

Vergleichsstudie erneuerbarer Antriebe für den Busverkehr im Oberallgäu

Landratsamt Oberallgäu

Schlussbericht, Stand: 22.05.2024

Vergleichsstudie erneuerbarer Antriebe für den Busverkehr im Oberallgäu

Schlussbericht

Projektname	Vergleichsstudie erneuerbarer Antriebe für den Busverkehr im Oberallgäu	Ramboll Kopenhagener Str. 60-68 Haus D 13407 Berlin
Auftraggeber	Landratsamt Oberallgäu	
Dokumententyp	Schlussbericht	
Datum	22.05.2024	T +49 30 302020-0 F +49 30 302020-199 www.ramboll.com/de-de
Autoren	Carl-Linus Aue, Bastian Hußlein, Hauke Juranek, Torsten Perner, Mathias Schmidt und Niels Tietgen	

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Ramboll Deutschland GmbH
Jürgen-Töpfer-Straße 48
22763 Hamburg

Amtsgericht Hamburg, HRB 125325

Geschäftsführer:

Jens-Peter Saul, Bo Rene Pedersen

BNP Paribas S.A. Niederlassung
Deutschland

IBAN: DE46512106004223069016

BIC: BNPADEFFXXX

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	6
1. Einleitung	8
2. Ausgangssituation und Rahmenbedingungen	10
2.1 Bestehende Rahmenbedingungen des ÖSPV im Landkreis Oberallgäu	10
2.2 Rechtliche Rahmenbedingungen (Clean Vehicle Directive)	11
3. Betrachtung alternativer Antriebe im Busverkehr	14
3.1 Emissionen als wichtigstes Kriterium zukünftiger Investitionen im ÖSPV	19
3.2 Energieeffizienz als essenzieller Faktor für die Antriebswende	21
3.3 Verfügbarkeit und Systemansprüche	24
3.4 Entscheidung für Fokus auf batterieelektrische Fahrzeuge	26
4. Energetische Analyse des ÖSPV	28
4.1 Allgemeine Betrachtung von Fahrzeugherstellern und -modellen	28
4.2 Reichweitenanforderungen	30
4.3 Lokale Analyse und Auswertung	32
4.4 Auswirkung und Empfehlungen	36
5. Ökonomische Analyse alternativer Antriebe	39
5.1 Annahmen der TCO-Kalkulation	39
5.2 Ergebnisse	40
5.3 Sensitivitätsanalyse	42
5.4 Limitierungen	44
6. Fuhrpark- und Betriebshofanalyse	45
6.1 Bestandsbusflotte im Landkreis Oberallgäu	45
6.2 Busbetriebshöfe im Landkreis Oberallgäu	47
7. Strategische Planung der Versorgungsinfrastruktur	48
7.1 Ladekonzepte	48
7.2 Identifikation von potenziellen Standorten	48
7.3 Machbarkeitsprüfung der Standorte	54
8. Zeit- und Meilensteinplanung für die Umrüstung	58
9. Primärenergetische und umweltbilanzielle Betrachtung	62
9.1 Betrachtung des Primärenergiebedarfs	62
9.2 Emissionsbetrachtung	63
10. Zusammenfassung und Fazit	65

Quellenangaben	67	
Anhang	69	
A.1	Übersicht Energieverbräuche je Linie und Richtung	70
A.2	Modellierte Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Total Cost of Ownership	72
A.3	Flächenbedarfe für unterschiedliche Busabstellkonzepte inkl. Ladeinfrastruktur	77
A.4	Checkliste zur Betriebshofumrüstung	79

Abkürzungsverzeichnis

AA	Alternative Antriebe
BEV	Batterie Electric Vehicle (<i>Deutsch: batterieelektrisches Fahrzeug</i>)
CAPEX	Capital Expenses (<i>Deutsch: Investitionskosten</i>)
CNG	Compressed Natural Gas (<i>Deutsch: komprimiertes Erdgas</i>)
CO ₂ eq.	Kohlenstoffdioxid Äquivalent
CVD	Clean Vehicle Directive (<i>Deutsch: Saubere-Fahrzeuge-Richtlinie [EU-Richtlinie]</i>)
EE	Erneuerbare Energien
EV	Electric Vehicle (<i>Deutsch: Elektrofahrzeug</i>)
FAME	Fettsäuremethylester (<i>Englisch: fatty acid methyl ester</i>)
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle (<i>Deutsch: berenstoffzellenelektrisches Fahrzeug</i>)
HEV	Hybrid Electric Vehicle (<i>Deutsch: Hybrid-Elektrofahrzeug</i>)
HVO	Hydrotreated Vegetable Oil (<i>Deutsch: hydriertes Pflanzenöl</i>)
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle (<i>Deutsch: Fahrzeug mit Verbrennungsmotor</i>)
KSG	Klimaschutzgesetz
LNG	Liquefied Natural Gas (<i>Deutsch: Flüssigerdgas</i>)
LRA OA	Landratsamt Oberallgäu
OPEX	Operational Expenditures (<i>Deutsch: Betriebskosten</i>)
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖSPV	Öffentlicher Straßenpersonennahverkehr
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle (<i>Deutsch: Plug-in-Hybrid-Elektrofahrzeug</i>)
RED III	Renewable Energy Directive III (<i>Deutsch: Erneuerbare Energien Richtlinie III [EU-Richtlinie]</i>)
SO ₂ eq.	Schwefeldioxid Äquivalent
SWOT	strengths, weaknesses, opportunities, threats (<i>Deutsch: Stärken, Schwächen, Chancen, Risiken</i>)
TCO	Total Cost of Ownership (<i>Deutsch: Gesamtkosten des Besitzes</i>)
THG	Treibhausgas(-Emissionen)
TRL	Technologie Readiness Level (<i>Deutsch: Technologiereifelevel</i>)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Zielkonzept für Integralen Taktfahrplan mit Stand Oktober 2023; Details bzw. große Darstellung siehe Anhang.	10
Abbildung 2 Tagesgangkurve Anzahl eingesetzter Busse	11
Abbildung 3: CVD-Ziele: Neuzulassungsquote kategorisiert nach emissionsfreie, saubere und nicht CVD-konforme Antriebe	12
Abbildung 4: Übersicht der Antriebsarten und deren Energieträgern	14
Abbildung 5 Vereinfachte Skizze des technischen Aufbaus inkl. Energieträgerzufuhr unterschiedlicher Antriebstechnologien und -systeme im ÖSPV	16
Abbildung 6: Vereinfachte Energiequelle-Kraftstoffe-Darstellung	17
Abbildung 7: Einordnung der Antriebstechnologien nach CVD	18
Abbildung 8 oben: Treibhausgasemissionen (CO ₂ eq.) und unten: Luftschadstoffemissionen (SO ₂ eq.) durch die Nutzung von alternativen Energieträgern im Verkehrssektor nach Energieträgern	21
Abbildung 9: Darstellung des Energieeffizienzvergleichs zwischen unterschiedlichen Antriebstechnologien	24
Abbildung 10: Prognostizierte Kostenbandbreite synthetischer Flüssigkraftstoffe im Vergleich zur Referenz (Diesel) und dessen Prognose bis 2050	25
Abbildung 11: Busneuzulassungen der Top Modelle in Deutschland für den Zeitraum der vergangenen 12 Monate	29
Abbildung 12 Mittlere tägliche Laufleistung der Batteriebusse je Bus	31
Abbildung 13 Reichweitenanforderungen für Batteriebusse	32
Abbildung 14 Schematischer Darstellung des Simulationsablaufes	32
Abbildung 15 ÖSPV-Liniennetz im Landkreis Oberallgäu	33
Abbildung 16 Überschlag des Energieverbrauchs des ÖSPV im Landkreis Oberallgäu nach Tagestyp	38
Abbildung 17: Übersicht der ökonomischen Parameter der TCO-Kalkulation	39
Abbildung 18: Ergebnisse der Total Cost of Ownership nach Kostenbestandteilen in 2024	41
Abbildung 19: Kosten für einen Bus pro Jahr bei einer Investition in 2024	41
Abbildung 20: Ergebnisse der Total Cost of Ownership entsprechend des Jahres der Investition	42
Abbildung 21: Sensitivitätsanalyse des Kaufpreises von BEV und FCEV	43
Abbildung 22: Sensitivitätsanalyse des Dieselpreises	43
Abbildung 23 Darstellung des CVD-relevanten Linienbusbestands im Landkreis Oberallgäu	45

Abbildung 24 Busbestandsdaten in Bayern - relativer Anteil je Antriebstechnologie	46
Abbildung 25 Busbetriebe Landkreis Oberallgäu	47
Abbildung 26: Überblick Ladekonzepte	48
Abbildung 27 Suchräume für Ladestandorte	52
Abbildung 28 Skizze für den Flächenbedarf von Busabstellstandorten mit Ladeinfrastruktur Variante A: Betriebshof, Pantograph	56
Abbildung 29 Mittelfristiger Zeitplan mit Blick auf die Vergabe der öffentlichen Verkehrsdienstleistung	58
Abbildung 30 Beschaffung im Zuge der Vergabe des öffentlichen Dienstleistungsauftrages im ÖSPV anhand von drei Szenarien	59
Abbildung 31 Busneuzulassungen im Landkreis Oberallgäu: Referenzszenario	60
Abbildung 32 Busbestand des ÖSPV im Landkreis Oberallgäu: Referenzszenario	60
Abbildung 33 Darstellung einer beispielhaften Bestandsentwicklung einer fortlaufenden Elektrifizierung (Szenario B)	60
Abbildung 34 Langfristiger Zeitplan mit Blick auf Vergabe und Laufzeit der öffentlichen Verkehrsdienstleistung	61
Abbildung 35 Primärenergiebedarf des ÖSPV im Landkreis Oberallgäu: Referenzszenario	62
Abbildung 36 Primärenergiebedarf des ÖSPV im Landkreis Oberallgäu: Szenario B	63
Abbildung 37 Emissionsbilanz im ÖSPV im Landkreis Oberallgäu: Vergleich zwischen Referenzszenario und Szenario B	64
Abbildung 38: Sensitivitätsanalyse der CO ₂ -Preisentwicklung nach 2026	72
Abbildung 39: Sensitivitätsanalyse der Strompreisentwicklung	73
Abbildung 40: Sensitivitätsanalyse der Jahresfahrleistung je Fahrzeug	74
Abbildung 41: Sensitivitätsanalyse der Investitionssumme der Infrastruktur für BEV und FCEV	75
Abbildung 42: Sensitivitätsanalyse eines Batteriewechsels für BEV nach 6 Jahren	76
Abbildung 43 Skizze für den Flächenbedarf von Busabstellstandorten mit Ladeinfrastruktur Variante B: Betriebshof, Ladesäule	77
Abbildung 44 Skizze für den Flächenbedarf von Busabstellstandorten mit Ladeinfrastruktur Variante C: Gelegenheitsladestandort, Pantograph	78
Abbildung 45 Skizze für den Flächenbedarf von Busabstellstandorten mit Ladeinfrastruktur Variante D: Gelegenheitsladestandort, Ladesäule	78

1. Einleitung

In den letzten Jahren ist die Bedeutung einer nachhaltigen Mobilität aufgrund der drängenden Notwendigkeit des Klimaschutzes stark in den Vordergrund gerückt. Der Verkehrssektor ist ein wesentlicher Verursacher von Treibhausgasemissionen, die das globale Klima erheblich beeinflussen. Vor diesem Hintergrund wurden weltweit Maßnahmen ergriffen, um die Emissionen im Verkehrsbereich zu reduzieren und nachhaltiger zu gestalten. In Deutschland wurde im Jahr 2019 das Klimaschutzgesetz (KSG) verabschiedet, das ehrgeizige Ziele zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen formuliert und den Weg für eine klimafreundlichere Mobilität ebnen soll.

Das Klimaschutzgesetz verpflichtet Deutschland dazu, seine Treibhausgasemissionen bis 2030 um mindestens 55 Prozent gegenüber dem Referenzjahr 1990 zu reduzieren. Eine zentrale Herausforderung für die Emissionsminderung ist der Verkehrssektor, der für einen erheblichen Teil der nationalen Emissionen verantwortlich ist. Innerhalb des Personenverkehrs spielen nicht nur der Motorisierte Individualverkehr (MIV) oder die Luftfahrt, sondern auch der öffentliche Personennahverkehr (ÖPNV) eine entscheidende Rolle. Dieser stellt eine wichtige Alternative zum MIV dar und bietet durch Verlagerungspotenziale eine entscheidende Möglichkeit Emissionen erheblich zu reduzieren. Um auch innerhalb des ÖPNV eine Emissionsminderung zu bewirken, muss neben der Elektrifizierung des Schienenverkehrs auch im öffentlichen straßengebundenen Personenverkehr (ÖSPV) auf emissionsfreie Lösungen gesetzt werden.

Die Emissionen im ÖSPV resultieren vor allem aus dem Einsatz von konventionellen Verbrennungsmotoren, die fossile Brennstoffe wie Benzin und überwiegend Diesel verwenden. Diese Motoren stoßen Kohlendioxid (CO₂ eq.), Luftschadstoffe (SO₂ eq.) und Lärmemissionen aus, die nicht nur das Klima belasten, sondern auch die Luftqualität in urbanen Gebieten beeinträchtigen. Um die ehrgeizigen Klimaziele des Klimaschutzgesetzes zu erreichen und gleichzeitig die Lebensqualität in Städten zu verbessern, ist es daher dringend erforderlich, alternative Antriebe im ÖSPV zu fördern und zu implementieren. Ein europaweiter Anreiz hierfür wird durch die in Kapitel 2.2 beschriebene Clean Vehicle Directive (CVD) geschaffen.

Alternative Antriebe im ÖSPV bieten die Möglichkeit, die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu reduzieren und die Emissionen deutlich zu senken. Eine Vielzahl von Technologien und Konzepten steht zur Verfügung, um den ÖSPV nachhaltiger zu gestalten. Dazu gehören Elektroantriebe, Wasserstofftechnologien, Hybridantriebe und alternative biogene oder synthetische Kraftstoffe. Jede dieser Technologien hat ihre eigenen Vor- und Nachteile, und ihre Eignung hängt von verschiedenen Faktoren ab; darunter die Wertschöpfungsketten, die Einsatzgebiete, die Infrastruktur und die Wirtschaftlichkeit.

Der vorliegende Bericht hat das Ziel, die verschiedenen Aspekte der Einführung von alternativen Antrieben im ÖSPV im Landkreis Oberallgäu zu beleuchten. Die Einordnung der Thematik erfolgt auf technischer, betrieblicher und ökonomischer Ebene, um eine umfassende Analyse und Bewertung zu ermöglichen.

Der Bericht zur Machbarkeitsstudie von erneuerbaren Antrieben für den Busverkehr im Oberallgäu strukturiert sich entlang folgender Abschnitte: In Kapitel 2 werden die Ausgangssituation und Rahmenbedingungen detailliert beschrieben, um ein klares Verständnis der aktuellen Gegebenheiten und der notwendigen Voraussetzungen zu vermitteln. Kapitel 3 bietet eine allgemeine Betrachtung alternativer Antriebe im Busverkehr und analysiert die verschiedenen technologischen Optionen sowie deren Potenzial und Herausforderungen. Kapitel 4 widmet sich der energetischen Analyse des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖSPV) im Landkreis Oberallgäu, wobei der Energieverbrauch und -bedarf von batterieelektrischen Bussen im Liniennetz ermittelt und bewertet werden. In Kapitel 5 folgt eine ökonomische Analyse alternativer Antriebe, die Wirtschaftlichkeit und ökonomische Wettbewerbsfähigkeit der verschiedenen Optionen beleuchtet. Kapitel 6 analysiert den bestehenden Fuhrpark und die Betriebshöfe, um bestehende Strukturen mit Blick auf Elektrobusse zu untersuchen und betrachtet diese im Rahmen

einer strategischen Planung der notwendigen Versorgungs- und Ladeinfrastrukturen (Kapitel 7). Das Kapitel 8 präsentiert eine Zeit- und Meilensteinplanung entlang der bevorstehenden Verkehrsvertragslaufzeiten des ÖSPV und im Sinne einer Einführung alternativer Antriebe. Abschließend behandelt Kapitel 9 die primärenergetische und umweltbilanzielle Betrachtung, um die bestehenden und zukünftigen Energiebedarfe sowie THG-Emissionen im ÖSPV darzustellen.

2. Ausgangssituation und Rahmenbedingungen

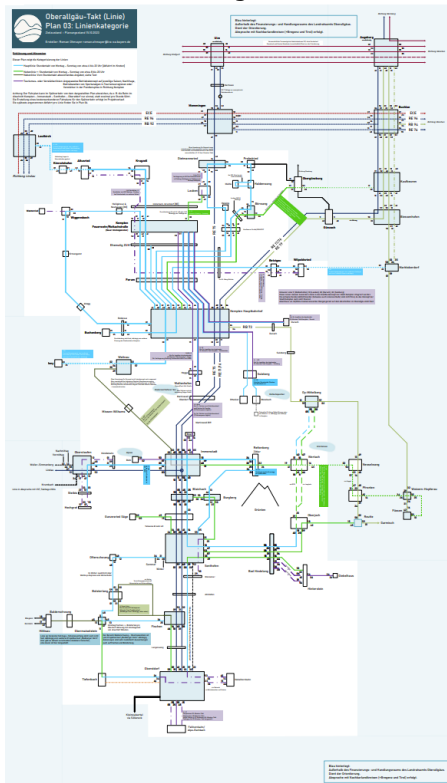
2.1 Bestehende Rahmenbedingungen des ÖSPV im Landkreis Oberallgäu

Aktuell werden mit über 70 Bussen rund 4,2 Mio. Fahrplankilometer pro Jahr im Landkreis gefahren. Der überwiegende Teil der Leistung ist motiviert durch den Schülerverkehr. Dieser Verkehr wird auf Achsen mit höherem Einwohnerpotential etwas systematischer bedient in dem Sinne, dass leere Rückfahrten als Fahrplanfahrten ausgewiesen werden und die Fahrzeiten im Sinne von einheitlichen Abfahrtsminuten etwas angepasst werden sowie vereinzelte Fahrten auch an Ferientagen und am Wochenende angeboten werden.

Ein weiterer bedeutender Teil der Leistung wird auf touristischen Linien im südlichen Teil des Landkreises erbracht sowie im direkten Einzugsgebiet nach Kempten (Linie 30 von Sulzberg und Linie 20 von Durach) mit weitgehend gut vertakteten Fahrten mindestens im Stundentakt sowohl unter der Woche als auch in den Ferien und weitgehend am Wochenende.

Der überwiegende Teil der heutigen Verkehre werden eigenwirtschaftlich betrieben. Eigenwirtschaftlich heißt, ohne direkte Zuschüsse. Bezuschusst wird jedoch der Fahrgast, in dem ein Teil der Kosten für die Fahrkarte seitens des Aufgabenträgers des ÖPNVs (der Landkreis) übernommen wird. Die meisten Linienkonzessionen laufen Mitte 2026 aus, so dass ab Mitte 2026 ein wesentlicher Gestaltungsspielraum für den Aufgabenträger besteht hinsichtlich Linienführung, Angebotsumfang, Qualitätsstandards und Loszuschnitte. Zu diesem Zeitpunkt ist der Landkreis zudem verpflichtet die CVD umzusetzen.

Politisches Ziel ist auf den Hauptlinien ein Taktfahrplan mindestens im Stundentakt von früh bis spät an allen Wochentagen mit modernen Niederflurbussen, der zu einer deutlichen Erhöhung des Modal-



Splits des öffentlichen Verkehrs führt. Wird anfangs von einer Kapazitätserhöhung zur Spitzenzeit zur ersten Schulstunde abgesehen, so erhöht sich zwar nicht die Zahl der nötigen Busse, aber die durchschnittliche Laufleistung der Busse und die Zahl der erforderlichen Fahrer wird deutlich erhöht. Des Weiteren nimmt die Zahl der nötigen Niederflurbusse zu und die Zahl der Fahrten (für den Schülerverkehr) ab, auf denen Hochbodenbusse (Reisebusse oder Linienbusse älterer Bauart) eingesetzt werden dürfen.

Allein um den aktuell gültigen Nahverkehrsplan zu erfüllen ist eine Leistungsausweitung auf 5,6 Mio. Fahrplankilometer pro Jahr erforderlich. Bei einem Angebot von früh bis spät und auch am Wochenende müssen insgesamt 7,8 Mio. Fahrplankilometer erbracht werden. Diese Werte wurden in dem von Ramboll erarbeiteten Konzept „Strategische Umsetzung einer ÖPNV-Angebotskonzeption im Landkreis Oberallgäu“ aus dem Jahr 2023 ermittelt und bilden die Basis für diese Machbarkeitsstudie. Die Fahrplankilometer bestimmen den Gesamtenergiebedarf, auf den die Ladeinfrastruktur bei reinen Elektrobusbetrieb ausgerichtet werden muss.

Im Rahmen der Angebotskonzeption wurde ein Integraler Taktfahrplan entworfen, der in Abstimmung mit den Gemeinden an deren Mitfinanzierungsbereitschaft angepasst wurde. Der daraus resultierende Angebotsumfang bildete die Grundlage für diese Studie zu den erneuerbaren Antrieben.

Abbildung 1 Zielkonzept für Integralen Taktfahrplan mit Stand Oktober 2023; Details bzw. große Darstellung siehe Anhang.

Im Schulverkehr besteht weiterhin die Anforderung, alle Schülerinnen und Schüler zur in etwa gleichen Zeit zwischen 07:45 Uhr und 08:00 Uhr zur ersten Schulstunde zu befördern, während die Rückfahrten sich auf mehrere Schulstunden verteilen (siehe Abbildung 2). Dies führt zu einer besonders großen Busflotte zur Hauptverkehrszeit zwischen 07:00 und 08:00 Uhr, in der es dadurch auch besonders kostenintensiv ist, auch für Werktätige in dieser Zeit ein attraktives Angebot und akzeptable Kapazitäten anzubieten. Das Erfordernis eine besonders große Zahl an Bussen nur für die Spitzenstunde zwischen 07:00 und 08:00 Uhr bietet jedoch den Vorteil während des Tages. Busse können regelmäßig zum Austauschen und für längere Lade- oder Betankungsvorgänge ein paar Stunden aus dem Verkehr genommen werden. Dies erlaubt kleinere Batteriekapazitäten bzw. Tankvolumina.

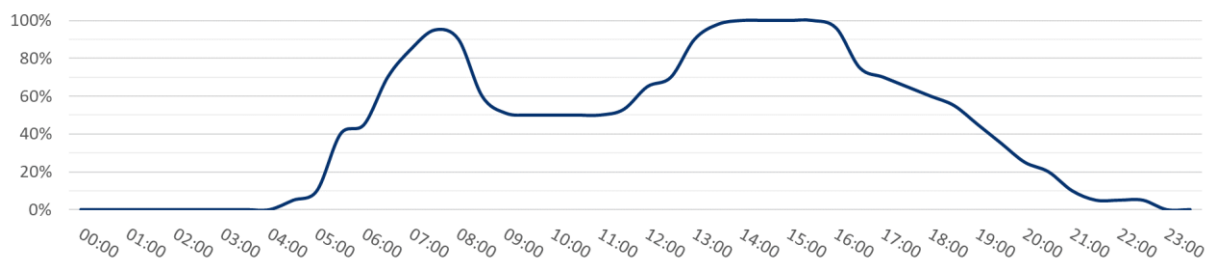


Abbildung 2 Tagesgangkurve Anzahl eingesetzter Busse

2.2 Rechtliche Rahmenbedingungen (Clean Vehicle Directive)

Die EU-Richtlinie zur Förderung von umweltfreundlichen und energieeffizienten Straßenfahrzeugen, auch bekannt als Clean Vehicle Directive (CVD) stellt erstmals verbindliche Mindestquoten für die Beschaffung von emissionsarmen¹ und emissionsfreien Fahrzeugen auf. Diese Quoten sind sowohl für öffentliche Auftraggeber als auch für Sektorenauftraggeber verpflichtend, wobei letztere private Akteure sind, die bestimmte Dienstleistungen erbringen. Das Hauptziel dieser Richtlinie besteht darin, die Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor weiter zu reduzieren und die Nachfrage nach umweltfreundlichen Fahrzeugen zu steigern. Konkret sehen die Beschaffungsquoten für saubere Busse vor, dass im sogenannten **Referenzzeitraum I** - zwischen dem 2. August 2021 und dem 31. Dezember 2025 - mindestens 45 % der Busse, die beschafft werden, sauber sein müssen, wobei mindestens die Hälfte davon emissionsfrei sein muss. Im **Referenzzeitraum II** - ab dem 1. Januar 2026 bis zum 31. Dezember 2030 - erhöht sich diese Quote auf 65 %, wobei auch hier mindestens die Hälfte emissionsfrei sein muss.

¹ „emissionsarme“ Fahrzeuge werden teils auch als „saubere“ bezeichnet

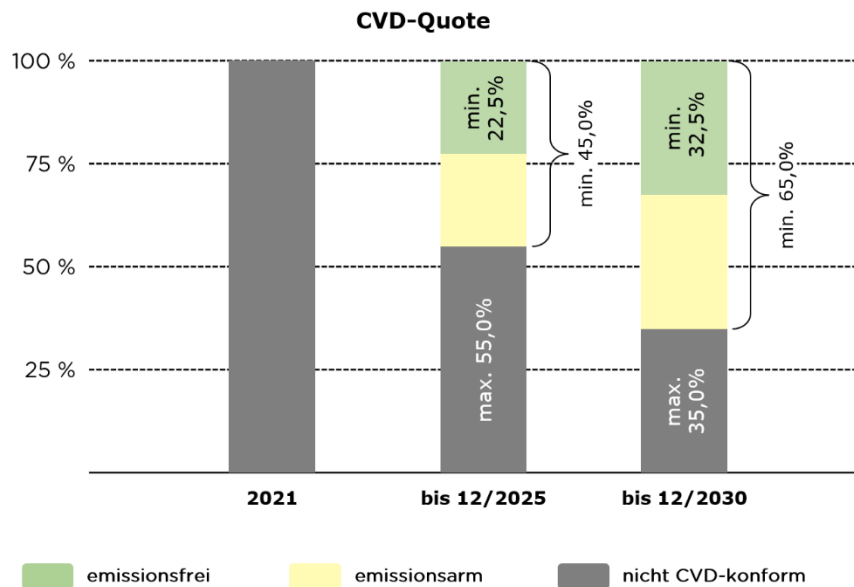


Abbildung 3: CVD-Ziele: Neuzulassungsquote kategorisiert nach emissionsfreie, saubere und nicht CVD-konforme Antriebe²

Wie bereits erwähnt werden die Fahrzeuge entsprechend ihrer Antriebstechnologien wie folgt kategorisiert:

- **Emissionsarme** (saubere) schwere Nutzfahrzeuge und Busse (der Klassen³ N2, N3, M3) umfassen aufgrund der Nutzung alternativer Kraftstoffe Plug-In-Hybrid-Busse (PHEV) sowie Busse mit Gasantrieb, Hybridelektrofahrzeuge (HEV), Busse mit Gasverbrennungsmotor (ICEV-Gas) sowie Busse mit Dieselverbrennungsmotor (ICEV-Diesel), sofern diese nicht mit fossilen Brennstoffen angetrieben werden.
- **Emissionsfreie** schwere Nutzfahrzeuge und Busse umfassen Fahrzeuge mit batterieelektrischem oder brennstoffzellenelektrischem Antrieb sowie auch Oberleitungsfahrzeuge ohne lokale Emissionen. Fahrzeuge mit Wasserstoffverbrennungsmotor (ICEV-H₂) gelten aufgrund ihrer Kohlenstoff-freien Verbrennung auch als emissionsfrei.⁴

Die spezifische Einordnung der Antriebstechnologien nach CVD inkl. Berücksichtigung der Energieträger siehe Abbildung 7 in Kapitel 3.

Um die Vorgaben der CVD-Richtlinie in nationales Recht umzusetzen, wurde das Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz (SaubFahrzeugBeschG) 2021 vom Bundestag verabschiedet. Dieses Gesetz definiert die Mindestquoten und regelt, auf welche Arten von Verträgen sie anzuwenden sind. Gemäß SaubFahrzeugBeschG gelten die Quoten für Verträge über den Kauf, das Leasing oder die Anmietung von Straßenfahrzeugen, bei denen ein Vergabeverfahren erforderlich ist. Darüber hinaus sind sie auch auf öffentliche Dienstleistungsaufträge im ÖPNV sowie auf Dienstleistungsaufträge für weitere Verkehrsdienste anwendbar, wie beispielsweise Personensonderbeförderung, Abfallentsorgung und Paket- und Postdienste.

Die CVD-Richtlinie erstreckt sich auch auf Unternehmen, die Verkehrsleistungen oder Verkehrsdienste im ÖPNV aufgrund besonderer oder exklusiver Rechte erbringen. Hierzu gehören beispielsweise Betreiber von Eisenbahnen, automatischen Systemen, Straßenbahnen, Trolleybussen, Bussen und Seilbahnen, gemäß § 102 GWB⁵. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass private Busunternehmen, die eigenwirtschaftliche Verkehre durchführen und über eine Genehmigung gemäß Personenbeförderungsgesetz

² Eigene Darstellung. CVD (2021)

³ EU-Fahrzeugklassen: M – Fahrzeuge für Personenbeförderung, N – Fahrzeuge für Güterbeförderung. M3: mehr als 8 Passagiersitzplätze und mehr als 5 Tonnen Gesamtmasse. Siehe [Verordnung \(EU\) 2018/858](#).

⁴ e-mobil BW (2021)

⁵ Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen (GWB)

(PBefG) verfügen, von diesen Verpflichtungen ausgenommen sind. Diese Unternehmen können jedoch erneut unter den Anwendungsbereich fallen, wenn öffentliche Auftraggeber gemäß GWB einen beherrschenden Einfluss auf sie ausüben.

Eine entscheidende Eigenschaft der CVD-Richtlinie ist die umfassende Dokumentationspflicht, die sowohl für öffentliche Auftraggeber als auch für Sektorenauftraggeber gilt.⁶ Das Hauptziel dieser Dokumentation besteht darin, Daten über alle beschafften Fahrzeuge im Vergleich zu sauberen und emissionsfreien Nutzfahrzeugen zu erfassen. Dies ermöglicht eine umfassende Überwachung der Umsetzung der Quoten und unterstützt die Behörden bei der Gewährleistung der Einhaltung der Richtlinie.

Insgesamt zielt die CVD-Richtlinie darauf ab, die Beschaffung sauberer und emissionsfreier Fahrzeuge sowohl im öffentlichen Verkehr als auch im privaten Sektor zu steuern und zu fördern. Durch die Umsetzung in nationales Recht und die Einhaltung der festgelegten Quoten soll ein wichtiger Beitrag zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor geleistet und die Verbreitung umweltfreundlicher Fahrzeugtechnologien gefördert werden.

⁶ SaubFahrzeugBeschG, § 8

3. Betrachtung alternativer Antriebe im Busverkehr

Die klassische Antriebsquelle im öffentlichen Nahverkehr war jahrzehntelang der Dieselantrieb (ICEV-Diesel; Englisch: *internal combustion engine vehicle*). Diese Technologie bot etablierte Infrastruktur, routinierte Prozesse und eine gewisse ökonomische Erfahrung. Allerdings gingen damit u.a. erhebliche CO₂- und NO_x-Emissionen einher, was in Zeiten des bewusster wahrgenommenen Klimawandels zunehmend problematisch wurde.

Im Zuge der Bemühungen zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors hat sich die Priorität einer Weiterentwicklung und Einführung von alternativen Antrieben signifikant erhöht. Dazu gehören Erdgasverbrenner (ICEV-Gas), Hybridelektrofahrzeuge (HEV), Plug-in-Hybride (PHEV; Englisch: *plug-in hybrid electric vehicle*), batterieelektrische Fahrzeuge (BEV; Englisch: *battery electric vehicle*), Brennstoffzellenelektrische Fahrzeuge (FCEV; Englisch: *fuel cell electric vehicle*), Wasserstoffverbrenner und Verbrennungsmotoren mit fortschrittlichen Biokraftstoffen oder synthetischen Kraftstoffen. Abbildung 4 zeigt einen Überblick der Antriebstechniken (nicht aber jeder Kraftstoffvariante, siehe hierzu im Folgenden u.a. Abbildung 6). Jede dieser Technologien hat ihre eigenen Vor- und Nachteile in Bezug auf technische und betriebliche Anforderungen, Emissionen, Energieeffizienz und ökonomische Faktoren.

Die Wahl des Antriebs und des eingesetzten Kraftstoffs im öffentlichen Nahverkehr ist von entscheidender Bedeutung, um ohne betriebliche Einschränkungen die Umweltauswirkungen zu minimieren, die Energieeffizienz zu maximieren und die Wirtschaftlichkeit sicherzustellen. Verzögerungen in der Antriebswende können durch das Risiko von verlorenen Investitionen (auch *Stranded Assets* genannt) und teuren Struktur- und Prozessbrüchen im Betriebsablauf zu erhöhten Gesamtkosten führen. Außerdem können falsch gestellte Weichen bei der heutigen Technologieentscheidung zu erheblichen Fehlinvestitionen v.a. der Verkehrsunternehmen führen. Daher ist ökonomische Effizienz entscheidend für eine ausgewogene langfristig tragbare Energie- und Antriebswende im ÖSPV.

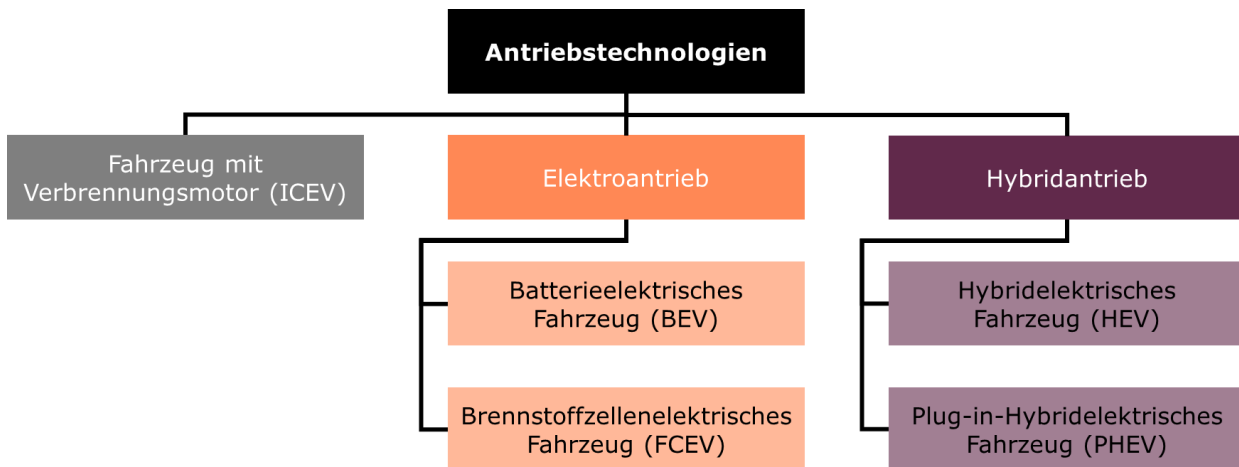


Abbildung 4: Übersicht der Antriebsarten und deren Energieträgern ⁷

Dieselbusse – bzw. Busse mit Dieselerbrennungsmotor – sind aufgrund ihrer hohen Energiedichte und Reichweite weit verbreitet. Allerdings sind sie auch für die Emission von Kohlendioxid (CO₂ eq.), Luftschadstoffen (SO₂ eq) und Lärmemissionen verantwortlich. Der aktuelle Stand der Technik im Dieselantrieb im ÖSPV umfasst Fortschritte bei der Abgasnachbehandlungstechnologie, um die NO_x- und Partikelemissionen zu reduzieren. Dies schließt den Einsatz von Dieselpartikelfiltern und selektiven katalytischen Reduktionsanlagen ein. Ein weiterer Fortschritt ist die Integration von Hybridtechnologie in Dieselbusse, um den Kraftstoffverbrauch zu senken. Hybridantriebe kombinieren Verbrennungsmotoren mit elektrischen Antrieben. Dies ermöglicht die Nutzung der Bremsenergie-Rückgewinnung und kann

⁷ Eigene Darstellung

die Effizienz von Fahrzeugen im ÖSPV verbessern. Sie ermöglichen den Einsatz von Elektromobilität in Bereichen, in denen reine Elektrofahrzeuge aufgrund der Reichweite noch nicht praktikabel sind. Dennoch sind auch hier Fragen der wirtschaftlichen und energetischen Effizienz zu berücksichtigen. Trotzdem bleibt der Dieselantrieb aufgrund seiner Umwelt- und Klimaauswirkungen umstritten.

Erdgasbusse – bzw. Busse mit Erdgasverbrennungsmotor –, überwiegend mit komprimiertem Erdgas (CNG; Englisch: *compressed natural gas*), haben sich im letzten Jahrzehnt einigen Regionen zu einer Alternative im ÖSPV entwickelt. Diese Entwicklung ist seit Ende der 2010er Jahre rückläufig⁸, wenn auch in anderen Verkehrsegmenten die Anwendung von flüssigem Erdgas (LNG; Englisch: *liquefied natural gas*) wiederkehrend – vor allem zu Beginn der 2020er Jahre – den Weg in die Diskussionen findet.⁹ Erdgasantriebe werden regelmäßig als eine Übergangslösung dargestellt, insbesondere in Regionen, in denen eine bereits bestehende Erdgasinfrastruktur oder sogar lokale Biomethanproduktion genutzt werden kann. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass Erdgasantriebe lediglich als emissionsarm in der CVD eingestuft werden und somit keine emissionsfreie Alternative darstellen. Das CO₂-Emissionsreduktionspotenzial von Erdgasantrieben im Vergleich zum Dieselantrieb reicht nicht aus, um einen signifikanten Beitrag zur Emissionsreduktion beizutragen.¹⁰ Die Kapitel 3.1 und 9.2 gehen detaillierter auf das Thema Emissionen ein.

