. je VU	Anteil über Gesamtflotte
BEV	80%	100%	87%
FCV	80%	100%	99%

4. AP3: Bedarfsanalyse und Mehrkostenbetrachtung

4.1 Ermittlung der Anschlussleistung je Betriebshof sowie Möglichkeiten zur Lastgangoptimierung

Ein weiterer relevanter Aspekt für die Einführung batterieelektrischer Busse neben der Analyse des umlaufbezogenen Energiebedarfs ist die Analyse der Energieversorgung der Fahrzeuge. Anhand der technischen Machbarkeitsanalyse aus AP2, wird der Infrastrukturbedarf (Ladeinfrastruktur) für die Flottenumstellung auf batterieelektrische Fahrzeuge je Betriebshof ermittelt.

Hierzu werden für die Umstellung die Möglichkeiten zur Lastgangoptimierung abgeschätzt. Lastgangoptimierung beim Betrieb von batterieelektrischen Bussen bedeutet, den Energiebedarf für das Laden der Fahrzeuge so zu steuern, dass Lastspitzen möglichst vermieden und die Stromaufnahme möglichst gleichmäßig über den Tag verteilt wird. Wenn alle Busse gleichzeitig mit voller Leistung laden, entstehen hohe Lastspitzen, die zu hohen Netzanschlusskosten und hohen monatlichen Leistungskosten führen. Durch intelligente Ladeplanung – beispielsweise zeitlich versetztes Laden oder dynamische Anpassung der Ladeleistung – kann der Lastgang geglättet werden. Ziel ist es, die Ladeinfrastruktur wirtschaftlich und technisch optimal zu dimensionieren und zu betreiben, ohne die Verfügbarkeit der Busse im Linienverkehr zu gefährden.

In der technischen Machbarkeitsanalyse wurde für die Depotladung bereits betriebshofspezifisch eine reduzierte Ladeleistung je Ladepunkt angenommen, mit der die Machbarkeit möglichst vieler Umläufe realisiert werden kann. Neben der reduzierten Ladeleistung wurde in der Bedarfsanalyse eine Ladezeitoptimierung durchgeführt. Hier wird davon ausgegangen, dass die Busse bedarfsgerecht zeitlich versetzt im Depot geladen werden. Durch eine betriebshofspezifische Ladezeitoptimierung konnte die jeweils berechnete Spitzenlast im Durchschnitt um 23% reduziert werden. Tabelle 11 zeigt die aggregierte Ergebnisse der Lastgangoptimierung über alle Betriebshöfe.

Tabelle 11: Aggregierte Ergebnisse der Lastgangoptimierung über alle Betriebshöfe

Ladeleistung pro Betriebshof	Min.	Max.	Durchschnitt
Reduzierte Ladeleistung pro Ladepunkt [kW]	11	1596	457
Ladezeitoptimiert [kW]	11	1117	339
Reduktionspotenzial durch Ladezeitoptimierung	0%	-50%	-23%

Abbildung 13 zeigt beispielhaft den optimierten Lastgang eines beispielhaften Referenztages für einen beispielhaften Betriebshof mit 6 von 7 machbaren Umläufen, einer zugrundeliegenden Ladeleistung je Ladepunkt von 45 kW und einen Gleichzeitigkeitsfaktor je Ladepunkt von 0,5, d. h. es laden max. 3 Busse zur gleichen Zeit. Die Anzahl der notwendigen Ladepunkte entspricht der Anzahl machbarer Umläufe unter Annahme des mittleren Verbrauchwertes mit der BEV-Fahrzeugkonfiguration „OEM 2“.

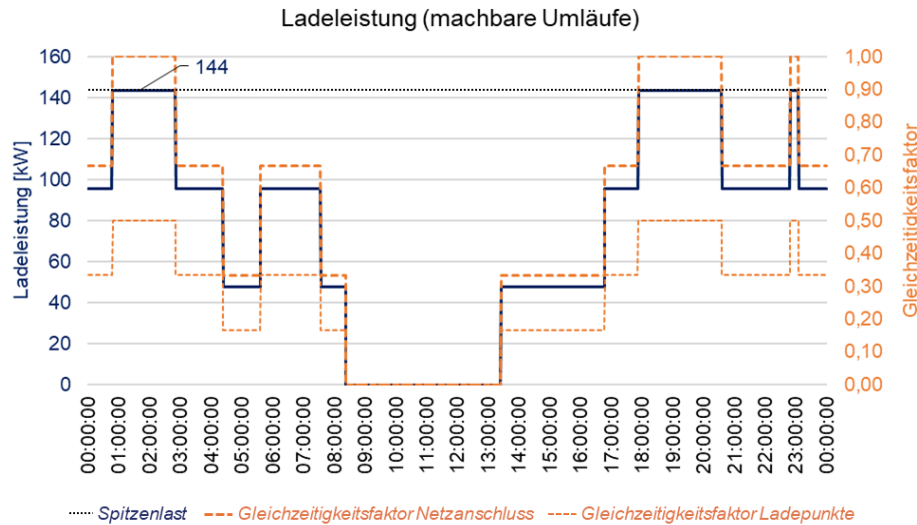


Abbildung 13: Lastgang eines beispielhaften Betriebshofs an einem Referenztag (Depotladung)

Für alle untersuchten Betriebshöfe wurde auf Basis entsprechender Ladeleistungskurven und den damit verbundenen Hintergrundinformationen mit den zuständigen Netzbetreibern geklärt, ob die notwendige Anschlussleistung zur Verfügung gestellt werden kann. Es wurden keine größeren Sicherheitsfaktoren berücksichtigt – nur eine Reserve von 10% für den Netzanschluss, aber keine weiteren Verbraucher. Grundlage der Abschätzung ist nur die reine netzseitig notwendige Anschlussleistung (als Wirkleistung, d. h. ohne Berücksichtigung Blindleistung).

Auf Basis erster Abschätzungen der Verteilernetzbetreiber wäre an allen 11 untersuchten Betriebshöfen grundsätzlich eine Erhöhung der spezifisch erforderlichen Netzanschlussleistung innerhalb eines Jahres nach offizieller Antragstellung realisierbar, d. h. es bestehen aus heutiger Sicht an keinem der untersuchten Betriebshöfe grundlegende Netzengpässe, die die Einführung batterieelektrischer Busse verzögern bzw. erschweren würden.

4.2 Flächenbedarf von Ladeinfrastruktur sowie Umrüstungspotenzial vorhandener Betriebshöfe

Für ein Busverkehrsunternehmen, das batterieelektrische Busse betreibt, hängt der Flächenbedarf der Ladeinfrastruktur stark vom gewählten Ladekonzept, der Flottengröße, dem Betriebshoflayout und der Ladeleistung ab und ist konkret nur durch eine Detailplanung unter Berücksichtigung der Standort- und Betriebsanforderungen konkret bestimmbar. Tabelle 12 beinhaltet für die notwendigen Komponenten eine grobe Abschätzung zu den typischen Flächenanforderungen.

Tabelle 12: Typische Flächenanforderungen der Ladeinfrastruktur anhand einzelner Komponenten

Komponenten	Typische Flächenanforderungen
Ladeeinrichtungen	Depotladung mit CCS (Stecker) Platzbedarf pro Bus: ca. 70–100 m ² : - Platzbedarf pro Ladepunkt: ca. 20–30 m ² - Ggf. zusätzliche Rangierfläche bei Blockabstellung: ca. 50–70 m ² pro Bus
	Pantographen (automatisches Laden von oben) Platzbedarf pro Bus: ca. 50–100m ² : - Platzbedarf pro Ladepunkt: ähnlich wie CCS

Trafostation / Umspannstation	Platzbedarf: ca. 20–50 m ² pro Station: - Größe: je nach Leistung (z. B. 300kVA–2 MVA) - Anzahl: abhängig von der Gesamtanschlussleistung (z. B. 1 Station pro 10–20 Busse)
Netzanschluss & Technikflächen	Platzbedarf: ca. 10–20 m ² pro Ladegruppe: - Kabeltrassen, Schaltschränke, Verteilerschränke
IT- und Lademanagementsysteme	Platzbedarf: ca. 5–10 m ² , oft in bestehender Infrastruktur integrierbar: - Serverräume / Steuerungseinheiten
Werkstatt- und Wartungsflächen	Platzbedarf: ca. 50–100 m ² zusätzlich zur bestehenden Werkstatt: - Spezialbereiche für Hochvoltarbeiten außerdem Einrichtung Dacharbeitsstand mit entsprechender Sicherungstechnik, entweder fest oder mobil - Max. 25 bzw. 10-15% Busse pro baulicher Brandabschnitt, abhängig von Vorgaben der Versicherung
Brandabschnitte	- Abschottung durch feuerbeständige Trennwände (oder evtl. durch Brandschutzvorhänge) - Rettungswege: ≥ 1 m freie Flure
Havarie-/ Quarantäneflächen	- Mind. 1–2 Abstellplätze, für gestörte Fahrzeuge.

Anhand der ermittelten Anschlussleistung sowie den Abschätzungen der Verteilernetzbetreiber zum nötigen Aufwand der Flottenumstellung auf batterieelektrische Fahrzeuge, wurde die Möglichkeit zur Umrüstung der vorhandenen Betriebshöfe, d. h. die Eignung der Standorte zur Errichtung der erforderlichen Ladeinfrastruktur bewertet. Es erfolgte hierzu eine erste beispielhafte Verortung der einzelnen Ladeinfrastrukturkomponenten (Mögliche Bereich für Ladepunkte, ggf. Verortung des Trafos der Umspannstation) unter Berücksichtigung der bestehenden Busabstellung auf Basis von Satellitenbildern.

Bei allen untersuchten Betriebshöfen ist entsprechend der Verteilernetzbetreiber die Erhöhung der Anschlussleistung möglich. Die Platzverhältnisse sind entsprechend einer groben Analyse der Satellitenbilder bei den Standorten unter Berücksichtigung der technisch machbaren Flottenumstellung ausreichend³⁰.

Abbildung 14 zeigt schematisch einen bestehenden Betriebshof mit angrenzenden Erweiterungsflächen. Die Busse können von einem auf das andere Areal fahren (s. eingezeichnete Fahrspuren). Auf der linken Seite des Bildes, innerhalb der Erweiterungsfläche, sind mögliche Ladeplätze für BEV dargestellt. Im dargestellten Beispiel sollen für 17 Solobusse Abstellmöglichkeiten mit integrierter LIS realisiert werden. Die Abstellungen sind in einer Sägezahnstruktur angeordnet, welche aufgrund der Länge von 20 m theoretisch auch von Gelenkbussen angefahren werden können. Diese Anordnung ermöglicht ein direktes Ein- und Ausfahren ohne Rangiermanöver. Rechts im Bild befindet sich das bestehende Areal mit einer Halle, in der aktuell Dieselfahrzeuge abgestellt sind. Die Größenverhältnisse der BEV-Ladespuren zu der bestehenden Abstellung auf dem linken Areal, die in diesem Beispiel innerhalb einer Halle baulich umgesetzt ist, zeigt, dass durch den Umbau der Halle und die Integration von LIS aufgrund des höheren Platzbedarfs, Abstellflächen wegfallen werden. Gerade in einem umschlossenen Raum, wie der hier dargestellten Halle, sind bei der Integration von LIS und der Abstellung von BEV im Vergleich zu Dieselnissen zusätzliche Fluchtwege und Brandschutzmauern (ggf. Brandschutzvorhänge) einzuplanen.

³⁰ Die Flächenaufteilungen an den Betriebshöfen sowie Potenzialflächen zur Integration von LIS wurden mit den VUs gemeinsam identifiziert.

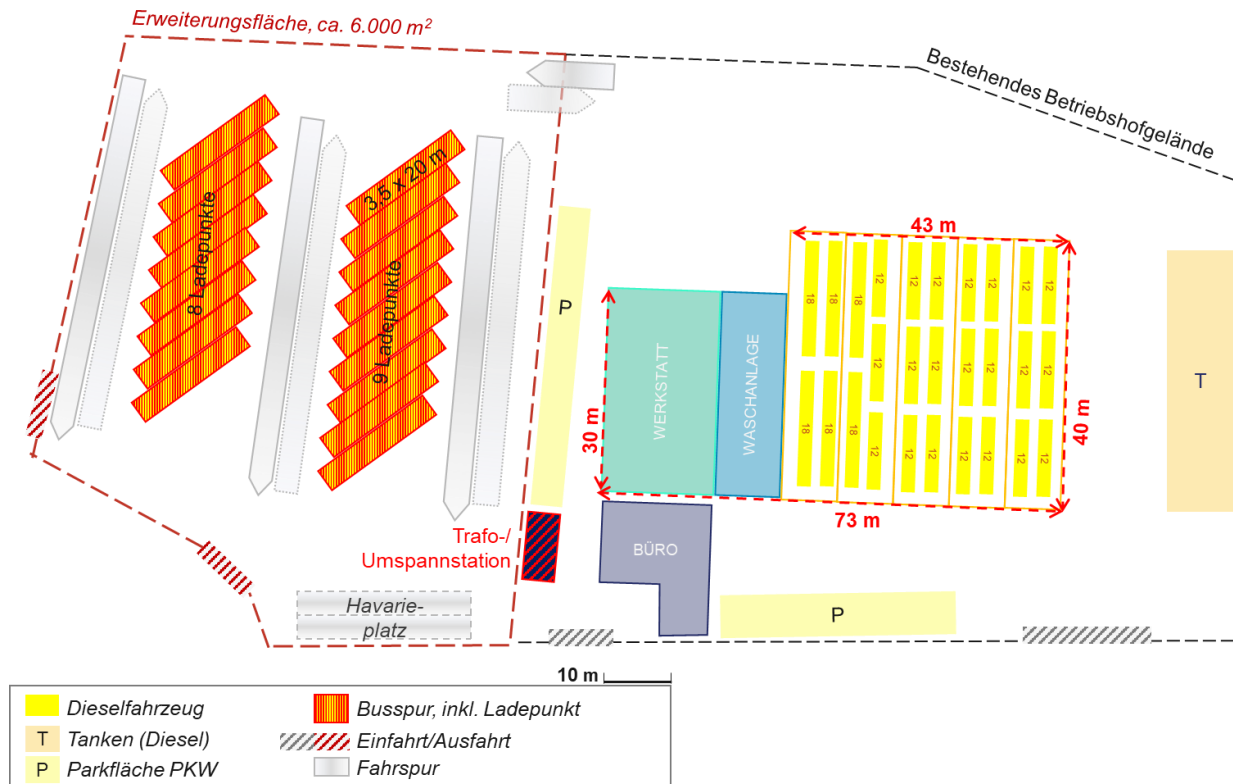


Abbildung 14: Beispielhaft Betriebshoferweiterung um 17 Ladespuren für BEV-Fahrzeuge

4.3 Alternative Betriebskonzepte für Ladeinfrastruktur

Bei der (Teil-)Umstellung auf eine batterieelektrische Busflotte wird üblicherweise ein betriebsinternes Betriebsmodell für die Ladeinfrastruktur gewählt. Beim Betriebshof basierten Betriebsmodell errichtet und betreibt jedes Verkehrsunternehmen seine eigene Ladeinfrastruktur ausschließlich für den eigenen Fuhrpark. Die Verantwortung für Planung, Finanzierung, Betrieb und Wartung liegt vollständig beim Unternehmen.

Demgegenüber sind weitere Betriebsmodelle, wie das unternehmensübergreifende und das externe Betriebsmodell, möglich. Beim unternehmensübergreifenden Betriebsmodell stellt ein Verkehrsunternehmen seine Ladeinfrastruktur einem weiteren Unternehmen zur Mitnutzung zur Verfügung. Die Infrastruktur wird gemeinsam genutzt, wobei organisatorische und technische Abstimmungen erforderlich sind. Die Eigentumsverhältnisse bleiben beim Betreiberunternehmen, während das Partnerunternehmen Nutzungsrechte erhält. Beim externen Betriebsmodell wird die Ladeinfrastruktur von einem externen Akteur, beispielsweise einer Kommune oder einem Energieversorger, betrieben. Die Infrastruktur steht mehreren Verkehrsunternehmen zur Verfügung und ist öffentlich oder halböffentlich zugänglich. Die Betreiberrolle liegt nicht bei den Verkehrsunternehmen, sondern bei einem neutralen Dritten. Beide Ansätze bieten Chancen zur Kostensenkung und Ressourcenschonung, bringen jedoch spezifische Herausforderungen mit sich. Im Folgenden werden diese Herausforderungen sowie mögliche Optimierungsstrategien näher erläutert.

Unternehmensübergreifendes Betriebsmodell

Die gemeinsame Nutzung von Ladeinfrastruktur durch mehrere Verkehrsunternehmen erfordert eine enge Abstimmung. Die zentralen Herausforderungen sind:

- *Koordination der Ladezeiten:* Da mehrere Unternehmen auf dieselben Ladepunkte zugreifen, besteht die Gefahr von Nutzungskonflikten. Besonders in Spitzenzeiten, etwa nachts oder in Betriebspausen, kann es zu Engpässen kommen. Ohne klare Regeln und digitale Steuerung drohen Verzögerungen im Betriebsablauf.
- *Abrechnung und Kostenteilung:* Die faire Verteilung der Investitions- und Betriebskosten ist komplex. Unterschiedliche Nutzungsintensitäten und Ladebedarfe erfordern transparente Abrechnungssysteme. Fehlende Standards können zu Konflikten führen.
- *Technische Kompatibilität:* Fahrzeuge verschiedener Hersteller haben unterschiedliche Ladeleistungen und Schnittstellen. Ohne einheitliche Standards kann die Nutzung eingeschränkt sein oder zusätzliche Investitionen in Adapter und Software erforderlich machen.
- *Datensicherheit und Zugangsmanagement:* Die gemeinsame Nutzung erfordert digitale Plattformen zur Buchung und Steuerung. Dabei müssen Zugangsrechte klar definiert und Daten geschützt werden, um Missbrauch zu verhindern.
- *Organisatorischer Aufwand:* Die Abstimmung zwischen Unternehmen erfordert zusätzliche Ressourcen für Planung, Kommunikation und Vertragsgestaltung. Dies kann die Einführung verzögern und die Komplexität erhöhen.

Um die genannten Herausforderungen zu bewältigen, bieten sich folgende Maßnahmen an:

- *Digitale Buchungs- und Steuerungsplattformen:* Intelligente Systeme ermöglichen die Reservierung von Ladefenstern und die dynamische Anpassung an den Bedarf. Dies reduziert Nutzungskonflikte und erhöht die Auslastung.
- *Lastmanagement und zeitliche Staffelung:* Durch die gezielte Verteilung der Ladevorgänge lassen sich Lastspitzen vermeiden. Dynamische Tarife können Anreize für eine gleichmäßige Nutzung schaffen.
- *Standardisierung der Technik:* Einheitliche Ladeprotokolle und kompatible Hardware sind entscheidend, um die Nutzung für alle Beteiligten zu gewährleisten. Hier können Brancheninitiativen und Normen helfen.
- *Transparente Abrechnungssysteme:* Digitale Lösungen für die Kostenverteilung schaffen Vertrauen und reduzieren den administrativen Aufwand. Modelle wie nutzungsbasierte Abrechnung oder Pauschalen können je nach Bedarf eingesetzt werden.
- *Kooperations- und Kontroll-Strukturen:* Die Einrichtung gemeinsamer Gremien oder Koordinationsstellen erleichtert die Abstimmung und sorgt für klare Verantwortlichkeiten.

Externes Betriebsmodell

Die Nutzung von Ladeinfrastruktur, die durch externe Akteure wie Kommunen oder Energieversorger betrieben wird, bringt andere Herausforderungen mit sich:

- *Verfügbarkeit und Priorisierung:* Öffentliche Ladepunkte sind oft für verschiedene Nutzergruppen vorgesehen. Die Sicherstellung der Verfügbarkeit für den ÖPNV ist essenziell, um Betriebsabläufe nicht zu gefährden.
- *Flexibilität bei Betriebsänderungen:* Verkehrsunternehmen benötigen kurzfristige Anpassungen, etwa bei Umleitungen oder Zusatzfahrten. Externe Betreiber können diese Flexibilität nicht immer gewährleisten.
- *Kostenstruktur und Abhängigkeit:* Die Nutzung externer Infrastruktur reduziert Investitionskosten, führt aber zu laufenden Kosten. Unternehmen sind abhängig von Preisgestaltung und Vertragsbedingungen des Betreibers.

- *Technische Anforderungen und Ladeleistung:* Aufgrund der Fahrplanvorgaben und den damit zur Verfügung stehenden Ladezeitfenster ergeben sich erhöhte Anforderungen hinsichtlich Ladeleistung je Ladepunkt, Anzahl Ladeplätze und den damit verbunden Platzbedarf für Gefäßgrößen von bis zu 18 m Länge (Gelenkbusse). Da voraussichtliche verschiedene Busbetreiber die Ladeinfrastruktur nutzen werden, ist von einem breiten Spektrum an Fahrzeugherstellern und Bustypen auszugehen. Dies stellt zusätzliche Anforderungen an die Interoperabilität zwischen Ladeinfrastruktur und zu ladende Bussen.
- *Integration in Betriebsabläufe:* Die Standorte externer Ladepunkte müssen mit den Linienführungen und Betriebsabläufen (Stichwort Ladezeitfenster) kompatibel sein. Eine fehlende Nähe zu Depots erhöht den logistischen Aufwand für Ladefahrten. Weiterhin ist auf eine Trennung der Ladepunkte zwischen Bussen und anderen Nutzern (Privatnutzer und gewerbliche Nutzern) zu achten, da sonst mit Einschränkungen bzw. Verzögerungen durch besetzte/blockierte Ladeplätzen zu rechnen ist.