Elektroantriebe sind eine der vielversprechendsten Alternativen im ÖSPV. Elektrobusse und elektrische Bahnen haben sich bereits in vielen Städten als umweltfreundliche und leise Optionen etabliert. Sie produzieren keine lokalen Emissionen und tragen somit zur Verbesserung der Luftqualität bei. Darüber hinaus können Elektrofahrzeuge durch Strom aus erneuerbaren Energien betrieben werden, was ihre Klimabilanz weiter verbessert. Jedoch sind noch Herausforderungen wie die begrenzte Reichweite von Batterien und der Ausbau der Ladeinfrastruktur zu bewältigen. Der Aufbau der Lade- und Tankinfrastruktur für emissionsfreie Busantriebe erfordert zielgerichtete Maßnahmen und erhebliche Investitionen. Bei der Ladeinfrastruktur für Elektrobusse sind mehrere entscheidende Schritte zu berücksichtigen. Die Identifizierung geeigneter Standorte für Ladestationen an Busbahnhöfen, in städtischen Gebieten und in Betriebshöfen steht an erster Stelle. Dies erfordert enge Zusammenarbeit mit Behörden und Eigentümern, um Genehmigungen zu erhalten. Die eigentliche Installation der Ladestationen erfordert Fachwissen in Elektrotechnik und Bauwesen. Je nach Anforderungen werden verschiedene Ladetypen wie Depotladung, Schnellladung oder auch Oberleitungen benötigt, was spezifische Technologien und Anschlüsse erfordert. Die Anbindung an das Stromnetz erfordert Kooperationen und Koordinationen mit Energieversorgungsunternehmen, um ausreichende Leistungsfähigkeit sicherzustellen.

Wasserstofftechnologien bieten eine alternative Möglichkeit, den ÖSPV nachhaltig zu gestalten. Brennstoffzellenbusse verwenden Wasserstoff als Energieträger und erzeugen dabei lediglich Wasserdampf als Abgas. Sie haben den Vorteil, dass sie eine hohe Reichweite und relativ kurze Betankungszeiten bieten. Allerdings sind die Herstellung und der Transport von Wasserstoff mit relevant hohen energetischen Verlusten, infrastrukturellen Herausforderungen sowie eingeschränkter Marktverfügbarkeit (v.a. von grünem Wasserstoff) verbunden. Die Auswahl von Standorten für Wasserstofftankstellen erfordert sorgfältige Planung im Hinblick auf Zugänglichkeit und Sicherheit, begleitet von behördlichen Genehmigungen. Die Technologie zur Speicherung, Komprimierung und Verteilung von Wasserstoff muss installiert werden, was technisches Fachwissen erfordert. Die Sicherstellung einer kontinuierlichen Wasserstoffversorgung erfordert die Zusammenarbeit mit Wasserstoffproduzenten und -lieferanten. Die Sicherheitsanforderungen und gesetzlichen Vorschriften müssen streng eingehalten werden, einschließlich Schulungen für das Personal. Regelmäßige Inspektionen, Wartung der Tank- und Kompressionsanlagen sowie die Lösung technischer Probleme sind unabdingbar, um Sicherheit und Effizienz der Tankinfrastruktur sicherzustellen.

⁸ KBA (2024)

⁹ Siehe beispielsweise ifeu (2021), Fraunhofer ISI (2019), DVGW (2019)

¹⁰ „Der Klimavorteil von Flüssigerdgas-Lkw [gegenüber dem Diesel-LKW] ist mit maximal 8 Prozent nur sehr gering.“ UBA (2020)

Busse mit Wasserstoffverbrennungsmotor sind eine weitere Alternative zu den zuvor genannten Verbrennungsmotoren. In diesem System wird komprimierter Wasserstoff als Kraftstoff verwendet, der im ottomotorischen Verbrennungsmotorkonzept mit Luft gemischt wird. Im Vergleich zu herkömmlichen Verbrennungsmotoren mit kohlenstoffbasierten Brennstoffen, erzeugt die Wasserstoffverbrennung aufgrund der Kohlenstoff-freien Verbrennung lediglich Wasserdampf als Emission, nicht aber CO₂.¹¹

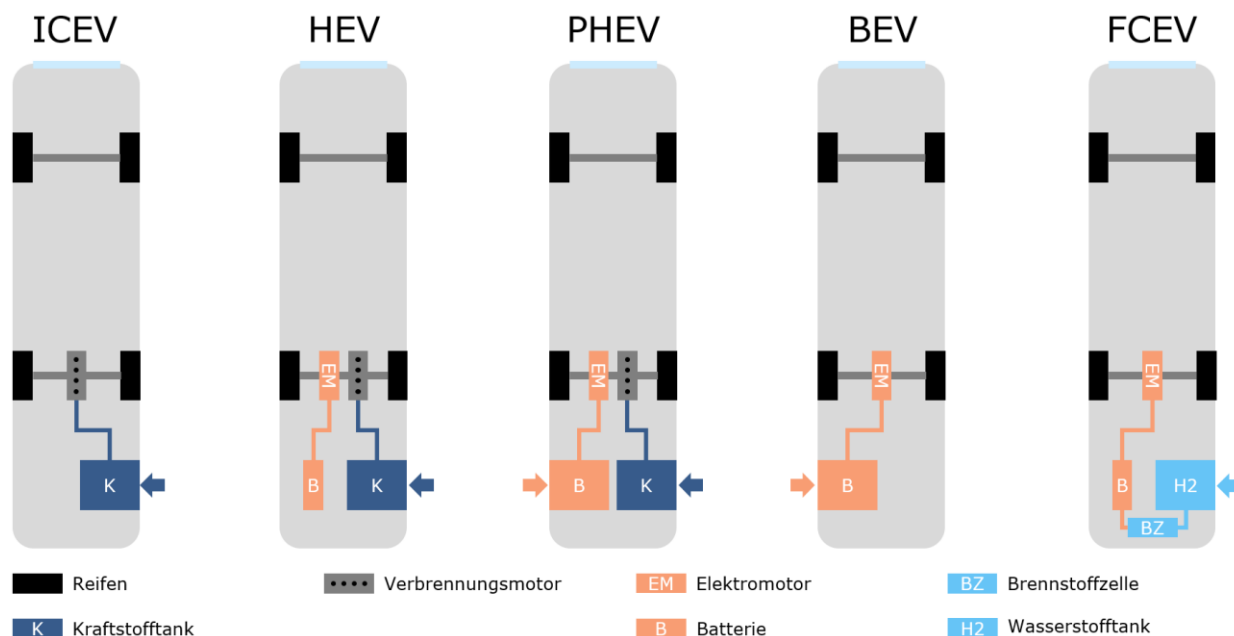


Abbildung 5 Vereinfachte Skizze des technischen Aufbaus inkl. Energieträgerzufuhr unterschiedlicher Antriebstechnologien und -systeme im ÖSPV ¹²

Die Wahl der Art und Herkunft von Energieträgern bzw. Kraftstoffen im Verkehr spielt eine entscheidende Rolle in Anbetracht der drängenden globalen Herausforderungen, darunter der Klimawandel, die Energieeffizienz und die Marktverfügbarkeit. Diese Faktoren beeinflussen nicht nur die Umweltauswirkungen des Verkehrs, sondern auch die wirtschaftliche Nachhaltigkeit und die Verfügbarkeit von Ressourcen. Um diese Zusammenhänge besser zu verstehen, betrachten wir die Aspekte CO₂-Emissionen, Energieeffizienz und Marktverfügbarkeit im Kontext der verschiedenen verfügbaren Energieträger und Kraftstoffe im Verkehr.

Alternative Kraftstoffe – beispielsweise Biokraftstoffe oder synthetische Kraftstoffe – bieten eine Möglichkeit, die Emissionen im ÖSPV zu reduzieren, ohne auf konventionelle Verbrennungsmotoren zu verzichten. Sie könnten in bestehenden Fahrzeugflotten eingesetzt werden und tragen dazu bei, die CO₂-Emissionen zu senken. Allerdings sind auch sie nicht frei von Herausforderungen, insbesondere im Hinblick auf die Verfügbarkeit, Herstellung und Wirtschaftlichkeit.

Die Bereitstellung von Energieträgern durchläuft eine komplexe Abfolge von Prozessschritten, die von der Energiequelle bis zur Umwandlung im Fahrzeug reichen. In der Regel umfasst dieser Prozess bis zu fünf grundlegende Schritte:

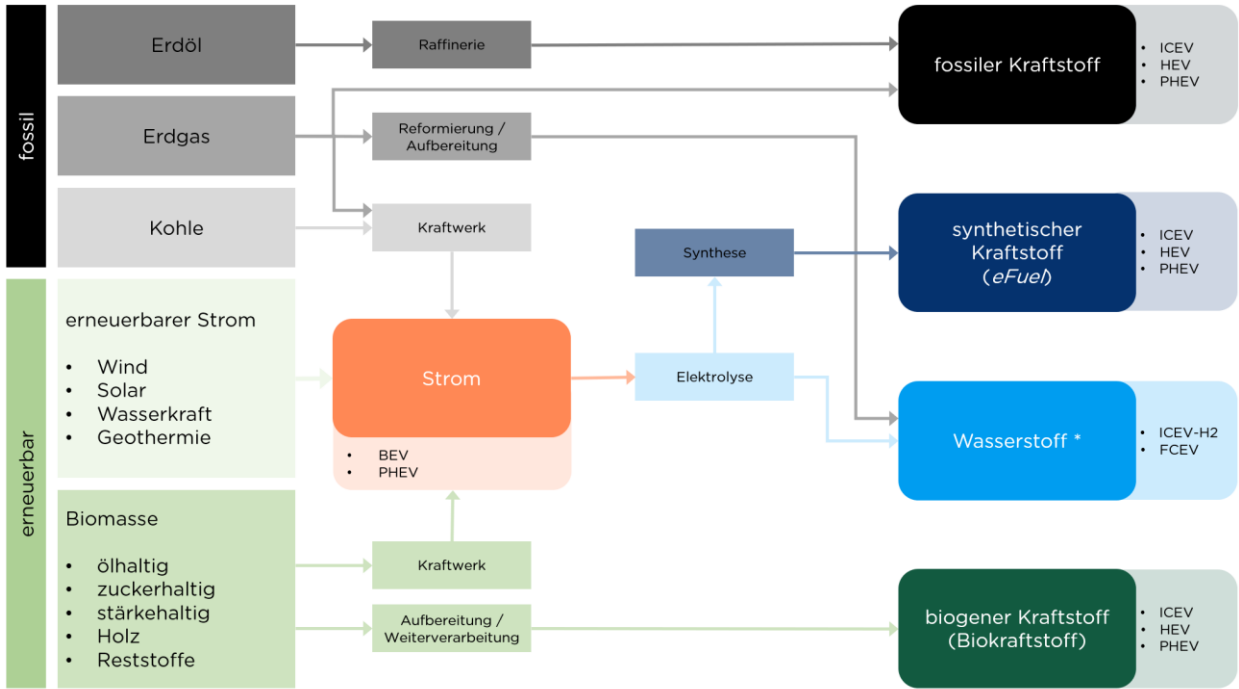
- **Produktion & Aufbereitung des Energieträgers an der Quelle:** Hierbei handelt es sich um den ersten Schritt, bei dem der Energieträger an seiner Quelle gewonnen und aufbereitet wird.
- **Transformation des Energieträgers an der Quelle:** An diesem Punkt kann der Energieträger je nach Quelle und Technologie transformiert werden, um ihn für die Weiterverarbeitung geeignet zu machen.

¹¹ e-mobil BW (2021)

¹² Eigene Darstellung

- **Distribution zum Markt:** Nach der Produktion und eventuellen Transformation wird der Energieträger an den Markt verteilt.
- **Transformation am Markt:** Am Markt können weitere Veränderungen und Anpassungen am Energieträger vorgenommen werden, um ihn für die Verwendung in den Fahrzeugen geeignet zu machen.
- **Aufbereitung und Verteilung des finalen Energieträgers:** Schließlich erfolgen die Aufbereitung und Verteilung des finalen Energieträgers, der in den Fahrzeugen genutzt wird.

Jede Antriebstechnologie kann auf eine Vielzahl unterschiedlicher Energieträgerquellen, Herstellungsprozesse und Distributionsmöglichkeiten zugreifen. Dabei kann grob zwischen fossilen und erneuerbaren Energiequellen unterschieden werden (siehe Abbildung 6).



* Wasserstoff gehört in die Gruppe synthetischer (strombasierter) Kraftstoffe, erhält aber hier aufgrund der Relevanz eine separate Aufmerksamkeit.

Abbildung 6: Vereinfachte Energiequelle-Kraftstoffe-Darstellung ¹³

Die Herstellung von herkömmlichen Kraftstoffen aus Erdöl oder Erdgas unterscheidet sich grundlegend von den Energieträgern Strom, Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen. Dies liegt daran, dass bei Letzteren die direkte Nutzung (Strom) oder eine zusätzliche Transformationsstufe (Elektrolyse) erforderlich ist. Biogene Kraftstoffe zeichnen sich durch die Kraft-Wärme-Kopplung und die Vielfalt der Quellstoffe für die Herstellung aus.¹⁴ Es ist wichtig zu beachten, dass diese Prozessketten und ihre spezifischen Schritte je nach Technologie und Energiequelle variieren. Für eine fundierte Bewertung der verschiedenen Antriebstechnologien müssen diese Unterschiede sorgfältig berücksichtigt werden.

Ein zukunftsorientierter ÖSPV bedarf einen ganzheitlichen Ansatz, der technische und operative Rahmenbedingungen, Energieeffizienz sowie ökologische und ökonomische Aspekte berücksichtigt. Angesichts der drängenden Herausforderungen des Klimawandels, der Luftverschmutzung und der Ressourcenknappheit ist eine zukunftsorientierte Wahl des richtigen Antriebs für Busse von entscheidender Bedeutung. Ein zentraler Aspekt sind die Kohlenstoffemissionen, die von den verschiedenen Antriebsarten erzeugt werden.

¹³ Eigene Darstellung

¹⁴ „Biokraftstoffe im Sinne des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) und des Energiesteuergesetzes (EnergieStG) sind Energieerzeugnisse ausschließlich aus Biomasse im Sinne der Biomassenverordnung (BiomasseV) [...]“ Zoll (2024)

Neben den Emissionen spielt die Energieeffizienz eine wichtige Rolle bei der Bewertung der Nachhaltigkeit von Verkehrssystemen. Energieeffiziente Antriebe ermöglichen einen sparsameren Umgang mit Ressourcen und reduzieren die Betriebskosten. Elektrische Antriebe, insbesondere batterieelektrische Busse, weisen eine hohe Energieeffizienz auf.

Die Umstellung auf alternative Antriebe im ÖSPV ist ein komplexer Prozess, der eine sorgfältige Analyse der technischen Rahmenbedingungen, Umstellungs- und Umrüstungsaufwände sowie betriebliche Veränderungen und Herausforderungen erfordert.

Die Wirtschaftlichkeit ist aus betriebswirtschaftlicher Sicht ein entscheidender Faktor für Verkehrsunternehmen. Die Investitionen in alternative Antriebe müssen langfristig kosteneffizient sein. Hier spielen nicht nur die Anschaffungskosten der Fahrzeuge, sondern auch die Betriebskosten und die Lebensdauer der Antriebe eine Rolle.

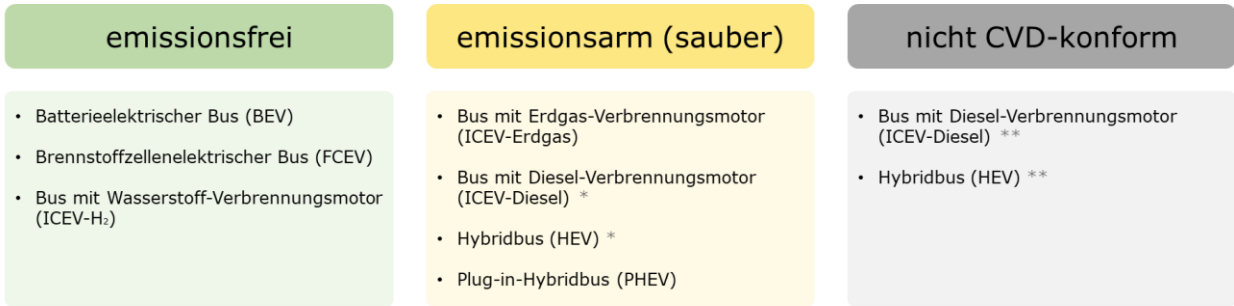
Ausrichtung Klimaschutz

Genau diese zukunftsorientierte Ausrichtung beschloss der Landkreis Oberallgäu im Jahr 2017 mit dem "Masterplan 100% Klimaschutz"¹⁵ mit dem Ziel, langfristig eine nachhaltige und klimafreundliche Zukunft zu gestalten. Fünf Jahre später, im Jahr 2022, wurde dieser Plan fortgeschrieben und konkretisiert. Der Landkreis hat sich das ehrgeizige Ziel gesetzt, seine Emissionen bis zum Jahr 2035 um 95 % gegenüber dem Basisjahr 2010 zu reduzieren. Ein zentraler Bestandteil dieses Plans ist die weitgehende Umstellung des Energiebedarfs für die Mobilität auf erneuerbare Energien. Bis 2035 sollen nur noch 5 % des heutigen Energiebedarfs für Mobilität durch fossile Energien gedeckt werden.

Für den Busverkehr im Landkreis bedeutet dies eine bedeutende Veränderung: Der Umweltverbund soll gestärkt und der Umstieg auf emissionsfreie Antriebssysteme vorangetrieben werden. Emissionsfreie Busse sollen mit einer engen Taktung und attraktiven Tarifen alle Kommunen im Landkreis sowie die benachbarten Landkreise miteinander vernetzen. Diese Maßnahmen sollen dazu beitragen, den öffentlichen Nahverkehr attraktiver zu gestalten und gleichzeitig die Klimaziele des Landkreises Oberallgäu zu erreichen.

Einordnung der Antriebstechnologien in die CVD

Die unterschiedlichen Antriebstechnologien werden entsprechend der CVD wie folgt eingeordnet, siehe Abbildung 7. Hierbei ist es wichtig bei einigen Technologien die Herkunft der Kraftstoffe zu beachten.



* mit 100% nicht-fossilen Kraftstoffen ** mit > 0 % fossilen Kraftstoffen

Abbildung 7: Einordnung der Antriebstechnologien nach CVD ¹⁶

¹⁵ LRA (2022)
¹⁶ Eigene Darstellung auf Basis CVD (2021)

3.1 Emissionen als wichtigstes Kriterium zukünftiger Investitionen im ÖSPV

Die Thematik der CO₂-Emissionen steht zweifellos im Zentrum der zukünftigen Investitionen im öffentlichen Straßenpersonennahverkehr. In einer Welt, die den Klimawandel aktiv bekämpfen und die negativen Umweltauswirkungen des Verkehrssektors drastisch reduzieren muss, gewinnen Treibhausgasemissionen, insbesondere Kohlendioxid, eine herausragende Bedeutung.

Fahrzeuge

Der gegenwärtige Zustand des öffentlichen Personennahverkehrs wird nach wie vor von Dieseln und -fahrzeugen dominiert. Diese Fahrzeuge profitieren zweifellos von etablierten Infrastrukturen und bewährten Prozessen, weisen jedoch erhebliche Nachteile auf, da sie erhebliche Mengen an CO₂- und Stickoxid-Emissionen verursachen. Eine scheinbare Alternative zum herkömmlichen Dieselantrieb ist der Erdgasantrieb. Erdgas wird oft als "sauberer" Kraftstoff betrachtet, da bei seiner Verbrennung im Vergleich zu Dieselmotoren weniger Schadstoffe freigesetzt werden. Jedoch bewirkt die Umstellung auf Erdgas keine signifikante Reduzierung der CO₂-Emissionen, da Erdgas größtenteils aus fossilen Ressourcen gewonnen wird. Diese Abhängigkeit von begrenzten fossilen Rohstoffen bleibt bestehen, und die langfristige Nachhaltigkeit dieses Ansatzes steht in Frage. In einer Zeit, in der drastische Maßnahmen zur Reduzierung von CO₂-Emissionen erforderlich sind, wird deutlich, dass Erdgas allein keine dauerhafte Lösung bieten kann.

Hybridfahrzeuge kombinieren oft einen Verbrennungsmotor, normalerweise auf Dieselmotorbasis, mit einem Elektromotor, um die Gesamteffizienz zu steigern. Dies führt zu einer Verringerung des Kraftstoffverbrauchs und einer Effizienzsteigerung des Primärtriebs. Allerdings führt die Verwendung von Hybridtechnologie nicht zu einer signifikanten Reduktion der CO₂-Emissionen, da sie immer noch primär auf fossilen Brennstoffen basieren. Darüber hinaus sind Hybridfahrzeuge entsprechend der CVD weder als emissionsarm, gar als emissionsfreie Lösung einzuordnen und bieten keine nachhaltige Antwort auf die Emissionsminderung im Verkehrssektor.

Plug-in-Hybridfahrzeuge gehen einen Schritt weiter und ermöglichen das Aufladen der Batterie aus dem Netz, was eine begrenzte (rein) elektrische Reichweite ermöglicht. Dennoch bieten PHEV aufgrund ihrer operativen Einschränkungen nur begrenztes Potenzial zur Reduktion von CO₂-Emissionen. In Situationen, in denen der Verbrennungsmotor eingeschaltet ist, werden weiterhin CO₂-Emissionen ausgestoßen, selbst wenn die Batterie geladen ist. Die Antriebsstränge von PHEV erfordern daher ein spezifisches Fahrverhalten, um das Potenzial zur Emissionsreduktion zu maximieren.

Batterieelektrische Fahrzeuge gelten als eine der vielversprechendsten Alternativen zur Reduzierung von CO₂-Emissionen im Verkehrssektor. Sie sind emissionsfrei am Auspuff, aber ihre tatsächliche Umweltauswirkung hängt stark von der Herkunft des eingesetzten Stroms ab. Ohne die Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen besteht keine signifikante Reduktion von CO₂-Emissionen im Vergleich zum Status Quo mit Dieselantrieb.¹⁷ Der Einsatz von Strom aus erneuerbaren Quellen ist daher von entscheidender Bedeutung, um die Emissionsminderungspotenziale von BEVs zu realisieren.

Wasserstoff kann als Energieträger für brennstoffzellenelektrische Fahrzeuge oder Wasserstoffverbrenner verwendet werden. Der Betrieb von FCEV ist emissionsfrei, aber der Ursprung des Wasserstoffs ist entscheidend. Nur wenn der Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen gewonnen wird, kann eine signifikante und nachhaltige Reduktion von CO₂-Emissionen erreicht werden. Die Umstellung auf Wasserstoff erfordert daher den Ausbau erneuerbarer Wasserstoffproduktion.

Elektrische Antriebe wie BEV und FCEV und hybride Antriebstechnologien wie HEV und PHEV bieten ein direktes Kraftstoffeinspar- und somit Emissionsminderungspotenzial. Durch den (lokal) emissionsfreien Betrieb reduzieren elektrischen Antrieben die Emissionen – im Vergleich zum Diesel-Verbrenner (Status

¹⁷ UBA (2023): Deutscher Strommix: 434 g CO₂/kWh

Quo) – von 100 %¹⁸. Hybride Antriebstechnologien hingegen können den Dieserverbrauch durch elektrische Unterstützung (v.a. HEV) und/oder elektrisch zurückgelegte Strecken (v.a. PHEV) reduzieren. Hierdurch ergeben sich grobe Dieseleinsparpotenziale von 10-30 %. Abweichungen innerhalb der Spanne entstehen u.a. aufgrund der Technologiewahl und -reife, aber auch der Fahrweise.¹⁹

Anders ist das Emissionsminderungspotenzial von Verbrennungsmotoren mit alternativen Kraftstoffen zu betrachten. Dies ist abhängig von der Herkunft des Kraftstoffes. Biogene und synthetische Kraftstoffe können aus erneuerbaren Quellen hergestellt werden, was theoretisch zu einer nahezu neutralen Emissionsbilanz führt.

Insgesamt verdeutlicht diese Betrachtung, dass die Emissionsminderung im öffentlichen Personennahverkehr eine komplexe Herausforderung darstellt. Die Wahl des Antriebs und des eingesetzten Kraftstoffs ist von entscheidender Bedeutung, um die Umweltauswirkungen zu minimieren. Dies erfordert nicht nur technologische Innovationen, sondern auch politische Maßnahmen, die die Nutzung erneuerbarer Energiequellen fördern und die Umstellung auf nachhaltige, emissionsfreie Alternativen unterstützen.

Energieträger und Kraftstoffe

Die Reduzierung von Emissionen im Verkehr durch den Einsatz alternativer Energieträger und Kraftstoffe ist ein wesentlicher Schritt zur Verringerung der Umweltauswirkungen des Verkehrssektors. Dennoch bestehen erhebliche Herausforderungen hinsichtlich der Emissionsminderungspotenziale, die in Bezug auf erneuerbare Stromquellen, die begrenzte Verfügbarkeit von nachhaltiger Biomasse und bestehende lokale CO₂-Emissionen bei biogenen oder synthetischen Kraftstoffen relevant sind.

Eine wesentliche Voraussetzung für die Effektivität alternativer Energieträger im Verkehr ist die Herkunft des verwendeten Stroms. Sowohl Strom als auch strombasierte Energieträger wie Wasserstoff sind nur dann wirkungsvoll in der Emissionsminderung, wenn der für die Elektrolyse oder Synthese verwendete Strom aus erneuerbaren Energiequellen stammt. Im Gegensatz dazu bietet konventioneller Strom aus fossilen Quellen kein nennenswertes Potenzial zur Reduktion von Emissionen. Aus diesem Grund ist die Verfügbarkeit erneuerbaren Stroms und die Sicherstellung einer zuverlässigen und nachhaltigen Energieversorgung von zentraler Bedeutung. Insbesondere im Kontext der Herstellung fortschrittlicher Biokraftstoffe erweist sich die beschränkte Verfügbarkeit nachhaltiger Biomasse als weitere Herausforderung. Fortschrittliche Biokraftstoffe werden gemäß RED III²⁰ aus Biomassequellen hergestellt, die nicht für die Nahrungsmittelproduktion geeignet sind, um Konflikte mit dieser Nutzung zu vermeiden. Doch die Verfügbarkeit solcher Biomasse befindet sich noch im Markthochlauf, was die Skalierbarkeit und den Einsatz fortschrittlicher Biokraftstoffe beeinträchtigt (dazu mehr in Abschnitt 3.3). Eine zusätzliche Herausforderung bei der nachhaltigen Beschaffung von Biomasse ist die Umweltauswirkungen bei der Gewinnung. Die Landnutzung, der Einsatz von Pestiziden und der Wasserbedarf sind Beispiele für potenzielle Umweltbelastungen, die biogene Kraftstoffe bei einer breiten Anwendung im Vergleich zu anderen Energieerzeugungsmöglichkeiten fragwürdig macht.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Frage der lokalen CO₂-Emissionen im Zusammenhang mit biogenen oder synthetischen Kraftstoffen. Obwohl diese Kraftstoffe oft als kohlenstoffarm oder CO₂-neutral betrachtet werden, führt ihre Verbrennung dennoch zu ähnlichen lokalen CO₂-Emissionen wie herkömmlicher Dieselmotorkraftstoff und vor allem nicht zu einer vollkommenen Emissionsreduktion (siehe Abbildung 8, oben). Dies hat weiterhin Auswirkungen auf die Luftqualität, insbesondere in städtischen Gebieten (siehe Abbildung 8, unten). Daher ist es unerlässlich, nicht nur die Kohlenstoffbilanz, sondern auch die lokalen Umweltauswirkungen zu berücksichtigen. Selbst bei einer intensiven Erforschung und Entwick-

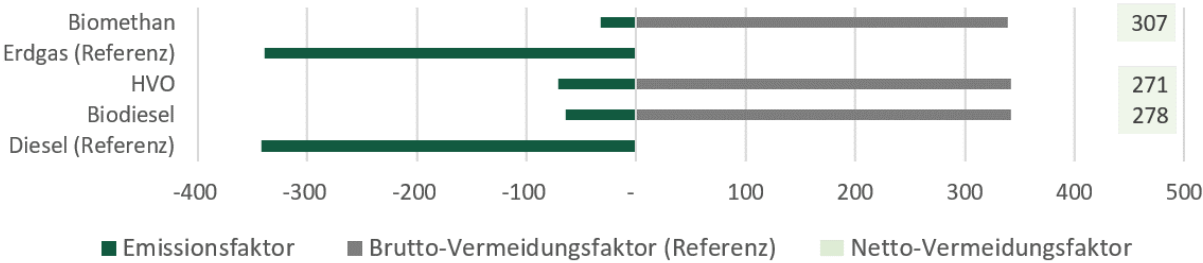
¹⁸ Kraftstoffeinspar- und somit Emissionsminderungspotenzial ist nicht zu verwechseln mit Energieeinsparung.

¹⁹ INFRAS (2020), Thinkstep (2015), Öko-Institut (2014)

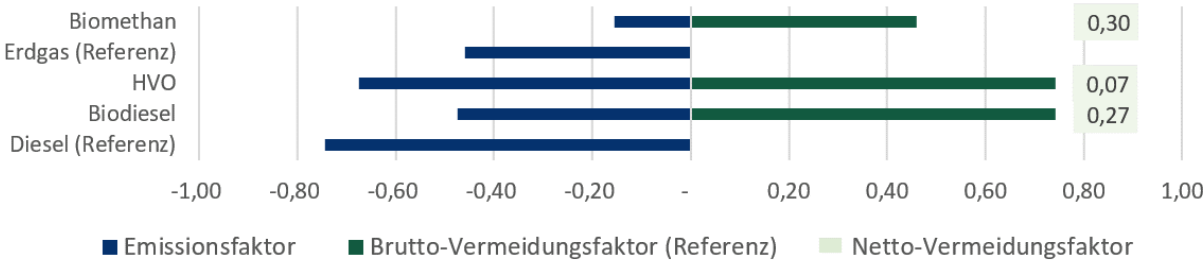
²⁰ Renewable Energy Directive III (RED III)

lung von revolutionären Technologien zur Abgasbehandlung oder einer radikalen Optimierung der Verbrennungsprozesse ist es fraglich, ob die Reduzierung der lokalen Emissionen bei biogenen oder synthetischen Kraftstoffen jemals in Konkurrenz zu anderen emissionsfreien Technologien treten kann.

Emissionsfaktoren in CO₂ eq. / kWh



Emissionsfaktoren in SO₂ eq. / kWh



Hinweis: Die Emissionsfaktoren können nach Art des Biokraftstoffs und der Rohstoffbasis zu den abgebildeten Annahmen abweichen.

Abbildung 8 oben: Treibhausgasemissionen (CO₂ eq.) und unten: Luftschadstoffemissionen (SO₂ eq.) durch die Nutzung von alternativen Energieträgern im Verkehrssektor nach Energieträgern ²¹

Insgesamt sind die Potenziale zur Emissionsminderung durch alternativen Energieträger und Kraftstoffe eng mit der Verfügbarkeit erneuerbarer Stromquellen, der nachhaltigen Beschaffung von Biomasse und der Kontrolle lokaler CO₂-Emissionen verknüpft. Die Bewältigung dieser Herausforderungen erfordert eine sorgfältige Planung, bundes- und europaweite politische Maßnahmen zur Förderung nachhaltiger Energiequellen und eine kontinuierliche Überwachung der Umweltauswirkungen. Nur so können alternative Energieträger und Kraftstoffe ihr volles Potenzial zur Minderung von Emissionen im Verkehr entfalten.

3.2 Energieeffizienz als essenzieller Faktor für die Antriebswende

Energieeffizienz ist ein Schlüsselfaktor bei der Umstellung auf alternative Antriebe im öffentlichen Straßenpersonennahverkehr. Sie spielt eine zentrale Rolle bei der Reduzierung des Energieverbrauchs, was angesichts der begrenzten Ressourcen von großer Bedeutung ist. Im Vergleich mit dem herkömmlichen fossilen Dieselmotorkraftstoff weisen alternative Antriebe und alternative Energieträger jedoch unterschiedliche Effizienzniveaus auf. Energieeffizienz im Gesamtenergiesystem bezieht sich darauf, wie effektiv Energie von der Erzeugung bis zur (End)Nutzung genutzt wird. Der Bereitstellungspfad spielt eine Schlüsselrolle, da Übertragungs- und Umwandlungsverluste minimiert werden sollten.

²¹ Nach UBA (2021). „Bio-LNG emittiert [...] durch den höheren Aufwand für die Logistik und Verflüssigung 3 bis 4 g CO₂ eq/MJ zusätzlich.“ Fraunhofer ISI (2019).

In Fahrzeugen bezieht sich Energieeffizienz darauf, wie effizient Energieträger bzw. Kraftstoff in kinetische Energie umgewandelt wird. Der Pfad umfasst Energieträgerproduktion, Transport und Nutzen (bspw. Antrieb durch Verbrennung). Die Einheit für Energieeffizienz ist Prozent und bildet das Verhältnis zwischen der zugeführten Energie und der Nutzenergie ab ($\text{Energie}_{\text{Zufuhr}}/\text{Energie}_{\text{Nutzen}}$) - wobei höhere Werte auf eine effizientere Nutzung hindeuten.

Im folgenden Abschnitt werden wir die Herausforderungen und Potenziale in Bezug auf die Energieeffizienz verschiedenen Antriebstechnologien im ÖSPV beleuchtet.

Fahrzeug

Der herkömmliche Dieselmotor weist im Vergleich zu seinen Anfangsjahren auf den Straßen erhebliche Energieeffizienzentwicklungen vor, jedoch gehen aufgrund des Verbrennungsprozesses noch immer erhebliche Energieverluste einher. Das bedeutet, dass nur ein Teil der ursprünglichen Energie tatsächlich zur Fortbewegung des Fahrzeugs genutzt wird. Hinzu kommt, dass Dieselmotoren im Betrieb nicht besonders effizient sind, da ein erheblicher Anteil der erzeugten Energie in Form von Wärme verloren geht.

Hybridtechnologien wurden entwickelt, um die Effizienz von Dieselmotoren zu steigern, indem ein Elektromotor den Verbrennungsmotor unterstützt. Dies ermöglicht, Energie während des Bremsens zurückzugewinnen und sie beim Beschleunigen erneut zu nutzen. Obwohl dies die Effizienz im Vergleich zu reinen Verbrennungsmotoren verbessert, bleibt die Steigerung der Effizienz begrenzt und nicht signifikant, da der Verbrennungsmotor den Großteil der Arbeit leistet und somit erhebliche Energieverluste auftreten.

Der direkte Einsatz von Strom in batterieelektrischen Fahrzeugen bietet die geringsten Verluste. Die Energie wird in einer Batterie gespeichert und direkt an einen Elektromotor geleitet, um das Fahrzeug anzutreiben. Während der Umwandlung von elektrischer Energie in Bewegung treten nur geringe Verluste auf, wobei die relevantesten Verluste während des Ladevorgangs der Batterie auftreten. Dies macht BEVs zu einer äußerst effizienten Option im ÖSPV, vorausgesetzt, der verwendete Strom stammt aus erneuerbaren Energiequellen.

Eine Herausforderung für die Energieeffizienz tritt auf, wenn Strom in strombasierte Energieträger wie Wasserstoff umgewandelt wird – vergleichend dargestellt ist dies in Abbildung 9. Die Elektrolyse von Wasser zur Erzeugung von Wasserstoff erfordert Energie und ist mit Verlusten verbunden. Zusätzliche Verluste treten auf, wenn der erzeugte Wasserstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen oder Wasserstoffverbrennungsmotoren verwendet wird. Die Umwandlung von Wasserstoff in elektrische Energie in einer Brennstoffzelle ist nicht so effizient wie die direkte Verwendung von Strom in BEVs. Die alternative Verbrennung von Wasserstoff in einem Wasserstoffverbrennungsmotor ist ebenfalls mit erheblichen Verlusten verbunden, da bei der Verbrennung große Mengen an Wärmeenergie freigesetzt werden.

Ähnliche Effizienzprobleme treten bei strombasierten oder synthetischen Kraftstoffen (eFuels) auf. Diese Kraftstoffe werden häufig aus zuvor durch Elektrolyse erzeugtem Wasserstoff hergestellt. Die Herstellung von eFuels erfordert zusätzliche Verarbeitungs- und Veredlungsprozesse, die ebenfalls mit Energieverlusten einhergehen. Die Verbrennung von eFuels in Verbrennungsmotoren verursacht weitere Effizienzverluste.

Wasserstoffverbrennungsmotoren, die Wasserstoff direkt nutzen, anstatt ihn in Strom umzuwandeln, unterliegen ebenfalls erheblichen Effizienzverlusten im Vergleich zum elektrischen Nutzen durch Brennstoffzellen. Bei der Verbrennung von Wasserstoff wird nicht nur Bewegungsenergie, sondern auch eine erhebliche Menge an Wärmeenergie erzeugt. Diese Wärme geht verloren und trägt zu den Gesamtverlusten bei.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Energieeffizienz eine zentrale Rolle bei der Bewertung von Antriebslösungen im ÖSPV spielt. Wie in Abbildung 9 vergleichend dargestellt, bieten batterieelektrische Fahrzeuge die höchste Effizienz, vorausgesetzt, der verwendete Strom stammt aus erneuerbaren

Quellen. Der Einsatz von Wasserstoff und strombasierten Kraftstoffen geht mit erheblichen Energieverlusten einher und erfordert die Umstellung auf erneuerbare Energiequellen, um die Gesamteffizienz zu steigern. Die Wahl des richtigen Antriebs hängt daher nicht nur von der Reduzierung von CO₂-Emissionen, sondern auch von der Effizienz des Gesamtsystems ab.

Energieträger

Die Skalierbarkeit strombasierter Energieträger und Kraftstoffe ist von zentraler Bedeutung für den Erfolg der Energiewende. Strombasierte Energieträger, wie grüner Wasserstoff und synthetische Kraftstoffe, werden oft als vielversprechende Alternativen zu konventionellen, fossilen Kraftstoffen betrachtet. Sie haben das Potenzial, den Verkehrssektor und andere Bereiche der Wirtschaft zu dekarbonisieren und somit zur Erreichung der Klimaziele beizutragen. Dennoch bestehen erhebliche Herausforderungen hinsichtlich der Skalierbarkeit, der Energieeffizienz der Produktion und des kritischen Primärenergiebedarfs.

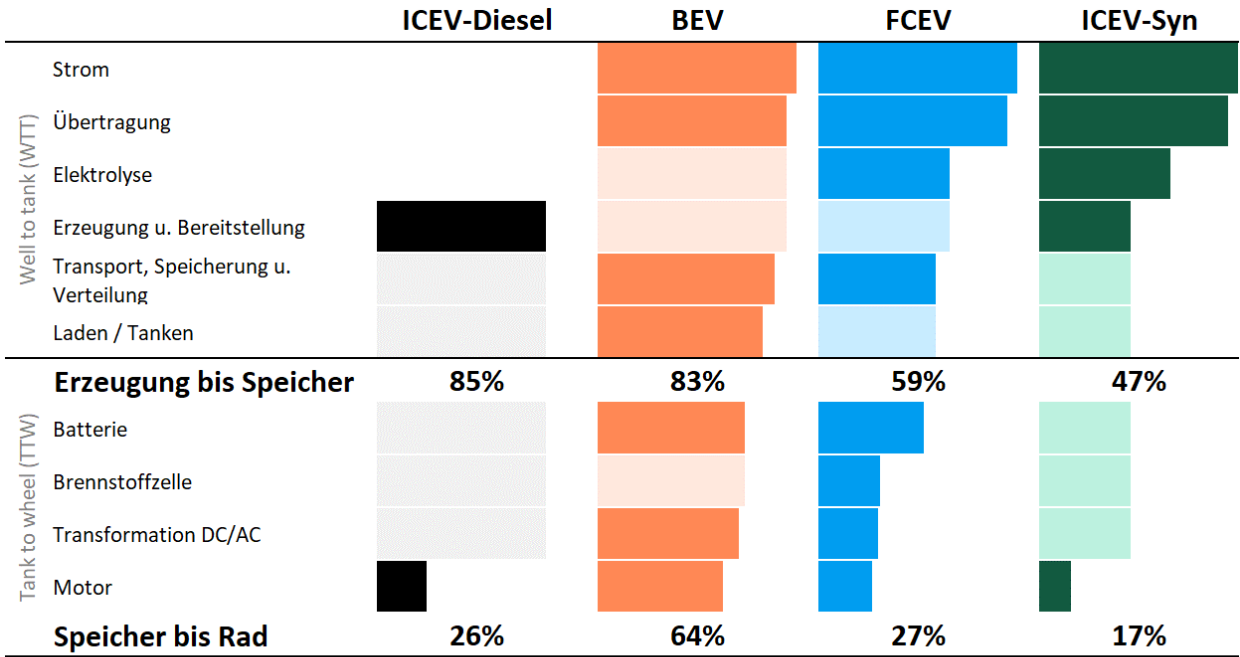
Ein Schlüsselproblem bei strombasierten Energieträgern ist die Energieeffizienz der Herstellung. Die Umwandlung von elektrischem Strom in Wasserstoff oder synthetische Kraftstoffe erfordert Elektrolyse- und Syntheseprozesse, die mit Energieverlusten einhergehen. Diese Verluste treten sowohl bei der Umwandlung von Strom in Wasserstoff als auch bei der Herstellung von synthetischen Kraftstoffen auf. Als Ergebnis benötigt die Produktion strombasierter Energieträger einen erheblichen Primärenergiebedarf, der die Gesamteffizienz der Energiesysteme beeinträchtigt.

Zudem ist die Skalierung der Produktion strombasierter Energieträger ein herausfordernder Prozess. Die erforderliche Infrastruktur, einschließlich Elektrolyseure und Anlagen zur Synthese von Kraftstoffen, muss in großem Maßstab bereitgestellt werden, um die steigende Nachfrage zu decken. Dies erfordert erhebliche Investitionen und die Verfügbarkeit erneuerbarer Energiequellen in ausreichender Menge. Der Hochlauf der Produktion von grünem Wasserstoff und synthetischen Kraftstoffen hängt stark von politischer Unterstützung und wirtschaftlichen Anreizen ab.

Ein weiteres Problem im Zusammenhang mit strombasierten Energieträgern ist die Abhängigkeit von der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen. Um die Umweltauswirkungen zu minimieren, müssen strombasierte Energieträger aus grünem Strom hergestellt werden. Dies setzt voraus, dass erneuerbare Energien wie Wind, Sonne und Wasser in ausreichendem Maße zur Verfügung stehen. Die Verfügbarkeit erneuerbarer Energiequellen kann jedoch wetterabhängig sein und Schwankungen unterliegen. Daher ist die Kopplung von strombasierten Energieträgern mit einer zuverlässigen und stabilen erneuerbaren Stromerzeugung von wesentlicher Bedeutung.

Die Sicherstellung der erforderlichen Rohstoffe für die Produktion strombasierter Energieträger ist eine herausfordernde Aufgabe. Besondere Materialien wie Platin, die als Katalysatoren in Elektrolyseuren benötigt werden, sind in ausreichender Menge und Qualität erforderlich. Die Verfügbarkeit seltener Erden kann die Wirtschaftlichkeit der Produktion beeinflussen. Auch der Transport dieser Energieträger, sei es Wasserstoff oder synthetische Kraftstoffe, erfordert spezielle Infrastruktur und Sicherheitsmaßnahmen. Besonders im Fall von Wasserstoff, der hohe Sicherheitsanforderungen aufweist, ist die Bereitstellung einer zuverlässigen Lieferkette zwischen Produktionsstätten, Zwischenspeichern und den Verbrauchern eine komplexe Angelegenheit. Die physische Versorgung ähnelt zwar in Teilen der herkömmlichen Kraftstofflogistik, jedoch sind die technologischen Anforderungen bei strombasierten Energieträgern deutlich anspruchsvoller. Die Gewährleistung einer konstanten Versorgung ist zwar für bestimmte Großabnehmer wie z.B. Glas- oder Stahlindustrie durchaus denkbar. Jedoch wird die Sicherstellung der Versorgung, insbesondere im Falle einer breiten Anwendung in verschiedenen Sektoren und auf breiter geografischer Ebene, zu einer kritischen Herausforderung. Dabei ist insbesondere die Versorgungssicherheit von eminenter Bedeutung, um einen reibungslosen Übergang zu strombasierten Energieträgern zu gewährleisten. Hierbei sind nicht nur die Verfügbarkeit der Energieträger selbst, sondern auch die gesamte Lieferkette und die logistische Infrastruktur zu berücksichtigen.

Insgesamt stellt die Skalierbarkeit strombasierter Energieträger eine komplexe Herausforderung dar. Die Produktion erfordert erhebliche Energieinvestitionen und ist stark von der Verfügbarkeit erneuerbarer Energiequellen abhängig. Die Energieeffizienz der Herstellung ist ein weiterer kritischer Faktor, der die Gesamteffizienz des Energiesystems beeinflusst. Trotz dieser Herausforderungen sind strombasierte Energieträger nach wie vor vielversprechende Alternativen zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors und anderer energieintensiver Industriezweige, vorausgesetzt, die technologischen und infrastrukturellen Hürden können erfolgreich bewältigt werden.



Hinweis: Aufgrund einer Vielzahl unterschiedlicher Produktions- u. Prozesspfade können Abweichungen zu getroffenen Annahmen entstehen.

Abbildung 9: Darstellung des Energieeffizienzvergleichs zwischen unterschiedlichen Antriebstechnologien²²

3.3 Verfügbarkeit und Systemansprüche

Die Umstellung auf alternative Technologien im Verkehrssektor als Teil der Energie- und Antriebswende ist zweifellos eine immense Herausforderung, die weit über die technischen Aspekte hinausgeht. Sie erfordert die Anpassung von etablierten Prozessen, die über Jahrzehnte hinweg auf fossile Energieträger ausgerichtet waren. Diese Transition beinhaltet nicht nur die Umstellung der bestehenden Fahrzeugflotten auf Modelle mit alternativen Antriebstechnologien, sondern auch den Hochlauf der Produktion von alternativen Energieträgern, den Ausbau der notwendigen Infrastruktur und die Neugestaltung der gesamten Lieferketten.

Eine der zentralen Herausforderungen besteht darin, die Abhängigkeit von fossilen Ressourcen zu minimieren. Dies bezieht sich nicht nur auf den traditionellen Dieselmotorkraftstoff, der fälschlicherweise oft als saubere Alternative betrachtet wird. Der Ausbau erneuerbarer, emissionsfreier Energiequellen wird daher zu einem entscheidenden Faktor. Diese Maßnahme ist nicht nur im Verkehrssektor, sondern auch in anderen energieintensiven Bereichen wie der Industrie, im Wärme- und Gebäudesektor von zentraler Bedeutung. Ein sektorenübergreifender Ansatz wird immer wichtiger, da die Sektoren stärker miteinander verschmelzen, wenn es um die Nutzung erneuerbarer Energien geht.

²² Eigene Darstellung, auf Basis AGORA Verkehrswende (2023); T&E (2022), VDI (2022), KCW (2021), AGORA Energiewende (2018).

Lieferzeiten sowohl der Fahrzeuge als auch der Infrastruktur müssen bei der Umstellung auf alternative Antriebe einkalkuliert werden. Diese ist abhängig vom Lieferanten und liegt je nach Bestellung zwischen 9 und 14 Monaten. Signifikant unplanmäßig abweichende Lieferzeiten und/oder -engpässen von Bussen mit alternativen Antrieben sind im Vergleich zu noch vor 3 bis 4 Jahren derzeit nicht bekannt. Die Streckung der Lieferpläne über Monate gerade von Großbestellungen dient eher entsprechenden Rabatten durch eine Auslastungsglättung beim Herstellen. Zudem präferieren die Unternehmen eine schrittweise Lieferung von Fahrzeug, um diese nahtlos im Betrieb zu integrieren. Daher kommt es regelmäßig zu Lieferplänen von bis zu 2 Jahren. Es ist jedoch anzumerken, dass im Bereich der Busproduktion keine Lagerproduktion mehr üblich ist, um hohe Kapitalbindung zu vermeiden. Dies gilt sowohl für elektrische als auch für Dieselbusse, was zu den seit langem üblichen Mindestlieferzeiten von etwa 6 Monaten führt.²³

Der Aufbau von flächendeckenden Lade- und Tankinfrastruktur ist ein entscheidender Schritt für den erfolgreichen Übergang mit alternativen Antrieben im öffentlichen straßengebundenen Personennahverkehr. Dies erfordert erhebliche Investitionen in die Infrastruktur, um Ladestationen für batterieelektrische Fahrzeuge und Tankstellen für Wasserstofffahrzeuge flächendeckend verfügbar zu machen. Dies ist sowohl ein zeitlicher als auch ein ökonomischer Faktor, der berücksichtigt werden muss. Die operativen Prozesse im ÖSPV müssen an die zeitintensiveren Lade- und Tankvorgänge angepasst werden.

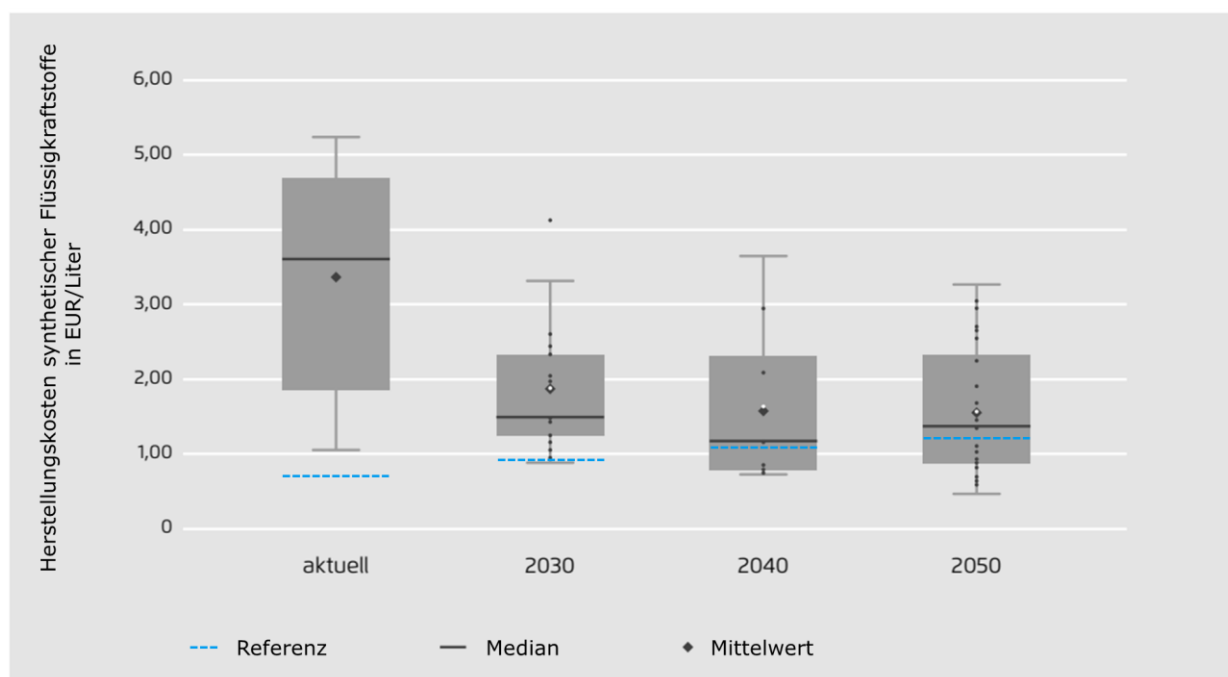


Abbildung 10: Prognostizierte Kostenbandbreite synthetischer Flüssigkraftstoffe im Vergleich zur Referenz (Diesel) und dessen Prognose bis 2050 ²⁴

Die Verfügbarkeit von alternativen Kraftstoffen wie biogenen oder synthetischen Kraftstoffen hängt ebenfalls stark vom Hochlauf der entsprechenden Produktionskapazitäten ab. Obwohl diese Kraftstoffe das Potenzial haben, die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu verringern, sind sie derzeit noch nicht in ausreichender Menge verfügbar, um den Bedarf des Verkehrssektors flächendeckend und wirtschaftlich zu decken.

²³ VDV (2023)

²⁴ Abbildung: AGORA Verkehrswende (2023), AGORA (2018)

Biokraftstoffe und Biomethan werden folglich zwar auch künftig eine Rolle im Kraftstoffbereich spielen können, sie werden jedoch nicht annähernd den Gesamtbedarf im Straßenverkehr decken können, zumal ein Großteil im Schiffs- und Flugverkehr benötigt werden könnte.²⁵ Die Skalierbarkeit von biogenen Kraftstoffen und Biogas ist aufgrund der limitierten Mengenpotenziale begrenzt und kann allenfalls 10 % des Verkehrs defossilisieren.²⁶ Für eine umfassende Dekarbonisierung ist der Einsatz erneuerbaren Stroms für den Straßengüterverkehr daher zentral. Produktionsanlagen für synthetische Kraftstoffe mit den dazugehörigen großen Mengen an Erzeugungsanlagen für erneuerbaren Strom müssen erst errichtet werden²⁷, bevor diese einen Beitrag leisten können. Prognosen gehen davon aus, dass strombasierte Kraftstoffe vor 2030 nicht in nennenswerten Mengen verfügbar sein werden.²⁸

Der Weg zur Marktreife mit ausreichender Verfügbarkeit und Wettbewerbsfähigkeit ist noch weit. Die Herausforderung der Wettbewerbsfähigkeit rein aus ökonomischer Perspektive zeigt sich u.a. für synthetische Kraftstoffe an Abbildung 10 oder für biogene Kraftstoffe (wie bspw. HVO 100²⁹) an Abbildung 22 in Abschnitt 5.3.

Auf Seiten der Länder und Kommunen sowie der Verkehrsbetriebe und Technologieanbieter erfordert die Unterstützung der Verkehrswende im öffentlichen Straßenpersonenverkehr beträchtliche Anstrengungen, die parallel zu den technologischen Entwicklungen erfolgen müssen. Dies beinhaltet die Gewährleistung von Sicherheit und Zertifizierung neuer Technologien, um Unfälle zu verhindern und das Vertrauen der Öffentlichkeit zu stärken. Ebenso wichtig ist die Umsetzung umweltfreundlicher Methoden zur Entsorgung und zum Recycling von Batterien und anderen Fahrzeugkomponenten, um Umweltauswirkungen zu minimieren. Auf betrieblicher Ebene ist die Integration und Interoperabilität verschiedener Verkehrsträger von entscheidender Bedeutung, um ein effizientes Verkehrssystem zu gewährleisten.

Schließlich spielt die Akzeptanz der Verkehrsbetriebe und die Begeisterung der Kunden bzw. der Bevölkerung für alternative Antriebe eine herausragende Rolle, was gezielte Aufklärung und Kundenbindung erfordert. Dieser Übergang erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen den zuständigen Ministerien auf Landesebene, den Landkreisen, Kommunen und den örtlichen Verkehrsbetrieben. Es ist von wesentlicher Bedeutung, dass klare Zielsetzungen sowohl auf Bundesebene als auch auf lokaler Ebene transparent kommuniziert und miteinander abgestimmt werden.

Die Herausforderungen im Zusammenhang mit der Energie- und Kraftstoffverfügbarkeit sowie der Systemintegration im Verkehrssektor sind vielschichtig und erfordern eine umfassende Strategie. Die Energiewende im Verkehr erfordert nicht nur technologische Innovationen, sondern auch politische Maßnahmen, Investitionen und die Zusammenarbeit verschiedener Akteure, um die Transition zu nachhaltigen und emissionsfreien Antrieben erfolgreich zu gestalten. Es ist eine langfristige Transformation des Verkehrssektors, die entschlossenes Handeln erfordert, um die Ziele der Energiewende zu erreichen.

3.4 Entscheidung für Fokus auf batterieelektrische Fahrzeuge

In der Vergleichsstudie zu erneuerbaren Antrieben für den Busverkehr im Oberallgäu wurden batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) gegenüber brennstoffzellenelektrischen Fahrzeugen (FCEV) als bevorzugte Option identifiziert. Dies basiert auf technischen, ökonomischen und energetischen Vorteilen, die BEV bieten. BEV sind technologisch ausgereift und profitieren von einer bereits entwickelten und etablierten Strominfrastruktur. Die höhere Energieeffizienz und die geringeren Betriebskosten, insbesondere durch

²⁵ „Darüber hinaus ist das Mengenpotenzial von Biomasse aus Abfällen und Reststoffen, bei denen die Flächenkonkurrenzen nicht auftreten, viel zu gering, um in ausreichender Menge Kraftstoff für den Verkehr liefern zu können.“ AGORA Verkehrswende (2023)

²⁶ Ifeu (2021)

²⁷ „Es gibt allerdings bisher keine Produktionsanlagen für E-Diesel im industriellen Maßstab.“ BMDV (2024)

²⁸ BMUV (2023)

²⁹ „Hydrierte biogene Öle (HVO), wenn sie aus biogenen Ölen oder Fetten gewonnen werden, die selbst Biomasse im Sinne der Biomasseverordnung sind, und wenn die Hydrierung nicht in einem raffinerietechnischen Verfahren gemeinsam mit mineralölstämmigen Ölen erfolgt ist. Hydrierte biogene Öle sind unter diesen Voraussetzungen in vollem Umfang als Biokraftstoff zu behandeln. [...]“ und „Fettsäuremethylester (FAME, Biodiesel), wenn sie aus biogenen Ölen oder Fetten gewonnen werden, die selbst Biomasse im Sinne der Biomasseverordnung sind, und wenn ihre Eigenschaften mindestens den Anforderungen für Biodiesel nach § 5 der 10. Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV) entsprechen. [...]“ Zoll (2024)

die Nutzung kostengünstiger Elektrizität, machen sie attraktiv für den Einsatz im Oberallgäu. Zudem können BEV eine verbesserte Umweltbilanz aufweisen, insbesondere wenn sie mit Strom aus erneuerbarer Energie betrieben werden.

Darüber hinaus lassen sich BEV mit unterschiedlichen Ladekonzepten betreiben, was sie ideal für den dicht getakteten ÖSPV macht. Obwohl theoretisch Wasserstoff aufgrund seiner Reichweite bei bestimmten Routen-Konzessionen im Oberallgäu attraktiv sein könnte, ist die derzeitige Verfügbarkeit und Preiselastizität von lokal produziertem grünem Wasserstoff begrenzt. Darüber hinaus ist bislang auf keine vorhandene oder geplante Wasserstofftankinfrastruktur zurückzugreifen. Ein Gesamtsystem zur Anwendung von Wasserstoff ist außerdem wesentlich komplexer als die Versorgung mit Strom, bei der es nach Aussagen des lokalen Stromnetzbetreibers keine signifikanten Hürden geben sollte. Daher wird die Umstellung auf BEV bevorzugt betrachtet.

Die Implementierung von BEV wird zusätzlich durch das breitere Fahrzeugangebot und die höhere Marktverfügbarkeit von Technologiepartnern erleichtert. Somit stellen batterieelektrische Fahrzeuge die praktikablere Antriebsalternative für den Busverkehr im Landkreis Oberallgäu dar und wird im Folgenden fokussiert weiter betrachtet.

4. Energetische Analyse des ÖSPV

Die örtlichen topographischen und klimatischen Bedingungen im Oberallgäu prägen maßgeblich die Eignung von alternativen Antrieben im ÖSPV. Die individuelle Bewertung der Eignung von alternativen Antriebstechnologien erfordert eine spezifische Analyse der Linienumläufe. Umlauflängen, Taktzeiten und die teilweise stark bewegte Topografie spielen dabei eine entscheidende Rolle. Nur so kann die Eignung für entsprechende Antriebstechnologien mit Blick auf potenzielle Herausforderungen evaluiert werden und potenzielle Anpassungsbedarfe des Betriebs-konzeptes identifiziert werden. Ziel sollte es sein, dass geplante Angebotskonzept zu ermöglichen und lediglich punktuell und gut begründete Anpassungen vorzunehmen.

Die geographische und topographische Anordnung der Haltestellen im Liniennetz ist von großer Bedeutung, um genaue Energiebedarfe zu ermitteln. Stand- und Pausenzeiten bieten Potenziale für die Energiebereitstellung, insbesondere in einem Ladekonzept mit Gelegenheitsladern für batterieelektrische Fahrzeuge.

Im Gegensatz zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ist bei Elektrofahrzeugen die Berücksichtigung von Energiemehrbedarf aufgrund lokaler Witterungsverhältnisse entscheidend. An kalten Tagen kann dieser Mehrbedarf je nach Außentemperatur und Fahrzeuggröße zwischen 20-66 % im Vergleich zum Jahresdurchschnitt liegen.³⁰

Zum anderen erfolgt im nachfolgenden Kapitel 5 eine eingehende Analyse der Total Cost of Ownership um die ökonomischen Herausforderungen und Auswirkungen, sowie Entwicklungen, bezüglich einer Umstellung auf alternative Antriebe im Vergleich zum Status Quo zu erörtern. Diese beiden Aspekte sind von grundlegender Bedeutung, um die Herausforderungen und Chancen der Antriebswende im ÖSPV umfassend zu verstehen.

4.1 Allgemeine Betrachtung von Fahrzeugherstellern und -modellen

In der folgenden Tabelle 1 zeigt sich eine Übersicht der Neuzulassungen von Kraftomnibussen nach Fahrzeugherstellern in Deutschland von 2018 bis 2022 in absoluten Fahrzeugzahlen sowie dem relativen Anteil je Hersteller. Eine genaue Datenlage zur Anzahl der Fahrzeuge je Antriebsart und Hersteller ist nur begrenzt verfügbar.

Tabelle 1: Neuzulassungen von Kraftomnibussen und Kraftfahrzeuganhängern nach Herstellern ³¹

Hersteller	2018	2019	2020	2021	2022	Relativ ges. 2018-2022
Daimler ³²	3.226	3.372	3.168	3.084	2.527	50 %
IVECO	674	628	529	693	434	10 %
MAN	1.450	1.390	1.676	1.624	1.200	24 %
SCANIA	216	77	57	134	94	2 %
SOLARIS	153	291	330	155	147	3 %
Gesamt	6.687	6.437	6.460	6.474	4.883	30.941

³⁰ NOW (2021)

³¹ KBA (2023)

³² inkl. EvoBus GmbH (seit 07/2023 teil von Daimler Buses GmbH)

Einen Einblick in spezifischere Neuzulassungsdaten von Bussen bietet der KBA Monatsreport³³ anhand der Top Modelle in Deutschland für den Zeitraum der vergangenen 12 Monate. Die Abbildung 11 zeigt einen Überblick der Modelle inkl. Hersteller und der entsprechenden Antriebstechnologie.

Die Entwicklung der Neuzulassungen von Kraftomnibussen in Deutschland verzeichnet einen auffälligen Rückgang von ca. 24 % in 2022 im Vergleich zum Vorjahr. Der Rückgang fiel insbesondere im Segment der Reisebusse stark aus, wo sich der Markt nahezu halbierte.³⁴ Einzelne Belebungen im Fernverkehr konnten den Trend nicht umkehren und insbesondere kleinere Betriebe sahen sich zur Aufgabe gezwungen. Hintergrund ist eine veränderte Mobilitätskultur, in der sich ein zunehmender Anteil älterer Menschen alternativen Reiseformen, wie dem Automobil oder Flugverkehr, zuwendet. Im ÖSPV zeigte sich indessen nur eine leichte Delle, die u.a. auf die anhaltende Verunsicherung durch Corona (-Maßnahmen) und die Sprunghaftigkeit von Landesförderprogrammen zurückzuführen ist. Letzteres betrifft insbesondere das Angebot von Bundesländern wie Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Nordrhein-Westfalen und Baden-Württemberg. Wobei Sachsens Ankündigung, künftig nur noch emissionsfreie Fahrzeuge zu fördern, hierbei kein Einzelfall darstellt. Klare Vorgaben und langfristig orientierte Planbarkeit sollten dem entgegenwirken.

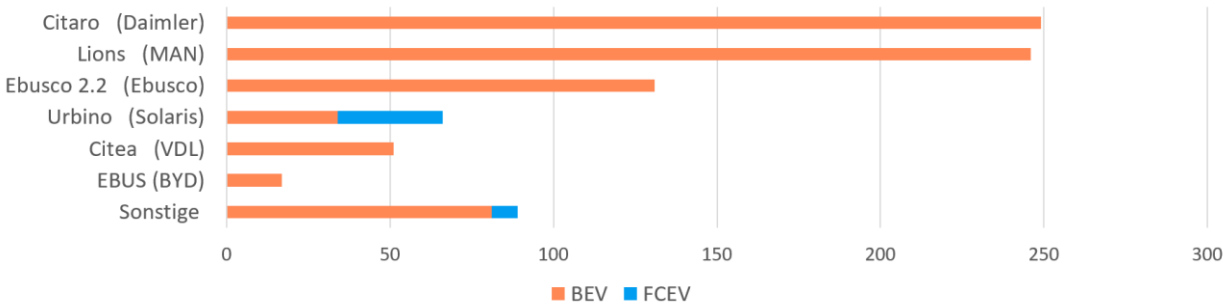


Abbildung 11: Busneuzulassungen der Top Modelle in Deutschland für den Zeitraum der vergangenen 12 Monate ³⁵

Die folgende Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Fahrzeugdaten der unterschiedlichen Top-Modelle entsprechend der Herstellerangaben. Sie zeigt nicht nur die grundlegenden technischen Spezifikationen wie Größe, Motor, Batteriekapazität und Energieverbrauch, sondern gibt auch Auskunft darüber, ob es zu den jeweiligen Modellen auch Varianten als Gelenkbus oder mit brennstoffzellenelektrischem Antrieb gibt.

³³ NOW (2023)
³⁴ Busplaner (2023) und Statistisches Bundesamt (2023)
³⁵ Eigene Darstellung, in Anlehnung an NOW (2023). Zeitraum von Oktober 2022 bis September 2023.

Tabelle 2 Übersicht der Fahrzeugdaten der Top-Modelle (Herstellerangaben ³⁶, Solobus, 12 m, in Klammern: Angaben zur Gelenkbusvariante, 18 m)

Modell	eCitaro	Lions	Ebusco 2.2	Urbino	Citea	EBUS
Hersteller	Daimler	MAN	Ebusco0	Solaris	VDL	BYD
Weitere Modelloptionen	GB	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
	FCEV	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein
Leergewicht in kg			12.850			
Höhe in m	3,40	3,32	3,25	3,30	3,19	3,30
Motor	ZF Radnabenmotor	Elektro-Zentralmotor	ZF Radnabenmotor	Asynchronmotor	ZF Elektro-Zentralmotor	Radnabenmotor
Batteriekapazität in kWh	198-441	320-480 (640)	350-500		Bis 490 (674)	348-422 (563)
Verbrauch in kWh/km	0,6-1,4	0,9-1,4	0,7-0,8			0,9-1,1

GB: Gelenkbus; ZF: Zahnradfabrik Friedrichshafen AG

4.2 Reichweitenanforderungen

Die Reichweite ist einer der relevantesten und oft diskutierten Aspekte von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben, insbesondere bei batterieelektrischen Fahrzeugen. Im Busverkehr spielen hierbei neben den technischen Parametern des Fahrzeugs (Batteriekapazität und Verbrauch) vor allem zwei Dinge eine entscheidende Rolle: die Fahrzeugeinsatzplanung im täglichen Linienbetrieb, sowie das Ladekonzept (siehe auch Kapitel 7).

Eine vereinfachte Überschlagsrechnung zur Betrachtung der Fahrleistungsanforderungen eines Betriebstages ist in Tabelle 3 zu sehen: links die Tagesfahrleistung, rechts der resultierende Energiebedarf. Für die Überschlagsrechnung werden folgende Annahmen angesetzt:

- Durchschnittsgeschwindigkeit: 30 km/h
- Durchschnittsverbrauch: 1,24 kWh/km (inkl. Klimaanlage)

Die Rechnung zeigt, dass die Reichweiten- und somit Batteriekapazitätsanforderungen maßgeblich von den Fahrzeugbetriebsstunden und dem Fahrplan (und daraus resultierenden Standzeiten) abhängen. Beides ist individuell je Linie und Fahrzeug zu betrachten und ist auf den Fahrplanumfang, die Anzahl der einzusetzenden Fahrzeuge und die Fahrzeugeinsatzplanung zurückzuführen. Die hier aufgezeigten Standzeiten bieten darüber hinaus Potenzial für Gelegenheitsladezeiten und -standorte. Das Zwischenladen ist in der Überschlagsrechnung nicht berücksichtigt.

³⁶ siehe Daimler (2024), MAN (2024), Ebusco (2024), Solaris (2024), VDL (2024) und BYD (2024)

Tabelle 3 Übersichtsrechnung zur Betrachtung der Fahrleistungsanforderungen eines Betriebstages

Tagesfahrleistung für ein Fahrzeug in km/Tag					Energiebedarf für ein Fahrzeug in kWh/Tag						
		Standzeit in min/h						Standzeit in min/h			
		5	10	15	20			5	10	15	20
Paare bzw. Betriebsstunden	13	357,50	325,00	292,50	260,00	13	444,45	404,05	363,64	323,24	
	14	385,00	350,00	315,00	280,00	14	478,64	435,13	391,61	348,10	
	15	412,50	375,00	337,50	300,00	15	512,83	466,21	419,59	372,97	
	16	440,00	400,00	360,00	320,00	16	547,02	497,29	447,56	397,83	
	17	467,50	425,00	382,50	340,00	17	581,21	528,37	475,53	422,69	
	18	495,00	450,00	405,00	360,00	18	615,39	559,45	503,50	447,56	
	19	522,50	475,00	427,50	380,00	19	649,58	590,53	531,48	472,42	

Im Rahmen der Programmbegleitforschung "Innovative Antriebe im straßengebundenen ÖPNV" der NOW³⁷ wurden zum einen reale tägliche Laufleistungen von batterieelektrischen Bussen (Abbildung 12 und zum anderen bestehende Reichweitenanforderungen für Elektrobusse (Abbildung 13) abgefragt und aufgezeigt. Bei der Auswertung der Betriebsdaten der Batteriebusse wird zwischen Depot- und Gelegenheitsladern unterschieden, welche zudem nochmals in Midi-, Solo- und Gelenkbussen aufgeteilt sind. Bei der Depotladung werden die Busse auf dem Betriebshof geladen, wohingegen die Busse bei der Gelegenheitsladung auf der Strecke nachgeladen werden. Bei der Gelegenheitsladung werden die Busse in der Regel ebenfalls über Nacht im Depot vollständig geladen.

Abbildung 12 zeigt die durchschnittliche tägliche Fahrleistung der Batteriebusse. Die erhobenen Daten beziehen sich dabei maximal auf den gesamten Zeitraum der Begleitforschung von Februar 2019 bis April 2021. Bei den Depotladern betrug die mittlere tägliche Laufleistung rund 133 km. Dieser Durchschnittswert setzt sich aus Betriebsdaten von bis zu 103 Solobussen mit einer durchschnittlichen Laufleistung von 133 km und bis zu 5 Gelenkbussen mit einer durchschnittlichen Laufleistung von 110 km zusammen. Die Gelegenheitslader erreichten eine durchschnittliche tägliche Laufleistung von 131 km, welche sich dabei aus den Laufleistungen von Midi-, Solo- und Gelenkbussen zusammensetzt. Auch hier gibt es Unterschiede hinsichtlich der Anzahl der Busse sowie den Zeiträumen, für welche Daten vorliegen. Bemerkenswert sind die hohen Laufleistungen der Solobusse, die im Durchschnitt 179 km erreichten.

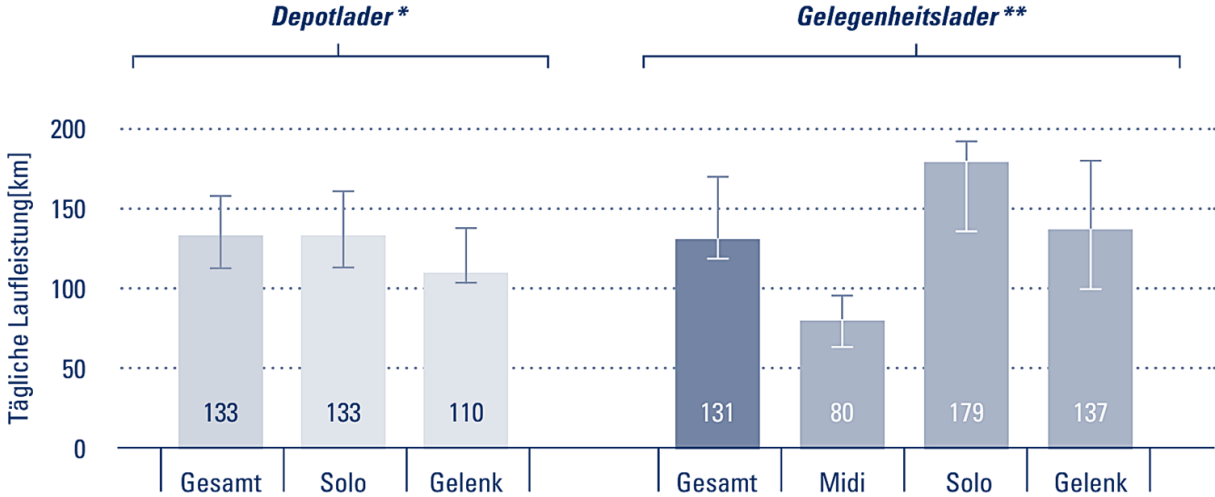


Abbildung 12 Mittlere tägliche Laufleistung der Batteriebusse je Bus ³⁸

³⁷ NOW (2021)
³⁸ NOW (2021). *Anzahl Depotlader: Solobusse (bis 103 Busse, 11 VU), Gelenkbusse (bis 5 Busse, 2 VU); ** Anzahl Gelegenheitslader: Midi- (4 Busse, 1 VU), Solobusse (bis 8 Busse, 3 VU), Gelenkbusse (1 Bus, 1 VU)

Vergleicht man die bisher erzielten Tagesfahrleistungen mit den Reichweitenanforderungen der Verkehrsunternehmen, zeigt sich, dass dies derzeit eine der zentralen Herausforderungen für den Einsatz von Batteriebussen ist. Wie in Abbildung 13 ersichtlich ist, benötigt mit 77% die überwiegende Mehrheit der betrachteten 31 Verkehrsunternehmen eine tägliche Reichweite von mindestens 200 km. Der Großteil (58%) fordert eine Reichweite von 200 bis 350 km pro Tag und rund ein Fünftel (20%) sieht eine tägliche Reichweite von mehr als 350 km als erforderlich an.

N = 31 VU

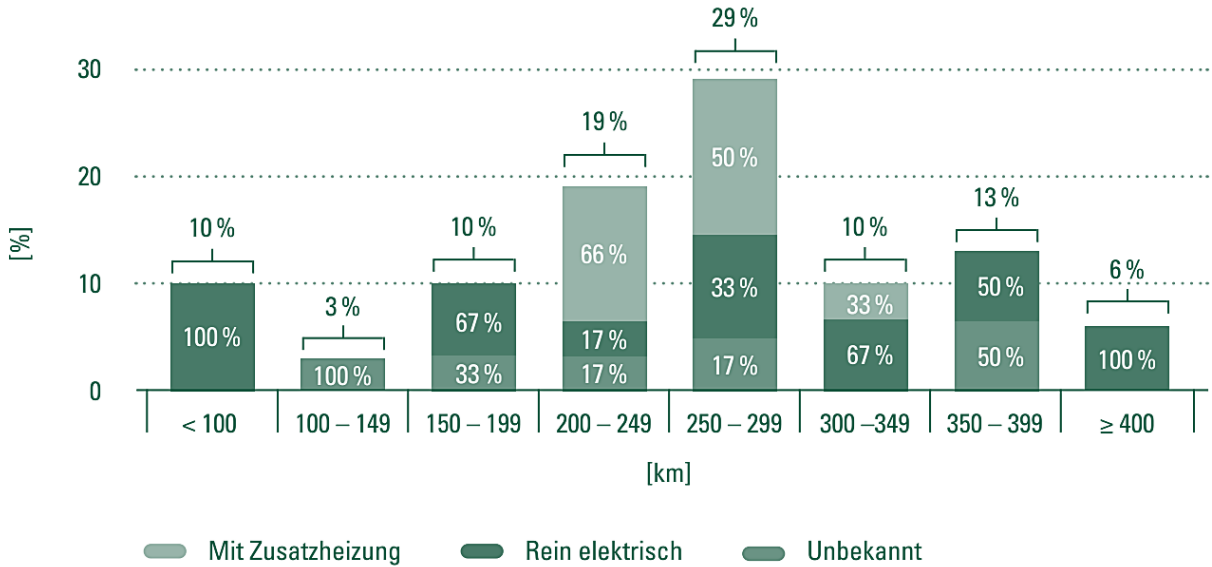


Abbildung 13 Reichweitenanforderungen für Batteriebusse ³⁹

4.3 Lokale Analyse und Auswertung

Die Analyse der Energiebedarfsbetrachtung folgt einem strukturierten Vorgehen, das verschiedene Inhalte und Arbeitsschritte umfasst. Eine Übersicht des Gesamtablaufs ist in Abbildung 14 dargestellt.