Auch für extern betriebene Infrastruktur gibt es Ansätze zur Effizienzsteigerung:

- *Digitale Plattformen für Buchung und Monitoring:* Verkehrsunternehmen sollten Ladefenster reservieren können, um Planungssicherheit zu gewährleisten. Echtzeitdaten ermöglichen eine flexible Anpassung.
- *Kooperation mit Energieversorgern und Kommunen:* Durch strategische Partnerschaften können Ladehubs speziell für den ÖPNV eingerichtet werden. Dies erhöht die Verfügbarkeit und reduziert Nutzungskonflikte.
- *Integration EE und Speicherlösungen:* Betreiber können durch Photovoltaik und Batteriespeicher die Netzbelastung reduzieren und günstigere Tarife anbieten. Dies kann nicht nur die Kosten senken sondern steigert auch die Nachhaltigkeit, indem u. a. Emissionen, wie Treibhausgase (THG) reduziert werden.
- *Technische Anpassung der Ladepunkte:* Die Bereitstellung von Ladepunkten mit ausreichender Leistung für Busse ist entscheidend. Einheitliche Standards erleichtern die Nutzung durch verschiedene Unternehmen und Fahrzeugtypen.
- *Dynamische Preisgestaltung und Anreizsysteme:* Flexible Tarife können Anreize schaffen die Auslastung zu optimieren und damit Lastspitzen zu vermeiden. Verkehrsunternehmen profitieren durch potenziell günstigeren Energiekosten.

Beide Modelle – unternehmensübergreifend und extern betrieben – bieten Potenziale zur Kostensenkung und Effizienzsteigerung. Während die unternehmensübergreifende Lösung eine hohe Eigenverantwortung und Koordination erfordert, ist die externe Lösung stärker von Dritten abhängig, bietet aber niedrigere bzw. vermeidet Investitionskosten für die Busunternehmen.

Tabelle 13 stellt die grundsätzlichen Vor- und Nachteile der alternativen Betriebskonzepte für Ladeinfrastruktur gegenüber.

Tabelle 13: Vor- und Nachteile alternativer Konzepte zum Betrieb von Ladeinfrastruktur

Betriebsmodell	Vorteile	Nachteile
Intern	<ul style="list-style-type: none"> - Volle Kontrolle über Betrieb und Wartung - Hohe Flexibilität bei Einsatzplanung - Keine Abhängigkeit von externen Partnern 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Investitionskosten für jedes Unternehmen - Geringe Auslastung der Infrastruktur bei kleinen Flotten - Keine Skaleneffekte durch Kooperation
Unternehmensübergreifend	<ul style="list-style-type: none"> - Bessere Auslastung des Netzanschlusses/ der Ladeinfrastruktur - Kostenteilung zwischen Unternehmen - Potenzial für gemeinsame Optimierung (z. B. Lastmanagement) 	<ul style="list-style-type: none"> - Komplexere Abstimmung der Ladezeiten und Betriebsabläufe - Risiko von Nutzungskonflikten bzw. erhöhter Platzbedarf für zusätzliche Ladeplätze - Zusätzlicher organisatorischer Aufwand für Abrechnung und Koordination
Extern	<ul style="list-style-type: none"> - Reduzierte bis keine Investitionskosten für Verkehrsunternehmen - Professioneller Betrieb durch spezialisierten Anbieter - Möglichkeit zur Integration in öffentliche Ladeinfrastruktur 	<ul style="list-style-type: none"> - Abhängigkeit von externem Betreiber - Geringere Flexibilität bei kurzfristigen Änderungen - Potenziell höhere laufende Kosten durch Nutzungsgebühren

Die vertragliche Ausgestaltung der hinsichtlich Eigentums- und Betriebsmodellen erfordert eine eigene rechtssichere Untersuchung, die nicht Gegenstand dieses Projekts ist.

Für den Ostalbkreis könnte eine Kombination der genannten Ladeinfrastrukturbetriebskonzepte sinnvoll sein: betriebsinterne bzw. -eigene Ladeinfrastruktur auf den Betriebshöfen, zentrale Ladehubs in öffentlicher Hand (ggf. auf öffentlichen Flächen, die gleichzeitig als Abstellung dienen können), ergänzt durch unternehmensübergreifende Kooperationen an strategischen Standorten. Innerhalb der Analyse auf Ebene der einzelnen Verkehrsunternehmen wurde daher geprüft, inwieweit eine unternehmensübergreifende Nutzung der Ladeinfrastruktur und/oder die Nutzung extern betriebener Ladeinfrastruktur möglich ist.³¹ Es wurde, u. a. aufgrund der Standortbedingungen, eine beispielhafte Synergieoption für die Kooperation zwischen zwei Verkehrsunternehmen identifiziert, und ein beispielhafter Standort an dem sich die Errichtung eines Ladehubs im öffentlichem Raum anbietet.

Die Synergieoption umfasst den Ansatz der Einrichtung von Ladeinfrastruktur für zwei Verkehrsunternehmen durch die Zusammenlegung des Betriebshofes bzw. der Abstellung der jeweiligen Unternehmen, die sich derzeit im selben Ort in relativ unmittelbarer räumlicher Nähe befinden und für die ein unternehmensübergreifendes Modell ein Hebel für die Flottenumstellung sein könnte. Zudem wurde ein Standort identifiziert, der sich für die Errichtung eines öffentlichen Ladehubs eignen könnte. Dieser befindet sich in Bopfingen am Bahnhofplatz am Zentralen Omnibus-Bahnhof, ZOB und stellt nach dem Nahverkehrsplan des Ostalbkreis einen wichtigen Verknüpfungspunkt im Kreisgebiet dar (8). Abbildung 15 zeigt das Satellitenbild des Standortes Bopfingen, Bahnhofplatz, mit Potenzialflächen für einen öffentlichen Ladehub sowie erste Kennwerte, die auf einer ersten Abschätzung des zuständigen Netzbetreibers basieren. Der Standort wird derzeit als Abstellung von einem Unternehmen für 3 Busse genutzt, die durch die Einrichtung einer öffentlichen LIS auf BEV umgestellt werden könnten (Linien 7696, 7864 und 7865). Die drei Busse werden derzeit auch am ZOB über Nacht abgestellt. Der ZOB wird zudem durch Busse der Linien 90 bis 97 angefahren, die ebenso am Standort grundsätzlich die Möglichkeit für eine (Zwischen-) Ladung hätten (10) (siehe Abbildung 16).

³¹ Durch Experteninterviews mit den VUs wurde die grundsätzliche Option für alternativen Ladekonzepte für die relevanten Standorte (Abstellungen) erörtert.



Verteilernetzbetreiber	Angefragte Leistung	Netzebene	Anschlusslänge	Umspannung erforderlich	Baukostenzuschuss (Stand 2025)	Netzanschlusskosten	Inbetriebnahme	Kosten Trafo
Netze ODR GmbH*	400 kW	Mittelspannung (20 kV)	5 m	Ja, kundenseitig	29.600 €	3.000 €	< 1 Jahr nach Antragstellung	81.000 €

*Alle Angaben basieren auf einer ersten Grobkalkulation der Netze ODR GmbH (Experteninterview durch Sphera mit Hr. Daniel Deissler - Teamleiter Netzplanung, 29.10.2025)

Abbildung 15: Satellitenbild des Standortes Bopfingen, Bahnhofsplatz (ZOB), mit Potenzialflächen für einen öffentlichen Ladehub



Abbildung 16: Ausschnitt des Liniennetzplans der Ostalbmobil GmbH (Quelle: [Ostalbmobil GmbH](https://www.ostalbmobil.de))

4.4 Synergien und Potenziale für lokalen Wasserstoffbezug

Die Bereitstellung von Wasserstoff kann über verschiedene Wege erfolgen. Der flüssige Wasserstoff kann komprimiert mittels LKWs zum Betriebshof geliefert werden und in Tanks am Betriebsstandort gespeichert werden. Wasserstoffbusse können dann mittels einer eigenen Tankstelle auf dem Betriebshof betankt werden. Eine Betriebshoftankstelle kann auch mittels einer Rohrleitung gespeist werden, welche direkt mit einem wasserstoffproduzierenden Unternehmen ist oder zukünftig mit einer Wasserstofftransportpipeline verbunden wird. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die Errichtung einer H₂-Betriebshoftankstelle mit Platzbedarf und nicht unwesentlichen Kosten verbunden ist und eine Errichtung in der Regel erst für größere Busflotten >10-15 Busse aufgrund des genehmigungsrechtlichen und finanziellen Aufwandes praktikabel ist. Des Weiteren wirkt sich die vorzuhaltende Wasserstoffmenge über die

Speichergröße direkt auf die Infrastrukturkosten aus, weshalb es gilt hier einen Kompromiss zwischen ausreichender betrieblicher Reserve zur Gewährleistung eines stabilen Betriebes und den Speicherkosten und dem damit verbundenen Platzbedarf zu finden. Neben einer Installation der Wasserstofftankstelle auf dem Betriebshof ist eine Betankung der Busse an einer oder mehreren öffentlichen Wasserstofftankstellen möglich. Für die Verkehrsunternehmen des Ostalbkreis werden in diesem Zusammenhang Synergien mit der im Rahmen von HyExperts II: H2Ostwürttemberg errichteten Erzeugungsanlage für grünen Wasserstoff, inkl. geplanter Tankstelleninfrastruktur, in Schwäbisch Gmünd untersucht.

Für die Versorgung der Brennstoffzellenbusse mit Wasserstoff kommt die sich in Planung befindende Wasserstofftankstelle in Schwäbisch Gmünd, im Industriegebiet Gügling, in Frage. Es ist vorgesehen, dass diese durch die H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG betrieben wird und dass diese öffentlich zugänglich sein wird. Versorgt wird diese mit grünem Wasserstoff (Güte nach ISO 14687) über eine Pipeline, an die der unmittelbar benachbarte 10-Megawatt-Elektrolyseur direkt angeschlossen ist. Der Elektrolyseur der Firma Lhyfe ging im Oktober 2025 in Betrieb und nutzt für die Erzeugung ausschließlich Strom aus Erneuerbaren Energien. Mit einer maximal möglichen Produktionsmenge von 3.800 kg/Tag stellt er derzeit den größten Elektrolyseur in Süddeutschland dar. Die Inbetriebnahme der geplanten Wasserstofftankstelle ist für Mitte 2027 geplant. Für die erste Realisierungsstufe der Tankstelle ist die Installation eines H2-Mobility-eigenen „EVA Dispensers“ mit 350 bar vorgesehen. Dabei handelt es sich um eine Zapfanlage mit integrierter Kältetechnik und einer Kommunikationsschnittstelle. Geplant ist zunächst ein Zapfpunkt mit zwei Fahrspuren die so dimensioniert sind, dass sie auch von großen Fahrzeugen, wie z. B. Gelenkbussen, angefahren werden können. Die Zugänglichkeit wird ohne Einschränkungen ganztägig mittels Tankkarte ermöglicht. Die Tankstelle ist so konzipiert, dass sie bei Bedarf um eine zweiten Abgabepunkt erweitert werden kann. Die technische Betreuung einschließlich Service und Wartung wird vollständig durch H2 MOBILITY übernommen. Drei Techniker sind direkt in unmittelbarer räumlicher Nähe zum Standort Schwäbisch Gmünd stationiert und können somit kurzfristig auf evtl. Störungen reagieren (24/7-Notfallservice). Darüber hinaus wird seitens H2 Mobility darauf geachtet, dass Standard-Ersatzteile jederzeit verfügbar und abrufbar sind, um in Summe eine hohe Betriebssicherheit zu gewährleisten. Zum Verkaufspreis des Wasserstoffs können seitens der H2 MOBILITY noch keine belastbaren Aussagen getroffen werden. Die übliche Praxis ist, dass Abnahmeverträge mit einer Mindestabnahmemenge (Take or Pay) vereinbart werden, die sich an den voraussichtlichen Abnahmemengen des Kunden, d. h. des Busunternehmens orientieren. Dieses Vorgehen wird auch für Gügling anvisiert (11).

Mit dem aus dem Gewerbegebiet Gügling bezogenen grünen Wasserstoff könnte ein Teil der Busflotte im Ostalbkreis emissionsfrei betrieben werden. Der Bezug des Wasserstoffs von der geplanten Tankstelle wird allerdings nur für Unternehmen als relevant bewertet, die Busse in einer Entfernung von ungefähr 10 km zur Tankstelle abstellen, da für Fahrzeuge die in mehr als 10 km Entfernung von der Tankstelle stationiert sind, der betriebliche Aufwand, d. h. der Zeitaufwand um zur Tankstelle zu kommen, als zu hoch eingestuft wird. Für die Umstellung der Restflotte auf FCV wären daher zusätzliche Wasserstofftankstellen im Kreisgebiet notwendig (siehe Kapitel 5.1).

Die Möglichkeit der Nutzung einer privaten Wasserstofftankstelle wird innerhalb der Machbarkeitsstudie nicht weiter berücksichtigt, da an keinem Standort nach der prioritären BEV-Umstellung mehr als 10 Fahrzeuge auf Wasserstoff umgestellt werden könnten bzw. nach aktuellem Stand keines der betrachteten Verkehrsunternehmen aktuell konkrete Überlegungen für eine Errichtung einer H₂-Betriebshoftankstelle anstellt.

4.5 Abschätzung des THG-Reduktionspotenzials

Anhand des ermittelten Umstellungsmöglichkeiten werden mittels einer Well-to-Wheel (WtW)-Analyse die möglichen THG-Einsparungen durch den Einsatz von ZEV-Bussen ermittelt. Grundlage bildet der bereits in AP2 verwendete Dieselverbrauch für die verschiedenen Gefäßgrößen und die jeweilige Jahresfahrleistung je Verkehrsunternehmen. Tabelle 14 zeigt die Eingangsdaten, die für die Berechnung des THG-Reduktionspotenzials je Betreiber von Relevanz sind und hier im Überblick als die sich über die betrachteten Busunternehmen hinweg ergebenden Mittelwerte je Gefäßgröße dargestellt werden.

Tabelle 14: Überblick der gemittelten Eingangsdaten zur Berechnung der THG-Einsparpotenziale, dargestellt je Gefäßgröße

Mittelwerte je Gefäßgröße	Mini (PKW)	Mini (Sprinter)	Solo (12 m)	Solo (> 12 m)	Doppeldecker	Gelenk (18 m)
Verbrauch Dieselbus [l/100 km]	8	16	32	40	54	45
Verbrauch BEV-Bus [kWh/100 km]	32	64	129	159	215	182
Verbrauch BZ-Bus [kg H ₂ /100 km]	1,9	3,9	7,9	9,7	13,3	11,4
Jahresfahrleistung (Diesel-Bus) [km/a]	12.747	33.824	44.709	23.003	33.250	34.708
Jahresfahrleistung (BEV) [km/a] ¹	12.747	28.198	44.507	18.920	0	34.708
Jahresfahrleistung (FCV) [km/a] ¹	0	33.824	44.709	23.003	33.250	34.708

¹ OEM 2 wurde als Referenzszenario für die technische Machbarkeitsanalyse zugrunde gelegt.

Um die größtmögliche Reduktion an THG-Emissionen zu erreichen, sollte für den Betrieb der Busse nur Strom aus EE-Quellen genutzt werden. Für die Strommenge, die für das Laden der BEV sowie die Herstellung des grünen Wasserstoffes benötigt wird, wird daher angenommen, dass diese vollständig aus EE gemäß dem Technologiemitmix in Baden-Württemberg im Jahr 2024 erzeugt wird (BW EE-2024-Mix) (12). Um das damit verbundene THG-Reduktionspotenzial zu verdeutlichen, werden zusätzlich das Delta der Emissionen aufgezeigt, welches mit der Nutzung eines konventionellen Strommixes (BW-2024-Mix, (13)) einhergehen sowie das Delta der Emissionen, welches mit der Herstellung von „grauem“ Wasserstoff mittels Dampfreformierung aus Erdgas verbunden wäre. Es werden entsprechend der technischen Machbarkeitsanalyse die im Jahr 2025 verfügbaren Batteriekapazitäten des OEM 2 angenommen. Einmalig auftretende Emissionen wie bspw. durch die Busherstellung werden anhand der Haltedauer und gefahrenen Jahreskilometer auf einen gefahrenen Kilometer umgelegt.

Da die Buskategorie „Solo (12 m)“ die mit Abstand am häufigsten verwendete Gefäßgröße im Ostalbkreis darstellt, soll sie stellvertretend näher beschrieben werden. Für die Buskategorie werden dabei fünf Szenarien beleuchtet und als THG-Emissionen pro Kilometer³² ausgewiesen (Berücksichtigung der durchschnittlichen Jahresfahrleistung):

³² Anzumerken ist, dass grundsätzlich die BEV-Busse eine geringere Fahrleistung im Vergleich zu den Wasserstoffbussen aufweisen, weswegen die Ergebnisse pro Kilometer dargestellt werden.

- Szenario 1: Alle Umläufe werden mit Dieselnbussen bedient (Diesel) – 100% Diesel.
- Szenario 2: Alle BEV-machbaren Umläufe werden mit BEV-Bussen bedient. Der Rest mit Diesel-Bussen (BEV & Diesel) – 87% BEV und 13% Diesel.
- Szenario 3: Alle BEV-machbaren Umläufe werden mit BEV-Bussen bedient. Der Rest mit wasserstoffbetriebenen Bussen (BEV & H2) – 87% BEV und 13% FCV.
- Szenario 4: Alle FCV-machbaren Umläufe werden mit wasserstoffbetriebenen Bussen bedient. Der Rest mit Diesel-Bussen (H2 & Diesel) – 99% FCV und 1%³³ Diesel.
- Szenario 5: Alle FCV-machbaren Umläufe werden mit wasserstoffbetriebenen Bussen bedient. Der Rest mit BEV-Bussen (H2 & BEV) 99% FCV und 1%³⁰ BEV.

Wie Abbildung 17 zeigt, lässt sich mit der prioritären Umstellung auf BEV (Solo (12 m)), mit Diesel-Zusatzheizung) zwischen 47 und 53% der THG pro Kilometer einsparen (Szenario 2 und 3) im Vergleich zum Diesel-Referenzszenario. Die prioritäre Umstellung auf FCV hat ein THG-Reduktionspotenzial von 69% pro Kilometer (Szenario 4 und 5). Deutlich zu erkennen ist, dass beim Dieselbus der Großteil der Emissionen aus der Dieselverbrennung, also den direkten Betriebsemissionen, stammt. Der BZ-Bus hat etwas höhere Emissionen in der Herstellung im Vergleich zum Dieselbus, den größten Teil macht bei dieser Antriebstechnologie die Wasserstoffherstellung bzw. -bereitstellung aus. Direkte Betriebsemissionen, außer Wasserdampf, gibt es prinzipbedingt keine. Bei den BEV-Bussen hingegen ist die Buserstellung (und hierbei die HV-Batterieherstellung, Batteriekapazitäten OEM 2) der größte Verursacher von Treibhausgasen, die Strombereitstellung fällt nur relativ gering ins Gewicht. Beim BEV tragen die direkten Emissionen der Dieselzusatzheizung bezogen auf ein Jahr im Mittel 15% zu den Gesamtemissionen bei. Unter Berücksichtigung des EE-Mixes (BW EE-2024-Mix) liegen die Szenario 2) bis 5) deutlich unter der Emissionsintensität von Szenario 1). Während bei Szenario 2) und 3) die Intensität der Fahrzeugherstellung auffällig ist (v.a. getrieben durch die große HV-Batteriekapazität von 588 kWh), ist in Szenario 4) und 5) die Wasserstoffbereitstellung mit höheren THG-Emissionen verbunden. Die Wartung ist in allen Szenarien ungefähr auf gleichem Niveau.