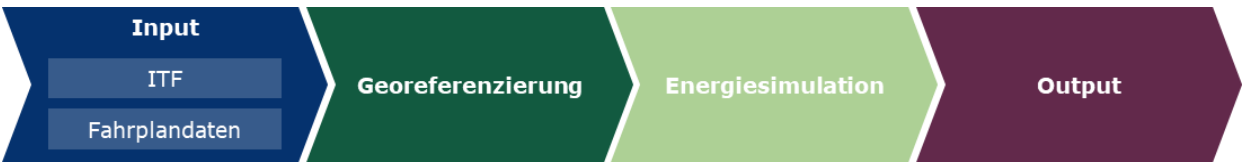


Abbildung 14 Schematischer Darstellung des Simulationsablaufes

Grundlage der Simulation bilden die Fahrplandaten und das Angebotskonzept gemäß des integralen Taktfahrplans (ITF) des Öffentlichen Personennahverkehrs (ÖSPV) im Landkreis Oberallgäu (Abschnitt 2.1). Dieser ITF wurde im Rahmen der Studie „Strategische Umsetzung einer ÖPNV-Angebotskonzeption im Landkreis Oberallgäu“ aus dem Jahr 2023 entwickelt. Der Gesamtumfang des Liniennetzes ist in Abbildung 15 aufgezeigt.

³⁹ NOW (2021)

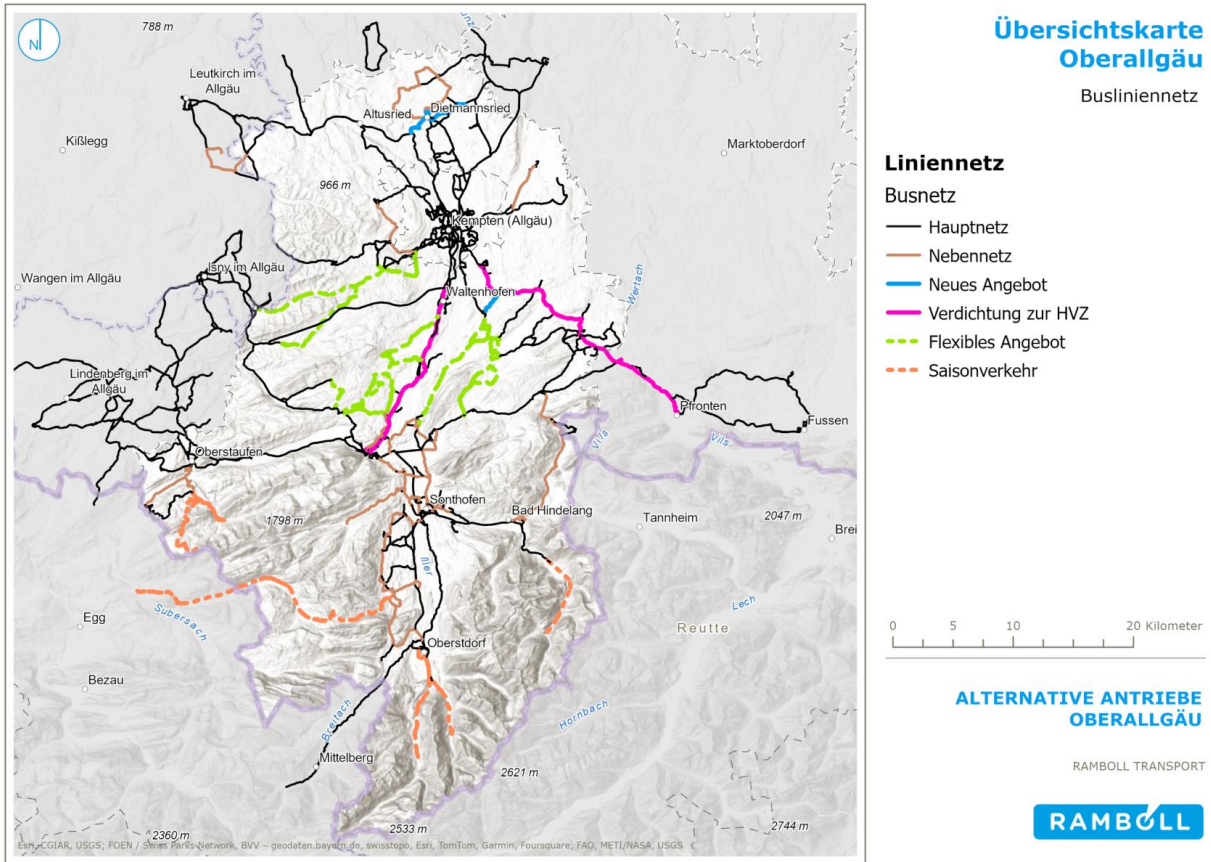


Abbildung 15 ÖSPV-Liniennetz im Landkreis Oberallgäu

Auf dieser Grundlage wird ein georeferenziertes und topographisches Profil der einzelnen Linien und Fahrtrichtungen erstellt. Diese Profile werden mit Betriebs- und Umweltdaten verknüpft, wobei relevante Parameter der Simulation in Tabelle 4 aufgeführt sind. Anhand dieser detaillierten Informationen der einzelnen Linien wird anschließend der Antriebsenergiebedarf für die einzelnen Linien und deren Streckenabschnitte ermittelt. Dabei wird der Energiebedarf in kinetische und potenzielle Energie sowie Luft- und Rollwiderstand unterteilt.

Tabelle 4 Relevante Parameter und Annahmen der Energieverbrauchssimulation

Parameter	Annahmen
Fahrzeugtyp	Solobus, 12 m
Gewicht	Leergewicht: 15 t, Gesamtgewicht: 18 t
Energiebestandteile	Antriebsenergie, Klimaanlage, Leerfahrten (20 km/Tag)
Rekuperationsfaktor	0,8
Leistung Klimaanlage	15 kW
Windgeschwindigkeit	0 km/h
Wendezeit / Puffer	10 min je Fahrtenpaar

Ergänzend zur Antriebsenergie wird der mögliche Energiebedarf der Heiz- und Kühlleistung (Klimaanlage) ermittelt. Im Rahmen der Simulation wird der maximale Energiebedarf bestimmt, um einen täglichen Betrieb unabhängig von den Bedingungen zu gewährleisten. Entsprechend wird auch ein maximaler Verbrauch der Klimaanlage angenommen.

Des Weiteren wird über die Fahrdistanz je Linie ermittelt, wobei jede Linie paarweise in sogenannten Fahrtenpaaren (kurz: Paare) betrachtet wird. Ein Fahrtenpaar besteht aus zwei Fahrten, jeweils der Hin- und der Rückfahrt derselben Linie, und bildet somit das topographische Gesamtprofil einer Linie ab. Aus der Streckenbetrachtung ergibt sich außerdem eine Fahrzeit pro Richtung und Fahrtenpaar.

Die Ergebnisse der Simulation umfassen die Fahrdistanzen je Linie und Richtung, die Fahrzeit je Fahrtenpaar der einzelnen Linien sowie die Anzahl mindestens benötigter Fahrzeuge je Linie⁴⁰ für einen zeitlich und betrieblich machbaren Betrieb. Zudem werden die Energiebedarfe je Linie und Richtung der jeweiligen Gesamtdistanz sowie pro Kilometer ermittelt.

Für die Neukonzeption und somit Simulation der Linienbündel wird als Zielwert von folgenden Leistungen ausgegangen: Montag bis Freitag (ohne Schulverkehr) 19 Paare, Montag bis Freitag (mit Schulverkehr) 23 Paare, Samstag 18 Paare und Sonn- und Feiertage 17 Paare je Linie. Da der Schulverkehr den Einsatz weiterer Fahrzeuge bedingt, ist die Betrachtung der 23 Paare nicht mit den anderen Fahrtenpaaren vergleichbar. In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Analyse detailliert dargestellt und ausgewertet.

Tagesfahrleistungen je Linie

Im Folgenden werden die simulierten Tagesfahrleistungen in Tabelle 5 dargestellt und bietet eine umfassende Übersicht über die Fahrdistanzen je Linie und Richtung sowie im weiteren Schritt die Betrachtung je Fahrtenpaar, was die Zusammenfassung der Hin- und Rückrichtung beinhaltet. Darüber hinaus führt sie die kalkulierte (Mindest-) Anzahl an benötigten Fahrzeugen je Linie auf, was in der rechten Spalte ersichtlich ist.

In der paarweisen Betrachtung wird einerseits die Gesamttagesfahrleistung je Linie in Abhängigkeit von 17, 18 oder 19 Paaren pro Tag aufgezeigt. Andererseits wird die maximale errechnete Tagesfahrleistung je Fahrzeug je Linie entlang der möglichen Fahrtenpaare pro Tag dargestellt. Dabei sind die Tagesfahrleistungen, die über 300 km, 400 km und 500 km liegen, unterschiedlich hervorgehoben.

Die Analyse zeigt, dass von den insgesamt 27 Linien bis zu 17 Linien eine Tagesfahrleistung eines Fahrzeugs von über 400 km/Tag aufweisen, während bis zu 6 Linien sogar über 500 km/Tag liegen.

⁴⁰ Die Mindestfahrzeuganzahl wurde im Zuge der Simulation kalkuliert und basiert auf der individuellen zeitlichen Betrachtung jeder Linie.

Die maximale Tagesfahrleistung einer Linie liegt bei 19 Paaren bei insgesamt 2167,9 km/Tag und für ein Fahrzeug bei 570,5 km/Tag.

Tabelle 5 Übersicht der Distanzen und Tagesfahrleistungen je Linie und Richtung ⁴¹

Linien Nr.	Richtung	je Richtung		Paarweise						Anzahl Fahrzeuge / Linie	
		Distanz in km	Distanz in km	Tagesfahrleistung je Linie in km/Tag			Tagesfahrleistung je Fahrzeug in km/Tag				
				17	18	19	17	18	19		
69*	1	7,7									
69*	2	7,7	15,5	263,3	278,8	294,3	263,3	278,8	294,3	1	
11	1	25,0									
11	2	24,2	49,2	835,9	885,0	934,2	442,5	442,5	491,7	2	
45/49/50	1	39,4									
45/49/50	2	39,8	79,2	1.346,3	1.425,5	1.504,7	475,2	475,2	554,4	3	
48	1	47,0									
48	2	47,2	94,2	1.601,5	1.695,7	1.790,0	471,0	471,0	471,0	4	
67	1	14,7									
67	2	14,4	29,1	494,7	523,8	552,9	261,9	261,9	291,0	2	
82	1	20,2									
82	2	20,2	40,4	686,7	727,1	767,5	363,5	363,5	403,9	2	
95	1	13,2									
95	2	13,3	26,5	450,7	477,2	503,7	238,6	238,6	265,1	2	
20a	1	7,6									
20a	2	7,6	15,2	258,6	273,8	289,0	258,6	273,8	289,0	1	
20b	1	15,4									
20b	2	15,7	31,0	527,7	558,8	589,8	279,4	279,4	310,4	2	
40	1	24,5									
40	2	25,1	49,6	843,7	893,3	942,9	446,7	446,7	496,3	2	
39	1	24,4									
39	2	18,9	43,4	737,1	780,5	823,8	390,2	390,2	433,6	2	
50	1	39,2									
50	2	39,4	78,6	1.336,3	1.414,9	1.493,5	471,6	471,6	550,2	3	
61	1	19,8									
61	2	31,4	51,2	870,2	921,3	972,5	460,7	460,7	511,9	2	
62	1	31,8									
62	2	32,1	63,9	1.085,9	1.149,8	1.213,6	383,3	383,3	447,1	3	
66	1	33,3									
66	2	33,6	66,9	1.137,3	1.204,2	1.271,1	401,4	401,4	468,3	3	
1	1	19,6									
1	2	19,5	39,2	665,6	704,8	743,9	352,4	352,4	391,5	2	
35	1	5,7									
35	2	5,3	11,1	188,2	199,2	210,3	188,2	199,2	210,3	1	
44/47	1	30,2									
44/47	2	29,0	59,2	1.007,2	1.066,4	1.125,7	355,5	355,5	414,7	3	
46	1	39,1									
46	2	37,6	76,7	1.304,1	1.380,8	1.457,5	460,3	460,3	537,0	3	
7	1	11,2									
7	2	11,2	22,4	381,1	403,5	425,9	381,1	403,5	425,9	1	
71	1	34,2									
71	2	35,4	69,6	1.183,4	1.253,0	1.322,6	417,7	417,7	487,3	3	
8	1	9,7									
8	2	9,7	19,4	329,6	349,0	368,3	329,6	349,0	368,3	1	
81	1	25,7									
81	2	25,6	51,4	873,5	924,8	976,2	462,4	462,4	513,8	2	
83	1	12,8									
83	2	13,4	26,3	446,7	472,9	499,2	236,5	236,5	262,7	2	
84	1	11,8									
84	2	12,1	23,9	406,4	430,3	454,2	406,4	430,3	454,2	1	
9	1	5,9									
9	2	5,9	11,7	199,0	210,7	222,4	199,0	210,7	222,4	1	
120	1	57,1									
120	2	57,0	114,1	1.939,7	2.053,8	2.167,9	570,5	570,5	570,5	4	
Summe		1.258,8	1.258,8	21.400,1	22.658,9	23.917,7	9.967,3	10.086,4	11.137,0	58,0	
Maximalwert		57,1	114,1	1.939,7	2.053,8	2.167,9	570,5	570,5	570,5	4,0	
Durchschnitt		23,3	46,6	792,6	839,2	885,8	369,2	373,6	412,5	2,1	

* Stand 05/2024 keine Bestandslinie
a/b: die Linie wurde für die Betrachtung in zwei Abschnitte unterteilt

Im Ergebnis der pauschalen Betrachtung der unterschiedlichen Fahrleistungen je Linie und Fahrzeug wird deutlich, dass einige Linien über signifikante Tageslaufleistungen je Fahrzeug verfügen. Es ist

⁴¹ Eigene Modellierungen und Berechnungen.

jedoch wichtig anzumerken, dass diese Betrachtung und die Annahme der Fahrzeug(mindest)anzahl je Linie einem pauschalen Kalkulationsschema folgen und keine detaillierte Fahrzeugeinsatzplanung zugrunde liegt.

Energiebedarfe je Linie

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Energiebedarfssimulation dargestellt. Jede Linie wird, wie zuvor beschrieben, als Fahrtenpaar betrachtet, was die Zusammenfassung der Hin- und Rückrichtung einschließt. Die Tabelle 7 gibt eine Übersicht über die Tageslaufleistung je Linie für ein Fahrzeug gemäß der zuvor beschriebenen Kalkulation, den Antriebsenergiebedarf je Linie für ein Fahrzeug und den Gesamtenergiebedarf (inklusive Klimaanlage) je Linie. Der durchschnittliche Energieverbrauch pro Kilometer über alle Linien ist der Tabelle 6 zu entnehmen.

Tabelle 6 Durchschnittlicher Energieverbrauch pro km über alle Linien und Richtungen im Landkreis Oberallgäu

	Antriebsenergie	Klimaanlage	Summe
Ø-Energieverbrauch in kWh/km	0,743	0,500	1,243

In der paarweisen Betrachtung wird je Linie in Abhängigkeit von 17, 18 oder 19 Paaren pro Tag angezeigt. Bei den Gesamtenergiebedarfen je Linie und Fahrzeug sind die Energiebedarfe, die über 400 kWh/Tag liegen (etc.), unterschiedlich hervorgehoben. Insgesamt liegen bis zu 20 Linien bei einem Tagesenergiebedarf eines Fahrzeugs bei über 400 kWh/Tag, und bis zu 7 Linien sogar bei über 600 kWh/Tag. Der maximale Antriebsenergiebedarf einer Linie liegt bei 19 Paaren bei 446,81 kWh/Tag und beim Gesamttagenergiebedarf für ein Fahrzeug bei 732,05 kWh/Tag.

4.4 Auswirkung und Empfehlungen

Im Ergebnis der Betrachtung der unterschiedlichen Fahrleistungen je Linie und Fahrzeug lässt sich erkennen, dass einige Linien über signifikante Tagesenergiebedarfe je Fahrzeug verfügen. Es ist jedoch wichtig anzumerken, dass dieser Betrachtung keine detaillierte Fahrzeugeinsatzplanung zugrunde liegt. Diese ist jedoch unumgänglich, um die Ergebnisse der Energiebedarfe je Fahrzeug und Linie zu berücksichtigen.

Unter Berücksichtigung der Batteriekapazitäten heutiger Fahrzeugmodelle, wie im Abschnitt 4.1 beschrieben, ist eine individuelle Fahrzeugeinsatzplanung essenziell. Es wird empfohlen, eine (teilweise linienindividuelle) Fahrzeugwahl unter Berücksichtigung der Batteriekapazität vorzunehmen und an den Linien mit einem Gesamtenergiebedarf von über 500 kWh/Tag die Optionen von möglichen Gelegenheitsladestandorten und -zeiten zu prüfen. Der größte Einfluss auf die energetisch-betriebliche Machbarkeit von batterieelektrischen Bussen auf den einzelnen Linien bleibt die Fahrzeugeinsatzplanung inklusive Fahr- und Standzeiten, die den Energieverbrauch und die Potenziale der Energieversorgung maßgeblich beeinflussen.

Tabelle 7 Energiebedarfe der einzelnen Linien und Richtungen

Paare/Tag Linien Nr.	Tageslaufleistung je Fahrzeug in km/Tag			Antriebsenergiebedarf je Fahrzeug in kWh/Tag			Energiebedarf inkl. Klimaanlage je Fahrzeug in kWh/Tag			Anzahl Fahrzeuge / Linie
	17	18	19	17	18	19	17	18	19	
69*	263,28	278,77	294,25	192,21	203,52	214,83	323,85	342,90	361,95	1
11	442,51	442,51	491,68	348,00	348,00	386,66	569,25	569,25	632,50	2
45/49/50	475,16	475,16	554,36	357,28	357,28	416,83	594,86	594,86	694,01	3
48	471,04	471,04	471,04	340,53	340,53	340,53	576,05	576,05	576,05	4
67	261,89	261,89	290,99	146,46	146,46	162,73	277,41	277,41	308,23	2
82	363,54	363,54	403,94	278,98	278,98	309,98	460,75	460,75	511,94	2
95	238,58	238,58	265,09	227,42	227,42	252,69	346,71	346,71	385,23	2
20a	258,56	273,77	288,98	185,66	196,58	207,50	314,94	333,46	351,99	1
20b	279,39	279,39	310,43	224,72	224,72	249,69	364,41	364,41	404,90	2
40	446,66	446,66	496,29	219,18	219,18	243,53	442,50	442,50	491,67	2
39	390,24	390,24	433,60	294,25	294,25	326,95	489,37	489,37	543,75	2
50	471,63	471,63	550,23	283,19	283,19	330,39	519,01	519,01	605,51	3
61	460,67	460,67	511,85	345,69	345,69	384,09	576,02	576,02	640,02	2
62	383,26	383,26	447,13	271,09	271,09	316,27	462,72	462,72	539,84	3
66	401,39	401,39	468,29	297,84	297,84	347,48	498,53	498,53	581,62	3
1	352,39	352,39	391,54	329,17	329,17	365,75	505,37	505,37	561,52	2
35	188,18	199,24	210,31	212,10	224,57	237,05	306,18	324,19	342,20	1
44/47	355,48	355,48	414,72	284,15	284,15	331,51	461,89	461,89	538,87	3
46	460,28	460,28	536,99	347,57	347,57	405,50	577,71	577,71	673,99	3
7	381,11	403,53	425,94	298,47	316,02	333,58	489,02	517,79	546,55	1
71	417,67	417,67	487,28	310,18	310,18	361,87	519,01	519,01	605,51	3
8	329,58	348,96	368,35	253,05	267,93	282,82	417,83	442,41	466,99	1
81	462,42	462,42	513,80	301,49	301,49	334,99	532,70	532,70	591,89	2
83	236,46	236,46	262,74	201,72	201,72	224,14	319,95	319,95	355,50	2
84	406,39	430,30	454,20	300,70	318,39	336,08	503,90	533,54	563,18	1
9	199,01	210,72	222,43	180,45	191,07	201,68	279,96	296,43	312,90	1
120	570,49	570,49	570,49	446,81	446,81	446,81	732,05	732,05	732,05	4
Summe				7.478,34	7.573,79	8.351,91	12.461,96	12.617,00	13.920,38	58
Durchschnitt	369,16	373,57	412,48	276,98	280,51	309,33	461,55	467,30	515,57	

Eine ergänzende tabellarische Übersicht zu den Energieverbräuchen je Linie und Richtung befindet sich in Anhang A.1 in Tabelle 12..

Resultierende Energiebedarf für den ÖSPV im Landkreis Oberallgäu je Tagestyp

Resultierend aus den zuvor aufgezeigten Linienlaufleistungen und Energiebedarfen hat das entsprechende Liniennetz eine Jahresfahrleistung von ca. 9,5 Mio. Fahrkilometer (exkl. Leerfahrten), mit ca. 21.000 bis 29.000 km/Tag je nach Tagestyp. Der daraus resultierende Energiebedarf (inkl. pauschalisierter Leerfahrten) im Falle einer vollständigen Elektrifizierung durch batterieelektrische Busse ist in Abbildung 16 dargestellt und liegt zwischen ca. 27.700 und 37.500 kWh/Tag. Dabei sinkt der Energiebedarf von Schultagen zu Ferientagen, dann Samstagen und schließlich Sonn- und Feiertagen annähernd linear.

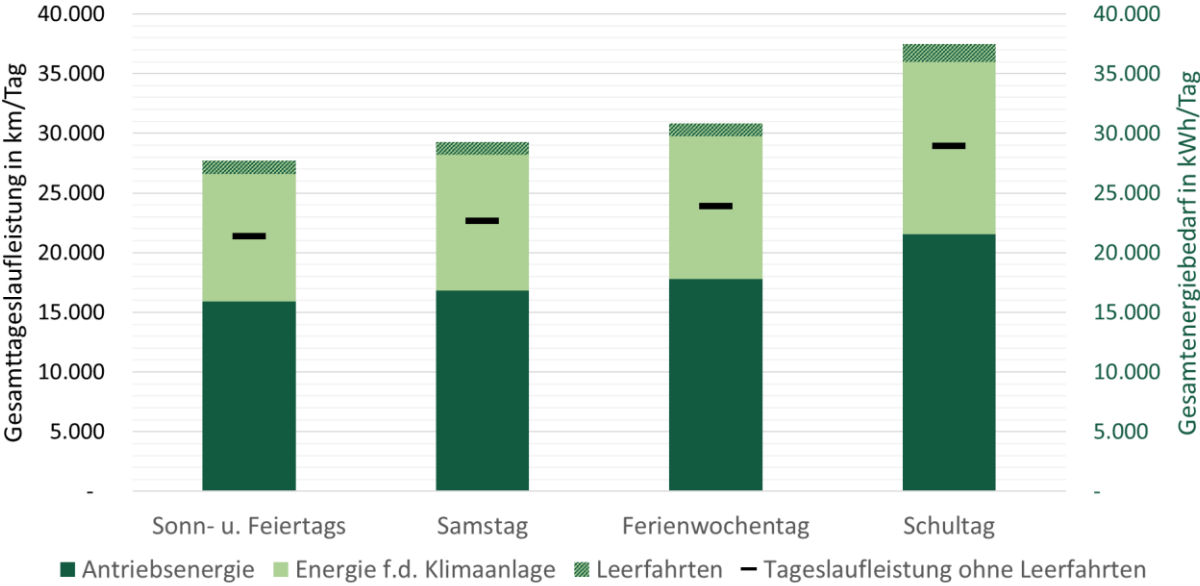


Abbildung 16 Überschlagn des Energieverbrauchs des ÖSPV im Landkreis Oberallgäu nach Tagestyp ⁴²

⁴² Eigene Darstellung und Berechnungen.

5. Ökonomische Analyse alternativer Antriebe

Die Betrachtung der Total Cost of Ownership (TCO) ist eine wirtschaftliche Berechnung, die Planern, Betreibern und Eigentümern helfen soll, die direkten und indirekten Kosten eines Produkts oder Systems zu ermitteln. Es handelt sich um eine Bilanzierungsmethode, die im Rahmen einer Vollkostenrechnung verwendet wird und alle Kosten über den gesamten Zeitraum der (Erst)Nutzung widerspiegelt.

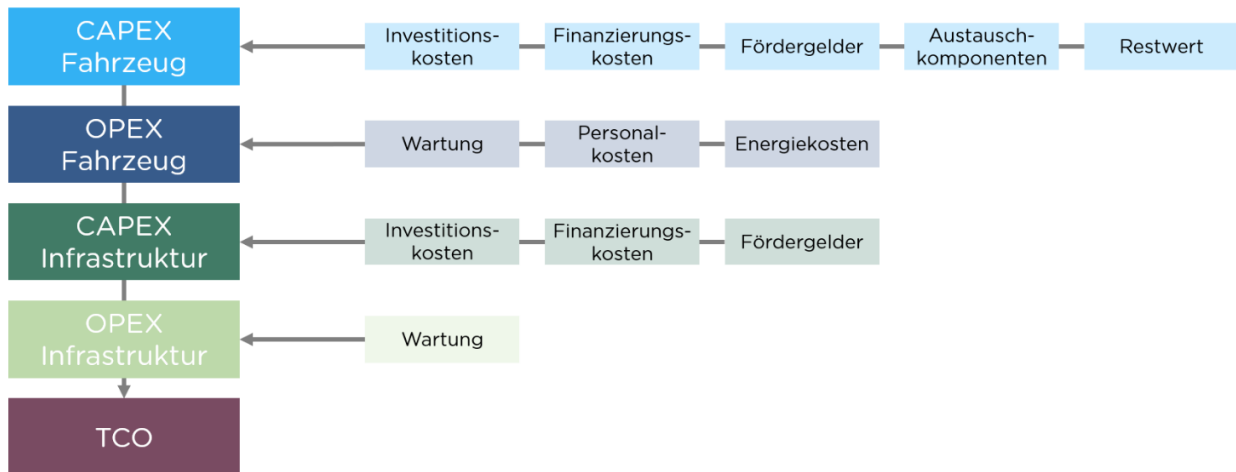


Abbildung 17: Übersicht der ökonomischen Parameter der TCO-Kalkulation ⁴³

Die Investitionsentscheidung für eine Antriebstechnologie im ÖSPV basiert – aufgrund der kommerziellen Nutzung – hauptsächlich auf den Kosten. Daher wurde eine TCO-Analyse gewählt, die die Gesamtkosten für die Anschaffung, den Betrieb einschließlich der Energiekosten und die Kosten für den Ersatz von Teilen oder sogar die Aufrüstung innerhalb des Lebenszyklus umfasst. Sie wird zur Messung der Kostenwirksamkeit verwendet. Unternehmen nutzen die TCO als Instrument für den Produktvergleich, um in diesem Fall verschiedene Arten von Energieträgern und Antriebssystemen für Busse aus wirtschaftlicher Sicht zu vergleichen. Abbildung 17 zeigt die Modellstruktur der TCO-Berechnung und damit alle berücksichtigten Elemente.

5.1 Annahmen der TCO-Kalkulation

Die folgende Tabelle 8 zeigt einen Ausschnitt der relevanten Parameter der TCO-Kalkulation.

Tabelle 8: Ausschnitt relevanter Parameter und Annahmen der TCO-Kalkulation

Parameter	Einheit	Wert
Ersthaltdauer	Jahre	10,00
Laufleistung	km/Jahr	60.000,00
Inflation ⁴⁴	%	2,00-8,00
CO ₂ -Preis in 2030	EUR/t CO ₂ eq.	100,00
Förderung (Fahrzeug und Infrastruktur) ⁴⁵	%	0,00

⁴³ Eigene Darstellung.

⁴⁴ Differenziert je Bezugsgut bzw. -leistung

⁴⁵ Es wurden weder für Fahrzeug noch Infrastruktur Fördergelder in der dargestellten TCO-Kalkulation berücksichtigt.

5.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der TCO-Kalkulation für alternative Antriebe im Vergleich zum Status Quo bietet einen tiefgreifenden Einblick in ökonomische Aspekte der Antriebswende im Öffentlichen Straßengebundenen Personennahverkehr. Die Analyse legt besonderen Wert darauf, einen direkten Marktvergleich der verschiedenen Technologien zu ermöglichen. Die Erkenntnisse aus dieser TCO-Kalkulation sind essenziell, um die wirtschaftliche Tragfähigkeit und die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit emissionsfreier Antriebe im ÖSPV zu verstehen.

Ein entscheidender Faktor, der sich in den Ergebnissen deutlich abzeichnet (siehe Abbildung 18), ist die erhebliche Differenz in den Fahrzeuginvestitionskosten. Vor allem batterieelektrische Busse (BEV) und wasserstoffbasierte Brennstoffzellenbusse (FCEV) sind im Vergleich zu herkömmlichen Dieselnissen mehr als doppelt so teuer. Dies spiegelt die derzeitigen Marktbedingungen wider, in denen die Produktion von emissionsfreien Fahrzeugen noch gering ist und Skaleneffekte noch nicht in vollem Umfang greifen.

Ein weiterer Punkt, der durch die TCO-Ergebnisse hervorgehoben wird, ist die Entwicklung der Erdgaspreise. Die gestiegenen Preise für Erdgas seit 2022 wirken sich signifikant auf die ökonomische Wettbewerbsfähigkeit von Erdgas-Bussen aus. Erdgas-betriebene Busse galten lange Zeit als eine vermeintlich wettbewerbsfähige emissionsärmere Alternative zu Dieselnissen. Die gestiegenen Kosten haben die ökonomische Wettbewerbsfähigkeit von Erdgasbussen erheblich beeinträchtigt und machen deutlich, dass die Abhängigkeit von fossilen Ressourcen eine unsichere und langfristig ungeeignete Option darstellt. Des Weiteren verdeutlicht dies, dass es wichtig ist nicht nur die Anschaffungskosten der Fahrzeuge, sondern auch die laufenden Betriebskosten, einschließlich der Energie- und Kraftstoffkosten, in die Analyse einzubeziehen.

Des Weiteren werden die Infrastrukturinvestitionskosten betrachtet. Während es schwer ist, diese Kosten auf ein einzelnes Fahrzeug herunterzubrechen, spielt die Infrastruktur, insbesondere beim Einsatz von Wasserstoff-Bussen, eine bedeutende Rolle. Bei batterieelektrischen Bussen sind die Infrastrukturkosten zwar ebenfalls ein Faktor, jedoch sind sie in Bezug auf die Gesamtkosten der Fahrzeugflotte und die Mehrkosten im Vergleich zum Diesel aus ökonomischer Sicht eher untergeordnet. Dennoch sind sie mit organisatorischen und baulichen Herausforderungen verbunden.

Ein zentraler Punkt in der TCO-Kalkulation ist die Betrachtung von Effizienzverlusten. FCEV weist aufgrund der Umwandlung von Wasserstoff in elektrische Energie erhebliche Effizienzverluste auf. Diese resultieren aus dem Elektrolyseprozess zur Wasserstoffgewinnung sowie der Rückumwandlung von Wasserstoff in Strom in der Brennstoffzelle. Dies führt zu einem höheren Energiebedarf und damit höheren Kosten im Vergleich zu BEV.

BEV unterliegen in dieser Analyse einem konservativen Ansatz, bei dem ein möglicher Mehrbedarf an Personal und Fahrzeugen aufgrund von Reichweitenbeschränkungen und Ladezeiten berücksichtigt wird. Dieser Ansatz beruht auf der Annahme, dass Verkehrsunternehmen möglicherweise Anpassungen in ihren Fahrplänen vornehmen müssen, um die Herausforderungen der begrenzten Reichweite und der erforderlichen Ladezeiten zu bewältigen.

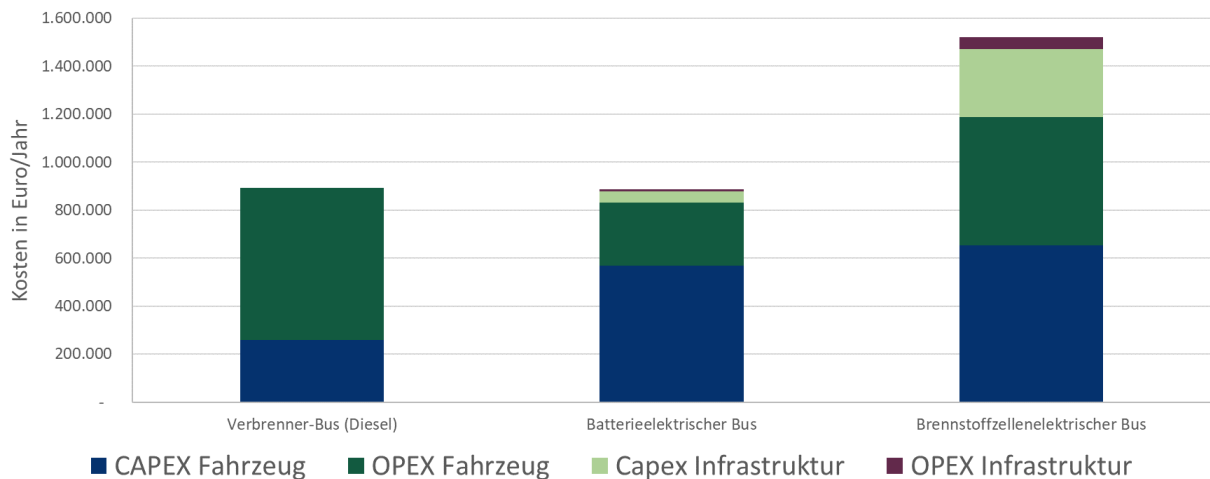


Abbildung 18: Ergebnisse der Total Cost of Ownership nach Kostenbestandteilen in 2024 ⁴⁶

Die Ergebnisse der TCO-Kalkulation betonen die Relevanz einer umfassenden Betrachtung aller Kosten, nicht nur der höheren Fahrzeuginvestitionskosten. Die TCO-Analyse berücksichtigt die Gesamtkosten über die gesamte Ersthaltedauer der Fahrzeuge und zeigt, dass die Wirtschaftlichkeit eines Fahrzeugs nicht nur von den Anschaffungskosten abhängt.

Die Bedeutung einer zeitlichen Weitsicht wird ebenfalls deutlich. Investitionen im ÖSPV und somit auch die dortige Antriebswende erfordern Langfristinvestitionen, da Busse oft eine Ersthaltedauer von mehr als zehn Jahren haben. Daher ist es entscheidend, die zukünftige Entwicklung und langfristigen operativen (Kosten-)Aspekte der wirtschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit – wie bspw. Energiepreissteigerungen – zu berücksichtigen.

Abbildung 19 zeigt die Kosten eines Busses pro Jahr bei einer Fahrzeuganschaffung in 2024 (CAPEX) sowie den Betrieb über 10 Jahre in den Jahren 2025 bis 2035 (OPEX). Die Ergebnisse geben einen Einblick in die Relevanz der Betriebskosten - sowie dessen Vergleich zwischen den Antriebstechnologien - und stellt diese in Relation zu den Investitionsaufwänden bei der Anschaffung der Fahrzeuge. Ein potenzieller Wechsel der Batterie wird in Abschnitt 5.3 betrachtet.

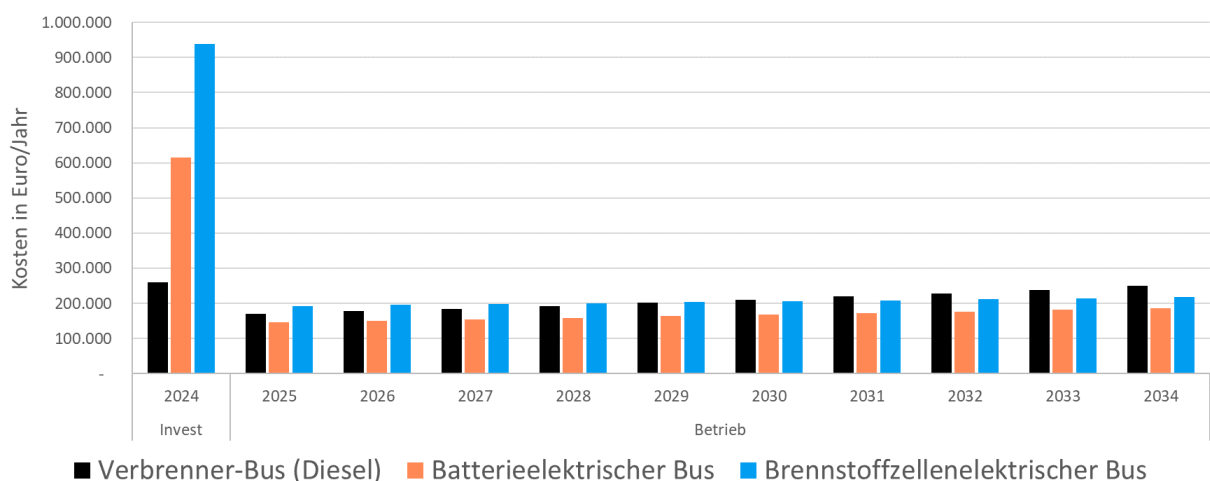


Abbildung 19: Kosten für einen Bus pro Jahr bei einer Investition in 2024 ⁴⁷

⁴⁶ Eigene Darstellung und Berechnungen.

⁴⁷ Eigene Darstellung und Berechnungen.