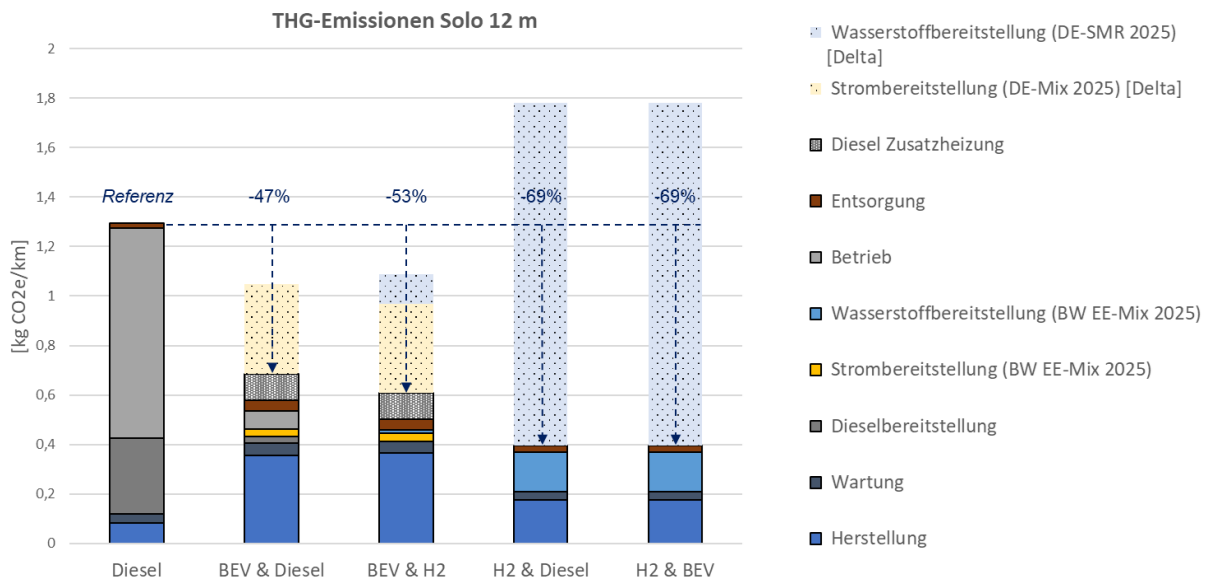


Abbildung 17: THG-Emissionen pro gefahrenen Kilometer (Solo (12 m), OEM 2

³³ Für die Kategorie „Mini (PKW)“ existiert keine marktfähigen FCV.

Tabelle 15 gibt einen Überblick über die mittleren Einsparpotenziale aller von den untersuchten Verkehrsunternehmen eingesetzten Gefäßgrößen. Die Grafiken zu den übrigen Gefäßgrößen sind in Anhang B eingegliedert.

Tabelle 15: THG-Reduktionspotenziale pro Kilometer je Gefäßgröße (Durchschnitt über alle analysierten Umläufe)

THG-Reduktionspotenzial	Mini (PKW) ¹	Mini (Sprinter) ²	Solo (12 m) ²	Solo (> 12 m) ²	Doppel-decker ^{2, 3}	Gelenk (18 m) ²
Szenario 1 (Referenz): Diesel	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Szenario 2: BEV & Diesel	39%	31%	47%	54%	0%	52%
Szenario 3: BEV & H2	39%	66%	53%	63%	75%	52%
Szenario 4: H2 & Diesel	0%	71%	69%	74%	75%	69%
Szenario 5: H2 & BEV	39%	71%	69%	74%	75%	69%

¹ Kein marktfähiger wasserstoffbetriebener Bus in dieser Gefäßgröße verfügbar. Alle Umläufe, die mit dieser Gefäßgröße bedient werden, sind BEV-machbar.

² Alle Umläufe H2-machbar.

³ Kein Umlauf, der mit dieser Gefäßgröße bedient wird, ist BEV-machbar.

Die Quantifizierung des jährlichen THG-Reduktionspotenzials für den Ostalbkreis für die einzelnen Szenarien zeigt Abbildung 18. Würden alle Umläufe, die theoretisch auf BEV umgestellt werden könnten, auch mit BEV bedient, ergibt sich ein Reduktionspotenzial der Treibhausgasemissionen von 46 bis 55%, je nachdem, ob der Rest der Flotte (also der Teil, der nicht auch BEV umgestellt wird) mit Dieseln oder mit FCV betrieben wird und unter Einsatz von EE für die Energieerzeugung (Reduktionspotenzial Szenario 2: 5.018 Tonnen CO₂e/Jahr, Szenario 3: 5.958 Tonnen CO₂e/Jahr). Würden alle Umläufe, die theoretisch auf ZEV umgestellt werden könnten, auch mit ZEV bedient, ergibt sich ein Reduktionspotenzial der Treibhausgasemissionen von ca. 70% unter Einsatz von EE für die Energieerzeugung (Reduktionspotenzial Szenario 4: 7.628 Tonnen CO₂e/Jahr, Szenario 5: 7.631 Tonnen CO₂e/Jahr).

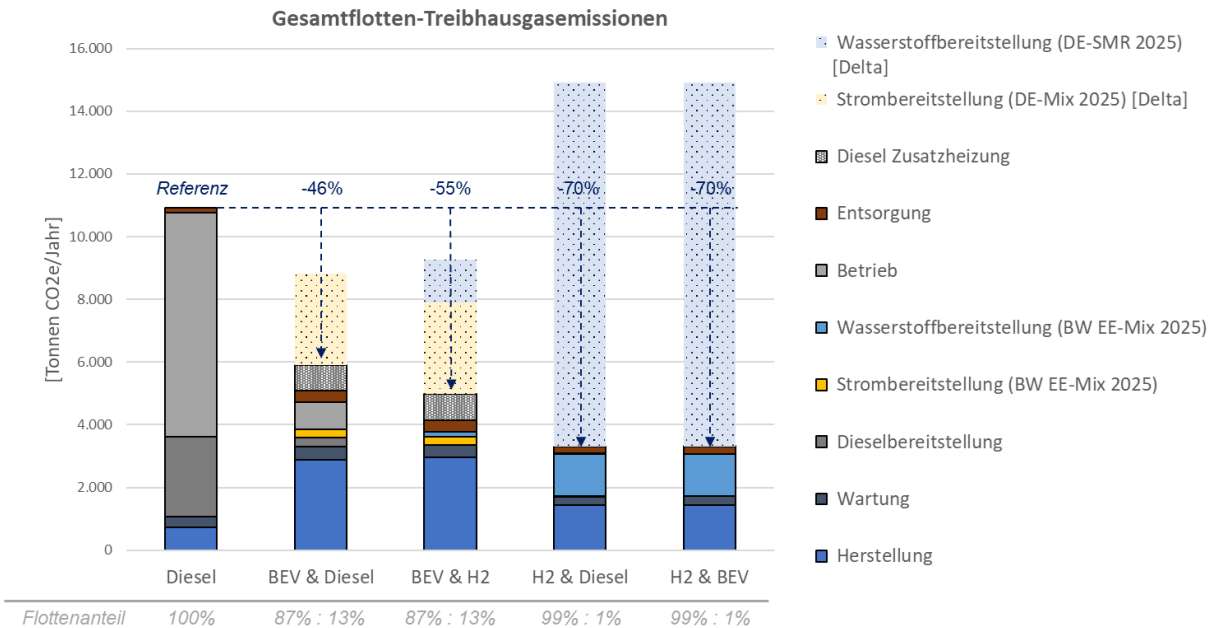


Abbildung 18: THG-Reduktionspotenzial entsprechend der Jahresfahrleistung aller untersuchten Umläufe

Eine entsprechende Übersicht zum THG-Reduktionspotenzial wird für jedes Verkehrsunternehmen auf Basis der spezifischen Umlaufdaten für die jeweilige Busflotte und bezogen auf deren Jahresfahrleistung erstellt.

4.6 Abschätzung Mehrkosten durch Umstellung auf ZEV

Unter Berücksichtigung der Strom- und Wasserstoffpreise (vgl. Kapitel 2.1.4) werden die Mehrkosten der Umstellung für die Betreiber über die nächsten 12 Jahre (entsprechend der mittleren Lebensdauer eines Linienbusses) abgeschätzt. Dabei werden die Kostenkomponenten Fahrzeugbeschaffungs-, Fahrzeugfinanzierungs-, Ersatzkomponenten-, Wartungs-, Energie- (Diesel, Strom, Wasserstoff) und Energieversorgungsinfrastrukturkosten berücksichtigt. Personal- bzw. Fahrerkosten werden nicht einbezogen, da sie unabhängig von der Antriebstechnologie sind. Die Grundannahmen, die in die Kostenabschätzung eingehen, sind in Tabelle 16 für die Fahrzeugbeschaffung, in Tabelle 17 für die Ersatzkomponenten sowie in Tabelle 18 für die Energieversorgungsinfrastruktur dargestellt. Die Gefäßgröße „Doppeldecker“ wird in der Mehrkostenanalyse aufgrund der unzureichenden Datenlage für äquivalente ZEVs nicht berücksichtigt, genauso wie FCV der Kategorie Mini (PKW). Für BEV wurde angenommen, dass die Batterie nach etwa 1.500 Ladezyklen bei einem SoH von 80% ausgetauscht wird. Auf Basis des durchschnittlichen Energieverbrauchs je Fahrzeugtyp wurde berechnet, wie oft ein Batteriewechsel erforderlich ist. Es wird die Annahme getroffen, dass max. nach acht Jahren die Batterie ausgetauscht wird. Für FCV wurde eine Lebensdauer der Brennstoffzelle von 25.000 Betriebsstunden zugrunde gelegt (14). Unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit ergibt sich, dass die Brennstoffzelle im Mittel erst nach rund 12 Jahren gewechselt werden müsste. Daher wird kein anteiliger Wechsel der BZ über die 12 Jahre berücksichtigt.³⁴ Für BEV werden 5% niedrigere Wartungskosten im Vergleich zu Dieseln angenommen und für FCV 10% höhere Wartungskosten. Da, wie auch in den vorangegangenen

³⁴ Aus Erkenntnissen vorheriger Studien (z. B. (15)) ist der Einfluss des HV-Batteriewechsels für BZ-Hybrid Fahrzeuge als vernachlässigbar einzustufen.

Kapitel erwähnt, keine marktfähigen FCV für die Kategorien „Mini (Sprinter)“ und „Solo (> 12 m)“ existieren, basiert die nachfolgende Kostenabschätzung aufgrund der schlechten Datenlage auf Annahmen. Die Beschaffungskosten orientieren sich dabei an der „Anlage Investitionsmehrkosten Umweltschutz zum Antrag Busförderung“ (L-Bank) und den darin genannten Referenzwerten und förderfähigen Preisobergrenzen (netto) für emissionsfreie Fahrzeuge.

Tabelle 16: Annahmen Fahrzeugbeschaffung

Parameter	Beschreibung			
Haltedauer Fahrzeuge	12 Jahre			
Jährliche Laufleistung je Gefäß	Mini (PKW)			35.000 km/a
	Mini (Sprinter)			45.000 km/a
	Solo (12 m), Solo (> 12 m), Gelenk (18 m)			60.000 km/a
Fahrzeugbeschaffung (2026)	Gefäßgröße	Diesel	BEV	FCV
	Mini (PKW)	44.000 €	80.000 €	-
	Mini (Sprinter)	132.000 €	270.000 €	340.000 €
	Solo (12 m)	253.000 €	570.000 €	590.000 €
	Solo (> 12 m)	293.000 €	615.000 €	640.000 €
	Gelenk (18 m)	352.000 €	730.000 €	800.000 €
	Durchschnittlicher Kapitalkostenzinssatz	4,3% (engl., <i>Weighted Average Cost of Capital, WACC</i>)		
Annuitätenfaktor	0,11			
	Diesel	10%		
Restwert nach max. Haltedauer	BEV	5%		
	FCV	5%		

Tabelle 17: Annahmen Ersatzkomponenten

Parameter	Beschreibung
NMC Batterie (2026) (€/kWh)	300
Kostendegression pro Jahr	7%
Batterielade-/Entladezyklen (SoH 80%)	1.500
Lebensdauer der Brennstoffzelle (h)	25.000
BZ (2026) (€/kW)	700
Kostendegression pro Jahr	8,7%
Erforderlicher Batteriewechsel	Basierend auf dem durchschnittlichen Energieverbrauch und der Jahresfahrleistung je Gefäßgröße, max. nach 8 Jahren
Erforderlicher BZ-Wechsel	Basierend auf der Durchschnittsgeschwindigkeit und der Jahresfahrleistung je Gefäßgröße (> 12 Jahre)

Tabelle 18: Annahmen Energieversorgungsinfrastruktur

	Parameter	Beschreibung
Diesel	Investitionskosten Tankstelle	210.000 €
	Lebensdauer	14 Jahre
	Wartung und Betrieb	13.500 €/a
BEV	Ladeinfrastruktur und Wartungskosten	Basierend auf den betriebshofspezifischen Daten der untersuchten VUs und der Angaben der Verteilernetzbetreiber (Baukostenzuschuss, Netzanschlusskosten, Trafo, Kosten für Ladestationen und Betriebsinfrastruktur), inkludierte Wartungskosten 1%
FCV	Investitionskosten und Wartungskosten Tankstelle	Im Wasserstoffpreis inkludiert

Abbildung 19 stellt die Gesamtkosten pro Kilometer nach Antriebstechnologie und Gefäßgröße bezogen auf die Fahrleistung in €/km dar sowie die prozentualen Mehrkosten der ZEV gegenüber den entsprechenden Diesel-Referenzfahrzeugen (ohne Personalkosten). Hierbei wird noch keine Förderung für die ZEVs berücksichtigt. BEV liegen über alle Gefäßgrößen hinweg im Schnitt 41% über den Kosten der Dieselfahrzeuge (Referenz), wohingegen FCV mit 57% höheren Kosten als Dieselfahrzeuge einhergehen. Die Kostenkomponenten Fahrzeugbeschaffung, Wartung und Energie tragen über alle Fahrzeuge hinweg am meisten zu den Gesamtkosten pro Kilometer bei. Für einen Bus der Kategorie „Solo (12 m)“ entfallen auf die Fahrzeugbeschaffung 24% (Diesel), 39% (BEV) bzw. 39% (FCV) der Gesamtkosten, auf die Wartung 34% (Diesel), 22% (BEV) bzw. 24% (FCV) und auf die Energiebereitstellung 33% (Diesel), 16% (BEV) bzw. 24% (FCV). Hierbei ist anzumerken, dass für FCV die Energieinfrastrukturkosten in den Energiekosten (Wasserstoffkosten) inkludiert sind. Aufgrund der unzureichenden Datenlage wurden zur Bestimmung der Wartungskosten des FCV der Kategorie „Solo (> 12 m)“ FCV die Daten eines Fahrzeug der Kategorie „Solo (12 m)“ zugrunde gelegt. Auch ist für die Kategorie „Mini (Sprinter)“ die Kostenabschätzung aufgrund dem Nichtvorhandensein eines entsprechenden marktfähigen FCV-Fahrzeugs nur als Orientierung zu verstehen.

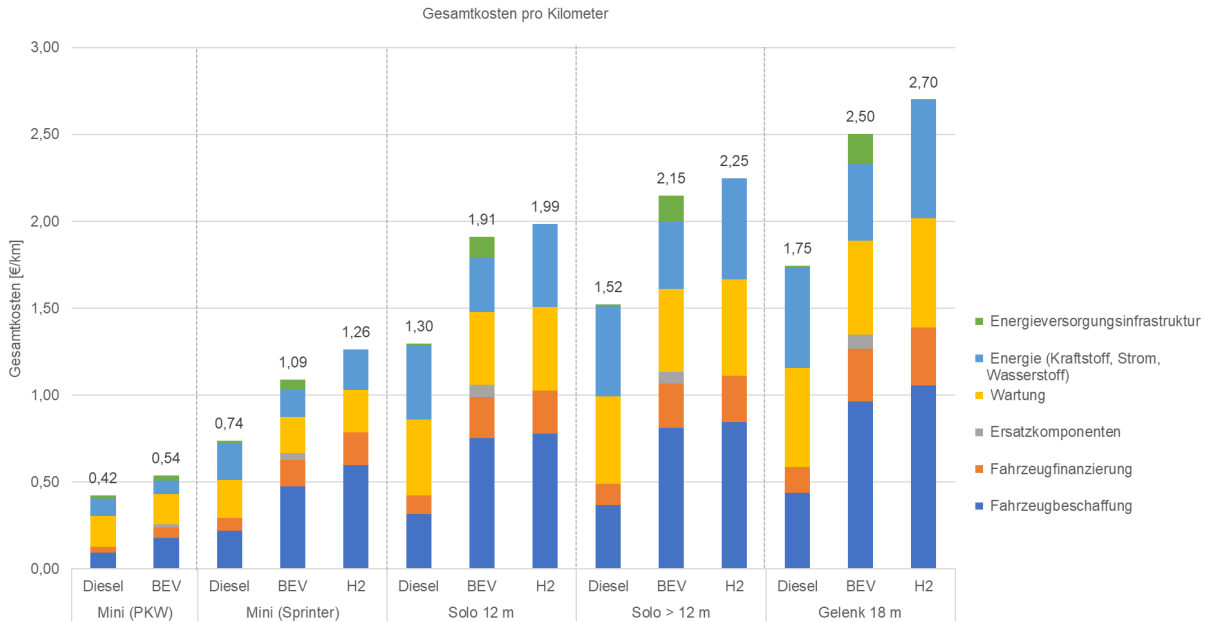


Abbildung 19: Gesamtkosten pro Kilometer nach Antriebstechnologie (Diesel, BEV, H2) und Gefäßgröße bezogen auf die Fahrleistung (ohne Personalkosten) sowie den anteiligen Mehrkosten für ZEV gegenüber Dieseln, ohne Förderung

Abbildung 20 zeigt für die in Kapitel 4.5 eingeführten Flottenszenarien³⁵ die Gesamtkosten pro Jahr für den Ostalbkreis unterschieden nach den Gefäßgrößen sowie die prozentualen Mehrkosten der Szenarien mit ZEV-Anteil gegenüber dem Diesel-Szenario (Szenario 1) (Bezugsjahr 2026, ohne Förderung). Aufgrund des hohen Anteils an 12-m-Solo-Fahrzeugen in der Ostalbkreis-Flotte – 76% der Umläufe werden mit dieser Gefäßgröße bedient, übernimmt diese Gefäßgröße den dominanten Kostenanteil in der Gesamtflotte. Mit Blick auf die Flottenszenarien kann festgehalten werden, dass sich die Mehrkosten mit steigendem FCV-Anteil erhöhen. Auch hier sei zu beachten, dass für FCV die Energieinfrastrukturkosten in den Energiekosten (Wasserstoffkosten) inkludiert sind. Für die Gesamtflotte ergeben sich zusammenfassend entsprechend der betrachteten Szenarien schätzungsweise Mehrkosten gegenüber dem Diesel-Referenzszenario (Szenario 1), in folgenden Höhen:

- Szenario 2 (BEV & Diesel): + 4,50 Mio. € pro Jahr,
- Szenario 3 (BEV & H2/FCV): + 5,03 Mio. € pro Jahr,
- Szenario 4 (H2/FCV & Diesel): + 5,68 Mio. € pro Jahr und
- Szenario 5 (H2/FCV & BEV): + 5,68 Mio. € pro Jahr (vgl. Tabelle 19).

³⁵ Szenario 1: Diesel, Szenario 2: BEV & Diesel, Szenario 3: BEV & H2, Szenario 4: H2 & Diesel, Szenario 5: H2 & BEV (vgl. Kapitel 4.5).

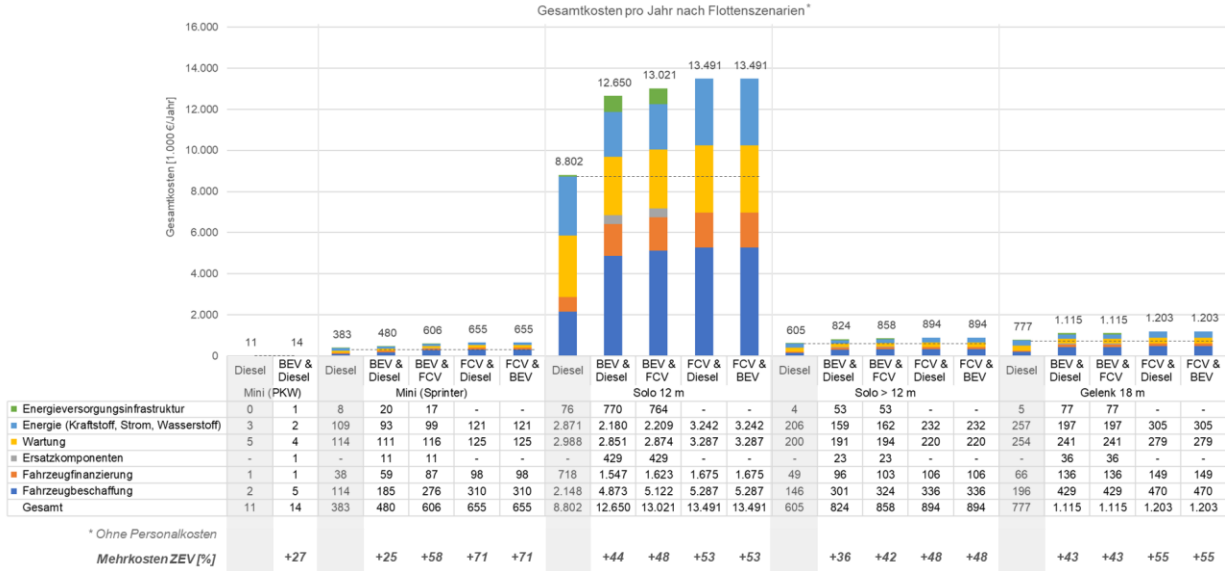


Abbildung 20: Gesamtkosten pro Jahr nach Flottenszenarien und Gefäßgröße sowie den anteiligen Mehrkosten für ZEV gegenüber Dieseln (ohne Förderung)

Der Einfluss aktueller Fördermöglichkeiten auf die Mehrkosten wird zunächst repräsentativ für die Gefäßgröße „Solo (12 m)“ beispielhaft dargestellt. Hierbei wird von einem Förderszenario in Anlehnung an das Landesförderprogramm Baden-Württemberg (LGVFG und Busförderprogramm) für mittlere Unternehmen ausgegangen (vgl. Kapitel 2.4), welches eine 70%-Förderung für die Fahrzeugmehrkosten sowie eine 70%-Förderung für die Infrastrukturinvestitionskosten berücksichtigt. Abbildung 21 stellt die Gesamtkosten pro Kilometer für die Gefäßgröße „Solo 12“ ohne (Abbildung 21, links) und mit (Abbildung 21, rechts) gegenüber. Durch das Förderszenario reduzieren sich die Mehrkosten pro Kilometer für BEV von insgesamt 47% auf 10% und für FCV (H₂) von insgesamt 53% auf 17%.