Ein zentrales Ergebnis der TCO-Kalkulation ist die Erkenntnis, dass die ökonomische Hürde für die Umstellung auf emissionsfreie Antriebe voraussichtlich zeitnah überwunden wird. Die Ergebnisse in Abbildung 20 zeigen, dass sowohl BEV als auch FCEV in den kommenden Jahren an wirtschaftlicher Wettbewerbsfähigkeit gewinnen werden. BEV erreicht den Break-even-Punkt mit Diesel-Verbrennern voraussichtlich zur Mitte des aktuellen Jahrzehnts, während FCEV dies voraussichtlich bis zum Ende des aktuellen Jahrzehnts schafft.

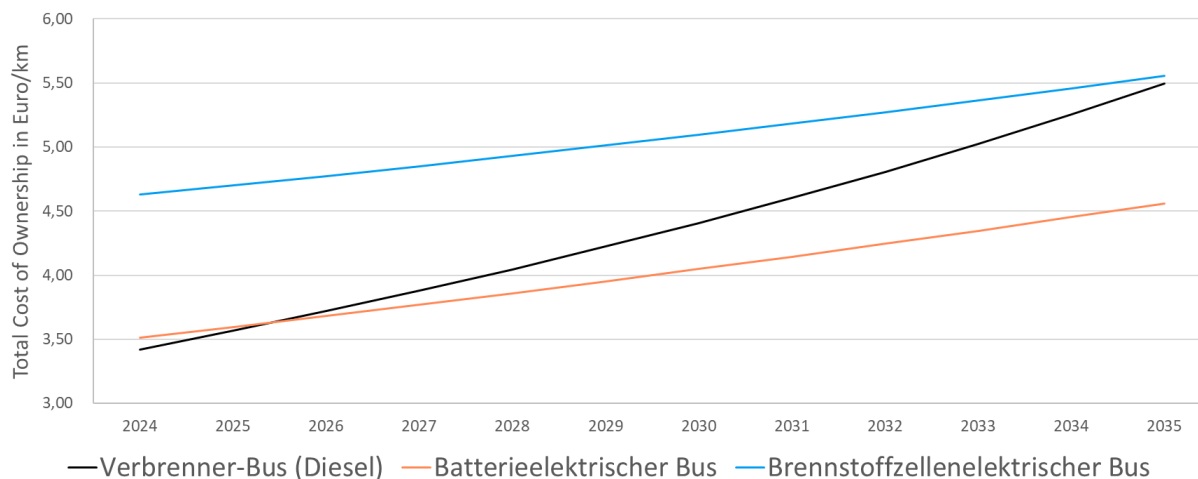


Abbildung 20: Ergebnisse der Total Cost of Ownership entsprechend des Jahres der Investition ⁴⁸

5.3 Sensitivitätsanalyse

Es wurden folgende Parameter in der Sensitivitätsanalyse betrachtet:

- Kaufpreise für BEV und FCEV: +/- 20%
- Dieselpreis bzw. -verbrauch: +/- 20%
- CO₂-Preisentwicklung: progressiv steigend (200 EUR/t CO₂ im Jahr 2030) / ab 2026 stagnierend
- Strompreis bzw. -verbrauch: +/- 30%
- Infrastrukturinvestition für BEV und FCEV: +20%/-100%
- Jahresfahrleistung: +/- 15%
- Batteriewechsel für BEV nach 6 Jahren: + 150 TEUR (einmalig im Verlauf der Ersthaltedauer)

Die Abbildung 21 zeigt exemplarisch den resultierenden Verlauf der TCO-Ergebnisse sowie die Sensitivitäten am Szenario der Kaufpreisabweichung für BEV und FCEV von +/- 20%.

⁴⁸ Eigene Darstellung und Berechnungen.

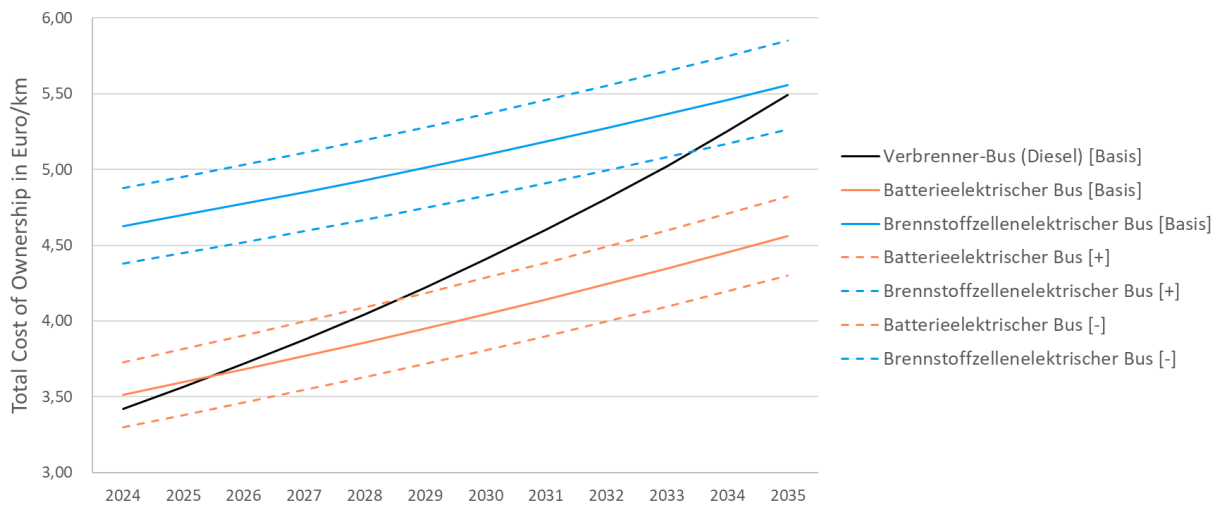


Abbildung 21: Sensitivitätsanalyse des Kaufpreises von BEV und FCEV ⁴⁹

Die Abbildung 22 zeigt exemplarisch den resultierenden Verlauf der TCO-Ergebnisse sowie die Sensitivitäten am Szenario der Dieselpreisabweichung von +/- 20%. Das +20% Szenario gibt einen Einblick in die Betankung und Verwendung von biogenem Diesel (bspw. HVO 100).

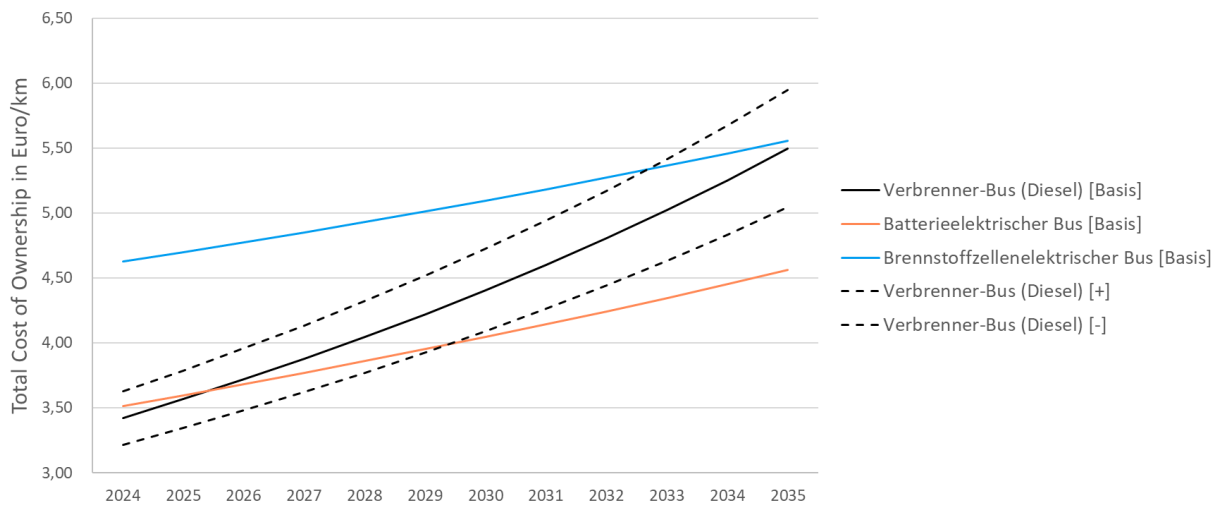


Abbildung 22: Sensitivitätsanalyse des Dieselpreises ⁵⁰

Die Tabelle 9 gibt einen Überblick zu den entsprechenden Jahren des resultierenden Break-even beispielhaft an den Technologien Verbrennungsmotor mit Diesel (ICEV-Diesel) und batterieelektrischem Bus (BEV). Der Break-even im Basisszenario lag ca. im Jahr 2024. Die dazugehörigen Ergebnisse der TCO der Sensitivitätsanalysen sind im Detail in Anhang A.2 in Abbildung 38 bis Abbildung 42 dargestellt.

⁴⁹ Eigene Darstellung und Berechnungen.

⁵⁰ Eigene Darstellung und Berechnungen.

Tabelle 9: TCO-Break-even zwischen ICEV-Diesel und BEV in den Szenarien der Sensitivitätsanalyse ⁵¹

Szenario	Faktor	Resultierender Break-even Diesel/BEV	Faktor	Resultierender Break-even Diesel/BEV
Kaufpreis BEV u. FCEV	+20%	2029	-20%	2023
Dieselpreis	+20%	2023	-20%	2030
CO ₂ -Preisentwicklung	progressiv	2024	stagnierend	2026
Strompreis	+30%	2028	-30%	2023
Jahresfahrleistung	+15%	2024	-15%	2027
Infrastrukturinvestition	+20%	2026	-100%	2024
Batteriewechsel ⁵²	+150 TEUR	2030	-	-

5.4 Limitierungen

Die Ergebnisse der Total Cost of Ownership (TCO) Modellierung sind mit einigen Limitierungen verbunden. Zunächst berücksichtigt die Modellierung eine allgemeine Perspektive, die keine detaillierte Berücksichtigung individueller Faktoren wie Standort- und Netzgegebenheiten, Flächenverfügbarkeit, Flottendimensionierung oder unternehmensspezifische Marktkonditionen ermöglicht. Dies kann dazu führen, dass die tatsächlichen TCO-Werte für bestimmte Betreiber und Standorte erheblich abweichen können. Zudem ist die Modellierung auf die verfügbaren öffentlichen Markt- und Fahrzeugdaten angewiesen, deren Vollständigkeit und Aktualität variieren kann.

Des Weiteren unterliegen alle in der Modellierung verwendeten Preisentwicklungen Annahmen und diversen Unsicherheiten. Hinzu kommen stets die Qualität und Aktualität der Daten. Dies betrifft sowohl die Kosten für Fahrzeuge als auch die Energiepreise, die eine erhebliche Rolle in den TCO-Berechnungen spielen. Der Zusammenhang zwischen Fahrzeuginvestitionen und Infrastrukturdimensionierung unterliegt ebenfalls generellen Annahmen.

Die unsichere Entwicklung des Produktionsausbaus von relevanten Fahrzeugen und Kraftstoffen kann die Ergebnisse der TCO-Modellierung erheblich beeinflussen. Eine begrenzte Verfügbarkeit von emissionsarmen oder emissionsfreien Fahrzeugen kann die Investitionsmöglichkeiten einschränken und die wirtschaftliche Attraktivität beeinträchtigen. Schließlich ist auch die Entwicklung des CO₂-Preises unsicher, und Änderungen in dieser Hinsicht können die Gesamtkosten der Fahrzeuge und Kraftstoffe erheblich verändern. Daher ist es wichtig, die Ergebnisse der TCO-Modellierung im Kontext dieser Limitierungen zu interpretieren und zu berücksichtigen.

Übergreifend bedingt die Unvorhersehbarkeit politischer Entscheidungen stets potenzielle Auswirkungen auf Prognosemodellierung, da diese einen erheblichen Einfluss auf zukünftige Preisentwicklungen haben können. Relevante Faktoren wie Richtlinien, Gesetzesänderungen oder geopolitische Ereignisse können die Kostendynamik beeinflussen, was es schwierig macht, genaue und v.a. robuste Prognosen zu erstellen. Die Komplexität politischer Entscheidungsprozesse und ihre potenziellen Auswirkungen auf wirtschaftliche Parameter erschweren eine präzise Kostenmodellierung.

⁵¹ Eigene Darstellung und Berechnungen.

⁵² Batteriewechsel nach 6 Jahren der Erthaltdauer

6. Fuhrpark- und Betriebshofanalyse

Die vorliegende Machbarkeitsstudie fokussiert sich maßgeblich auf die technische Machbarkeit des Einsatzes von batterieelektrischen Bussen. Daher wurde ein linienverlaufsorientierter Ansatz gewählt, um die generelle Machbarkeit festzustellen. Zudem wurden die ansässigen Betriebshöfe erfasst und geographisch verortet. Darüber hinaus hat eine Zuordnung der im Oberallgäu operierenden Omnibusse stattgefunden.

6.1 Bestandsbusflotte im Landkreis Oberallgäu

Die Aufnahme der Bestandsflotte erfolgte mittels der Datensammlung zu Fahrzeugen im Busverkehr des Landkreis Oberallgäu.⁵³ Demnach sind 256 Fahrzeuge aller Klassen und Einsatzzwecke zugelassen, circa 40 Busse davon verkehren im Linienbusverkehr in der EU-Klasse M3/UN-Klasse I und II⁵⁴. Für die Erfüllung des Zielbilds des ITF (siehe Abschnitt 2.1) werden hingegen weitere Busse benötigt, sodass in der Summe voraussichtlich 75 Busse für den Linienbusverkehr benötigt werden, von denen ca. 70 CVD-relevant sind (siehe Abbildung 23).⁵⁵

Die CVD gilt für Busse der EU-Klasse M3/UN-Klasse I (sogenannte Stadtbusse). Busse der UN-Klasse II (sogenannte Überlandbusse) sind ausgenommen. Überlandbusse können Reisebusse als auch Linienbusse älterer Bauart mit Hochboden sein. Alle künftigen Busse, die die Barrierefreiheit nach PBefG §8 (3) erfüllen müssen, fallen nicht mehr in die UN-Klasse II sondern ausschließlich in UN-Klasse I. Über den Nahverkehrsplan können begründet bestimmte Leistungen von der Erfüllung der Barrierefreiheit ausgenommen werden. Dies wäre beispielsweise denkbar für Verstärkerleistungen und Zusatzfahrten, die insbesondere für den Schülerverkehr erforderlich sind. Diese Fahrten könnten dann mit Fahrzeugen durchgeführt werden, die weder emissionsfrei noch emissionsarm sind.

Informationen zur Antriebstechnologie der Busse liegen in der Datensammlung nicht vor. Einzelne Verkehrsbetriebe haben jedoch bereits Berührungspunkte mit Fahrzeugen mit alternativen Antrieben. Mit Stand 2024 sind vier batterieelektrische Busse im Oberallgäu im Betrieb. Das erste Fahrzeug wurde ca. vor vier Jahren angeschafft. Es ist somit festzustellen, dass im Hinblick auf die Umstellung auf alternative Antriebe seitdem keine signifikanten Fortschritte gemacht wurden und weiterhin Dieselsebusse dominieren.

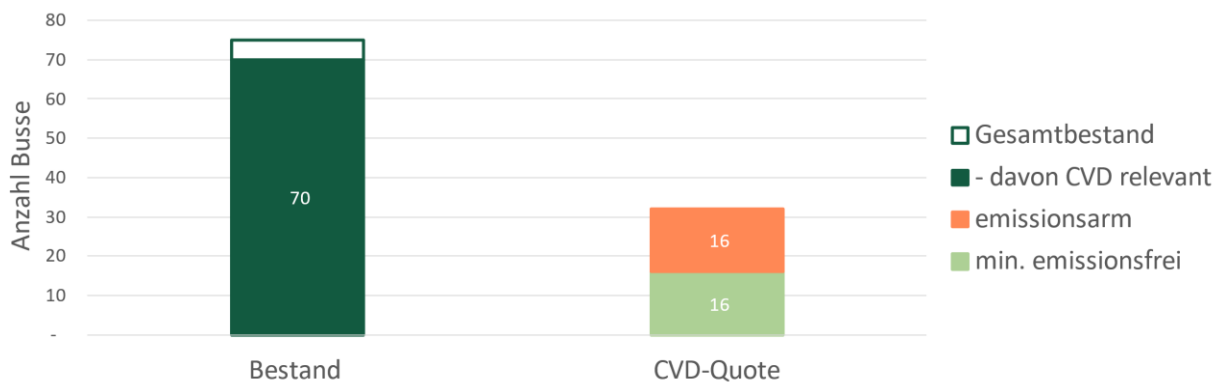


Abbildung 23 Darstellung des CVD-relevanten Linienbusbestands im Landkreis Oberallgäu

⁵³ Fahrzeugprüfbücher des LRA OA

⁵⁴ UN Regulation No. 107 (2.1)

⁵⁵ Basierend auf der vorliegenden Informationslage.

Um die Bestandsentwicklung im Landkreis Oberallgäu in einen umfassenderen Kontext zu stellen, wurde ein Vergleich mit den Busbestandszahlen im gesamten Freistaat Bayern angestellt. Die Tabelle 10 bietet einen Überblick über die Entwicklung der Bestände nach Antriebsarten von 2018 bis 2024.

Tabelle 10 Busbestandsdaten in Bayern – absolute Zahlen je Antriebstechnologie. 01/2018 bis 01/2024

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Erdgas	350	329	307	276	269	253	235
Hybrid	17	80	198	439	747	872	1141
Plug-in-Hybrid	1	1	1	1	2	2	11
Batterieelektrisch	12	18	34	68	142	206	371
Brennstoffzellenelektrisch	1	1	1	1	0	0	2
Gesamt alternative Antriebe	381	429	541	785	1160	1333	1760
Gesamt Deutschland	14203	14311	14399	12753	13894	14.342	14766

In Bayern zeigt sich seit 2019 ein kontinuierlicher Anstieg der batterieelektrischen Busse, mit einem Wachstumsfaktor 2, der zwar in den letzten Jahren leicht zurückging, aber immer noch bei etwa 1,8 pro Jahr liegt. Bezüglich brennstoffzellenelektrischer Busse sind bisher nur zwei registriert, jedoch wurden im ersten Quartal 2024 weitere fünf Busse im Linienverkehr des Münchener Verkehrs- und Tarifverbundes (MVV) in Betrieb genommen, mit weiteren fünf geplant.⁵⁶ Es wird erwartet, dass auch Bayreuth bald folgen wird.⁵⁷ Generell zeigt sich, dass in Bayern der Fokus auf batterieelektrischen Bussen liegt, besonders in urbanen Gebieten wie München oder Nürnberg. Dennoch besteht im gesamten Freistaat weiterhin Steigerungspotenzial für die Umstellung auf alternative Antriebe.

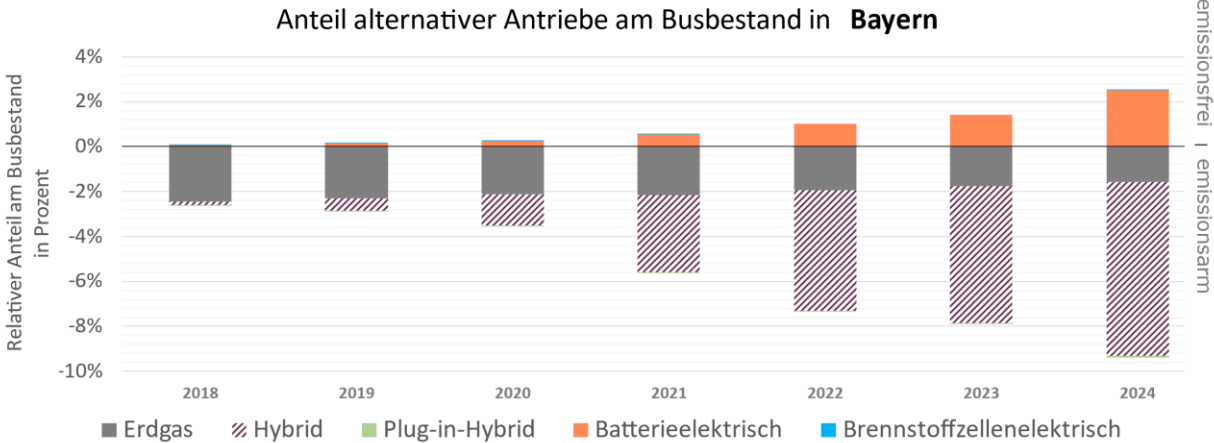


Abbildung 24 Busbestandsdaten in Bayern - relativer Anteil je Antriebstechnologie⁵⁸

Hinweis zur Abbildung 24: Hybrid (mit fossiler Diesel-Verbrennung) ist entsprechend der CVD nicht als emissionsarm eingestuft und ist somit nicht auf die Quote für emissionsfreie Fahrzeuge anrechenbar (siehe Abschnitt 2.2). Hybrid dient hier nur der Veranschaulichung der Bestandsentwicklungen von Alternativen zum Status Quo.

⁵⁶ Neue Wasserstoffbusse in den Landkreisen Ebersberg und München - Ebersberg - SZ.de (sueddeutsche.de)
⁵⁷ Wasserstoffstrategie: Debatte im Bund, Entscheidung in Bayreuth | BR24
⁵⁸ Eigene Darstellung. KBA (2024)

6.2 Busbetriebshöfe im Landkreis Oberallgäu

Im Landkreis Oberallgäu befinden sich Busbetriebe an 19 Standorten. Diese sind dezentral über den Landkreis verteilt. Mehrheitlich umfassen die Fuhrparks weniger als zehn Fahrzeuge. Ausnahmen stellen die RVA Regionalverkehr Allgäu GmbH mit 41 Fahrzeugen, Arnold-Reisen GmbH mit 25 Bussen, die Komm mit Morent GmbH & Co. KG mit 64 Fahrzeugen und die Personenbeförderung Putz mit 14 Fahrzeugen dar (vgl. Abbildung 25).

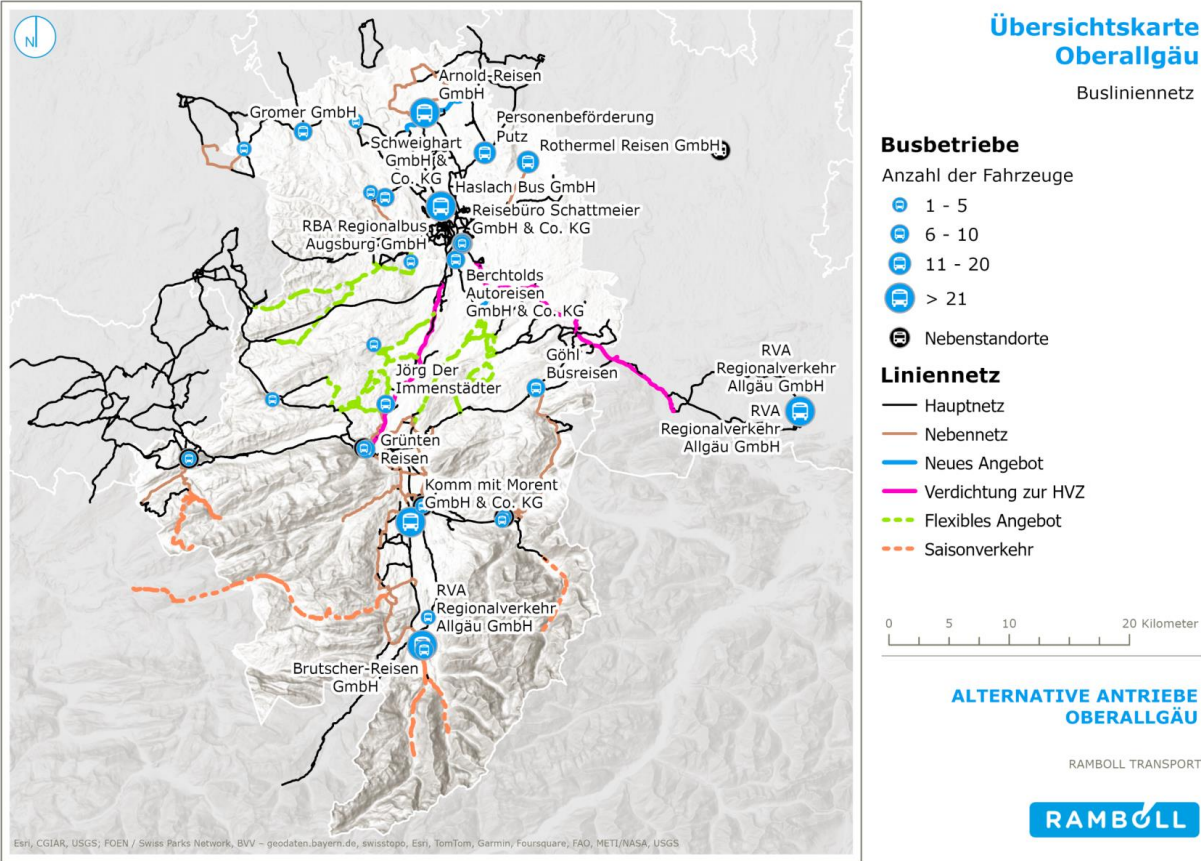


Abbildung 25 Busbetriebe Landkreis Oberallgäu

Die Charakteristika des Betriebshofs stellen neben dem Linienverlauf eine wesentliche Rahmenbedingung für die Umstellung auf alternative Antriebe dar. Maßgeblich sind hierbei die Energieversorgung, die Ladeinfrastruktur und die Flächenverfügbarkeit. Um einen Fuhrpark mit elektrischen Bussen betreiben zu können, ist ein ausreichend dimensionierter Netzanschluss (meist an die Mittelspannungsebene) notwendig. Zudem benötigt sowohl die Ladeinfrastruktur als auch die Fahrzeuge sowie der etwaige Mehrbedarf an Fahrzeugen ausreichend Platz auf dem Betriebsgelände.

Eine detaillierte Untersuchung der einzelnen Betriebshöfe im Oberallgäu ist nicht Bestandteil dieser Untersuchung. Dennoch wurden die Anforderungen an die Betriebshöfe sowie die nötigen Prüfschritte für die Umstellung auf alternative Antriebe in einer Checkliste festgehalten (siehe Anhang A.4). Diese dient den Verkehrsbetrieben als Werkzeug, um ihren Betrieb auf die allgemeine Umrüstbarkeit zu prüfen als auch die notwendigen Schritte im Blick zu behalten.

7. Strategische Planung der Versorgungsinfrastruktur

Die strategische Planung der Versorgungsinfrastruktur für batterieelektrische Busse ist von entscheidender Bedeutung, um eine nahtlose Integration dieser emissionsfreien Technologie in den öffentlichen Nahverkehr zu gewährleisten. Diese Planung umfasst die Identifikation potenzieller Standorte für Ladestationen sowie die Durchführung von Machbarkeitsprüfungen, um sicherzustellen, dass die Infrastruktur den Anforderungen entspricht und effektiv betrieben werden kann.

7.1 Ladekonzepte

Die Wahl des richtigen Ladekonzepts ist von entscheidender Bedeutung, da es den Betriebsablauf erheblich beeinflusst. Es gibt verschiedene Ladekonzepte, darunter Depot Charging, Opportunity Charging und In-motion Charging (siehe auch Abbildung 26), die jeweils ihre eigenen Vor- und Nachteile haben.

- **Depot Charging:** Beim Depot Charging werden die Busse während ihrer Standzeiten im Depot aufgeladen. Dies ist eine effiziente Methode, da die Busse ausreichend Zeit zum Laden haben. Allerdings erfordert sie eine gut geplante Infrastruktur im Depot und kann den Platzbedarf erhöhen.
- **Opportunity Charging:** Opportunity Charging (Gelegenheitsladen) ermöglicht das Nachladen der Busse während kurzer Pausen an ausgewählten Haltestellen oder Endpunkten. Dies ermöglicht einen kontinuierlichen Betrieb, erfordert jedoch eine sorgfältige Planung der Ladestationen und eine präzise Zeitplanung.
- **In-motion Charging:** Bei In-motion Charging erfolgt das Laden während der Fahrt. Dies erfordert spezielle Infrastruktur, wie Oberleitungen oder Induktionsspulen im Straßenbelag. Diese Methode ermöglicht einen nahezu kontinuierlichen Betrieb, erfordert jedoch erhebliche Investitionen in die Infrastruktur.

Die Wahl des Ladekonzepts hängt von verschiedenen Faktoren ab, einschließlich der Routen, der zur Verfügung stehenden Infrastruktur und der betrieblichen Anforderungen. Die Umstellung auf alternative Antriebe erfordert oft die Identifikation und Ausstattung entsprechender Ladestandorte, um das gewählte Ladekonzept umzusetzen.

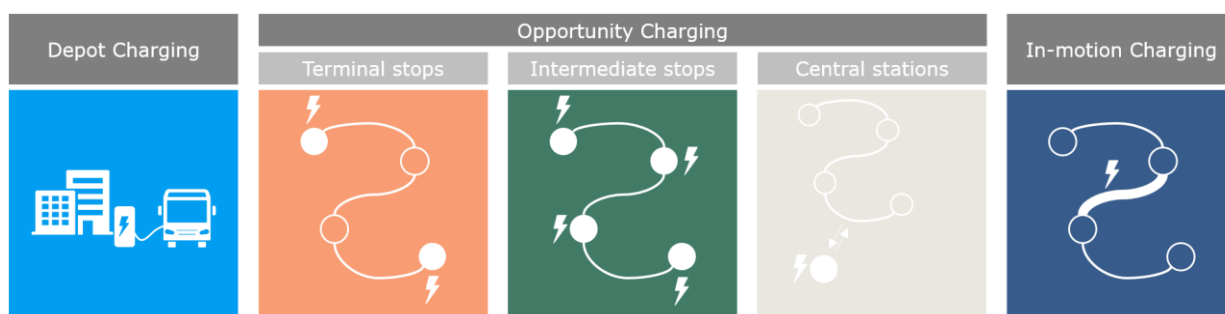


Abbildung 26: Überblick Ladekonzepte ⁵⁹

7.2 Identifikation von potenziellen Standorten

Die Vertiefung der Bestandsanalyse (Linienverläufe und Betriebsstandorte aktueller Verkehrsunternehmen) und Vorgehen für die Neuplanung von Standorten für Ladeinfrastruktur für den Landkreis Oberallgäu erfordert eine mehrschichtige und detaillierte Herangehensweise, die sich nicht nur auf die aktuelle

⁵⁹ Eigene Darstellung in Anlehnung an TU Berlin (2020)

Infrastruktur und geografischen Bedingungen stützt, sondern auch zukunftsorientiert, datengetrieben und anpassungsfähig ausgerichtet ist.

Um die Bestandsanalyse weiter zu detaillieren, müssen zunächst verkehrstechnische Datenbanken und Betriebsprotokolle konsultiert werden, um ein umfassendes Verständnis der gegenwärtigen Auslastung, Fahrzeugrotation und Fahrgastflüsse zu erhalten. Eine feinmaschige Datenerhebung ermöglicht es, die Effizienz der gegenwärtigen Betriebsabläufe zu bewerten und Potenziale für die Integration von Ladestationen aufzuzeigen, ohne dabei den bestehenden Service zu beeinträchtigen.

Im Rahmen der Neuplanung ist es zudem wesentlich, eine detaillierte kartographische Analyse der Region durchzuführen. Diese beinhaltet eine Bewertung der vorhandenen und potenziell notwendigen Netzanschlüsse, die Abschätzung der verkehrlichen Belastung und eine Topographieanalyse. Hierdurch können Standorte priorisiert werden, die aufgrund ihrer geografischen Lage geringere Installations- und Betriebskosten versprechen oder aufgrund topographischer Vorteile (z.B. weniger Höhenunterschiede) eine höhere Energieeffizienz ermöglichen.

Des Weiteren ist die Untersuchung der energetischen Rahmenbedingungen von zentraler Bedeutung. Dies beinhaltet die Analyse des bestehenden und zukünftigen Energiemixes in der Region und dessen Kapazität zur Deckung des Mehrbedarfs durch Elektrobusse. In diesem Zusammenhang müssen Prognosen zur Entwicklung der Energiepreise, mögliche Subventionen für erneuerbare Energien und die Verlässlichkeit der Energieversorgung berücksichtigt werden.

Die Planung der Ladeinfrastruktur muss auch die technologische Entwicklung und Markttrends in Betracht ziehen. Dies umfasst die Analyse des aktuellen Marktes für Ladeinfrastruktur, inklusive der Betrachtung von Schnittstellennormen, Ladeleistungsklassen und -technologien. Ebenso bedeutsam ist die Evaluierung von zukünftigen technologischen Fortschritten, wie etwa induktives Laden oder Entwicklungen in der Batterietechnologie, die Einfluss auf die Gestaltung der Ladeinfrastruktur haben könnten.

Das kreisweite Ladekonzept sollte auch eine fundierte Risikoanalyse beinhalten, die nicht nur finanzielle und technische Risiken umfasst, sondern auch soziale und umweltpolitische Faktoren berücksichtigt. Dabei ist es entscheidend, eine Stakeholder-Analyse durchzuführen, die sowohl die Interessen der lokalen Bevölkerung als auch der beteiligten Unternehmen und Behörden einschließt.

Eine leistungsfähige und nachhaltige Ladeinfrastruktur muss schließlich flexibel auf unterschiedliche Betriebsszenarien reagieren können. Die Berücksichtigung von saisonalen Schwankungen, besonderen Veranstaltungen oder auch Krisensituationen wie Naturkatastrophen ist dabei von Bedeutung, um eine resiliente Infrastruktur zu gewährleisten.

Die Zusammenführung dieser detaillierten Analysen bildet die Grundlage für die Ausarbeitung einer umfassenden und strategisch fundierten Roadmap für die Einführung und Verwaltung von Elektromobilität im ÖPNV des Landkreises Oberallgäu. Es empfiehlt sich, diese Roadmap in regelmäßigen Abständen zu überprüfen und anzupassen, um sicherzustellen, dass sie weiterhin die sich ändernden Rahmenbedingungen und technologischen Entwicklungen reflektiert.

SWOT-Analyse der Ladekonzepte

Unter Berücksichtigung der im Oberallgäu vorherrschenden Bedingungen – die von alpinen Topografien bis hin zu saisonalen Schwankungen im Tourismus reichen – wird die SWOT-Analyse dazu beitragen, ein Ladekonzept zu entwickeln, das den spezifischen Anforderungen der Region entspricht. Hierbei sind sowohl die Einschränkungen durch natürliche Bedingungen als auch die Potenziale, die sich durch die lokalen Gegebenheiten ergeben, in die Analyse einzubeziehen.

Tabelle 11 SWOT-Analyse der Ladekonzepte

	Depotladen	Endhalteladen	Zwischenstoppladen
Stärken	<ul style="list-style-type: none"> • Zentralisierte Energiesteuerung und optimierte Lade-strategie • Keine komplexe Ladeinfrastruktur entlang der Routen • Effektive Nutzung außerhalb Betriebszeiten, bei potenziell niedrigen Strompreisen (nachts) • Flexible und effektive Lade- und Betriebsstrategie 	<ul style="list-style-type: none"> • Dezentral • Reichweiterverlängerung durch Nutzen von Pausen-, Stand- und Wendezeiten • Entlastet das Depot 	<ul style="list-style-type: none"> • Dezentral und zentral • Hohe Betriebsflexibilität • Potenzielle Effizienzsteigerung durch Laden in Pausen • Reichweiterverlängerung durch Nutzen von Pausen-, Standzeiten, ohne Einschränkung • Entlastet das Depot
Schwächen	<ul style="list-style-type: none"> • Zentralisiert • Hoher Platzbedarf • Hohe Anfangsinvestition • Teilweise erhebliche Investitionen in Netzanschluss und Trafo aufgrund des hohen Strombedarfs an einem Standort • Reichweitenbeschränkung oder alternativ vermehrte Leerfahrten, sollten Zwischenladezeit eingeplant sein/werden 	<ul style="list-style-type: none"> • Ladestrategie ist in der Betriebsstrategie zu berücksichtigen → erfordert laderelevante Wendezeiten • Erfordert ggf. unterschiedliche Ladetechnologien • Geringe Auslastung • Integration räumlich, finanziell und visuell kompliziert 	<ul style="list-style-type: none"> • Ladestrategie ist in der Umlaufplanung zu berücksichtigen • Erfordert ggf. unterschiedliche Ladetechnologien • Integration räumlich, finanziell und visuell aufwendig • Finanzierungs- und Betriebsmodell unter mehreren Stakeholdern zu klären
Chancen	<ul style="list-style-type: none"> • Skalierung und Integration von erneuerbaren Energien am Depot • Kosteneinsparung durch optimierte Energiebezugpreise • Kann ggf. für Dritte nutzbar gemacht werden, um die CVD-Quoten schneller zu erfüllen • Fortlaufende Entwicklung und steigende Batteriekapazitäten mindern die Notwendigkeit von Zwischenladen 	<ul style="list-style-type: none"> • Gleichmäßigere Stromabnahme über den Tag • Verlängerung der Betriebsstrecken und/oder Reduktion der notwendigen Batteriekapazität • Quernutzung zwischen VU senkt Anschaffungshemmnisse von E-Bussen • Steigert ggf. teilweise die öffentliche Wahrnehmung von emissionsfreien Bussen 	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung von HPC • (längere) Standzeiten an zentralen Punkten (bspw. ZOB) sinnvoll nutzen • Hohe Auslastung, gemeinschaftliche Nutzung mehrerer VU
Risiken	<ul style="list-style-type: none"> • Abhängigkeit einer zentralen Energieversorgung und Störungen des Gesamten Betriebs • Fortlaufende Baumaßnahmen am gleichen Standort • Durch Zentralisierung erhöhte Spitzenlast kann zu hohen Kosten durch Lastspitzen und ggf. zu Engpässen führen 	<ul style="list-style-type: none"> • Bedarf die gleichen Ladeanschlüsse/-kontakte wie im Betriebshof • Elektrifizierung von peripheren Standorten kann ggf. technisch aufwendig sein und hohe Kosten verursachen • Quernutzung zwischen VU kann zu Komplikationen führen 	<ul style="list-style-type: none"> • Betreiberkonzept? • Abstimmung mit Kommune/Stadt • Pot. Herausforderung an urbanen Standorten • Ineffiziente Betriebsabläufe • Quernutzung zwischen VU kann zu Komplikationen führen

Die Stärken verschiedener Ladekonzepte, wie die Nutzung bestehender Infrastrukturen beim Depotladen, die Flexibilität des Endhalteladens und die effizienzsteigernde Wirkung des Zwischenstoppladens, müssen gegen die potenziellen Schwächen abgewogen werden. Zu diesen Schwächen zählen beispielsweise die Begrenzung durch die Reichweite, die Integration der Ladeinfrastruktur in das Stadtbild und die Abhängigkeit von der Zuverlässigkeit des Ladeprozesses während der Betriebszeiten.