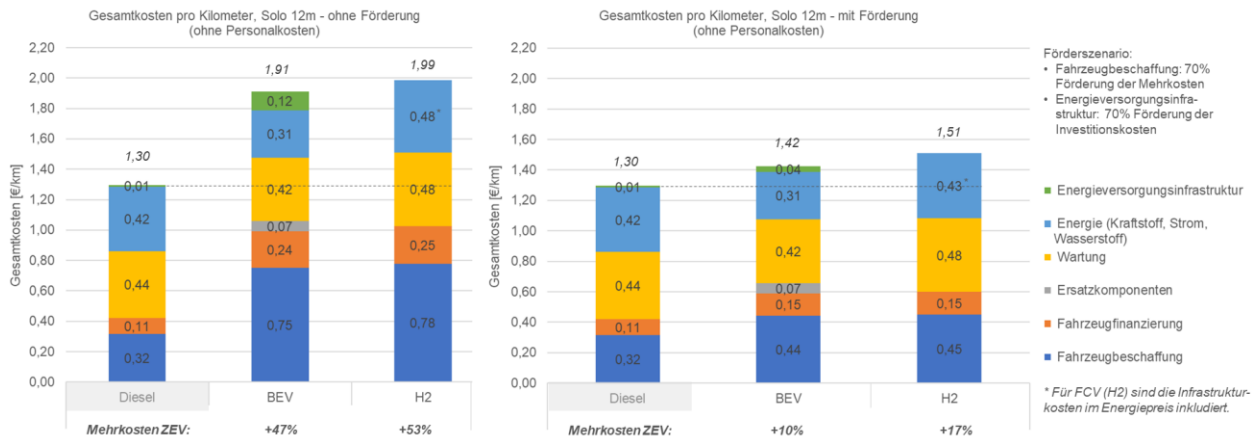


Abbildung 21: Einfluss des beispielhaften Förderszenarios auf die Gesamtkosten pro Kilometer am Beispiel der Gefäßgröße "Solo (12 m)"

In Anlehnung an Abbildung 20 zeigt Abbildung 22 für die Flottenszenarien die Gesamtkosten pro Jahr für den Ostalbkreis unterschieden nach Gefäßgrößen sowie die prozentualen Mehrkosten der Szenarien mit ZEV-Anteil gegenüber dem Diesel-Szenario (Szenario 1)

(Bezugsjahr 2026) inklusive des oben dargestellten Förderszenarios. Durch das Förderszenario (Fahrzeugbeschaffung: 70% Förderung der Mehrkosten, Energieversorgungsinfrastruktur: 70% Förderung der Investitionskosten) kann eine Kostenreduktion über die untersuchten Szenarien hinweg gegenüber den Gesamtkosten ohne Förderung (vgl. Abbildung 20) von durchschnittlich 24% erzielt werden (Szenario 2: 24%, Szenario 3: 25%, Szenario 4: 24%, Szenario 5: 24%).

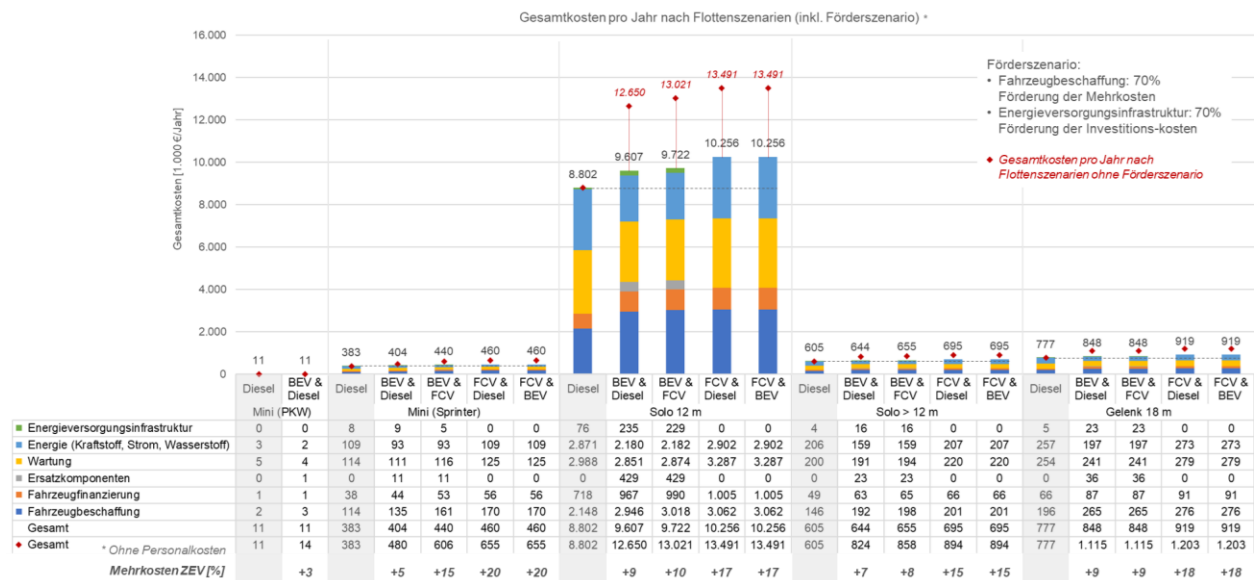


Abbildung 22: Gesamtkosten pro Jahr nach Flottenszenarien und Gefäßgröße sowie den anteiligen Mehrkosten für ZEV gegenüber Dieseln (mit Förderung)

Tabelle 19 listet zusammenfassend die Mehrkosten pro Jahr ohne Berücksichtigung und mit Berücksichtigung einer Förderung nach Flottenszenarien für die gesamte OAK-Flotte gegenüber dem Diesel-Referenzszenario (Szenario 1).

Tabelle 19: Mehrkosten pro Jahr nach Flottenszenarien für die untersuchte OAK-Flotte gegenüber dem Diesel-Referenzszenario, ohne Förderung (o. F.) und mit Förderung (m. F.)

Mehrkosten [Mio. €/Jahr]	Szenario 2: BEV & Diesel		Szenario 3: BEV & H2		Szenario 4: H2 & Diesel		Szenario 5: H2 & BEV	
	o. F.	m. F.*	o. F.	m. F.*	o. F.	m. F.*	o. F.	m. F.*
Fahrzeugbeschaffung	+3,19	+0,94	+3,55	+1,04	+3,80	+1,11	+3,80	+1,11
Fahrzeugfinanzierung	+0,97	+0,29	+1,08	+0,32	+1,16	+0,35	+1,16	+0,35
Ersatzkomponenten	+0,50	+0,50	+0,50	+0,50	+0,00	+0,00	+0,00	+0,00
Wartung	-0,17	-0,16	-0,14	-0,13	+0,36	+0,36	+0,36	+0,36
Energie (Kraftstoff, Strom, Wasserstoff)	-0,81	-0,81	-0,78	-0,81	+0,46	+0,05	+0,46	+0,05
Energieversorgungsinfrastruktur	+0,83	+0,19	+0,82	+0,18	-0,09	-0,09	-0,09	-0,09
Gesamt	+4,50	+0,94	+5,03	+1,10	+5,68	+1,76	+5,68	+1,76

* Das zugrundeliegende Förderszenario beinhaltet eine Förderung der Fahrzeugbeschaffung (70% Förderung der Mehrkosten) sowie der Energieversorgungsinfrastruktur (70% Förderung der Investitionskosten)

4.7 Varianzanalyse

Um die Bandbreite der möglichen technischen und wirtschaftlichen Entwicklung darzustellen, wird anhand von vier zentralen Parametern eine Varianzanalyse für die in Abbildung 19 dargestellten Mehrkosten vorgenommen. Hierbei wird der Einfluss der Energiekosten, der Förderquote, der Nutzungsdauer der HV-Batterie bzw. der BZ sowie der Fahrzeugrestwert der ZEV am Ende der Nutzungsdauer (nach 12 Jahren) auf die Mehrkosten untersucht.

Abbildung 23 stellt die Mehrkosten von BEV (links) und FCV (rechts) gegenüber dem entsprechenden Dieselfahrzeug dar (Grundannahmen entsprechend Abbildung 19). Um den Einfluss der Energiekosten auf die Mehrkosten zu verstehen, werden die Dieseldaten um 10 ct/l variiert sowie die Stromkosten um 1 ct/kWh bzw. die Wasserstoffkosten um 1 €/kg. Hierbei haben v.a. die Wasserstoffkosten mit rund 11% einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Mehrkosten pro Kilometer. Der Fahrzeugrestwert hat für beide ZEV eine mäßige Relevanz für die Mehrkosten, wohingegen sich kürzere Wechselperioden (< 8 Jahre) der HV-Batterie bei BEV deutlich auf die Mehrkosten auswirken (15% höhere Mehrkosten bei einem Batteriewechsel nach 6 Jahren). Der Förderanteil der ZEV hat erwartungsgemäß den größten Einfluss auf die Mehrkosten. Hierbei wurden von Förderszenarien ausgegangen, bei denen die Fahrzeugbeschaffung sowie die Infrastrukturinvestition (BEV) zu gleichen Teilen bezuschusst wurde (60%/70%/80%-Förderung für Mehrkosten der ZEV-Beschaffung und für Infrastrukturinvestition). Hieran ist zu erkennen, dass die Gesamtmehrkosten der ZEV gegenüber den Dieselfahrzeugen maßgeblich durch die höheren Beschaffungskosten der ZEV getrieben werden und die Höhe der Förderquote den maßgeblichen Einfluss auf die Mehrkosten des ZEV gegenüber dem Dieselfahrzeug hat (bis zu 90% Reduktion der Mehrkosten bei BEV-Bus (Solo (12 m))).

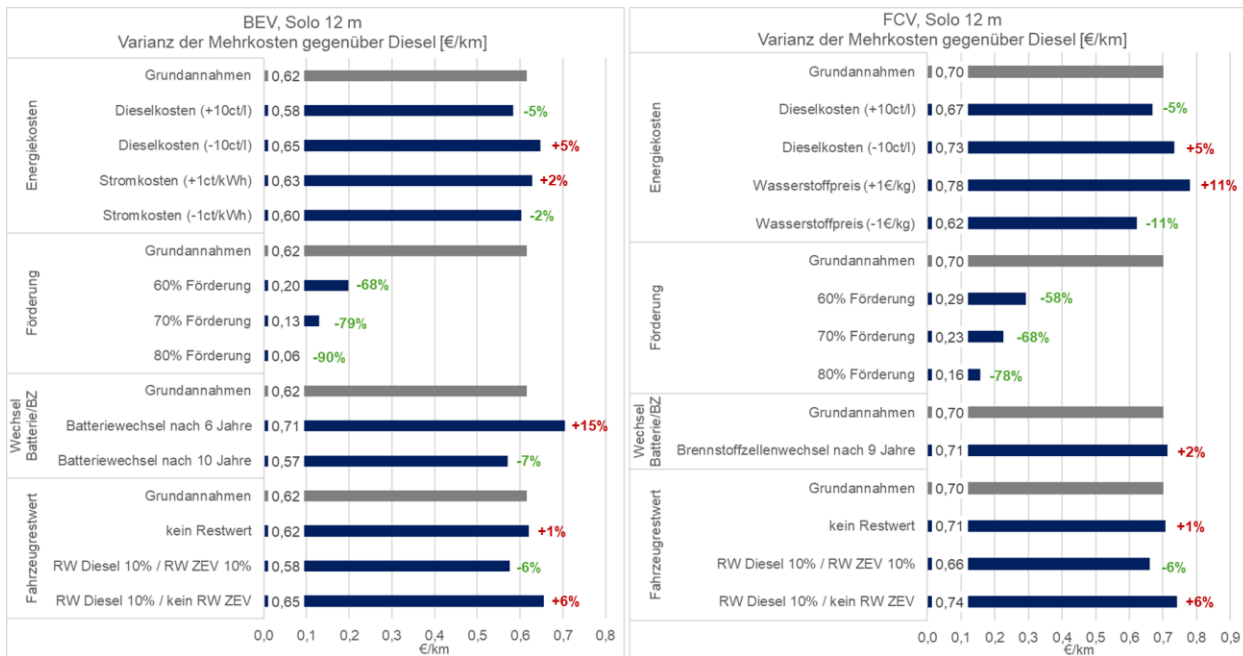


Abbildung 23: Varianzanalyse der Mehrkosten eines BEV bzw. FCV gegenüber dem Dieselfahrzeug (Bsp. Solo (12 m))

5. AP4: Gesamtdarstellung für den Ostalbkreis

5.1 Infrastrukturbedarf des Ostalbkreis

Die Einzelergebnisse für die untersuchten Betreiber werden zu einer Gesamtdarstellung des Infrastrukturbedarfs für den gesamten Ostalbkreis zusammengefasst. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die in der Untersuchung berücksichtigte Busflotte lediglich ca. 75% der im Ostalbkreis zur Bedienung des aktuellen ÖPNV-Angebots eingesetzten Busflotte repräsentiert. Für die nachfolgend dargestellten Ergebnisse auf Basis der unternehmensspezifischen Umlaufdaten wird daher jeweils eine grobe Gesamtschätzung für den Ostalbkreis vorgenommen.

Mit den verfügbaren Umlaufdaten wurde zunächst die mögliche Umstellung auf batterieelektrische Fahrzeuge überprüft, da dies in aller Regel die technisch einfachere und auch häufig wirtschaftlichere Lösung darstellt. Tabelle 20 stellt das ermittelte Umstellungspotenzial der untersuchten OAK-Flotte auf BEV dar. Bezogen auf die analysierten Betriebshöfe ergibt sich grundsätzlich für die 154 untersuchten Umläufe eine theoretische BEV-Umstellungsquote von 86% bzw. 132 BEV Fahrzeuge. Für die dafür notwendigen 132 Ladepunkte wurde die Realisierungsmöglichkeit mit den zuständigen Verteilernetzbetreibern für eine gesamte Netzanschlussleistung von 3.550 kW abgeklärt. 106 Ladepunkte benötigen einen Anschluss auf Mittelspannungsebene, für 25 Ladepunkte genügt ein Anschluss auf Niederspannungsebene. Für 5 der 11 näher untersuchten Betriebshöfe ist die zusätzliche Errichtung einer kundeneigenen Umspannstation (Nieder- auf Mittelspannung) am jeweiligen Betriebshof erforderlich. Die mittlere Anschlusslänge je Netzanschluss liegt bei 8 m, in Summe bei 1.105 m. Für alle Betriebshöfe ist entsprechend der Rückmeldungen der Verteilernetzbetreiber die Ladeinfrastruktur an den untersuchten Betriebshöfen innerhalb eines Jahres nach Antragstellung auch praktisch umsetzbar. Stand heute ist laut Auskunft der Verteilernetzbetreiber für keinen der untersuchten Standorte mit grundsätzlichen Einschränkungen bei der Realisierung des Netzanschlusses zu rechnen. Die entsprechenden Netzkapazitäten bieten für alle betrachteten Standorte ausreichend Reserven.

Für die Abstellungen ist die Errichtung von Ladeinfrastruktur aus organisatorischer Sicht nur bedingt bzw. nicht direkt möglich (Flächen sind angemietet, meist eher zu knappen Platzverhältnisse, Mietverträge werden durchaus auch kurzfristig wegen Eigenbedarf für die Flächen gekündigt, sodass die Errichtung einer Ladeinfrastruktur und die damit verbundenen Investitionen aus Sicht der Busbetreiber als nicht sinnvoll bzw. machbar angesehen werden), weswegen das Potenzial von Synergieoptionen zwischen den Verkehrsunternehmen sowie der Nutzung von öffentlicher Ladeinfrastruktur berücksichtigt werden. Insgesamt werden für die Abstellungsstandorte 51 Umläufe analysiert. Hiervon könnten durch die Verfügbarkeit eines möglichen öffentlichen Ladehubs in Bopfingen (vgl. Abbildung 24) sowie durch ein unternehmensübergreifendes Ladekonzept zweier Verkehrsunternehmen 22% der Umläufe mit BEV betrieben werden.

In Summe können im Ostalbkreis auf Basis der zugrunde gelegten Annahmen 143 von 205 Umläufen (70%) auf BEV umgestellt werden.

Tabelle 20: Umstellungspotenzial der untersuchten OAK-Flotte auf BEV

	Mini (PKW) ¹	Mini (Sprinter)	Solo (12 m)	Solo (> 12 m)	Doppel-decker	Gelenk (18 m)	Gesamt
Umstellungspotenzial BEV, Betriebshöfe							
Anzahl Umläufe ²	2	15	111	14	5	7	154 (100%)
Anzahl DFZ	2	12	90 ⁴	14	5	7	150⁴
Dieselbedarf, max. [1000 l/a]	2	70	1.661	160	90	177	2.159
Anzahl BEV machbar, gesamt	2	8	102 ⁵	13	0	7	132⁵ (86%)
Anzahl Ladepunkte ³	2	8	102 ⁶	13	0	7	132⁶
Strombedarf, max. [MWh/a]	8	139	6.094 ⁵	561	0	716	7.518
Umstellungspotenzial BEV, Abstellungen							
Anzahl Umläufe ²	-	3	44	-	-	4	51 (100%)
Anzahl DFZ	-	2	44	-	-	4	50
Dieselbedarf, max. [1000 l/a]	-	12	695	-	-	43	749
Anzahl BEV aus VU-Synergien und öffentlicher LIS = Anzahl Ladepunkte	-	1	8	-	-	2	11 (22%)
Strombedarf [MWh/a]	-	15	446	-	-	79	540
Umstellungspotenzial BEV, gesamt							
Anzahl Umläufe OAK ²	2	18	155	14	5	11	205 (100%)
Anzahl BEV machbar, gesamt	2	9	110 ⁵	13	0	9	143⁵ (70%)
Anzahl Ladepunkte	2	9	110 ⁶	13	0	9	143⁶
Strombedarf [MWh/a]	8	154	6.540 ⁵	561	0	795	8.058

¹ Kein marktfähiger wasserstoffbetriebener Bus in dieser Gefäßgröße verfügbar.

² Zur Erhöhung der Machbarkeit wurden zwei Umläufe auf jeweils zwei Umläufe aufgeteilt.

³ Mittlere Ladeleistung pro Ladepunkt über alle Betriebshöfe: 44 kW.

⁴ Exklusive der 20 BEV, die durch die OVA bereits betrieben werden.

⁵ Inklusive der 20 BEV, die durch die OVA bereits betrieben werden.

⁶ Grundsätzlich wird pro BEV-machbaren Umlauf ein Ladepunkt vorgesehen.

⁷ Inklusive der 22 Ladepunkte, die durch die OVA bereits betrieben werden.

Ist der Einsatz batterieelektrischer Fahrzeuge aufgrund zu langer Umläufe, ungenügender Ladezeit oder der nicht möglichen Realisierung von LIS nicht möglich, wird die Option des Einsatzes von FCV-Bussen untersucht. Entsprechend der technischen Machbarkeitsanalyse liegt die theoretische FCV-Umstellungsquote der Betriebshofumläufe bei 99% und der Abstellungsumläufe bei 100%. Allerdings muss neben der theoretischen Machbarkeit die

Verfügbarkeit von Wasserstoff gegeben sein. Abbildung 24 stellt einerseits die Standortnähe der untersuchten Standorte zu der sich bereits in Planung befindlichen Wasserstofftankstelle der H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG in Schwäbisch Gmünd dar, andererseits zeigt sie potenzielle Standorte zur Errichtung zweier weiterer Wasserstofftankstellen (H₂-Tankstelle 2 und H₂-Tankstelle 3) zu einer möglichst flächendeckenden Versorgung der betrachteten Betriebshöfe und Busabstellungen. Durch die beispielhaft getroffene Standortwahl kann die Wasserstoffversorgung für die Fahrzeuge ermöglicht werden, die nicht auf BEV umgestellt werden konnten (33 Fahrzeuge). Ein potenzieller Standort für die H₂-Tankstelle 2 ist demnach nahe Alfdorf (Rems-Murr-Kreis) im Nordwesten und für die H₂-Tankstelle 3 nahe Hüttlingen.

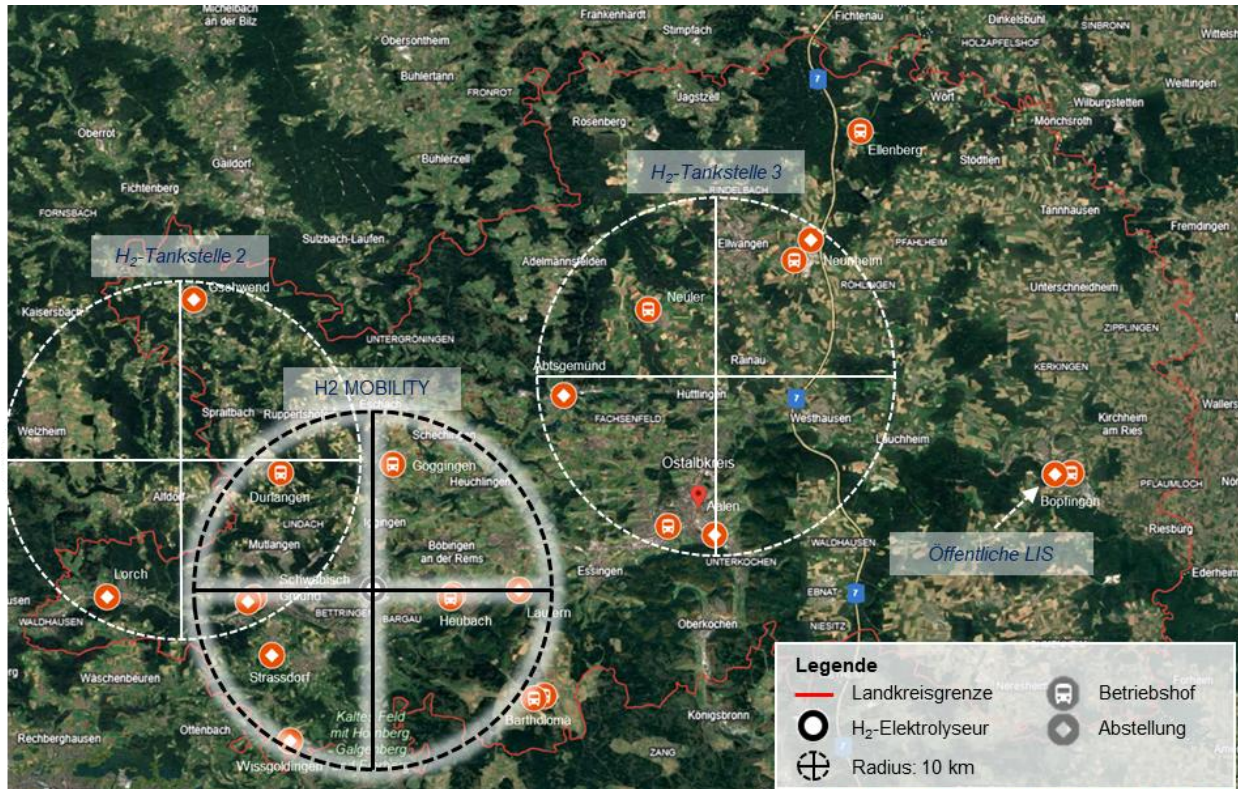


Abbildung 24: Lokalisierung externer Lade- und Tankinfrastruktur im Ostalbkreis

Das Umstellungspotenzial auf FCV ist für den OAK in Tabelle 21 dargestellt. Hierbei wird unterschieden, ob die Standorte sich in einer Entfernung von <10 km zur H2-MOBILITY-Tankstelle in Schwäbisch Gmünd befinden, oder sich im 10 km Umkreis der zwei zusätzlichen möglichen H₂-Tankstellenstandorte befinden. Hieraus ergibt sich, dass von den 62 Umläufen, die nicht mit BEV bedient werden können, 27 Umläufe durch ihre Standortnähe zur Wasserstofftankstelle in Schwäbisch Gmünd das Potenzial haben auf FCV umgestellt zu werden, sowie 33 Fahrzeuge, die durch die zwei weiteren Wasserstofftankstellen versorgt werden können. Die zusätzliche H₂-Tankstelle 2 nahe Alfdorf könnte für die Versorgung von mind. 11 Bussen genutzt werden, wobei sich auch weitere 13 Busse, die im Einzugsgebiet der sich in Planung befindlichen H2-MOBILITY-Tankstelle abgestellt werden, in einem 10-Kilometer-Radius zu dieser Tankstelle befinden. Es ergibt sich eine wünschenswerte Redundanz für die Wasserstoffversorgung der Busse und damit ein nicht unerheblicher Beitrag zur Steigerung der betrieblichen Stabilität. Die zusätzliche H₂-Tankstelle 3 nahe Hüttlingen könnte potentiell 22 Fahrzeuge mit Wasserstoff versorgen.

Tabelle 21: Umstellungspotenzial der untersuchten OAK-Flotte auf FCV

	Mini (PKW) ¹	Mini (Sprinter)	Solo (12 m)	Solo (> 12 m)	Doppel-decker	Gelenk (18 m)	Gesamt
Umstellungspotenzial FCV, Betriebshöfe							
Anzahl Rest-Umläufe (nicht BEV-machbar)	-	7	9	1	5	-	22 (100%)
Anzahl FCV machbar (<10 km zu H2-MOBILITY- + sonst. H2-Tankstelle)	-	0+5	9+0	0+1	0+5	-	9+11=20 (91%)
Wasserstoffbedarf [t/a]	-	7,5	29,3	2,1	22,1	-	61,1
Umstellungspotenzial FCV, Abstellungen							
Anzahl Rest-Umläufe (nicht BEV-machbar)	-	2	36	-	-	2	40 (100%)
Anzahl FCV machbar (<10 km zu H2-MOBILITY- + sonst. H2-Tankstelle)	-	0+2	18+18	-	-	0+2	18+22=40 (100%)
Wasserstoffbedarf [t/a]	-	1,9	137,5	-	-	5,6	145
Umstellungspotenzial FCV, gesamt							
Anzahl Umläufe	-	9	45	1	5	2	62 (100%)
Anzahl FCV machbar (<10 km zu H2-MOBILITY- + zusätzliche H2-Tankstellen)	-	0+7	27+18	0+1	0+5	0+2	27+33=60 (96%)
Wasserstoffbedarf [t/a]		9,4	166,8	2,1	22,1	5,6	206,1

Somit könnten im Ostalbkreis bis zum Jahr 2037 81% (OAK A) bis 99% (OAK B) der untersuchten Umläufe mit ZEV bedient werden, was einen Bedarf an 143 BEV³⁶ (70%) und 22 FCV (11%) für OAK A und einen Bedarf von 143 BEV³⁶ (70%) und 60 FCV (29%) für OAK B entspricht. Die restlichen beiden Umläufe, die in beiden Szenarien nicht umgestellt werden können, sind weiterhin mit Dieselfahrzeugen der Kategorie „Mini (Sprinter)“ zu betreiben, da sie nicht in der Nähe der H₂-Tankstellen sind.

Für den gesamten Kreis wird vereinfacht angenommen, dass die zusätzlichen Gefäße im gleichen Verhältnis umgestellt werden können, wie die untersuchte 75%-Flotte. Demnach wären für den OAK in Summe schätzungsweise 274 Gefäße im Betrieb, von welchen max. 70% auf BEV umgestellt werden können (192 Fahrzeuge). Von der restlichen Flotte können entweder bis zu 13% (OAK A: 36 Fahrzeuge) auf ZEV umgestellt werden, wenn angenommen wird, dass sich die entsprechenden Fahrzeuge in der Nähe zur H₂-MOBILITY-Tankstelle befinden, oder bis zu 29% (79 Fahrzeuge), wenn angenommen wird, dass es zwei zusätzliche Wasserstofftankstellen zur Versorgung im Kreisgebiet gibt.

³⁶ Die 132 BEV beinhalten die 20 E-Busse, die bereits durch die OVA im Einsatz sind.

5.2 Roadmap zur Technologieumstellung

Die Umstellung auf ZEV im Ostalbkreis hängt zudem von der Nutzungsdauer der bisher eingesetzten Flotte und der damit einhergehenden notwendigen Flottenerneuerungszeitpunkte ab. Es wird davon ausgegangen, dass die eingesetzten Fahrzeuge nach einer Nutzungsdauer von 12 Jahren ersetzt werden müssen. Abbildung 25 zeigt für den Untersuchungszeitraum 2026 bis 2037 den notwendigen Fahrzeugneubeschaffungsbedarf pro Jahr und unterschieden nach Gefäßgrößen. Es wird davon ausgegangen, dass keine Angebotsausweitung erfolgt, d. h. es wird kein Flottenzuwachs berücksichtigt. Aktuell wird in den Jahren 2032 bis 2034 entsprechend der Altersstruktur der Busflotte mit einem hohen Neubeschaffungsbedarf gerechnet (ca. 60% bezogen auf die Gesamtflotte, vgl. Abbildung 25).

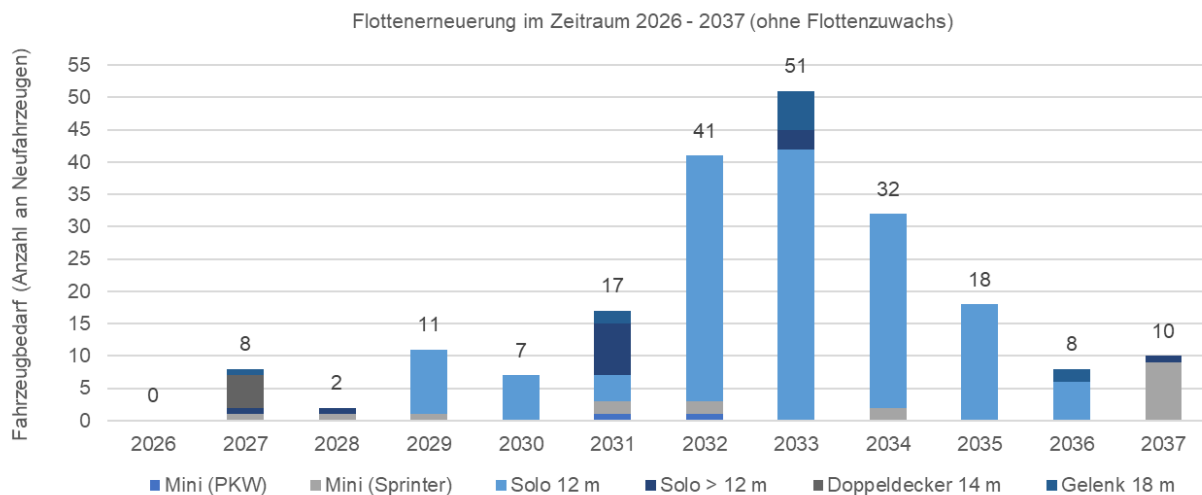


Abbildung 25: Fahrzeugneubeschaffungsbedarf zwischen 2026 und 2037 (ohne Flottenzuwachs)

Der dargestellte Fahrzeugneubeschaffungsbedarf zwischen 2026 und 2037 bildet die Basis der Roadmap zur Technologieumstellung für den Ostalbkreis (siehe Abbildung 26). Es wird davon ausgegangen, dass, wie in Kapitel 5.1 beschrieben, für alle untersuchten Standorte, an denen Ladeinfrastruktur baulich realisiert werden kann (Betriebshöfe, öffentlicher Ladehub in Bopfingen, Synergieoption zwischen VUs) alle Umläufe, die mit BEV technisch machbar sind, sukzessive umgestellt werden. Es wird angenommen, dass der öffentliche Ladehub in Bopfingen ab 2028 zur Verfügung steht. Für die Umstellung der Restflotte wird danach unterschieden, ob die Fahrzeuge in der Nähe der geplanten H2-MOBILITY-Tankstelle in Schwäbisch Gmünd stationiert sind (OAK A)³⁷ oder nur durch die zwei zusätzlichen Wasserstofftankstellenstandorte bedient werden könnten (vgl. Abbildung 24) (OAK B). Entsprechend den Szenarien zur Wasserstoffversorgung ändert sich der Mehrbedarf an Dieselfahrzeugen pro Jahr (Diesel (OAK A) bzw. Diesel (OAK B)). Für das Jahr 2026 werden die 20 BEV, die seit dem Jahr 2025 bei der OVA im Einsatz sind, bereits berücksichtigt. Das Referenzjahr 2026 setzt sich demnach aus 185 Diesel-Fahrzeugen und 20 BEV zusammen (ca. 75% der Gesamtflotte im Ostalbkreis). Aufgrund der momentanen Planung eines weiteren VUs wird zudem eine Beschaffung von FCV in den Jahren 2027 (4 Fahrzeuge) und 2028 (3 Fahrzeuge) berücksichtigt.

³⁷ Hierbei sind die aktiven Umstellungspläne eines Unternehmens von 7 Dieselfahrzeugen auf 7 FCV berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass 4 dieser FCVs im Jahr 2027 in Betrieb genommen werden und 3 im Jahr 2028.

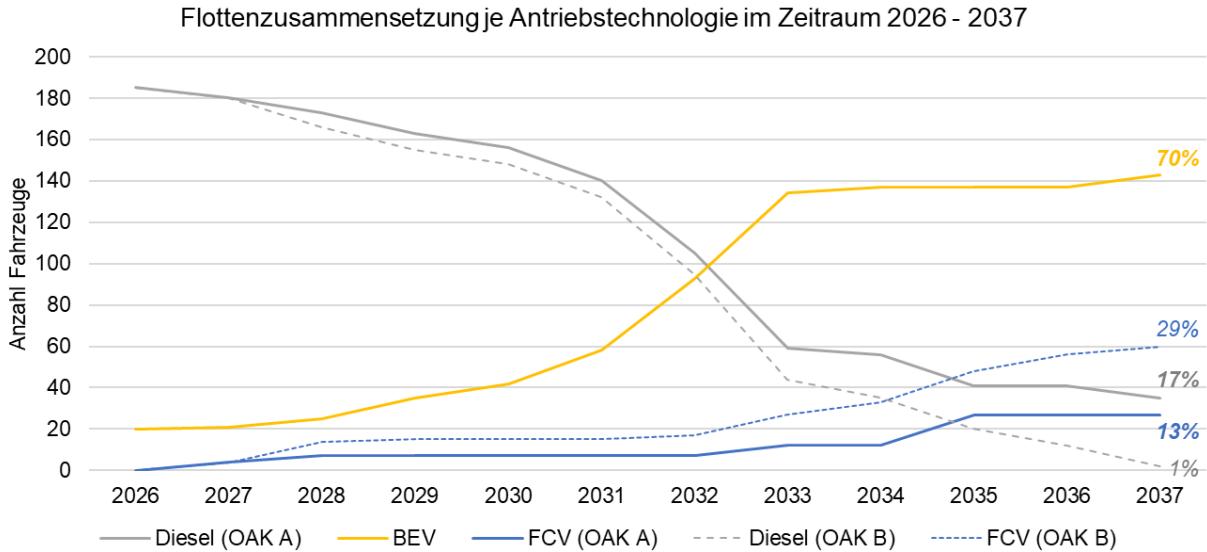


Abbildung 26: Roadmap zur Technologieumstellung - Flottenzusammensetzung je Antriebstechnologie im Ostalbkreis von 2026 bis 2037 (ohne Flottenzuwachs)

Abbildung 27 zeigt für den Betrachtungszeitraum den Flottenanteil nach Antriebstechnologie. Für das Szenario OAK A sieht man, dass ab der geplanten Eröffnung in 2027 der H2-MOBILITY Tankstelle sukzessive 4 (2027) bis 27 (2037) Fahrzeuge versorgt werden können. Für das Szenario OAK B ist zugrunde gelegt, dass die entsprechenden zusätzlichen Tankstellen (H₂-Tankstelle 2 und H₂-Tankstelle 3, vgl. Abbildung 24) ab den Jahr 2028 einsatzbereit sind. Diese können zusätzlich die Versorgung der entsprechend den Annahmen des Szenarios von 7 Fahrzeugen (ab 2028) auf 33 Fahrzeuge anwachsenden FCV-Busflotte (bis 2037) gewährleisten.

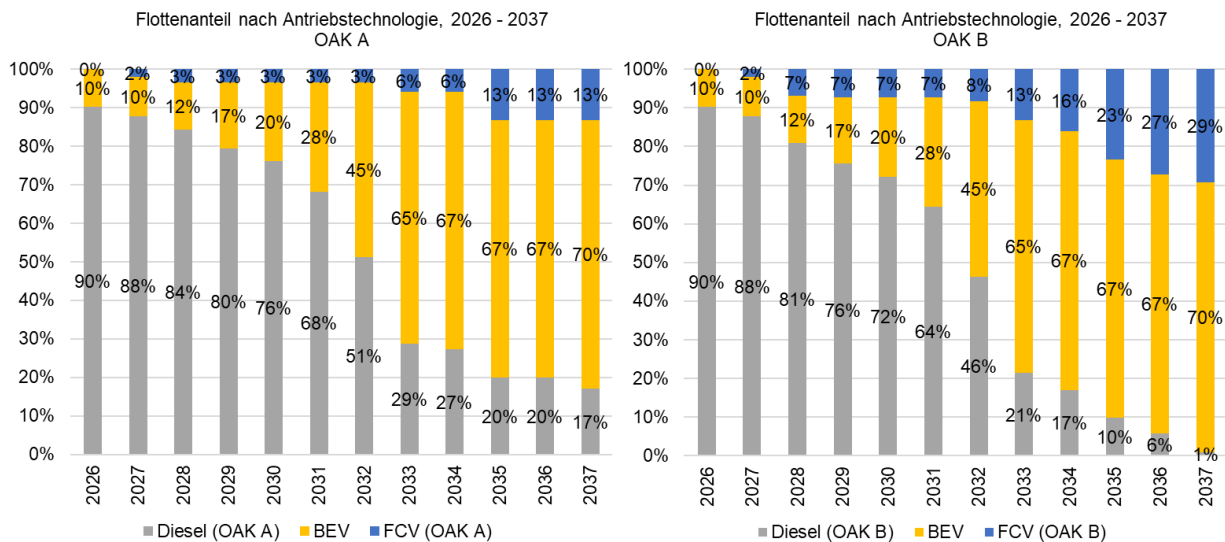


Abbildung 27: Flottenanteil nach Antriebstechnologie von 2026 bis 2037 (links: Szenario OAK A, rechts: Szenario OAK B, ohne Flottenzuwachs)

Für den gesamten Kreis wird vereinfacht angenommen, dass die zusätzlichen Gefäße bis zum Jahr 2037 im gleichen Verhältnis umgestellt werden können, wie die untersuchte 75%-Flotte.

5.3 Abschätzung des Gesamt-THG-Reduktionspotenzials für den Ostalbkreis

Es erfolgt zunächst die Aggregation der Ergebnisse für das Reduktionspotenzial der THG-Emissionen für die untersuchten Busbetreiber im Kreis entsprechend der Transformationsszenarien OAK A und OAK B (siehe Abbildung 28). Durch die Flottenumstellung entsprechend des Szenarios OAK A besteht bis zum Jahr 2037 ein jährliches THG-Reduktionspotenzial, das entsprechend der graduellen Umstellung der Flotte auf 44% anwächst. Entsprechend des Szenarios OAK B – durch den größeren ZEV-Anteil in der Flotte – ergibt sich ein Reduktionspotenzial der Gesamt-THG-Emissionen von bis zu 56% (im Jahr 2037) gegenüber dem Referenzjahr 2026. Der Sprung in den Jahren 2032 bis 2035 ist auf die Fahrzeugneubeschaffung und die Umstellungsmöglichkeit auf ZEV zurückzuführen (vgl. Abbildung 25 und

Abbildung 27). In Summe können innerhalb des Betrachtungszeitraums ca. 27.200 Tonnen CO₂e (OAK A) bzw. ca. 33.500 Tonnen CO₂e (OAK B) bei den untersuchten Verkehrsunternehmen eingespart werden. Die jährliche Einsparung steigt bis 2037 auf bis zu ca. 4.600 Tonnen CO₂e (OAK A) bzw. auf bis zu 5.800 Tonnen CO₂e (OAK B).

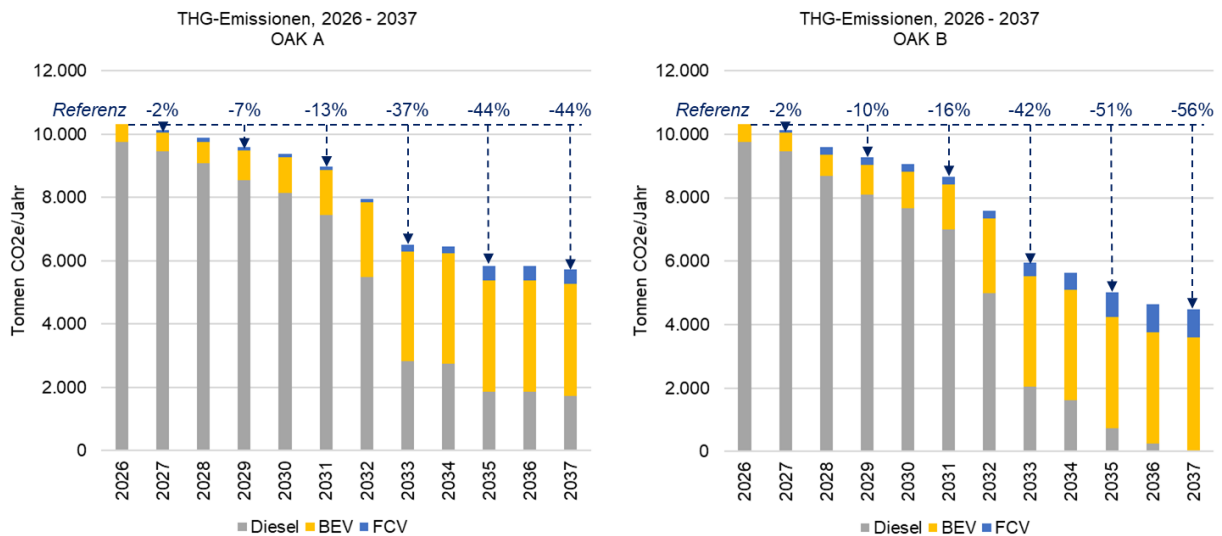


Abbildung 28: Gesamt-THG-Reduktionspotenzial für den Ostalbkreis (links: Szenario OAK A, rechts: Szenario OAK B; ohne Flottenzuwachs)

Für den gesamten Kreis werden zur Abschätzung des THG-Reduktionspotenzials die Ergebnisse der untersuchten 75%-Flotte entsprechend skaliert. Tabelle 22 stellt jeweils für die 75%-Flotte und schätzungsweise für die 100%-Flotte die THG-Emissionen für das Jahr 2026 und 2037 sowie das entsprechende THG-Reduktionspotenzial dar. Die jährliche Reduktionspotenzial steigt bis 2037 schätzungsweise auf bis zu ca. 6.100 Tonnen CO₂e (OAK A) bzw. auf bis zu 7.800 Tonnen CO₂e (OAK B). In Summe können im Hinblick auf die 100%-Flotte innerhalb des Betrachtungszeitraums ca. 36.400 Tonnen CO₂e (OAK A) bzw. ca. 44.700 Tonnen CO₂e (OAK B) eingespart werden.

Tabelle 22: Abschätzung des THG-Reduktionspotenzials für die gesamte OAK-Flotte (100%-Flotte)

THG-Emissionen	OAK A			OAK B		
	2026	2037	Reduktion	2026	2037	Reduktion
75%-Flotte [Tonnen CO ₂ e/Jahr]	10.319	5.735	4.584 (-44%)	10.319	4.494	5.825 (-56%)
Abschätzung 100%-Flotte [Tonnen CO ₂ e/Jahr]	13.793	7.666	6.127 (-44%)	13.793	6.007	7.786 (-56%)

5.4 Abschätzung der Gesamt-Mehrkosten für den Ostalbkreis

Es erfolgt die Aggregation der Mehrkosten auf Kreisebene für die beiden Transformationsszenarien OAK A (siehe Abbildung 29, ohne Förderung, und Abbildung 30, inkl. Berücksichtigung des Förderszenarios) und OAK B (Abbildung 31 und Abbildung 32, inkl. Berücksichtigung des Förderszenarios). Die Mehrkosten, die mit der Umstellung auf ZEV einhergehen, setzen sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- Fahrzeugbeschaffungskosten, inkl. Finanzierungskosten,
- Kosten für die Energieversorgungsinfrastruktur (Ladeinfrastruktur für BEV³⁸),
- Betriebskosten in Form von Energiebereitstellungskosten (Diesel, Strom und Wasserstoff) und Wartungskosten sowie
- Kosten für Ersatzkomponenten (Wechsel der HV-Batterie planmäßig nach 8 Jahren, bei der Gefäßgröße „Mini (Sprinter)“ nach 6 Jahren).

Mit steigender Anzahl der ZEV-Neubeschaffung steigt der Anteil der Fahrzeugbeschaffungskosten innerhalb der Mehrkostenabschätzung. Der Investitionsbedarf für die Energieversorgungsinfrastruktur (Ladeinfrastruktur für BEV) wird in dem Jahr angenommen, in welchem die Fahrzeugneubeschaffung stattfindet. Aufgrund der höheren FCV-Quote im OAK B Szenario (siehe Abbildung 31) und den damit verbundenen etwas höheren Anschaffungs- und Betriebskosten, liegen die kumulierten Mehrkosten von 91 Mio. € über den kumulierten Mehrkosten von 79 Mio. € aus Szenario OAK A (Abbildung 29).

Für beide Transformationsszenarien ist ersichtlich, dass im Jahr 2032 ein nicht unwesentlicher Teil der Mehrkosten auf die Beschaffung von Ersatzkomponenten in Form der HV-Batterien anfällt. Dieser Beschaffungsaufwand (ca. 10%) entfällt auf die 20 Busse, die seit 2025 im OAK eingesetzt werden und für die nach 8 Jahren planmäßig ein wartungsbedingter HV-Batteriewechsel angenommen wird. In den letzten vier Jahren (2034–2037) sind die Kosten für weitere Batterieerneuerungen erkennbar, die für Fahrzeuge anfallen, die in den Jahren 2027 bis 2029 eingeflottet wurden. Einige Hersteller bieten beim Kauf eines BEV die Möglichkeit, eine Garantieverlängerung für die Hochvoltbatterie zu erwerben. Diese Option deckt die Mehrkosten für einen späteren Batterietausch ab, erhöht jedoch die Kosten bei der Anschaffung. Bei der Planung sollte daher sorgfältig geprüft werden, ob eine Garantieverlängerung, ein Batterietausch oder die frühzeitige Neubeschaffung des Fahrzeugs – unter Nutzung von Förderprogrammen – wirtschaftlich die sinnvollste Lösung darstellt.

Neben den Wartungskosten sind in den Betriebskosten die Kosten für die Diesel-, Strom- und Wasserstoffbeschaffung inkludiert. Je höher der BEV-Zuwachs der Flotte wird, desto mehr wird der Kostenvorteil der geringeren Stromkosten gegenüber Diesel- und Wasserstoffkosten sichtbar.

³⁸ Infrastrukturkosten für FCV sind im Wasserstoffpreis inkludiert.

In Abbildung 30 und Abbildung 32 wird der Einfluss einer Förderung der Fahrzeugbeschaffungsmehrkosten und der Infrastrukturinvestitionskosten auf die sich ergebenden Mehrkosten dargestellt. Hierbei wird von einer Förderung in Anlehnung an das Landesförderprogramm Baden-Württemberg (Busförderprogramm und Infrastrukturförderung im Rahmen des LGVFG-ÖPNV) für mittlere Unternehmen ausgegangen, welches eine 70%-Förderung für die Fahrzeugmehrkosten sowie eine bis zu 75% Förderung für die Infrastrukturinvestitionskosten berücksichtigt, wobei für das hier betrachtete Förderszenario mit 70% ein etwas konservativerer Wert angenommen wird (vgl. Kapitel 4.6). Die Förderung wirkt somit unmittelbar für die größten Kostenblöcke in OAK A und OAK B als Hebel zur Reduzierung der Mehrkosten. Durch das Förderszenario reduzieren sich die kumulierten Mehrkosten innerhalb des Betrachtungszeitraums von 2026 bis 2037 für das Transformationsszenario OAK A und OAK B um jeweils ca. 70% (Mehrkostenreduktion durch Förderung OAK A: 54 Mio. € bzw. 62 Mio. € für OAK B) auf ca. 24 Mio. € (OAK A) bzw. auf ca. 28 Mio. € (OAK B).

Für den gesamten Kreis werden zur Abschätzung der Mehrkosten die Kostenkomponenten Fahrzeugbeschaffungskosten, Betriebskosten und Ersatzkomponenten linear skaliert. Für die Kosten für die Energieversorgungsinfrastruktur wird entsprechend den Ergebnissen der von Sphera durchgeführten CVD-Studie die Annahme getroffen, dass die Mehrkosten der Ladeinfrastruktur mit steigender Anzahl an Ladepunkten sinken. Daher wird eine Reduktion der Ladeinfrastrukturinvestitionskosten von 5% angenommen (vgl. (15)). Die Umstellung der 100%-Flotte auf ZEV ist daher schätzungsweise mit kumulierten Mehrkosten innerhalb des Betrachtungszeitraums von 2026 bis 2037 ohne Berücksichtigung des Förderszenarios von ca. 105 Mio. € (OAK A) bis 121 Mio. € (OAK B) verbunden. Mit Berücksichtigung des Förderszenarios belaufen sich die kumulierten Mehrkosten auf ca. 32 Mio. € (OAK A) bis 37 Mio. € (OAK B).

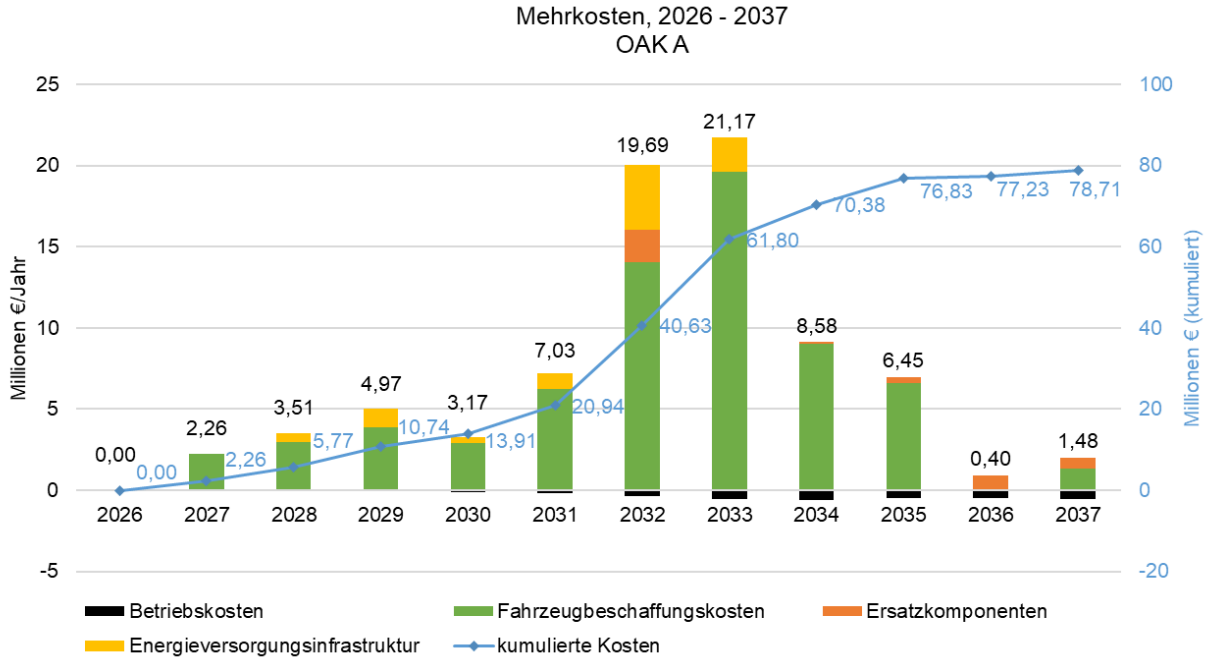


Abbildung 29: Merkkosten im Betrachtungszeitraum 2026 bis 2027, Szenario OAK A

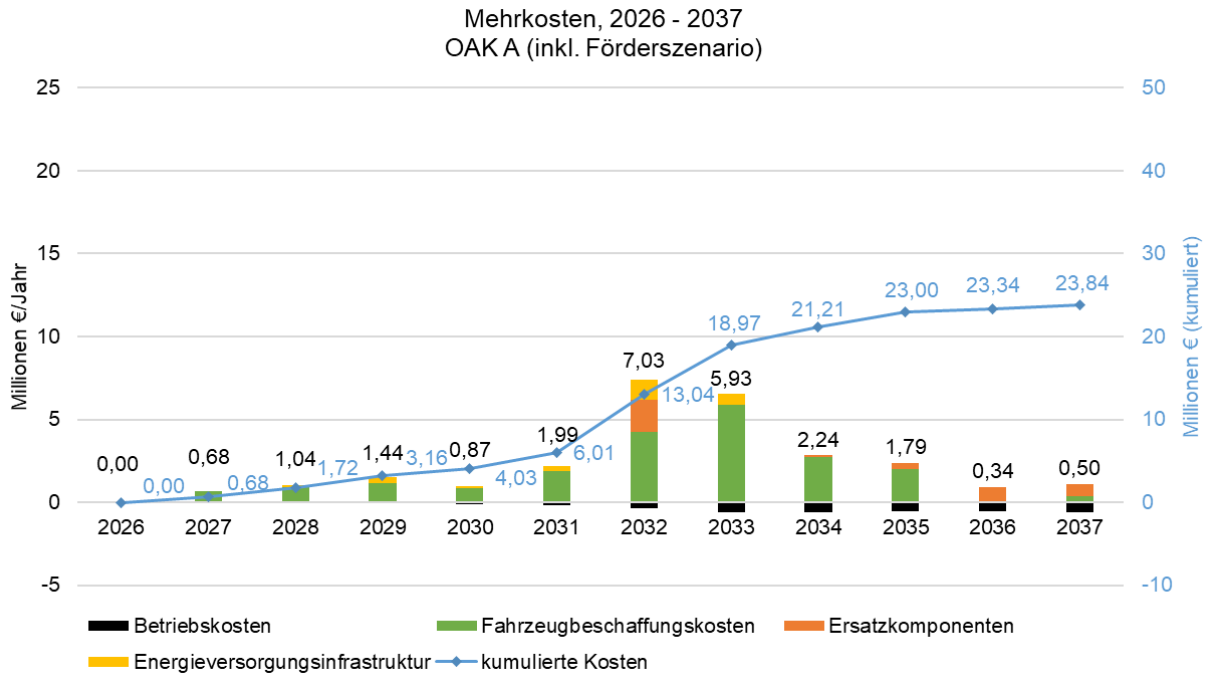


Abbildung 30: Merkkosten im Betrachtungszeitraum 2026 bis 2027, Szenario OAK A, inkl. Förderszenario

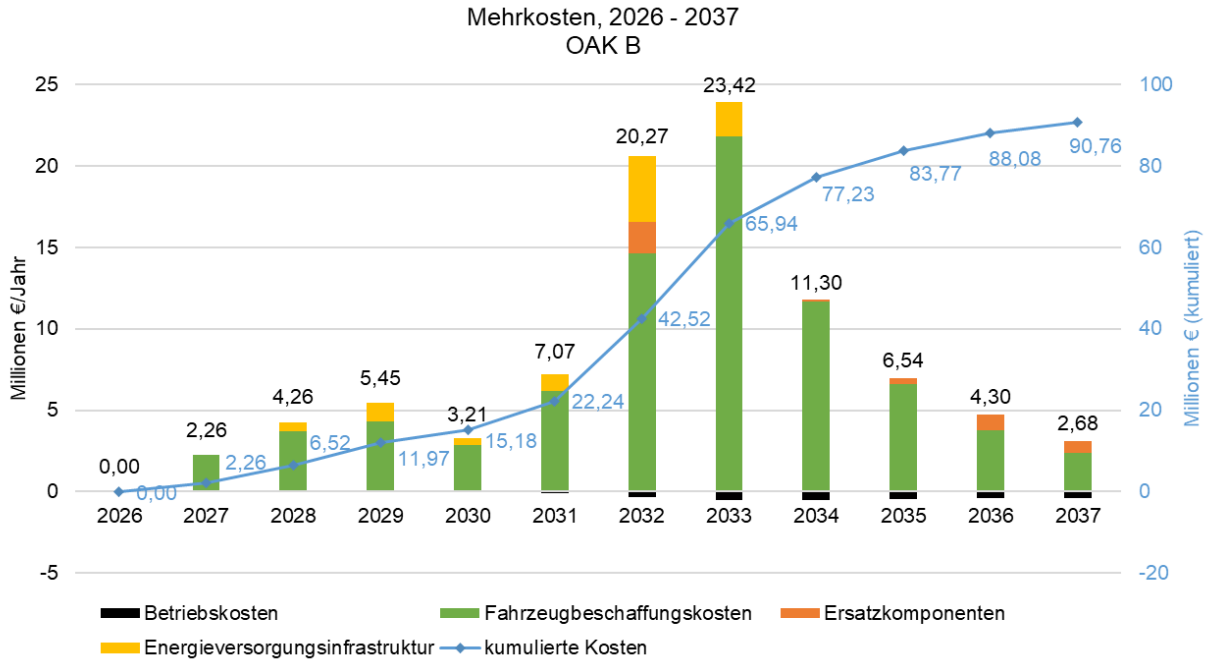


Abbildung 31: Merkmkosten im Betrachtungszeitraum 2026 bis 2027, Szenario OAK B

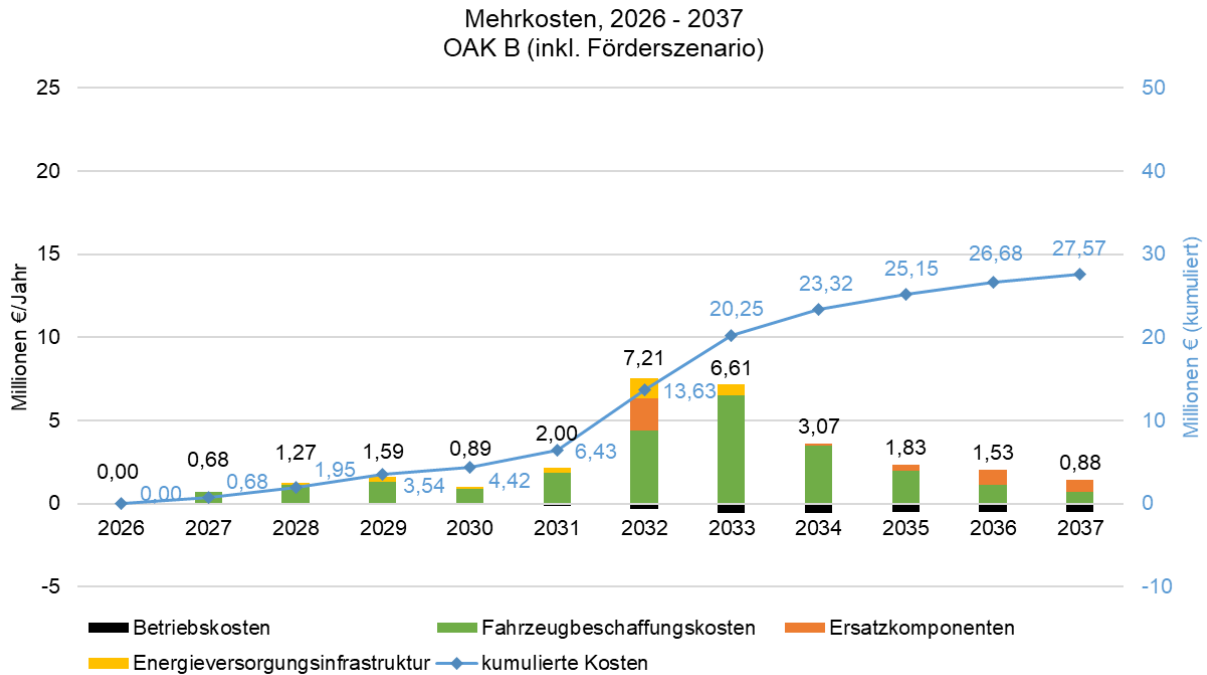


Abbildung 32: Merkmkosten im Betrachtungszeitraum 2026 bis 2027, Szenario OAK B, inkl. Förderszenario

5.5 Handlungsempfehlungen für den Transformationsprozess

Der Transformationsprozess im ÖPNV hin zu emissionsfreien Antrieben wird derzeit durch politische und gesetzliche Vorgaben vorangetrieben, wie z. B. dem Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungsgesetz, mit dem die 2021 in Kraft getretene europäische Clean Vehicle Directive in nationales Recht umgesetzt wurde, dem im März 2025 vom Land verabschiedeten Landesmobilitätsgesetz und dem „Leitbild Nachhaltigkeit und Umweltschutz“, wie es im Nahverkehrsplan 2021 des Ostalbkreis definiert wurden. Die Umstellung der Busflotten auf emissionsfreie Antriebstechnologien bringt dabei sowohl Chancen als auch Risiken mit sich. Zu den Vorteilen, die die Einführung zukunftsorientierter Antriebstechnologien für Verkehrsbetriebe bietet, zählen u. a. der frühzeitige Aufbau von Know-how zum Einsatz von elektrisch angetriebenen Bussen, die damit verbundenen positiven Umwelteffekte für die Bevölkerung (reduzierter Lärm und Emissionen), die Positionierung als Anbieter eines attraktiven öffentlichen Nahverkehrs und mit Blick auf die Personalgewinnung als moderner Arbeitgeber sowie die Wahrnehmung als Vorreiter der Verkehrswende bei Kunden und dem Landkreis als Auftraggeber. Neben den in Kapitel 2.5 dargestellten Best-Practice-Grundlagen für die erfolgreiche Umstellung auf emissionsfreie Busantriebe – sei es batterieelektrisch oder wasserstoffbasiert – lassen sich verschiedene Handlungsempfehlungen für den Transformationsprozess des ÖPNV im Ostalbkreis ableiten.

Ausgangspunkt ist dabei die im Kapitel 5.2 ermittelte Roadmap zur Technologieumstellung im OAK, die anhand der verfügbaren Informationen zum Alter des Busse, den einzelnen Unternehmensstrategien, die mit den VUs in Einzelinterviews erörtert wurden, sowie anhand der Eignungsanalyse der verfügbaren Antriebstechnologien (BEV, FCV), die umlaufspezifisch für die einzeln untersuchten Busunternehmen durchgeführt wurde. Hierfür wurde ein technologieoffener Ansatz verfolgt, um auch das Potenzial für die Teilflotte aufzuzeigen, welche aufgrund der technischen Machbarkeit (Stichwort Reichweite) oder der Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur derzeit absehbar nicht auf BEV umgestellt werden können. Für die Roadmap wurde zunächst ein Szenario (OAK A) berücksichtigt, welches den derzeitigen Planungsstand der Wasserstoffversorgung im Ostalbkreis integriert (Wasserstofftankstelle in Schwäbisch Gmünd, Industriepark Gügling), die Stromversorgung einer Teilflotte, die nicht an einem Betriebshof stationiert ist, mittels eines öffentlichen Ladehubs in Bopfingen sowie der zusätzlichen Synergieoption für Ladeinfrastruktur für zwei VUs in Neunheim. Das zweite Szenario (OAK B) berücksichtigt zwei zusätzliche Wasserstoffversorgungspunkte im Kreisgebiet, durch welche die Umstellung von 99% der OAK-Busflotte auf ZEV erfolgen könnte (bis auf zwei Fahrzeuge der Kategorie „Mini (Sprinter)“).

Gewährleistung einer hohen Verfügbarkeit

Für die erfolgreiche Integration der neuen Antriebstechnologien in Busflotten ist die Gewährleistung einer hohen Verfügbarkeit entscheidend. Dies ist die Grundvoraussetzung für die Akzeptanz der neuen Antriebstechnologien bei allen Beteiligten (Busunternehmen, Fahr- und Werkstattpersonal, Fahrgästen und Auftraggebern). Hierzu müssen die verschiedenen Faktoren, die zu einer hohen Verfügbarkeit beitragen, berücksichtigt und entsprechende Maßnahmen und Managementprozesse implementiert werden.

In der täglichen Betriebsführung gilt es sicherzustellen, dass die zum Einsatz kommenden BEV-Busse zu Dienstbeginn vollständig geladen sind. Über den Tag hinweg muss der Ladestand der HV-Batterie im Fahrzeug in Abstimmung mit dem Fahrpersonal kontinuierlich überwacht werden, um im Falle eines niedrigen Ladestandes den ggf. erforderlichen Fahrzeugwechsel im laufenden

Betrieb rechtzeitig vorzunehmen. Hierfür bietet sich der Einsatz softwareunterstützte Betriebshof³⁹- und Betriebsmanagementsysteme an.

Ein weiterer zentraler Faktor ist die zuverlässige Verfügbarkeit der Lade- und Wasserstofftankinfrastruktur. Bereits während der Planungsphase ist auf eine möglichst hohe Verfügbarkeit zu achten, beispielsweise durch die Integration von Redundanzen hinsichtlich der Schlüsselkomponenten wie Trafo, Wasserstoffverdichter, Lade-/Tankpunkte und die jeweils erforderlichen Steuerungssysteme. Sobald erste wasserstoffbetriebene Brennstoffzellenbusse im Ostalbkreis im Einsatz sind, ist es idealerweise anzustreben, möglichst zeitnah eine zweite Tankstelle im Landkreis in Betrieb zu nehmen.

Wenn die Busse selbst gewartet werden, müssen entsprechende Erfahrungen hinsichtlich der Ersatzteilverfügbarkeit und -vorhaltung aufgebaut und die Lagerhaltung entsprechend angepasst werden. Hinsichtlich Wartungs- und Reparaturverträgen mit externen Werkstätten – sei es für die Fahrzeuge oder die Ladeinfrastruktur – sind geeignete Reaktionszeiten zu vereinbaren.

Während der Einführungsphase (der ersten drei bis sechs Monate) wird empfohlen, eine erhöhte Fahrzeugreserve (Dieselbusse) vorzuhalten, um auf mögliche Unwägbarkeiten reagieren zu können, die während der Anlaufphase auftreten können. Dies hilft dabei, den zuverlässigen Linienbetrieb abzusichern.

Planung

Generell sind eine sorgfältige Planung und Vorbereitung von entscheidender Bedeutung. Um die Einführung der neuen Antriebstechnologien erfolgreich zu gestalten, ist eine integrierte Planung der Fahrzeugbeschaffung sowie – im Falle der Umstellung auf batterieelektrische Antriebe – der benötigten Ladeinfrastruktur erforderlich. Zu den weiteren zu berücksichtigenden Punkten zählen die Ertüchtigung der eigenen Werkstatt für die Wartung der Fahrzeuge (sofern vorhanden) sowie die Weiterbildung und Sensibilisierung der Mitarbeiter in den verschiedenen Unternehmensbereichen. Als erste Orientierung sollte ein Zeitraum von ca. 24 Monaten veranschlagt werden, mindestens jedoch 18 Monate.

Probetrieb

Um die Umstellung für die VUs zu erleichtern, wird eine vorab durchgeführte Erprobung von ZEV auf sinnvoll ausgewählten Routen empfohlen. Dabei sollten möglichst lange Umläufe bei niedrigen Außentemperaturen (< 5 °C) gewählt werden. Dies kann beispielsweise durch die ein- oder sogar mehrwöchige Integration eines BEV- oder FCV-Busses in den täglichen Betrieb erfolgen. Ein solcher Probetrieb ermöglicht es dem einzelnen Busunternehmen, die neuen Technologien unter den eigenen betriebsspezifischen Bedingungen praxisnah zu testen. Durch die begleitende Datenerhebung während des Probetriebs können wichtige Erkenntnisse zur technischen Eignung und zur Wirtschaftlichkeit, einschließlich der Ermittlung erster Ansatzpunkte für mögliche Ladestrategien, gewonnen werden. Gerade die zeitliche Gestaltung des Ladens und die Optimierung hin zu einer möglichst geringen Ladeleistung, um die erforderliche Netzanschlussleistung und den damit verbundenen Leistungspreis zu minimieren, bieten relevante Kosteneinsparungspotenziale von über 15% (16), (17). Diese Erfahrungen schaffen eine gute Entscheidungsgrundlage für die weitere Einführung der Antriebstechnologien und reduzieren die Risiken bei der Umstellung.

³⁹ Inkl. Lademanagementsystem zur Überwachung und Steuerung der Ladeleistung und des Ladezustands der HV-Batterie.

Modulare Auslegung Lade- und Tankinfrastruktur

In Bezug auf die Planung und Auslegung der benötigten Lade- bzw. Tankinfrastruktur wird ein modularer und skalierbarer Ansatz empfohlen, der die jeweiligen Standortgegebenheiten und Betriebsbedingungen berücksichtigt. Die weitgehend planbare Flottenumstellung (Tausch der Fahrzeuge nach Nutzungsdauer) kann daher als Maßgabe für die mitwachsende Infrastruktur zugrunde gelegt werden. Für die Umstellung auf BEV an den Betriebshöfen wurde pro umgestelltem BEV grundsätzlich ein Ladepunkt am Betriebshof vorgesehen, an dem das Fahrzeug über Nacht geladen werden kann (Depotladung). Im Sinne der betrieblichen Flexibilität wird zudem empfohlen, mindestens zwei Ladepunkte bzw. 20 % der errichteten Ladepunkte pro Betriebshofstandort regelbar vorzusehen. An diesen kann mit einer erhöhten Ladeleistung von bis zu 150 kW geladen werden, sodass die Busse durch das schnellere Laden kurzfristig auf den erforderlichen Ladestand gebracht werden können. Zu berücksichtigen sind auch, wie bereits erwähnt, Redundanzen in den Infrastrukturkomponenten, um Ausfallzeiten zu minimieren und die Verfügbarkeit zu erhöhen.

Etablierung regionaler Wertschöpfungsketten

Für die Planung und Realisierung der Umstellung bei den einzelnen Busunternehmen – die unter anderem die Errichtung der benötigten Ladeinfrastruktur und die Ertüchtigung der Werkstatt, sofern vorhanden, beinhaltet – wird der Aufbau regionaler Wertschöpfungsketten empfohlen. Die Einbindung lokaler Akteure (Energieversorger, Handwerksbetriebe, Werkstätten etc.) bietet Busunternehmen gleich mehrere Vorteile bei der Umstellung auf emissionsfreie Antriebe. Durch die Zusammenarbeit mit regionalen Partnern wird die lokale Wirtschaft gestärkt und die Verfügbarkeit von Dienstleistern in der Region erhöht. Kurze Wege und direkte Ansprechpartner erleichtern die Abstimmung während der Planungs- und Umsetzungsphase, was zu einer schnelleren und effizienteren Realisierung und späteren Inbetriebnahme der ZEV-Busse führt.

Errichtung öffentlicher Lade- und Tankinfrastruktur

Da ein relevanter Teil der Umläufe der untersuchten Unternehmen von Fahrzeugen bedient wird, die nicht an einem Betriebshof stationiert sind (angemietete, öffentliche oder private Abstellungen), und sich die erforderliche Ladeinfrastruktur daher üblicherweise nur schwierig bzw. gar nicht realisieren lässt und die Fahrzeuge zudem eventuell nicht im direkten Umkreis der geplanten Wasserstofftankstelle liegen, wird empfohlen, die Errichtung weiterer öffentlicher Lade- und Tankpunkte (siehe Vorschlag zu weiteren H₂-Tankstellen nahe Alfdorf und nahe Hüttlingen) an strategisch sinnvollen Plätzen im Kreisgebiet zu forcieren. Aufgrund der besonderen organisatorischen Rahmenbedingungen im Ostalbkreis (eigenwirtschaftliche VUs) sollten die strategisch sinnvollen öffentlichen Lade- und Tankpunkte in enger Abstimmung mit den Verkehrsunternehmen ausgewählt werden, um die Verkehrswende im Kreisgebiet gemeinsam und im Sinne des Nahverkehrsplans (8) zu gestalten.

Als Beispiel kann hier Aalen als weiterer potentieller Standort für einen zusätzlichen öffentlichen Ladehub genannt werden. Hier werden derzeit 7 Busse auf einer privat angemieteten Fläche abgestellt. Die Umläufe, die diese Busse bedienen, sind im Rahmen der technischen Machbarkeitsanalyse alle als BEV-machbar bewertet worden.

Verwendung Biokraftstoffe

Wenn die Errichtung zusätzlicher Lade- und Tankinfrastruktur im Kreisgebiet nicht sofort realisierbar ist, besteht weiterhin die Möglichkeit, die restliche Teilflotte an Dieselnissen mit Biokraftstoffen zu betreiben. Der Einsatz von zertifizierten Biokraftstoffen wie HVO (*engl., Hydrotreated Vegetable Oil*) kann eine schnelle und kosteneffiziente Reduzierung der THG-Emissionen bewirken und somit als sinnvolle Zwischenlösung dienen. Hierbei kann die

bestehende Tankinfrastruktur genutzt werden, ohne dass große Investitionen in neue Fahrzeugtechnologien erforderlich sind. Dies gilt sowohl für den Betrieb der Dieselflotte bis zum jeweiligen Umstellungszeitpunkt auf ZEV als auch für die Dieselfahrzeuge, die absehbar im Einsatz bleiben werden. Werden Busse mit Biokraftstoffen betrieben, fallen sie entsprechend des SaubFahrzeugBeschG bzw. der CVD unter die Kategorie der emissionsarmen Fahrzeuge und tragen somit ebenfalls zur Erfüllung der Quotenziele für diese Kategorie bei (vgl. Kapitel 2.3). Diese Lösung ermöglicht es, kurzfristig den Klimazielen näherzukommen, während mittelfristig der Einsatz von Batterie- und/oder Wasserstoffbussen vorbereitet werden kann.

Auch für die Beheizung der BEV bei niedrigen Außentemperaturen, die den Studienannahmen entsprechend mit flüssigkraftstoffbasierten Zusatzheizungen erfolgt, ist der Einsatz von Biokraftstoffen wie HVO empfehlenswert. Dies ist eine einfache Maßnahme, um den CO₂-Ausstoß weiter zu senken, ohne dass zusätzliche Infrastruktur oder große Investitionen erforderlich sind. Das damit verbundene Einsparpotenzial liegt im Szenario BEV & Diesel bzw. BEV & H₂ bei schätzungsweise ca. 700 t (siehe Abbildung 18).

Risiken bei der Integration von ZEV

Den Vorteilen einer Integration von ZEV stehen allerdings auch Risiken gegenüber. Auf Basis der im Rahmen der Studie durchgeführten Untersuchungen sind hier insbesondere die im Vergleich zur etablierten Dieseltechnologie höheren Kosten zu nennen. Für Verkehrsunternehmen ist die erfolgreiche Einwerbung von Fördermitteln aus Bundes- oder Landesmitteln der maßgebliche Hebel, um die mit dem Einsatz von ZEV-Bussen verbundenen Mehrkosten zu minimieren und den Einsatz von ZEV-Bussen überhaupt zu ermöglichen. Allerdings wird der mit der Antragstellung verbundene bürokratische Aufwand von einigen der ansässigen VUs als wesentliche Hürde wahrgenommen, die mit den verfügbaren Personalkapazitäten kaum zu bewältigen ist. Daher wird empfohlen, eine spezialisierte Fördermittelberatung als wichtige Hilfestellung zur erfolgreichen Projektentwicklung inklusive Fördermittelantragstellung anzubieten. Diese könnte beispielsweise über den Landkreis angeboten werden. Weiterhin gibt es auf Landesebene über die e-mobil BW ein Unterstützungsangebot für die Beantragung von LGVFG-Fördermitteln für die Beschaffung von Fahrzeugen und Infrastruktur ([e-mobil BW, Netzwerk Null-Emissionen Busse](#)) (18).

In diesem Kapitel wurden neben den finanziellen auch die technischen Risiken thematisiert. Dabei wurde die Empfehlung ausgesprochen, insbesondere in der Anfangsphase der Umstellung auf emissionsfreie Antriebe eine erhöhte Fahrzeugreserve vorzuhalten. So kann bei ggf. auftretenden Anlaufschwierigkeiten und der damit möglicherweise verbundenen erhöhten Anzahl an Fahrzeugausfällen weiterhin ein ordnungsgemäßer Linienbetrieb gewährleistet werden.

Zusammenfassend lassen sich für den Ostalbkreis und die dort ansässigen Verkehrsunternehmen folgende Handlungsempfehlungen ableiten:

- Gewährleistung einer hohen Verfügbarkeit als Schlüssel zur Akzeptanz der neuen Antriebstechnologien und als Richtschnur für eine sorgfältige Planung zur Einführung der der neuen Antriebstechnologie(n).
- Technologieoffene Strategie: Kombination von Batterie- und Brennstoffzellenantrieben je nach spezifischen Einsatzbedingungen und Verwendung von Biokraftstoffen für verbleibende Dieselsebusse (und flüssigkraftstoffbasierten Zusatzheizungen in BEV).
- Pilotprojekt mit Monitoring: Frühzeitige Erprobung der neuen Technologien mit Datenerhebung zur Bewertung der technisch-betrieblichen und wirtschaftlichen Machbarkeit.

- Technologieverfügbarkeit: Berücksichtigung von Lieferzeiten und Verfügbarkeiten der unterschiedlichen Technologiekomponenten (Busse, Ersatzteile, Lade- und Tankinfrastruktur, Trafos, Wartungsinfrastruktur (Dacharbeitsstand, Spezialwerkzeuge, Diagnosegeräte etc.).
- Anlaufmanagement: Rechtzeitige Schulung des Personals, Vorhalten einer erhöhten (Diesel-) Fahrzeugreserve zur Absicherung des Linienbetriebs in der Anlaufphase (ca. 3 bis 6 Monate).
- Modulare standort- und betriebsspezifische Infrastrukturplanung: Aufbau skalierbarer Lade- und Wasserstofftankstellen, die mit dem ZEV-Flottenwachstum mitwachsen (inkl. Berücksichtigung von Redundanzen, um Ausfallzeiten zu minimieren).
- Errichtung öffentlicher Ladeinfrastruktur-/Wasserstofftankstellen an strategisch sinnvollen Plätzen in Abstimmung mit Busunternehmen zur Erschließung zusätzlichen Potenzials für die Umstellung von Umläufen auf emissionsfreie Antriebe.
- Regionale Wertschöpfungsketten: Einbindung und Kooperation mit lokalen Akteuren (z. B. Energieversorger, Gewerke, Werkstätten) zur Stärkung der regionalen Wirtschaft (ggf. bei gleichzeitig höherer Verfügbarkeit und leichteren Abstimmungsprozessen während Planung und Realisierung).
- Fördermittelberatung und Projektentwicklung: Bereitstellung eines Unterstützungsangebots für die Verkehrsunternehmen bei der Antragstellung für Fördermittel und Projektkonzeption/-realisierung.

5.6 Fazit

Die Ergebnisse der technischen Machbarkeitsanalyse in Kombination mit der dargestellten Roadmap zur Technologieumstellung zeigen, dass der Transformationsprozess hin zu emissionsfreien Antrieben bei den eigenwirtschaftlichen Busbetrieben im Ostalbkreis durch eine technologieoffene Strategie bis 2037 grundsätzlich realisierbar ist.

Ein entscheidender Erfolgsfaktor für die Umstellung zumindest eines Teils der Flotte auf batterieelektrische Fahrzeuge wird die Investitionsbereitschaft der lokalen Verkehrsunternehmen sein. Sie stehen vor der Herausforderung die Modernisierung ihrer Betriebshöfe sowie die Installation entsprechender Ladeinfrastruktur in den kommenden Jahren eigeninitiativ voranzutreiben. Darüber hinaus kann die Einrichtung öffentlicher Ladehubs an strategisch geeigneten Standorten – etwa in Bopfingen – die Elektrifizierung weiterer Flottenteile ermöglichen, die heute auf angemieteten Abstellflächen außerhalb der Betriebshöfe untergebracht sind.

Wie beschrieben verfolgen sowohl die Politik als auch die Busersteller einen klaren Transformationspfad weg vom Dieselantrieb. Einige Hersteller planen bereits ab 2030 keine dieselbetriebenen Stadtbusse mehr anzubieten. Für Verkehrsunternehmen im Ostalbkreis wird die mittelfristige Umstellung auf emissionsfreie Antriebe daher unausweichlich. Aktuell liegt der technologische Fokus der Hersteller im Stadtbussegment deutlich auf batterieelektrischen Fahrzeugen. Gründe hierfür sind die noch nicht flächendeckend gesicherte Wasserstoffversorgung, die aktuell in vielen Fällen höheren Kosten von Wasserstoff im Vergleich zu Strom sowie die stetig zunehmenden Reichweiten batterieelektrischer Fahrzeuge durch technologische Fortschritte im Bereich der Batterietechnologie.

Gleichzeitig ergibt sich jedoch durch die spezifische Situation im Ostalbkreis – unter anderem die dezentrale Verteilung der Betriebshöfe, das hohe Maß an auf angemieteten Flächen abgestellten

Fahrzeugen und das verfügbare vor-Ort Wasserstoffangebot durch den Elektrolyseur in Schwäbisch Gmünd –, dass Wasserstoffantriebe einen zentralen Hebel im Transformationsprozess des ÖPNV im Ostalbkreis darstellen können. Durch den gezielten Einsatz von Brennstoffzellenbussen auf Umläufen, die nicht mit batteriebetriebenen Fahrzeugen bedient werden können – sei es aus technischen Gründen oder aufgrund fehlender Lademöglichkeiten – sowie durch den Ausbau zusätzlicher Wasserstofftankstellen, kann in Verbindung mit dem Einsatz von BEV bis 2037 aus technischer Sicht ein potentieller Anteil von 99% emissionsfreier Busse im Ostalbkreis erreicht werden. Daraus ergibt sich gegenüber 2026 ein Treibhausgas-Reduktionspotenzial von rund 7.800 Tonnen CO₂-Äquivalenten pro Jahr, was einer Reduktion von etwa 66 % der ÖPNV bedingten THG Emissionen entspricht.

Von entscheidender Bedeutung für die erfolgreiche Umsetzung des Transformationsprozesses sind die Förderprogramme des Bundes und des Landes Baden-Württemberg. Wie die Analyse der Mehrkosten zeigt, hängen die Investitionsentscheidungen für emissionsfreie Fahrzeuge (BEV und FCV) im Vergleich zu Dieselnissen maßgeblich von Förderquoten für Fahrzeugmehrkosten und Energieversorgungsinfrastruktur ab. Ohne Förderung belaufen sich die kumulierten Mehrkosten für eine anteilige Transformation bis 2037 (Szenario OAK A, 83 % ZEV) auf in Summe rund 79 Mio. € und für eine vollständige Transformation (Szenario OAK B, 99 % ZEV) auf insgesamt rund 91 Mio. €. Unter Berücksichtigung der angenommenen Förderquoten reduzieren sich die Gesamtmehrkosten auf rund 24 Mio. € im Szenario OAK A und rund 28 Mio. € im Szenario OAK B. Diese verbleibenden Mehrkosten werden überwiegend von den eigenwirtschaftlichen Verkehrsunternehmen im Ostalbkreis bzw. in der Folge entweder vom Landkreis und/oder den Fahrgästen zu tragen sein.

Insgesamt verdeutlicht die Machbarkeitsstudie, dass die Transformation hin zu einer nahezu vollständig emissionsfreien Busflotte im Ostalbkreis sowohl technisch machbar als auch aus mit Blick auf die Klimaziele des Landkreise sinnvoll und notwendig ist. Die kommenden Jahre werden jedoch entscheidend sein: Die Verkehrsunternehmen stehen vor bedeutenden Investitionsentscheidungen, der Ausbau der Infrastruktur muss konsequent vorangetrieben werden und ein verlässlicher Förderrahmen seitens der öffentlichen Hand sind unerlässlich. Gelingt es, diese Rahmenbedingungen optimal zu gestalten, kann der Ostalbkreis nicht nur die Klimaschutzziele im Verkehrssektor erfolgreich erfüllen, sondern zugleich eine Vorreiterrolle bei der nachhaltigen Mobilität im ländlichen Raum in Baden-Württemberg und darüber hinaus einnehmen.

Literaturverzeichnis

1. NOW GmbH. Batteriebusse. *eBusTOOL*. [Online] NOW GmbH. [Cited: 09 02, 2025.] <https://www.ebustool.de/antriebsformen/#>.
2. —. Brennstoffzellenbusse. *eBusTOOL*. [Online] NOW GmbH. [Cited: 09 15, 2025.] <https://www.ebustool.de/antriebsformen/brennstoffzellenbusse/>.
3. L-Bank. Anlage Investitionsmehrkosten Umweltschutz zum Antrag Busförderung. [Online] 8 2024. [Cited: 12 15, 2025.] <https://www.l-bank.de/binaries/content/documents/lbank/allgemein/wirtschaftsfoerderung/dokumente/sonstige-dokumente-wf/nahverkehrsfinanzierung/busfoerderung-anlage-umweltschutzbeihilfen-art-36/busfoerderung-anlage-umweltschutzbeihilfen-art-36/hippocms%3Ad>.
4. VBG. Elektromobilität – Arbeiten an Omnibussen mit Wasserstoff- oder Hochvoltsystemen. Leitfaden für ein betriebliches Konzept (VBG Fachwissen, Version 2). [Online] Juni 2024. [Cited: 09 04, 2025.] file:///C:/Users/JZeulner/OneDrive%20-%20Sphera/Sustainability%20Consulting%20-%20PRJ2010446%20PS%20-%20Landratsamt%20-%20Feasibility%20study%20for%20introducing%20ZEV%20buses%20in%20the%20Ostalbkreis/02_Infos/Recherche/VBG_Fachwissen_E_Busse_2024_V12_Pro.
5. NOW GmbH. Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV. Fahrzeuge, Infrastruktur und betriebliche Aspekte. [Online] 2018. [Cited: 09 04, 2025.] https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2018/12/NOW-Broschuere_Wasserstoffbusse-im-OePNV.pdf.
6. Baden-Württemberg Ministerium für Verkehr. Baden-Württemberg Ministerium für Verkehr. *Verwaltungsvorschrift Landesgemeindevkehrsfinanzierungsgesetz (VwV-LGVFG)*. [Online] [Cited: 12 15, 2025.] <https://vm.baden-wuerttemberg.de/de/service/foerderprogramme-und-aufrufe/vwv-lgvfg>.
7. —. Baden-Württemberg Ministerium für Verkehr. *Ladeinfrastrukturförderung Charge@BW*. [Online] [Cited: 12 15, 2025.] <https://vm.baden-wuerttemberg.de/de/politik-zukunft/elektromobilitaet/foerderung-elektromobilitaet/ladeinfrastrukturfoerderung-chargebw>.
8. Ostalbkreis. *Nahverkehrsplan für den Ostalbkreis. Teilfortschreibung 2021*. s.l. : Ostalbkreis, 2021.
9. Rau, Peter. Einführung von batterieelektrischen Bussen bei der OVA in Aalen - Erfahrungsbericht. s.l. : Faltenbacher, Michael; Zeulner, Julia, 11 13, 2025.
10. Ostalbmobil GmbH. *Aktuelle Fahrpläne*. [Online] [Cited: 12 15, 2025.] <https://www.ostalbmobil.de/fahrplaene/>.
11. Breuer, Annett (H2 MOBILITY) and Louvet, Pascal (Lhyfe). Wasserstoffversorgung in Schwäbisch Gmünd. s.l. : Faltenbacher, Michael; Zeulner Julia, 11 25, 2025.
12. Baden-Württemberg Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft. *Erneuerbare Energien in Baden-Württemberg 2024*. Stuttgart : s.n., 2025.
13. Bundesnetzagentur. SMARD.de. *Marktdaten*. [Online] Bundesnetzagentur, 2024. <https://www.smard.de/home/downloadcenter/download-marktdaten/>.
14. FUEL CELLS and HYDROGEN 2 JOINT UNDERTAKING (FCH 2 JU). *Addendum to the Multi - Annual Work Plan 2014 - 2020*. 2018.

15. Sphera. *Transformationsprozess zu emissionsfreien Bussen im Kontext der Clean Vehicles Directive (CVD-Studie)*. s.l. : WBO - Verband Baden-Württembergischer Omnibusunternehmen e.V., 2021.
16. Grawenhoff, S. et al. *Gesteuertes Laden von Elektrofahrzeugen über Preisanreize*. Köln : TÜV Rheinland, 2020. S. 60, Kurzstudie. Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.
17. *A comparative analysis of charging strategies for battery electric buses in wholesale electricity and ancillary services markets*. Brinkel, Nico et al. April 2023, Utrecht : Elsevier, April 2023, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol. Volume 172. 103085.
18. e-mobil BW GmbH. *Netzwerk Null-Emissions-Busse*. [Online] 0225. [Cited: 12 22, 2025.] <https://www.e-mobilbw.de/netzwerk-null-emissions-busse>.
19. European Commission. European Alternative Fuels Observatory. *The Clean Vehicles Directive*. [Online] Directorate-General for Mobility and Transport. [Cited: 09 03, 2025.] <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/policymakers-and-public-authorities/clean-vehicles-directive>.
20. VDE Renewables GmbH. *Elektrifizierung von KMU-Busunternehmen, Grundsatzstudie*. Alzenau : s.n., 2023.
21. NOW GmbH. Wasserstoffbetankung. *eBusTOOL*. [Online] [Cited: 09 15, 2025.] <https://www.ebustool.de/infrastruktur/wasserstoffbetankung/>.
22. Destatis. Stromerzeugung 2024: 59,4 % aus erneuerbaren Energieträgern. Pressemitteilung Nr. 091 vom 12. März 2025. [Online] 03 12, 2025. [Cited: 12 15, 2025.] https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2025/03/PD25_091_43312.html.

Anhang

Anhang A: Kurzdarstellung Ladesysteme für batterieelektrische Busse

Tabelle 23 zeigt eine Übersicht über verfügbare Ladesysteme für batterieelektrische Busse. Für batterieelektrische Busse, die im ÖPNV Einsatz finden und lange Standzeiten im Depot aufweisen, hat sich v.a. das Depotladen mittels „Combined Charging System“ (CCS) in der Praxis etabliert. Das CCS als physische Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladestation ist aktuell der Standard für Busse, mit Ladeleistungen von bis zu 150 kW. Die Vorteile der Technologie im Vergleich zum Opportunity Charging und dem Schnellladen liegen in den vergleichsweise niedrigeren Infrastrukturkosten, der planbaren und geringeren Netzbelastung sowie dem einfacheren Planungs- und Realisierungsaufwand.

Tabelle 23: Übersicht von Ladesystemen für batterieelektrische Busse

Kriterium	Depotladung (Über-Nachtladung)	Gelegenheitsladung (Opportunity Charging)	Schnellladen (High-Power Charging, HPC)
Ort	Betriebshof / Depot	Endhaltestelle / Knoten	Spezielle Ladepunkte (Depot oder unterwegs)
Leistung	30–150 kW (AC/DC)	150–450 kW (DC)	300–600 kW (DC)
Ladedauer	3–10 Stunden (abhängig von gewählter Ladeleistung)	5–15 Minuten	20–60 Minuten
Technik	Kabel, Stecker (CCS)	Pantograph (auf Bus oder Station)	CCS oder Pantograph
Batteriegröße	Groß (300–500 kWh)	Mittel (150–250 kWh)	Mittel bis groß
Infrastrukturkosten	Niedrig bis mittel	Hoch (wegen Netzanschluss an Haltestellen)	Sehr hoch (Netzverstärkung, Kühlung)
Netzbelastung	Planbar, nachts geringer	Hohe Spitzenlast	Sehr hohe Spitzenlast
Einsatzprofil	Linien mit langen Standzeiten	Linien mit kurzen Umläufen	Reserve- oder Spitzenlastbetrieb
Vorteile	Kostengünstig, einfache Planung	Kleine Batterien, hohe Verfügbarkeit	Flexibel für Zwischenladungen
Nachteile	Hoher Platzbedarf im Depot	Teure Infrastruktur, komplexe Planung	Extrem hohe Netzlast, teuer

Modulare Ladesysteme bieten darüber hinaus eine flexible und skalierbare Lösung für das Laden von batterieelektrischen Busflotten. Im Gegensatz zu klassischen Stand-Alone-Ladestationen sind sie häufig als Add-on-Systeme konzipiert, die bestehende Ladeinfrastrukturen ergänzen. Der modulare Aufbau basiert auf mehreren Leistungseinheiten, die typischerweise in Stufen von 40 kW, 80 kW oder 150 kW verfügbar sind und je nach Bedarf kombiniert werden können. Ergänzt werden diese durch Verteilereinheiten, die die Gesamtleistung dynamisch auf mehrere

Ladepunkte aufteilen, sowie eine intelligente Softwaresteuerung für Lastmanagement, Priorisierung und Monitoring.

Ein entscheidender Vorteil modularer Systeme liegt in ihrer hohen Anpassungsfähigkeit und Zukunftssicherheit. Betreiber können die Ladeleistung bei steigender Nachfrage oder neuen Fahrzeuganforderungen problemlos erweitern, ohne die gesamte Infrastruktur neu aufzubauen. Zudem ermöglichen modulare Systeme ein effizientes Lastmanagement, das die Netzbelastung optimiert und die Integration EE sowie stationärer Batteriespeicher unterstützt. Durch den modularen Aufbau wird eine hohe Ausfallsicherheit gewährleistet, da bei einem Defekt einzelner Module der Betrieb mit reduzierter Leistung fortgesetzt werden kann. Moderne Systeme erfüllen gängige Kommunikationsstandards wie OCPP und ISO 15118, was intelligente Steuerung, Smart Charging und Plug&Charge-Funktionen ermöglicht.

Depotladen ist die Standardlösung für Busflotten, bei der jeder Bus über einen eigenen Ladepunkt verfügt. Dies ist einfach in der Handhabung und erfordert weniger komplexe Steuerung. Allerdings muss die Netzanschlussleistung für die maximale gleichzeitige Ladeleistung ausgelegt sein. Modulare Systeme hingegen bieten eine zentrale Leistungsbereitstellung, die dynamisch auf mehrere Ladepunkte verteilt wird. Vorteile sind die bessere Skalierbarkeit, geringerer Platzbedarf und die Möglichkeit zur Integration von Energiemanagement und Speicherlösungen. Nachteile sind ein höherer Planungsaufwand, komplexere Steuerung und potenziell höhere Anfangsinvestitionen.

Modulare Systeme können als Ergänzung eingesetzt werden, wenn Betreiber bereits über eine Grundinfrastruktur für Depotladen verfügen. Die modulare Lösung erlaubt es, zusätzliche Ladeleistung bereitzustellen, ohne die bestehende Infrastruktur vollständig zu ersetzen. Dies ist besonders relevant bei wachsenden Flotten, temporären Leistungsspitzen oder der Integration neuer Fahrzeugtypen. So können Betreiber flexibel auf steigende Anforderungen reagieren, ohne die Kosten und den Aufwand einer kompletten Umrüstung tragen zu müssen.

Anhang B: Einsparpotenziale THG-Emissionen (übrige Buskonfigurationen)

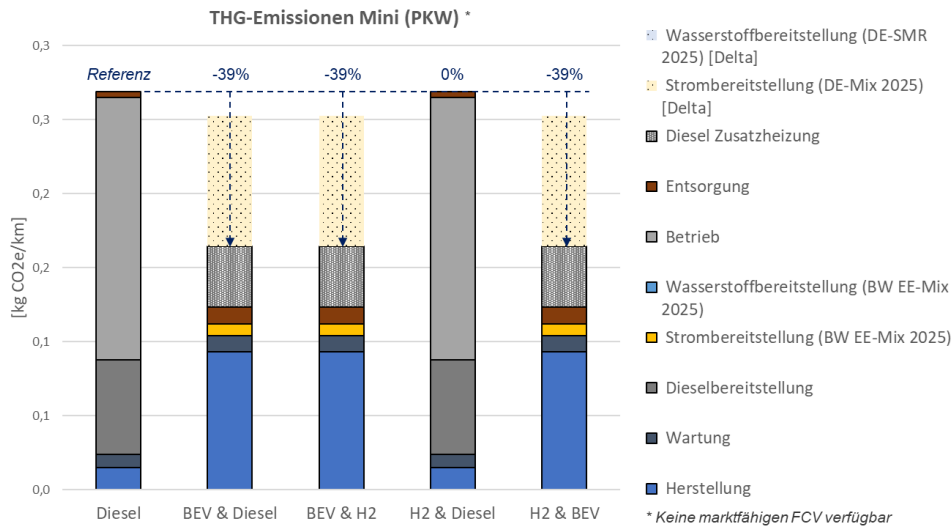


Abbildung 33: THG-Einsparpotenziale Mini (PKW)

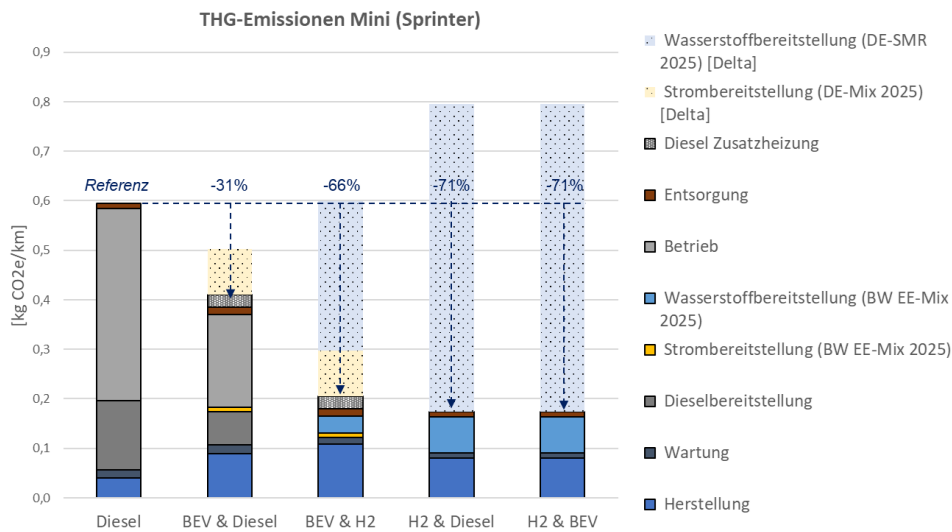


Abbildung 34: THG-Einsparpotenziale Mini (Sprinter)

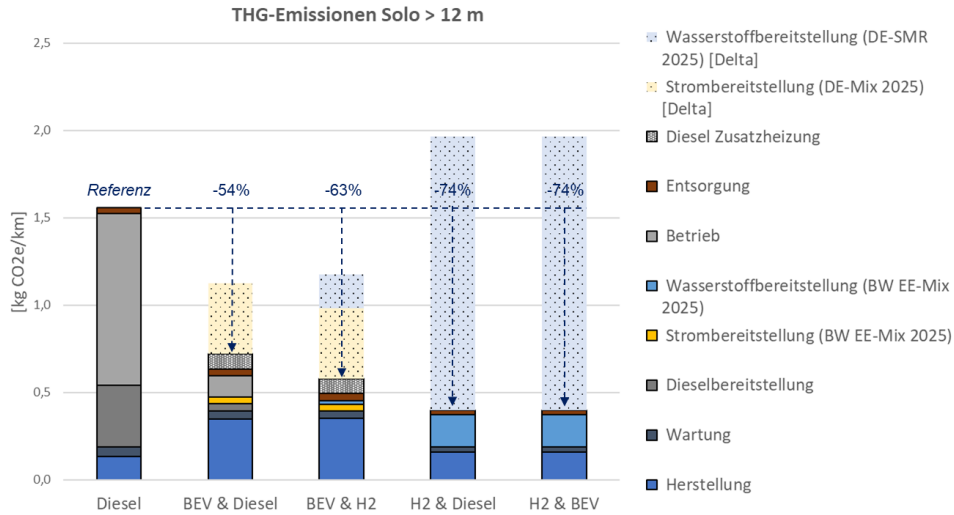


Abbildung 35: THG-Einsparpotenziale Solo (> 12 m)

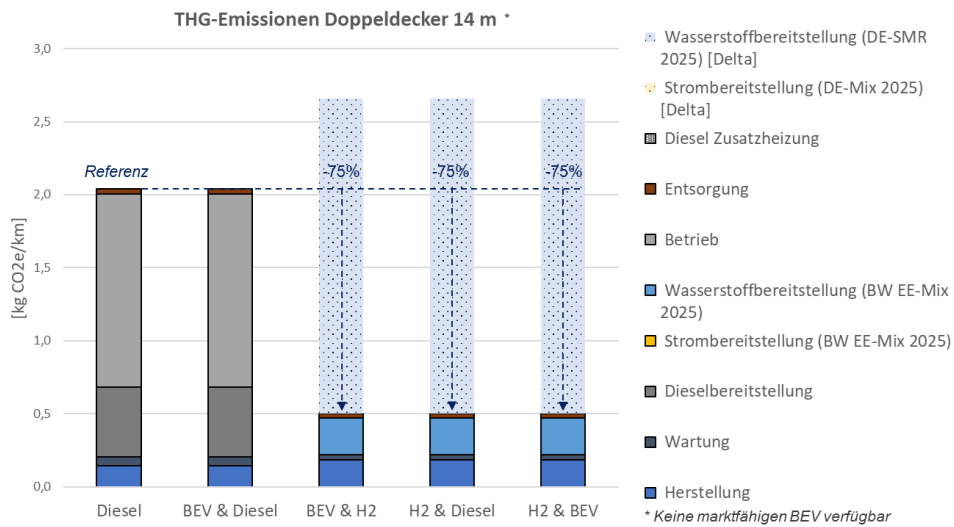


Abbildung 36: THG-Einsparpotenziale Doppeldecker

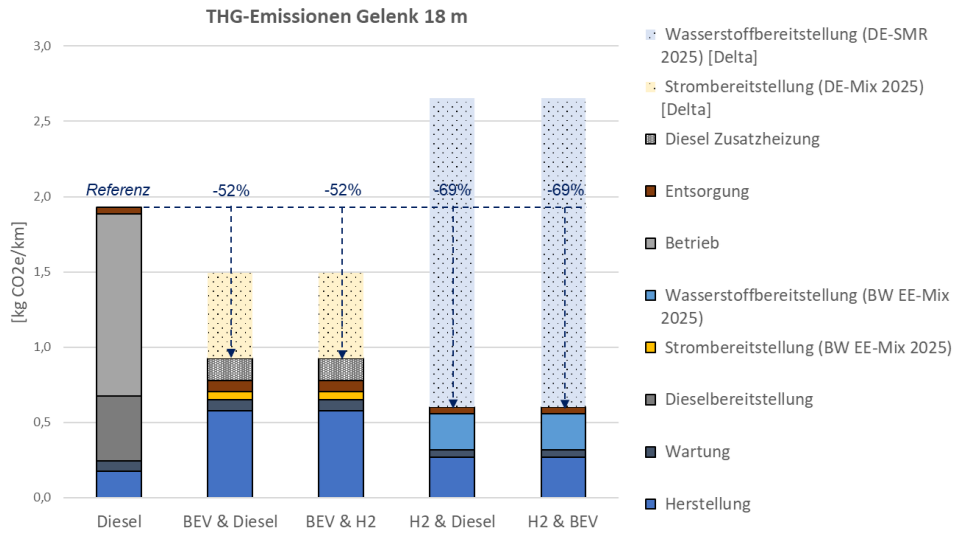


Abbildung 37: THG-Einsparpotenziale Gelenk (18 m)