Chancen, wie die Verringerung der Betriebskosten durch optimierte Ladezeiten und die Nutzung von regenerativen Energien, sind ebenso zu bewerten wie die Risiken, die sich durch die Zentralisierung der Ladeinfrastruktur oder potenzielle technische und infrastrukturelle Herausforderungen ergeben können.

Die Einbeziehung aller relevanten Stakeholder – von Verkehrsunternehmen und Energieversorgern bis hin zu den Einwohnern des Landkreises – ist von entscheidender Bedeutung, um ein breites Spektrum an Perspektiven zu erfassen und eine umfassende Entscheidungsgrundlage zu schaffen. Dieser partizipative Ansatz gewährleistet, dass die entwickelte Strategie sowohl den betrieblichen Anforderungen gerecht wird als auch auf Akzeptanz und Unterstützung innerhalb der Gemeinschaft trifft.

Die daraus resultierende SWOT-Analyse wird nicht nur als unmittelbarer Leitfaden für die nächsten Schritte in den Kapiteln "Strategische Empfehlungen zur zentralisierten Ladeinfrastruktur" und "Strategisches Vorgehen zur dezentralen Ladeinfrastruktur" dienen, sondern auch als Basis für die kontinuierliche Überprüfung und Anpassung der Strategie an die sich verändernden Rahmenbedingungen im Bereich der Elektromobilität.

Dieses umfangreiche und detaillierte Vorgehen, welches auf den vorangegangenen Analysen aufbaut und die SWOT-Elemente im Kontext des Landkreises Oberallgäu interpretiert, unterstreicht die Notwendigkeit einer dynamischen und vorausschauenden Planung, um den Übergang zur Elektromobilität erfolgreich zu gestalten. Eine Umfassende Übersicht ist der Tabelle 11 zu entnehmen.

Strategische Empfehlungen Zentralisierte Ladeinfrastruktur

Zusätzlich zur Bestandsbetrachtung ist es wichtig, die geografischen Merkmale der aktuellen und geplanten Linienverläufe zu berücksichtigen. Durch eine genaue Analyse können potenzielle Standorte identifiziert werden, die die Anforderungen an die Ladestationen am besten erfüllen.

Im gegenwärtigen gewachsenen Netz bestreiten eine Vielzahl kleinerer Busunternehmen – teils auch als Subunternehmer größerer Unternehmen – die Zubringer- und Abbringerfahrten insbesondere zu bzw. von den Schulen. Dies ist mit ortsansässigen Fahrern noch grenzwertig vertretbar zu leisten mit Dienstlängen von deutlich über 10 Stunden, d.h. Beginn z.B. vor 7 Uhr und Ende nach 17 Uhr; natürlich mit Unterbrechungen z.B. zwischen 8 und 12 Uhr. Sobald jedoch der Personalpool erweitert werden muss und nicht alle Fahrten mit ortsansässigen Fahrern bestreitbar ist, werden Dienste mit langen Unterbrechungen nur in geringem Umfang akzeptiert. Aus diesem Grunde sind verstreut liegende Depotstandorte nur unter bestimmten Rahmenbedingungen darstellbar. Für den Fall, dass attraktive Schichten für einen Fahrer auch an einem Außenstandort beginnen und enden können, ist ein Außenstandort zur Abstellung eines oder mehrerer Busse denkbar. Dies limitiert jedoch die Gestaltungsmöglichkeiten des Fahrplanangebotes für den Fahrgast.

Insofern haben strategisch günstig gelegene größere Depotstandorte den Vorteil, die Dienstschichten für die Fahrer attraktiver gestalten zu können. Unter dem Aspekt des gegenwärtigen Fahrermangels bekommt dieser Aspekt ein besonders hohes Gewicht. Darüber hinaus bieten größere Depotstandorte den Vorteil, dass Wartung, Reinigung und Betankung bzw. Aufladung mit deutlich geringerem logistischem Aufwand erfolgen können, da sämtlich Fahrzeuge zumindest über Nacht alle am Standort zur Verfügung stehen.

Die Wahl der Standorte erfolgt folglich unter dem Aspekt, zum einen eine gewisse Mindestgröße zu erreichen, die eine Waschanlage und eine Werkstatt auslasten und zum anderen die Leerkilometer geringhalten.

Folgende vier grobe Gebiete werden für je einen größeren Depotstandort als vorteilhaft identifiziert:

1. Dietmannsried
2. Buchenberg - Kempten
3. Oberstaufen - Immenstadt
4. Bereich Sonthofen – Oberstdorf

Daneben kann es im Einzelfall zielführend sein, Busse an Außenstandorten abzustellen. Allerdings mit der Maßgabe, dass ein Bus während eines Tages möglichst regulär über Fahrplanfahrten an den Depotstandorten vorbeikommt und dort bei Bedarf zu Wartungs- und Reinigungszwecken ausgetauscht werden kann.

Die Analyse bestehender Depots und des Liniennetzes legt vier Suchräume für die Ertüchtigung von Betriebshöfen oder den Neubau von Betriebshöfen nahe. Diese sind in Abbildung 27 ersichtlich.

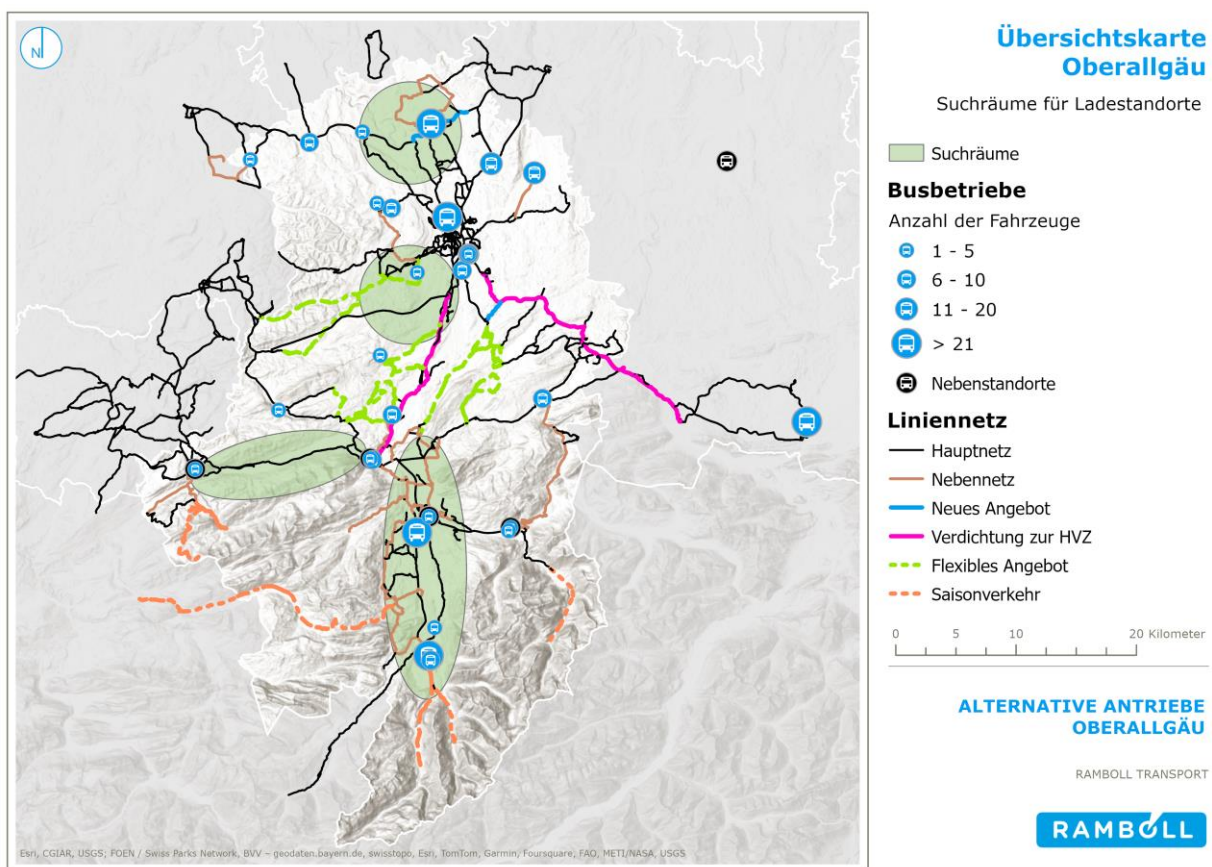


Abbildung 27 Suchräume für Ladestandorte

Vorgehen zur Identifikation zentraler Ladeinfrastruktur

Die Auswahl geeigneter Standorte für zentralisierte Ladestationen beginnt mit einer detaillierten Bestandsaufnahme und einer geografischen Analyse des bestehenden und geplanten Liniennetzes. Durch die Untersuchung der aktuellen Betriebsabläufe und Infrastrukturen, insbesondere der Depots und ihrer geografischen Lage im Verhältnis zu den Linienvläufen, lassen sich potenzielle Standorte für zentrale Ladestationen identifizieren. Diese Standorte sollten sowohl ausreichend Anbindung an das öffentliche Verkehrsnetz als auch genügend räumliche Kapazitäten zur Installation der erforderlichen Ladeinfrastruktur bieten.

Die Analyse hat vier Hauptbereiche für die Einrichtung zentraler Ladestationen hervorgehoben. Diese Bereiche wurden aufgrund ihrer strategischen Position, ihrer Nähe zu wichtigen Verkehrsknotenpunkten und ihrer Fähigkeit, die logistischen Anforderungen des Betriebs zu unterstützen, ausgewählt. Die genauen Standorte sind in der Dokumentation und den Abbildungen des Berichts detailliert aufgeführt.

Empfehlungen zur Implementierung

Aufgrund der geringen Anzahl von Fahrzeugen, die von den meisten lokalen Verkehrsbetrieben betrieben werden, wird empfohlen, eine zentrale Ladeinfrastruktur an gut erreichbaren, größeren Betriebshöfen zu errichten. Dies ermöglicht eine effiziente Nutzung der Ressourcen und kann zu Kosteneinsparungen sowohl in der Installation als auch im Betrieb führen. Eine zentrale Infrastruktur fördert auch die standardisierte Wartung und Überwachung der technischen Systeme.

Es ist jedoch wichtig, die potenziellen Nachteile einer zentralisierten Strategie zu beachten. Dazu gehören die Möglichkeit von Engpässen während Spitzenzeiten und das Risiko von erhöhten Leerfahrten, da Fahrzeuge möglicherweise längere Strecken zurücklegen müssen, um die zentralen Ladestationen zu erreichen. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, sollte die Infrastruktur so gestaltet sein, dass sie Spitzenlasten effizient managen kann und genügend Flexibilität bietet, um auf Änderungen in der Nachfrage reagieren zu können.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist die Sicherstellung der Zugänglichkeit dieser Infrastruktur für alle beteiligten Verkehrsbetriebe. Es wird empfohlen, ein Modell der gemeinschaftlichen Nutzung zu entwickeln, das faire Zugangsbedingungen und transparente Nutzungsregelungen beinhaltet. Dies würde nicht nur die Effizienz verbessern, sondern auch kleinere Betriebe unterstützen, die möglicherweise nicht die Mittel haben, eigene umfangreiche Ladeinfrastrukturen zu errichten.

Strategisches Vorgehen Dezentrale Ladeinfrastruktur

Im Rahmen der strategischen Planung für eine dezentrale Ladeinfrastruktur im Öffentlichen Personennverkehr (ÖPNV) des Landkreises Oberallgäu liegt der Fokus auf der Implementierung individueller Ladepunkte durch die einzelnen Verkehrsbetriebe. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine größere Flexibilität und reduziert die Notwendigkeit für ausgedehnte Netzanschlüsse an die Mittelspannungsebene, was insbesondere für kleinere Fuhrparks praktikabel ist. Durch die Vermeidung von Leerfahrten, die sonst für das Erreichen zentraler Ladestationen notwendig wären, lassen sich effizienz- und kostensparende Maßnahmen realisieren.

Beim Endstationsladen ist es entscheidend, dass die Ladestationen so positioniert werden, dass sie mit den Betriebspausen der Busse an Endstationen korrelieren. Dies erfordert eine detaillierte Analyse der Umlaufplanung, die durch das Integrierte Taktfahrplan-System (ITF) unterstützt wird. Die Analyse sollte aufzeigen, welche Endstationen sich durch längere Aufenthaltszeiten der Busse besonders für das Laden eignen. Dadurch kann eine nahtlose Integration des Ladevorgangs in den Betriebsablauf gewährleistet werden, ohne dass zusätzliche Standzeiten entstehen.

Das Zwischenladen konzentriert sich auf strategische Netzknotenpunkte und Linienüberschneidungen, wo Busse natürlich bedingte Wartezeiten haben. Hierdurch wird eine effiziente Nutzung der Ladeinfrastruktur erreicht, indem Busse während kurzer Pausen im Linienverkehr geladen werden. Bei der Planung der Standorte für das Zwischenladen ist eine gründliche Bewertung der Linienführungen und der Frequenz der Busse an diesen Knotenpunkten erforderlich. Es sollte eine Balance gefunden werden, die eine maximale Abdeckung und minimale Betriebsunterbrechung gewährleistet.

Empfehlungen zur Implementierung

Um die Einführung einer dezentralen Ladeinfrastruktur im Landkreis Oberallgäu erfolgreich zu gestalten, sollte ein umfassendes, kreisweites Ladekonzept erarbeitet werden. Dieses Konzept muss die spezifischen Anforderungen jedes Verkehrsbetriebs berücksichtigen und flexibel genug sein, um auf unterschiedliche Betriebsgrößen und -strukturen einzugehen. Es wird empfohlen, eine Machbarkeitsstudie

durchzuführen, die nicht nur die technischen und finanziellen Aspekte der Ladeinfrastruktur, sondern auch die potenzielle Akzeptanz und die operativen Auswirkungen auf den Busbetrieb bewertet.

Zudem sollte die Möglichkeit einer gemeinschaftlichen Nutzung der Ladeinfrastruktur an zentralen Omnibus-Bahnhöfen (ZOB) geprüft werden. Solche Standorte könnten für das Zwischen- oder Vollladen über Nacht genutzt werden und eine sinnvolle Ergänzung zu den individuellen Ladestationen der Verkehrsbetriebe darstellen. Diese Hybridlösung könnte dazu beitragen, die initialen Kosten zu verteilen und die operative Flexibilität zu erhöhen.

Die Entwicklung und Umsetzung einer dezentralen Ladeinfrastruktur erfordert eine sorgfältige Planung und Koordination, um sicherzustellen, dass die elektrische Busflotte effizient, zuverlässig und nachhaltig betrieben werden kann.

7.3 Machbarkeitsprüfung der Standorte

Die Machbarkeitsprüfung von Standorten für Ladeinfrastruktur im Busbetrieb erfordert eine umfassende Analyse verschiedener Faktoren, um optimale Lösungen zu gewährleisten. Dies beinhaltet Standorte auf Busbetriebshöfen, an Busabstellorten sowie Zwischenladestandorten an zentralen Drehpunkten wie Zentralen Omnibusbahnhöfen (ZOB) oder Endhaltestellen während der Wendezeit.

Machbarkeitsprüfung verkehrlicher Anforderungen

Ein wesentlicher Aspekt bei der Bewertung potenzieller Standorte ist der Flächenbedarf. Im Vergleich zum klassischen Dieselbusbetrieb müssen Standorte für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben entsprechend angepasst werden. Insbesondere bei rein elektrisch betriebenen Bussen und der damit verbundenen Ladeinfrastruktur können neue Platzanforderungen entstehen. Dies betrifft nicht nur die Fahrzeugabstellung selbst, sondern auch die erforderlichen Verkehrs-, Abstands- und Bewegungsflächen zwischen den Fahrzeugen und den Versorgungseinrichtungen.

Besondere Beachtung muss dem Platzbedarf für Elektrobusse geschenkt werden. Neben den Fahrzeugen müssen auch die erforderlichen Infrastrukturelemente wie Ladesäulen, Trafos und Steuerungseinheiten berücksichtigt werden. Die genaue Platzierung dieser Elemente hängt vom jeweiligen Ladekonzept ab und erfordert ausreichend Verkehrs- und Fluchtwege gemäß den geltenden Sicherheitsstandards.

Ein weiterer wichtiger Faktor sind die Gesamtmaße der Fahrzeuge, insbesondere bei Gelenkbussen, und die entsprechenden Kurvenradien für die Zugänglichkeit der Stellplätze bei der Ein- und Ausfahrt. Dies stellt sicher, dass die Busse sicher manövrieren können, ohne andere Fahrzeuge oder Strukturen zu beeinträchtigen.

Die Anordnung der Stellplätze kann ebenfalls variieren, je nach den örtlichen Gegebenheiten und den betrieblichen Anforderungen. Dies umfasst die Wahl zwischen parallelen oder in Reihe angeordneten Stellplätzen, Blockaufstellung oder Schrägaufstellung in Einzel- oder Doppelreihen sowie Vor-Kopf-Parken oder Durchfahrtparken. Jede Anordnung hat ihre eigenen Vor- und Nachteile, die sorgfältig abgewogen werden müssen, um eine effiziente Nutzung des verfügbaren Platzes zu gewährleisten.

Insgesamt erfordert die Machbarkeitsprüfung von Standorten für Ladeinfrastruktur für Busse eine ganzheitliche Betrachtung, die sowohl technische als auch betriebliche Anforderungen berücksichtigt, um eine optimale Lösung zu finden, die den Bedürfnissen des Busbetriebs entspricht.

Flächenbedarf für Busabstellanlagen und Integration von Ladeinfrastruktur

Der Flächenbedarf für Busabstellanlagen variiert stark je nach Ladekonzept und den spezifischen Anforderungen an die Infrastruktur. Im Folgenden werden verschiedene Ladekonzepte und deren Auswirkungen auf den Flächenbedarf und die Ladeinfrastruktur betrachtet.

Variante A - Betriebshof: Pantograph (siehe Abbildung 28)

- Das Laden erfolgt über eine Brückenkonstruktion und das automatische Herstellen des Ladekontakts, wenn sich ein Bus darunter an der korrekten Position befindet. Mehrere Busse können parallel nebeneinanderstehend geladen werden. Der Platzbedarf am Boden ergibt sich aus den Aufstellflächen der Busse und der Stützpfeiler der Ladebrücke sowie der dazwischenliegenden Mindestsicherheitsabstände.
- Es ist möglich, den Ladebereich als Durchfahrt anzuordnen, um Rangiervorgänge oder Rückwärtsfahrten auszuschließen oder zu unterbinden (je nach übriger Gestaltung und Flächenverfügbarkeit des Betriebshofs)

Variante B - Betriebshof: Ladesäule (siehe Abbildung 43 in Anhang A.3)

- Das Laden erfolgt durch manuelles Herstellen des Ladekontakts zwischen einer am Boden stehender Ladesäule und einer Ladebuchse an der Buskarosserie.
- Die Anordnung der Ladesäulen ist entweder als Durchfahrt oder „Vor Kopf“-Lösung realisierbar. Im ersteren Fall ergibt sich ein höherer Flächenbedarf als bei der Pantograph-Lösung, da von einer zwischen den Bussen stehenden Ladesäule immer nur die benachbarten zwei Busse geladen werden können. Die „Vor-Kopf“-Lösung kann unter Umständen flächeneffizienter sein, zu beachten sind jedoch die Ein- und Ausfahrvorgänge, die das Rangieren und Rückwärtsfahren erfordern. Durch die notwendigen Schleppkurven kann dabei der Flächenvorteil aufgezehrt werden, auch birgt das Rückwärtsfahren stets ein erhöhtes Sicherheitsrisiko.
- Für Gelenkbusse ist nur die Anordnung als Durchfahrtslösung geeignet
- Das Manuelle Herstellen des Ladekontakts erfordert ggf. mehr Zeit und Personalressourcen. Ggf. ist jedoch weniger Präzision beim Einparken als bei einer automatischen Herstellung des Ladekontakts notwendig
- Eine Variante mit Ladesäule als Durchfahrtskonzept wäre weitestgehend analog der Variante D anzuordnen.

Variante C - Gelegenheitsladestandort: Pantograph (siehe Abbildung 44 in Anhang A.3)

- Platzierung parallel zum Straßenrand ermöglicht eine einfache Durchfahrt und effiziente Nutzung des Platzes.
- Mehrere Busse können parallel parken, wobei die Dimensionierung entscheidend ist. Mehrere Ladekontakte können über eine Mittelinsel und nicht parallel zum Straßenrand angeordnet sein.
- Pantograph via Ladekontakt oder Kontakthaube erfordert etwas Platz am Boden, kann jedoch flexibel an End- oder Zwischenhaltestellen installiert werden.
- Diese Anordnung ist für End- oder Zwischenhaltestellen geeignet, da sie wenig zusätzlichen Platz beansprucht und die Durchfahrtsmöglichkeiten erhält.
- Die Versorgung „von oben“ reduziert die Wahrscheinlichkeit von Schäden durch Vandalismus

Variante D - Gelegenheitsladestandort: Ladesäule (siehe Abbildung 45 in Anhang A.3)

- Ein Ladepunkt am Straßenrand erfordert minimalen zusätzlichen Platz, was die Integration in bestehende Straßennetze erleichtert.
- Bei der Nutzung einer Mittelinsel ist Platz für zwei Ladekabel notwendig, was mehr Raum beansprucht, jedoch die Ladeeffizienz erhöhen kann.
- Ladesäulen am Boden, entweder am Straßenrand oder auf einer Mittelinsel, ermöglichen manuelles Stecken des Ladekabels.
- Diese Lösung bietet Flexibilität und kann leicht an verschiedenen Standorten entlang der Route implementiert werden, sowohl an Endhaltestellen als auch an stark frequentierten Zwischenhaltestellen.

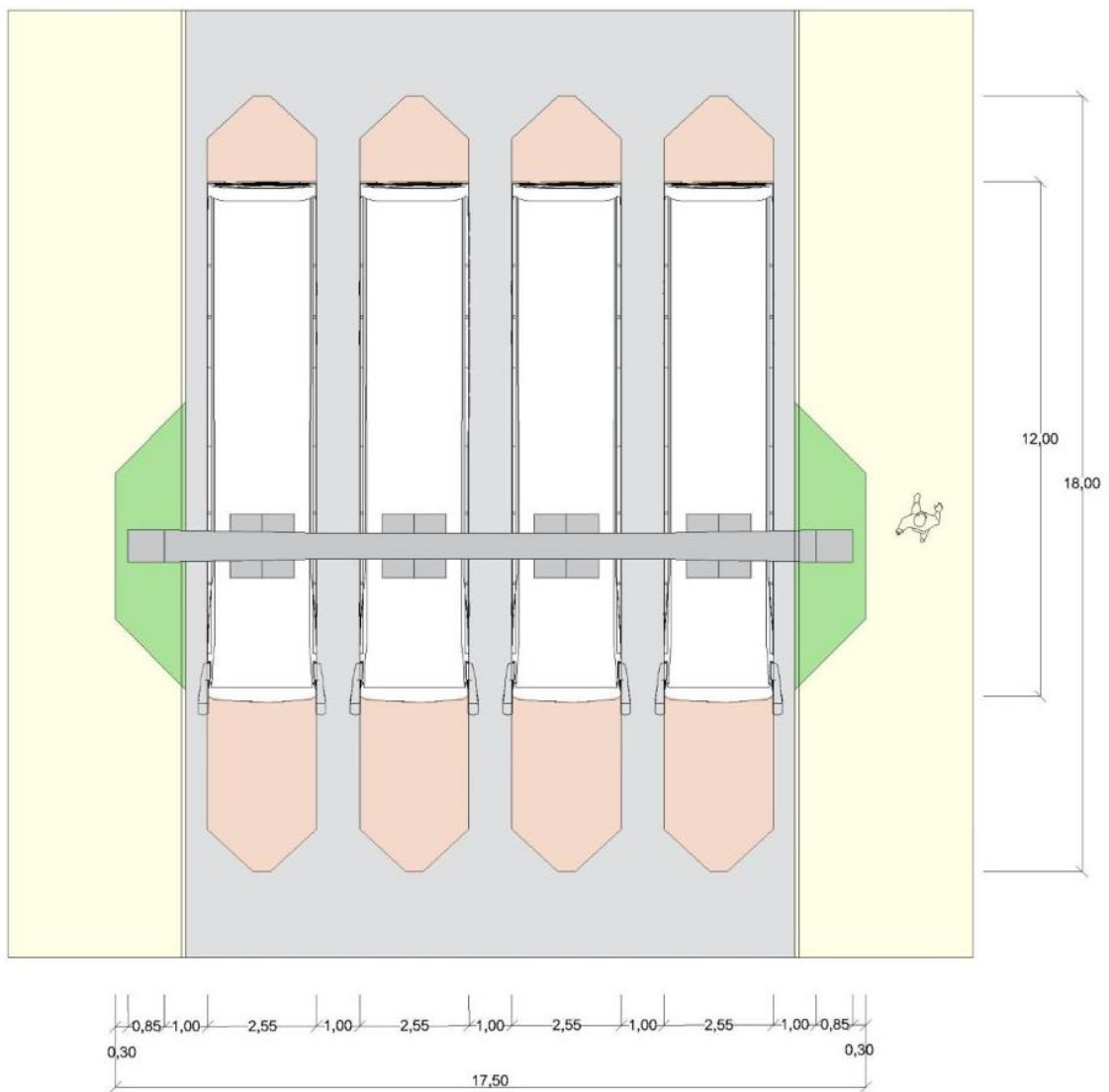
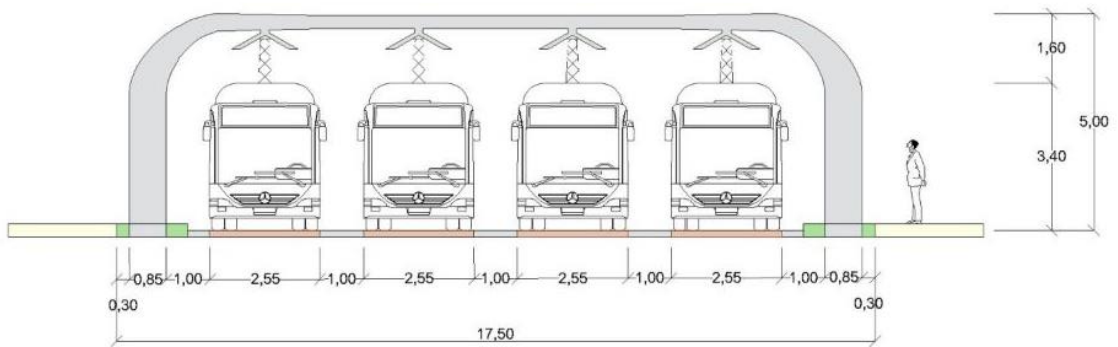


Abbildung 28 Skizze für den Flächenbedarf von Busabstellstandorten mit Ladeinfrastruktur Variante A: Betriebshof, Pantograph⁶⁰

Hinweis: Skizzen zu den weiteren Varianten für Busabstellkonzepte befinden sich in Anhang A.3.

⁶⁰ Auf Basis VDV Schriften 822, 825 und 260

Der Flächenbedarf und die Integration der Ladeinfrastruktur hängen stark vom gewählten Ladekonzept ab. Hierbei müssen ggf. weitere, durchaus signifikante Platzbedarfe und Abstände (u.a. aufgrund maximaler Kabellängen) für Transformatorstation und weitere Steuerungs- und Elektrotechnik berücksichtigt werden. Betriebshöfe mit Durchfahrt und parallelem Parken (Variante A) nutzen den Platz effizient und benötigen keine zusätzlichen Bodenflächen für Ladesäulen. Betriebshöfe mit vor Kopf parkenden Bussen (Variante B) benötigen mehr Platz für die Schleppkurven und zusätzliche Bodenflächen für Ladesäulen. Gelegenheitsladestandorte (Varianten C und D) bieten flexible Lösungen sowohl parallel zum Straßenrand als auch auf Mittelinseln, wobei der Platzbedarf variiert je nach Anzahl der Ladestationen und deren Anordnung.

Machbarkeitsprüfung im Austausch mit dem lokalen Netzbetreiber

Ein wichtiger Aspekt, der bei der Planung der Versorgungsinfrastruktur für batterieelektrische Busse berücksichtigt werden muss, ist der Netzanschluss und die damit verbundenen potenziellen Kosten. Die Ladestationen müssen an das Stromnetz angeschlossen werden, was sowohl infrastrukturelle als auch finanzielle Herausforderungen mit sich bringen kann. Bei der Auswahl der Standorte müssen daher die Kosten für den Netzanschluss sowie mögliche Upgrades berücksichtigt werden, um sicherzustellen, dass die Ladestationen kosteneffizient betrieben werden können. Darüber hinaus müssen potenzielle Standorte möglicherweise mit zusätzlichen Einrichtungen ausgestattet werden, um eine zuverlässige Stromversorgung zu gewährleisten und Engpässe im Netz zu vermeiden.

Der Austausch mit dem lokalen Netzbetreiber spielt hierbei eine entscheidende Rolle, da die Ladung von batterieelektrischen Bussen eine erhebliche Menge an Strom benötigen. Nach ersten Gesprächen mit AllgäuNetz zum schrittweisen Vorhaben einer Elektrifizierung des ÖSPV stellt die Bereitstellung der notwendigen Energiemengen an den meisten Orten im Landkreis, selbst bei einer vollständigen Elektrifizierung, kein Hindernis dar.⁶¹ Dennoch wird eine vorausschauende und integrierte Planung mit regelmäßigem Austausch aller beteiligten lokalen Akteure empfohlen.

Gemeinsam sollte sichergestellt werden, dass das Stromnetz die zusätzliche Belastung bewältigen kann und dass die Infrastruktur entsprechend dimensioniert ist, um einen zuverlässigen Betrieb zu gewährleisten.

Relevante Schritte hierbei sind u.a.:

- Allgemeiner wiederkehrender Austausch mit dem lokalen Netzbetreiber zum Vorhaben der Elektrifizierung
- Kapazitätsprüfung spezifischer Standorte
- Prüfung der Netzanschlusskosten spezifischer Standorte
- Abstimmung von technischen Anforderungen
- Netzanschlussanfrage stellen

⁶¹ Gespräch zwischen AllgäuNetz, dem LRA OA und Ramboll im Februar 2024.

8. Zeit- und Meilensteinplanung für die Umrüstung

Die Zeit- und Meilensteinplanung für die Umrüstung der ÖSPV-Busflotte im Landkreis Oberallgäu ist von entscheidender Bedeutung, insbesondere vor dem Hintergrund der rechtlichen Grundlagen und Quoten der CVD. Mit einem geplanten Quotenanstieg ab dem Jahr 2026 wird der Zeitpunkt der Vergabe äußerst relevant (siehe Abbildung 29).

Wie bereits in Kapitel 2.2 erläutert, gibt der öffentliche Auftraggeber im Rahmen eines Dienstleistungsauftrags die Nutzung einer bestimmten Anzahl von Fahrzeugen für die Erbringung einer Dienstleistung in Auftrag. Dabei wird die Anzahl der Fahrzeuge, die der Dienstleister für die Dienstleistung nutzt, unabhängig davon gezählt, ob es sich um Neufahrzeuge handelt oder bereits vorhandene Fahrzeuge. Das zu berücksichtigende Datum für die Berechnung der Mindestziele oder -quoten ist das Datum der Auftragsvergabe, unabhängig von der tatsächlichen Lieferung der Fahrzeuge.

Wie in der folgenden Abbildung 29 aufgezeigt, ist die Planung der Elektrifizierung der Busflotte und Betriebshöfe schon weit vor Vergabezeitpunkten und auch fortlaufend danach ein aktives Thema.

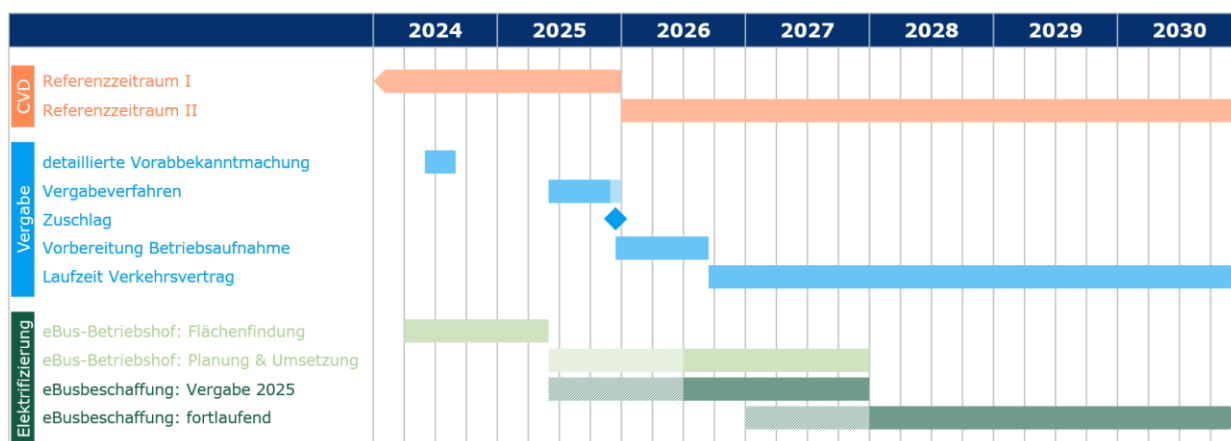


Abbildung 29 Mittelfristiger Zeitplan mit Blick auf die Vergabe der öffentlichen Verkehrsdienstleistung

Die dargestellten CVD-Referenzzeiträume spielen in der zeitlichen Planung eine entscheidende übergeordnete Rolle. Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, können die Anforderungen der CVD durch die Beschaffung emissionsfreier und teilweise emissionsarmer Fahrzeuge erfüllt werden. Mit Blick auf die Vergabe in 2025 – sowie darüber hinaus erneut zu Mitte der 2030er Jahre – zeigen sich die in Abbildung 30 dargestellten Quoten. Die unterschiedlichen Quoten ergeben sich wie folgt:

- **Referenzszenario:** Beschaffung im Zuge der Vergabe im Jahr 2025 anhand der Quoten des CVD-Referenzzeitraums I (2021-2025), sowie die Beschaffung im Zuge einer möglichen Vergabe im Jahr 2035 unter der Annahme einer bis dahin stagnierenden Quote des CVD-Referenzzeitraums II (2026-2030)
- **Szenario A:** Beschaffung im Zuge der Vergabe im Jahr 2025 anhand der Quoten des CVD-Referenzzeitraums I, sowie die Beschaffung im Zuge einer möglichen Vergabe im Jahr 2035 unter der Annahme einer linear ansteigenden Quote für einen CVD-Referenzzeitraums III
- **Szenario B:** Beschaffung im Zuge der Vergabe im Jahr 2025 anhand der Quoten des CVD-Referenzzeitraums I inkl. einer möglichen Übererfüllung emissionsarmer (bspw. batterieelektrischer) Busse, sowie die Beschaffung im Zuge einer möglichen Vergabe im Jahr 2035 mit Blick auf das Ziel des Landkreises der Klimaneutralität im Jahr 2035. ⁶²

⁶² LRA OA (2022)

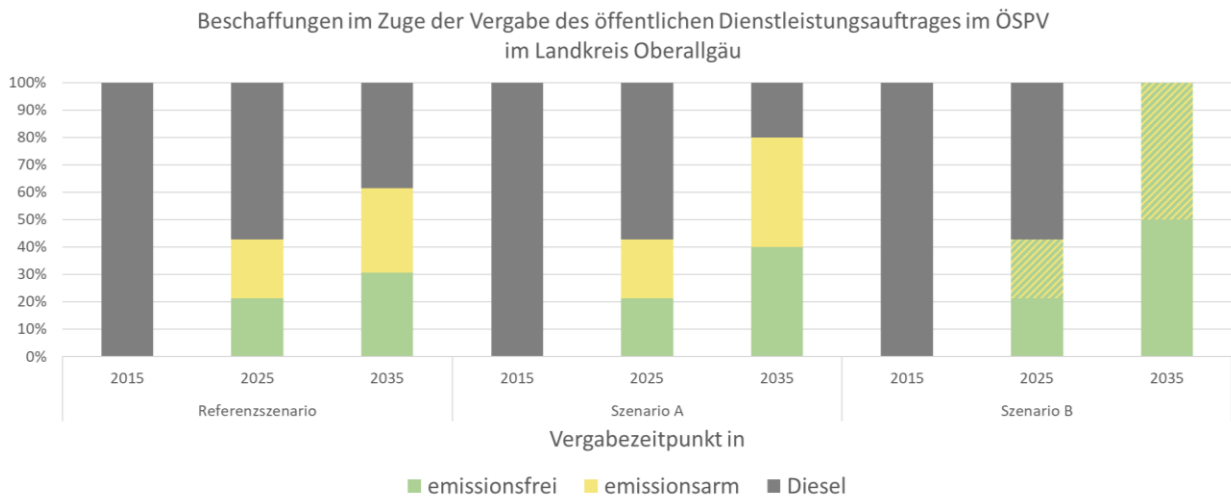


Abbildung 30 Beschaffung im Zuge der Vergabe des öffentlichen Dienstleistungsauftrages im ÖSPV anhand von drei Szenarien

Über die zeitliche Perspektive hinaus, zeigt die Betrachtung der vergangenen Flottenentwicklung und des Antriebsmixes im Landkreis Oberallgäu, dass in den letzten Jahren keine signifikante Elektrifizierung stattgefunden hat und nur eine geringe Anzahl von Elektrobussen angeschafft wurde (siehe Abbildung 31). Dies stellt eine bedeutende Herausforderung für die Erfüllung der CVD-Quoten zum Zeitpunkt der Vergabe dar.

Ein positives lokales Vorreiterbeispiel ist die Elektrifizierung der Ringlinien in Kempten, auf der derzeit 16 Elektrobuse im Einsatz sind und in Zukunft 27 Elektrobuse eingesetzt werden sollen. Obwohl diese nicht direkt zum Untersuchungsgebiet des Landkreises gehören, dürften sie dennoch einen positiven Einfluss und lokalen Erfahrungsgewinn mit sich bringen.

Die stufenweise Umrüstung der Busflotte auf alternative Antriebe kann entsprechend unterschiedlichen Entwicklungen folgen. Im Falle des Referenzszenarios werden die Fahrzeugneuzulassungen in Abbildung 31 dargestellt. Der Verlauf unterliegt folgenden Annahmen:

- IST-Verlauf bis einschließlich 2024 ⁶³
- Eine vereinfachte, gleichmäßig aufgeteilte Anschaffung von batterieelektrischen Bussen in den Jahren 2026 und 2027 im Zuge der CVD-Quotenerfüllung bei der Vergabe im Jahr 2025. Grund hierfür können u.a. Lieferzeiten der Fahrzeuge sein.
- Keine fortlaufende Elektrifizierung der Busflotte außerhalb von Zeitpunkten einer Neuvergabe der öffentlichen Verkehrsdienstleistung
- Erneute Anschaffungen von weiteren batterieelektrischen Bussen im Zuge der CVD-Quotenerfüllung bei einer möglichen Vergabe im Jahr 2035
- Die Umstellung der Bestandsflotte von Diesel-Verbrenner-Bussen von fossilem Diesel auf bspw. biogenen Diesel wird nicht als zwangsläufige Busneuzulassung aufgeführt (Abbildung 31), allerdings im Folgenden im Busbestand (Abbildung 32) berücksichtigt.

⁶³ Auf Basis der vorliegenden Informationen zu Fahrzeugneuzulassungen im Landkreis Oberallgäu der vergangenen Jahre.

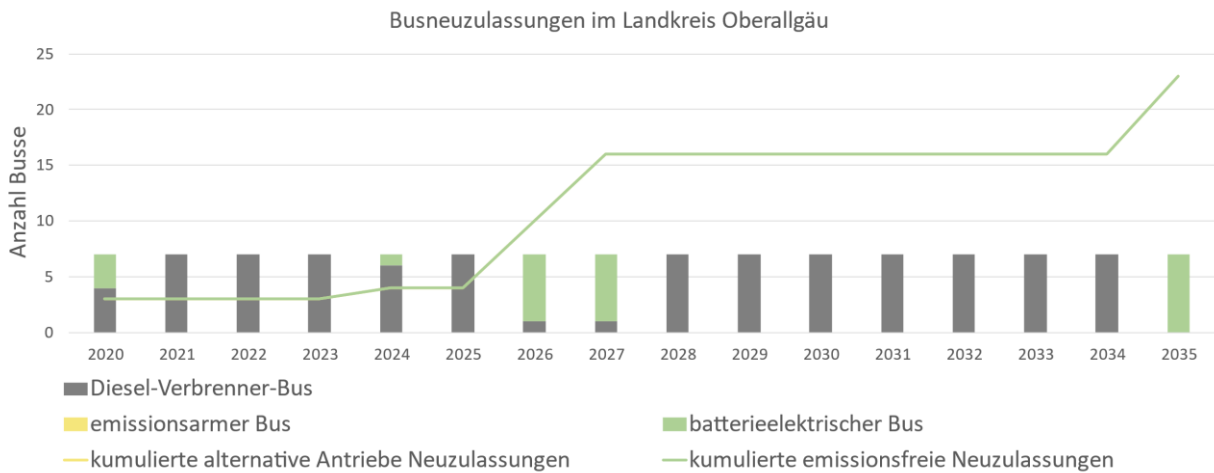


Abbildung 31 Busneuzulassungen im Landkreis Oberallgäu: Referenzszenario

Der beschriebene Verlauf der Busneuzulassungszahlen im Referenzszenario spiegelt sich entsprechend im Busbestand wider und ist in Abbildung 32 dargestellt.

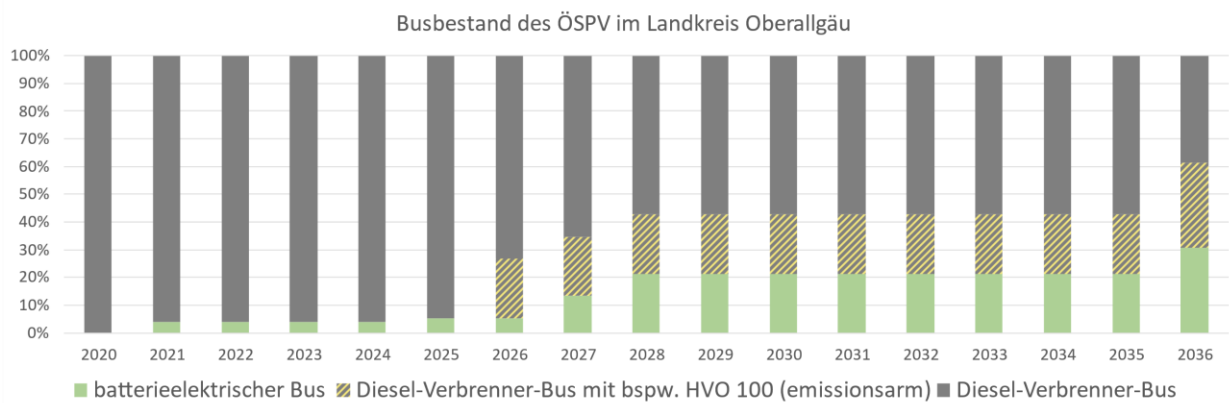


Abbildung 32 Busbestand des ÖSPV im Landkreis Oberallgäu: Referenzszenario

In der folgenden Abbildung 33 wird beispielhaft eine Bestandsentwicklung einer fortlaufenden Elektrifizierung - losgelöst von Vergabezeitpunkten – skizziert. Diese Entwicklung ist vergleichbar mit dem **Szenario B** und nimmt die Vergabe im Jahr 2025 als Auslöser für eine kontinuierliche und auf das Ziel der Klimaneutralität des Landkreises im Jahr 2035 ausgerichtete Entwicklung.

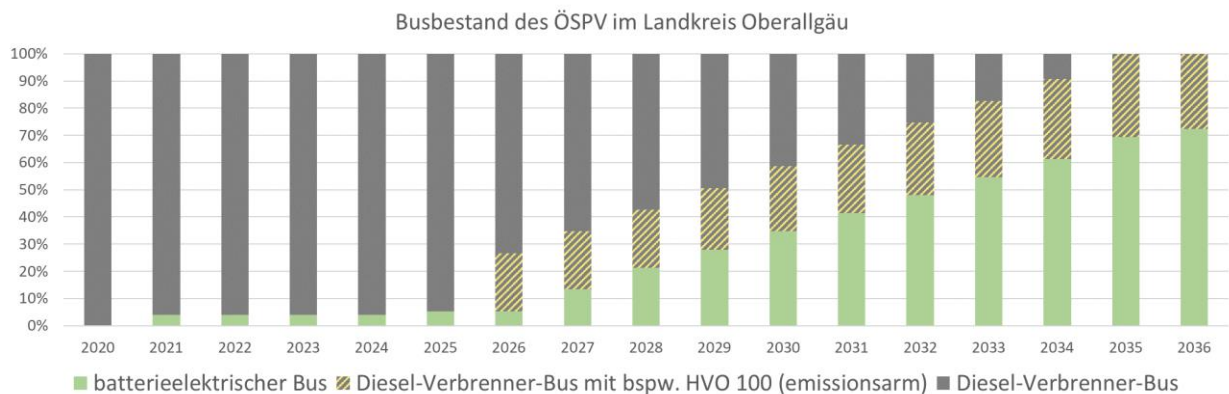


Abbildung 33 Darstellung einer beispielhaften Bestandsentwicklung einer fortlaufenden Elektrifizierung (Szenario B)

Trotz der scheinbar weitreichenden Betrachtung in die Zukunft ist es entscheidend, nicht nur die bevorstehende Vergabe im Jahr 2025 zu berücksichtigen, sondern auch die folgende Vergabe im Jahr 2035 im Blick zu behalten. Voraussichtlich wird im Jahr 2035 eine erneut höhere CVD-Quote anfallen, deren genaue Höhe jedoch zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht abgeschätzt werden kann (siehe Beschreibung der Szenarien A und B).

Die bevorstehende Vergabe im Jahr 2025 stellt die Weichen für die Antriebswende und Defossilisierung des ÖSPV im Landkreis Oberallgäu. Sie legt den Grundstein für die zukünftige Entwicklung der Antriebstechnologien im Flottenbestand und ist somit von entscheidender Bedeutung für die Emissionsreduktion des öffentlichen Verkehrs.

Es ist daher von großer Bedeutung, dass im Laufe der Laufzeit des Verkehrsvertrages weiterhin eine positive emissionsreduzierende Entwicklung vorangetrieben wird. Die Zwischenphase darf nicht als Stagnationsphase dienen (siehe Phase III in Abbildung 34), sondern muss vielmehr genutzt werden, um die Elektrifizierung und den Einsatz anderer umweltfreundlicheren Antriebstechnologien kontinuierlich voranzutreiben (vgl. eBusbeschaffung in Abbildung 29). Nur so kann langfristig ein fossilfreier und emissionsfreier öffentlicher Personenverkehr im Landkreis Oberallgäu gewährleistet werden.

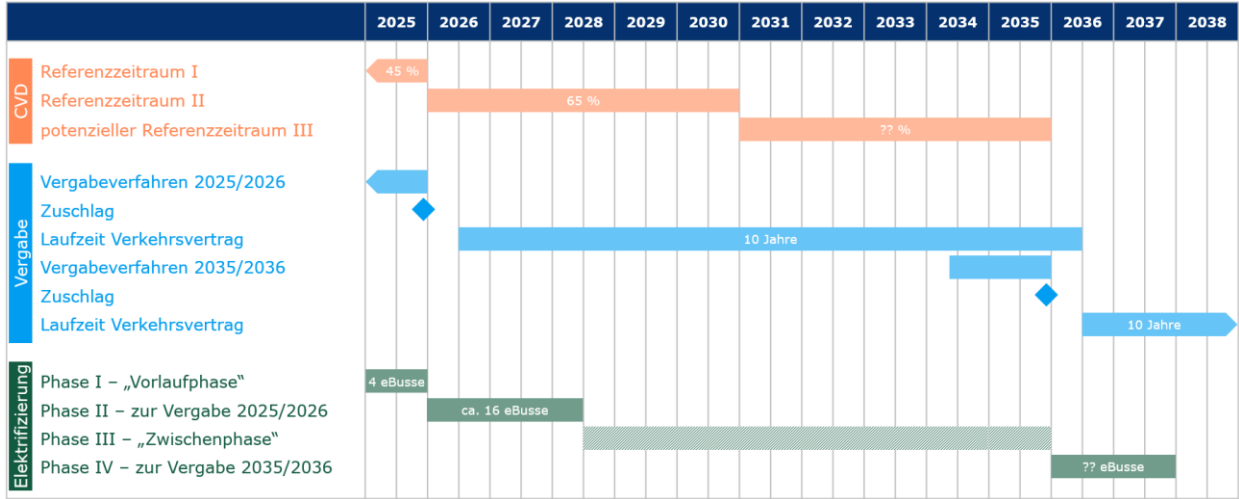


Abbildung 34 Langfristiger Zeitplan mit Blick auf Vergabe und Laufzeit der öffentlichen Verkehrsdienstleistung

9. Primärenergetische und umweltbilanzielle Betrachtung

Im Folgenden werden der Primärenergiebedarf und die Emissionsbilanz des ÖSPV im Landkreis Oberallgäu betrachtet. Unter Berücksichtigung der CVD sowie im Rahmen des *Masterplans 100% Klimaschutz 2022-2035*⁶⁴ des Landkreises Oberallgäu spielen sowohl der Primärenergiebedarf des Verkehrs sowie der einzelnen Energieträger als auch die Emissionen im Verkehr eine maßgebliche Rolle.

Für die Betrachtung werden die beiden zuvor aufgeführten Szenarien berücksichtigt und auf Basis des Busbestands und dessen Antriebsmixentwicklung im ÖPNV im Landkreis Oberallgäu analysiert. Auf Grundlage der detaillierten Betrachtung der Fahrzeugfahrleistungen in der Energieanalyse in Kapitel 4 wird in beiden folgenden Betrachtungen eine Jahresfahrleistung von ca. 9,5 Mio. Fahrzeugkilometern angenommen. Die CVD fordert den verstärkten Einsatz emissionsarmer und emissionsfreier Fahrzeuge, was zu einer signifikanten Reduktion der verkehrsbedingten Emissionen beitragen soll. Im Einklang einer klimafreundlichen Mobilität gilt es gleichzeitig den ÖPNV zu stärken und gleichzeitig den CO₂-Ausstoß im Verkehr deutlich zu senken und den Energiebedarf durch den Einsatz effizienter Antriebstechnologien zu optimieren.

9.1 Betrachtung des Primärenergiebedarfs

Die Abbildung 35 zeigt die Entwicklung des Primärenergiebedarfs auf Basis des Referenzszenarios. Die Entwicklung illustriert eine Reduktion des fossilen Dieselbedarfs um rund 40 % bis zum Jahr 2028. Hierbei ist zu erwähnen, dass etwa die Hälfte dieser Bedarfsreduktion auf die direkte Substitution durch biogenen Diesel zurückzuführen ist. Diese Veränderung zeigt eine deutliche Tendenz hin zu alternativen Kraftstoffen, jedoch bleibt der Anteil an biogenem Diesel beträchtlich.

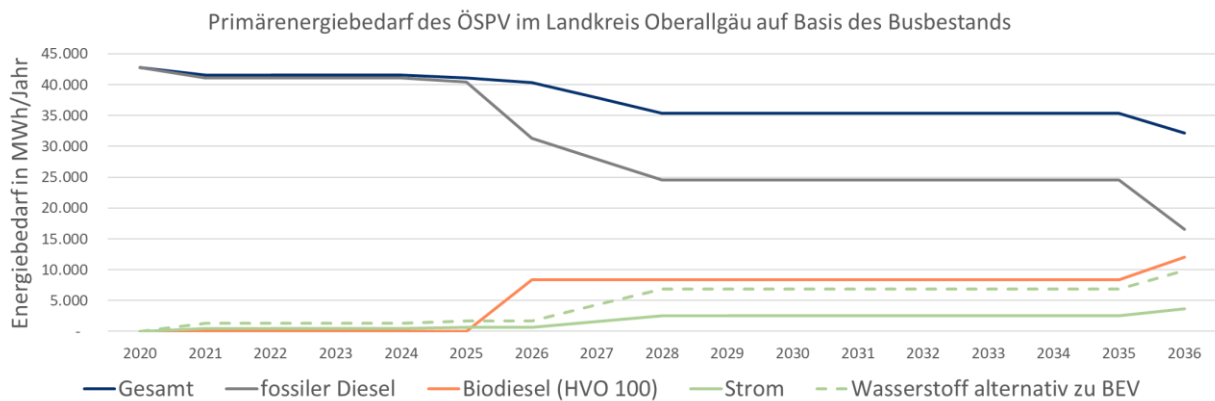


Abbildung 35 Primärenergiebedarf des ÖSPV im Landkreis Oberallgäu: Referenzszenario

Die Abbildung 36 zeigt die Entwicklung des Primärenergiebedarfs auf Basis des Szenario B. Dieses Szenario prognostiziert eine vollumfängliche Reduktion des fossilen Dieselbedarfs unter einem weitestgehend linearen Verlauf bis zum Jahr 2035. Interessanterweise lässt sich die Bedarfsreduktion in diesem Szenario nur zu 30 % auf die Substitution durch biogenen Diesel zurückführen. Der bedeutendere Faktor ist hier die umfangreiche Integration emissionsfreier Antriebe ab 2025 und vor allem ein weitreichender Hochlauf des Betriebs mit diesen Antrieben bis 2035. Diese Entwicklung unterstreicht die Rolle innovativer Technologien und den Übergang zu nachhaltigen Mobilitätslösungen.

⁶⁴ LRA OA (2022): Masterplan 100% Klimaschutz des Landkreises Oberallgäu

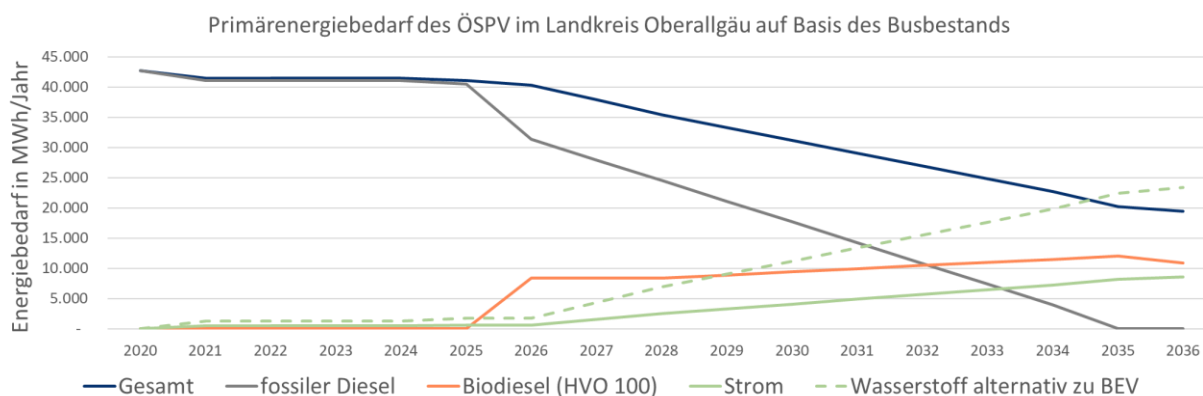


Abbildung 36 Primärenergiebedarf des ÖSPV im Landkreis Oberallgäu: Szenario B

Wasserstoff als Alternative zu batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) ist in beiden Abbildungen lediglich als Vergleichsgröße aufgeführt. Diese Darstellung soll verdeutlichen, welche signifikanten Auswirkungen die Wahl von Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV), bei denen Wasserstoff als Energieträger verwendet wird, im Gegensatz zur direkten Nutzung von Strom in BEV auf den Primärenergiebedarf des ÖSPV im Landkreis Oberallgäu hätte. Die Betrachtung macht deutlich, dass die Wahl des Energieträgers entscheidend für die Effizienz und den Primärenergiebedarf ist und somit weitreichende Implikationen für die energetische, aber auch ökonomische Zukunftsfähigkeit des ÖSPV hat.

9.2 Emissionsbetrachtung

Im folgenden Abschnitt wird die Emissionsbilanz im Bestand sowie in den zuvor in Kapitel 8 beschriebenen Entwicklungsszenarien in Bezug auf eine Flottenumstellung auf alternative Antriebe betrachtet. Die Abbildung 37 zeigt die Entwicklung der Emissionen im ÖSPV im Landkreis Oberallgäu entlang des Referenzszenarios und des Szenario B - mit einer fortlaufenden Umstellung auf alternative Antriebe.

Die THG-Emissionen durch den Einsatz von biomassebasierten Kraftstoffen werden je nach Fragestellung und Kontext sehr unterschiedlich berechnet. Für diese Untersuchung werden die THG-Emissionen in Anlehnung an die Methodik der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED) bestimmt.⁶⁵ Emissionen beruhen im Status Quo im ÖSPV nahezu ausschließlich auf der Verbrennung von fossilem Dieselmotorkraftstoff. Die Entwicklung zeigt insgesamt eine Emissionsreduktion von rund 40 % bis zum Jahr 2028. Hierbei ist zu erwähnen, dass die direkte Substitution durch biogenen Diesel etwa 80% Emissionsreduktion zur Folge hat. Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, entstehen bei der Verbrennung von biogenem Kraftstoff lokal nur insignifikant weniger Emissionen als beim fossilen Diesel. Allerdings sind entlang der gesamten Wertschöpfung von Biokraftstoffen die Emissionen signifikant niedriger als beim fossilen Diesel und entsprechend in der Emissionsbilanzierung im Verkehr zu berücksichtigen.

Nach 2028 unterscheiden sich die Emissionsverläufe der beiden Szenarien. Während die Emissionen im Referenzszenario bis einschließlich 2035 konstant verlaufen und lediglich im Zuge einer möglichen Vergabe im Jahr 2035 durch die weitere Einführung von Elektrobussen (siehe Abbildung 32) sinken, ist im Szenario B eine kontinuierliche Emissionsreduktion zu erkennen. Bis 2035 kann ein nahezu emissionsneutraler ÖSPV bilanziert werden. Dies setzt sich aus einem Busbestand von mehr als 70% Elektrobussen, dem Rest Diesel-Verbrenner-Busse mit Biokraftstoffen und keinerlei fossilem Diesel im Jahr 2035 zusammen (siehe Abbildung 33).

⁶⁵ UBA (2019)

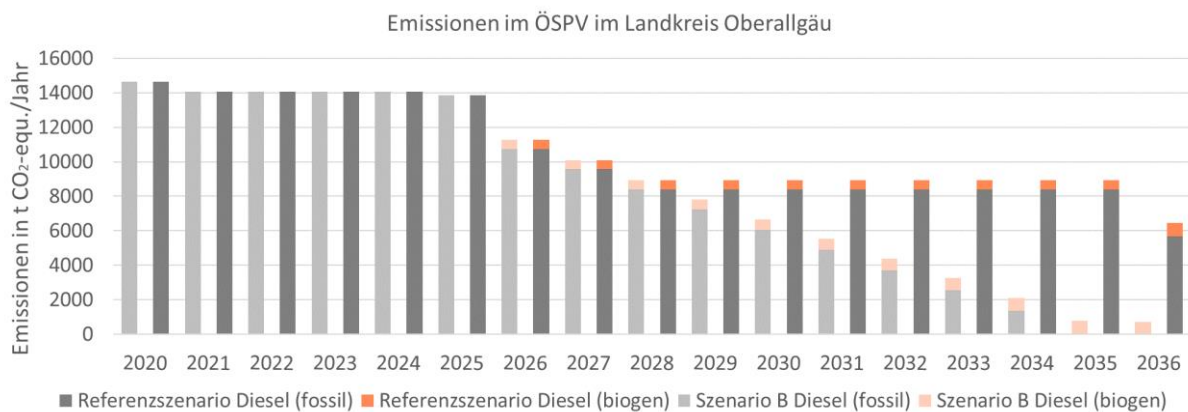


Abbildung 37 Emissionsbilanz im ÖSPV im Landkreis Oberallgäu: Vergleich zwischen Referenzszenario und Szenario B

Die Betrachtung zeigt, dass durch die gezielte Umstellung auf emissionsarme und emissionsfreie Antriebstechnologien im ÖPNV des Landkreises Oberallgäu sowohl der Primärenergiebedarf als auch die verkehrsbedingten Emissionen signifikant gesenkt werden können. Während im Referenzszenario der Fortschritt durch die langsame Einführung von Elektrobussen bis 2035 begrenzt ist, bietet Szenario B eine deutlich ambitioniertere und effektivere Reduktion der Emissionen durch eine konsequente Integration von Elektrobussen und eine ergänzende Überbrückung einzelner Fahrzeuge durch (vor allem) biogene Kraftstoffe ab 2025. Diese Maßnahmen sind essenziell, um die Klimaschutzziele des Landkreises zu erreichen und einen nachhaltigen Beitrag zum Umweltschutz zu leisten.

10. Zusammenfassung und Fazit

Die Machbarkeitsstudie zur Einführung erneuerbarer Antriebe für den Busverkehr im Landkreis Oberallgäu zeigt, dass der ÖSPV in dieser Region noch am Anfang der Umstellung auf emissionsfreie Antriebstechnologien steht. Derzeit gibt es nur punktuelle Erfahrungen mit Elektrobussen, sowohl im Landkreis selbst als auch in der anliegenden Stadt Kempten. Die Studie beleuchtet die Herausforderungen, die ein großflächiger, weitgehend ländlicher Landkreis mit peripherer Lage und 16 verschiedenen Busverkehrsunternehmen, die oft kleine Fahrzeugflotten und Betriebshöfe betreiben, mit sich bringt.

Batterieelektrische Busse stellen bereits heute und vor allem aber mit Blick auf die Zeit bis 2030 die ökonomisch bevorzugte Technologie dar. Im Gegensatz dazu sind brennstoffzellenelektrische Busse (FCEV) mit Wasserstoff keine wirtschaftlich attraktive Alternative. Diese Technologie ist im Gesamtumfang (inkl. Infrastruktur) sowohl technisch als auch betrieblich deutlich komplexer und aufwändiger. Daher sind batterieelektrische Busse das zentrale Element zur Dekarbonisierung des ÖSPV im Oberallgäu.

Die Untersuchung der Fahrleistungen je Linie und Fahrzeug hat ergeben, dass einige Linien einen signifikanten Tagesenergiebedarf pro Fahrzeug aufweisen. Trotz dieser Herausforderungen ist die technische und betriebliche Machbarkeit gegeben. Dies kann durch die Wahl von Fahrzeugen mit entsprechenden Batteriekapazitäten, ein geeignetes Ladekonzept für einzelne Linien und eine detaillierte Fahrzeugeinsatzplanung sichergestellt werden.

Ein entscheidender Aspekt ist die geografische Verortung des tatsächlichen Energiebedarfs entlang eines Elektrifizierungshochlaufs des ÖSPV. Dies betrifft insbesondere die Lade- und Busabstellstandorte. Nach Aussagen des lokalen Netzbetreibers AllgäuNetz stellen die resultierenden Energiemengen des ÖSPV, selbst bei vollständiger Elektrifizierung, kein Hindernis dar. Dennoch wird empfohlen, für die Elektrifizierung eine vorausschauende und integrierte Planung mit allen beteiligten lokalen Akteuren anzustreben und einen regelmäßigen Austausch zu pflegen.

Der Status Quo der Emissionen im ÖSPV ist fast ausschließlich auf den Einsatz von fossilem Diesel zurückzuführen. Ein erhebliches Emissionsreduktionspotenzial besteht bei der Umstellung auf alternative Antriebe. Besonders emissionsfreie Antriebe wie Elektrobusse bieten das größte Potenzial zur Reduktion von Treibhausgasen und Luftschadstoffen.

Bei der Betrachtung alternativer Kraftstoffe zum fossilen Diesel spielen sowohl die kurzfristige Verfügbarkeit als auch die mittelfristige Verfügbarkeit und Skalierbarkeit eine entscheidende Rolle. Synthetische Kraftstoffe werden vor 2030 voraussichtlich nicht in nennenswerten Mengen verfügbar sein. Bei biogenen Kraftstoffen ist zu erwarten, dass die begrenzten Mengenpotenziale die Kraftstoffpreise beeinflussen werden. Schon heute kosten biogene Dieselalternativen etwa 20% mehr als fossiler Diesel. Diese Preisdifferenz könnte sich weiter vergrößern, was die Wirtschaftlichkeit dieser Kraftstoffe in Frage stellt.

Zusammenfassend zeigt die Studie, dass die Umstellung auf batterieelektrische Busse im Oberallgäu technisch machbar und ökonomisch sinnvoll ist. Trotz der geografischen und betrieblichen Herausforderungen kann durch eine sorgfältige Planung und Zusammenarbeit mit lokalen Akteuren eine erfolgreiche Implementierung erreicht werden. Die vollständige Elektrifizierung des ÖSPV bietet ein enormes Potenzial zur Emissionsreduktion und zur Förderung einer nachhaltigen Mobilität im Landkreis Oberallgäu.

Hinsichtlich der Vergabe der Verkehrsleistung müssen Rahmenbedingungen auch bezüglich der Antriebsart formuliert werden. Theoretisch können eigenwirtschaftliche Anträge gestellt werden innerhalb der ersten 3 Monate einer Vorankündigung eines Vergabeverfahrens. Bereits in diesem Stadium bedarf es nicht nur eine Beschreibung der mindestens zu erbringenden Leistung und tariflicher Rahmenbedin-

gungen, sondern auch einer Festlegung von Rahmenbedingungen für die Antriebsart. Für eigenwirtschaftliche Anträge ist jedoch keine direkte Befassung mit einer nötigen Ladeinfrastruktur erforderlich, da grundsätzlich die erforderlichen Energiemengen im Landkreis zur Verfügung gestellt werden können.

Kommt es jedoch zu einer wettbewerblichen Vergabe, so sind seitens des Landkreises kostengünstige Angebote erstrebenswert. Dazu ist die Beistellung von Infrastruktur mit einer deutlichen längeren Abschreibungsdauer als die Verkehrsvertragsdauer (maximal 10 Jahre) hilfreich. Dazu zählen günstig zum Verkehrsgebiet liegende Depot- und Abstellflächen mit möglichem aufwandsarmem Anschluss an das Stromnetz, mit entsprechend hoher Leistung zum Laden der dort abzustellenden Busse und die elektrische Basisausrüstung an Transformatoren und Stromleitungen.

Sinnvoll ist die optionale Beistellung der Infrastruktur, da seitens des Landkreises schwer zu beurteilen ist, welche Komponenten einem Bieter ein besonders günstiges Angebot erlauben. Optional bedeutet, dass einem Bieter freigestellt ist, eine vom Landkreis bereitgestellte Infrastruktur zu nutzen.

Die Beistellung der Infrastruktur muss nicht derart erfolgen, dass der Landkreis sich um die Beschaffung und Errichtung kümmert, sondern dass dieses der Bieter selbst vornimmt. Sinnvollerweise wird dann geregelt, dass mit Ablauf des Verkehrsvertrages die Infrastruktur zu den Restbuchwerten auf den Gewinner des Folgeverkehrsvertrages übergeht; also die Infrastruktur dem Folgevergabeverfahren beigegeben wird. Dazu bedarf es jedoch einer Festlegung, in welcher Qualität die Infrastruktur zu übergeben ist.

Idealerweise stehen sämtliche Busse mit alternativer Antriebstechnik bereits zu Beginn des Verkehrsvertrages zur Verfügung, um sie dann über die maximal mögliche Vertragsdauer von 10 Jahren abzuschreiben⁶⁶. Steht jedoch zu wenig Zeit (bereits weniger als 18 Monate) zwischen Zuschlag und Betriebsaufnahme zur Verfügung, so könnte eine größere Zahl dieser Busse erst verzögert zur Verfügung stehen. Um zu vermeiden, dass zur Kostenreduktion Busse auch einem späteren Vergabeverfahren beigegeben werden müssten, bietet das Vergaberecht die Ausnahmemöglichkeit, den Verkehrsvertrag über die 10 Jahre hinaus auf bis zu 15 Jahre zu verlängern⁶⁷. Diese Möglichkeit sollte während des Vergabeverfahrens genutzt werden. Entsprechend der signalisierten Lieferzeiten und Gewährleistungsdauern kann dann die Vertragsdauer zwischen 10 und 15 Jahren festgesetzt werden. Dazu wird sinnvollerweise ein Verhandlungsverfahren mit Teilnahmewettbewerb angekündigt.

⁶⁶ EU-Verordnung 1370/2007 Artikel 4 Absatz (3)

⁶⁷ EU-Verordnung 1370/2007 Artikel 4 Absatz (4)

Quellenangaben

AGORA Energiewende (2018): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. URL: [Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe \(agora-energiewende.de\)](https://www.agora-energiewende.de).

AGORA Verkehrswende (2019): Klimabilanz von strombasierten Antrieben und Kraftstoffen. URL: [Publikation - Klimabilanz von strombasierten Antrieben und Kraftstoffen - \(agora-verkehrswende.de\)](https://www.agora-verkehrswende.de).

AGORA Verkehrswende (2023): E-Fuels zwischen Wunsch und Wirklichkeit. Diskussionspapier. URL: [Publikation - E-Fuels zwischen Wunsch und Wirklichkeit - \(agora-verkehrswende.de\)](https://www.agora-verkehrswende.de).

BMDV (2024): FAQ zu HVO 100 [BMDV - FAQ zu HVO 100 \(bund.de\)](https://www.bund.de).

BMUV (2023): Alternative Kraftstoffe. URL: [BMUV: Alternative Kraftstoffe | Cluster](https://www.bmuv.de).

BYD (2024): eBus. URL: bydeurope.com/byd-ebus-b13.

Daimler (2024): eCitaro. URL: [eCitaro – Mercedes-Benz Buses \(mercedes-benz-bus.com\)](https://www.mercedes-benz-bus.com).

DVGW (2019): Bewertung von Gasbussen für den öffentlichen Personennahverkehr und Vergleich mit Alternativkonzepten. URL: [g201810-busstudie-abschlussbericht.pdf \(SECURED\) \(dvgw.de\)](https://www.dvgw.de)

Ebusco (2024): Ebusco 2.2. URL: [Ebusco 2.2 - Electric bus city/intercity | 90-130 persons](https://www.ebusco.com).

e-mobil BW (2021): Systemvergleich zwischen Wasserstoffverbrennungsmotor und Brennstoffzelle im schweren Nutzfahrzeug. URL: [e-mobilBW-Studie H2-Systemvergleich.pdf](https://www.e-mobil.de).

Fraunhofer ISI (2019): Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw. Fraunhofer ISI, TUHH, IREES URL: [N-559204.pdf \(fraunhofer.de\)](https://www.fraunhofer.de).

ifeu (2021): Erfolgsfaktoren für einen effektiven Klimaschutz im Straßengüterverkehr – Hintergrundpapier im Rahmen des Projekts BOLD. ifeu, Öko-Institut, Fraunhofer ISI. URL: [ifeu gGmbH: Erfolgsfaktoren für einen effektiven Klimaschutz im Straßengüterverkehr](https://www.ifeu.de).

Ifeu (2019): BISCO – Bilanzierungs-Systematik Kommunal - Empfehlungen zur Methodik der kommunalen Treibhausgasbilanzierung für den Energie- und Verkehrssektor in Deutschland. URL: [ifeu gGmbH: BISCO Bilanzierungs-Systematik Kommunal](https://www.ifeu.de).

INFRAS (2020): Bus-Antriebe im Vergleich: Eine Ökobilanz. Schlussbericht.

KBA (2024): *Statistik, Fahrzeuge nach Kraftstoffarten (Bestand und Neuzulassungen)*.

KCW (2021): Alternative Antriebe im öffentlichen Verkehr.

LRA OA (2022): Masterplan 100% Klimaschutz. URL: [Klimaschutz im Landkreis Oberallgäu \(allgaeu-klimaschutz.de\)](https://www.allgaeu-klimaschutz.de)

MAN (2024): Lions City E. URL: [MAN Lion's City E | MAN DE](https://www.man.de)

NOW (2021): Abschlussbericht - Programmbegleitforschung Innovative Antriebe und Fahrzeuge - Innovative Antriebe im straßengebundenen ÖPNV

NOW (2023): KBA Monatsreport – März 2024.

Öko-Institut (2014): Schlussbericht – Forschungsprojekt „Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energie und Steigerung der Energieeffizienz im öffentlichen Personennahverkehr“.

Ramboll (2023): *eigens durchgeführte Marktabfrage der Verkehrsverbände und -betriebe im Freistaat Sachsen*. Ramboll Deutschland GmbH.

Solaris (2024): Urbino. URL: [Urbino electric \(solarisbus.com\)](https://www.solarisbus.com)

Thinkstep (2015): Prüfprogramm „Effizienz-, Kosten- und Einsatzanalyse für den Linienbetrieb von Diesel-Hybridbussen“. Endbericht.

TU Berlin (2020): *A Comprehensive TCO Evaluation Method for Electric Bus Systems Based on Discrete-Event Simulation Including Bus Scheduling and Charging Infrastructure Optimisation.*

T&E (2022): *Cities are buying more electric buses, but an EU deadline is needed.* Transport & Environment. URL: [Cities are buying more electric buses, but an EU deadline is needed \(transportenvironment.org\)](https://transportenvironment.org).

T&E (2022): Rewarding renewable efficiency. [TE-Briefing-Rewarding-renewable-efficiency.docx.pdf \(transportenvironment.org\)](#).

UBA (2020): Flüssigerdgas-Lkw haben kaum einen Klimavorteil. URL: [Flüssigerdgas-Lkw haben kaum einen Klimavorteil | Umweltbundesamt](#).

UBA (2023): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger - Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2022. URL: [20231219_49_2023_cc_emissionsbilanz_erneuerbarer_energien_2022_bf.pdf \(umweltbundesamt.de\)](#)

UBA (2023): Entwicklung der spezifischen Treibhausgas Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2022. URL: [2023_05_23_climate_change_20-2023_strommix_bf.pdf \(umweltbundesamt.de\)](#).

VDI (2022): Wasserstoff für den Schienenverkehr.

VDL (2024): Citea. URL: [Neue Citea-Generation \(vdlbuscoach.com\)](#).

Zoll (2024): Anrechnung von Biokraftstoffen. URL: [Zoll online - Anrechnung von Biokraftstoffen](#)

Gesetze

CVD: *Clean Vehicle Directive (CVD).* Europäisches Parlament und der Rat der Europäischen Union. URL: [Directive - 2019/1161 - EN - EUR-Lex \(europa.eu\)](#).

KSG: *Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG).* Bundesamt für Justiz (BfJ). URL: [KSG - nichtamtliches Inhaltsverzeichnis \(gesetze-im-internet.de\)](#)

PBefG: *Personenbeförderungsgesetz (PBefG).* Bundesamt für Justiz (BfJ). URL: [PBefG - Personenbeförderungsgesetz \(gesetze-im-internet.de\)](#)

SaubFahrzeugBeschG: *Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz.* URL: [SaubFahrzeugBeschG - Gesetz über die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge \(gesetze-im-internet.de\)](#)

RED III: *Renewable Energy Directive (RED).* Europäisches Parlament und der Rat der Europäischen Union. URL: [Directive - EU - 2023/2413 - EN - Renewable Energy Directive - EUR-Lex \(europa.eu\)](#)

Anhang

A.1 Übersicht Energieverbräuche je Linie und Richtung

Tabelle 12 Simulierte Energieverbräuche je Linie, Richtung und Fahrtenpaar ⁶⁸

Linien Nr.	Richtung	Von	Nach	je Richtung						Paarweise				
				Distanz in km	Fahrzeit in h	Antriebsenergie		Energie in kWh/Distanz		Distanz in km	Fahrzeit in h	Energie in kWh		
						in kWh/km	in kWh/Distanz	A/C	Summe			Antrieb	Klimaanlage	Summe
69*	1	Krugzell	Probstried	7,74	0,26	1,24	9,56	3,87	13,44	15,49	0,52	11,31	7,74	19,05
69*	2	Probstried	Krugzell	7,74	0,26	0,22	1,74	3,87	5,61					
11	1	Bühl	Goimoomühle	24,97	0,83	0,81	20,28	12,49	32,76	49,17	1,64	38,67	24,58	63,25
11	2	Goimoomühle	Bühl	24,20	0,81	0,76	18,39	12,10	30,49					
45/49/50	1	Oberstdorf - Schöllang - Sonthofen	Bad Hindelang - Hinterstein - Giebelhaus	39,44	1,31	1,02	40,22	19,72	59,94	79,19	2,64	59,55	39,60	99,14
45/49/50	2	Giebelhaus - Bad Hindelang	Sonthofen - Schöllang - Oberstdorf	39,76	1,33	0,49	19,32	19,88	39,20					
48	1	Immenstadt	Sonthofen - Oberjoch - Wertach - Oy	47,01	1,57	0,90	42,10	23,50	65,60	94,21	3,14	68,11	47,10	115,21
48	2	Oy - Oberjoch - Sonthofen	Immenstadt	47,20	1,57	0,55	26,01	23,60	49,61					
67	1	Oberstdorf	Sonthofen	14,68	0,49	0,38	5,54	7,34	12,89	29,10	0,97	16,27	14,55	30,82
67	2	Sonthofen	Oberstdorf	14,42	0,48	0,74	10,73	7,21	17,94					
82	1	Immenstadt	Weitnau	20,17	0,67	0,91	18,45	10,09	28,54	40,39	1,35	31,00	20,20	51,19
82	2	Weitnau	Immenstadt	20,22	0,67	0,62	12,54	10,11	22,66					
95	1	Kalzhofen - Oberstaufen	Steibis Hochgratbahn	13,25	0,44	1,17	15,52	6,62	22,14	26,51	0,88	25,27	13,25	38,52
95	2	Hochgratbahn - Steibis	Oberstaufen - Kalzhofen	13,26	0,44	0,74	9,75	6,63	16,38					
20a	1	Blaichach - Burgberg	Sonthofen	7,57	0,25	0,77	5,83	3,78	9,62	15,21	0,51	10,92	7,60	18,53
20a	2	Sonthofen	Burgberg - Blaichach	7,64	0,25	0,67	5,09	3,82	8,91					
20b	1	Staig - Sonthofen	Gunzesried	15,38	0,51	1,20	18,43	7,69	26,13	31,04	1,03	24,97	15,52	40,49
20b	2	Gunzesried	Sonthofen - Staig	15,66	0,52	0,42	6,54	7,83	14,36					
40	1	Kempten Hbf	Wiggensbach	24,49	0,82	0,47	11,53	12,24	23,77	49,63	1,65	24,35	24,81	49,17
40	2	Wiggensbach	Kempten Hbf	25,14	0,84	0,51	12,82	12,57	25,39					
39	1	Immenstadt - Kalzhofen	Oberstaufen	24,42	0,81	0,84	20,51	12,21	32,72	43,36	1,45	32,69	21,68	54,37
39	2	Oberstaufen	Kalzhofen - Immenstadt	18,94	0,63	0,64	12,18	9,47	21,65					
50	1	Kempten (Allgäu) Hbf	Isny K.-W. -Heck-Str.	39,21	1,31	0,54	21,28	19,61	40,88	78,60	2,62	47,20	39,30	86,50
50	2	Isny Kurhaus, Busbhf	Kempten (Allgäu) Hbf	39,39	1,31	0,66	25,92	19,70	45,62					
61	1	Kempten	Dietmannsried - Gemeinderied	19,76	0,66	0,81	16,10	9,88	25,98	51,19	1,71	38,41	25,59	64,00
61	2	Gemeinderied - Dietmannsried	Kempten	31,42	1,05	0,71	22,31	15,71	38,02					
62	1	Kempten - Betzigau	Wildpoldsried - Marktoberdorf	31,82	1,06	0,78	24,92	15,91	40,83	63,88	2,13	45,18	31,94	77,12
62	2	Marktoberdorf - Wildpoldsried	Betzigau - Kempten	32,06	1,07	0,63	20,26	16,03	36,29					
66	1	Kempten Hbf	Leutkirch Bahnhof	33,30	1,11	0,68	22,48	16,65	39,14	66,90	2,23	49,64	33,45	83,09
66	2	Leutkirch Bahnhof	Kempten Hbf	33,60	1,12	0,81	27,16	16,80	43,95					
1	1	Oberstdorf	Baad	19,63	0,65	1,88	36,90	9,82	46,72	39,15	1,31	36,57	19,58	56,15
1	2	Baad	Oberstdorf	19,52	0,65	0,02	0,33	9,76	9,44					
35	1	Immenstadt	Bräunlings Ortsmitte	5,74	0,19	1,03	5,91	2,87	8,78	11,07	0,37	12,48	5,53	18,01
35	2	Bräunlings Ortsmitte	Immenstadt	5,33	0,18	1,23	6,56	2,67	9,23					
44/47	1	Oberstdorf	Obermaiselstein - Sonthofen	30,21	1,01	0,61	18,31	15,10	33,42	59,25	1,97	47,36	29,62	76,98
44/47	2	Obermaiselstein - Sonthofen	Oberstdorf	29,04	0,97	1,00	29,04	14,52	43,56					
46	1	Oberstdorf Schulzentrum	Hittisau Gemeindehaus	39,14	1,30	0,79	30,75	19,57	50,32	76,71	2,56	57,93	38,36	96,28
46	2	Hittisau Gemeindehaus	Oberstdorf Schulzentrum	37,58	1,25	0,72	27,18	18,79	45,97					
7	1	Oberstdorf	Alpe - Eschbach	11,23	0,37	1,43	16,04	5,62	21,65	22,42	0,75	17,56	11,21	28,77
7	2	Alpe - Eschbach	Oberstdorf	11,19	0,37	0,14	1,52	5,59	7,11					

Linien Nr.	Richtung	Von	Nach	je Richtung						Paarweise				
				Distanz in km	Fahrzeit in h	Antriebsenergie		Energie in kWh/Distanz		Distanz in km	Fahrzeit in h	Energie in kWh		
						in kWh/km	in kWh/Distanz	A/C	Summe			Antrieb	Klimaanlage	Summe
71	1	Kempton (Allgäu) Hbf	Obergünzburg, Rösslewie	34,21	1,14	0,79	27,07	17,11	44,17					
71	2	Obergünzburg, Sportplatz	Reicholzried, Ortsmitte	35,40	1,18	0,70	24,63	17,70	42,33	69,61	2,32	51,70	34,81	86,50
8	1	Oberstdorf	Spielmannsau	9,72	0,32	1,64	15,94	4,86	20,80	19,39	0,65	14,89	9,69	24,58
8	2	Spielmannsau	Oberstdorf	9,66	0,32	0,11	1,05	4,83	3,78					
81	1	Immenstadt	Kranzegg - Wertach	25,73	0,86	1,20	30,80	12,87	43,66	51,38	1,71	33,50	25,69	59,19
81	2	Jungholz - Wertach - Kranzegg	Immenstadt	25,65	0,85	0,11	2,70	12,82	15,53					
83	1	Immenstadt	Niedersonthofen	12,84	0,43	0,82	10,57	6,42	16,99	26,27	0,88	22,41	13,14	35,55
83	2	Niedersonthofen	Immenstadt	13,44	0,45	0,88	11,84	6,72	18,56					
84	1	Immenstadt	Wolfis	11,84	0,39	0,75	8,91	5,92	14,83	23,91	0,80	17,69	11,95	29,64
84	2	Goimösmühle	Wolfis	12,07	0,40	0,73	8,78	6,03	14,81					
9	1	Oberstdorf, Burgbich P1	Oberstdorf, Burgbich P1	5,85	0,20	0,91	5,31	2,93	8,23	11,71	0,39	10,61	5,85	16,47
9	2	Oberstdorf, Burgbich P1	Oberstdorf, Burgbich P1	5,85	0,20	0,91	5,31	2,93	8,23					
120	1	Reutte - Oberjoch	Sonthofen	57,08	1,90	0,70	39,90	28,54	68,44	114,10	3,80	89,36	57,05	146,41
120	2	Sonthofen	Oberjoch - Reutte	57,02	1,90	0,87	49,46	28,51	77,97					
Summe				####	41,96	41,38	935,58	629,41	1.565,00	####	41,96	935,58	629,41	1.565,00
Durchschnitt				23,31	0,78	0,77	17,33	11,66	28,98	46,62	1,55	34,65	23,31	57,96

* Stand 05/2024 keine Bestandslinie
a/b: die Linie wurde für die Betrachtung in zwei Abschnitte unterteilt

⁶⁸ Eigene Modellierung und Berechnungen.

A.2 Modellierte Ergebnisse Sensitivitätsanalyse Total Cost of Ownership

Sensitivitätsanalyse der CO₂-Preisentwicklung: [+] progressiv steigend (200 EUR/t CO₂ im Jahr 2030) / [-] ab 2026 stagnierend

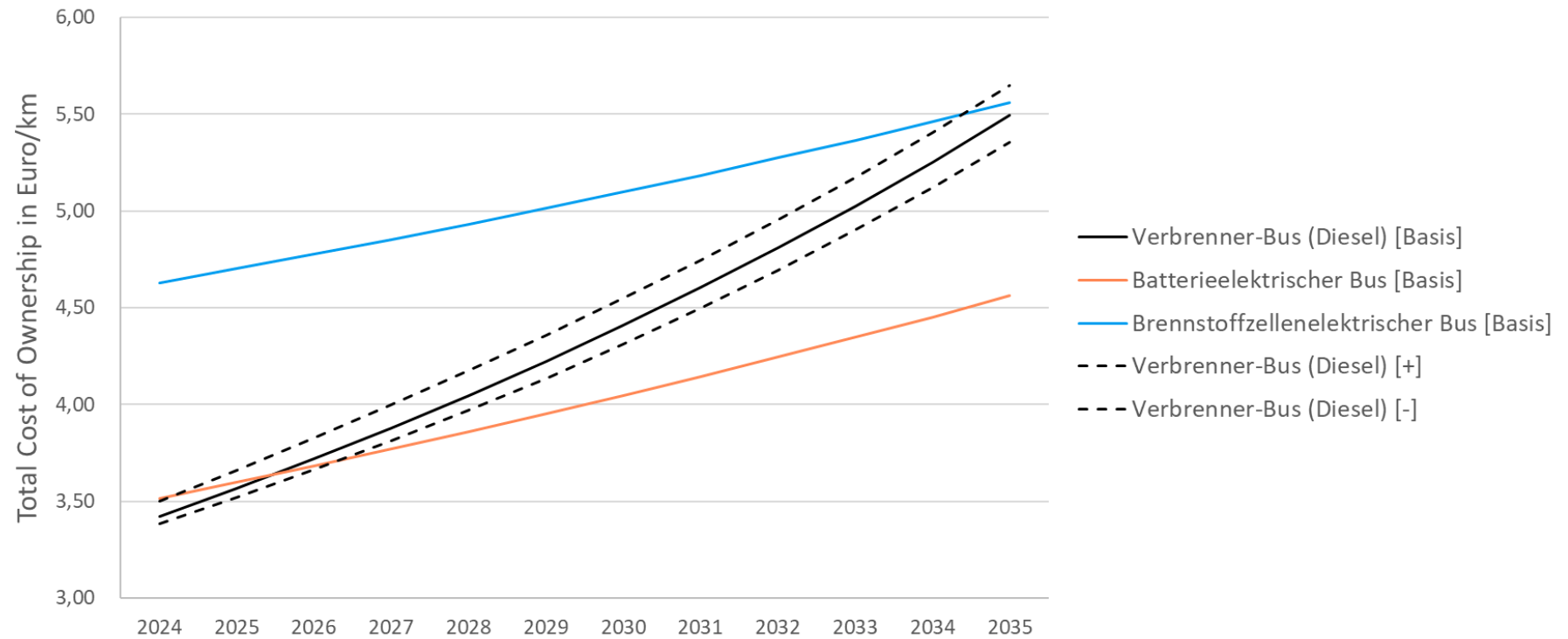


Abbildung 38: Sensitivitätsanalyse der CO₂-Preisentwicklung nach 2026 ⁶⁹

⁶⁹ Eigene Darstellung und Berechnungen.

Sensitivitätsanalyse der Strompreisentwicklung: +/- 30%

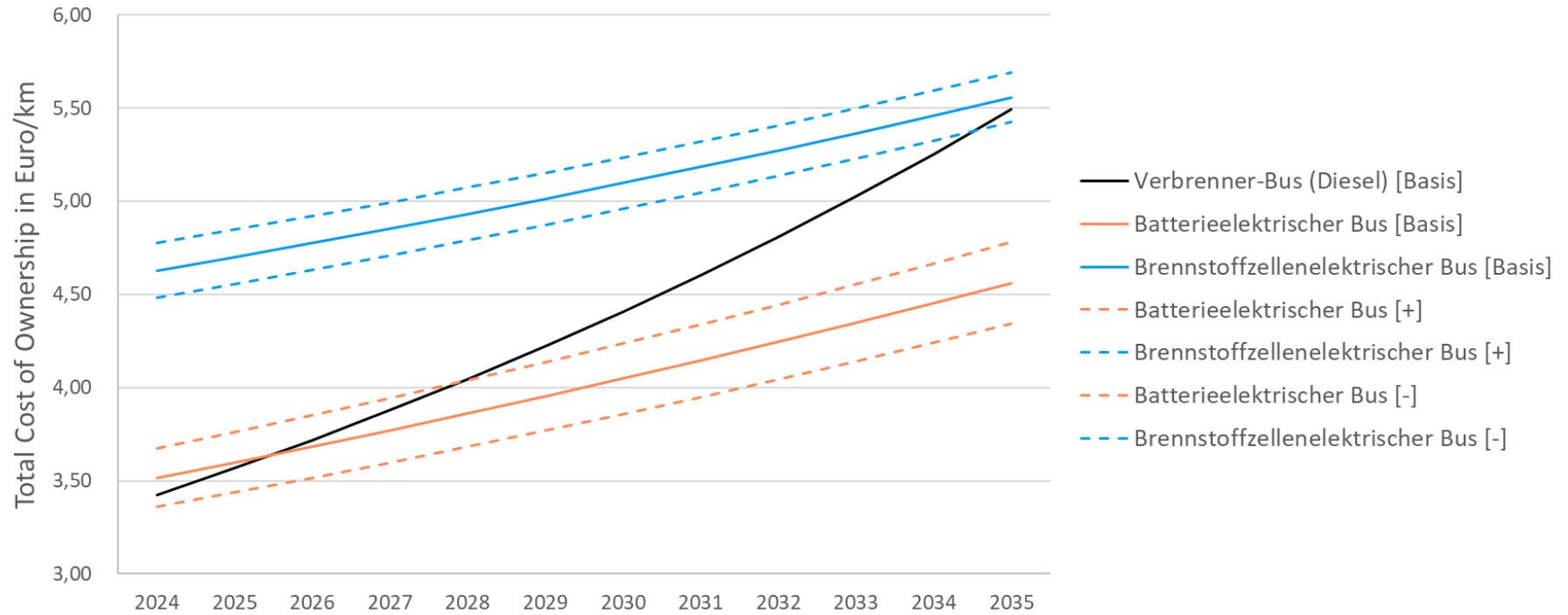


Abbildung 39: Sensitivitätsanalyse der Strompreisentwicklung ⁷⁰

⁷⁰ Eigene Darstellung und Berechnungen.

Sensitivitätsanalyse der Jahresfahrleistung: +/- 15%

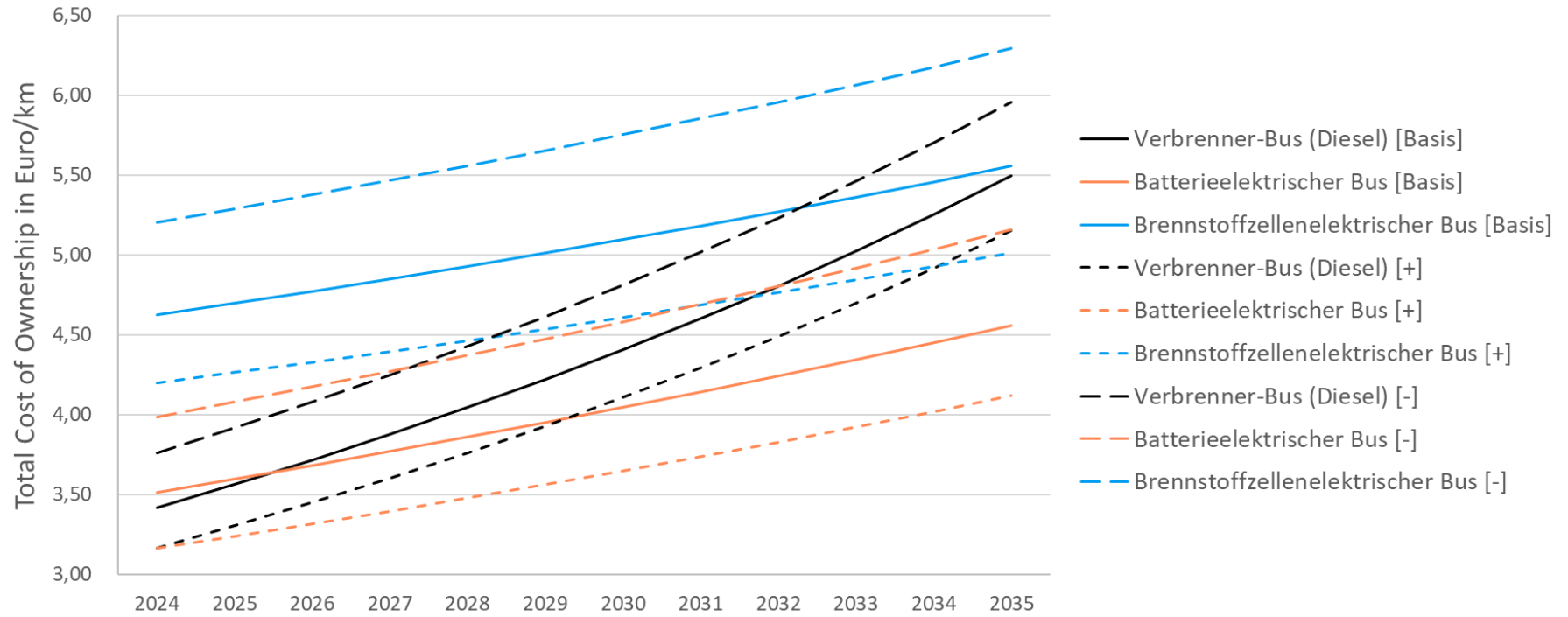


Abbildung 40: Sensitivitätsanalyse der Jahresfahrleistung je Fahrzeug ⁷¹

⁷¹ Eigene Darstellung und Berechnungen.

Sensitivitätsanalyse der Infrastrukturinvestition für BEV und FCEV: +20%/-100%

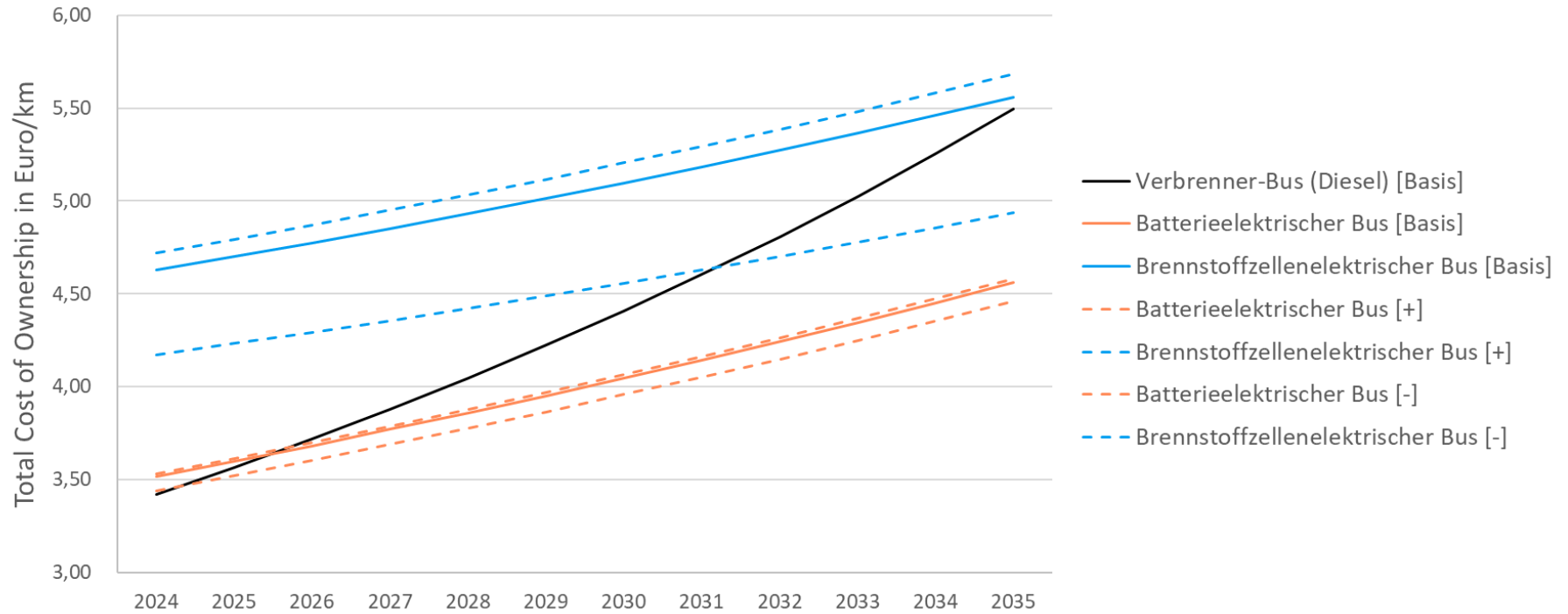


Abbildung 41: Sensitivitätsanalyse der Investitionssumme der Infrastruktur für BEV und FCEV ⁷²

⁷² Eigene Darstellung und Berechnungen.

Sensitivitätsanalyse der Berücksichtigung eines Batteriewechsels nach 6 Jahren (150 TEUR; einmalig im Verlauf der Ersthaltedauer)

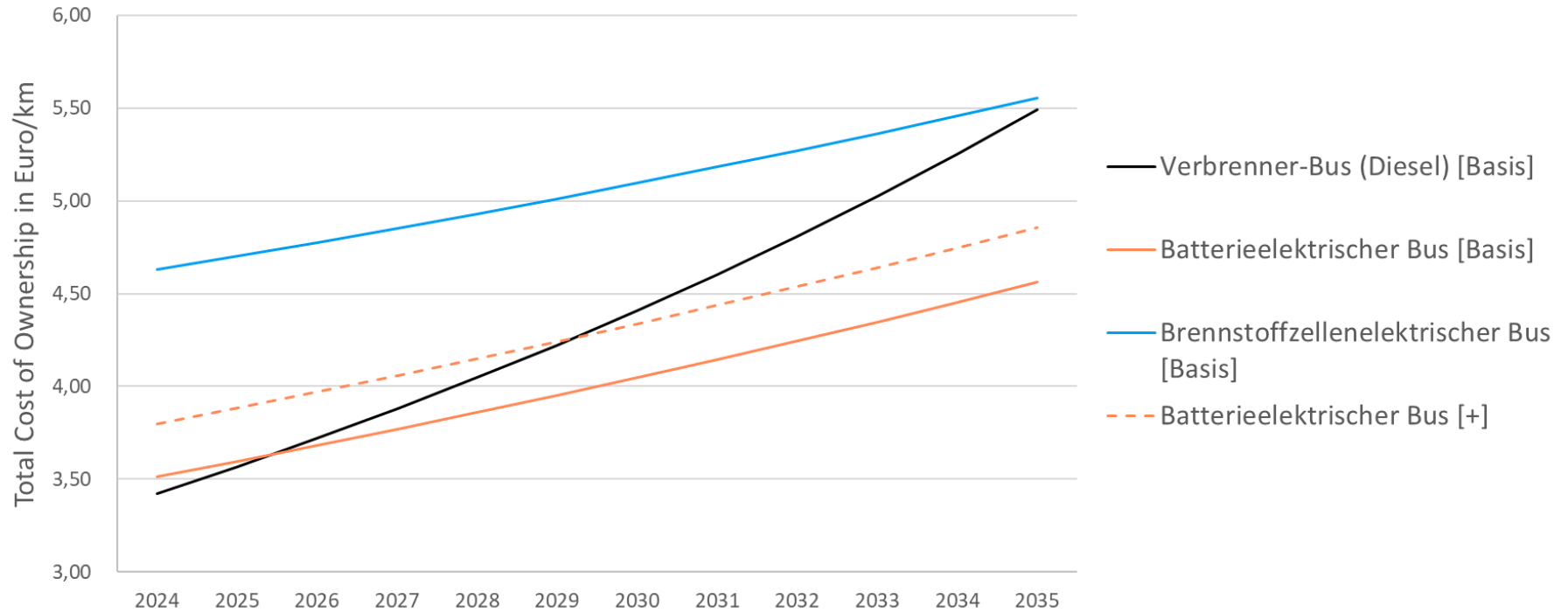


Abbildung 42: Sensitivitätsanalyse eines Batteriewechsels für BEV nach 6 Jahren ⁷³

⁷³ Eigene Darstellung und Berechnungen.

A.3 Flächenbedarfe für unterschiedliche Busabstellkonzepte inkl. Ladeinfrastruktur

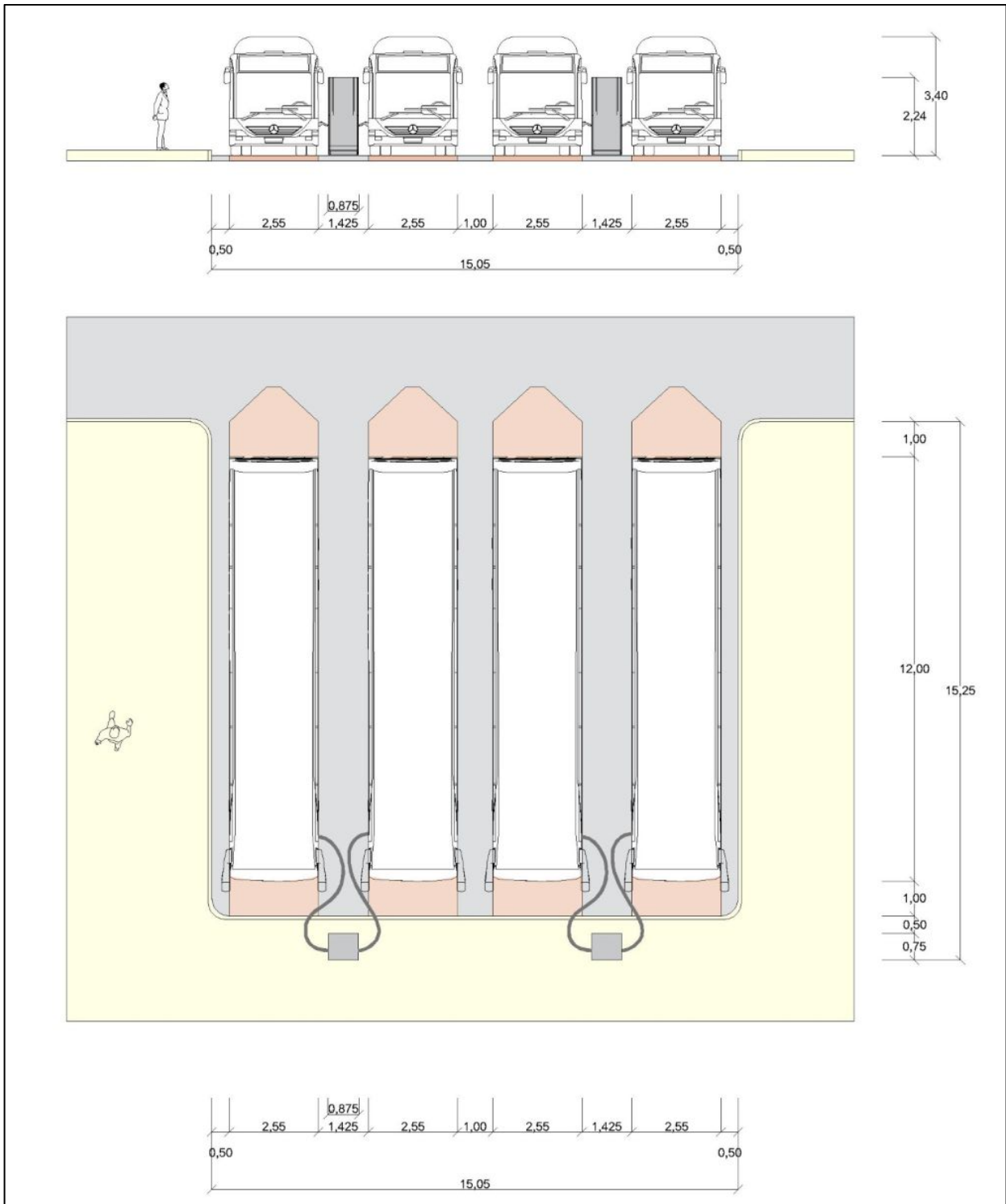


Abbildung 43 Skizze für den Flächenbedarf von Busabstellstandorten mit Ladeinfrastruktur Variante B: Betriebshof, Ladesäule

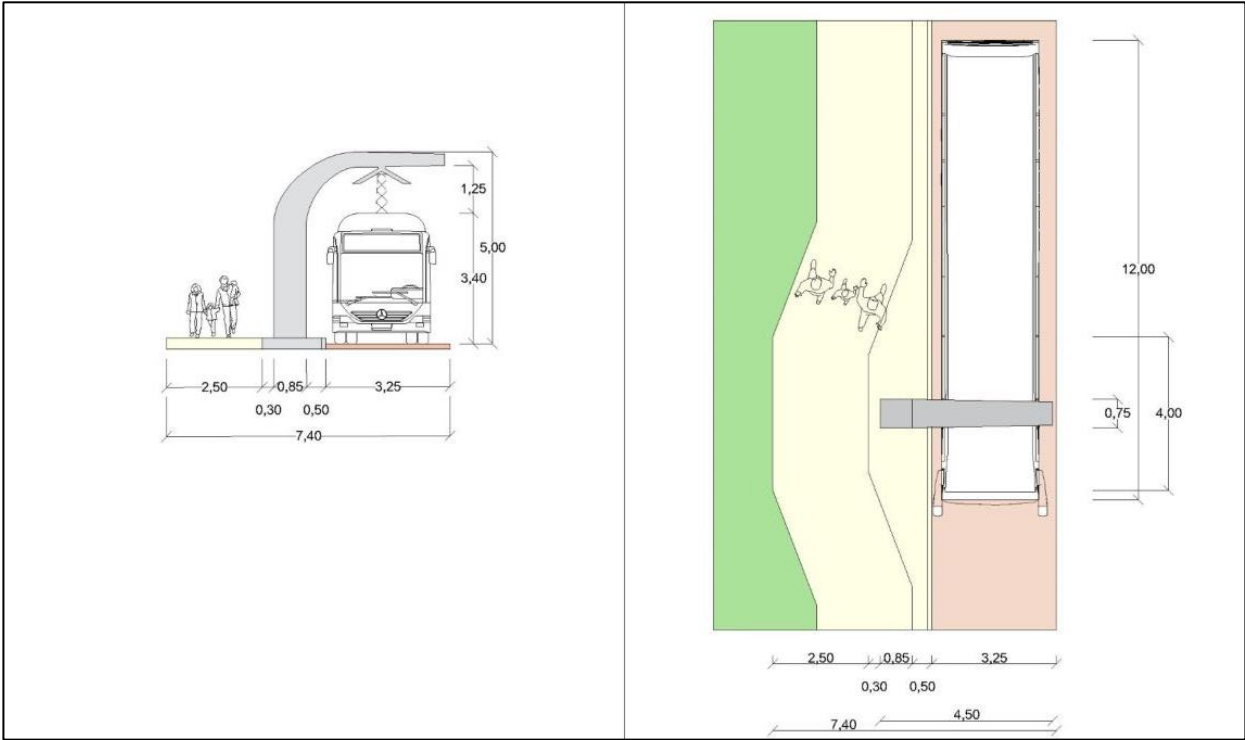


Abbildung 44 Skizze für den Flächenbedarf von Busabstellstandorten mit Ladeinfrastruktur Variante C: Gelegenheitslade-standort, Pantograph

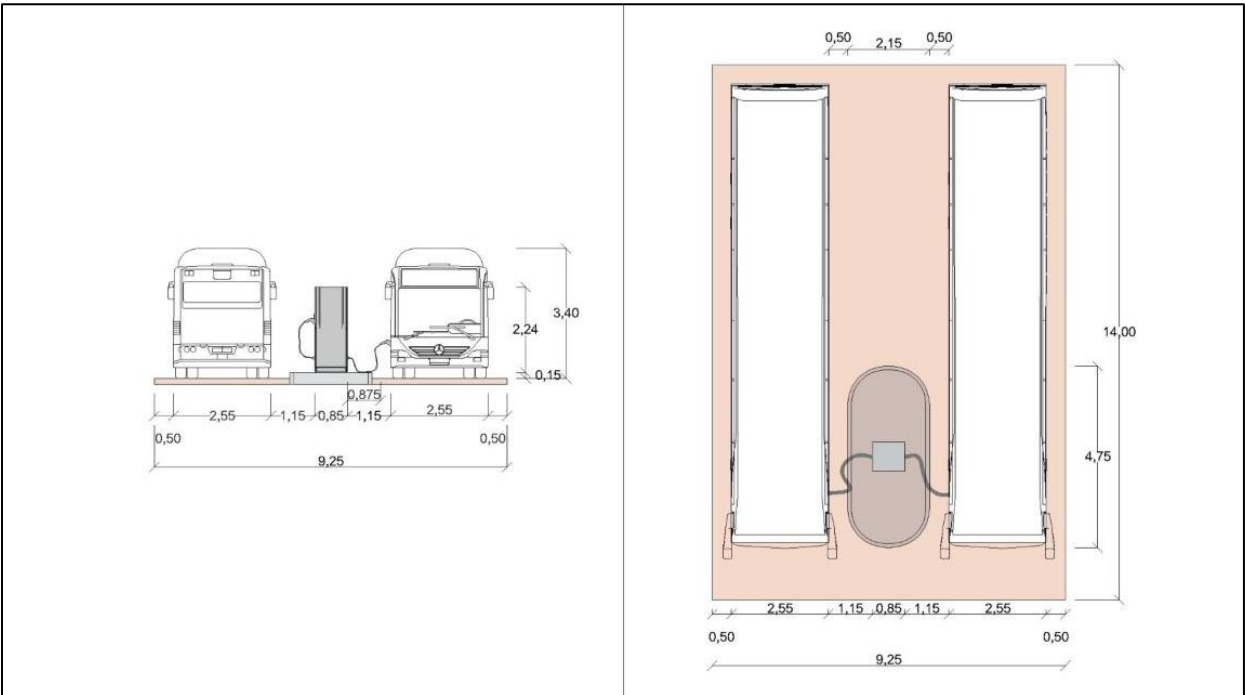


Abbildung 45 Skizze für den Flächenbedarf von Busabstellstandorten mit Ladeinfrastruktur Variante D: Gelegenheitslade-standort, Ladesäule

A.4 Checkliste zur Betriebshofumrüstung

Laden

Netzanschluss

a. Ermittlung der Anschlussleistung

<input type="checkbox"/>	Anzahl der geplanten E-Busse ist bekannt
<input type="checkbox"/>	Standzeiten bzw. Ladezeiten sind bekannt
<input type="checkbox"/>	Anzahl gleichzeitiger Ladevorgänge ist ermittelt
<input type="checkbox"/>	Ladeleistung wurde ermittelt
<input type="checkbox"/>	Entscheidung, ob ein Lastmanagement genutzt werden soll, wurde getroffen
→	Die erforderliche Gesamtleistung zum Laden des Fuhrparks ist bekannt

b. Abstimmung mit dem Netzbetreiber

<input type="checkbox"/>	Netzbetreiber ist bekannt
<input type="checkbox"/>	Benötigte Anschlussleistung wurde ermittelt
<input type="checkbox"/>	Falls erforderlich: Maßnahmen zur Ertüchtigung des Netzanschlusses sind vorbereitet
→	Der Netzanschluss ist ausreichend für den aktuellen und zukünftigen Leistungsbedarf dimensioniert

Betriebshof

Flächenkapazität

<input type="checkbox"/>	Es ist ausreichend Fläche verfügbar, um Stellplätze mit Ladeinfrastruktur auszustatten
<input type="checkbox"/>	Es wurde geprüft, ob jedes Fahrzeug einen eigenen Ladepunkt benötigt
<input type="checkbox"/>	Es wurde der Platzbedarf für die ggf. zusätzliche Energieversorgungsanlagen ermittelt
→	Es ist ausreichend Fläche auf dem Betriebshof für Fahrzeuge, Lade- und Energieinfrastruktur vorhanden

Werkstatt

<input type="checkbox"/>	Die Werkstatthalle ist ausreichend dimensioniert (größere Höhe und Gewicht der Fahrzeuge)
<input type="checkbox"/>	Die Werkstatt wurde gemäß DIN VDE 1000-10:2009-01 Abs. 1 als elektronischer Betriebsteil ausgeprägt
<input type="checkbox"/>	Elektrofachkräfte wurden berufen oder das Personal entsprechend geschult
<input type="checkbox"/>	Es wurde der Platzbedarf für die ggf. zusätzliche Energieversorgungsanlagen ermittelt
→	Die Werkstatt ist für die Instandhaltung von E-Bussen geeignet

Sicherheitsaspekte

<input type="checkbox"/>	Brandschutzkonzept wurde erstellt
--------------------------	-----------------------------------

	Für Arbeiten an elektronisch freigeschalteten Fahrzeugen wird elektronisch unterwiesenes oder sensibilisiertes Personal eingesetzt. Entsprechende Arbeitsanweisungen und Schulungspläne wurden erarbeitet
<input type="checkbox"/>	Havariefläche für defekte Fahrzeuge, die sich evtl. entzünden könnten, wurde eingerichtet
<input type="checkbox"/>	Räumliche und bauliche Trennung von Energiespeichern und feuergefährlichen Stoffen wurde zur Schadenverhütung berücksichtigt
→	Die Werkstatt ist für die Instandhaltung von E-Bussen geeignet und das Personal entsprechend ausgebildet

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages