

Machbarkeitsstudie zur Einsatzmöglichkeit von Bussen mit alternativen Antrieben

Technologieentscheidung für die Dekarbonisierung der
Busflotte im Odenwaldkreis

Abschlussbericht, Juni 2024



www.odenwaldmobil.de

Auftraggeber:
**Odenwald -Regional -
Gesellschaft mbH**
Hulster Straße 2
64720 Michelstadt

**Odenwälder Verkehrsbetriebe
GmbH**
Neutorstraße 10
64720 Michelstadt

www.odenwaldmobil.de

Auftragnehmer:
**VCDB VerkehrsConsult
Dresden-Berlin GmbH**

Standort Dresden

Könneritzstraße 31
01067 Dresden
Tel.: +49 .351 .4 82 31-00
Fax: +49 .351 .4 82 31-09
E-Mail: dresden@vcdb.de

Standort Berlin

Uhlandstraße 97
10715 Berlin
Tel.: +49 .30 .23 63 19-41
Fax: +49 .30 .23 63 19-49
E-Mail: berlin@vcdb.de

Internet: www.vcdb.de

Ansprechpartner:
Jonas Ramme
E-Mail: j.ramme@vcdb.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	11
1 Management Summary	15
2 Hintergrund der Machbarkeitsstudie	21
2.1 Ausgangslage	21
2.2 Umsetzung der Clean Vehicles Directive	21
2.3 Zielsetzung	27
2.4 Vorgehen in der Machbarkeitsstudie	27
3 Technologische Grundlagen	29
3.1 Elektrische Antriebskonzepte	29
3.1.1 Elektrischer Antrieb	30
3.1.2 Hybridantrieb	38
3.1.3 Antriebssystem	39
3.1.4 Energiespeicher	41
3.1.5 Heizungs- und Klimatisierungskonzept	45
3.2 Versorgungsinfrastruktur	50
3.2.1 Elektrische Energiebereitstellung	50
3.2.2 Chemische Energiebereitstellung	59
3.3 Well-to-Wheel-Wirkungsgrade verschiedener Antriebstechnologien	68
3.4 Werkstattausrüstung	69
3.5 Personalqualifizierung	70
4 Fuhrpark- und Betriebshofanalysen	74
4.1 Grundlagen-Workshop	74

Inhaltsverzeichnis

4.2	Datenerfassung	75
4.3	Clusterung und Vermessung der Referenzszenarien	80
4.4	Liniennetzanalyse	85
5	Strecken- und Einsatzanalysen.....	93
5.1	Festlegung der energetischen Versorgung der alternativen Fahrzeugtechnologien	93
5.1.1	Fahrzeugkonfiguration	98
5.1.2	Energiebilanzierung und Umlaufbewertung bestehender Umläufe	104
5.1.3	Energiebilanzierung und Umlaufbewertung neues Umlaufkonzept	107
5.1.4	Flottenhochlauf.....	109
6	Infrastrukturanforderungen und -bedarfe und Analysen zur Energiebereitstellung	111
6.1	Auslegung der Lade-/ Tankinfrastruktur.....	111
6.1.1	Auslegung der Ladeinfrastruktur	111
6.1.2	Auslegung der Tankinfrastruktur.....	121
6.2	Konzeption der Fahrzeugabstellung mit Lade-/Tankinfrastruktur	134
7	Maßnahmen zur Effizienzsteigerung des Gesamtsystems oder zur Einbindung lokaler Erzeugungskapazitäten.....	140
7.1	Grundlagen zum Lademanagement und Konzeption IT-Systemarchitektur.....	140
7.1.1	Funktionsbeschreibung.....	140
7.1.2	Optimierungsgrößen	141
7.1.3	Potential des Lademanagements	144
8	Betriebswirtschaftliche und umweltbilanzielle Betrachtung der Auswirkungen der Umstellung auf alternative Antriebe	148
8.1	Datengrundlage.....	148
8.2	Ermittelte Kosten	151

8.3	Ausweisung von Umweltparametern und Umweltkosten	158
9	Bewertung der favorisierten Antriebskonzepte	163
10	Umsetzungs- und Handlungsempfehlung	167
	Anlagenverzeichnis	173

Abbildungsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Hochlauf emissionsfreier Busse	16
Abbildung 1.2:	Überblick aller Gesamtkosten für alle Szenarien	17
Abbildung 1.3:	Überblick aller Gesamtkosten für alle Szenarien	17
Abbildung 1.4:	Investitionskosten mit Förderung – gesamter Betrachtungszeitraum	19
Abbildung 1.5:	Gesamtkosten für Dieselsebusse	19
Abbildung 1.6:	Gesamtkosten für batterieelektrische Busse.....	20
Abbildung 1.7:	Treibhausgas-Kosten aller Hochlaufkonzepte	20
Abbildung 2.1:	Beschaffungsquoten der CVD	22
Abbildung 2.2:	Relevante Fahrzeugklassen nach dem SaubFahrzeugBeschG	25
Abbildung 3.1:	Konfigurationsmöglichkeiten Elektrobus	29
Abbildung 3.2:	Prinzip Batteriebus	31
Abbildung 3.3:	Kategorisierung von Brennstoffzellenbussen	36
Abbildung 3.4:	Hybride Fahrzeugkonzepte am Beispiel Diesel-/Erdgas-Bus.....	39
Abbildung 3.5:	Antriebsstrang Zentralmotor	40
Abbildung 3.6:	Antriebsstrang radnaher Motor	41
Abbildung 3.7:	Antriebsstrang Radnabenmotor	41
Abbildung 3.8:	Schematische Darstellung der Funktionsweise einer Wasserstoffbrennstoffzelle	44
Abbildung 3.9:	Heizenergiebedarf eines Solobusses.....	45
Abbildung 3.10:	Energiebilanz Dieselsebus.....	46
Abbildung 3.11:	Energiebilanz von Batterie- und Brennstoffzellenbus	46
Abbildung 3.12:	Versorgungsinfrastruktur für elektrisch angetriebene Busse	50
Abbildung 3.13:	Stromabnehmer bei Oberleitungsbussen	53
Abbildung 3.14:	Oberleitungsbus Salzburg	55
Abbildung 3.15:	Hub-Docking-Station.....	57
Abbildung 3.16:	Senk-Docking-Station	57
Abbildung 3.17:	Belegung Combo-2-Kupplung und -Stecker nach IEC 62196	59
Abbildung 3.18:	Tankkupplung für Wasserstoff mit IR-Kommunikation.....	61
Abbildung 3.19:	Schematische Darstellung der Wasserstoffelektrolyse	63
Abbildung 3.20:	Übersicht Herstellung von synthetischen Kraftstoffen.....	66
Abbildung 3.21:	Wertschöpfungstiefe der Instandhaltung	69
Abbildung 3.22:	HV-Qualifikation nach DGUV-Information 209-093	71

Abbildung 4.1:	Betriebshof Wissmüller	76
Abbildung 4.2:	Linienetzplan mit topografischer Einordnung	81
Abbildung 4.3:	Ergebnis der Dieselumlaufplanung alle Umläufe im Tagesverlauf an einem Wochentag in der Schulzeit	82
Abbildung 4.4:	Topografische Karte des Einsatzgebiets Quelle: (topographic-map.com)	83
Abbildung 4.5:	Höhenprofil einer Fahrt von Reichelsheim nach Weilheim Quelle: (maps.openrouteservice.org)	84
Abbildung 4.6:	Höhenprofil einer Fahrt von Höchst im Odenwald nach Beerfelden Quelle: (maps.openrouteservice.org)	84
Abbildung 4.7:	Fahrzeuge im Einsatz und im Betriebshof ein Tagesverlauf an einem Wochentag in der Schulzeit	84
Abbildung 4.8:	Vermessung der repräsentativen Umläufe	86
Abbildung 4.9:	Vermessung der repräsentativen Umläufe	86
Abbildung 4.10:	Vermessung der repräsentativen Umläufe - Beerfelden	87
Abbildung 4.11:	Vermessung der repräsentativen Umläufe - Michelstadt	87
Abbildung 4.12:	Vermessung der repräsentativen Umläufe	88
Abbildung 4.13:	Vermessung der repräsentativen Umläufe	88
Abbildung 4.14:	Übersicht der Vermessung der repräsentativen Umläufe	89
Abbildung 4.15:	Tageszeitliche Verteilung Standzeiten - Höchst	89
Abbildung 4.16:	Tageszeitliche Verteilung Standzeiten - Michelstadt	90
Abbildung 4.17:	Haltepunktuntersuchung	90
Abbildung 4.18:	Haltepunktuntersuchung	91
Abbildung 4.19:	Haltepunktuntersuchung	91
Abbildung 4.20:	Haltepunktuntersuchung	92
Abbildung 5.1:	Technologietrichter	94
Abbildung 5.2:	Festgelegte Betriebskonzepte (Nicht gewählte Konzepte sind ausgegraut)	97
Abbildung 5.3:	Wetterdaten Station Michelstadt-Vielbrunn	103
Abbildung 5.4:	Vorgehen Umlaufoptimierung	107
Abbildung 5.5:	Umlaufoptimierung	108
Abbildung 5.6:	Hochlauf emissionsfreier Busse	110
Abbildung 6.1:	Gesamte Fahrzeugflotte: Ungesteuerte Ladung	113
Abbildung 6.2:	Ungesteuerte Ladung Betriebshof Michelstadt	114
Abbildung 6.3:	Gleichmäßige Ladung Betriebshof Michelstadt	114
Abbildung 6.4:	Gesteuerte Ladung Betriebshof Michelstadt	115
Abbildung 6.5:	Ungesteuerte Ladung Betriebshof Beerfelden	115
Abbildung 6.6:	Gleichmäßige Ladung Betriebshof Beerfelden	116
Abbildung 6.7:	Gesteuerte Ladung Betriebshof Beerfelden	116
Abbildung 6.8:	Ungesteuerte Ladung Betriebshof Rimhorn	117

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 6.9:	Gleichmäßige Ladung Betriebshof Rimhorn	117
Abbildung 6.10:	Gesteuerte Ladung Betriebshof Rimhorn	118
Abbildung 6.11:	Wasserstoffstrategie Hessen	127
Abbildung 6.12:	Übersichtsplan Wasserstofftankstelle (Quelle: NOW)	132
Abbildung 6.13:	Fahrzeugabstellung - Variante Blockaufstellung mit Gebäude für die Werkstatt	136
Abbildung 6.14:	Fahrzeugabstellung - Variante Blockaufstellung ohne Gebäude für die Werkstatt	136
Abbildung 6.15:	Fahrzeugabstellung - Variante Aufstellung „schräg“ (Fischgräte) und Blockaufstellung	137
Abbildung 6.16:	Variante Blockaufstellung mit H2-Tankinfrastruktur mobile Infrastruktur mit Gebäude für die Werkstatt	137
Abbildung 6.17:	Variante Blockaufstellung mit H2-Tankinfrastruktur stationäre Infrastruktur mit Gebäude für die Werkstatt	138
Abbildung 7.1:	Lastkurve Ladung ohne Optimierung	145
Abbildung 7.2:	Lastkurve Ladung mit Optimierung	146
Abbildung 8.1:	Eingangsdaten Gesamtkostenbetrachtung	150
Abbildung 8.2:	Preisentwicklungsszenarien elektrische Energie	150
Abbildung 8.3:	Investitionskosten pro Jahr für Fahrzeuge	152
Abbildung 8.4:	Kosten Betriebsmittel	153
Abbildung 8.5:	Kosten Betriebsmittel	153
Abbildung 8.6:	Überblick aller Gesamtkosten für alle Szenarien	154
Abbildung 8.7:	Überblick aller Gesamtkosten für alle Szenarien	154
Abbildung 8.8:	Investitionskosten mit Förderung – gesamter Betrachtungszeitraum	156
Abbildung 8.9:	Gesamtkosten für Dieselsebusse	157
Abbildung 8.10:	Gesamtkosten für batterieelektrische Busse	157
Abbildung 8.11:	Treibhausgas-Emissionen Well-to-Wheel	159
Abbildung 8.12:	Treibhausgas-Emissionen	160
Abbildung 8.13:	Treibhausgas-Kosten aller Hochlaufkonzepte	161
Abbildung 8.14:	Umweltkosten CO2 pro Tonne	161
Abbildung 8.15:	Lokale Emissionen von Luftschadstoffen	162
Abbildung 9.1:	Umsetzbarkeit der Umläufe mit Elektrobusbetrieb	166
Abbildung 10.1:	Hochlauf emissionsfreier Busse	169
Abbildung 10.2:	Exemplarische Fahrzeugabstellung - Variante Blockaufstellung mit Gebäude für die Werkstatt	171

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1:	Investitionskosten Oberleitungsbus.....	31
Tabelle 3.2:	Investitionskosten Batteriebus (BMVI, ab 2018 laufend)	35
Tabelle 3.3:	Charakteristika Brennstoffzellenbus	37
Tabelle 3.4:	Vergleich gravimetrischer Energiedichten	42
Tabelle 3.5:	Fahrzeugenergiebedarf unterschiedlicher Antriebskonzepte	47
Tabelle 3.6:	HV-Qualifikationsstufen nach DGUV-I 209-093, Batteriebus	72
Tabelle 3.7:	H ₂ -Qualifikationsstufen nach DGUV-I FB HM 099, Brennstoffzellenbus.....	73
Tabelle 5.1:	Vergleich der Investitionskosten unterschiedlicher Systeme	97
Tabelle 5.2:	Marktüberblick batterieelektrische Busse als Depotlader (*angekündigte Modelle)	99
Tabelle 5.3:	Marktüberblick Brennstoffzellenbusse (*angekündigte Modelle)	100
Tabelle 5.4:	Festgelegter Energieinhalt der Batteriespeicher und H ₂ - Druckspeicher	101
Tabelle 5.5:	Berechnete und festgelegte fahrzeugspezifische Verbräuche mit Zusatzheizgerät	103
Tabelle 5.6:	Randbedingungen der Energiebilanzierung	105
Tabelle 5.7:	Befahrbarkeit der aktuellen Umläufe mit batterieelektrischen Bussen	105
Tabelle 5.8:	Energiebedarfe je Technologie und Betriebshof.....	106
Tabelle 5.9:	Befahrbarkeit der aktuellen Umläufe mit batterieelektrischen Bussen	107
Tabelle 5.10:	Befahrbarkeit der aktuellen Umläufe mit batterieelektrischen Bussen	109
Tabelle 6.1:	Spitzenleistungsbedarfe je Betriebshof und Lademodell	118
Tabelle 6.2:	Schätzung Maßnahmen und Kosten Netzbetreiber	119
Tabelle 6.3:	Tägliche Wasserstoffbevorratungsmenge für die gesamte Busflotte	123
Tabelle 6.4:	Wasserstoffbedarfe je Betriebshof	123
Tabelle 6.5:	Genehmigungsverfahren nach gelagerter Wasserstoff- Menge im Falle der Anlieferung	126
Tabelle 6.6:	Variantenvergleich der Aufstellungen.....	139
Tabelle 7.1:	Spitzenleistung mit und ohne Optimierung	146

Tabellenverzeichnis

Tabelle 7.2:	Stromkosten mit und ohne Optimierung	147
Tabelle 8.1:	Luftschadstoffemissionen gemäß HBEFA	162

Abkürzungsverzeichnis

€/kWh	Kosten pro Kilowattstunde
AC	Alternating Current, Wechselstrom
AEL	Alkalische Elektrolyse
AFID	Alternative Fuels Infrastructure Directive
BauO	Landesbauordnung
BEB	Batteriebus (engl. Battery electric bus)
BEB-REX	Batteriebus mit Brennstoffzelle als Range Extender
BeSystO®	Bewertungsverfahren für Systeminnovationen im ÖPNV
BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BMDV	Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BtL	Biomass-to-Liquids, synthetische Kraftstoffe aus Biomasse
BZ	Brennstoffzelle
BZB	Brennstoffzellenbus
CCS	Combined Charging System, kombiniertes Ladesystem
CNG	Compressed Natural Gas, Erdgas
COP	Coefficient of Performance, Effizienzwert für das Heizen
CP	Contact Pilot, Pilotkontakt
CPV-Nummern	Common Procurement Vocabulary; gemeinsame Vokabular für öffentliche Aufträge, schlüsselt Gegenstände eines Auftrags auf und ordnet ihnen feste Nummern zu
CtL	Coal-to-Liquids, Kohleverflüssigung
CVD	Clean Vehicles Directive
DC	Direct Current, Gleichspannung
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DL	Depotlader
DoD	Depth of Discharge, Entladetiefe
EER	Energy Efficiency Ratio, Effizienzwert für das Kühlen
EG	Europäische Gemeinschaft

Abkürzungsverzeichnis

EU	Europäische Union
GH ₂	gasförmigem Wasserstoff
GL	Gelegenheitslader
GtL	Gas-to-Liquids
HVAC	Heating, Ventilation and Air-Conditioning, Heizung und Klimatisierung
i. d. R.	In der Regel
IEC	International Electrotechnical Commission, Internationale Elektrotechnische Kommission
kWh/kg	Einheit der Gravimetrischen Energiedichte
kWh/l	Einheit der Volumetrische Energiedichte
LFP	Lithium-Eisenphosphat
LMS	Lade- & Lastmanagementsystem
LNG	Liquefied Natural Gas, Flüssiggas
LPG	Liquefied Petroleum Gas, Flüssiggas
LTO	Lithium-Titanat-Oxid
MtG	Methanol-to-Gasoline
NaNiCl	Natrium-Nickelchlorid
NiMH	Nickel-Metallhydrid
NMC	Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid
OdVB	Odenwälder Verkehrsbetriebe GmbH
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
OREG	Odenwald-Regional-Gesellschaft mbH
PE	Schutzleiter
PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran
PEMFC	Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle
PtL	Power-to-Liquids, el. Energie zu flüssigem Kraftstoff
R134a	Tetrafluorethan, Kältemittel
R744	CO ₂ , Kältemittel
SaubFahrzeugBeschG	Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz
SoC	State of Charge, Ladezustand
SoH	State of Health, Alterungszustand
SORT	Standardised On-Road Testcycles, Ersatzzyklus
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
SuperCaps	Hochleistungskondensatoren
TAR	Technischen Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Mittelspannungsnetz und deren Betrieb
TCO	Total Cost of Ownership

Abkürzungsverzeichnis

TED	Tenders Electronic Daily, Anzeiger für das öffentliche Auftragswesen in Europa
TRBS	Technische Regeln für Betriebssicherheit
VCDB	VCDB VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen
WIBank	Wirtschafts- und Infrastrukturbank Hessen
ZAwheel	Elektro-Radnabenantrieb der Firma Ziehl-ABEGG

1 Management Summary

Um ein für die OREG und die OdVB ein optimales Einsatzkonzept für den Elektrobusbetrieb zu entwickeln, wurde im Rahmen der Machbarkeitsstudie der Elektrobusbetrieb planerisch, unter Berücksichtigung der bestehenden Rahmen- und Einsatzbedingungen, im gesamten Liniennetz der OdVB abgebildet und dem konventionellen Dieselbusbetrieb gegenübergestellt.

Im Ergebnis der Machbarkeitsstudie ist nach Bewertung aller untersuchten Kriterien der Batteriebus als Depotlader mit einer konduktiven Ladung über ein Plug-In-System in vielfacher Hinsicht objektiv besser zu bewerten und stellt somit das für die OREG und die OdVB am besten geeignete Antriebskonzept dar.

Mit batterieelektrischen Depotladern können bei den gegebenen Rahmenbedingungen und mit Nutzung eines Zusatzheizgerätes etwa 84 Prozent der vorhandenen Umläufe zum „Begin Of Life“ der Traktionsbatterie gefahren werden. Ohne Inanspruchnahme des Zusatzheizgerätes sind 77 Prozent der Umläufe direkt umstellbar.

Durch eine Umlafoptimierung besteht kein zusätzlicher Bedarf an Solobussen für den Einsatz von Batteriebussen. Die neuen Technologien bieten eine effiziente Alternative, die den bisherigen Bedarf an herkömmlichen Solobussen deckt. Des Weiteren können die derzeit nicht erfüllbaren Umläufe durch die geschickte Aufteilung und den Einsatz von anderen Bussen mit früher endenden Umläufen bedient werden, wodurch kein weiterer Bedarf entsteht. Allerdings besteht ein Fahrzeugmehrbedarf von 2 Kleinbussen speziell im Bereich der Batteriebusse. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, die Flotte entsprechend den spezifischen Anforderungen der verschiedenen Technologien zu optimieren.

Um die Energieversorgung für die ermittelten Leistungsbedarfe je Betriebshof zu realisieren, ist entsprechende Ladeinfrastruktur erforderlich. Diese Komponenten umfassen jeweils eine Übergabestation, Transformatoren und Ladestationen mit Ladegeräten. Ausgehend von einer zu errichtenden Übergabestation zur elektrischen Anbindung des Betriebshofes und der Realisierung der Schutz- und Messstellenfunktionen erfolgt die weitere Verteilung im Betriebshof. In Abhängigkeit des Fahrzeughochlaufes sind die Betriebshöfe vorbereitend mit entsprechenden Transformatoren auszustatten. Ladegeräte und die Ladestationen mit den CCS-Ladern sind ebenfalls an den Fahrzeughochlauf anzupassen.

Management Summary

Die erste Ausbaustufe erfordert die Übergabestation und Transformatorenstationen. Im Anschluss je nach Ausbaustufe die Installation der Ladestationen entsprechend des geplanten Fahrzeughochlaufes. Nach Auskunft des Netzbetreibers stellt die elektrische Versorgung der Betriebshöfe technisch kein Problem dar.

An jedem Busabstellort sollte ein Ladepunkt installiert werden. Die Ladeleistung kann für alle Ladepunkte mit 70 kW (netto) festgelegt werden. Die Standzeiten der Fahrzeuge dafür sind ausreichend. Um den Spitzen-Leistungsbedarf zu senken, bietet sich der Einsatz eines Lademanagementsystems in Verbindung mit einem Betriebshofmanagementsystem an, welches auf den Einsatz von Batteriebusen vorbereitet ist. An Standorten mit Reserven bei Platz und Anschlusskapazität können zusätzliche Schnellladepunkte in Betracht gezogen werden. Diese sollten mindestens 100 kW als Ladeleistung je Ladepunkt bereitstellen können.

Die aktuelle OdVB-Busflotte besteht aus Klasse-II-Fahrzeugen und fällt somit derzeit noch nicht in den Geltungsbereich der CVD. Die Nutzungsdauer der Fahrzeuge der Kategorie A und B ist auf 12 Jahre definiert.

Entsprechend des neuen EU-Kommissions-Vorschlags werden die Emissionsziele für „Überlandbusse“ angesetzt:

- » 45 % Emissionsreduktion ab 2030
- » 65 % Emissionsreduktion ab 2035
- » 90 % Emissionsreduktion ab 2040

Im folgenden Diagramm ist der Hochlauf emissionsfreier Busse dargestellt. Der Fokus liegt auf der Beschaffung der Busse im jeweiligen Jahr unter Berücksichtigung der geltenden Beschaffungsquoten.

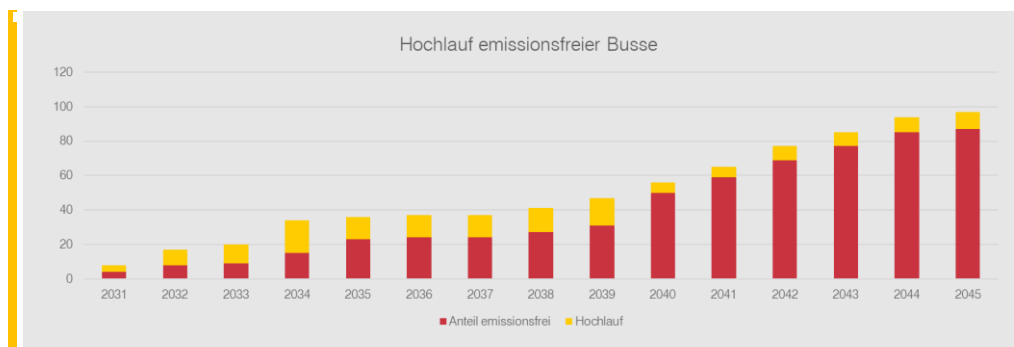


Abbildung 1.1: Hochlauf emissionsfreier Busse

Es wurden nur emissionsfreie Fahrzeuge betrachtet, um die Diversität der Antriebstechnologien gering zu halten. Ansonsten müssten für alle Antriebstechnologien separate Infrastrukturen, z. B. Ladeinfrastruktur für

Elektrobusse und Tankinfrastruktur für Erdgas sowie konventionelle Dieseldieselkraftstoffe einschließlich AdBlue, vorgehalten werden.

Die TCO-Analyse liefert eine Gesamtkostenübersicht wesentlicher Investitions- und Betriebskosten als Lebenszyklusbetrachtung. Es erfolgt ein Betriebskostenvergleich zwischen Diesel- und alternativen Buseinsatz. Dabei werden die spezifischen Mehrkosten der alternativen Antriebstechnologie je km ausgewiesen.

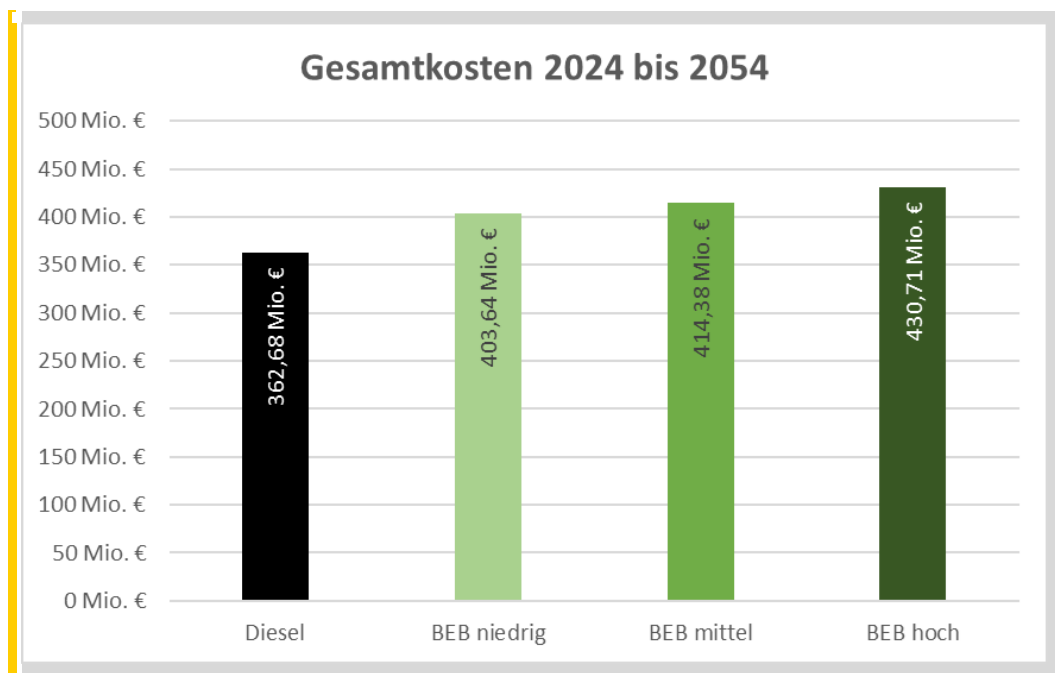


Abbildung 1.2: Überblick aller Gesamtkosten für alle Szenarien

Hochlauf	Preis pro Kilometer (Durchschnitt 2025 bis 2054)
Diesel	1,70 EUR
BEB – Batterieelektrische Busse	1,90 EUR – 1,95 EUR – 2,02 EUR

Abbildung 1.3: Überblick aller Gesamtkosten für alle Szenarien

Über den gesamten Betrachtungszeitraum ergibt sich eine Summe aller Kosten von ca. 362,68 Mio. EUR für die Vergleichsanalyse Diesel. Für batterieelektrische Busse mit mittlerer Preisentwicklung der elektrischen Energie ergibt sich eine Summe aller Kosten von ca. 414,38 Mio. EUR.

Die Gesamtkosten berücksichtigen alle technologiebezogenen Kosten. Investitionskosten für bspw. allgemeine Betriebshofgebäude oder Grunderwerbskosten sind nicht enthalten.

Gesamt betrachtet entstehen durch die Anschaffung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben erhebliche Mehrkosten im Vergleich zur Anschaffung von

Management Summary

Dieselbussen. Diese konnten bislang durch aktuelle Förderrichtlinien auf Bundesebene reduziert werden. Die passende BMDV-Richtlinie wurde nach insgesamt drei Aufrufen jedoch im Februar 2024 in einen inaktiven Zustand versetzt. Innerhalb der Calls war eine Förderung von 80 % der Fahrzeugmehrkosten und 40 % der Infrastrukturkosten zu erwerben. Ob und wann die Richtlinie wieder aktiviert wird ist zum Zeitpunkt des Berichtes unklar. Aktuell versucht der VDV die Notwendigkeit und Dringlichkeit dem Ministerium zu spiegeln.

Folglich richtet sich der Blick nach Fördermitteln auf Landesebene, welche teils ähnliche Förderquoten mit unterschiedlichen Programmen realisieren. So hat Hessen 2017 die Richtlinie „Förderung von Elektrobussen und für den Betrieb erforderlicher Infrastruktur“ aufgestellt, die derzeit überarbeitet wird. Weitere Möglichkeiten der Förderung bestehen darüber hinaus über das hessische Mobilitätsgesetz oder mit EU-Mitteln aus dem EFRE-Programm über die Landesförderbank, die Wirtschafts- und Infrastrukturbank Hessen (WIBank).

Für die Abschätzung im Folgenden gilt: Unter der Annahme, dass die oben genannten Förderquoten für den gesamten Zeitraum der Kostenbetrachtung gelten, ergeben sich die in Abbildung 8.8 aufgeführten Investitionskosten für Fahrzeuge und Infrastruktur. Hier ist zum einen festzustellen, dass die Investitionen für die Infrastruktur wesentlich geringer ins Gewicht fallen als die für Fahrzeuge. Insgesamt sind in der Abbildung die minimalen und maximalen Mehrkosten ausgewiesen, je nachdem wie sich die Förderungsrichtlinien nach 2030 entwickeln.

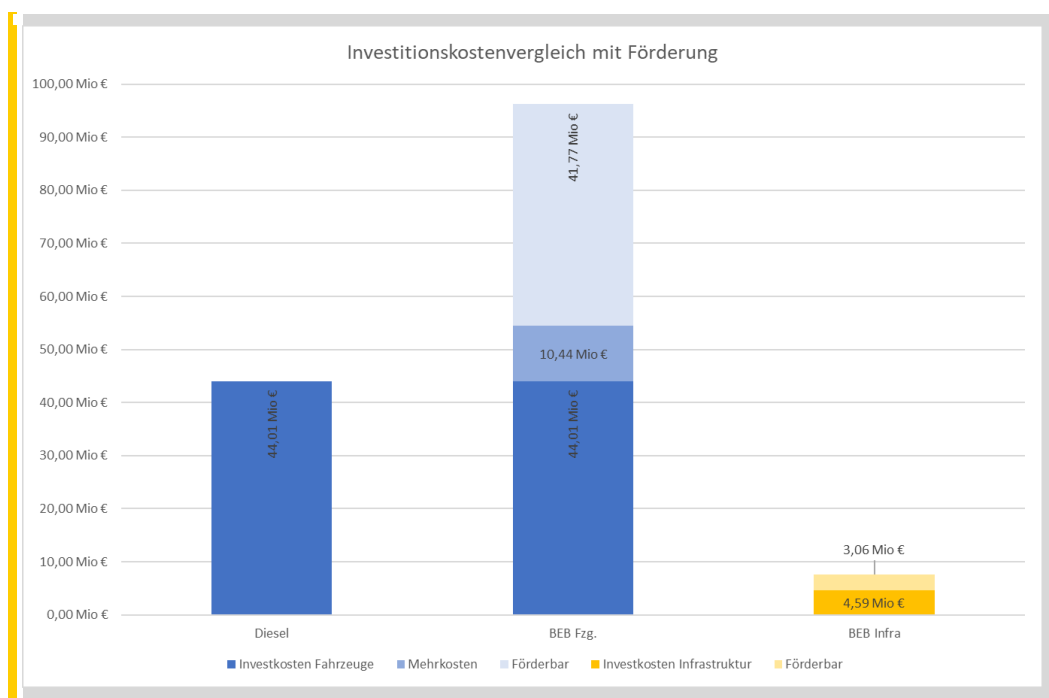


Abbildung 1.4: Investitionskosten mit Förderung – gesamter Betrachtungszeitraum

Angesichts der hohen Investitionskosten ist die Inanspruchnahme von Fördermitteln unverzichtbar. Diese sind notwendig, um den finanziellen Aufwand für den Übergang zu Elektrobussen zu bewältigen. Letztendlich zeigen diese Ausgaben nicht nur das Engagement für umweltfreundliche Mobilität, sondern sind auch ein wichtiger Schritt für die Stärkung der lokalen Akteure und der Region.

Abschließend für die Gesamtkostenbetrachtung sind in Abbildung 8.9 und Abbildung 8.10 noch einmal die Zusammensetzung der Gesamtkosten für die Vergleichsanalyse mit nur Dieselfahrzeugen und dem Hochlauf des vollständigen Ersatzes bei der Anschaffung ab 2026 mit batterieelektrischen Fahrzeugen zu sehen. Hervorzuheben ist, dass die Personalkosten mit einem fast gleichgebliebenen Anteil einer der größten Kostenpunkte sind. Während die Investitionskosten bei batterieelektrischen Fahrzeugen steigen, werden gleichzeitig auch die Betriebskosten geringer.

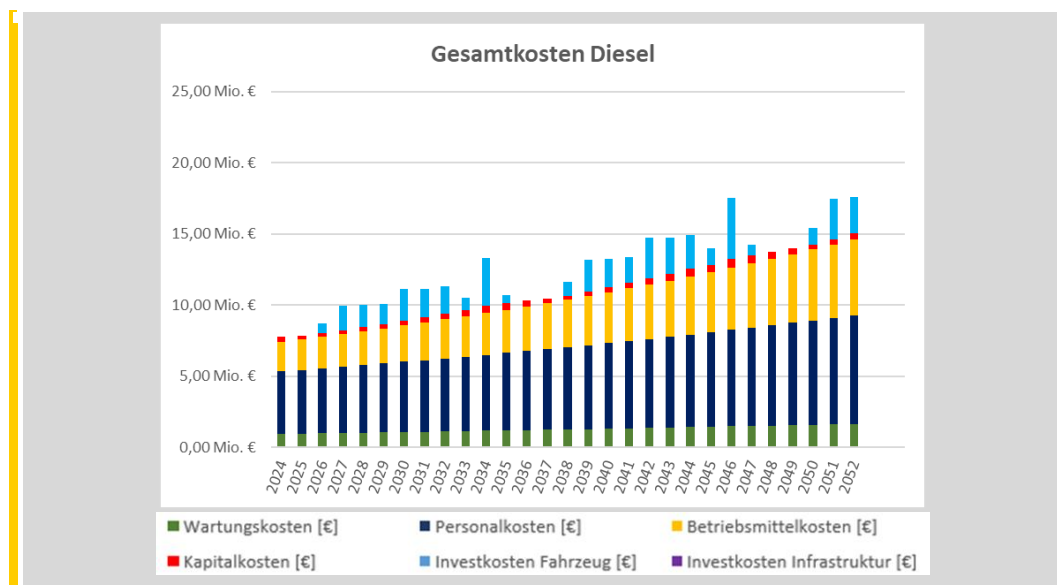


Abbildung 1.5: Gesamtkosten für Dieselsebusse

Management Summary

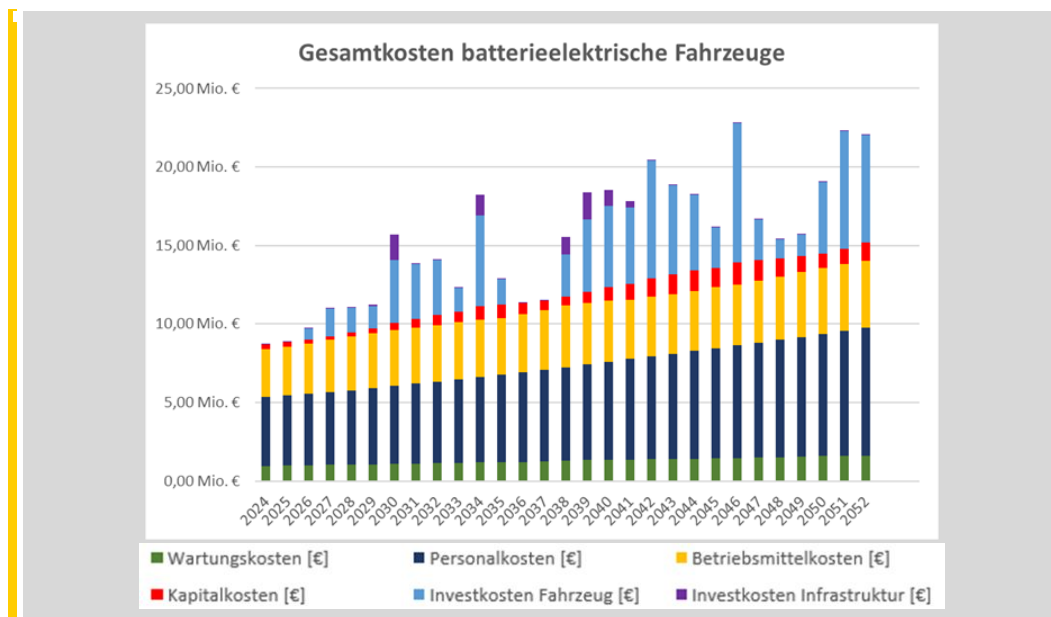


Abbildung 1.6: Gesamtkosten für batterieelektrische Busse

Über den gesamten Betrachtungszeitraum ergeben sich für die zwei Hochlaufszenerarien folgende Umweltkosten:

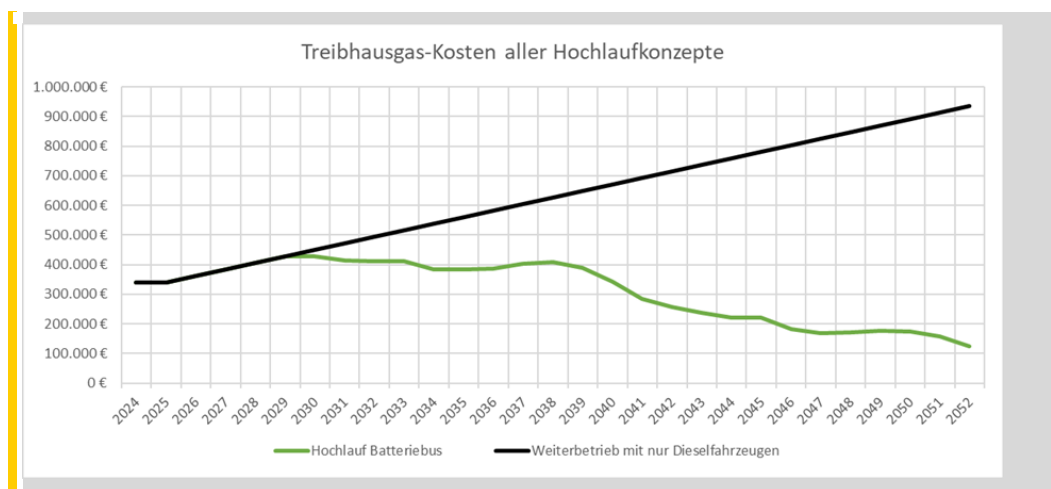


Abbildung 1.7: Treibhausgas-Kosten aller Hochlaufkonzepte

Die höchsten Umweltkosten entstehen bei einem Weiterbetrieb mit Dieselfahrzeugen über den gesamten Betrachtungszeitraum ohne alternative Antriebe. Ein Weiterbetrieb ist alleine durch die Vorgaben des SaubFahrzeugBeschG für Fahrzeuge der Klasse M3 der Klasse I nicht möglich. Umso mehr Elektrofahrzeuge in der Flotte vorhanden sind bei gleichbleibender Flottengröße, desto geringer werden die Umweltkosten. Im Vergleich der Hochlaufkonzepte zum Weiterbetrieb mit ausschließlich Dieselfahrzeugen können somit Umweltkosten in Höhe von bis 25 Millionen Euro vermieden werden.

2 Hintergrund der Machbarkeitsstudie

2.1 Ausgangslage

Die *Odenwald-Regional-Gesellschaft mbH*, im weiteren OREG genannt, ist eine kommunal getragene Gesellschaft zur Wirtschaftsförderung und Regionalentwicklung mit dem strategischen Ziel, die Wirtschafts- und Sozialstruktur des Odenwaldkreises zu stärken und die regionale Identität zu fördern. Als ÖPNV-Aufgabenträgerorganisation schafft die OREG die Rahmenbedingungen, unter denen die Verkehrsunternehmen der *Odenwälder Verkehrsbetriebe GmbH*, im weiteren OdVB genannt, eine qualitativ hochwertige Beförderungsleistung erbringen kann. Deren Gemeinsames Ziel ist es, dem Odenwaldkreis und seiner Bevölkerung eine nachhaltige ÖPNV-Infrastruktur zu bieten, die dazu beiträgt, die wirtschaftliche, gesellschaftliche und kulturelle Vielfalt der Region zu erhalten und fortzuentwickeln.

Im Zuge der Clean Vehicles Directive (CVD) und des SaubFahrzeugBeschG im ÖPNV hat die OREG und die OdVB eine Machbarkeitsstudie zur Einsatzmöglichkeit von Bussen mit alternativen Antrieben für die Dekarbonisierung der Busflotte beauftragt.

Gegenstand der geplanten Untersuchungen ist das Aufzeigen der technischen, betrieblichen, wirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen der Umstellung der Busse auf emissionsarme bzw. emissionsfreie Antriebe.

2.2 Umsetzung der Clean Vehicles Directive

Die „Richtlinie (EU) 2019/1161 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019 zur Änderung der Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge“ gibt für die EU-Mitgliedsstaaten Mindestziele für emissionsarme und -freie PKW sowie leichte und schwere Nutzfahrzeuge einschließlich Bussen bei der öffentlichen Auftragsvergabe vor. Die zu erfüllenden Quoten für Deutschland bei der Beschaffung schwerer Nutzfahrzeuge einschließlich Bussen im ÖPNV sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

Hintergrund der Machbarkeitsstudie

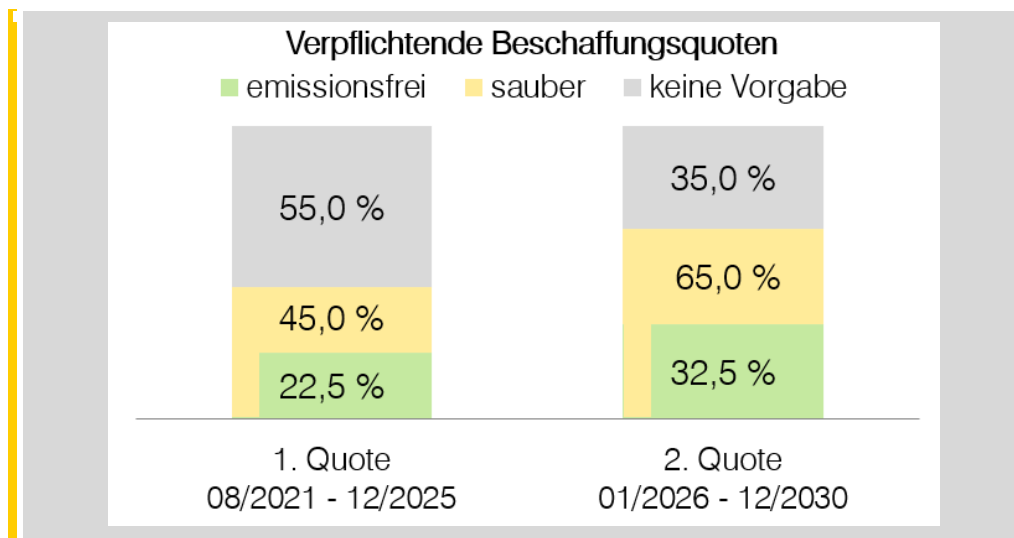


Abbildung 2.1: Beschaffungsquoten der CVD

Es werden zwei Referenzzeiträume definiert:

- » 02. August 2021 - 31. Dezember 2025: Bei Fahrzeugbeschaffungen gilt eine Mindestquote von 45 % für saubere Busse. Mindestens die Hälfte der Quote ist durch emissionsfreie Antriebe zu erfüllen.
- » 01. Januar 2026 - 31. Dezember 2030: Die Quote für saubere Fahrzeuge steigt auf 65 %. Erneut muss mindestens die Hälfte der Quote durch emissionsfreie Busse erfüllt werden.
- » Ab 01.01.2031: Werden keine neuen Mindestziele festgelegt, gelten die Quoten des 2. Referenzzeitraumes fort.

Eine Quotenverschärfung seitens der Gesetzgebung ist zu erwarten. Der Koalitionsausschuss der Bundesregierung Deutschland hat am 28. März 2023 ein Modernisierungspaket für Klimaschutz und Planungsbeschleunigung beschlossen. Darin wird eine Änderung des Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungsgesetzes angestrebt, so dass im Rahmen der öffentlichen Auftragsvergabe ab 2030 nur noch bilanziell emissionsfreie Fahrzeuge (insb. Nahverkehrs-Busse) beschafft werden dürfen. Auch die Europäische Kommission strebt ähnliche Änderung zur Änderung der CVD an.

Hintergrund der Machbarkeitsstudie

Die Begriffe „saubere“ und „emissionsfreie“ Fahrzeuge sind in der CVD definiert. Saubere Fahrzeuge werden mit alternativen Kraftstoffen im Sinne der europäischen Alternative Fuels Infrastructure Directive (AFID) betrieben. Bezogen auf Busse sind dies Fahrzeuge mit Nutzung der folgenden Kraftstoffe:

- » Strom
- » Wasserstoff
- » Biokraftstoff
- » Synthetische und paraffinhaltige Kraftstoffe
- » Erdgas inkl. Biomethan, gasförmig (CNG) und flüssig (LNG)
- » Flüssiggas (LPG)

Dies schließt bei der Nutzung von Strom alle rein elektrisch betriebenen Busse sowie auch Plug-In-Hybridbusse und konventionelle Oberleitungsbusse ein. Bei der Nutzung von Biokraftstoffen oder synthetischen und paraffinhaltigen Kraftstoffe dürfen diese nicht mit konventionellen fossilen Kraftstoffen gemischt werden.

Als emissionsfreie Fahrzeuge werden Fahrzeuge ohne Verbrennungsmotor sowie Fahrzeuge mit einem Verbrennungsmotor, der weniger als 1 g CO₂/kWh bzw. 1 g CO₂/km ausstößt, bezeichnet. Wiederum bezogen auf Busse meint dies Fahrzeuge mit rein elektrischem Antrieb sowie den Wasserstoff-Verbrenner, d. h. folgende Fahrzeuge:

- » Batteriebusse
- » Batterie-Oberleitungsbusse
- » Brennstoffzellenbusse mit/ohne Range-Extender
- » Wasserstoff-Verbrenner

Demzufolge sind emissionsfreie Fahrzeuge zugleich saubere Fahrzeuge. Andersherum gilt dies jedoch nicht.

Mit dem Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz (SaubFahrzeugBeschG) vom 9. Juni 2021 wurde die CVD in nationales Recht überführt. Dieses regelt, wie die Beschaffung sauberer und emissionsfreier Fahrzeuge in Deutschland zu erfolgen hat.

Hintergrund der Machbarkeitsstudie

Betroffen von dem Gesetz ist die Beschaffung von Fahrzeugen und Dienstleistungsaufträge durch öffentliche Auftraggeber und Sektorenauftraggeber durch folgende Verträge:

- » Verträge über den Kauf, das Leasing oder die Anmietung von Straßenfahrzeugen
- » Öffentliche Dienstleistungsaufträge gemäß der Verordnung (EG) Nr. 1370/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007, die folgende jährliche Schwellenwerte übersteigen:
 - 1 Million Euro oder 300.000 Kilometer
 - 2 Millionen Euro oder 600.000 Kilometer bei unter 23 Fahrzeugen
- » Dienstleistungsaufträge über Verkehrsdienste, die im EU-Amtsblatt (TED) unter folgenden CPV-Nummern bekannt gemacht werden:
 - 60112000-6 Öffentlicher Verkehr (Straße)
 - 60130000-8 Personensonderbeförderung (Straße)
 - 60140000-1 Bedarfspersonenbeförderung

Die Quoten sind in jedem Bundesland durch alle öffentlichen Auftraggeber und Sektorenauftraggeber insgesamt einzuhalten. Die Länder haben die Einhaltung der Quoten zu überwachen. Die Länder können für ihren Zuständigkeitsbereich zulassen, dass bestimmte Auftraggeber die Mindestziele nicht einhalten müssen, soweit diese bereits durch andere Auftraggeber innerhalb des Landes übererfüllt werden. Hierzu werden ausdrücklich Branchenvereinbarungen in den Ländern genannt. Die länderübergreifende Branchenvereinbarung zur Umsetzung des Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetzes im Busbereich für den ersten Referenzzeitraum 02.08.2021 bis zum 31.12.2025 im Busbereich (Klasse M 3) der Hessen beigetreten ist, liegt mit Schreiben vom 28.11.2023 vor.

Die Quoten müssen über den jeweiligen Referenzzeitraum eingehalten werden, d. h. es ist jeweils der Zeitraum vom 02.08.2021 bis 31.12.2025 bzw. vom 01.01.2026 bis 31.12.2030 als Ganzes relevant.

Verpflichtet zur Einhaltung der Quoten sind alle Beschaffungen, deren Auftragsbekanntmachung nach dem 2. August 2021 veröffentlicht wird oder bei denen nach dem 2. August 2021 zur Abgabe eines Angebotes aufgefordert wird. Es können jedoch für die Erfüllung der Ziele auch Zuschlagserteilungen angerechnet werden, die nach dem 2. August 2021 erfolgt sind, deren Bekanntmachung jedoch vor dem Stichtag lag.

Ob ein Auftrag unter die Quote des ersten oder zweiten Referenzzeitraumes fällt, bemisst sich am Datum der Zuschlagserteilung. Im praktischen Fall fällt damit eine Ausschreibung, die beispielsweise am 01.01.2025 veröffentlicht, für die aber erst am 01.01.2026 der Zuschlag erteilt wird, unter die Mindestziele der zweiten Periode.

Hintergrund der Machbarkeitsstudie

Im Allgemeinen sind die für die Personenbeförderung ausgelegte und gebaute Fahrzeuge der Klasse M₃ mit mehr als acht Sitzplätzen zusätzlich zum Fahrersitz und mit einer zulässigen Gesamtmasse von mehr als 5 Tonnen aktuell aus dem Anwendungsbereich des SaubFahrzeugBeschG ausgenommen.

Allerdings fällt die Fahrzeugklasse „M3 der Klasse I und A“ explizit wieder in den Anwendungsbereich des SaubFahrzeugBeschG. Die Fahrzeugklasse stellt den Stadtbus dar. Der Überlandbus „M3 der Klasse II und B“ ist damit nicht vom SaubFahrzeugBeschG betroffen. Die Hauptunterschiede zwischen der Fahrzeugklasse „M3 der Klasse I“ und „M3 der Klasse II“ sind im Rundschreiben vom 8. Juli 2021 vom VDV beschrieben.

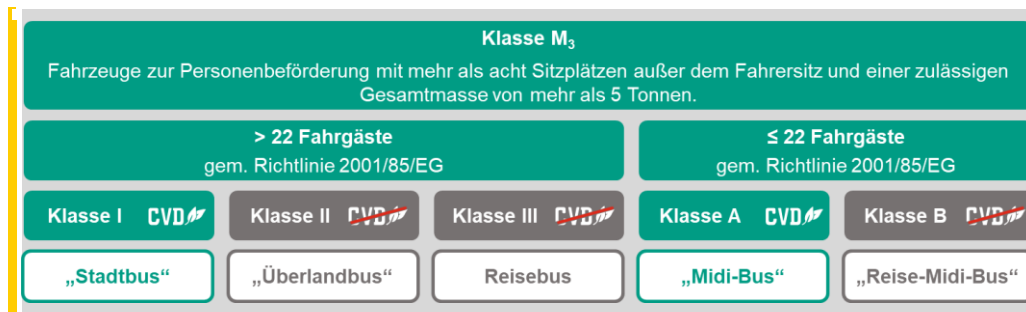


Abbildung 2.2: Relevante Fahrzeugklassen nach dem SaubFahrzeugBeschG

Kleintransporter mit acht Sitzplätzen oder weniger außer dem Fahrersitz sind nur vom SaubFahrzeugBeschG betroffen, wenn die Beschaffung der Fahrzeuge oberhalb des EU-Schwellenwertes liegt und somit eine EU-weite Ausschreibung erfordert.

In einem neuen EU-Kommissions-Vorschlag ist das Ziel die CO₂-Emissionen im Straßenverkehrssektor weiter zu verringern und neue Klimaschutz-Ziele für 2030, 2035 und 2040 einzuführen. Mit dem Vorschlag wird der Anwendungsbereich der Verordnung dahingehend ausgeweitet, dass beinahe alle neuen schweren Nutzfahrzeuge mit zertifizierten CO₂-Emissionen – kleinere Lastkraftwagen, Stadtbusse, Reisebusse und Anhänger – Emissionsreduktionszielvorgaben unterliegen.

Für „Überlandbusse“ sollen nun die gleichen Emissionsminderungsziele wie für Reisebusse gelten:

- » 45 % Emissionsreduktion ab 2030
- » 65 % Emissionsreduktion ab 2035
- » 90 % Emissionsreduktion ab 2040

Unklar ist aktuell, ob saubere und emissionsfreie Fahrzeuge bei einem ausgeschriebenen Dienstleistungsauftrag vom ersten Tag an in der geforderten

Hintergrund der Machbarkeitsstudie

Menge eingesetzt werden müssen. Das Gesetz enthält keine Angaben zur zeitlichen Einbringung der Fahrzeuge in Dienstleistungsaufträge. Der VDV interpretiert in seinem Rundschreiben vom 8. Juli 2021 im Sinne einer praktikablen Umsetzung, dass aufgrund der notwendigen Vorbereitungszeit zur Integration sauberer bzw. emissionsfreier Busse diese erst im Laufe der Vertragslaufzeit eingebracht werden müssen. Sollen die Fahrzeuge ab dem ersten Tag zum Einsatz kommen, wäre die Auftragsvergabe entsprechend frühzeitig zu erteilen. Können die Fahrzeuge erst im Laufe der Vertragslaufzeit eingebracht werden, muss ein Zeithorizont vorgegeben werden. In diesem Zusammenhang müssen ergänzend zum Gesetz Regelungen für die Quotenberechnung erlassen werden, d. h. Angaben darüber, welcher Stichtag oder ggf. welcher Zeitraum für die Quotenberechnung herangezogen wird. Die Frage zur zeitlichen Einbringung sauberer und emissionsfreier Fahrzeuge in einen Dienstleistungsauftrag sowie die konkrete Umsetzung im Land Hessen können zum Zeitpunkt der Finalisierung der Machbarkeitsstudie nicht abschließend beantwortet werden und sollten beim Entscheidungsprozess der OREG und der OdVB über die Einführung emissionsfreier Antriebe stets weiterverfolgt werden.

2.3 Zielsetzung

Ziel der Machbarkeitsstudie ist es, die Busflotte im gesamten Liniennetz der OdVB mit einer sauberen Antriebstechnologie abzubilden und ein optimales Einsatz- und Umstellungskonzept zu entwickeln, welches den Anforderungen der CVD bzw. SaubFahrzeugBeschG entspricht. In diesem Zuge sollen die technisch-betrieblichen, wirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen der Fuhrparkumstellung auf emissionsfreie Busse ermittelt und dem bisherigen konventionellen Dieselbusbetrieb gegenübergestellt werden. Das dabei angewandte Vorgehen wird in Abschnitt 1.4 detailliert erläutert.

Die Ergebnisse bilden die Grundlage für das abschließende Umsetzungskonzept zur schrittweisen Umstellung des Busbetriebes der OdVB auf emissionsfreie Antriebe. Mit Vorlage der Machbarkeitsstudie soll die OREG und die OdVB in die Lage versetzt werden, über die Umsetzung des erarbeiteten Konzepts zu entscheiden und mit dessen Realisierung anschließend unmittelbar beginnen zu können.

Diese umfassen die Planung, Beschaffung und Einführung der für den Betrieb notwendigen Infrastrukturen, Fahrzeuge und IT-Systeme. Weiterhin sind Maßnahmen zur Vorbereitung der Werkstatt und des Personals auf die Technologieumstellung vorzusehen und die Betriebsaufnahme einzuleiten.

2.4 Vorgehen in der Machbarkeitsstudie

Der Untersuchung vorangestellt wird eine allgemeine Technologiebetrachtung, welche einen Überblick über den aktuellen Stand der Technik von Elektrobussystemen in ihrer Gesamtheit gibt. Die Wissensvermittlung gegenüber den beteiligten Fach- und Führungskräften der OREG sowie der Geschäftsführung OdVB erfolgte zu Projektbeginn im Rahmen eines Grundlagenworkshops (Kapitel 3).

Die Grundlage für die Bewertung bildet die Bestandsaufnahme der Fuhrpark- und Betriebshofanalysen. Dabei wurden alle für die Untersuchung wesentlichen betrieblichen, technischen, verkehrlichen und wirtschaftlichen Eingangsdaten erfasst. Diese Daten wurden in Zusammenarbeit mit der OREG und der OdVB erhoben. Zudem wurden die grundlegenden Vorgaben und Zielvorstellungen sowie die für den Untersuchungsgegenstand relevanten Anforderungen und Rahmenbedingungen detailliert erfasst (Kapitel 4).

Im Rahmen der Strecken- und Einsatzanalysen wird eine generelle Clusterung des Liniennetzes in Referenzszenarien vorgenommen. Zur Einstufung können verkehrliche, topografische und betriebliche Eigenschaften herangezogen werden.

Hintergrund der Machbarkeitsstudie

Weiterhin werden die Endpunkte bzw. Wendepunkte hinsichtlich ihrer Eignung als mögliche Ladestandorte für den Gelegenheitsladereinsatz analysiert (Kapitel 5).

Im Mittelpunkt der Studie steht der Systemvergleich alternativer Antriebe anhand der Energiebilanzierung. Unter Maßgabe der vorab festgelegten Systemkonfiguration und -auslegung liefert die Gegenüberstellung von Energieinhalt und Energiebedarf eine Aussage hinsichtlich der Umsetzbarkeit der betrachteten Umläufe. Im Ergebnis wird für die untersuchten Antriebskonzepte der Anteil elektrifizierbarer Umläufe aufgezeigt (Kapitel 5).

Die für den Betrieb notwendige Energieversorgungsinfrastruktur wird für die untersuchten Antriebskonzepte konfiguriert und ausgelegt. Dabei werden Lade- und Tankinfrastruktur auf Basis der für den Busbetrieb erforderlichen Energie dimensioniert und unterschiedliche Möglichkeiten und Konzepte zur Integration in den Betriebshof diskutiert. Es werden außerdem mögliche Fahrzeughochläufe im Einklang mit dem SaubFahrzeugBeschG aufgezeigt (Kapitel 5).

Die Umstellung der Fahrzeugflotte auf das erarbeitete favorisierte Elektrobuskonzept wird ökonomisch und ökologisch bewertet. Es werden Maßnahmen zur Effizienzsteigerung des Gesamtsystems oder zur Einbindung lokaler Erzeugungskapazitäten aufgezeigt (Kapitel 7) und die Investitionskosten, Gesamtkosten sowie Mehr-/Minderkosten zum Dieselbus ausgewiesen. Außerdem werden die aus der Flottenumstellung resultierenden Umwelteffekte als Vergleichsdarstellung zum Dieselbus ausgewiesen (Kapitel 8).

Das sukzessive Vorgehen der Technologiebewertung führt im Ergebnis zu einem favorisierten Elektrobuskonzept. Die Technologiekomponenten und erforderlichen betrieblichen Anpassungen werden im Betriebskonzept aggregiert (Kapitel 9).

In der Umsetzungsempfehlung werden zusammengefasst die Vorteile der favorisierten Technologie aufgezeigt. Zudem werden die mit der Umsetzung verbundenen Chancen und Risiken herausgestellt (Kapitel 10).

3 Technologische Grundlagen

Im Folgenden wird ein Überblick über das Elektrobussystem in seiner Gesamtheit gegeben. Es werden die alternativen Antriebskonzepte und deren Kernkomponenten sowie die zugehörige Versorgungsinfrastruktur beleuchtet.

Das Wissen um den aktuellen Stand der Technik wurde vor Untersuchungsbeginn gegenüber der OREG und der OdVB präsentiert und im Rahmen eines gemeinsamen Workshops diskutiert. Einen aggregierten Überblick über die untersuchten Antriebskonzepte Batteriebus und Brennstoffzellenbus bietet die Anlage 3.

3.1 Elektrische Antriebskonzepte

Die elektrischen Antriebskonzepte von Bussen unterteilen sich gemäß Abbildung 3.1 in rein elektrische Antriebe und Hybridantriebe. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie werden ausschließlich die rein elektrischen Antriebskonzepte Oberleitungsbus, Batteriebus und Brennstoffzellenbus untersucht. Gemäß der Definition der CVD bzw. des SaubFahrzeugBeschG gelten diese als emissionsfrei. Für alle Busse mit elektrischem Antrieb kann übergeordnet der Begriff „Elektrobus“ verwendet werden.

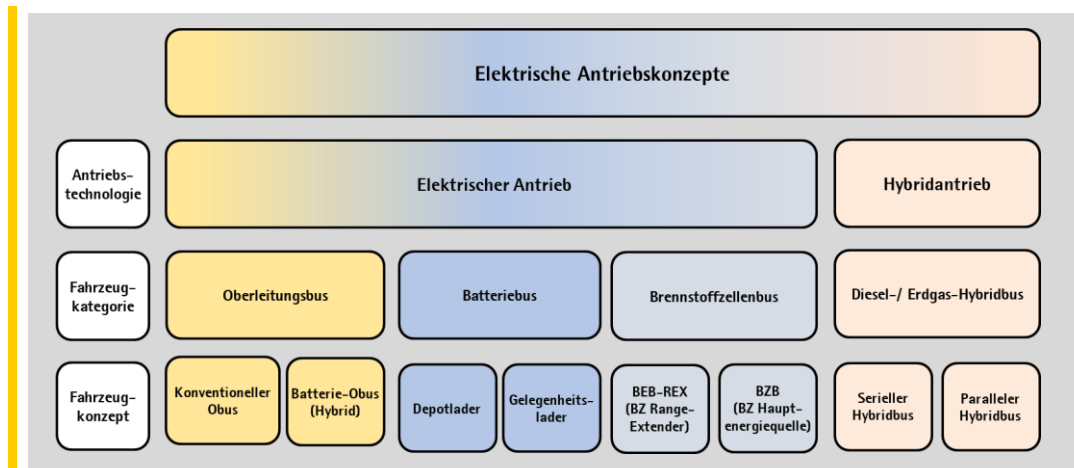


Abbildung 3.1: Konfigurationsmöglichkeiten Elektrobus

Bei allen elektrischen Antriebskonzepten besteht als gemeinsames Merkmal die Möglichkeit zur Rückgewinnung von Bremsenergie (Rekuperation) durch die Nutzung des Elektromotors im generatorischen Betrieb und dessen Gebrauch als Nutzbremse. Die dabei gewonnene Energie dient zum Zwischenladen des auf dem Fahrzeug befindlichen Energiespeichers. Die Rekuperation ermöglicht die Rückgewinnung von bis zu 75 % der Bremsenergie.

Technologische Grundlagen

3.1.1 Elektrischer Antrieb

Die nachfolgenden Fahrzeugkategorien werden betrachtet:

- » Oberleitungsbus
- » Batteriebus
- » Brennstoffzellenbus

3.1.1.1 Oberleitungsbus

Oberleitungsbusse werden in zwei Gruppen unterteilt, konventionelle Oberleitungsbusse und Batterie-Oberleitungsbusse.

Oberleitungsbusse verfügen nicht zwangsläufig über eine Traktionsbatterie, denn sie beziehen die benötigte Antriebsenergie über eine Oberleitung. Die Energiezuführung erfolgt dynamisch, d. h. während der Fahrt. Durch die baulich festgesetzte Lage der Oberleitungen sind Abweichungen vom regulären Streckenverlauf nur (sehr) beschränkt möglich, z. B. in Form von Spurwechseln, da die Fahrzeuge je nach Ausführung auf die permanente Energiezuführung aus der Oberleitung angewiesen sind. Aufgrund der dynamischen Energiezuführung aus der Oberleitung, spielt der Energiebedarf der Heizanlage oder der Klimatisierung im Hinblick auf die Reichweite des Fahrzeugs nur eine untergeordnete Rolle.

Konventioneller Oberleitungsbus

Konventionelle Oberleitungsbusse können verhältnismäßig kurze Fahrten ohne Oberleitung bei verminderter Leistung über ein Notaggregat oder einen Energiespeicher zurücklegen. Für den regulären Betrieb sind sie durchgehend auf die Oberleitung angewiesen.

Batterie-Oberleitungsbus

Batterie-Oberleitungsbusse verfügen über eine größere Traktionsbatterie und können je nach Energieinhalt mehrere Kilometer bei unveränderter Leistung ohne Oberleitung zurücklegen. Mit dieser Option ist der Aufbau eines Oberleitungsbus-Netzes wesentlich weniger komplex und preisintensiv, da Oberleitungen und deren Verzweigungen bspw. im Kreuzungs- und Kurvenbereich entfallen können.

Die Reichweite von Batterie-Oberleitungsbusen wird maßgeblich vom Energieinhalt der Traktionsbatterie, der Auslastung, Topografie und dem Fahrprofil auf den oberleitungsfreien Strecken beeinflusst. Beim Einsatz von Batterie-Oberleitungsbusen sollten, im Sinne der Betriebssicherheit, mindestens 40 % bis 50 % der Strecke sowie Endhaltstellen und Steigungsstrecken über eine

Oberleitung verfügen. Zu beachten ist, dass das Ein- und Ausdrahten der Fahrzeuge nach Stand der Technik nur im Stand erfolgen kann. Das Ein- und Ausdrahten während der Fahrt befindet sich bislang im Status der Prototypenphase.

Oberleitungsbusse gelten als erprobt und robust und zeichnen sich durch lange Nutzungszeiten von bis zu 20 Jahren sowie geringe Betriebskosten aus. Die Kosten für Wartung und Instandhaltung sind geringer als für Dieselsebusse. Die Verfügbarkeit entspricht der von Dieselsebusen. Unter anderem aufgrund der hohen Aufwendungen für die erforderliche Infrastruktur und im Vergleich zu Dieselsebusen höheren Fahrzeugkosten (vgl. Tabelle 3.1) werden sie europaweit jedoch nur selten eingesetzt.

Fahrzeug	Oberleitungsbus	Batterie-Oberleitungsbus
Solobus	540.000-610.000 €	580.000-670.000 €
Gelenkbus	580.000-750.000 €	720.000-880.000 €

Tabelle 3.1: Investitionskosten Oberleitungsbus

3.1.1.2 Batteriebus

Batteriebusse verfügen über eine Traktionsbatterie (vgl. Abbildung 3.2), welche stationär für den Betriebseinsatz mit elektrischer Energie geladen wird (Plug-In-System und/oder Pantograph) sowie einen oder mehrere Elektromotoren (E) zur Bewältigung der eigentlichen Traktionsaufgabe. Die Einsatzfähigkeit dieser Fahrzeuge richtet sich nach dem Energieinhalt des Batteriespeichers sowie der zulässigen Lade- und Endladeleistung und damit der resultierenden maximalen Ladegeschwindigkeit.

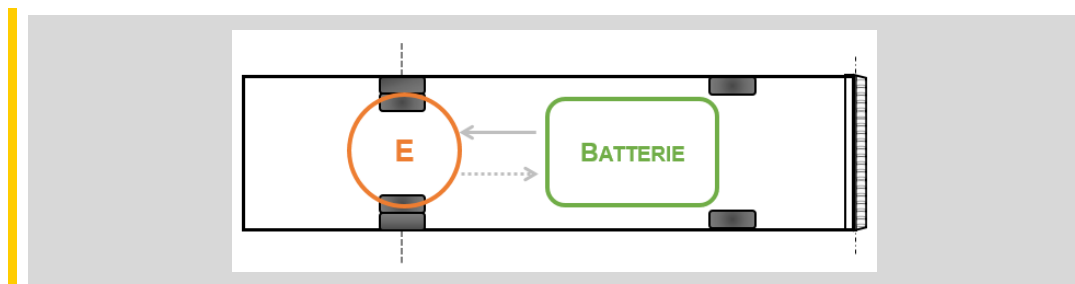


Abbildung 3.2: Prinzip Batteriebus

Technologische Grundlagen

Batteriebusse werden nach ihrer Ladestrategie in Depot- und Gelegenheitslader unterteilt. Die Wahl der jeweiligen Ladestrategie wird im Wesentlichen von folgenden Aspekten bestimmt:

- » Heizkonzept (rein elektrisch oder hybrid),
- » Klimatisierungskonzept (Fahrerklimateuerung, ΔT -Klimatisierung, Vollklimatisierung),
- » Umlaufplänen und Gesamtfahrweiten,
- » der Möglichkeit von Fahrpausen für das Wiederaufladen der Batterien und
- » der Möglichkeit zum Errichten/Betreiben von Ladeinfrastruktur außerhalb des Betriebshofs.

Depotlader

Das Depotlader-Prinzip beruht auf der ausschließlichen Nachladung der Batterien auf Betriebshöfen oder Abstellanlagen, während dafür vorgesehener Aufenthaltszeiten.

Ist der Energieinhalt der Hochvoltbatterie im Fahrzeug für einen ganzen Tageseinsatz ausgelegt, so handelt es sich um einen Depotlader. Die Nachladung der im Vergleich zum Gelegenheitslader größeren Energiespeicher erfolgt an zentralen Punkten während der Betriebspause, vorzugsweise im Betriebshof. Bei zeitgleicher Ladung von mehreren Bussen an einem Ort ist eine entsprechende Anzahl von Ladepunkten vorzusehen. Die Auslegung der Ladepunkte ist abhängig von dem Energieinhalt und der maximalen Ladeleistung der Batterie und des für die Ladung zur Verfügung stehenden Zeitfensters. Diese Parameter bestimmen das Betriebskonzept.

Während der mit moderater Leistung zeitlich ausgedehnten stationären Ladung kann der Ladezyklus optimiert werden. Diese Ladestrategie schont die Speicherzellen, was sich positiv auf die Lebensdauer der Batterien auswirkt.

Aufgrund der bislang noch begrenzten Reichweite ist es möglich, auch beim Depotlader eine Zwischenladung während des Einsatztages zu realisieren, um die Tagesfahrleistung zu optimieren oder die Netzlast während der Nachladung zu reduzieren. Eine solche Zwischenladung mit, im Vergleich zur Gelegenheitsladung, zum Teil geringer Ladeleistung kann beispielsweise bei längeren Betriebspausen im Betriebshof oder an den Wendepunkten erfolgen. Auch ein Fahrzeugtausch ist für ein solches Szenario denkbar.

Der beim Depotlader erforderliche große Energieinhalt des Speichers geht einher mit einem hohen Eigengewicht und einem entsprechenden Platzbedarf. In der Folge liegt das Fahrzeugleergewicht tendenziell oberhalb dem eines Gelegenheitsladers. Bei den meisten Herstellern befinden sich die

Technologische Grundlagen

Traktionsbatterien auf dem Dach des Fahrzeugs bzw. im vormaligen Motorturm. Zunehmend gehen einige Hersteller bei Neuentwicklungen von Elektrobussen zur Installation von unterflurigen Batteriepaketen (Vorteil: niedriger Schwerpunkt) über.

Die Kosten für den Energiespeicher steigen nahezu linear mit dem Energieinhalt des verbauten Energiespeichers. Bei Depotladern kommen überwiegend die sogenannten Hochenergiebatterien zum Einsatz. Sie sind für große Energiemengen und eine moderate Ladeleistung ausgelegt. Kapazitätsbereinigt ist die Hochenergiebatterie kostengünstiger als eine Hochleistungsbatterie. Typische, nach derzeitigem Stand der Technik eingesetzte Zellchemien für Hochenergiebatterien sind LFP- (Lithium-Eisenphosphat) und NMC- (Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid) Batterien. Die NMC-Batterie zeichnet sich durch eine höhere gravimetrische Energiedichte, die LFP-Batterie durch geringere spezifische Kosten in €/kWh sowie eine höhere Zyklenfestigkeit und Kobaltfreiheit aus.

Die Verfügbarkeit von Batteriebussen liegt aktuell bei maximal 90 % bis 92 %. Somit sind mindestens acht bis zehn Prozent der Flottengröße als Werkstattreserve vorzusehen. Aufgrund der neuartigen Technologie sind eher 12 % bis 13 % empfehlenswert. Bezüglich der Wartung und Instandhaltung liegen noch keine ausreichenden Informationen zur Bewertung vor. Der Wartungs- und Instandhaltungsaufwand kann bei Batteriebussen im Vergleich zu Dieselnissen als ähnlich eingeschätzt werden. Zwar ist der Elektroantrieb mechanisch einfacher aufgebaut als eine Verbrennungskraftmaschine und kann im generatorischen Betrieb rekuperierend und verschleißfrei bremsen, dafür ergeben sich neue Wartungs- und Instandhaltungsumfänge. So weisen beispielsweise die komplex aufgebauten Elektroportalachsen geringere Standzeiten als konventionelle Antriebsstränge auf. Auch der Reifenverschleiß ist aufgrund der hohen möglichen Anfahrmomente der Traktionsmotoren und des momentan noch höheren Fahrzeugleergewichts tendenziell höher. Allerdings verwenden einige Hersteller bei Neuentwicklungen von Elektrobussen schon eine Leichtbauweise, welche das Fahrzeugleergewicht enorm senkt.

Bei entsprechender Dimensionierung der Fahrzeugbatterie kann ein Depotlader viele der derzeit üblichen Betriebsszenarien von Dieselnissen gleichwertig abbilden. Abhängig vom Fahrprofil und der Fahrzeugkonfiguration können auch bei hohem Heiz- bzw. Kühlbedarf mit einer Ladung Reichweiten von ca. 150 km bis 300 km erreicht werden. Sie bieten im Vergleich zu Gelegenheitsladern – welche stets eine betriebliche Abhängigkeit von ihrer Zwischenlademöglichkeit haben – eine größere Einsatzflexibilität, lediglich begrenzt durch die Reichweite des Busses. Um entsprechend große Strecken zurücklegen zu können, müssen Depotlader im Vergleich zu Gelegenheitsladern auf einem Betriebshof oder einer Abstellanlage deutlich mehr Energie nachladen. Das kann wiederum zu einer leistungsstärkeren und damit teureren Ladeinfrastruktur sowie zu höheren

Technologische Grundlagen

Anschlussleistungen und damit verbundenen Mehrkosten führen. Die Fahrzeugbeschaffungskosten von Depotladern liegen teilweise noch unter denen für Gelegenheitslader (vgl. Tabelle 3.2).

Gelegenheitslader

Gelegenheitslader (engl. Opportunity Charger) werden in der Regel bei planmäßig längeren Aufenthaltszeiten auf dem Betriebshof sowie an Ladestationen außerhalb des Betriebshofes geladen.

Die Ladestrategie sieht entsprechend der Streckencharakteristik neben einer Nachladung auf dem Betriebshof weitere Ladepunkte an Wendepunkten vor. Zusätzlich können ausgewählte Haltestellen mit längerer Haltezeit als Ladepunkte mit hoher Nachladeleistung (Gelegenheitsladung) ausgelegt werden.

Der Gelegenheitslader verfügt über einen Energiespeicher mit geringerem Energieinhalt (vgl. Depotlader), welcher nicht für einen kompletten Tageseinsatz ausgelegt ist. Der Energiespeicher muss während des Linieneinsatzes auf der Strecke nachgeladen werden. Im Gegensatz zum Depotlader mit Zwischenladung kommen beim Gelegenheitslader hohe Ladeleistungen und oft auch ein eigens hierfür vorgesehenes Ladesystem (z. B. Docking-Station) zur Anwendung.

Der Batteriebus fährt einen Ladepunkt, der an einer Haltestelle eingerichtet ist, an. Sobald das Fahrzeug am Ladesystem positioniert ist, wird automatisch oder durch eine Aktion des Fahrpersonals die Kontaktherstellung ausgelöst und anschließend die Energieübertragung mit Leistungen bis derzeit etwa 450 kW gestartet. Generell beanspruchen hohe Ladeleistungen herkömmliche Akkumulatoren stärker, d. h. sie führen zu einer verstärkten Zellalterung und wirken sich somit negativ auf die Lebensdauer des Energiespeichers aus.

Im Vergleich zum Depotlader-Konzept, welches den Einsatz großer, teils kostenintensiver und schwerer Energiespeicher erfordert, kann durch das Zwischenladen während des Betriebseinsatzes der Energiespeicher kleiner ausgelegt werden. Dies wirkt sich in mehreren Aspekten positiv auf das Gesamtfahrzeug aus: Kleinere Energiespeicher haben ein geringeres Gewicht und nehmen weniger Bauraum in Anspruch. In Tabelle 3.2 sind Kostenindikationen für Gelegenheitslader aus der Programmbegleitforschung „Innovative Antriebe und Fahrzeuge“ des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur aufgeführt (BMVI, ab 2018 laufend).

Da nur vergleichbar geringe Speicherkapazitäten benötigt werden, kommen neben den elektrochemischen Batterien auch andere Speichertechnologien wie Kondensatoren bzw. genauer Ultrakondensatoren (Supercaps) in Betracht. Sie eignen sich für viele Lastzyklen und hohe Spitzenströme ohne große

Technologische Grundlagen

Beanspruchung des Speichers, weisen aber geringere Energiedichten auf. Auf Grund des hohen Platzbedarfs sind Supercaps nur bedingt für den Einsatz in Elektrobusen geeignet und finden sich daher nur in hybriden Antriebssystemen in Verbindung mit Verbrennungsmotoren.

Gelegenheitslader bieten demnach ein höheres Platz- und Gewichtspotenzial für die Personenbeförderung sowie für den Verbau weiterer Aggregate. Der freiwerdende Bauraum wird dabei für – bei der Gelegenheitsladung – benötigte Komponenten wie z. B. dem Pantographen genutzt.

Da zur Wahrung der Betriebssicherheit gewisse Ladezeiten sicherzustellen sind, erfordert die Gelegenheitsladung gegebenenfalls eine Erhöhung der Wendezeiten, was zu Anpassungen in der Umlauf- und Betriebsablaufplanung führt.

Bei Sicherstellung der erforderlichen Ladevorgänge kann ein Gelegenheitslader im Prinzip zeitlich unbegrenzt eingesetzt werden. Auf entsprechend ausgestatteten und betriebenen Fahrwegen können somit Dieselbusse vollständig ersetzt werden.

Die Abhängigkeit der Gelegenheitslader von den vorgesehenen Zwischenladepunkten schränkt den flexiblen Einsatz der Gelegenheitslader im Liniennetz grundsätzlich stark ein. Im Zuge betrieblicher Planungen, bspw. während kurzfristiger Umlaufanpassungen durch Baumaßnahmen oder langfristiger Umlaufanpassungen (Umstellung des Liniennetzes), sind die Ladepunkte als zusätzliche fixe Randbedingung in die Planung aufzunehmen.

Sobald einzelne Ladepunkte durch eine Vielzahl von Bussen genutzt werden, kann ein Investitionsvorteil erzielt werden.

Fahrzeug	Kosten Depotlader	Kosten Gelegenheitslader
Kleinbus	400.000 - 480.000 €	fehlende Datengrundlage
Solobus	520.000 - 650.000 €	550.000 - 690.000 €
Gelenkbus	750.000 - 900.000 €	750.000 – 950.000 €

Tabelle 3.2: Investitionskosten Batteriebus (BMVI, ab 2018 laufend)

3.1.1.3 Brennstoffzellenbus

Bei Brennstoffzellenbussen handelt es sich um einen seriellen Hybridantrieb mit einer wasserstoffbetriebenen Brennstoffzelle an Stelle der Motor-Generatoreinheit im Dieselbus. Die Brennstoffzelle (BZ) wird über einen Gleichspannungswandler an den Zwischenkreis des elektrisch angetriebenen Fahrzeugs angebunden.

Technologische Grundlagen

Es wird zwischen Batteriebus mit Brennstoffzelle als Range Extender (BEB-REX) und Brennstoffzellenbus (BZB) mit der Brennstoffzelle als Hauptenergiewandler unterschieden (vgl. Abbildung 3.3). Den Elektromotor oder die Elektromotoren zum Antrieb des Fahrzeugs, in der Abbildung als ‚E‘ dargestellt, nutzen beide Konzepte.

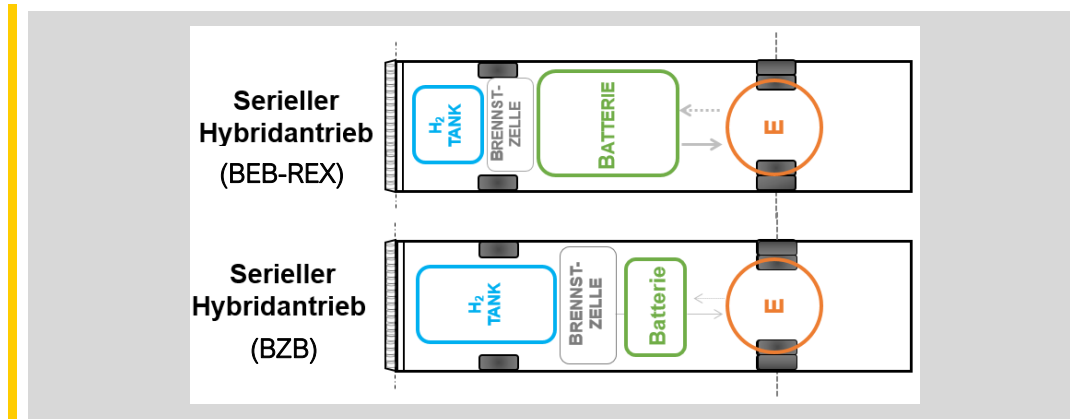


Abbildung 3.3: Kategorisierung von Brennstoffzellenbussen

Beide Fahrzeuge verfügen über eine vergleichbare Antriebskonfiguration. Der wesentliche Unterschied liegt in der Auslegung des Traktionsenergiespeichers und der Brennstoffzelle. Bei dem Brennstoffzellenbus wird der wesentliche Teil der Antriebsenergie durch die Brennstoffzelle bereitgestellt, beim BEB-REX durch die Traktionsbatterie.

Brennstoffzellenbus (Brennstoffzelle als Hauptenergiequelle)

Der Brennstoffzellenbus kann lediglich mit der entsprechenden Wasserstoffversorgung betrieben werden.

Der Brennstoffzellenbus verfügt auch über eine Traktionsbatterie. Diese dient dazu, Energie aus der Rekuperation sowie überschüssige Energie der Brennstoffzelle zu puffern und ggf. anspruchsvolle Leistungsprofile, wie erhöhte Beschleunigung oder Anfahren bei Steigung zu unterstützen. Ein regelmäßiges externes Nachladen der Traktionsbatterie ist nicht erforderlich, da die Versorgung hauptsächlich über die Brennstoffzelle erfolgt. Durch die größeren Reichweiten und kürzeren Betankungszeiten (<15 Min. mit Vorkühlung) können reine Brennstoffzellenfahrzeuge im Vergleich zu rein batterieelektrischen Bussen flexibler eingesetzt werden. Die Betankung der Fahrzeuge erfolgt wie bei einem Erdgasfahrzeug über einen Tankstutzen.

Aktuell auf dem Markt befindliche Brennstoffzellenbusse verfügen über Wasserstofftanks mit einem Fassungsvermögen von 30 bis 51 kg H₂ und können

Technologische Grundlagen

damit 300 bis 400 km zurücklegen. Der Energiebedarf der Gesamtfahrzeuge wird aufgrund der zur Beheizung nutzbaren Abwärme der Brennstoffzelle (60 bis 90 °C) geringer vom Heizkonzept beeinflusst als dies z. B. beim Batteriebus der Fall ist. Der Wasserstoffverbrauch von reinen Brennstoffzellenbussen liegt bei 8,5 bis 10,6 kg/100 km. Je nach Bezugskosten für Wasserstoff und je nach Fahrbedingung ergeben sich daraus Energiekosten von etwa 80 bis 120 €/100 km.

Die Markteinführung von Brennstoffzellenbussen steht aktuell noch am Anfang, weshalb auch eine Abschätzung anfallender Kosten nur schwer möglich ist. Die in Tabelle 3.3 genannten Werte sind deshalb als Orientierung zu werten.

Komponente	Brennstoffzellenbus	BEB-REX
Leistung Brennstoffzelle (12 m)	85 - 100 kW	30 - 60 kW
Energieinhalt Batteriespeicher	28 - 40 kWh	> 200 kWh
Investitionskosten Solobus	600.000 - 750.000 €	600.000 - 750.000 €
Investitionskosten Gelenkbus	800.000 - 1.050.000 €	800.000 - 1.050.000 €

Tabelle 3.3: Charakteristika Brennstoffzellenbus

Zu Wartungs- und Instandhaltungskosten sowie zur Verfügbarkeit von Brennstoffzellenbussen liegen derzeit noch keine ausreichenden Erkenntnisse vor. Aktuell wird nicht davon ausgegangen, dass die Instandhaltungskosten unterhalb derer von Dieselmotoren liegen. Bis zum Vorliegen ausreichender Daten sollte daher von einer Kostengleichheit ausgegangen werden. Die betriebliche Verfügbarkeit von Brennstoffzellenbussen wird aktuell auf maximal 90 % angesetzt.

Batteriebus mit Brennstoffzelle als Range Extender (BEB-REX)

Die Traktionsbatterie des BEB-REX muss regelmäßig extern (z. B. durch Ladestecker) geladen werden. Damit ist beim BEB-REX generell eine zusätzliche Ladeinfrastruktur erforderlich. Die – im Vergleich zum reinen Brennstoffzellenbus – deutlich größere Batterie (> 200 kWh) stellt maßgeblich die Traktionsenergie für die abzubildende Reichweite bereit. Die zusätzlich installierte Brennstoffzelle dient der Verlängerung der Reichweite durch eine kontinuierliche Nachladung der Batterie während des Betriebs. Der Vorteil bei diesem Konzept liegt in einer weniger transienten Beanspruchung der Brennstoffzelle. Diese kann daher kontinuierlicher in Kennfeldpunkten mit mittlerer Last betrieben werden. In diesen

Technologische Grundlagen

Lastpunkten arbeitet die Brennstoffzelle mit ihrem optimalen Wirkungsgrad, was sich positiv auf den Gesamtenergieverbrauch auswirken kann. Außerdem ist die Nutzung von elektrischer Energie durch die Batterie energetisch effizienter als die Nutzung von Wasserstoff und bringt somit geringere Betriebskosten mit sich.

Der Speicherinhalt der Brennstoffzellenbusse mit Range-Extender ist mit 25 – 35 kg H₂ geringer als der des reinen Brennstoffzellenbusses. Die Verbräuche eines BEB-REX können je nach Umlauflänge und Fahrzeugkonfiguration aufgrund des Betriebsregimes zwischen Batteriespeicher und Brennstoffzelle im Vergleich zum reinen Brennstoffzellenfahrzeug stark variieren. In Zukunft könnte der Einsatz einer Wasserstoff-Brennstoffzelle als Range-Extender dazu dienen, besonders lange und somit für rein batterieelektrische Busse ungeeignete Strecken ergänzend zu elektrifizieren.

Das BEB-REX -Konzept befindet sich in der Vorserie. Aktuell bietet lediglich ein auf dem deutschen Markt relevanter Hersteller ein vorserienreifes, verfügbares Fahrzeug an. Aus diesem Grund stellt die Kostenabschätzung in Tabelle 3.3 nur eine Indikation dar.

3.1.2 Hybridantrieb

Ein Hybridantrieb ermöglicht den Antrieb eines Busses mit unterschiedlichen Energieträgern. Er verfügt in der Regel:

- » über einen Verbrennungsmotor, mit oder ohne elektrischen Generator sowie
- » über einen oder mehrere Elektromotoren und
- » einen Energiespeicher zum Bereitstellen und/oder Speichern elektrischer Energie.

Je nach Umsetzung des Hybridantriebs erfolgt eine Kategorisierung entsprechend den folgenden Kategorien: Voll- und Mildhybrid.

Der Vollhybridantrieb erlaubt abschnittsweise ein reinelektrisches Fahren, der Verbrennungsmotor lässt sich vollständig auskuppeln. Beim Mildhybridantrieb ist ein Elektromotor/-generator in das Getriebe integriert. Der Elektromotor/-generator wird hauptsächlich vom Verbrennungsmotor angetrieben. Beim Bremsen kann mittels Rekuperation Energie aufgenommen und dem System beim Beschleunigen wieder zugeführt werden. Der Elektromotor wirkt lediglich unterstützend, ein rein elektrisches Fahren ist jedoch nicht möglich.

Besteht die Möglichkeit, ein Hybridfahrzeug stationär über eine externe Energiezuführung zu laden, so bezeichnet man dieses als Plug-In-Hybrid. In der Regel sind Plug-In-Hybride immer Vollhybridfahrzeuge und können als paralleler oder serieller Hybrid ausgeführt sein.

Im Folgenden wird entsprechend der Antriebskonzepte (vgl. Abbildung 3.4) zwischen dem seriellen Hybridbus und parallelen Hybridbus unterschieden.

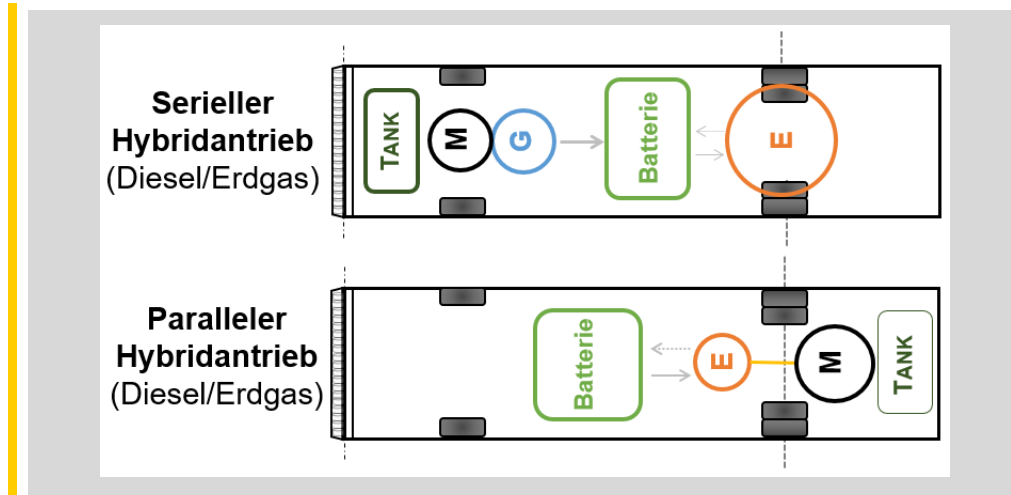


Abbildung 3.4: Hybride Fahrzeugkonzepte am Beispiel Diesel-/Erdgas-Bus

3.1.2.1 Serieller Hybridbus

Beim seriellen Hybridantrieb wirkt der Elektromotor als primärer Antrieb. Die benötigte elektrische Energie wird in der Regel von einer On-Board-Energieerzeugung, meist einer Motor-Generatoreinheit (Tank/M/G), bereitgestellt. Das System verfügt über einen Traktionsenergiespeicher (Batterie), welcher sowohl Energie der On-Board-Energieerzeugung als auch rekuperierte Energie aufnehmen und an den Elektromotor (E) abgeben kann. Der Verbrennungsmotor verfügt über keine mechanische Verbindung zu den anzutreibenden Rädern. Bei Fahrzeugen mit seriellen Hybridantrieb handelt es sich immer um Vollhybride.

3.1.2.2 Paralleler Hybridbus

Beim parallelen Hybridantrieb können sowohl der Elektro- als auch der Verbrennungsmotor das Fahrzeug direkt antreiben. Je nach Anforderung kann der elektrische Antrieb genutzt werden, um Lastspitzen zu glätten (z. B. beim Anfahren) oder Teilstrecken rein elektrisch zu bewältigen. Der Verbrennungsmotor kann dazu ausgekoppelt und gestoppt werden. Fahrzeuge mit parallelem Hybridantrieb können somit als Voll- oder Mildhybridfahrzeuge ausgeführt sein.

3.1.3 Antriebssystem

In Bussen mit alternativem Antrieb kommen vornehmlich wechselstrombetriebene Synchron- oder Asynchronmotoren zum Einsatz. Neben einem einfachen technischen Aufbau weisen diese Elektromotoren einen hohen energetischen Wirkungsgrad im Vergleich zu Dieselmotoren auf.

Technologische Grundlagen

In Diesebussen wird generell ein einzelner Motor eingesetzt, der die gesamte Traktionsleistung aufbringt. Das Pendant der alternativen Antriebe stellt dazu das Zentralmotorkonzept dar. Darüber hinaus können Elektrobusse auch mit mehr als einem Elektromotor angetrieben werden. Solche Systeme werden üblicherweise als radnahe oder Radnabenantriebe ausgeführt. Ihnen gemein ist die Verteilung der Gesamttraktionsleistung auf mehrere Motoren.

3.1.3.1 Zentralmotoren

Zentralmotoren sind bei Diesebussen Standard. Im Hinblick auf alternative Antriebe bietet ein elektrischer Zentralmotor eine vergleichsweise einfache Möglichkeit zur Umrüstung und der damit nachträglichen Elektrifizierung eines Fahrzeugs. In diesem Fall werden Verbrennungsmotor, Drehmomentwandler, Getriebe und Tank durch Batterie, Elektromotor und Wechselrichter ersetzt. Viele der vorher bereits vorhandenen Komponenten wie z. B. Antriebswelle und Differentialgetriebe verbleiben (vgl. Abbildung 3.5).



Abbildung 3.5: Antriebsstrang Zentralmotor

Zentralmotoren gelten als robust und vergleichsweise preiswert. Ein Nachteil am Konzept Zentralmotor ist jedoch die hohe Anzahl an mechanischen Schnittstellen, durch welche der Wirkungsgrad des Antriebsstrangs negativ beeinflusst wird. Der Wirkungsgrad von Antriebssträngen mit Zentralmotor beträgt etwa 75 - 80 %. Diese Antriebsarchitektur kommt beispielsweise bei Bussen vom Typ „MAN Lions City E“ zum Einsatz.

3.1.3.2 Radnaher Antrieb

Beim Einsatz von radnahen Motoren verfügt der Elektrobus über eine Achse mit zwei Elektromotoren jeweils unmittelbar vor einem Rad. Die Kopplung zum Rad findet über ein Planetengetriebe statt, sodass der Motor nicht direkt im Radkörper angeordnet ist. Aufgrund der radnahen Bauweise können auf ein Differentialgetriebe sowie die beim Zentralmotor vorhandene Antriebswelle verzichtet werden (vgl. Abbildung 3.6).

Radnahe Motoren ermöglichen durch ihren Einbauort eine größere Flexibilität bei der Gestaltung des Innenraums. Mit sinkender Anzahl von Komponenten im Antriebsstrang, reduzieren sich außerdem auch die Energieverluste, im Vergleich zur Variante mit Zentralmotor. Der Wirkungsgrad von Antriebssträngen mit

radnahen Motoren beträgt etwa 80 - 85 %. Diese Variante findet bei der häufig verwendeten Antriebsachse vom Typ „AVE 130“ des Herstellers ZF Anwendung.



Abbildung 3.6: Antriebsstrang radnaher Motor

3.1.3.3 Radnabenantrieb

Unter Radnabenmotoren sind Elektromotoren zu verstehen, die sich in den Felgen der Fahrzeuge befinden und die Radnabe tragen. Bei diesem Aufbau entfallen alle übrigen Komponenten des Antriebsstrangs, die Umdrehungen des Motors werden direkt auf das Rad übertragen (vgl. Abbildung 3.7). Aus diesem Grund stellen sie die effizienteste Antriebsmöglichkeit dar. Aufgrund ihrer räumlichen Anordnung im Radkörper ermöglichen zwar auch sie eine größere Flexibilität bei der Innenraumgestaltung, wegen der hohen ungefederten Masse kann sich ihre Anwendung jedoch negativ auf die Fahrdynamik auswirken.



Abbildung 3.7: Antriebsstrang Radnabenmotor

Der Wirkungsgrad von Antriebssträngen mit Radnabenmotor beträgt rund 90 %. Ein Vertreter dieser Antriebsart ist beispielsweise das Antriebsmodul „ZAwheel“ der Firma Ziehl-ABEGG.

3.1.4 Energiespeicher

Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor beziehen ihre Energie aus einem flüssigen oder gasförmigen Kraftstoff (i. d. R. Diesel oder Erdgas), der im Tank mitgeführt wird. Der Tank speichert also chemische Energie. Für Elektrofahrzeuge hingegen existieren verschiedene Möglichkeiten, die benötigte Antriebsenergie zu speichern. Unterschieden wird zwischen chemischen, elektrochemischen und elektrischen Speichern. Es existieren auch mechanische Energiespeicher (z. B. Schwungradspeicher), die aber wegen ihrer fehlenden Anwendung in Bussen nicht betrachtet werden.

Technologische Grundlagen

Energiespeicher werden hinsichtlich folgender Kriterien unterschieden und bewertet:

- » Gravimetrische Energiedichte (kWh/kg) / Leistungsdichte (W/kg)
- » Volumetrische Energiedichte (kWh/l) / Leistungsdichte (W/l)
- » Lade- und Entladegeschwindigkeiten (elektr.- u. elektrochemische Energiespeicher)
- » Zyklfestigkeit (elektr.- u. elektrochemische Energiespeicher)
- » Selbstentladung (elektr.- u. elektrochemische Energiespeicher)
- » Kosten

Wesentlicher Vorteil konventioneller Dieselfahrzeuge ist die hohe spezifische Energiedichte des mitgeführten Treibstoffes (11,8 kWh/kg). Die Energiedichte gibt an, wie viel Energie je Masseneinheit oder je Volumeneinheit gespeichert werden kann. Die Tabelle 3.4 gibt einen Überblick zu den gravimetrischen Energiedichten von Diesel, Wasserstoff und Lithium-Ion-Batterien (Li-Ion).

Energiequelle	Diesel	Wasserstoff (H ₂)	Li-Ion-Batterie
Gravimetrische Energiedichte	11,8 kWh/kg	33,33 kWh/kg	0,15 kWh/kg

Tabelle 3.4: Vergleich gravimetrischer Energiedichten

3.1.4.1 Batteriespeicher

Bei Batteriespeichern handelt es sich um elektrochemische Speicher. Diese wandeln zugeführte elektrische Energie in elektrochemische Energie und speichern diese ab. Bei Bedarf wird die elektrochemische Energie wieder in elektrische Energie umgewandelt und an den Verbraucher abgegeben. Traktionsbatteriespeicher bestehen aus einer Vielzahl in Reihe und parallel verschalteter Einzelzellen und basieren vorwiegend auf Lithium-Ion-Technologie. Diese werden in verschiedene Zellchemien – je nach Zusammensetzung der Anode und Kathode – untergliedert. In Elektrobussen kommen hauptsächlich Lithium-Ionen-Batterien auf NMC- (Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid), LFP- (Lithium-Eisenphosphat) sowie LTO- (Lithium-Titanat-Oxid) Basis zum Einsatz. Jede dieser Zellchemien hat spezifische Vor- und Nachteile hinsichtlich der Leistungs- und Energiedichte, Zyklfestigkeit sowie Kosten und eignet sich somit für unterschiedliche Einsatzprofile. Daneben existieren z. B. Batterien mit NaNiCl (Natrium-Nickelchlorid) oder NiMH-Zellen (Nickel-Metallhydrid).

Traktionsbatterien werden gegenwärtig auf eine hohe speicherbare Energiemenge oder eine hohe Leistungsaufnahme und -abgabe ausgelegt. Dementsprechend existieren Hochenergie- und Hochleistungsbatterien. Hochenergiebatterien ermöglichen es, eine verhältnismäßig große Energiemenge zu speichern.

Hochleistungsbatterien ermöglichen schnellere Auf- und Entladevorgänge als dies bei den Hochenergiebatterien der Fall ist und sind tendenziell etwas teurer im Einkauf.

Der real nutzbare Energieinhalt der Traktionsbatterie ist geringer als die nominelle Auslegungsgröße und wird normalerweise vom Batteriemanagementsystem (BMS) der Batterie und/oder dem Fahrzeughersteller begrenzt. Gängige Werte sind:

- » $SoC_{max} = 90\%$ der Nennkapazität (zulässiger Höchstladestand)
- » $SoC_{min} = 10\%$ der Nennkapazität (zulässige Entladetiefe)

Die Batteriespeicher unterliegen komplexen Alterungsfaktoren, die sich auf deren Lebensdauer und gleichzeitig auf die Nutzungsdauer in der Traktionsanwendung auswirken. Die Alterungsfaktoren untergliedern sich in:

- » Kalendarische Alterung: abhängig von der Temperatur und dem SoC
- » Zyklische Alterung: abhängig vom SoC-Hub, der Strom-Rate (auch: C-Rate¹) sowie der Temperatur

Nach allgemeiner Definition gilt eine Batterie als gealtert und damit nicht mehr für die Traktionsanwendung geeignet, wenn ihre Kapazität auf 80 % der initialen Nennkapazität gesunken ist oder sich der Innenwiderstand auf 200 %, ebenfalls bezogen auf den initialen Wert, erhöht hat. Die Batteriespeicher müssen nach aktuellem Stand der Technik mindestens einmal während der Nutzungszeit eines Fahrzeugs getauscht werden.

Der Hochvoltenergiespeicher hat einen wesentlichen Anteil am ökologischen Fußabdruck des Gesamtfahrzeugs. Dementsprechend sorgfältig sollte die Batterietechnologie in Verbindung mit den enthaltenen Inhaltsstoffen der Zellchemie gewählt werden. Es ist zudem empfehlenswert bspw. über zusätzliche Dienstleistungen den Gesundheitszustand des Energiespeichers kontinuierlich über ein datentechnisches Monitoring-System zu überwachen. Mit entsprechender Expertise kann damit eine Nutzungsdauer über die allgemein definierten Lebensdauergerenzen hinaus in Betracht gezogen werden. Alternativ können Anwendungen im Second-Life-Bereich ökonomische Anreize bieten.

Das Recycling von Lithium-Ionen basierten Energiespeichern ist aktuell noch im Entwicklungsstadium. Hier wird in den kommenden Jahren ein deutlicher Entwicklungssprung erwartet, der mit der Menge an recyclebaren Speichern und der anhaltend hohen Nachfrage an Materialien für die Zellherstellung einhergeht.

¹ Hinweis | Verhältnis von Batteriestrom zu nominellem Ladungsinhalt, 1C = Ladestrom, mit dem die Batterie in 1 Stunde vollständig geladen werden kann

Technologische Grundlagen

3.1.4.2 Brennstoffzelle (Wasserstoff)

In Wasserstoff-Brennstoffzellen werden Wasserstoff (aus Tank) und Sauerstoff (aus der Umgebungsluft) bei Temperaturen von 60 bis 90 °C zu Wasser umgewandelt und so elektrische Energie freigesetzt (Abbildung 3.8). Bei dem Prozess werden keine Schadstoffe, Lärm oder Vibrationen emittiert. Derzeit verfügbare Brennstoffzellen weisen einen Wirkungsgrad von 40 bis 60 % auf. Die Investitionskosten, im üblichen Leistungsbereich der Zellen von 60 bis 100 kW (reine Brennstoffzellenbusse), belaufen sich auf 100.000 bis 140.000 €. Die Nutzungsdauer von Brennstoffzellen liegt bei über 30.000 Betriebsstunden / 6 - 8 Jahre, weshalb während der Nutzungsdauer eines Fahrzeugs, üblicherweise 10 bis 12 Jahre, mindestens ein Tausch des Stapels (engl. Stack), der aus einer Schichtstruktur bestehenden, Brennstoffzellenmodule (vergleiche nachfolgende Abbildung) erforderlich wird. Die für den Betrieb des Brennstoffzellen-Systems benötigten Nebenaggregate bleiben davon in der Regel unberührt.

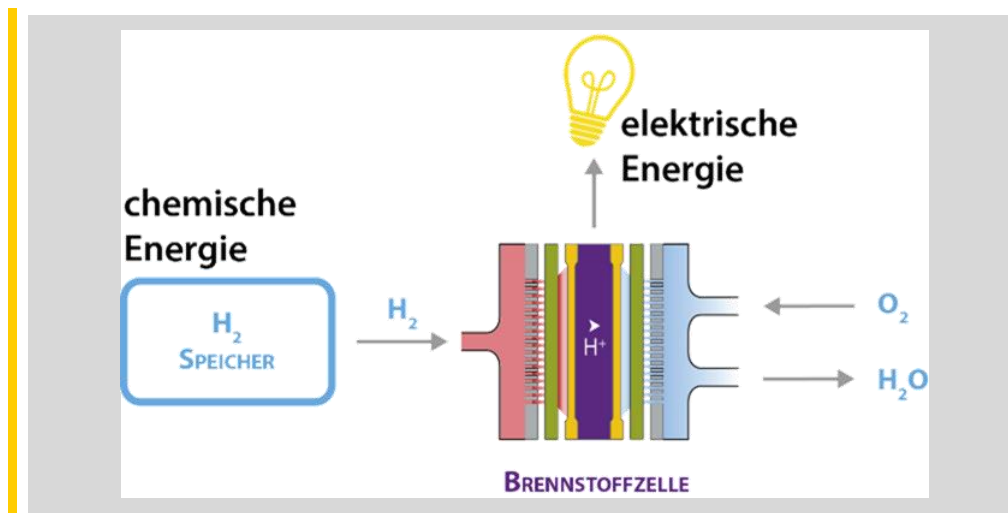


Abbildung 3.8: Schematische Darstellung der Funktionsweise einer Wasserstoffbrennstoffzelle

Bei den verwendeten Brennstoffzellen handelt es sich um Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen (PEMFC). Um Schädigungen im Betrieb der PEM-Brennstoffzelle zu vermeiden, wird relativ reiner Wasserstoff nach DIN EN 17124 (Brennstoffzellenanwendungen für Fahrzeuge) benötigt. Da Wasserstoff unter Normalbedingungen eine hohe gravimetrische, aber niedrige volumetrische Energiedichte von 0,0899 kg/m³ (Diesel 820 – 845 kg/m³ nach DIN EN 590) besitzt, erfolgt die Speicherung auf Bussen in Druckbehältern bei einem Niveau von 350 bar.

Der Einsatz von Brennstoffzellen ist wegen der nach wie vor eingeschränkten Infrastruktur und der hohen erforderlichen Energiemenge zur Erzeugung von grünem Wasserstoff (erzeugt mittels Elektrolyse aus erneuerbarem Strom) bisher auf

wenige Projekte begrenzt. Aufgrund der Nationalen Wasserstoffstrategie (seit 06/2020) und der technologieoffenen Förderrichtlinie für Busse mit klimafreundlichen, alternativen Antrieben des BMDV (07.09.2021) wird der Ausbau der Infrastruktur finanziell unterstützt.

3.1.5 Heizungs- und Klimatisierungskonzept

3.1.5.1 Energiebedarf

Speziell bei den alternativen Antrieben bildet der Energiebedarf der Nebenverbraucher einen wesentlichen Bestandteil des Gesamtenergiebedarfs ab. Denn der elektrische Antrieb verfügt zwar über einen höheren Wirkungsgrad, aufgrund der reduzierten oder gänzlich fehlenden Abwärme des Verbrennungsmotors werden jedoch zusätzliche Heizelemente zur Temperierung des Innenraums erforderlich. Generell gilt, je niedriger die Außentemperaturen, desto größer wird der Bedarf an Heizenergie im Fahrzeug (vgl. Abbildung 3.9).

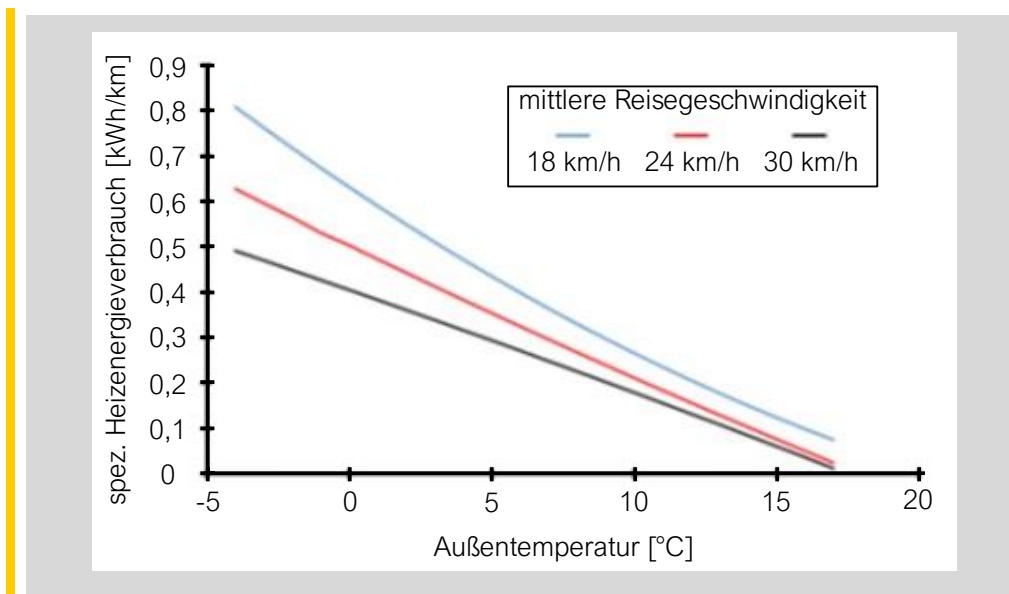


Abbildung 3.9: Heizenergiebedarf eines Solobusses

Ein durchschnittlicher 12-m-Dieselsbus verfügt über einen 150 l Tank. Der Tankinhalt von 150 l Diesel entspricht einer Energie von ca. 1.479 kWh und ermöglicht eine Reichweite von etwa 395 km. Rund 33 % dieses Energiegehalts wird vom Motor in mechanische, also Antriebsenergie umgewandelt, weitere 33 % gehen dem System als Abgaswärme verloren, die verbleibenden 33 % werden als Wärme an den Kühlkreislauf abgegeben (vgl. Abbildung 3.10). Von der an den Kühlkreislauf abgegebenen Wärmeenergie (~493 kWh) können rund 400 kWh zum Heizen des Fahrgastinnenraums genutzt werden. Um eine ausreichende

Technologische Grundlagen

Temperierung sicherzustellen, verfügen Dieselbusse für gewöhnlich über eine zusätzliche Heizanlage mit einer Heizenergie von 740 kWh, sodass eine Gesamtheizenergie von 1.140 kWh bereitgestellt werden kann.

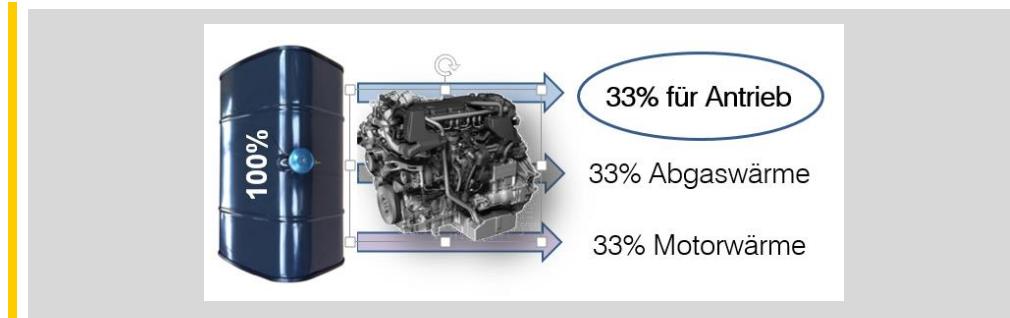


Abbildung 3.10: Energiebilanz Dieselbus

Batteriebusse verfügen im Vergleich zum Dieselbus über einen sehr effizienten Antrieb (Elektromotor $\eta = 0,98$). Dies bedeutet jedoch auch, dass kaum Abwärme des Antriebs zum Heizen des Innenraums genutzt werden kann. Die äquivalent zum Dieselbus erforderliche Energie von 1.140 kWh muss vollständig von der Heizanlage aufgebracht werden. Bei Brennstoffzellenfahrzeugen vermindert sich diese Problematik wiederum, da hier durch die Brennstoffzelle ungefähr 40 % der eingebrachten Energie in Abwärme umgewandelt und zum Heizen verwendet werden kann (vgl. Abbildung 3.11).

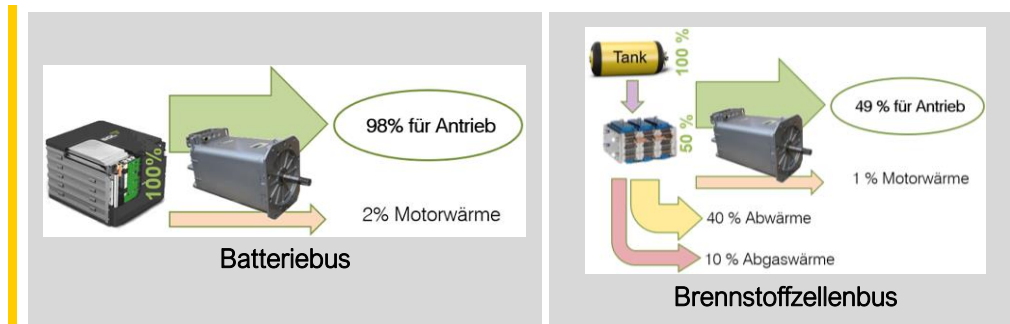


Abbildung 3.11: Energiebilanz von Batterie- und Brennstoffzellenbus

Eine Gegenüberstellung der Energiebedarfe (vgl. Tabelle 3.5) verdeutlicht, dass der Bedarf der Heizanlage bei Batteriebussen den des Antriebs übersteigt. Dies wird besonders dann zur Herausforderung, wenn, z. B. zur Begrenzung von Schadstoffemissionen, die Energie nicht durch eine Dieselheizung erzeugt werden darf und ebenfalls vom Traktionsspeicher bereitgestellt werden muss. Damit sei der wesentliche Einfluss des Heizkonzeptes auf den Gesamtenergiebedarf von Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb erklärt.

Laufleistung 395 km, Heizung 21 h	Dieselbus	Batteriebus	Brennstoffzellenbus
Gesamtenergiebedarf	2.219 kWh	1.640 kWh	1.917 kWh
Gesamtenergie Fahren	1.479 kWh	500 kWh	1.317 kWh
Zusatzenergie Heizung	740 kWh	1.140 kWh	600 kWh

Tabelle 3.5: Fahrzeugenergiebedarf unterschiedlicher Antriebskonzepte

3.1.5.2 Heizungssystem

Die Tagesmitteltemperaturen im deutschen Raum können, mit lokalen Abweichungen, zwischen -20 und $+30$ °C variieren. Dementsprechend ist es erforderlich, die Temperatur im Innenraum von Bussen zu steuern, also den Innenraum zu heizen oder zu klimatisieren. Dafür kommen je nach vorherrschendem Klima, den Vorgaben zur Innenraumtemperatur und dem Fahrzeug-/ Antriebskonzept verschiedene technische Systeme zur Anwendung. Bei Dieselbussen wird die Heizenergie in der Regel einerseits in Form der Motorabwärme über das Kühlsystem sowie von einer zusätzlichen Brennstoffheizung (i. d. R. Diesel) bereitgestellt. Das allgemein erklärte Ziel, Schadstoffemissionen lokal durch den Einsatz alternativer Antriebe zu reduzieren, macht jedoch andere Lösungen erforderlich. Hier sind es besonders die Batteriebusse, bei denen das Heizkonzept einen wesentlichen Faktor zur Bemessung des gesamten Energiespeicherkonzepts/der Traktionsbatterien darstellt. Zur Erzeugung von Heizenergie in Bussen kommen im Wesentlichen fünf Systeme zum Einsatz:

- » Hybridheizung
- » Infrartheizung
- » Wärmepumpe
- » Elektrischer Widerstand
- » Brennstoffheizung

In der Brennstoffheizung werden üblicherweise Diesel, Heizöl oder Erdgas als Energieträger in Heizenergie umgewandelt. Außer zur Steuerung ist hier keine elektrische Energie erforderlich. Mit Verwendung einer Brennstoffheizung ist ein lokal emissionsfreies Fahren jedoch nicht mehr möglich. Jedoch können die lokalen Schadstoffemissionen durch den Einsatz synthetischer GtL-Kraftstoffe auf Erdgasbasis (GtL- engl. Gas to Liquid) vermindert werden.

Technologische Grundlagen

Hybridheizung

Die Hybridheizung ist ein teilelektrisches Brennstoffheizsystem. Bei mäßigen Temperaturen von über 5 °C ist eine verhältnismäßig geringe Heizleistung erforderlich; in diesem Fall setzt die elektrische Heizung ein. Leistungsspitzen, die bei Außentemperaturen von unter 5 °C erforderlich sind, werden über eine zusätzliche Brennstoffheizung abgedeckt.

Infrartheizung

Als weiteres mögliches Heizsystem kommen in Fahrzeugen vereinzelt elektrische Infrartheizungen zum Einsatz. Diese erzeugen bei den Insassen das gleiche Behaglichkeitsgefühl bei niedriger Innenraumtemperatur. Der Betrieb ist direkt durch die Hochvoltanlage möglich, wodurch eine hohe Effizienz erreicht wird.

In Elektrobussen ist der Einsatz einer vollelektrischen Heizung immer dann vorteilhaft, wenn die Einsparung von Emissionen ein wesentlicher Grund zur Umstellung auf alternative Antriebe darstellt. Können die Umläufe allerdings nicht mit einer vollelektrischen Heizung realisiert werden, ist zunächst der Einsatz einer Hybridheizung in Erwägung zu ziehen.

Wärmepumpe

Bei der Wärmepumpe befindet sich ein Kältemittel in einem geschlossenen Kreislauf. Dieses wird über eine Pumpe verdichtet und so erwärmt. Diese Wärme wird dann genutzt, um den Innenraum zu heizen. Wärmepumpen stellen eine effiziente Möglichkeit zum Klimatisieren (Heizen und Kühlen) dar. Die Leistungsfähigkeit von Wärmepumpen wird in Leistungszahlen angegeben:

- » COP, Coefficient of Performance für das Heizen oder
- » EER, Energy Efficiency Ratio für das Kühlen.

Die Leistungszahlen geben das Verhältnis von erzeugter Wärme-/Kälteenergie zu der dafür aufgewendeten elektrischen Energie wieder. Abhängig sind diese Zahlen von der Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außentemperatur sowie dem verwendeten Kältemittel und der Bauart der Wärmepumpe. Moderne Wärmepumpen verfügen über einen COP von 2,0 (bei -10 °C) bis hin zu über 3,0 in Temperaturbereichen oberhalb von 0 °C. Sie erzeugen also mehr Wärmeenergie als dafür an elektrischer Energie aufgewandt werden muss und stellen die effizienteste Heizanlage dar.

Als Kältemittel kommen in Wärmepumpen zwei unterschiedliche Stoffe zum Einsatz: R134a (Tetrafluorethan) oder R744 (CO₂). R134a bietet bis hinunter zu einer Umgebungstemperatur von 5 °C eine gute Energieeffizienz; R744 von -20 °C

bis +20 °C. R134a gilt als höchst klimaschädlich und darf deshalb seit Anfang 2017 nicht mehr in Klimaanlage neuer Kfz verwendet werden. Die Anwendung im Busbereich ist noch zulässig; in Verbindung mit dem Verbot im Kfz-Bereich war jedoch auch ein Preisanstieg sowie eine Verschlechterung der Verfügbarkeit zu verzeichnen. Zudem wird am Einsatz weiterer Kältemittel geforscht, wie beispielsweise R290 (Propan). Dieses ist ebenfalls deutlich klimafreundlicher als R134a, bringt jedoch durch seine leichte Entflammbarkeit erhöhte Sicherheitsanforderungen mit sich.

Widerstandsheizung

Bei der elektrischen Widerstandsheizung wird elektrische Energie direkt in Wärme umgewandelt. Hierbei handelt es sich um eine vergleichsweise einfache Art, Heizenergie zu erzeugen. Ein wesentlicher Nachteil besteht jedoch darin, dass sich der Energiebedarf besonders an kalten Tagen verdoppeln kann. Dies hat speziell bei Batteriebussen einen erheblichen Verlust an Reichweite zur Folge.

3.1.5.3 Klimatisierung

Die Kühlung der Fahrzeuge erfolgt üblicherweise durch eine Klimaanlage, deren Kompressor beim konventionellen Diesel direkt an den Motor gekoppelt ist und beim Elektrobuss elektrisch betrieben wird. Darüber hinaus kann die Kühlung zum Teil auch über eine Wärmepumpe mit Kühlfunktion erfolgen. Die Energiebedarfe der verschiedenen Kühlsysteme unterscheiden sich nur unwesentlich. Da diesel- wie elektrisch angetriebene Fahrzeuge gleichermaßen Energie zum Kühlen aufwenden müssen und die Beheizung der Fahrzeuge aufgrund der mitteleuropäischen Klimabedingungen maßgebend energieintensiver ist, hat die Klimatisierung keinen entscheidenden Einfluss auf die Wahl des Fahrzeugkonzeptes.

Technologische Grundlagen

3.2 Versorgungsinfrastruktur

Die Ausführungen zur Versorgungsinfrastruktur folgen der Struktur in folgender Abbildung.

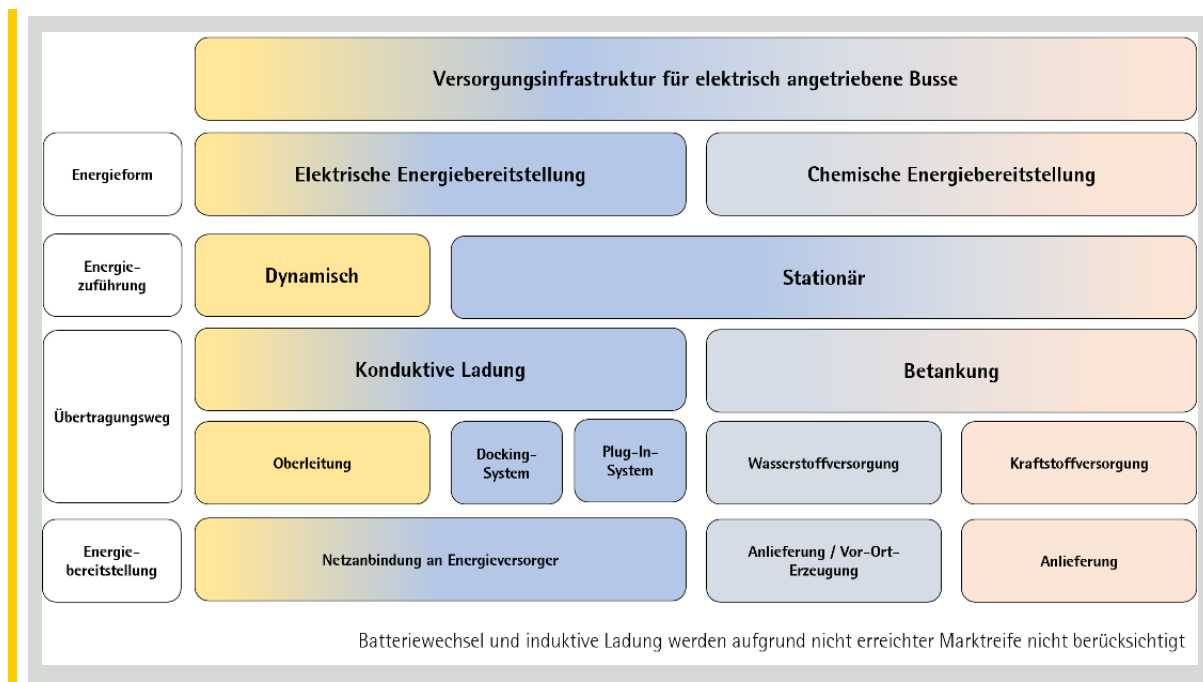


Abbildung 3.12: Versorgungsinfrastruktur für elektrisch angetriebene Busse

3.2.1 Elektrische Energiebereitstellung

Die elektrische Energie wird grundsätzlich über ein Netzwerk, das sogenannte Stromnetz, übertragen und verteilt. Die Energiebereitstellung setzt einen Anschluss an die lokale Versorgung voraus. Zur Ladung von Elektrobussen muss eine ausreichende Anschlussdimensionierung sichergestellt sein. Selbst bei kleineren Flotten (< 50 Fahrzeuge) kann der Leistungsbedarf die Leistungsreserve oder -fähigkeit des vorhandenen Transformators, der für die Versorgung des Betriebshofes zuständig ist, übersteigen. Deshalb kann es für die Ladung von Batteriebusen notwendig sein, neben den Ladegeräten ein Verteilungsnetz aufzubauen, um eine zuverlässige und leistungsfähige Ladung zu ermöglichen.

Die Energiezuführung elektrischer Busse muss primär am Betriebshof sichergestellt sein. Eine vollständige Ladung der Fahrzeuge auf der Strecke ist durch den Bedarf an Platz, Zeit und Personal in den meisten Fällen ökonomisch unzureichend darstellbar. Ausschlaggebend ist letztendlich das ausgearbeitete und angewendete Ladekonzept. Dieses umfasst sowohl die Anzahl und Anordnung der Ladegeräte unter Berücksichtigung der Betriebssicherheit, des Personenschutzes sowie der operativen Prozesse, als auch die maximal notwendige Anschlussleistung im Betriebshof oder auf der Strecke.

Technologische Grundlagen

Die Anschlussleistung im Betriebshof ist vor allem bei einem sogenannten Depotlader-Konzept (Fahrzeugnachladung ausschließlich im Betriebshof) signifikant. Eine lokale Nähe zur Stromerzeugung (bspw. Kraftwerk) ist hinsichtlich der Erschließung ökonomisch vorteilhaft. Die elektrische Energie wird über ein Verteilnetz bezogen, das wiederum vom Verteilnetzbetreiber (VNB) unterhalten wird. Dieser gibt die technischen Bedingungen zum Anschluss an das Versorgungsnetz vor. Handelt es sich um ein Mittelspannungsnetz, sind die „Technischen Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Mittelspannungsnetz und deren Betrieb“ (kurz: TAR Mittelspannung, VDE-AR-N 4110) zu beachten.

Je nach Leistungsbedarf ist ein Anschluss an das Mittelspannungsnetz (10/20/30 kV) oder an das Hochspannungsnetz (110 kV) vorzunehmen. Zur Trennung zwischen Verteil- und Kundennetz (Busbetriebshof) ist eine Übergabestation einzurichten. Dort sind zu Mess- und Abrechnungszwecken Geräte zu installieren. Im Bedarfsfall kann die Verbindung zum Versorgungsnetz getrennt werden.

Über das betriebshofinterne Verteilnetz wird die Energie auf die Ladegeräte verteilt. Das Verteilnetz kann nach verschiedenen Konzepten als Stich- oder Ringnetz aufgebaut werden. Innerhalb des Verteilnetzes sind Transformatoren einzubinden, welche die Mittelspannung in Niederspannung wandeln. Aus dieser Niederspannung, allgemein 3AC-400 V werden die Ladegeräte gespeist. Die Ladegeräte wirken als Gleichrichter, die ausgangsseitig Strom und Spannung stellen können. Die Ladegeräte versorgen die elektrifizierten Busse via Kabel oder Pantographen.

Energiezuführung

Elektrische Energie wird grundsätzlich über Ladegeräte in das jeweilige Zielsystem, in dem Falle ein elektrifizierter Bus, übertragen. Das Ladegerät selbst kann fahrzeugseitig oder infrastrukturseitig verbaut sein. Generell lassen sich die stationären Ladeverfahren in konduktive und induktive unterteilen. Die konduktive Zuführung stellt das leitungsgebundene Laden über eine form- oder kraftschlüssige (Steck)-Verbindung dar. Der Begriff der induktiven elektrischen Energiezuführung bezeichnet das kontaktlose Laden unter Nutzung elektromagnetischer Felder. Eine direkte Kontaktierung entfällt. Beide Ladeverfahren können auch dynamisch, also während der Fahrt, realisiert werden. Dabei entspricht das konduktive Energieübertragungssystem der Funktionsweise von Oberleitungsbussen.

Technologische Grundlagen

Ladevorgänge werden über sogenannte Ladesysteme realisiert. Diese lassen sich in die folgenden Varianten unterteilen:

- » Plug-In-System (Ladegerät fahrzeugseitig oder stationär/extern)
- » Docking-System
- » Ladepunkt Oberleitung (statisch)
- » Oberleitung (dynamisch)
- » Induktionsschleife/Pick-Up (induktiv)

Elektrochemische Energiespeicher sind Gleichspannungssysteme (synonym zum engl. Direct Current; kurz DC). Werden sie über Wechselstrom-Quellen (engl. Alternating Current; kurz AC) gespeist, muss zuvor eine Wandlung erfolgen.

Folgende betriebliche Faktoren beeinflussen den Nachladevorgang:

- » Abstand zwischen einzelnen Ladestationen
- » Verweildauer an der Ladestation
- » Umgebungstemperatur
- » Verfügbarkeit der Ladestation
- » Leistungsfähigkeit der Ladestation

Folgende Faktoren beeinflussen die Stromaufnahmefähigkeit des elektrochemischen Speichers beim Nachladevorgang:

- » Elektrische Dimensionierung (Zellverschaltung, Energieinhalt etc.)
- » Ladezustand (engl. State of Charge, SoC)
- » Alterungszustand (engl. State of Health, SoH)
- » Temperierung

Vorab kann der Energiebedarf überschlagsmäßig abgeschätzt werden, um auf dieser Basis die notwendigen Speichergrößen in den Bussen sowie die Ladeinfrastruktur zu dimensionieren. Dabei spielen weitere Kriterien zur Bewertung und Bestimmung des Ladesystems eine relevante Rolle:

- » Technische Umsetzbarkeit
- » Zeitliche Umsetzbarkeit
- » Energieeffizienz
- » Kosten
- » Gesetzliche Rahmenbedingungen

Um eine Systementscheidung treffen zu können, sind die genannten Faktoren im Kontext mit den betrieblichen Anforderungen des jeweiligen Einsatzszenarios zu bewerten. Die Entscheidung über die Nachladestrategie hat wesentliche

Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit des Systems in Verbindung mit der Attraktivität der Verkehrsdurchführung und der Einsatzstabilität.

3.2.1.1 Dynamische Energiezuführung

Konduktive Ladung über Oberleitung

Unter der dynamischen, konduktiven Energiezuführung ist leitungsgebundenes Laden während der Fahrt zu verstehen. Das konduktive dynamische Energieübertragungssystem ist bei konventionellen Oberleitungsbussen bewährt und wird analog auch für Batterie-Oberleitungsbusse mit Batteriespeicher angewandt. Die Energie wird über die (ggf. abschnittsweise) installierte Fahrleitung als Energiequelle durch die fahrzeugseitigen Stangenstromabnehmer übertragen. Für die Stromabnahme werden zwei Fahrdrähte (Plus- und Minuspolung) benötigt (vgl. Abbildung 3.13).

Während der Fahrt unter der Oberleitung gelten diese Fahrzeuge nicht als Batterie-, sondern als Oberleitungsbusse und werden deshalb rechtlich teilweise gesondert behandelt.

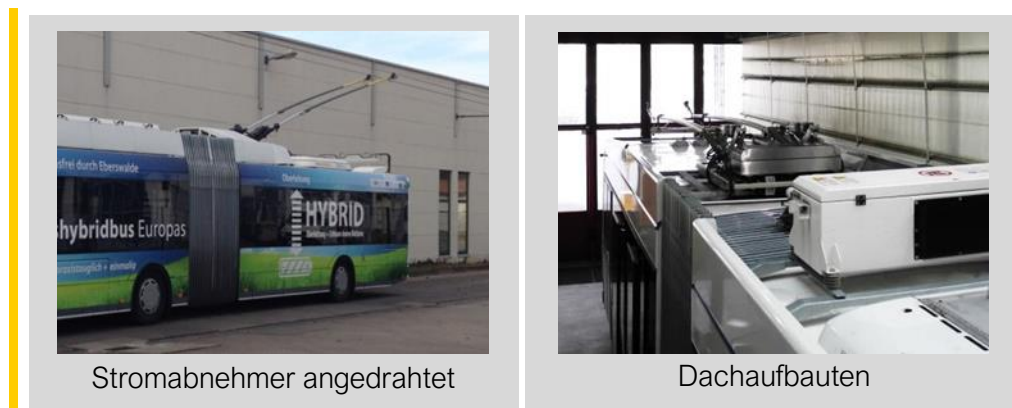


Abbildung 3.13: Stromabnehmer bei Oberleitungsbussen

Die Oberleitungsanlage muss sowohl der elektrischen als auch der mechanischen Beanspruchung standhalten. Das Kriterium für die elektrische Beanspruchung ist der elektrische Strom. Moderne Fahrzeuge mit einer hohen Traktionsleistung und hohem Beschleunigungsvermögen erfordern entsprechend eine hohe elektrische Leistungsabgabe. Hohe Leistungsübertragungen von der Oberleitung auf das Fahrzeug haben eine starke Erhitzung des Fahrdrahtes zur Folge, die bis zur Zerstörung des Systems führen kann. Aufgrund einer drohenden Überhitzung des Fahrdrahts ist ein Nachladen bei niedrigen Geschwindigkeiten nur mit geringer Leistung möglich. Die Leistungsaufnahme ist somit abhängig vom Geschwindigkeitsprofil des Fahrzeugs. Beispielsweise wird im

Technologische Grundlagen

Geschwindigkeitsband von 0 bis 30 km/h die externe Energiezuführung hauptsächlich für den Beschleunigungsvorgang des Fahrzeugs benötigt. Aufgrund der maximal zulässigen Leistungsübertragung zwischen Oberleitung und Fahrzeug kann während des Anfahrvorgangs also nur eine geringe Leistung für das Nachladen des Energiespeichers genutzt werden.

Die durch die Oberleitung bereitgestellte Energie wird vorrangig für das Fahren genutzt. Die während des Fahrvorgangs abgeforderten Leistungsspitzen können durch Hochleistungskondensatoren (SuperCaps) ausgeglichen werden, die neben dem Batteriespeicher als zusätzliche Energiequelle dienen (Kombispeicher) – jedoch erneut unter Erhöhung des Fahrzeugleergewichts. Der Batteriespeicher wird kontinuierlich während der Fahrt unter der Oberleitung nachgeladen. Der notwendige Ladestrom wird über das Energiemanagementsystem im Fahrzeug festgelegt.

Die begrenzten Stromstärken, die für das Nachladen des Energiespeichers zur Verfügung stehen, beeinflussen die Ladezeit und somit die erforderliche Dauer des Fahrens unter der Fahrleitung. Als pauschale Annäherung kann ein Verhältnis von mindestens 3:1 bis etwa 2:1 für das Fahren unter Oberleitung zum leitungsunabhängigen Fahren angesetzt werden, wobei die genaue Relation immer von den örtlichen Bedingungen abhängt.

Aufgrund der konduktiven, dynamischen Energiezuführung treten mechanische Beanspruchungen auf, die konstruktiv beherrscht werden müssen. Für die mechanische Belastbarkeit der Oberleitung gelten folgende Anforderungen:

- » Die Abspannung der Fahrleitung erfolgt in Abständen von 20 bis 25 Metern.
- » Der Anpressdruck der Stangenstromabnehmer muss durch die Fahrleitung aufgenommen werden.
- » Die zusätzlichen Schwingungen, die vom Fahrbahnprofil über das Fahrzeug auf die Oberleitung übertragen werden, müssen abgefangen werden.

Die Nutzung einer Oberleitungsanlage der Straßenbahn ist nur dann möglich, wenn diese auch für Oberleitungsbusse ausgelegt ist. Dabei ist neben den oben genannten Anforderungen Folgendes zu beachten:

- » Die Aufnahme des Fahrdrahtes ist so zu ändern, dass die Schleifschuhe der Oberleitungsbus-Stangenstromabnehmer den Fahrdraht ohne Beschädigung umschließen können. Dies ist bei üblichen Straßenbahn-Fahrleitungsanlagen nicht gegeben, da Straßenbahnpanatographen den Kontakt mit einem Schleifstück ohne Umfassen der Fahrleitung herstellen. Aktuell laufen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten eines geraden

Technologische Grundlagen

Schleifstücks, die sich jedoch noch in einem frühen Technologiereifestadium befinden.

- » Es ist ein zweiter Fahrdraht für die Rückleitung erforderlich. Bei Straßenbahnen erfolgt die Rückleitung über die Schiene. Sofern die Strecke auch weiterhin durch die Straßenbahn befahren werden soll, stellt die Doppelnutzung aufgrund der bestehenden Kurzschlussgefahr eine besondere Herausforderung dar.

Die Abbildung 3.14 zeigt den konstruktiven Aufbau einer Oberleitungsinfrastruktur für Oberleitungsbusse sowie (beispielhaft) den Einfluss auf das Stadtbild.



Abbildung 3.14: Oberleitungsbus Salzburg

Der Einsatz von Batteriebussen mit dynamischer, induktiver Nachladung macht den Auf-, Um- oder Neubau einer Fahrleitungsanlage notwendig. Um eine circa 5 km lange Oberleitungsanlage zu errichten und den Anschluss an ein bestehendes Unterwerk herzustellen, sind Investitionen in Höhe von rund 4 Millionen Euro zu erwarten. Die Errichtung der Oberleitungsinfrastruktur stellt einen nicht unerheblichen Eingriff in das Stadtbild dar und ist mit hohem bautechnischem- und planerischem Aufwand (Planfeststellung) verbunden.

Die Umspannstationen arbeiten nahezu wartungsfrei. Der Austausch des Fahrdrahtes wird nach ca. 10 bis 15 Jahren notwendig².

Die abschnittsweise Nutzung einer Oberleitungsanlage sollte vorwiegend auf Stammstrecken des ÖPNV mit hoher Nutzungsfrequenz, kurzen Taktfolgen und großen Fahrzeugeinheiten erfolgen. Der hohe Investitionsbedarf in die

² Quelle | https://www.planos-info.de/media/2010_09-endbericht_osnabrueck_dlr.pdf S. 25

Technologische Grundlagen

Oberleitungsanlage und deren langjährige Abschreibung erfordern langfristige Festlegungen zum Einsatz der Fahrzeuge.

3.2.1.2 Stationäre Energiezuführung

Konduktive Ladung über Docking-System

Stationäre, konduktive Energiezuführungssysteme laden die Energiespeicher im Fahrzeugstillstand. Es können hohe Leistungen zwischen wegseitiger Ladeeinrichtung und fahrzeugseitigem Energiespeichersystem übertragen werden. Über das sogenannte Docking-Station-System wird der Energiespeicher an punktuell im Linienverlauf installierten Ladestationen nachgeladen. Der Vorgang kann auf der Strecke während planmäßiger Fahrzeugstopps an Wendepunkten und/oder Zwischenhaltstellen erfolgen. Diese Form der Energieübertragung wird auch als Gelegenheitsladung (engl. Opportunity Charging) bezeichnet.

Das Spannungs- und Leistungsniveau ist normativ nicht vorgegeben und richtet sich nach dem jeweiligen Anwendungsfall. Im Allgemeinen liegen die Spannungsparameter im Bereich von 400 bis 850 V_{DC}, wobei auf Seiten der Ladetechnik teilweise Ausgangsspannungen von 150 bis 920 V_{DC} und Ladeleistungen von 150 bis 600 kW_{DC} unterstützt werden. Die Ladung erfolgt nach Mode 4 IEC 61851-1. Sowohl die Kommunikation als auch die Ladegeräte selbst sind demnach vergleichbar mit der Steckerladung über Combo 2 (IEC 62196 basiert auf IEC 61851-1).

Je nach Kopplungsrichtung wird zwischen zwei Ausführungsvarianten unterschieden:

- » Hub-Docking-Station: Stromabnehmer zur Kontaktherstellung auf dem Fahrzeugdach (engl. On-board bottom-up pantograph), typischer Hub 1,50 m bis 1,80 m, technisch realisierbar ist sogar ein noch größerer Bereich (vgl. Abbildung 3.15)
- » Senk-Docking-Station: Stromabnehmer zur Kontaktherstellung an der Ladestation (engl. Off-board top-down pantograph), realisierbarer Hub bis 2,50 m (vgl. Abbildung 3.16)

Technologische Grundlagen

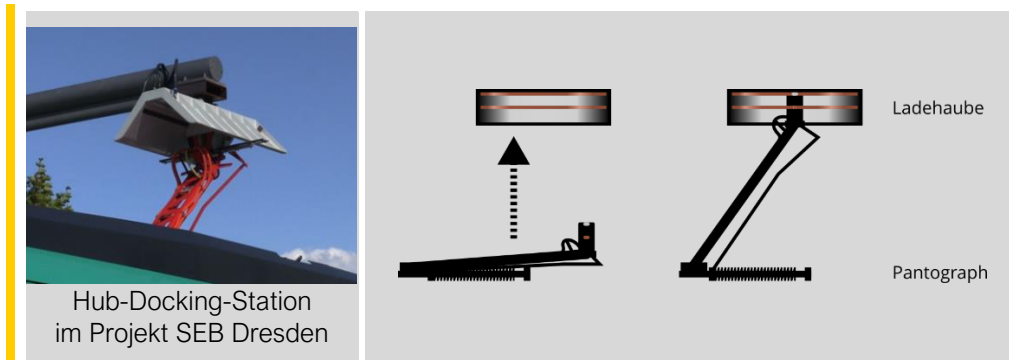


Abbildung 3.15: Hub-Docking-Station

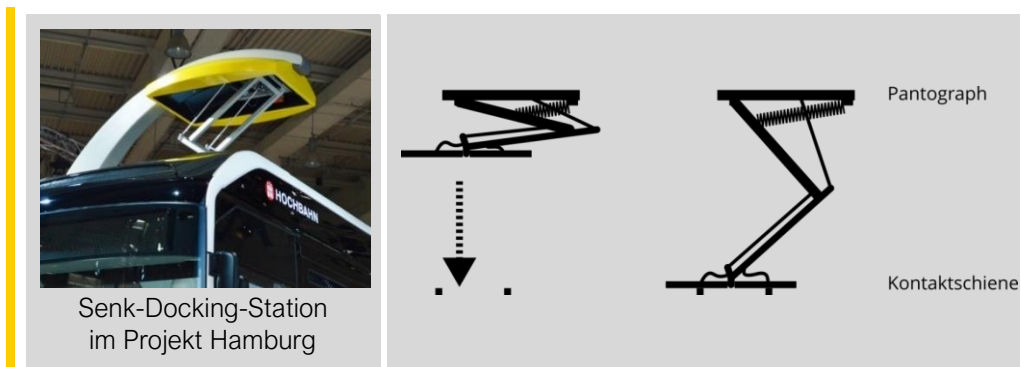


Abbildung 3.16: Senk-Docking-Station

Docking-Systeme verwenden mindestens vier Kontakte und haben üblicherweise folgende Sicherheitsfunktionen implementiert:

- » Schutzleiter (PE),
- » DC+ positive Polung,
- » DC- negative Polung sowie
- » Pilotkontakt (CP).

Mit gesicherter Einhaltung der Kontaktreihenfolge sind Gefährdungen ausgeschlossen. Der Pilotkontakt (CP) detektiert die ordnungsgemäße Kontaktierung und fordert die Nachladung an. Der Schutzleiter (PE) erdet im Fehlerfall die Anlage. Eine automatische Abschaltung der Energieversorgung wird eingeleitet.

Konduktive Ladung über Plug-In-System

Neben dem für Elektrobusse relevanten Mode 4, sind für den PKW-Bereich die Modi 1-3 definiert. Auf die Modi 1-3 wird im Weiteren nicht näher eingegangen.

Technologische Grundlagen

Der sogenannte Mode 4 definiert das Gleichstromladen. Dabei stellen stationär installierte Gleichrichter in einer Ladestation die Schnittstelle bereit. Ein fahrzeugseitiges Ladegerät ist nicht notwendig. Die Dimensionierung der Ladespannung hängt von der zulässigen Spannungsgrenze des zu ladenden Energiespeichers sowie den an die Ladestation übermittelten Zustandsdaten (z. B. SoC) ab. Sie liegt im Bereich von etwa 400 – 800 V_{DC}. Die erforderliche Ladeschlussspannung liegt oberhalb der Nennspannung der eingesetzten Batterien.

Es wird zwischen drei Ladevarianten unterschieden, wobei nur die DC-high-Ladung in der IEC 62196 standardisiert wurde:

- » Die DC-low-Ladung erfolgt fahrzeugseitig über zwei Wechselstromkontakte einer Typ-2-Kabelverbindung. Die maximale Ladeleistung beträgt 38 kW_{DC}.
- » Die DC-mid-Ladung erfolgt fahrzeugseitig über alle vier Wechselstromkontakte einer Typ-2-Kabelverbindung. Die maximale Ladeleistung beträgt etwa 120 kW_{DC}.
- » Die DC-high-Ladung nutzt in Europa die Ladeschnittstelle Combo Typ 2 (auch kurz Combo 2), welche eine Erweiterung der üblichen Typ-2-Verbindung um zwei zusätzliche DC-Kontakte darstellt. Die maximale Ladespannung beträgt für den Combo-2-Stecker derzeit 850 V_{DC}, der maximale Ladestrom beträgt 250 A. Daraus leitet sich die Maximalladeleistung mit 170 kW_{DC} ab (IEC 62196-3). Diese lässt sich durch die Verwendung eines Flüssigkeitsgekühlten Steckers noch weiter steigern (bis Nennstrom 400 A). Dabei ist zu beachten, dass der gekühlte Stecker inkl. dem dazugehörigen Kabel ein nicht unerhebliches Gewicht mit sich bringt und dadurch Nachteile im Umgang einhergehen.

Die nachfolgende Abbildung 3.17 stellt die Combo-2-Kupplung und -Stecker dar.

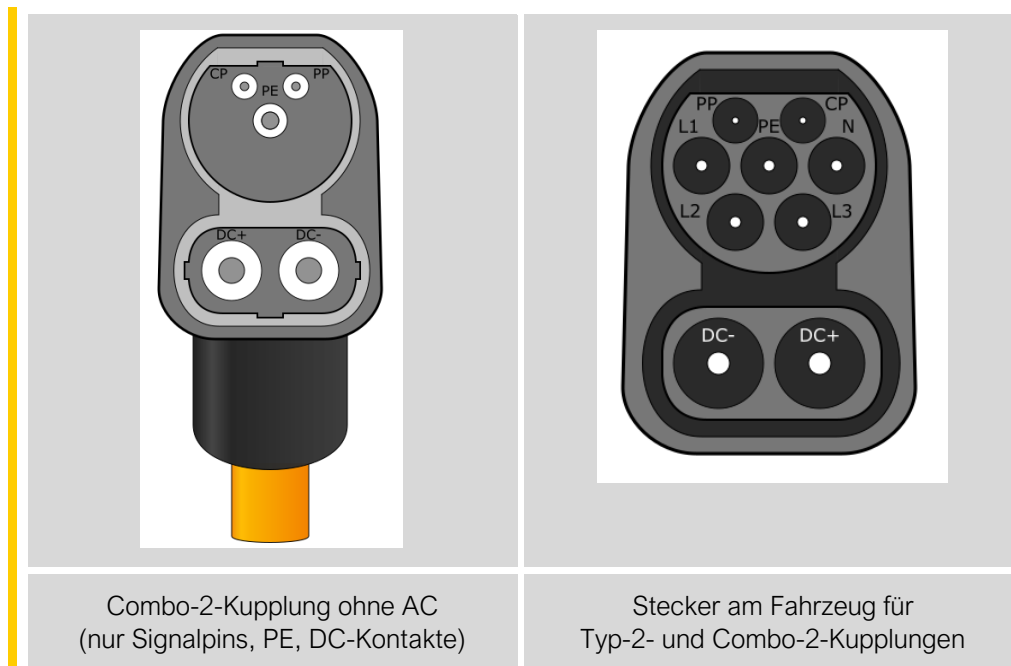


Abbildung 3.17: Belegung Combo-2-Kupplung und -Stecker nach IEC 62196³

3.2.2 Chemische Energiebereitstellung

Zur Bereitstellung und Verteilung chemischer Energie für den ÖPNV-Busverkehr werden im Allgemeinen Tankstellen genutzt. An ihnen werden große Mengen chemischer Energie in Tanks gespeichert oder sie sind direkt an einen Erzeuger über eine Pipeline angeschlossen. Je nach Energieträger unterscheidet sich die bereits ausgebaute Infrastruktur und erfordert mehr oder weniger Aufwand zur Bereitstellung oder Erschließung.

Die Bereitstellung mit chemischer Energie ist, abhängig vom verwendeten Medium, unterschiedlich gut ausgebaut.

Momentan besitzen/betreiben die meisten Verkehrsbetriebe eigene Tankstellen, um ihre Fahrzeuge mit Dieselmotorkraftstoff zu betanken. Ihre Versorgung wird mit Tankwagen sichergestellt. Bei einem Tankvorgang wird Kraftstoff mittels einer Pumpe in das zu betankende Fahrzeug gefüllt.

Wasserstofftankstellen werden entweder durch eine Anlieferung des Wasserstoffs per Trailer, Versorgung über eine Pipelineanbindung oder durch eine Onsite-Elektrolyse gespeist. Je nach Hochlaufplanung der Busse kann es sinnvoll sein, in einer ersten Phase den Wasserstoff anliefern zu lassen und später auf eine Vor-

³ Quelle | bearbeitet nach <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CCSCCombo2.svg> Benutzer Ajzh2074

Technologische Grundlagen

Ort-Produktion umzustellen. Zusammenfassend wird Wasserstoff wie folgt bereitgestellt:

- » Anlieferung / Versorgung in flüssiger Form oder als komprimiertes Gas,
- » Onsite- (Vor-Ort-) Erzeugung durch Elektrolyse oder
- » Kombination aus beiden Bereitstellungsformen.

Die herkömmliche Zuführung der chemischen Energieträger erfolgt über einen bewährten Betankungsprozess, d. h. Diesel, Erdgas oder Wasserstoff werden dem Fahrzeug über ein Zapfsystem zugeführt. Diesel wird dabei mithilfe einer Pumpe aus dem Tankstellentank in den Fahrzeugtank gepumpt. Die Betankung von Erdgas- oder Brennstoffzellenfahrzeugen hingegen erfolgt über das Druckausgleichsprinzip. Das verdichtete Gas strömt tankstellenseitig verdichtet in den Tank mit einem niedrigeren Gasdruck, bis ein Ausgleich der Drücke stattgefunden hat. Dazu erfolgt zu Beginn der Betankung ein Druckstoß zur Dichtheitsprüfung, bevor der eigentliche Betankungsprozess beginnt. Basierend auf dem Betankungsprotokoll erfolgt dann mit zunehmend steigendem Druck von Seiten der Tankstelle die eigentliche Betankung, sodass ein relativ gleichmäßiger Volumenstrom gewährleistet werden kann.

Kurze Betankungszeiten bei Brennstoffzellenbussen erfordern eine zusätzliche Kühlung des Wasserstoffs, da Wasserstoff, anders als andere Gase wie Luft, sich bei Entspannung erwärmt (Joule-Thomson-Effekt). Der auf dem Fahrzeugdach befindliche Drucktank ist häufig ein sogenannter Typ IV-Drucktank, d. h. es handelt sich um einen Kohlefaser-Tank mit innenliegendem Kunststoff. Da aufgrund seiner Bauweise beim Betankungsvorgang eine Temperatur von 85 °C nicht überschritten werden darf, ist für eine schnelle Betankung die Vorkühlung des zu betankenden Wasserstoffs erforderlich.

Im Vergleich zur Dieseltankstelle ist die Wasserstofftankstelle mit höheren Betriebskosten verbunden. Diese resultieren aus den Wartungskosten, dem Energieverbrauch des Verdichters und der Kühlung sowie den zusätzlich erforderlichen Sicherheitsprüfungen.

Für Busse mit ihren, im Vergleich zum PKW-Sektor, größeren Betankungsmengen einerseits und dem niedrigeren Druckniveau von 350 bar gegenüber 700 bar andererseits wurde ein gesondertes, international abgestimmtes Betankungsprotokoll von Wenger Engineering in Zusammenarbeit mit der Clean Energy Partnership entwickelt.

Führende Hersteller von Wasserstofftankkupplungen bieten für die 350-bar-Technologie zwei verschiedene Kupplungsarten bezüglich des maximalen Volumenstroms an:

- » Normale Tankkupplung mit bis zu 60 g/s
- » High-Flow Kupplung mit Flussraten von bis zu 120 g/s (abwärtskompatibel)

Um das Gefahrenpotenzial während der Nutzung zu minimieren und eine systemunabhängige Betankung zu gewährleisten, ist eine sichere einheitliche Tankkupplung notwendig. Hier ist neben der standardisierten Kupplungsgeometrie auch ein zuverlässiger Schutz vor versehentlichen Nutzungsfehlern und Beschädigungen, wie beispielsweise das Abreißen des Gasschlauchs erforderlich. Um den mechanischen Betankungsprozess zusätzlich elektrisch abzusichern, kann bei Betankungssystemen eine Infrarotkommunikation an der Tankkupplung vorgesehen werden. Diese ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Tankstelle ermöglicht ein effizienteres Betanken sowie mit Blick auf den Füllgrad eine optimale Befüllung des Fahrzeugtanks.



Abbildung 3.18: Tankkupplung für Wasserstoff mit IR-Kommunikation⁴

Neben der beschriebenen Betankungstechnologie sind auch eine entsprechende Infrastruktur sowie Tankstellen notwendig, die den Anforderungen eines Busbetriebs mit Wasserstoff gerecht werden. Hier sind in der Vorplanung insbesondere die Themen Logistik, erhöhter Platzbedarf der Betriebsstätten (Druckgasspeicher, Kompressoren etc.), Lärmemission (Kompressoren, Kälteaggregate etc.), Verfügbarkeit/Redundanz sowie Genehmigungsverfahren (BetrSichV, BImSchG) individuell zu betrachten.

3.2.2.1 Wasserstoffversorgung über Anlieferung

Wasserstoff kann sowohl flüssig als auch gasförmig per LKW angeliefert werden. Weiterhin ist die Versorgung mit gasförmigem Wasserstoff durch Pipelines

⁴ Quelle | weh.de/produkte

Technologische Grundlagen

möglich. Üblich ist derzeit die Anlieferung von gasförmigem Wasserstoff in Druckbehältern. Die Anlieferung von flüssigem Wasserstoff ist nur in Einzelfällen ökonomisch.

Um Wasserstoff in größeren Mengen transportieren zu können, ist für gasförmigen Wasserstoff ein Druckniveau von 200 bis 350 bar üblich, möglich sind bis zu 500 bar. Pro Traileranlieferung per LKW können ca. 400 bis 1.100 kg Wasserstoff transportiert werden. Alternativ kann Wasserstoff auch verflüssigt angeliefert werden. Damit können über 3.000 kg pro LKW angeliefert und der logistische Aufwand reduziert werden. Aufgrund des hohen Energieverbrauchs zur Verflüssigung ist das jedoch auch mit höheren Bezugskosten verbunden.

An der Tankstelle muss der Wasserstoff auf einem Druckniveau von 350 bar zum Tanken bereitgestellt werden. Dazu werden im Falle von flüssigem Wasserstoff zunächst ein Verdampfer und anschließend Verdichter zum Komprimieren des gasförmigen Wasserstoffs benötigt. Die Dimensionierung der Verdichter erfolgt unter Beachtung der benötigten Wasserstoffmenge und Größe nachliegender Wasserstoffspeicher. Bei gasförmiger Anlieferung kann eine Nachverdichtung auf das benötigte Druckniveau, z. B. mittels einer Booster-Kompression oder mittels eines Verdichters in lokale Speicher, erfolgen. Sowohl von lokalen Speichern als auch von mobilen Speichern kann alternativ auch eine Kaskadenbetankung erfolgen, bei der der Wasserstoff aufgrund des Druckniveauunterschiedes überströmt.

Der Verdichter sorgt dafür, dass genügend Wasserstoff auf dem benötigten Druckniveau in ausreichender Menge zur Betankung der Flotte zur Verfügung steht. Aufgrund des hohen Druckniveaus ist der Leistungsbedarf der Verdichter erheblich. Er benötigt je nach Größe und Druckniveau bis zu wenigen Hundert Kilowatt, die bei der elektrischen Auslegung des Betriebshofes oder der nachträglichen Integration einer Wasserstoffbetankungsanlage beachtet werden müssen.

Wasserstoff wird in Druckspeichern zwischengelagert, die für notwendige Wartungsarbeiten möglichst einfach zugänglich aufzustellen sind. Eine unterirdische Anordnung, wie es bei konventionellen Tankspeichern üblich ist, bietet sich dadurch nicht an.

3.2.2.2 Wasserstoffversorgung über Vor-Ort-Erzeugung

Wasserstoff kann lokal über Reformierungsverfahren oder die Wasser-Elektrolyse erzeugt werden. Das Reformierungsverfahren aus Erdgas wird vorrangig in der Chemieindustrie eingesetzt und hat den Nachteil, CO₂ zu erzeugen. Folgend findet die Herstellung von Wasserstoff (oder anderen innovativen chemischen

Technologische Grundlagen

Energieträgern) aus fossilen Rohstoffen oder aus nicht regenerativer Energie in der weiteren Ausführung keine Berücksichtigung.

Im Folgenden wird die Prozesskette für die Erzeugung und Verwertung von gasförmigem Wasserstoff beschrieben. Der Schwerpunkt liegt in der Darstellung umweltschonenderer Alternativen zu fossilen Energieträgern.

Die Elektrolyse von Wasser ist im folgenden Schema (vgl. Abbildung 3.19) bildlich dargestellt.

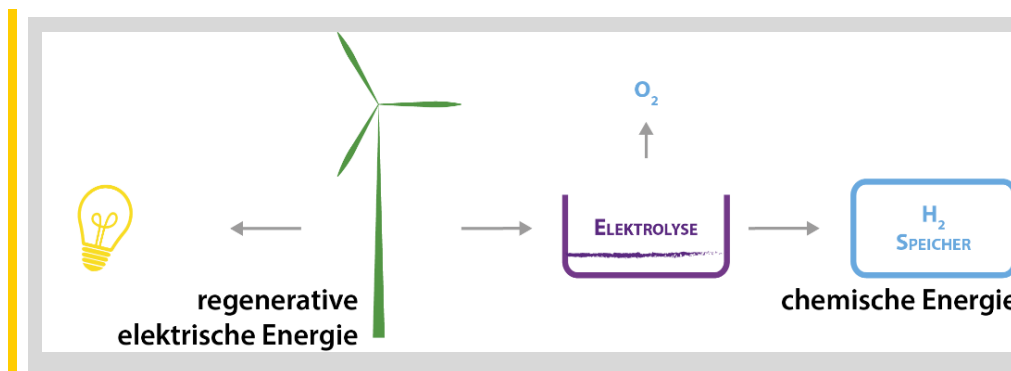


Abbildung 3.19: Schematische Darstellung der Wasserstoffelektrolyse

Mithilfe von elektrischem Strom wird Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten. Daraus geht hervor, dass die Herstellung von Wasserstoff durch Elektrolyse CO₂-neutral möglich ist, sofern der benötigte Strom aus erneuerbaren Energien verwendet wird. Der Vorgang selbst findet im sogenannten Elektrolyseur statt. Je nach Typ benötigt dieser eine Anschlussleistung in der Größenordnung von etwa 2,5 kW/kg zu erzeugendem Wasserstoff⁵. Je nach Flottengröße und Verbrauch ergeben sich entsprechend hohe Leistungsbedarfe.

Aufgrund des hohen Energiebedarfs ist die Erzeugung von Wasserstoff durch Elektrolyse nur bei geringen Strombezugskosten wirtschaftlich darstellbar. Aufgrund ihrer guten Regelbarkeit findet, neben der eher im industriellen Maßstab verwendeten alkalischen Elektrolyse, die Wasserelektrolyse mit einer Protonenaustauschmembran Anwendung. Dabei sollte die Lebensdauer der Stapel der Schichtstrukturen (engl. stacks, Stapel), die den funktionalen Kern des Elektrolyseurs darstellen, bei einer Kostenaufstellung berücksichtigt werden. Diese liegt unter der gängigen Einsatzdauer von Bussen, die etwa 12 bis 14 Jahre beträgt. Ob ein Austausch oder eine Wiederaufbereitung (engl. refurbishment) der Stacks notwendig ist, ist modellabhängig. Grundsätzlich verschlechtert sich die Effizienz der Stacks mit rd. 0,8 bis 1 % jährlich. Dementsprechend muss der höhere Stromverbrauch im Vergleich zu den Ersatzkosten vergleichend kalkuliert

⁵ Quelle | https://www.xn--starterset-elektromobilitaet-4hc.de/content/1-Bausteine/5-OEPNV/now_leitfaden_einfuehrung-wasserstoffbusse.pdf S. 21

Technologische Grundlagen

werden. Ein möglicher Wechsel sollte daher ebenso in die Kostenbilanz eingehen, wie die Wartungsarbeiten an Verdichter, Elektrolyseur und Druckbehältern. Auch Mischformen aus On-Site-Erzeugung und Anlieferung sind möglich.

Sollen viele Fahrzeuge (>> 50) auf einem Busdepot mit Wasserstoff versorgt werden, müssen entsprechend große Mengen vorgehalten werden. Je nach Tankstellengröße können unterschiedliche rechtliche Bestimmungen gelten. Dies hat Auswirkungen auf die notwendigen Sicherheitsabstände, welche in der Norm „Technische Regeln für Betriebssicherheit (TRBS 3151)“ geregelt sind. In Sonderfällen kann die Tankstelle als Störfallanlage eingeordnet werden, was gesonderte Sicherheitsabstände bedeutet.

Die rechtliche Grundlage der Genehmigung unterscheidet zwischen einer Liefer-H₂-Tankstelle und einer größeren H₂-Tankstelle ggf. in Kombination mit einer Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyse⁶. Erstere beinhaltet einen Wasserstoffspeicher von ≤ 3 t H₂ und verzichtet auf eine On-Site-Erzeugung. Hier gilt die Landesbauordnung (BauO) sowie die Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV). Im zweiten Fall bei einer Wasserstoffspeicherung von > 3 t H₂ und/oder On-Site-Erzeugung sind das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) und die Betriebssicherheitsverordnung zu berücksichtigen sowie ein Baugenehmigungsverfahren nach der Landesbauordnung durchzuführen. Aus diesen gegebenen Randbedingungen ergeben sich insbesondere für dicht bebaute Betriebshöfe Ausschlusskriterien bei der Wahl möglicher Standorte auf dem Betriebshof.

Verschiedene Hersteller bieten mit „mobilen“ Wasserstofftankstellen eine weitere Möglichkeit zur Betankung an. Regulatorisch werden mobile Systeme wie ortsfeste Anlagen behandelt. Ein entsprechender Planungshorizont bei mobilen Liefer-H₂-Tankstellen ist für die Erlaubniserteilung einzuplanen. Ist die Anlage herstellerseitig verfügbar, ist von bis zu 6 Monaten bis zur Erlaubniserteilung auszugehen. In Einzelfällen kann je nach Anlagenhersteller und Bundesland die Erlaubniserteilung deutlich unter 6 Monaten liegen. Mobile Systeme können eine zeitweise Back-up-Lösung, z. B. bei Ausfällen der ortsnahe Wasserstoffinfrastruktur, bieten.

3.2.2.3 Synthetische Kraftstoffe

Als ein möglicher Lösungsansatz zur Mobilitätssicherung und zur Ergänzung der Elektromobilität können synthetische Kraftstoffe dienen. Diese lassen sich teilweise in Bestandsfahrzeugen mit Dieselmotor einsetzen. Nachfolgend werden die Grundlagen von synthetischen Kraftstoffen sowie die Einordnung in die CVD und

⁶ <https://www.h2-genehmigung.de/> S. 5

verschiedene Herstellungsvarianten dargestellt. Weiterhin werden die rechtlichen Rahmenbedingungen aufgezeigt.

In der CVD und im SaubFahrzeugBeschG werden „saubere schwere Nutzfahrzeuge“ im Einklang mit der Richtlinie 2014/94/EU (22.10.2014), unter anderem, über den Einsatz von synthetischen oder paraffinhaltigen Kraftstoffen definiert. Um den Status „sauber“ zu bewahren, muss sichergestellt sein, dass nur solche Kraftstoffe für diese Busse eingesetzt werden.

Als Alternative zu herkömmlich hergestellten Kraftstoffen setzen Treibstoffhersteller verstärkt auf den Einsatz hochsauberer, synthetischer Dieselmotorkraftstoffe. Hierunter werden flüssige Kraftstoffe verstanden, welche auf Basis von Erdgas (GtL: Gas-to-Liquids), Kohle (CtL: Coal-to-Liquids), Biomasse (BtL: Biomass-to-Liquids) und elektrischer Energie (PtL: Power-to-Liquids oder E-Fuel) – z. B. über das Fischer-Tropsch-Verfahren – hergestellt werden können. GtL und CtL sind bereits heute in größeren Mengen verfügbar, eine solche Umstellung ist mit Mehrkosten je nach Marktlage von 10 bis 30 % pro Liter verbunden. Synthetischer Dieselmotorkraftstoff zeichnet sich durch fehlende Ruß-Entstehung, geringe Geräuschenstehung und Schwefelfreiheit aus. Allerdings werden weiterhin lokal giftige Stickoxide und Kohlenstoffdioxide ausgestoßen. Es können auch synthetische Benzinkraftstoffe z. B. aus Methanol (MtG: Methanol-to-Gasoline) hergestellt werden.

Zur Herstellung von PtL-Kraftstoffen wird absorbiertes Kohlenstoffdioxid aus der Luft sowie durch Elektrolyseverfahren hergestellter Wasserstoff benötigt. Aus Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff wird ein Synthesegas, woraus durch das Fischer-Tropsch-Verfahren ein Kraftstoff hergestellt wird.

Für GtL-Kraftstoffe wird das Erdgas von Verunreinigungen gereinigt und mittels Destillation das reine Erdgas (Methan) extrahiert. Daraus wird bei sehr hohen Temperaturen, durch teilweise Oxidation, Methan und Sauerstoff zu einer Mischung aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid umgewandelt (Synthesegas). Daraus wird durch das Fischer-Tropsch-Verfahren ein Kraftstoff hergestellt.

Technologische Grundlagen

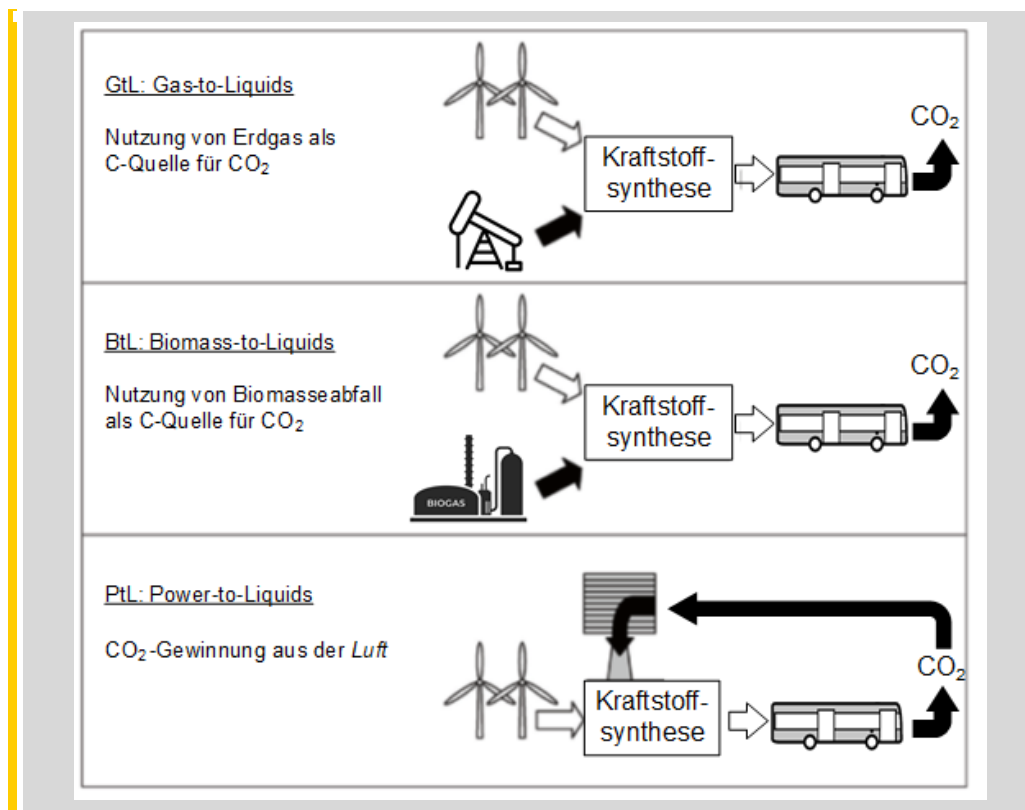


Abbildung 3.20: Übersicht Herstellung von synthetischen Kraftstoffen

Für den Anwender ergeben sich durch die Nutzung synthetischer Kraftstoffe keine Einschränkungen, da die Nutzungseigenschaften und die Distributionsinfrastruktur im Vergleich zu herkömmlichen Dieselmotorkraftstoffen unverändert bleiben. Allerdings widerspricht aktuell die 10. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchV) der ausnahmslosen Beschaffung paraffinhaltiger Dieselmotorkraftstoffe, da laut dieser Verordnung das Inverkehrbringen und Überlassen an Andere als Reinkraftstoff grundsätzlich nicht zulässig ist. Dieselmotorkraftstoff darf nur dann gewerbsmäßig oder im Rahmen wirtschaftlicher Unternehmungen gegenüber dem Letztverbraucher in den Verkehr gebracht werden, wenn er den Anforderungen der DIN EN 590, Ausgabe Oktober 2017 oder der DIN EN 15940 genügt, sofern dieser für den Linienbusverkehr genutzt wird.

Der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) löst diesen juristisch-formalen Interessenskonflikt zwischen dem SaubFahrzeugBeschG und der 10. BImSchV im offiziellen Rundschreiben Nr. 25/2021 (20.09.2021) in einer Stellungnahme zur Verwendung von synthetischen Kraftstoffen nach DIN EN 15940 auf. Demnach empfiehlt ausdrücklich das BMUV die Nutzung synthetischer Kraftstoffe zur Erfüllung des SaubFahrzeugBeschG. Dieser Empfehlung folgt auch das BMDV in seinem FAQ zur Umsetzung desselben Gesetzes:

*„In § 2 Nr. 5 SaubFahrzeugBeschG ist auch synthetischer Kraftstoff nach DIN EN 15940, Ausgabe Oktober 2019, als weitere Erfüllungsoption zugelassen, soweit er die weiteren Voraussetzungen des SaubFahrzeugBeschG erfüllt. Das Inverkehrbringen von paraffinischem Dieseldieselkraftstoff als Reinkraftstoff ist nach der 10. BImSchV grundsätzlich nicht zugelassen. Um der Option der Nutzung paraffinischer Dieseldieselkraftstoffe als Reinkraftstoffe im Rahmen des SaubFahrzeugBeschG Rechnung zu tragen, können die vom Gesetz verpflichteten Auftraggeber diesen Kraftstoff aus Sicht der Bundesregierung in entsprechender Anwendung von **§ 16 Absatz 2 der 10. BImSchV ohne gesonderte Ausnahmegenehmigung betriebsintern verwenden**. Auf einen Forschungs- und Erprobungszweck kommt es im Zusammenhang mit dem SaubFahrzeugBeschG nicht an. Für den Vollzug des Immissionsschutzrechts sind die Länder zuständig.“*

In Bezug auf den Umgang mit synthetischen Kraftstoffen ist keine größere Gefährdung als mit Dieseldieselkraftstoffen zu erwarten. Es kann eher von einer geringeren Gefährdung ausgegangen werden, da keinerlei Fremdstoffe enthalten sind.

In jedem Fall empfiehlt es sich, vor dem Einsatz von synthetischen Dieseldieselkraftstoffen eine Freigabe vom Fahrzeughersteller zu erwirken. Erste Hersteller haben für den Einsatz von alternativen Kraftstoffen gemäß DIN EN 15940 in EURO-VI-Motoren bereits eine Freigabe erteilt.

Technologische Grundlagen

3.3 Well-to-Wheel-Wirkungsgrade verschiedener Antriebstechnologien

Zur Betrachtung der energetischen Effizienz ist es erforderlich, die gesamte Wirkungsgradkette eines Antriebssystems zu betrachten. Diese sogenannte Well-to-Wheel-Betrachtung umfasst neben den Energieverlusten während des Betriebs (Tank-to-Wheel) auch die Erzeugung, Übertragung, Zwischenspeicherung und Ladung bzw. Betankung des Energieträgers (Well-to-Tank).

Im Vergleich Brennstoffzellenbus gegenüber dem Batteriebus resultieren deutlich höhere Verluste aus der Elektrolyse zur Wasserstoffherzeugung, der Kompression des Wasserstoffs auf das benötigte Druckniveau von mindestens 350 bar und der Stromerzeugung durch die Brennstoffzelle im Fahrzeug.

Beim Batterie- und Brennstoffzellenbus ist die Traktion, also die Umwandlung von elektrischer in kinetische Energie durch Elektromotoren, ähnlich. Je nach Elektromotor und Antriebsart sind Wirkungsgrade zwischen 80 und 95 % realistisch. Beim Verbrennungsmotor liegt der Wirkungsgrad hingegen aufgrund der Umwandlung in thermische Energie (Verbrennung) nur zwischen 20 und maximal 50 %. Beim Brennstoffzellenbus ist zusätzlich noch eine Pufferung mit einer im Vergleich zum Batteriebus klein dimensionierten Batterie zum Ausgleich von Abnahmespitzen notwendig, die entsprechend ihrer Arbeitsweise mit Wirkungsgradverlusten behaftet ist.

Je nach Studie, Berechnung, Stromerzeugung und Antriebsart werden andere Gesamtwirkungsgrade Well-to-Wheel errechnet. Nachfolgend werden Richtwerte angegeben, resultierend aus verschiedenen Studien und Zahlen (bspw. Well-to-Wheel Report der europäischen Kommission, Studie vom Bundesministerium für Umwelt, Schrift vom Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, Wirkungsgradstudie vom Transport & Environment):

- | | |
|--|---------------------------------|
| » Batterieelektrischer Bus | Gesamtwirkungsgrad: 60 bis 80 % |
| » Brennstoffzellenbus | Gesamtwirkungsgrad: 23 bis 33 % |
| » Dieselbus (konventioneller Kraftstoff) | Gesamtwirkungsgrad: 16 bis 25 % |
| » Dieselbus (synthetischer Kraftstoff) | Gesamtwirkungsgrad: 13 bis 23 % |

Bei den technologiespezifischen Prozessen der Energieumwandlung treten hohe Verluste auf. Insgesamt sind die Verluste der Umwandlungskette beim Brennstoffzellenbus mehr als doppelt so groß wie bei rein batterieelektrischen Fahrzeugen. Das genaue Verhältnis ist jedoch stark abhängig von der Auslegung der jeweiligen Systeme.

3.4 Werkstattausrüstung

Der konkrete Bedarf an Werkstattausrüstung sowie der Schulungsbedarf ist vorrangig von der geplanten Instandhaltungstiefe abhängig. Dabei können einerseits die Wartung und Instandsetzung über einen mit dem Fahrzeughersteller abgeschlossenen Vollservicevertrag, d. h., dass sämtliche Leistungen durch den Hersteller erbracht werden, abgebildet werden. Andererseits kann die gesamte Bandbreite der Instandhaltung auch durch die Verkehrsbetriebe in Eigenleistung durchgeführt werden. Ein Kombiwartungsvertrag kann eine Zwischenlösung darstellen. Die Proportionalität von Anpassungsbedarf und Instandhaltungstiefe verdeutlicht nachfolgende Abbildung.

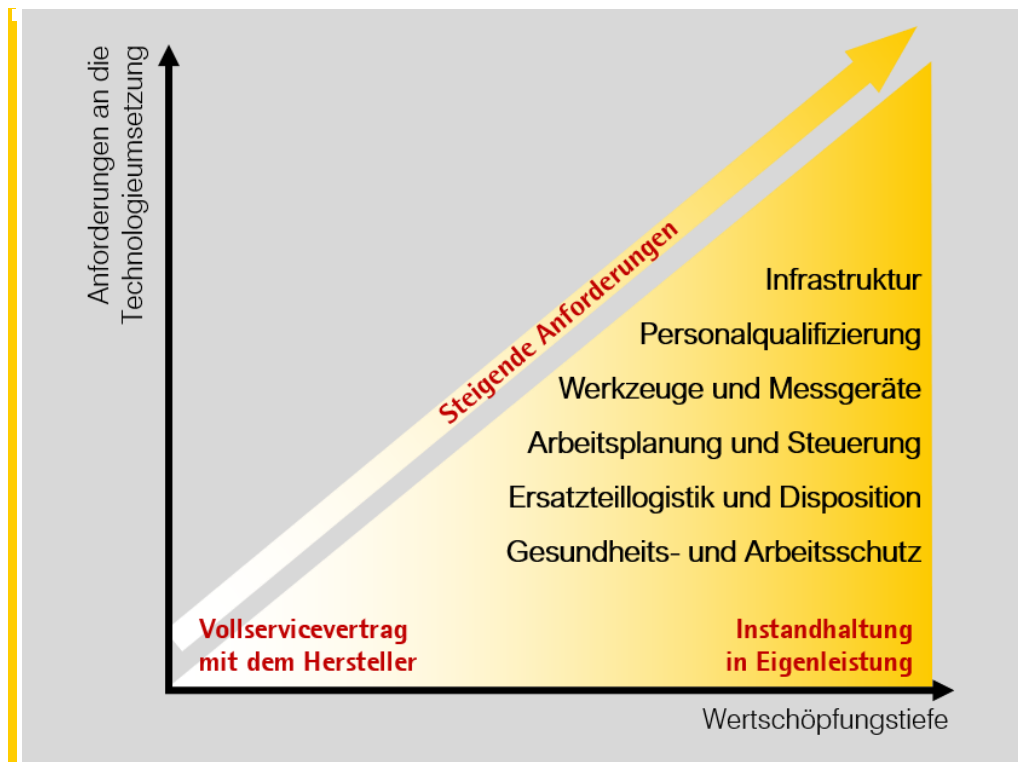


Abbildung 3.21: Wertschöpfungstiefe der Instandhaltung

Technologische Grundlagen

Welcher Weg für ein Verkehrsunternehmen der Geeignete ist, hängt zum einen von der Flottengröße, der verfügbaren Betriebshofgröße, der vorhandenen Werkstattausrüstung und dem bestehenden Grad der Personalqualifizierung ab. Zum anderen handelt es sich um eine wirtschaftliche und strategische Entscheidung. Bei kleineren Flotten kann ein Vollservicevertrag den Bedarf an Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten oftmals besser abbilden. Mit steigender Anzahl an Elektrobussen ist es sinnvoll, derartige Arbeiten zunehmend in Eigenleistung durchzuführen. Bei einer schrittweisen Flottenumstellung auf Fahrzeuge mit alternativem Antrieb können derartige Serviceverträge eine zweckmäßige Interimslösung während der Ertüchtigung der Werkstatt auf Elektrobuss-Betrieb darstellen.

Für die sichere Abstellung und Beobachtung von havarierten Fahrzeugen oder Fahrzeugen mit technischer Anomalie ist eine Havariefläche vorzusehen (siehe VDV-Schrift 825). Weiterhin sind die örtliche Feuerwehr und Rettungskräfte über die Besonderheiten der Elektrobusse zu informieren sowie ein Brandschutzkonzept zu entwickeln.

3.5 Personalqualifizierung

Bei Elektrobussen treten geänderte Gefahrenpotentiale durch Hochvolt-Systeme auf. Um Mitarbeiter vor Gefahren wie Körperdurchströmung oder Lichtbogenbildung zu schützen, sind sie zu sensibilisieren und zu qualifizieren. Die Schulungen müssen vor Inbetriebnahme der Elektrobusse abgeschlossen worden sein. Der Schulungsbedarf in einem Verkehrsunternehmen richtet sich nach den Vorgaben der berufsgenossenschaftlichen Informationsschrift DGUV-Information 209-093⁷, welche seit August 2021 die Vorgängerschrift DGUV-I 200-005 abgelöst hat. Je höher die Qualifikationsstufe, desto mehr Befugnisse und Fähigkeiten hat das betroffene Personal, wie nachfolgende Abbildung 3.22 verdeutlicht.

⁷ DGUV-Information 209-093 „Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltssystemen“ (bisher: DGUV-I 200-005), August 2021



Abbildung 3.22: HV-Qualifikation nach DGUV-Information 209-093

Die Qualifizierungen bauen aufeinander auf; die Dauer der Qualifizierungsmaßnahmen hängt von der Eingangs- und Zielqualifikation der Beschäftigten ab. Neben dem Werkstattpersonal müssen auch das Fahr- und Servicepersonal bei den Qualifizierungsmaßnahmen berücksichtigt werden.

Für das sichere Arbeiten an HV-Komponenten an Elektrobussen sind besondere Schutzmaßnahmen und Qualifikationen für das Werkstattpersonal erforderlich. Beim Werkstattpersonal wird im HV-Bereich zwischen nicht-elektrotechnischen Arbeiten (Service und mechanische Arbeiten), elektrotechnischen Arbeiten (im spannungsfreien Zustand / unter Spannung) und der Übernahme der Unternehmerverantwortung (verantwortliche Elektrofachkraft, VEFK) unterschieden.

Das Fahrpersonal benötigt zum Fahren von Elektrobussen eine Qualifizierung zur elektrotechnisch unterwiesenen Person für Fahrtätigkeiten. Dazu sind keinerlei elektrotechnische Vorkenntnisse notwendig. Im Rahmen der Sensibilisierung wird das Fahrpersonal auf die Bedienung und das optimale Führen des Fahrzeuges geschult. Darüber hinaus wird u. a. das richtige Verhalten bei Pannen und im Gefahrenfall (Unfall) hingewiesen. Die Schulung der Fahrdienstmitarbeiter kann

Technologische Grundlagen

vollständig extern erfolgen. Sofern unternehmenseigene Fahrlehrende zur Verfügung stehen, können die Schulungen in Eigenregie über Multiplikatoren durchgeführt werden.

Das für Reinigungsarbeiten vorgesehene Servicepersonal ist zu elektrotechnisch unterwiesenen Personen für Reinigungstätigkeiten zu qualifizieren. Dazu sind keinerlei elektrotechnische Vorkenntnisse notwendig. Im Rahmen der Unterweisung wird das Servicepersonal auf mögliche Gefahrenquellen durch HV-Komponenten hingewiesen sowie u. a. das Vorgehen bei Außen- und Innenreinigungen geschult. Die notwendigen Qualifizierungsmaßnahmen sind in folgender Tabelle zusammenfassend aufgeführt:

Qualifizierungsmaßnahme	Stufe	Beschreibung
Erstschulung		
HV-Bus	S	Sensibilisierung für Gefahren bei Kraftfahrzeugen mit HV-Systemen
	1S	Fachkundig unterwiesene Person Hochvolt (FuP) nach DGUV Information 209-093
	2S	Fachkundige Person Hochvolt (FHV). Arbeiten an Serienfahrzeugen
	3S	Fachkundige Person für Arbeiten an unter Spannung stehenden HV-Komponenten
	VEfk	Stufe 4 für verantwortliche Elektrofachkraft für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltsystemen
Wiederholung		
Jahresunterweisung für (HV-Bus 2&3)	JA-HV	Jahresunterweisung für Absolventen der Schulungen zur Stufe 2 und 3 "Arbeiten an nicht HV-eigensicheren Systemen" entsprechend ArbSchG § 12 und DGUV Vorschrift 1 § 4
Wiederholungskurs für (HV-Bus 3, alle 4 Jahre)	WA3a	Wiederholungsausbildung zur Fachkunde für Arbeiten an nicht HV-eigensicheren Systemen unter Spannung (AuS) nach Stufe 3 der DGUV Information 209-093.
Jahresunterweisung verantwortliche Elektrofachkraft (HV- Bus 4)	Jahresunterweisung HV-Bus-VEfk	Jahresunterweisung der verantwortlichen Elektrofachkräfte (VEfk) nach DGUV 1 und ArbSchG

Tabelle 3.6: HV-Qualifikationsstufen nach DGUV-I 209-093, Batteriebus

Bei Brennstoffzellenbussen sind darüber hinaus wasserstoffspezifische Personalqualifizierungsmaßnahmen nötig. Da die Wasserstofftechnologie in Bussen eine noch relativ neue und wenig eingesetzte Technologie darstellt, liegen zu diesem Zeitpunkt noch keine – dem VBG-Leitfaden „Elektromobilität – Arbeiten an Omnibussen mit HV-Systemen“ vergleichbar detailliert ausgearbeiteten – Qualifizierungskonzepte für Verkehrsunternehmen vor. Einen guten Anhaltspunkt zur Festlegung der notwendigen Qualifizierungen in Abhängigkeit der auszuführenden Tätigkeiten bietet die DGUV-Informationsschrift FB HM 099 „Gasantriebssysteme in Fahrzeugen – Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Gasantrieb“. Diese wird aufgegriffen und für das Personalqualifizierungsgerüst beim Brennstoffzellenbus zum Ansatz gebracht. Die H₂-Qualifikationsstufen sind in Tabelle 3.7 aufgeführt.

Qualifizierungsmaßnahme	Stufe	Beschreibung
Erstschulung		
Qualifizierungsstufen für Arbeiten an gasbetriebenen Fahrzeugen in Servicebetrieben	S	Bedienung von Fahrzeugen mit Gasantrieb
	1S	Arbeiten an Fahrzeugen mit Gasantrieb (außer Gassystem)
	2S	Arbeiten am Gassystem
	3S	Nachrüstung von Gassystemen

Tabelle 3.7: H₂-Qualifikationsstufen nach DGUV-I FB HM 099, Brennstoffzellenbus

Wie beim Umgang mit Hochvolttechnik müssen Mitarbeiter in die Bedienung von Wasserstoffbussen eingewiesen und hinsichtlich der Arbeiten am Fahrzeug, die nicht die Gasanlage betreffen, unterwiesen werden. Analog zur Qualifikation als Elektrofachkraft sind für Arbeiten am Gasanlagensystem besondere Ausbildungsinhalte notwendig, die den Mitarbeiter zu einer fachkundigen Person rechtssicher zertifiziert. Die Gasanlagenprüfung ist von einer Fachkraft nach § 41a StVZO Anlage XVIIa⁸ mit einer Zusatzausbildung für Wasserstoff durchzuführen oder zu beaufsichtigen.

⁸ „Anerkennung von Kraftfahrzeugwerkstätten zur Durchführung von Gassystemeinbauprüfungen oder von wiederkehrenden und sonstigen Gasanlagenprüfungen sowie Schulung der verantwortlichen Personen und Fachkräfte“

4 Fuhrpark- und Betriebshofanalysen

In diesem Kapitel erfolgt die Fuhrpark- und Betriebshofanalyse mit dem Ziel der Umstellung der Verkehrsleistung auf alternative Antriebe.

4.1 Grundlagen-Workshop

Es ist sinnvoll zu Projektbeginn eine einheitliche Wissensbasis für alle beteiligten Fach- und Führungskräfte des Unternehmens zu schaffen sowie die Erwartungen und Ziele der Projektbeteiligten zu diskutieren und im Projekt einzubinden.

Vor diesem Hintergrund und mit dem Ziel, Zugangshemmnisse gegenüber alternativ angetriebenen Bussystemen zu reduzieren, wurde zum Projektauftritt für die OREG und die OdVB ein Grundlagen-Workshop zum Thema „Alternative Antriebskonzepte im Busbetrieb“ durchgeführt.

Der Workshop gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der Technik von alternativen Bussystemen, in ihrer Gesamtheit im Kontext mit der CVD. Schwerpunktmäßig werden dabei elektrische Antriebskonzepte, die Energiespeicherung sowie die Energieversorgungsinfrastruktur für elektrisch angetriebene Busse als die wesentlichen Systemkomponenten betrachtet. Zudem werden die verschiedenen Ladestrategien sowie Wasserstoffbereitstellungsformen erläutert.

Entsprechend der CVD-Definitionen werden dabei „saubere“ sowie „emissionsfreie“ Fahrzeuge betrachtet. Dies beinhaltet folgende Energieträger:

- » Biokraftstoffe (gemäß Erneuerbare-Energie-RL, RED II),
- » Synthetische und paraffinhaltige Kraftstoffe,
- » Erdgas (CNG, LNG, inkl. Biomethan), Flüssiggas LPG,
- » Wasserstoff sowie
- » Elektrizität.

Im Workshop soll das geplante strategische Vorgehen zur Umsetzung der CVD, welches maßgebend für die Untersuchung ist, festgelegt werden.

Die Workshop-Inhalte zielen weiter auf die Bewertung des zu planenden Bussystems ab, wobei die Schwerpunkte auf die technischen, betrieblichen, wirtschaftlichen und ökologischen Aspekte gelegt werden.

Fuhrpark- und Betriebshofanalysen

Die folgenden Anlagen geben detaillierte/ weiterführende Informationen zur Technologiegrundlagen

- » Anlage 1: Grundlagen-Workshop
- » Anlage 2: Technologische Grundlagen
- » Anlage 3: Technologievergleich BOB-BEB-BZB

Im Rahmen des Grundlagen-Workshops konnten mit der OREG und der OdVB die Rahmenbedingungen des Projektes genauer definiert und eingegrenzt werden. Von Seiten der OREG und der OdVB wurde die Anforderung definiert einen Fahrzeugmehrbedarf auszuschließen bzw. gering zu halten.

In der Vielfalt der alternativen Antriebsformen konnte der Oberleitungsbus als ungeeignet bestimmt werden, wodurch diese Technologie nicht weiter im Fokus der Untersuchung steht. Die Thematik der synthetischen Kraftstoffe in der Region wurde ebenfalls diskutiert, da diese Technologie entsprechend der CVD nur als sauberes und nicht als emissionsfreies Fahrzeug eingesetzt werden kann stellt dies lediglich eine Übergangslösung dar und steht damit auch nicht mehr im Fokus der Untersuchung. Die Untersuchung der Machbarkeitsstudie konnte auf Konzepte für batterieelektrische Busse und Brennstoffzellenbusse definiert werden.

4.2 Datenerfassung

Eine fundierte Datenerfassung ist für den Erfolg der Untersuchung unabdingbar. Alle erforderlichen Daten wurden daher beim Auftraggeber anhand einer zuvor übermittelten Checkliste abgefragt. Es erfolgt eine Bestandsaufnahme hinsichtlich der möglichen Umsetzung der CVD-Richtlinie.

Fuhrpark- und Betriebshofanalysen



Abbildung 4.1: Betriebshof Wissmüller

Die Anforderungen und Rahmenbedingungen wurden in einem Eingangsdatengespräch als Untersuchungsbasis anhand relevanter Aspekte erhoben. Dabei erfolgte eine umfassende Bestandsaufnahme betrieblicher, verkehrlicher und wirtschaftlicher Basisdaten, die als Parameter in die energetischen und wirtschaftlichen Untersuchungen eingehen. Entsprechend einer Clusterung wurden Ausgangslage, Ziele und Maßnahmen/Herausforderungen für das Projekt definiert und erfasst.

Die Angaben sind in der folgenden Anlage ausführlich dargestellt:

- » Anlage 4: Anforderungen und Rahmenbedingungen im Linienbetrieb der OdVB

Die Datenerfassung wurde mit der BeSystO-Eingangsdatenerfassung fortgesetzt. Der Fokus hierbei bestand darin quantitative, betriebliche, ökonomische und technische Daten der OREG und der OdVB zu erfassen welche für die Erstellung eines Referenzkostenmodells erforderlich sind und die Grundlage für den Vergleich zu alternativen Antriebskonzepten bildet.

Die Angaben sind in der folgenden Anlage ausführlich dargestellt:

- » Anlage 5: BeSystO-Eingangsdaten

Fuhrpark- und Betriebshofanalysen

Zur Erfassung der betrieblichen Parameter wurden VDV-452 konforme Datensätze für Liniennetz und Fahrplan abgefragt. Die Daten wurden durch die OREG und die OdVB bereitgestellt und konnten durch die VCDB geprüft werden. Nach Anpassung der Konformität und Prüfung der Vollständigkeit gemäß Anlage 6: VDV-Datenerhebung konnte die Analyse für die weiteren Prozesse erfolgen.

Das Vorgehen ist in der folgenden Anlage ausführlich dargestellt:

- » Anlage 6: VDV-Datenerhebung

Zum Abschluss der Datenerhebung erfolgte die Bestandaufnahme der folgenden Punkte:

- » Instandhaltungstiefe
- » Personalqualifikation
- » Werkstattausrüstung
- » IT-Systeme

Im Rahmen der Datenerfassung wurden die organisatorischen und betrieblichen Rahmenbedingungen erfasst. Diese bilden die Grundlage für das zu erarbeitende Umsetzungskonzept.

Die Bestandaufnahme zur Instandhaltungstiefe beschreibt den Grad der Wertschöpfungsleistungen der Inspektions-, Wartungs- und Serviceleistungen. Die Kriterien entsprechen der VDV 881 – Technische Instandhaltung Werkstatt.

Wartung/ Service

- » Arbeiten gemäß den Wartungsplänen des Fahrzeug-Herstellers

Inspektion

- » Feststellung und Beurteilung des Fahrzeugzustands (durch HU, SP, AU, DGUV-Prüfung, GAP, Fahrtenschreiber/ Kontrollgerät und weitere erforderliche technische Prüfungen)
- » Störungsdienst am Fahrzeug und an der Zusatzausstattung (Beseitigung von Defekten, die vor oder während des Einsatzes auftreten, ggf. mit Einschleppen des Fahrzeuges zum Betriebshof), Reparaturarbeiten aufgrund von Befunden in einer Inspektion

Zusätzliche Instandhaltungsmaßnahmen/ Verbesserung

- » Unfall
- » Vandalismus
- » Reifenmanagement

Fuhrpark- und Betriebshofanalysen

- » Verbesserung: Arbeiten zur Beseitigung von Schwachstellen, soweit dies vom Hersteller empfohlen oder angewiesen wird

Für die Evaluation der Instandhaltungstiefe wurden die Informationen von den Busbetreibern der OREG und der OdVB abgefragt, zusammengefasst und analysiert. Die in der Untersuchung betrachteten Daten sind die erhaltenen Angaben von:

- » Fa. Friedrich
- » Fa. Kirchgässner
- » Fa. Lust
- » Fa. Sauter
- » Fa. VGG
- » Fa. Wissmüller

Die Betreiber Kirchgässner, Lust und Wissmüller erfüllen die gesamte Wertschöpfungstiefe in Eigenleistung. Diese soll im Weiteren beibehalten werden und es erfolgen bereits Maßnahmen um die Fahrzeuginspektion (z. B. mittels eines Bremsenprüfstandes) weiter in Eigenleistung durchführen zu können. Als Rückfallebene stehen Serviceniederlassungen der Hersteller in der Umgebung zur Verfügung.

Die Betreiber Sauter und VGG führen Wartung/ Service und Feststellung und Beurteilung des Fahrzeugzustands im Rahmen der Inspektion nicht in Eigenleistung aus. Alle weiteren Instandhaltungsmaßnahmen werden jedoch in Eigenleistung erbracht.

Die Angaben sind in der folgenden Anlage ausführlich dargestellt:

- » Anlage 7: Bestandsaufnahme Instandhaltungstiefe

Die Bestandsaufnahme Personalqualifizierung hat gezeigt das die Qualifikation für zukünftige Arbeiten an Fahrzeugen mit alternativen Antrieben und entsprechenden Hochvoltkomponenten teilweise vorhanden ist aber entsprechend ausgebaut werden muss.

Fuhrpark- und Betriebshofanalysen

Die Angaben sind in der folgenden Anlage ausführlich dargestellt:

- » Anlage 8: Bestandsaufnahme Personalqualifizierung

Die Bestandsaufnahme Werkstattausrüstung umfasst die Erfassung der vorhandenen Werkstattkomponenten für das Durchführen der erforderlichen Arbeiten an Fahrzeugen mit alternativen Antrieben. Teilweise sind mobile Arbeitsbühnen oder Krananlagen bereits vorhanden. Diese sind aber auf Tauglichkeit für die Instandhaltung an Elektrobussen zu untersuchen und ggf. zu erweitern. Spezialwerkzeuge und entsprechende Prüf- und Messgeräte sind noch nicht vorhanden und müssen entsprechend beschafft werden.

Die Angaben sind in der folgenden Anlage ausführlich dargestellt:

- » Anlage 9: Bestandsaufnahme Werkstattausrüstung

Die Bestandsaufnahme IT umfasst Themen des Werksstattmanagements, Systeme zur Fahr- und Umlaufplanung und Betriebshofmanagementsysteme und Betriebsleitsysteme. Aktuell sind bereits Systeme zur Fahr- und Umlaufplanung bei den Betreibern der OdVB vorhanden. Weitere Betriebsleitsysteme und Managementsysteme sind im Rahmen der Umstellung auf alternative Antriebe und der ggf. anzupassenden Betriebsbedingungen erforderlich.

Fuhrpark- und Betriebshofanalysen

4.3 Clusterung und Vermessung der Referenzszenarien

Für eine effiziente Analyse des Gesamtnetzes ist dieses in Referenzszenarien zu clustern, wobei jedem Referenzszenario Umläufe mit ähnlichen energetischen Anforderungen zugeordnet werden. Zur Einstufung können verkehrliche, topografische und betriebliche Eigenschaften herangezogen werden. Ziel ist es, für jedes definierte Referenzszenario den durchschnittlichen Energiebedarf zu bestimmen und anschließend die Energiebilanzierung und Umlaufbewertung bestehender Umläufe zu berechnen.

Für die Clusterung ist eine umfassende Untersuchung jeder einzelnen Linie bzw. jedes einzelnen Umlaufs notwendig. Ziel ist es, die zur Clusterung benötigten energetischen Anforderungen zu identifizieren und Endpunkte im Liniennetz außerhalb des Betriebshofs für eine mögliche Nachladung von batterieelektrischen Bussen (Gelegenheitslader) zu ermitteln.

Es wurden die übergebenen Umlaufdaten (VDV-452-Datenformat) zur Auswertung aufbereitet. Die Standzeiten der Fahrzeuge im Betriebshof und an Endpunkten wurden visualisiert und die Auslastung berechnet. Zur Ermittlung der Referenzszenarien wurden verschiedene Parameter als maßgebende, den spezifischen Energiebedarf bestimmende, Einflussgrößen identifiziert. Anschließend wurden alle Umläufe entsprechend ihrer ähnlichen charakteristischen Merkmale geclustert.

Die durch die OREG übergebenen Daten im VDV-452-Format enthalten alle Umläufe für die Verkehrstage vom 04.10.2022 bis zum 10.12.2022. Mit diesen werden die spezifischen Energiebedarfe ermittelt, das Liniennetz geclustert und das favorisierte Energieversorgungskonzept festgelegt.

Auf dieser Basis erfolgte eine Gruppierung (Clusterung) innerhalb der zu untersuchenden Verkehrsleistung und eine Definition von sogenannten *Referenzszenarien*. Diese Szenarien sollen den betrieblichen Querschnitt des Liniennetzes abbilden. Sie bestimmen sich aus betrieblichen, verkehrlichen und topographischen Parametern wie Fahrgastaufkommen, Geschwindigkeit, Haltestellenabstand, Beschleunigungselementen und Höhenprofil.

Die Referenzszenarien wurden in enger Abstimmung und unter Berücksichtigung der betrieblichen Erfahrung der OREG und der OdVB definiert. Anhand der Daten der OREG und der OdVB wurden die folgenden fünf charakteristischen Referenzszenarien bestimmt:

Fuhrpark- und Betriebshofanalysen

- » **Referenzszenario I** (Regional-/ Überlandverkehr)
 - » hohe mittlere Geschwindigkeit, anspruchsvolles Höhenprofil
- » **Referenzszenario II** (Regional-/ Überlandverkehr)
 - » niedrigere mittlere Geschwindigkeit, anspruchsvolles Höhenprofil
- » **Referenzszenario III** (Regional-/ Überlandverkehr)
 - » hohe mittlere Geschwindigkeit, flaches Höhenprofil
- » **Referenzszenario IV** (Regional-/ Überlandverkehr)
 - » niedrigere mittlere Geschwindigkeit, flaches Höhenprofil
- » **Referenzszenario V** (Stadtverkehr)
 - » Taktverkehr, Kleinbus (8m), hohes Fahrzeugaufkommen, spezifisches Höhenprofil

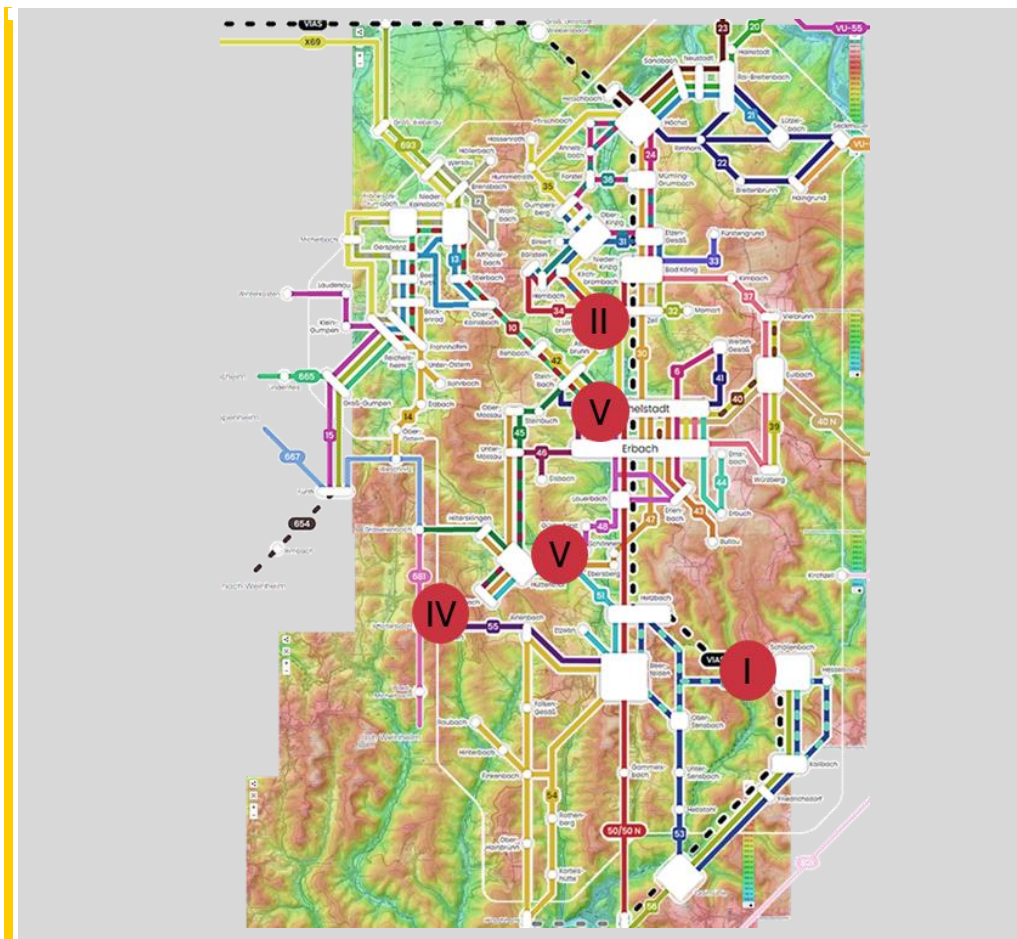


Abbildung 4.2: Liniennetzplan mit topografischer Einordnung

Fuhrpark- und Betriebshofanalysen

Bei der Clusterung wurde darauf geachtet, dass die Anzahl der Fahrplanfahrten in den jeweiligen Szenarien ausgewogen ist. Die Referenzszenarien wurden nach den entsprechenden SORT/ Regio-Zyklen benannt. SORT⁹ ist die Bezeichnung eines standardisierten Straßen-Testzyklus für Niederflur-Stadtbusse mit dem Ziel, Kraftstoffverbräuche verschiedener Hersteller vergleichbar zu machen. SORT 2 beschreibt dabei den leichten Stadtverkehr, für höhere Geschwindigkeiten werden die Regio-Zyklen¹⁰ verwendet. Für den Regionalbusverkehr stößt der SORT an die Grenze, daher wurde das SORT-Modell um Regio-Zyklen erweitert. Anhand der Durchschnittsgeschwindigkeit jeder Fahrt kann eine Zuordnung zum Referenzszenario anhand des Geschwindigkeitsbereichs erfolgen.

Die durch die OREG übergebenen Daten im VDV-452-Format enthalten alle Umläufe für die Verkehrstage vom 04.10.2022 bis zum 10.12.2022. Mit diesen werden die spezifischen Energiebedarfe ermittelt, das Liniennetz geclustert und das favorisierte Energieversorgungskonzept festgelegt.

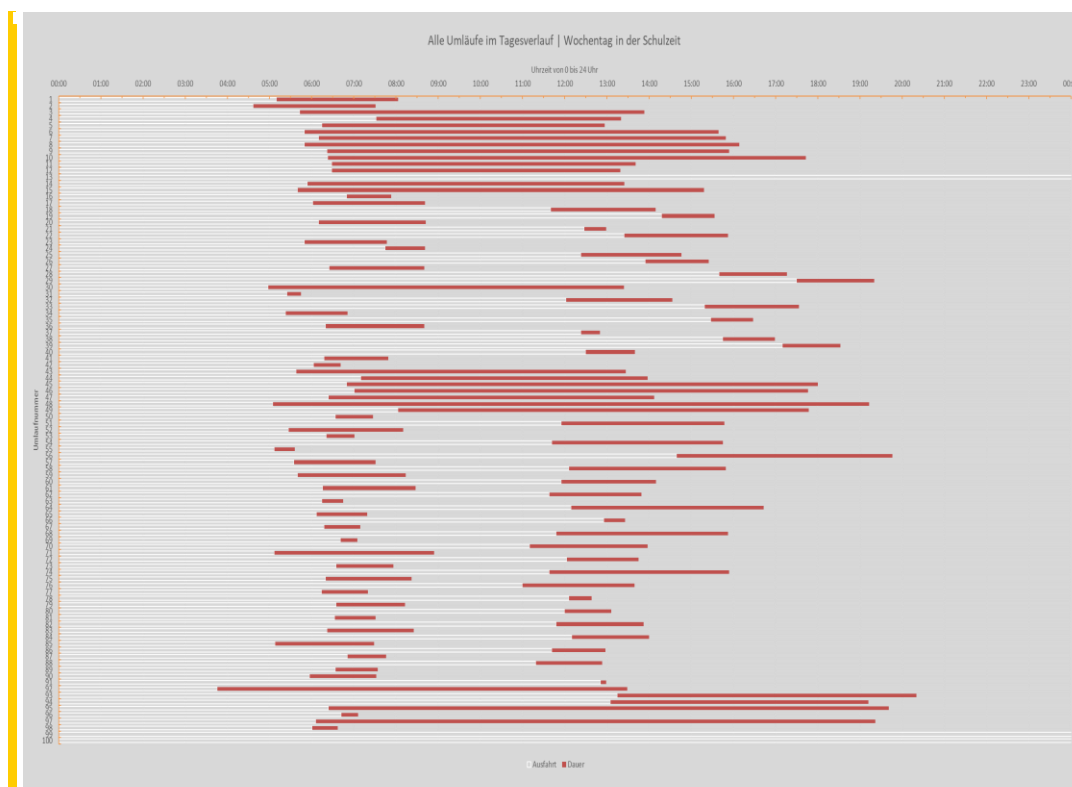


Abbildung 4.3: Ergebnis der Dieselumlaufplanung | alle Umläufe im Tagesverlauf an einem Wochentag in der Schulzeit

⁹ SORT = Standardised On Road Testcycles, UITP & VDV 2000

¹⁰ Eigenentwicklung der VCDB in Kooperation mit dem RMV | Erläuterung im Artikel "Weiterentwicklung des SORT-Modells zur Verbrauchsermittlung" im DER NAHVERKEHR | ELEKTROBUS-SPEZIAL 02/2022

Fuhrpark- und Betriebshofanalysen

Die OREG und die OdVB unterteilt die Betriebstage in vier Kategorien:

- » Montag bis Freitag | Schulzeit 14.026 Fahrplankilometer pro Tag
- » Montag bis Freitag | Ferien 7.505 Fahrplankilometer pro Tag
- » Samstag 2.386 Fahrplankilometer pro Tag
- » Sonn- und Feiertage 1.431 Fahrplankilometer pro Tag

Es ist deutlich erkennbar, dass die Wochentage in der Schulzeit energetisch betrachtet am anspruchsvollsten sind und werden daher für die weiteren Betrachtungen herangezogen. In den Ferien werden nur 54 % der Fahrplankilometer an einem Wochentag im Vergleich zur Schulzeit gefahren, an Samstagen 17 % und an Sonn- und Feiertagen sogar nur ca. 10 %. Mit der Auslegung der Infrastruktur und der Fahrzeuge für den energetisch anspruchsvollsten Betriebstag können auch Betriebstage mit weniger Fahrplankilometer vollständig bedient werden.

Das Höhenprofil im Einsatzgebiet der OdVB weist eine maximale Höhendifferenz von 494 m auf.

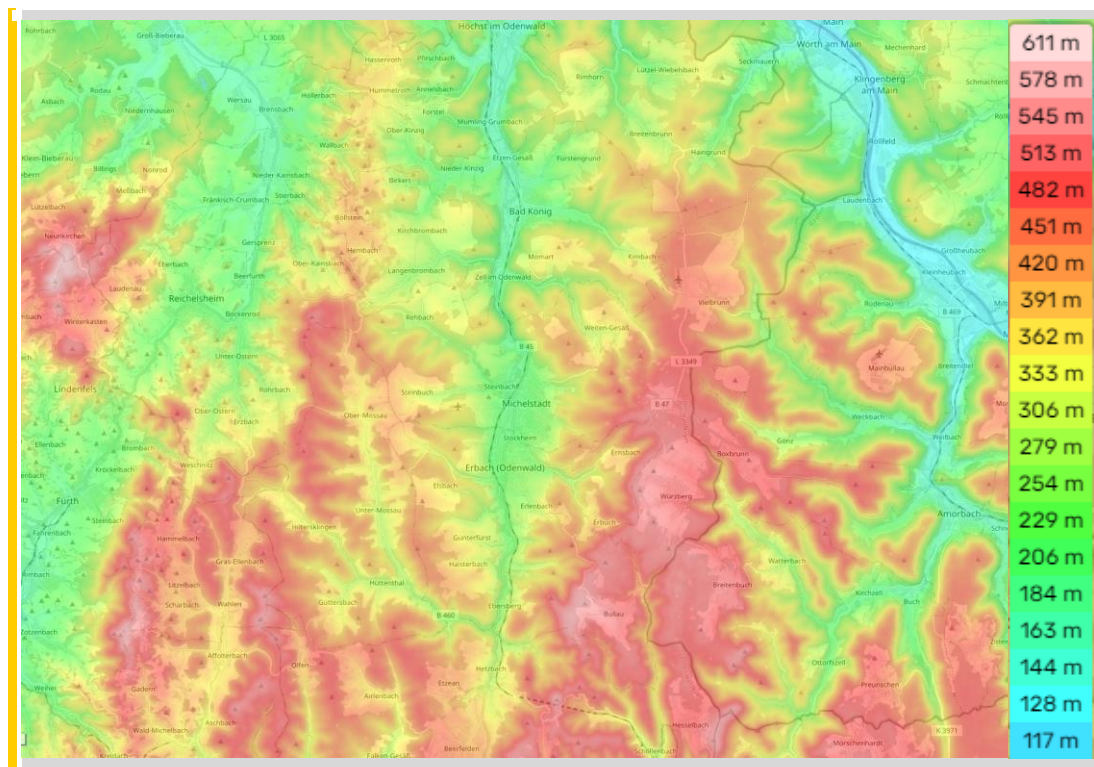


Abbildung 4.4: Topografische Karte des Einsatzgebiets | Quelle: (topographic-map.com)

Im Mittel sind Steigungen von ca. 1-3 % zu erwarten, dennoch können kurzzeitige Steigungen von bis zu 11 % auftreten.

Fuhrpark- und Betriebshofanalysen

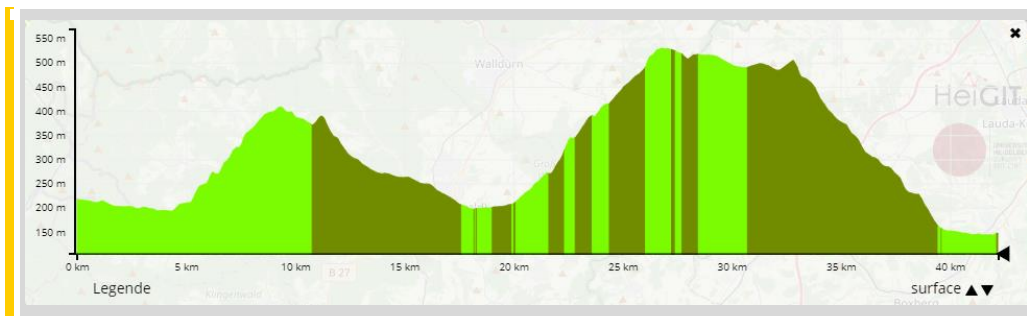


Abbildung 4.5: Höhenprofil einer Fahrt von Reichelsheim nach Weilheim | Quelle: (maps.openrouteservice.org)

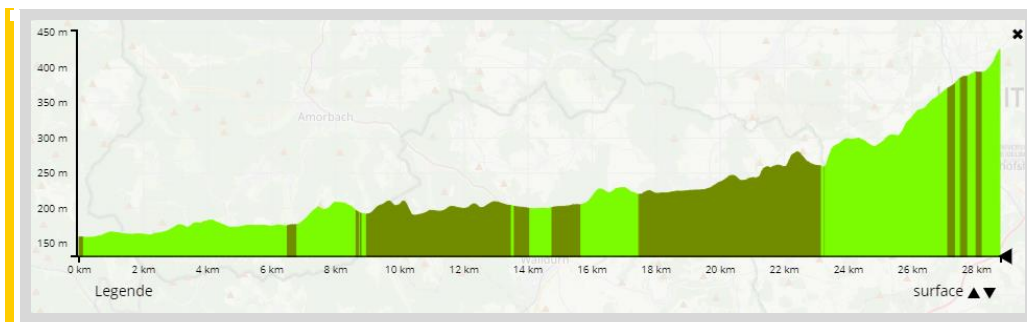


Abbildung 4.6: Höhenprofil einer Fahrt von Höchst im Odenwald nach Beerfelden | Quelle: (maps.openrouteservice.org)

Zur Analyse der Betriebshöfe wurde in der folgenden Darstellung die Anzahl der Fahrzeuge ermittelt, welche sich je nach Tageszeit in den Betriebshöfen befinden und welche im Einsatz sind:

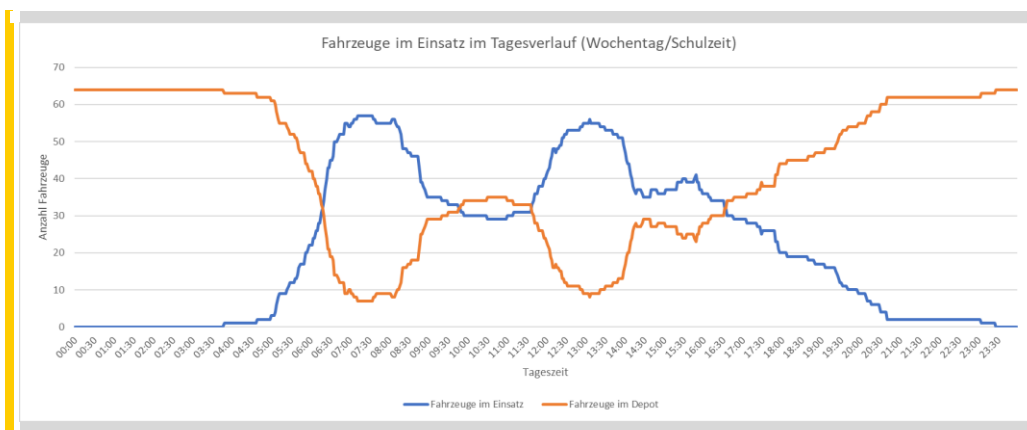


Abbildung 4.7: Fahrzeuge im Einsatz und im Betriebshof | ein Tagesverlauf an einem Wochentag in der Schulzeit

Die Verläufe zeigen den hohen Fahrzeugeinsatz zu Schulbeginn (6:00 bis 8:30 Uhr) und zum Schulschluss (12:30 bis 14:30 Uhr), bzw. das frühere Ausrücken und

spätere Einrücken am Betriebshof. Zwischen 9:00 und 11:30 Uhr ist ein Großteil der Fahrzeuge im jeweiligen Betriebshof. Die Betriebszeit liegt zwischen 04:00 und 20:00 Uhr, somit stehen alle Fahrzeuge mindestens acht Stunden im Betriebshof zzgl. der Standzeit während der Betriebszeit. Eine Nachladung der Fahrzeuge beim Batteriebus tagsüber (in Ergänzung der generellen Übernachtladung) ist daher empfehlenswert und wird für weitere Betrachtungen berücksichtigt.

4.4 Liniennetzanalyse

Für diese repräsentativen Umläufe werden alle erforderlichen Parameter theoretisch anhand der Umlaufplandaten berechnet (SOLL-Analyse). Zudem werden die repräsentativen Umläufe mit dem VCDB-eigenen System BeSystO[®]-ÖPi (ÖPNV Raspberry-Pi) vermessen, um die Plandaten unter verkehrlichen und betrieblichen Realbedingungen für die weitere Untersuchung zu verifizieren (IST-Analyse). Dazu wird ein Aufnahmegerät zur Erhebung der GPS-Daten in den betreffenden Bus eingebaut. Dieses zeichnet GPS-basiert automatisch ein exaktes Abbild der Fahrtumläufe auf. Die Ergebnisse der Streckenanalyse werden sowohl als Datensatz als auch grafisch in einer georeferenzierten Kartendarstellung ausgegeben.

Im Ergebnis der Vermessung der repräsentativen Umläufe (IST-Analyse) liegen Geschwindigkeits-Weg- und Höhenprofile der untersuchten Umläufe vor. Um einen SOLL-/ IST-Vergleich und eine Einstufung der Umläufe in SORT-Zyklen (Standardised On-Road Testcycles) und TOPO-Klassen (Topografische Klassifizierung) vornehmen zu können, werden folgende Parameter ausgewertet:

- » Verspätungsanfälligkeit und Wendezeiten an den Linienendpunkten,
- » Haltezeitanteil der Fahrzeuge im gesamten Umlauf,
- » mittlerer Haltestellenabstand und Anzahl der Halte je Umlauf,
- » mittlere Geschwindigkeit und maximale Steigung/ Gefälle sowie
- » maximaler Höhenunterschied auf der Strecke und im Haltestellenbereich

Fuhrpark- und Betriebshofanalysen

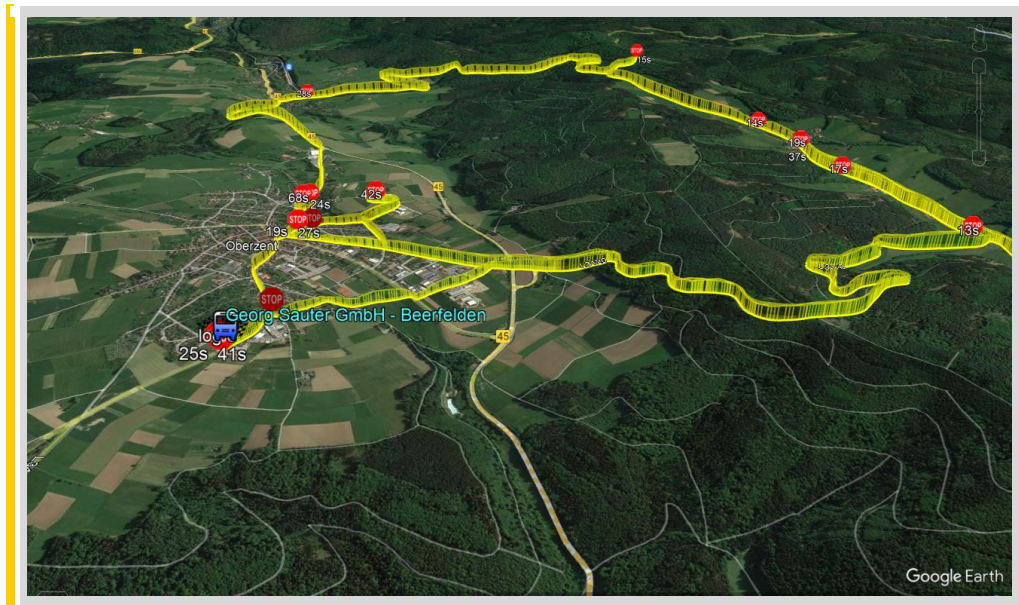


Abbildung 4.10: Vermessung der repräsentativen Umläufe - Beerfelden

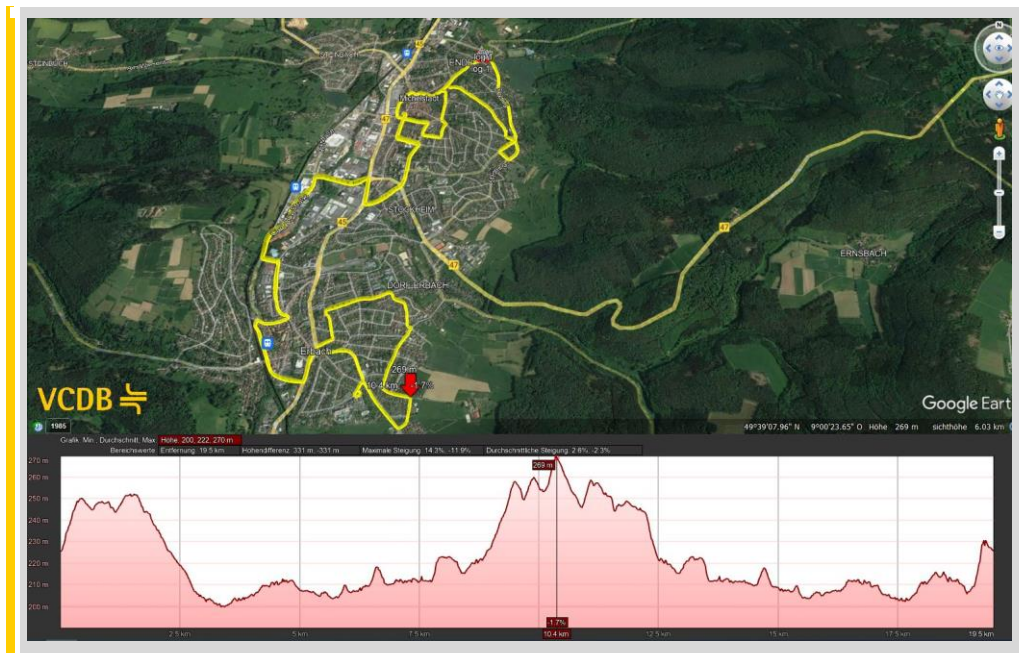


Abbildung 4.11: Vermessung der repräsentativen Umläufe - Michelstadt

Fuhrpark- und Betriebshofanalysen

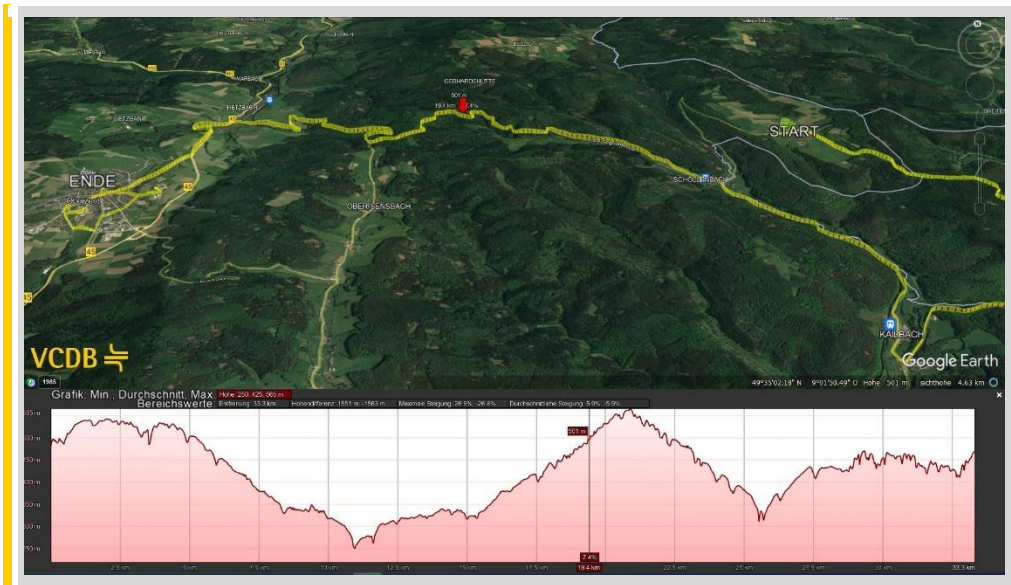


Abbildung 4.12: Vermessung der repräsentativen Umläufe



Abbildung 4.13: Vermessung der repräsentativen Umläufe

Fuhrpark- und Betriebshofanalysen

Zielorte	Wenden(gesamt)	Wenden(5-60min)	Wenden(5-10min)	Wenden(10-20min)	Wenden(20-30min)	Wenden(30-60min)	Mittelwert Wendezeit(5-60min)
Michelstadt	137	36	8	12	8	8	00:21:23
Höchst	92	48	12	31	2	5	00:14:20
Beerfelden	81	18	10	5	4	1	00:12:08
Erbach	65	24	5	13	5	3	00:17:50
Reichelsheim	55	15	5	7	3	3	00:23:22
Bad König	46	15	7	6	2	4	00:10:49
Vielbrunn	27	11	5	5	2	0	00:12:33
Eberbach	26	8	3	7	1	1	00:15:52
Rai-Breitenbach	23	10	7	4	0	0	00:09:12
Mömlingen	17	2	1	1	0	0	00:12:00
Weiten-Gesäß	15	1	0	0	0	1	00:38:00
Hirschhorn	14	3	1	2	0	0	00:10:15
Breitenbrunn	12	3	1	2	0	0	00:11:30
Lützelbach	11	1	0	1	0	0	00:12:00
Neustadt	10	2	2	0	0	0	00:08:30
Schöllensbach	10	4	3	1	0	0	00:08:00

Abbildung 4.14: Übersicht der Vermessung der repräsentativen Umläufe

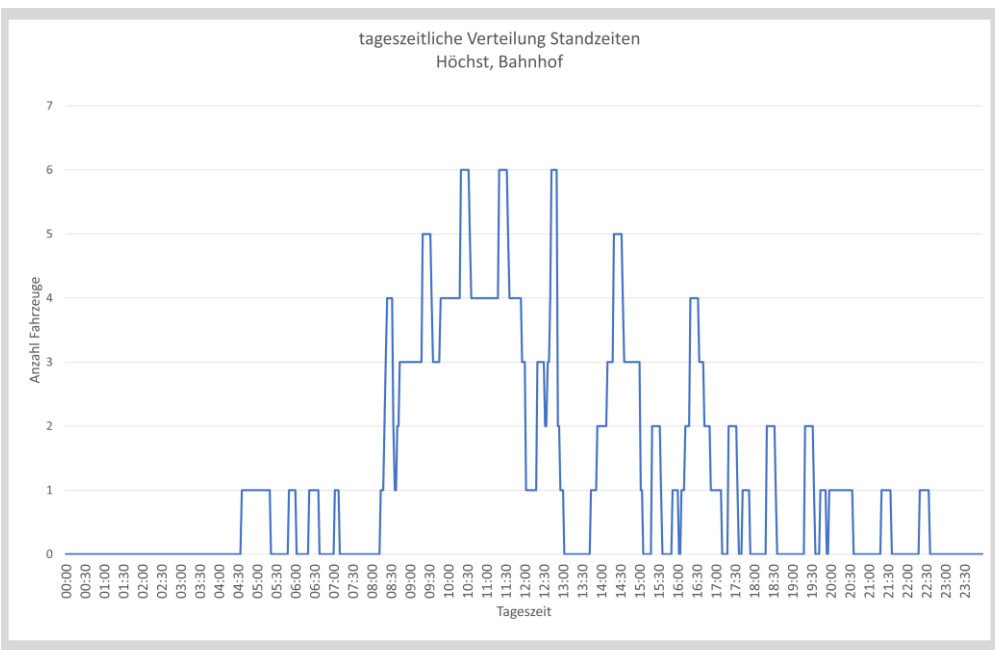


Abbildung 4.15: Tageszeitliche Verteilung Standzeiten - Höchst

Fuhrpark- und Betriebshofanalysen

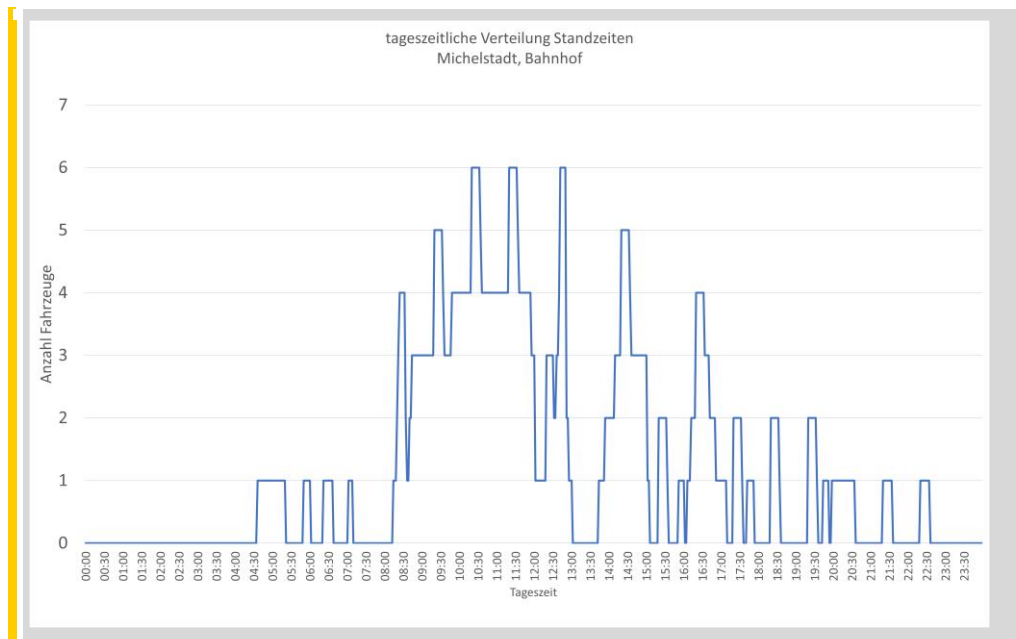


Abbildung 4.16: Tageszeitliche Verteilung Standzeiten - Michelstadt

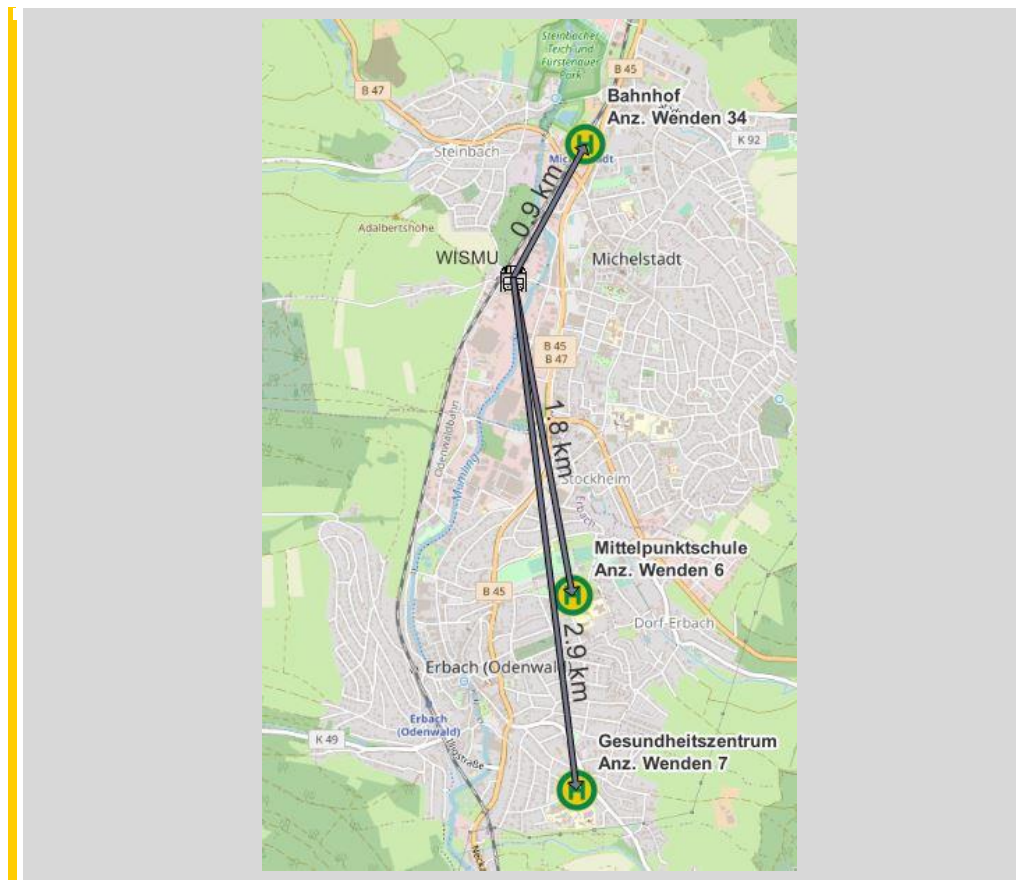


Abbildung 4.17: Haltepunktuntersuchung

Fuhrpark- und Betriebshofanalysen

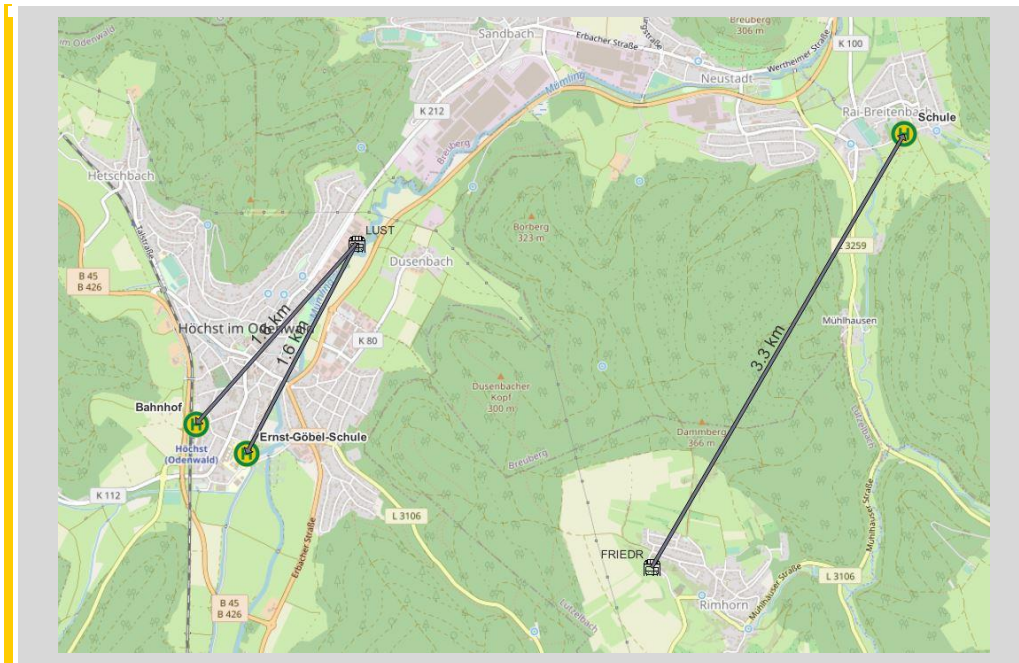


Abbildung 4.18: Haltepunktuntersuchung

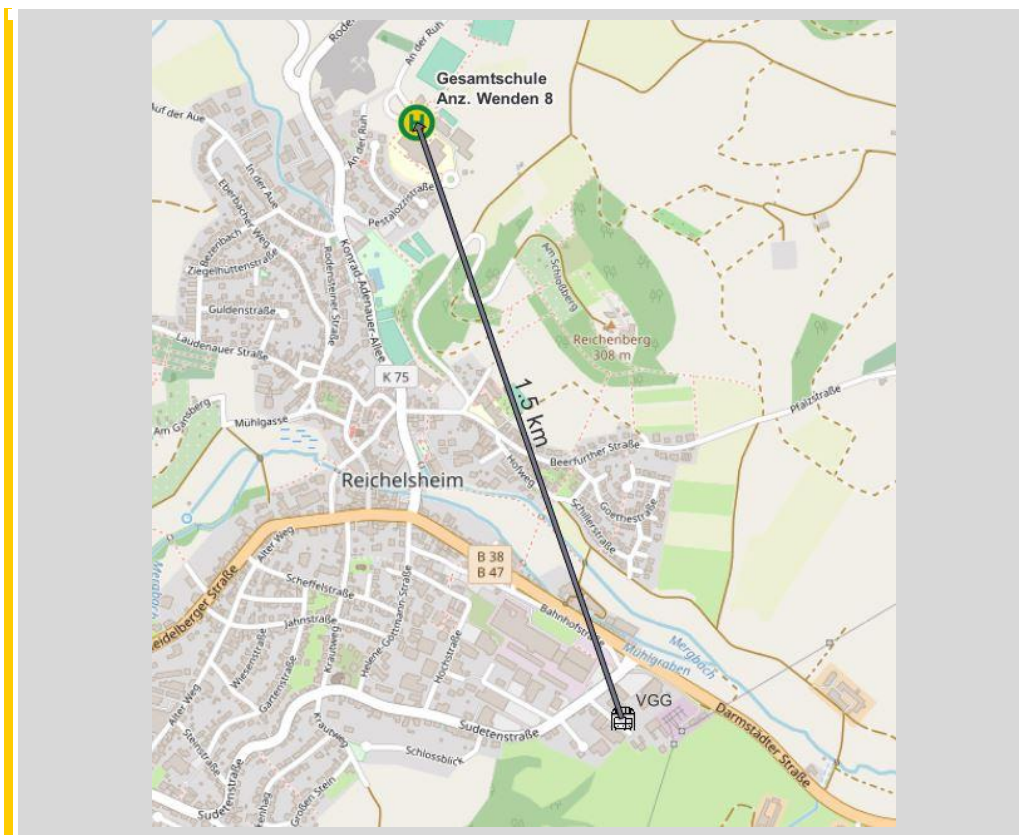


Abbildung 4.19: Haltepunktuntersuchung

Fuhrpark- und Betriebshofanalysen



Abbildung 4.20: Haltepunktuntersuchung

Die Ergebnisse der Vermessung der repräsentativen Umläufe (IST-Analyse) werden im nächsten Kapitel für die Strecken- und Einsatzanalyse genutzt. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die IST-Analyse einen wesentlichen Beitrag zur Strecken- und Einsatzanalyse leistet und somit die Grundlage für fundierte Entscheidungen bei der Auswahl alternativer Antriebe und Technologien bildet. Durch die detaillierte Betrachtung der aktuellen Betriebsbedingungen und Fahrzeugeinsätze können Unternehmen die Anforderungen präzise erfassen und die richtigen Schlussfolgerungen ziehen.

5 Strecken- und Einsatzanalysen

5.1 Festlegung der energetischen Versorgung der alternativen Fahrzeugtechnologien

Dieses Kapitel bewertet Energieversorgungskonzepte alternativer Antriebsformen für den Anwendungsfall bei der OREG und der OdVB. Auf Basis der grundlegenden Energieanforderungen werden die Energieversorgungskonzepte voneinander abgegrenzt. Einerseits das Laden mit Elektroenergie und andererseits die Betankung mit Wasserstoff. Jede alternative Antriebstechnologie hat eigene charakteristische Merkmale, die technisch für den betrieblichen Einsatz analysiert werden müssen.

Auf der Grundlage der Ergebnisse aus dem Grundlagen-Workshop sowie des Technologievergleichs erfolgt die Untersuchung der notwendigen Versorgungsinfrastruktur für die jeweiligen alternativen Antriebe.

Zur Identifikation der für die OREG und die OdVB geeigneten Technologien findet methodisch ein „Technologietrichter“ Anwendung. Auf Basis verschiedener technischer, betrieblicher, wirtschaftlicher und planerischer Kriterien werden die Fahrzeugkonzepte Batteriebus (BEB) als Depot (DL)- und Gelegenheitslader (GL) sowie reiner Brennstoffzellenbus (BZB) und Batteriebus mit Brennstoffzelle als Range Extender (BEB-REX) auf ihre Eignung für das Liniennetz der OdVB analysiert und bewertet. Als Ergebnis reduzieren sich die infrage kommenden Technologien, bis letztendlich zwei Antriebskonzepte mittels einer energetischen Betrachtung miteinander verglichen werden können (siehe grüne Markierung in der Abbildung).

Strecken- und Einsatzanalysen

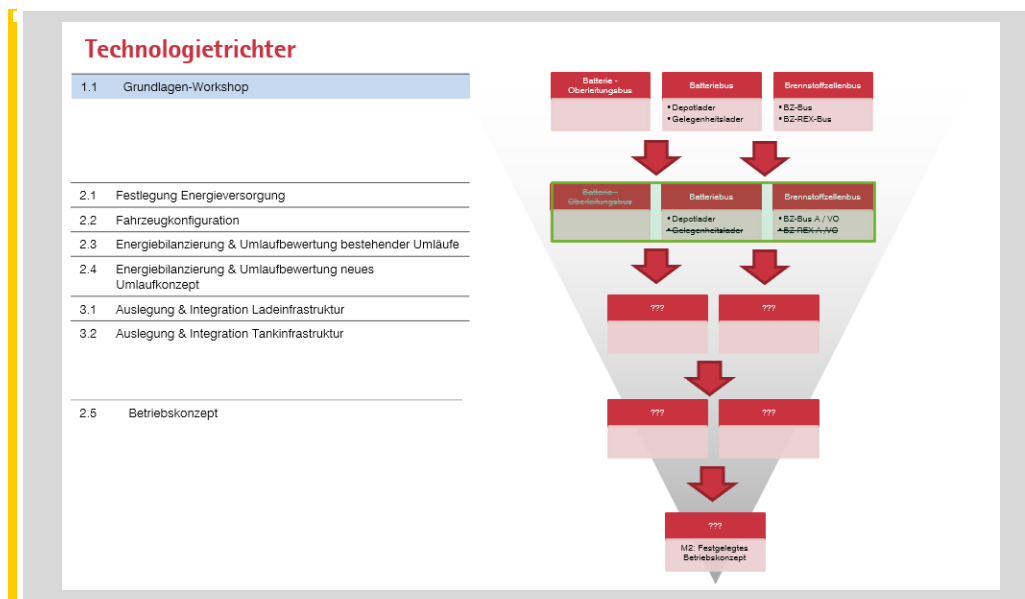


Abbildung 5.1: Technologietrichter

Im Zuge des durchgeführten Grundlagenworkshops wurde in Abstimmung mit der OREG und der OdVB bereits der batterieelektrische Oberleitungsbus (BOB) ausgeschlossen. Maßgebendes Ausschlusskriterium ist die für den BOB-Betrieb notwendige Fahrleitungsinfrastruktur, welche im Bedienegebiet Odenwald nicht vorhanden ist und mit erheblichen Planungs- und Investitionsmaßnahmen verbunden wäre. Dieses System bietet sich lediglich für stark frequentierte Strecken mit hoher Personenbeförderungszahl an. Der Oberleitungsbusbetrieb kann durch ein 10- bis 15-Minutentakt und den Einsatz von größeren Gelenkfahrzeugen wirtschaftlich abgebildet werden. Aufgrund des Fahrplanangebotes im Landkreis sind die investitions- und wartungsintensive Infrastruktur und relativ hochpreisigen Fahrzeuge keine abbildbare Alternative zur Durchführung des teilweise durchgehend in größeren Taktabständen oder gar nicht im Takt angebotenen Regional- und Stadtverkehrs.

Um das passende Nachladekonzept für den BEB zu ermitteln, wurden im Rahmen der durchgeführten Liniennetzanalyse die Endpunkte hinsichtlich ihrer Eignung als mögliche Ladestandorte für den Gelegenheitsladereinsatz analysiert. Es wurden die Möglichkeiten zur Integration von Ladeinfrastruktur (LIS) auf der Strecke untersucht sowie der Aufwand zur Ertüchtigung der betrachteten Endpunkte zu Ladestandorte abgeschätzt und bewertet. Der Ladeinfrastrukturbedarf auf der Strecke und die damit einhergehende eingeschränkte Flexibilität im Linieneinsatz steht dem GL entgegen. Der Einsatz von Gelegenheitsladern, mit Nachladung an geeigneten Wendepunkten auf der Strecke, setzt möglichst linienreine Umläufe voraus. Bei der OdVB werden vorrangig linienübergreifende Umläufe (stark gemischte Linienführung) gebildet, was eine ungünstige Voraussetzung für die Gelegenheitsladung darstellt. Vor dem Hintergrund der in den kommenden Jahren

Strecken- und Einsatzanalysen

zu erwartenden Batterieentwicklung wird für den Batteriebusseinsatz ein Nachladen auf der Strecke immer weniger notwendig sein. Der Use Case für Batteriebusse wird sich immer mehr an jenen von Dieselnissen angleichen. Allerdings ist hierbei der energiedichtenbedingte Trade-Off aus nutzbarer Energiemenge (=Reichweite) vs. Gewicht (=Beförderungskapazität) und Kosten (=Batteriepreis) nicht im gleichen Maße wie beim Dieselfahrzeug aufzulösen. Herstellerseitig ist somit beim BEB ein klarer Trend hin zum DL mit entsprechend großen Batterieenergieinhalten erkennbar. Batteriebusse als DL können im Depot per Plug-In-Ladestation oder Dockingstation geladen werden. Busse mit fahrzeugseitigem Pantographen verfügen obligatorisch zusätzlich über eine CCS-Schnittstelle. Diese dient als Rückfallebene bei einem Defekt des Pantographen oder innerhalb der Werkstatt, in der typischerweise mobile Ladegeräte mit Stecker eingesetzt werden. Die Positionierung erfolgt standardmäßig beifahrerseitig auf Höhe der Achse eins (Vorderachse). Es sind dementsprechend beide Kontaktsysteme im Fahrzeug integriert. Dies bringt einen höheren Aufwand bei der Verkabelung, der softwaretechnischen Steuerung und Kommunikation sowie einen gesteigerten Platzbedarf (Packaging) mit sich. Letzteres führt bei einigen Herstellern zu einer geringeren Anzahl an Batteriemodulen auf dem Fahrzeug, was wiederum mit geringeren Energieinhalten und damit Reichweite einhergeht.

Busse nur mit CCS-Schnittstelle lassen eine alternative Platzierung der Schnittstelle zu. Diese kann auf der Fahrerseite, in der Frontmaske, im Heckbereich des Fahrzeugs oder mehrere Varianten parallel sein.

Auf infrastruktureller Seite führt die Integration von Pantographen-Systemen – je nach den konkreten Rahmenbedingungen vor Ort – zu einem größeren baulichen Aufwand. Dies hängt maßgeblich mit der weniger flexiblen Positionierung des Kontaktsystems auf dem Fahrzeug zusammen. Hinzu kommen bei Bestandshallen vorhandene Dachkonstruktionen, die genug Bauhöhe aufweisen müssen und auch entsprechend statisch geeignet sein müssen (alternativ: separate Traversen einzubringen). Weiterhin hat die Ladeinfrastruktur mit Steckersystem leichte Vorteile bei den Investitionskosten. In der Folge wird im vorliegenden Fall die einheitliche Ausrüstung der Fahrzeuge mit einem Steckersystem empfohlen.

Brennstoffzellenbusse benötigen für den Betrieb Wasserstoff, welcher auf dem Betriebshof über eine eigene H₂-Tankstelle bereitgestellt werden kann. Die Versorgung der H₂-Tankstelle erfolgt entweder über eine externe Belieferung per H₂-LKW-Trailer oder durch eigens produzierten Wasserstoff mit dem Aufbau einer Elektrolyseanlage. Für die Elektrolyse ist ein entsprechender Energieanschluss und eine Versorgung mit Wasser erforderlich. Zusätzlich sind entsprechende Flächen für die Errichtung der Elektrolyseanlage erforderlich. Eine weitere Möglichkeit, in erster Linie für kleinere Busflotten anwendbar, stellt die Nutzung einer externen H₂-Tankstelle. Neben der Prüfung der Verfügbarkeit von H₂-Tankstellen im Einzugsgebiet ist deren Prüfung auf technische Eignung zur

Strecken- und Einsatzanalysen

Betankung von Bussen erforderlich. Von besonderer Relevanz ist hierbei die H₂-Abnahmemenge, das erforderliche Druckniveau, die Kommunikation und die Befahrbarkeit.

Brennstoffzellenbusse mit Range Extender sind ein Konzept, welches die Technologie des Brennstoffzellenbusses mit der des Batteriebusse kombiniert. Entsprechend sind auch Energieversorgungssysteme beider Technologien für den Betrieb erforderlich. Neben der Betankung des Busses über eine Tankinfrastruktur mit Wasserstoff muss die große Traktionsbatterie des BEB-REX regelmäßig extern durch eine entsprechende Ladeinfrastruktur (z. B. durch Plug-In-System) geladen werden.

Dadurch können aktuell höhere Reichweiten als bei einem Batteriebus, aber nicht die eines reinen Brennstoffzellenbusses, erreicht werden. Aufgrund der geringen Nachfrage von Brennstoffzellenbussen mit Range Extender gibt es jedoch keine hohe Verfügbarkeit am Markt und entsprechende Langzeiterfahrungen des Systems fehlen. Brennstoffzellen-Range-Extender sind aktuell eine Nischenlösung, deren Bedeutung im Zuge technologischer Entwicklungen und für die Rahmenbedingungen der OREG und der OdVB nicht relevant sind. Die Ergebnisse lassen zudem den Schluss zu, dass bereits ein Brennstoffzellenbus ohne Range Extender die Fahrzeugumläufe der aktuellen Dieselbus-Referenzplanung uneingeschränkt abbilden kann. Die Investition in technologisch aufwendigere und kostenintensivere Brennstoffzellenbusse mit Range Extender ist insofern nicht empfehlenswert.

Investitionskostenvergleich unterschiedlicher Systeme

In der folgenden Tabelle erfolgt ein Vergleich der Investitionskosten der alternativen Antriebstechnologien anhand einer Fahrzeugflotte von 10 Solobussen und der für den Betrieb erforderlichen Versorgungsinfrastruktur.

Strecken- und Einsatzanalysen

	Depotlader	Gelegenheitslader	Brennstoffzellenbus	Brennstoffzellenbus mit Range Extender
Anzahl Fahrzeuge	10	10	10	10
Kosten je Fahrzeug	600.000 €	550.000 €	700.000 €	700.000 €
Gesamtkosten Fahrzeuge	6.000.000 €	5.500.000 €	7.000.000 €	7.000.000 €
Kosten Ladeinfrastruktur	900.000 €	1.500.000 €	-	700.000 €
Kosten Tankstelle	-	-	2.500.000 €	2.500.000 €
Gesamtkosten Infrastruktur	900.000 €	1.500.000	2.500.000 €	3.200.000 €
Gesamtsystemkosten	6.900.000 €	7.000.000 €	9.500.000 €	10.200.000 €

Tabelle 5.1: Vergleich der Investitionskosten unterschiedlicher Systeme

Fazit Technologietrichter

Die Untersuchung der energetischen Versorgung betrachtet als Basis die Versorgung im Busbetriebshof. In den folgenden Kapiteln werden die Betriebskonzepte Batteriebus als Depotlader und reiner Brennstoffzellenbus betrachtet.

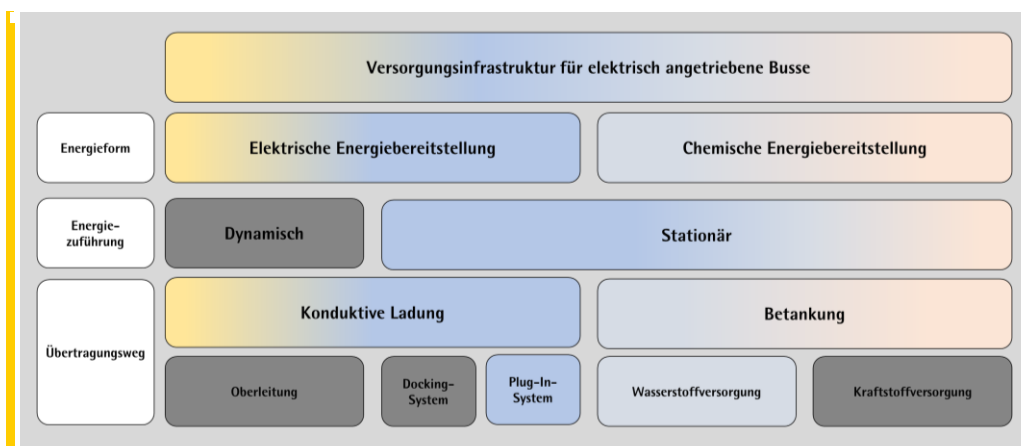


Abbildung 5.2: Festgelegte Betriebskonzepte (Nicht gewählte Konzepte sind ausgegraut)

Strecken- und Einsatzanalysen

5.1.1 Fahrzeugkonfiguration

Die Fahrzeugkonfiguration stellt eine wichtige Eingangsgröße für die Energiebilanzierung und der damit verbundenen Umlaufbewertung dar. Da sich die Fahrzeugkonfiguration unmittelbar auf den fahrzeugkonzeptspezifischen Verbrauch auswirkt, ist ein hoher Detaillierungsgrad notwendig. Dabei sind fahrzeugseitig insbesondere folgende Systemkomponenten zu berücksichtigen:

- » Antriebs- und Energiespeichersystem sowie
- » Heizung und Klimatisierung (HVAC).

Im Bedienegebiet der OdVB spielt zudem die Topografie eine signifikante Rolle.

Ziel ist es, für die eingesetzten Fahrzeuggrößen je eine Fahrzeugkonfiguration entsprechend der vorab definierten Referenzszenarien sowie anhand grundlegender Vorgaben und Zielvorstellungen festzulegen und den fahrzeugkonzeptspezifischen Verbrauch zu berechnen.

Mit den gegenübergestellten und ausgeschlossenen Fahrzeugkonzepten sind im Folgenden der batterieelektrische Bus als Depotlader (BEB DL) sowie der Brennstoffzellenbus (BZB) zur Energiebilanzierung heranzuziehen und zu konfigurieren.

Die Fahrzeugkonfiguration wird als marktverfügbarer Stand der Technik abgebildet. Hierzu liegen der VCDB aus laufenden, detaillierten Marktbeobachtungen und -begleitungen sowie gegenwärtig durchgeführten Ausschreibungen aktuelle und profunde Fahrzeugdaten unter anderem zu Batterie-/ Brennstoffzellengrößen, sich ergebenden Fahrgastkapazitäten und Fahrzeugverbräuchen vor. Aus diesen lassen sich aus dem stetig wachsenden Angebot an Fahrzeugen mit alternativen Antrieben ein repräsentativ konfiguriertes Fahrzeug für den BEB DL sowie den BZB in den Gefäßgrößen 7-11 m, 12 m und 15 m ableiten. Folgender methodischer Ansatz für die Machbarkeitsuntersuchung wird angewendet:

1. Festlegung geeigneter Energiespeicher aus Marktbeobachtungen und -begleitungen
2. Ermittlung eines Grundverbrauchs zum Fahren des Fahrzeuges nach SORT¹¹-/ Regio-Zyklen¹²
3. Berechnung eines Verbrauchszuschlags für die Topografie

¹¹ SORT = Standardised On Road Testcycles

¹² Eigenentwicklung der VCDB in Kooperation mit dem RMV | Erläuterung im Artikel "Weiterentwicklung des SORT-Modells zur Verbrauchsermittlung" im DER NAHVERKEHR | ELEKTROBUS-SPEZIAL 02/2022

Strecken- und Einsatzanalysen

4. Berechnung eines Verbrauchszuschlags für Nebenverbraucher ohne HVAC¹³-System
(bspw. Fahrgastinformation, Bordrechner, Fahrscheinautomaten, Videoüberwachung, WiFi, ...)
5. Berechnung eines Verbrauchszuschlags für das HVAC-System anhand von Datenblättern unterschiedlicher Systeme

Marktüberblick batterieelektrische Busse als Depotlader

Folgende, marktverfügbare Fahrzeugmodelle können zur Festlegung geeigneter Energiespeicher aus Marktbeobachtungen und -begleitungen herangezogen werden. Die Liste stellt einen Auszug von typischen Fahrzeugmodellen im europäischen Markt dar.

Fahrzeuggrundkonzept	Gefäßgröße	Hersteller	Modell	Batterie kWh Brutto (Max)	Batterie kWh Netto (Max)
BEB DL	8 m - 11 m	Altas	<i>EV Ecoline*</i>	115	92
		BYD	<i>K7M (8,7 m)*</i>	180	144
		CaetanoBus	<i>e.City Gold*</i>	100 - 385	308
		Karsan	<i>e-ATAK</i>	220	176
		Solaris	<i>Urbino 9 LE electric*</i>	352	282
	12 m	BYD	<i>K9UD</i>	324 - 422	338
		Ebusco	<i>2.2 12m</i>	350 - 500	400
		Ebusco	<i>3.0 12m</i>	250 - 350	280
		EvoBus	<i>eCitaro</i>	490 - 588	470
		MAN	<i>Lion's City 12E</i>	480	384
		Solaris	<i>nE12</i>	352 - 440	352
		SOR	<i>NS 12 electric</i>	244 - 388	310
		Van Hool	<i>A12 BEV*</i>	588	470
		VDL	<i>nGC LF-122</i>	306 - 429	343
	15 m	Solaris	<i>Urbino 15 LE</i>	528	422
		VDL	<i>NGC LE-149*</i>	368 - 674	539

Tabelle 5.2: Marktüberblick batterieelektrische Busse als Depotlader (*angekündigte Modelle)

¹³ HVAC = Heating, Ventilation und Air Conditioning (Heizung, Lüftung und Klimatisierung)

Strecken- und Einsatzanalysen

Marktüberblick Brennstoffzellenbusse

Fahrzeuggrundkonzept	Gefäßgröße	Hersteller	Modell	Batterie kWh brutto	H ₂ kg brutto
BZB	8 – 11 m	Caetano	<i>H2.City Gold 10,7 m*</i>	29 kWh	37,5 kg
	12 m	Caetano	<i>H2.City Gold</i>	29 kWh	37,5 kg
		Solaris	<i>Urbino 12 hydrogen</i>	29 kWh	37 kg
		Van Hool	<i>A12 H₂</i>	24 kWh	38,5 kg
	15 m	Aktuell kein 15 m-BZ-Fahrzeug serienreif verfügbar			

Tabelle 5.3: Marktüberblick Brennstoffzellenbusse (*angekündigte Modelle)

Zu beachten ist, dass die verfügbare Reichweite der Fahrzeuge über die Einsatzzeit je nach Betriebsstrategie des Herstellers bis zum Lebensdauerende der Batterie bei 80 % SoH um ca. ein Fünftel sinken kann. Eine konkret bezifferte Einschätzung zur Batterielebensdauer kann nicht gegeben werden, da die Degradation der Batterie maßgeblich vom Beanspruchungs- und Lastkollektiv beeinflusst wird. Es wird daher empfohlen, im Zuge der Fahrzeugbeschaffung mit dem Fahrzeughersteller eine Reichweitengarantie über einen definierten Zeitraum zu vereinbaren. Die Erfahrungen zeigen, dass die Hersteller Garantien auf die Batterien im Bereich von 6 Jahre/ 600.000 km bis 8 Jahre/ 800.000 km und vereinzelt auch bis zu 10 Jahre geben.

Die Nutzungsdauer von Brennstoffzellensystemen liegt bei bis zu 30.000 Betriebsstunden bzw. 6 bis 8 Jahren. Die Effizienz verschlechtert sich zunehmend, weshalb während der Nutzungsdauer der Fahrzeuge ein Tausch des Stapels (engl. Stack), der aus einer Schichtstruktur bestehenden Brennstoffzellenmodule, erforderlich wird.

Aus den zum heutigen Zeitpunkt marktverfügbaren Fahrzeugmodellen wird die folgend beschriebene Fahrzeugkonfiguration für die Energiebilanzierung und die damit verbundene Umlaufbewertung zur Anwendung gebracht. Unterteilt wird in das Antriebssystem und die Gefäßgröße.

Für die Berechnung der Netto-Batteriekapazität wurde stets der größte verfügbare Brutto-Energieinhalt der Batterie angenommen. Die Dimensionierung der Batteriespeicher hängt vom Anwendungsfall ab. Eine größere Energiemenge im Batteriespeicher führt unter anderem zu höheren Investitionskosten. Zudem führt das zusätzliche Gewicht zu höheren Traktionsverbräuchen und ggf. zu verminderter Fahrgastkapazität.



Festgelegter Energieinhalt der Batteriespeicher und H₂-Druckspeicher

Fahrzeugkonfiguration		Batteriespeicher Energieinhalt in kWh		H ₂ -Druckspeicher Tankinhalt in kg	
Fahrzeuggrundkonzept	Gefäßgröße	brutto	netto	brutto	netto
Batterieelektrischer Bus (BEB)	7 – 11 m	150 kWh	120 kWh	-	-
	12 m	420 kWh	336 kWh	-	-
	15 m	550 kWh	440 kWh	-	-
Brennstoffzellenbus (BZB)	7 – 11 m	25 kWh	20 kWh	25,0 kg	23,8 kg
	12 m	25 kWh	20 kWh	37,5 kg	35,6 kg
	15 m	25 kWh	20 kWh	37,5 kg	35,6 kg

Tabelle 5.4: Festgelegter Energieinhalt der Batteriespeicher und H₂-Druckspeicher

In der dargestellten Tabelle sind die jeweiligen Energiespeicherinhalte für den BEB und den BZB aufgeführt. Diese beruhen auf der vereinfachenden Annahme, dass 80 % des Batteriespeichers sowie 95 % des H₂-Druckspeichers im Betrieb für Traktion und HVAC-Bedarf genutzt werden können.

Fahrzeugkonzeptspezifische Verbrauchsermittlung:

Der Energiebedarf wird im Folgenden spezifisch angegeben: streckenspezifisch mit der Einheit kWh/km sowie zeitspezifisch in kWh/h. Die konkreten Werte wurden mit dem VCDB-Tool BeSystO-SOC bestimmt. Grundlegend wird der Traktionsenergiebedarf sowie der Energiebedarf für die Nebenverbraucher inklusive Heizung, Lüftung und Klimatisierung des Elektrobusses im Bediengebiet der OdVB betrachtet.

Zunächst wurden aus laufenden, detaillierten Marktbeobachtungen und gegenwärtig oder kürzlich durchgeführten Ausschreibungen aktuelle SORT-Fahrzeugverbräuche verschiedener Hersteller ermittelt. Anhand eines physikalischen Fahrzeugmodells wurde im Anschluss ein Grundverbrauch für alle Referenzszenarien zum Fahren des Fahrzeuges inkl. aller Assistenzsysteme berechnet. Diese Werte werden mit Zuschlägen für die Topografie, für Nebenverbraucher und das HVAC-System vervollständigt.

Als Traktionsverbräuche ohne Aufschläge wurden für den Solobus (BEB) ein Wert von 0,8 kWh/km und für den Solo-Brennstoffzellenbus ein Wert von 6 kg/100km angenommen.

Wie im Kapitel 4.3, weist das Bediengebiet starke Unterschiede in der Topografie auf. Die durchschnittlichen Steigungen der gefahrenen Strecken liegt in einem

Strecken- und Einsatzanalysen

Intervall von ca. 1-3 Prozent, zum Teil können kurze Steigungen von über 10 Prozent auftreten. Die maximale Höhendifferenz im Einsatzgebiet beträgt knapp 500 m. Aufgrund der Varianz in den Höhenprofilen wurde ein individueller Verbrauchszuschlag für die anspruchsvollen und die flachen Profile der Regionalfahrten sowie für den Stadtverkehr ermittelt. Hierbei wurden alle im Bedienegebiet eingesetzten Gefäßgrößen und die Antriebstechnologie (BEB bzw. BZB) berücksichtigt. Bei den Brennstoffzellenbussen fällt der Topographieaufschlag größer aus, da der Antriebsstrang einen geringeren Wirkungsgrad aufweist als der des batterieelektrischen Busses. Es ergibt sich, dass die Topografie im Bedienegebiet der OdVB einen signifikanten Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf der Fahrzeuge hat. Beim batterieelektrischen Solobus kann der Anteil beispielsweise bis zu 20 Prozent betragen. Die berechneten Zuschläge für die Topografie liegen je nach Referenzszenario und Gefäßgröße zwischen 0,04 kWh/km und 0,29 kWh/km beim BEB bzw. zwischen 0,36 kg/100km und 2,58 kg/100km beim BZB.

Nebenverbraucher im Fahrzeug, wie beispielsweise die Fahrgastinformation, Bordrechner, Fahrscheinautomaten und Videoüberwachung, haben bei einem Solobus eine kumulierte Grundlast in der Größenordnung von 3 bis 6 kW.¹⁴ Für die Machbarkeitsstudie wird eine Grundlast der Nebenverbraucher von 4 kW festgelegt.

Zur Ermittlung des Verbrauchszuschlags für das HVAC-System wird von einem an die klimatischen Verhältnisse angepassten Wert ausgegangen, um einen möglichst realistischen Gesamtenergiebedarf ermitteln zu können. Hierfür wird ein typischer Tagestemperaturverlauf im Winter herangezogen. Großen Einfluss auf den Energiebedarf des Elektrobussystems hat die Außentemperatur. Dabei ist bei Batteriebussen der Energiebedarf zum Heizen des Fahrzeugs bei sehr kalten Temperaturen in der Regel höher als zum Kühlen bei hohen Temperaturen. Bei Wasserstoffbussen kann die Abwärme der Brennstoffzelle teilweise zum Heizen genutzt werden. Für die Ermittlung des HVAC-Energiebedarfs wird eine an die VDV-Schrift 236 (Eco) angelehnte Behaglichkeitskennlinie ohne sowie mit Nutzung eines fossilen Zusatzheizgerätes sowie die Nutzung einer Restwärmefunktion während der Standzeiten herangezogen.

Die Annahme für den HVAC-Verbrauch beruht auf Herstellerangaben von Wärmepumpensystemen sowie auf Angaben von Busherstellern zur Fahrer- und Fahrgastklimatisierung ohne bzw. mit Nutzung eines fossiles Zusatzheizgerätes. Die Basis für die festgelegte Temperatur von -2 °C ist das 95. Perzentil der im Bedienegebiet gemessenen Temperaturen der letzten 15 Jahre.

¹⁴ Quelle: Techno-ökonomische Auslegungsmethodik für die Elektrifizierung urbaner Busnetze, Dissertation, K. Berthold, KIT 2018, S. 54

Strecken- und Einsatzanalysen

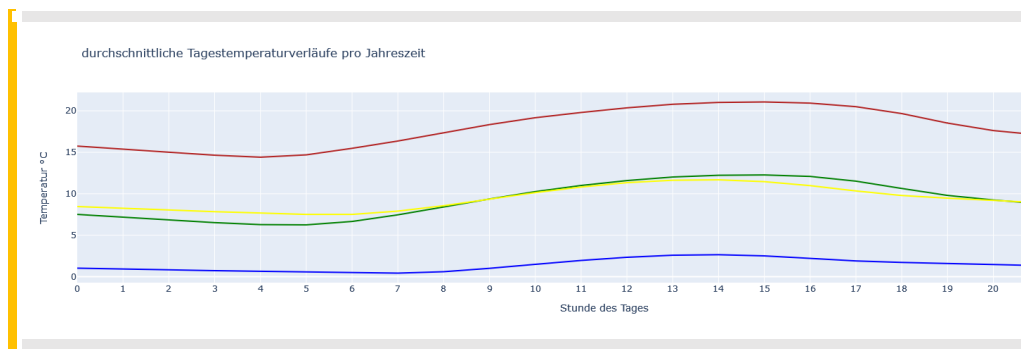


Abbildung 5.3: Wetterdaten Station Michelstadt-Vielbrunn¹⁵

Die Grafik stellt typische Tages Temperaturverläufe für alle vier Jahreszeiten dar. Die Wetterdaten stammen von der Wetterstation Michelstadt-Vielbrunn des Deutschen Wetterdienstes.

Unter Berücksichtigung der Traktionsverbräuche sowie eines Zuschlags für die Topografie, das HVAC-System und sonstige Nebenverbraucher wurden folgende Fahrzeugverbräuche für die verschiedenen Referenzszenarien ermittelt:

Berechnete und festgelegte fahrzeugspezifische Verbräuche mit Zusatzheizgerät:

Fahrzeugkonfiguration		Referenzszenario					zeitbasiert
Ø Steigung		2,7 %	2,7 %	1,0 %	1,0 %	1,6 %	
Ø Geschwindigkeit		42,3 km/h	33,9 km/h	42,3 km/h	33,9 km/h	24,2 km/h	
Fahrzeuggrundkonzept	Gefäßgröße	Ref.-Sz. 1 (Regio)	Ref.-Sz. 2 (Regio)	Ref.-Sz. 3 (Regio)	Ref.-Sz. 4 (Regio)	Ref.-Sz. 5 (Stadt)	Bsp. Wendezeit
Batterieelektrischer Bus (BEB)	7 - 11 m	0,86 kWh/km	0,85 kWh/km	0,78 kWh/km	0,79 kWh/km	0,90 kWh/km	1,95 kWh/h
	12 m	1,14 kWh/km	1,16 kWh/km	1,00 kWh/km	1,03 kWh/km	1,22 kWh/km	3,10 kWh/h
	15 m	1,39 kWh/km	1,42 kWh/km	1,22 kWh/km	1,26 kWh/km	1,53 kWh/km	4,45 kWh/h
Brennstoffzellenbus (BZB)	7 - 11 m	5,91 kg/100km	5,95 kg/100km	5,32 kg/100km	5,37 kg/100km	6,13 kg/100km	0,11 kg/h
	12 m	8,50 kg/100km	8,56 kg/100km	7,30 kg/100km	7,38 kg/100km	8,75 kg/100km	0,16 kg/h
	15 m	10,63 kg/100km	10,74 kg/100km	9,11 kg/100km	9,26 kg/100km	11,22 kg/100km	0,23 kg/h

Tabelle 5.5: Berechnete und festgelegte fahrzeugspezifische Verbräuche mit Zusatzheizgerät

¹⁵ Quelle: Wetterdaten der letzten 15 Jahre - Deutscher Wetterdienst (DWD) | Station Michelstadt-Vielbrunn

Strecken- und Einsatzanalysen

Erfolgt die Temperierung des Fahrgastinnenraums ohne Zusatzheizgerät, erhöht sich der Verbrauch an elektrischer Energie erheblich.

5.1.2 Energiebilanzierung und Umlaufbewertung bestehender Umläufe

Für die zu betrachtenden Umläufe wird der spezifische Energiebedarf (bezogen auf Strecke und Zeit) ermittelt. Dieser Schritt erfolgt durch eine Analyse der theoretischen SOLL-Daten sowie der erhobenen IST-Daten des jeweiligen repräsentativen Umlaufes.

Jeder Umlauf ist hinsichtlich des spezifischen Energiebedarfs und des verfügbaren Energieinhalts des Energiespeichers zu bewerten. Hierfür sind notwendige Randbedingungen zu definieren und die Zuordnung zu den Referenzverbräuchen vorzunehmen. Ziel ist es, aus den Ergebnissen der Energiebilanzierung der Umläufe erkennbar zu machen, welche der aktuell gefahrenen Umläufe mit dem gewählten Antriebskonzept (Batteriebus als Depotlader, Brennstoffzellenbus) und der definierten Fahrzeugkonfiguration (Antriebssystem, Heizungs-/ Klimatisierungskonzept, Energiespeicherkapazität) abbildbar wären. Im betrachteten Fall sind Umläufe gleichzusetzen mit den gefahrenen Wagenumläufen. Als Ergebnis liegt eine Einschätzung für den Einsatz von Batteriebussen als Depotlader und Brennstoffzellenbussen im Kontext der Dieselbus-Umlaufplanung vor.

Für die Energiebilanzierung wird für jeden Umlauf der spezifische Energiebedarf ermittelt. Die Basis für die Betrachtung der Umläufe und der dazugehörigen Fahrten bilden die zur Verfügung gestellten VDV-452-Daten sowie die im Vorfeld getroffenen Absprachen mit der OREG und der OdVB. Es werden alle Umläufe sowie deren Fahrten an einem Wochentag in der Schulzeit betrachtet. Da zusätzlich ein typischer Tag im Winter mit niedrigen Temperaturen und einem hohen Heizbedarf angenommen wird, spiegelt dies einen energetisch besonders anspruchsvollen Fall wider. In der Energiebilanzierung wird sowohl der Busbetrieb mit als auch ohne Nutzung eines Zusatzheizgeräts mit fossilen bzw. synthetischen Kraftstoffen betrachtet.

Zunächst wird jede Fahrt einem Referenzszenario und dem dazugehörigen berechneten Energieverbrauch zugeordnet. Mit dem Energieverbrauch und der Gesamtstrecke der jeweiligen Fahrt kann für diese der Gesamtenergiebedarf ermittelt werden. Die Fahrten werden anschließend zu Umläufen zusammengefasst, sodass sich der Gesamtenergiebedarf für jeden Wagenumlauf ergibt. Übersteigt der benötigte Energiebedarf eines Umlaufs den verfügbaren Energieinhalt im dazugehörigen Referenzfahrzeug, ist eine Umstellung auf einen Elektroantrieb für diesen bestehenden Umlauf mit Fahrzeugen nach dem aktuellen Stand der Technik nicht möglich. Eine Nachladung im Depot tagsüber wird hierbei

Strecken- und Einsatzanalysen

berücksichtigt. Als Randbedingung wird eine Reichweitenreserve von 15 Kilometern sowie folgende Werte festgelegt:

Batterieelektrischer Bus (BEB)		Brennstoffzellenbus (BZB)	
Kontaktierungszeit:	2 min	Nutzbarer H ₂ -Tankinhalt:	95 %
Ladeleistung Depot:	70 kW (netto)	Wirkungsgrad Brennstoffzelle:	48 %
Nutzbarer Energieinhalt Batterie:	80 %		
Ladewirkungsgrad:	90 %		

Tabelle 5.6: Randbedingungen der Energiebilanzierung

Nachfolgend sind die Ergebnisse für alle einzelnen Wagenumläufe nach den drei Ergebniskategorien „Einsatz möglich“, „Einsatz kritisch“ und „Einsatz nicht möglich“ aufgeschlüsselt. Unterschreitet das Fahrzeug zu einem Zeitpunkt des Umlaufs die zuvor festgelegte Reichweitenreserve von 15 Kilometern, wird die Umstellung dieses Umlaufs auf einen Elektroantrieb als „kritisch“ klassifiziert.

In jeder Kategorie werden die einzelnen Ergebnisse nach den Gefäßgrößen Kleinbus und Solobus aufgeschlüsselt.

Ergebnis der Energiebilanzierung

Mit batterieelektrischen Depotladern können bei den gegebenen Rahmenbedingungen und mit Nutzung eines fossilen Zusatzheizgerätes etwa 84 Prozent der vorhandenen Umläufe zum „Begin Of Life“ der Traktionsbatterie gefahren werden. Ohne Inanspruchnahme des fossilen Zusatzheizgerätes sinkt die Quote auf 77 Prozent. Mit der Brennstoffzellen-Technologie können mit dem Referenzfahrzeug bis auf drei Umläufe alle bedient werden.

In Tabelle 5.7 wird die Befahrbarkeit der Dieselumläufe mit batterieelektrischen Bussen nach Gefäßgrößen aufgeschlüsselt.

Batteriebus DL	Einsatz möglich	Einsatz kritisch	Einsatz nicht möglich
Kleinbus	3	1	4
Solobus	49	0	5
Gesamt	52	1	9

Tabelle 5.7: Befahrbarkeit der aktuellen Umläufe mit batterieelektrischen Bussen

Die Anzahl der nicht befahrbaren Umläufe beim Batteriebus liegt mit ca. 16 % im zu erwartenden üblichen Bereich bei der Umstellung von Dieselnissen auf

Strecken- und Einsatzanalysen

Batteriebusse. In der Regel sind diese Umläufe durch die Beschaffung von zusätzlichen Fahrzeugen (Fahrzeugmehrbedarf und zusätzliche Personalkosten) realisierbar.

Das Ergebnis der nicht befahrbaren Wagenumläufe im Bediengebiet der OdVB begründet sich mitunter mit den anspruchsvollen Höhenprofilen und den verhältnismäßig großen Umläufen von bis zu 560 Kilometern Gesamtlänge. Von den besonders langen Wagenumläufen mit einer Gesamtlänge von über 200 Kilometern, welche insgesamt etwa 50 Prozent ausmachen, bieten wiederum nur knapp die Hälfte eine Möglichkeit zum Zwischenladen im Depot. Eine Änderung der Ladeleistung zum Zwischenladen im Depot von 70 auf 150 kW würde demnach für das Ergebnis der Energiebilanzierung keine Änderungen mit sich bringen. Betrachtet wurde ein winterlicher Wochentag in der Schulzeit als energetisch sehr anspruchsvollen Fall. Weiterhin ist erkennbar, dass die Einhaltung der Umläufe im Stadtverkehr mit batterieelektrischen Kleinbussen zu großen Teilen nicht realisierbar ist. Dies liegt im Wesentlichen an der geringeren Reichweite der wenigen emissionsfreien Kleinbusmodelle, die aktuell auf dem Markt verfügbar sind.

Mit einer optimierten Umlaufgestaltung können möglicherweise noch mehr Umläufe mit einem Batteriebus gefahren werden. Umläufe können beispielsweise mit einem zusätzlichen Aufenthalt im Depot zur Nachladung geplant werden. Bei einer vollständigen Umstellung der Fahrzeugflotte auf Elektroantriebe ergeben die summierten Energiebedarfe aller Fahrzeuge pro Tag (Wochentag im Winter zur Schulzeit) folgende Werte:

Betriebshof	Energiebedarf batterieelektrische Busse [kWh/Tag]	Energiebedarf Brennstoffzellenbusse [kg H ₂ /Tag]	Anzahl Wagenumläufe
Beerfelden, Betriebshof Sauter	2.260	166	9
Höchst, Betriebshof Lust	1.067	77	4
Hummetroth, Betriebshof Kofler	1.014	73	4
Michelstadt, Betriebshof Wissmüller	6.444	466	28
Reichelsheim, Betriebshof VGG	1.694	122	9
Rimhorn, Betriebshof Friedrich	1.177	86	5
Weilbach, Busbetriebshof	937	69	3
Summe	52	1.058	62

Tabelle 5.8: Energiebedarfe je Technologie und Betriebshof

Die Energiebilanzierung und Umlaufbewertung zeigt, dass der Einsatz von Wasserstoffbussen im Liniennetz der OdVB zum Großteil zunächst ohne betriebliche Anpassungen realisierbar ist. Für eine vollständige Umstellung auf batterieelektrische Busse wären unter den getroffenen Annahmen betriebliche Änderungen notwendig. Es ist zu empfehlen, die Marktentwicklung von Elektrobussen und den dazugehörigen Traktionsbatterien zu beobachten.

Die Entscheidung für eine der beiden Technologien sollte jedoch nicht nur anhand der aktuell zu realisieren Wagenumläufe getroffen werden. Maßgebend sind die zu erwartenden Betriebs- und Investitionskosten sowie die räumlichen Gegebenheiten. Es ist außerdem der etappenweise Hochlauf der Fahrzeuge und der Infrastruktur zu berücksichtigen.

5.1.3 Energiebilanzierung und Umlaufbewertung neues Umlaufkonzept

Auf Basis der Ausgangslage bestehender Umläufe aus Tabelle 5.7 kann eine Umlafoptimierung durchgeführt werden.

Batteriebus DL	Einsatz möglich	Einsatz kritisch	Einsatz nicht möglich
Kleinbus	3	1	4
Solobus	49	0	5
Gesamt	52	1	9

Tabelle 5.9: Befahrbarkeit der aktuellen Umläufe mit batterieelektrischen Bussen

Im Kontext der energiebilanziellen Auswertung der bestehenden Umläufe erfolgte anschließend eine neue Umlaufplanung für den Linieneinsatz. Dazu wurde mithilfe von BeSystO®-UAA (Umlaufplanung alternative Antriebstechnologien) ein Verkehrsmodell erstellt, welches mit dem derzeitigen Fahrplan der OREG gespeist wird (Basis: vom Auftraggeber bereitgestellte VDV-452-Fahrplandaten; vollständige Abbildung von Fahrplan und Haltestelleninfrastruktur).



Abbildung 5.4: Vorgehen Umlafoptimierung

Strecken- und Einsatzanalysen

Für die Umlaufbildung werden die wesentlichen betrieblichen Parameter der Umlaufbildung und die Umsetzwege modellhaft nachgebildet.

Anschließend werden die technischen Parameter für die zu planende Technologie konfiguriert und eingestellt. Alle Parameteransätze wurden mit der OREG und der OdVB zur einmaligen Umsetzung abgestimmt. Durch das Zusammenstellen mehrerer Umläufe können Wagenumläufe gebildet werden. Im Ergebnis wurden Fahrzeugumläufe erzeugt, die es ermöglichen, dass konfigurierte Fahrzeug- und Betriebskonzept umzusetzen und ermöglichen Fahrzeuge zwischen Umläufen im Betriebshof zu laden. Auch die zur Umstellung notwendige Fahrzeuganzahl wird ausgewiesen.

Der Vorteil dieses Vorgehens besteht in der integrierten Berücksichtigung aller relevanten Linien bzw. Fahrten, wobei vollständig neue Umläufe gebildet werden, anstatt die derzeit bestehenden Umläufe als Planungsbasis zu verwenden. Eine Dienstplanung kann aus diesem Grund hier nicht erfolgen.

Im Ergebnis besteht kein zusätzlicher Bedarf an Solobussen für den Einsatz von Batteriebusen und Brennstoffzellenbussen. Die neuen Technologien bieten eine effiziente Alternative, die den bisherigen Bedarf an herkömmlichen Solobussen deckt. Des Weiteren können die derzeit nicht erfüllbaren Umläufe durch die geschickte Aufteilung und den Einsatz von anderen Bussen mit früher endenden Umläufen bedient werden, wodurch kein weiterer Bedarf entsteht. Allerdings besteht ein Fahrzeugmehrbedarf von 2 Kleinbussen speziell im Bereich der Batteriebusse. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, die Flotte entsprechend den spezifischen Anforderungen der verschiedenen Technologien zu optimieren.

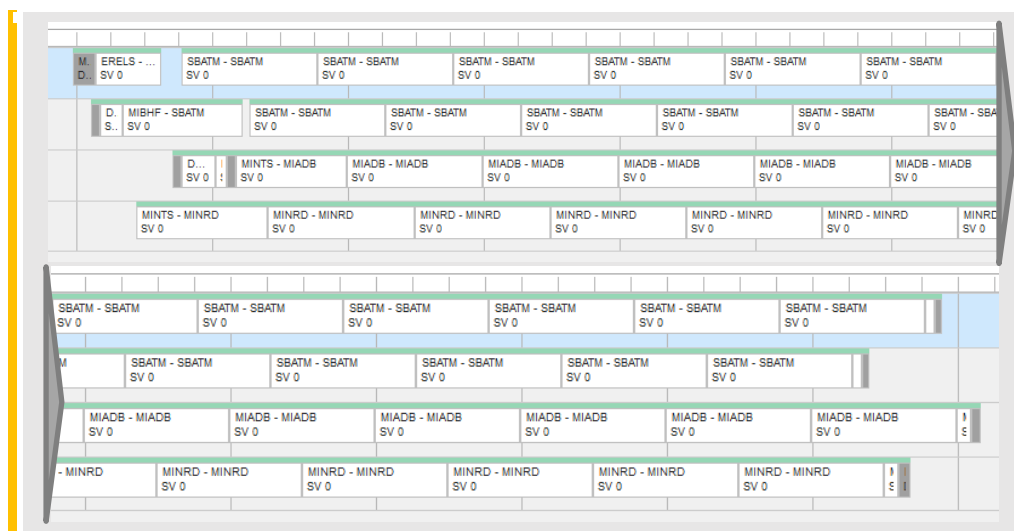


Abbildung 5.5: Umlaufoptimierung

Vom Betriebshof Michelstadt aus sind derzeit vier lange Umläufe für Kleinbusse mit gleichzeitigen Fahrten geplant. Durch die Aufteilung dieser Umläufe und das

Strecken- und Einsatzanalysen

gleichzeitige Laden der Fahrzeuge im Betriebshof können jedoch Umläufe mit insgesamt sechs Fahrzeugen befahren werden. Diese effiziente Nutzung der Ressourcen ermöglicht es, die Kapazität zu erhöhen und den Service zu verbessern, ohne zusätzliche Fahrzeuge einzusetzen.

Fahrzeugtyp	Dieselbus	Batteriebus	Brennstoffzellenbus
Kleinbus	8	10	8
Solobus	54	54	54
Insgesamt	62	64	62

Tabelle 5.10: Befahrbarkeit der aktuellen Umläufe mit batterieelektrischen Bussen

Die Aufteilung von Umläufen führt zu einem Anstieg der zu fahrenden Leerkilometer, da das Einrücken in den Betriebshof zum Laden der Fahrzeuge erforderlich ist (von 1.848 auf 2.985 Leerkilometer).

5.1.4 Flottenhochlauf

Ziel des Kapitels ist es, dass die OREG und die OdVB eine fundierte Aussage hinsichtlich der durch das SaubFahrzeugBeschG vorgeschriebenen Beschaffungsquoten im Bereich der alternativen Antriebe erhält. Das Softwaretool BeSystO[®]-BIF (Bestandsaufnahme Infrastruktur und Fahrzeuge) ermöglicht neben der Bestandsaufnahme der Fahrzeugflotte auch die Konzeption eines Flottenhochlaufs von alternativ angetriebenen Bussen.

In enger Abstimmung mit der OREG und der OdVB wurde ein Umsetzungszeitraum eines Flottenhochlaufs sowie unterschiedliche Varianten eines Beschaffungsplans für alternative Antriebe erarbeitet. Mit dem Flottenhochlauf wird ebenfalls eine Empfehlung zum Hochlauf der Infrastruktur gegeben. Dem Beschaffungsplan liegt zunächst die Altersstruktur des aktuellen Fuhrparks zugrunde.

Die aktuelle OdVB-Busflotte besteht aus Klasse-II-Fahrzeugen und fällt somit derzeit noch nicht in den Geltungsbereich der CVD. Die Nutzungsdauer der Fahrzeuge der Kategorie A und B ist auf 12 Jahre definiert.

Entsprechend des neuen EU-Kommissions-Vorschlags werden die Emissionsziele für „Überlandbusse“ angesetzt:

- » 45 % Emissionsreduktion ab 2030
- » 65 % Emissionsreduktion ab 2035
- » 90 % Emissionsreduktion ab 2040

Strecken- und Einsatzanalysen

Im folgenden Diagramm ist der Hochlauf emissionsfreier Busse dargestellt. Der Fokus liegt auf der Beschaffung der Busse im jeweiligen Jahr unter Berücksichtigung der geltenden Beschaffungsquoten.

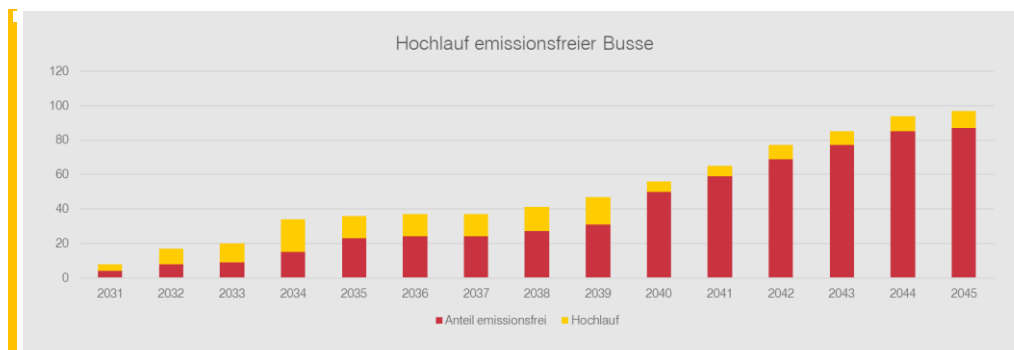


Abbildung 5.6: Hochlauf emissionsfreier Busse

Es wurden nur emissionsfreie Fahrzeuge betrachtet, um die Diversität der Antriebstechnologien gering zu halten. Ansonsten müssten für alle Antriebstechnologien separate Infrastrukturen, z. B. Ladeinfrastruktur für Elektrobusse und Tankinfrastruktur für Erdgas sowie konventionelle Dieselmotoren einschließlich AdBlue, vorgehalten werden.

Unklar ist weiterhin, ob saubere und emissionsfreie Fahrzeuge bei einem öffentlichen Dienstleistungsauftrag vom ersten Tag an in der geforderten Menge eingesetzt werden müssen. Zu prüfen ist auch, wie im Dienstleistungsvertrag nach den Fahrzeugklassen unterschieden werden kann, um somit die Anzahl der sauberen und emissionsfreien Fahrzeuge zu reduzieren.

6 Infrastrukturanforderungen und -bedarfe und Analysen zur Energiebereitstellung

6.1 Auslegung der Lade-/ Tankinfrastruktur

Auf Grundlage der Energiebilanzierung erfolgt die Untersuchung der Betriebshöfe im Hinblick auf die Eignung für die Installation mit Energieversorgungsinfrastruktur.

6.1.1 Auslegung der Ladeinfrastruktur

Für die Ladung von Batteriebusen ist der Aufbau von Ladeinfrastruktur in jedem Fall erforderlich. Der Umgang unterscheidet sich je nach Ladekonzept. Für die Vollladung ist die umfangreiche Installation von Ladeinfrastruktur im Betriebshof notwendig. Es wird davon ausgegangen, dass keine Zwischenladung im Betreibergebiet installiert wird (siehe Kapitel 5). Stattdessen werden sich möglichen Standorte auf die jeweiligen Abstellflächen der Fahrzeuge in Betriebspausen beschränken. Weiterhin wird definiert, dass jeder Umlauf mit vollständig gefülltem Energiespeicher (Batterie) ausrückt. Die im Tagesverlauf benötigte Energie soll ggf. während Aufenthalt im Depot nachgeladen werden.

Für die Dimensionierung der energetischen Versorgung der Busflotte werden die Umlaufdaten des Referenztags „Wochentag | Schulzeit“ verwendet. Es wird die erforderliche Energiemenge zum Laden der Batteriebusse berechnet und der maximale Leistungsbedarf bestimmt. Mit der Auslegung der Infrastruktur und der Fahrzeuge für den energetisch anspruchsvollsten Betriebstag können auch Betriebstage mit weniger Fahrplankilometer vollständig bedient werden. Hierbei wird zwischen den drei Lademodellen „Ungesteuerte Ladung“, „Gleichmäßige Ladung“ und „Gesteuerte Ladung“ unterschieden.

Aus den Umlaufuntersuchungen ergibt sich für alle Umläufe am betrachteten Referenztag „Wochentag | Schulzeit“ ein täglicher Gesamtenergiebedarf von etwa 14.590 kWh.

Zur Ermittlung der erforderlichen Anschlussleistung zur Anbindung an das Stromnetz wurden die Umläufe des Referenztages „Wochentag | Schulzeit“ untersucht. Es wurden die Ladeverläufe je Lademodell im Betriebshof simuliert. Beide Modelle berücksichtigen den Wirkungsgrad der Ladetechnik. Die Fahrzeugabstellung wurde vereinfacht nach dem First-In-/ First-Out-Prinzip abgebildet. Fahrzeuge, die als Erstes einrücken werden als Erstes ausrücken. Zudem wurde eine Leistungsreserve von 5 % zur Abbildung besonders fahrleistungstarker Tage berücksichtigt.

Infrastrukturanforderungen und -bedarfe und Analysen zur Energiebereitstellung

Der Gesamtleistungsbedarf setzt sich aus der für alle Ladevorgänge benötigten, aufsummierten Ladeleistung und der Leistung zum Vorkonditionieren der Fahrzeuge zusammen. Die gelbe Kurve gibt die Leistung zum Laden der Batteriebusse, die grüne Kurve die Leistung zum Vorkonditionieren der Fahrzeuge, beginnend 30 Minuten vor dem Ausrücken, und die blaue Kurve die Summe an.

Das Lademodell 1 bildet die „ungesteuerte Ladung“ ab. Ein Ladevorgang startet, sobald das Fahrzeug den Ladepunkt erreicht hat. Die Ladeleistung (netto) beträgt jeweils 70 kW. Die Ladezeit bestimmt sich in Abhängigkeit der nachzuladenden Energiemenge. Sobald der Energiespeicher vollgeladen ist, wird der Ladevorgang angehalten. Erst nach Beendigung des Vorkonditionierens wird der Ladevorgang beendet.

Das Lademodell 2 bildet die „gleichmäßige Ladung“ ab. Die erforderliche Ladeleistung passt sich an die nachzuladende Energiemenge und die zur Verfügung stehende Zeit an. Die Ladung beginnt ebenfalls zum frühestmöglichen Zeitpunkt und endet, sobald der Traktionspeicher geladen und die Vorkonditionierung abgeschlossen ist. Die zur Verfügung gestellte Ladeleistung wird auf die zur Ladung verfügbare Zeit angepasst. Bei einer langen Standzeit wird eine geringere Ladeleistung bereitgestellt, bei einer kurzen Standzeit ist die Ladeleistung entsprechend höher.

Das Lademodell 3 bildet eine „gesteuerte Ladung“ ab. Ein Ladevorgang startet in Abhängigkeit der Gesamtladeleistung. Durch die Verzögerung von Ladevorgängen sollen sich häufende parallele Ladevorgänge reduziert werden. Dadurch kann ggf. der maximale Spitzenleistungsbedarf gesenkt werden. Die Ladeleistung (netto) beträgt jeweils 70 kW. Die Ladezeit bestimmt sich in Abhängigkeit der nachzuladenden Energiemenge. Sobald der Energiespeicher vollgeladen ist, wird der Ladevorgang angehalten, um eine Kommunikation zwischen Fahrzeug und Infrastruktur zur Steuerung der Vorkonditionierung aufrechtzuerhalten. Erst nach Beendigung des Vorkonditionierens wird auch der Ladevorgang beendet.

Ladeinfrastrukturbedarfe aller Betriebshöfe

Die folgende Abbildung zeigt den Leistungsbedarfsverlauf für den Referenztag „Wochentag | Schulzeit“ über die gesamte Fahrzeugflotte und alle Betriebshöfe der OdVB.

Infrastrukturanforderungen und -bedarfe und Analysen zur Energiebereitstellung

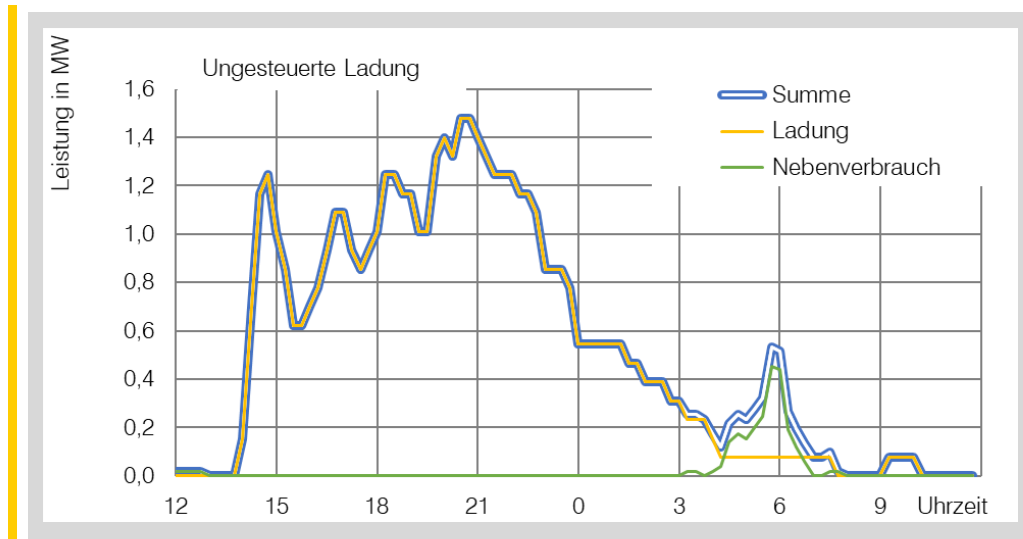


Abbildung 6.1: Gesamte Fahrzeugflotte: Ungesteuerte Ladung

Bei einer Ladung nach dem Lademodell 1 „Ungesteuerte Ladung“ über alle Betriebshöfe steigt der Leistungsbedarf mit Eintreffen der ersten Fahrzeuge gegen 14 Uhr an. Dieser steigert sich dann schnell bis 15 Uhr und erreicht nach ein paar Schwankungen gegen 21 Uhr das Maximum von 1,5 MW. In der Nacht zwischen 21 Uhr und 4 Uhr fällt die Ladeleistung ab. Bis 4 Uhr ist ein Großteil der Ladevorgänge abgeschlossen. Ab 4 Uhr erfolgt die Vorkonditionierung, zu erkennen an dem steigenden Leistungsbedarf vor dem Ausrücken der Fahrzeuge in den frühen Morgenstunden.

Ladeinfrastrukturbedarfe der einzelnen Betriebshöfe

Im Folgenden werden exemplarisch für die Betriebshöfe Michelstadt, Beerfelden und Rimhorn die Leistungsbedarfe für die ungesteuerte, gleichmäßige und gesteuerte Ladung dargestellt. Die Betriebshöfe Höchst, Hummetroth, Reichelsheim und Weilbach sind in der Anlage 10 hinterlegt.

Ebenfalls in der Anlage 10 werden die konkreten Bedarfe an Versorgungsinfrastruktur für alle Betriebshöfe aufgezeigt.

Infrastrukturanforderungen und -bedarfe und Analysen zur Energiebereitstellung

Betriebshof Michelstadt

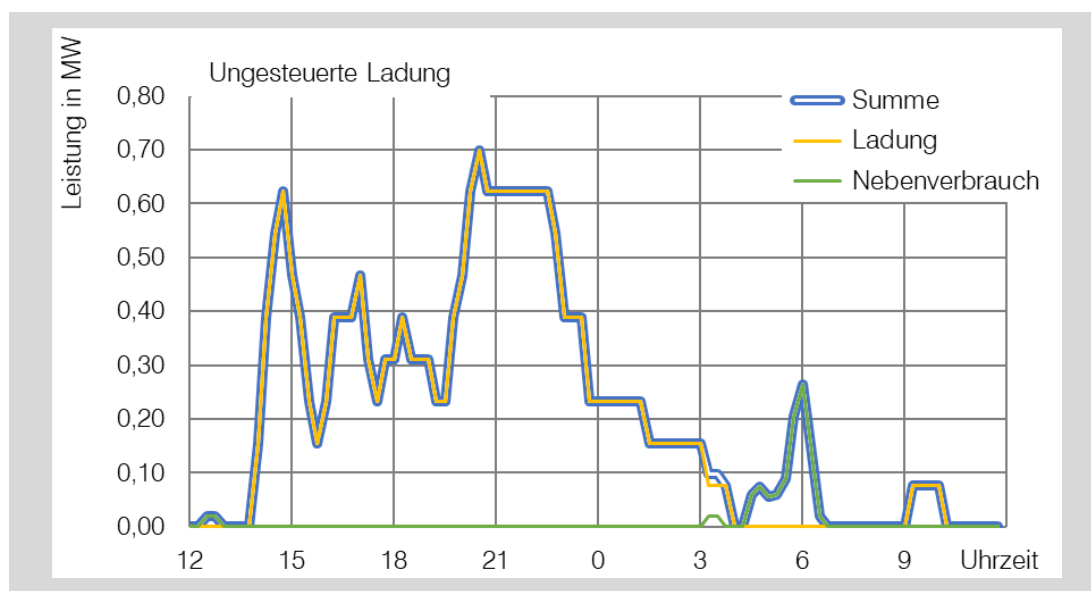


Abbildung 6.2: Ungesteuerte Ladung | Betriebshof Michelstadt

Der Betriebshof Michelstadt benötigt bei ungesteuerter Ladung eine maximale Spitzenleistung von 0,7 MW. Diese wird ab ca. 20 Uhr abgerufen, wenn die meisten Fahrzeuge im Depot eingerückt sind und den Ladevorgang ausführen.

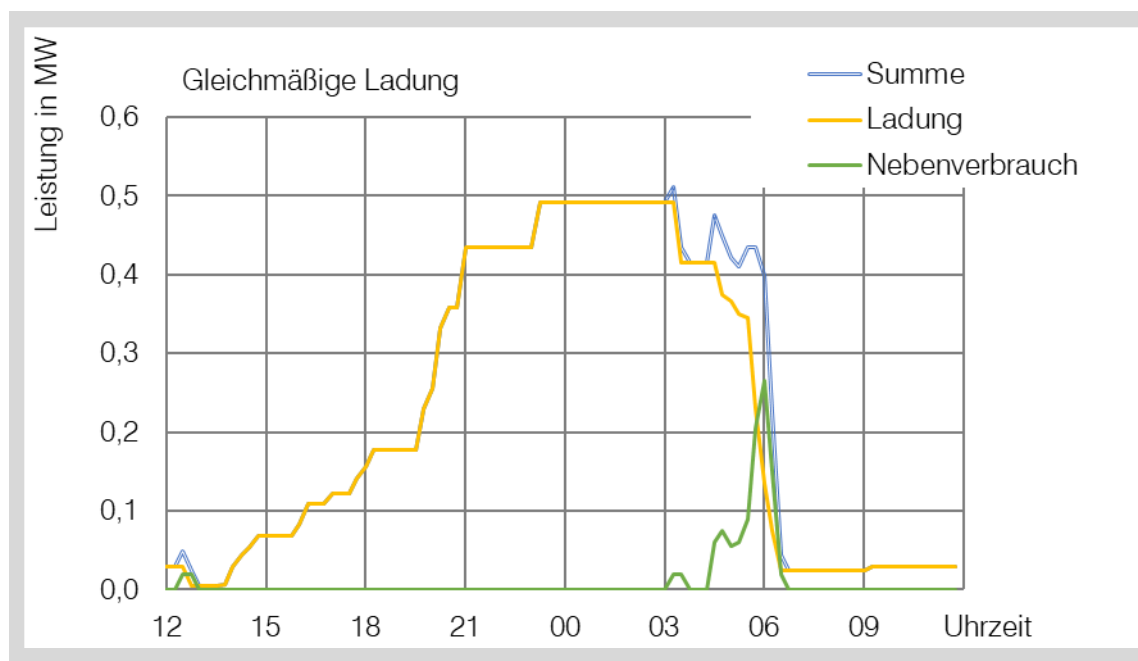


Abbildung 6.3: Gleichmäßige Ladung | Betriebshof Michelstadt

Infrastrukturanforderungen und -bedarfe und Analysen zur Energiebereitstellung

Bei gleichmäßiger Ladung kann der Leistungsbedarf reduziert werden. Die maximale Spitzenleistung von 0,51 MW ergibt sich aus den Ladevorgängen in der Zeit von 3 Uhr bis 4 Uhr. Im Rahmen der gesteuerten Ladung reduziert sich der maximale Leistungsbedarf auf 0,39 MW.

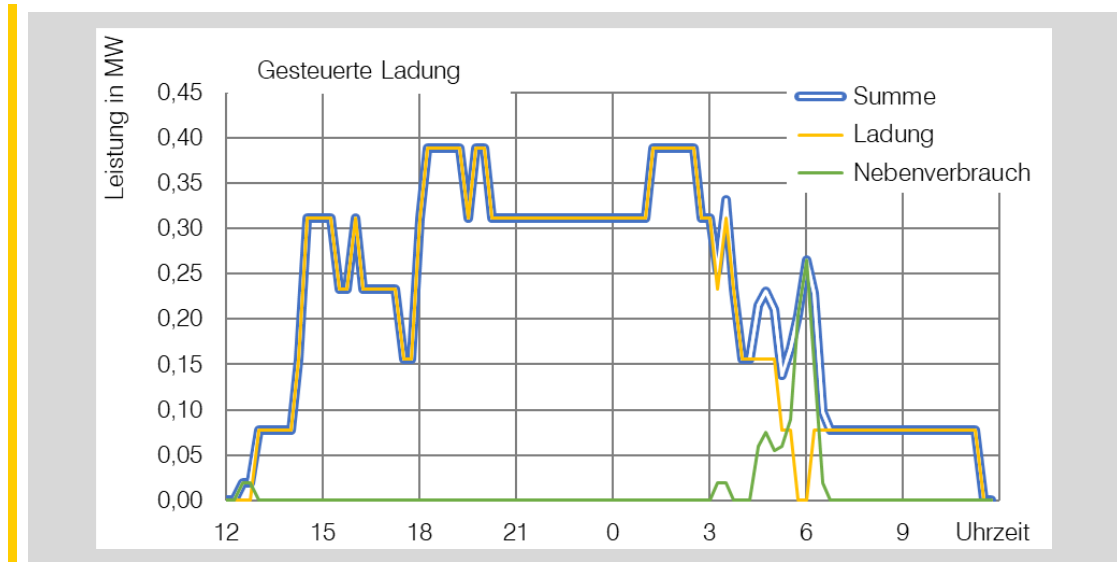


Abbildung 6.4: Gesteuerte Ladung | Betriebshof Michelstadt

Betriebshof Beerfelden

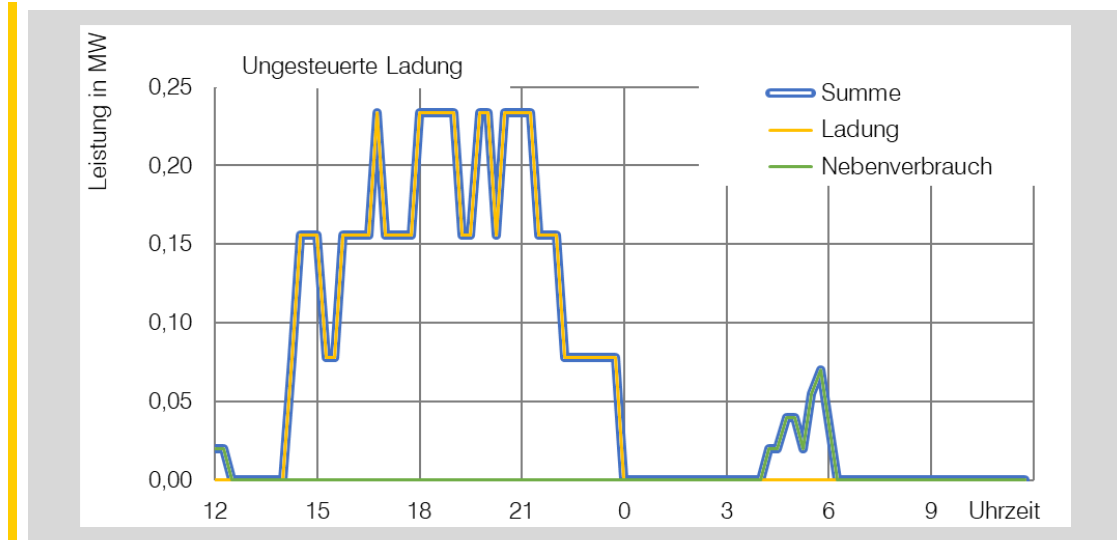


Abbildung 6.5: Ungesteuerte Ladung | Betriebshof Beerfelden

Der Betriebshof Beerfelden benötigt bei ungesteuerter Ladung eine maximale Spitzenleistung von 0,233 MW. Diese wird zwischen 16 Uhr und 21 Uhr abgerufen,

Infrastrukturanforderungen und -bedarfe und Analysen zur Energiebereitstellung

wenn die meisten Fahrzeuge im Depot eingerückt sind und den Ladevorgang ausführen.

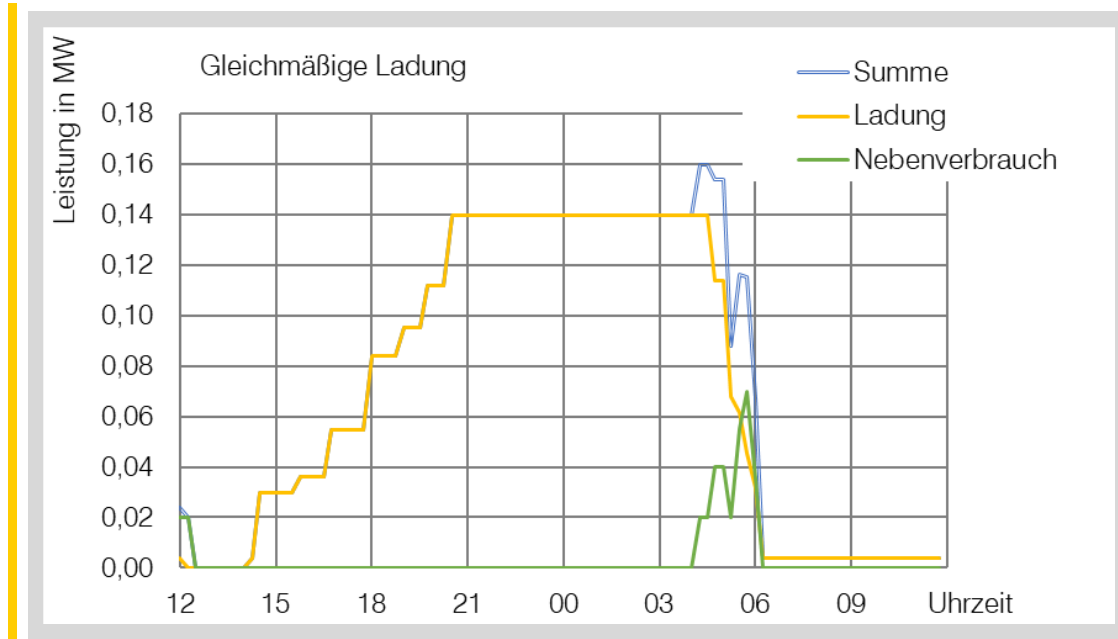


Abbildung 6.6: Gleichmäßige Ladung | Betriebshof Beerfelden

Bei gleichmäßiger Ladung kann der Leistungsbedarf reduziert werden. Die maximale Spitzenleistung von 0,160 MW ergibt sich aus den Ladevorgängen in der Zeit von 4 Uhr bis 5 Uhr. Im Rahmen der gesteuerten Ladung reduziert sich der maximale Leistungsbedarf auf 0,156 MW.

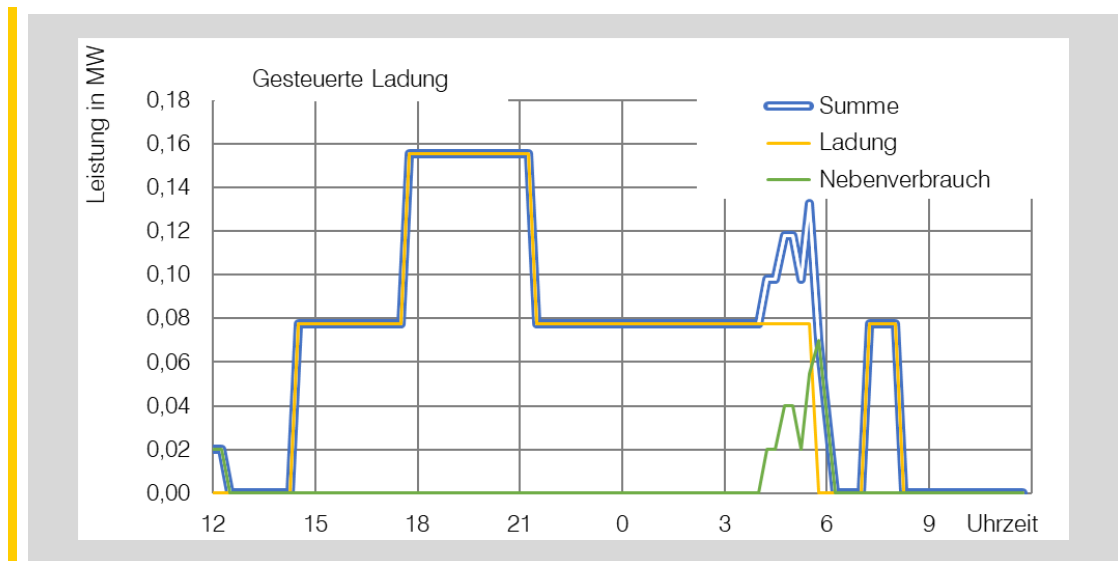


Abbildung 6.7: Gesteuerte Ladung | Betriebshof Beerfelden

Infrastrukturanforderungen und -bedarfe und Analysen zur Energiebereitstellung

Betriebshof Rimhorn

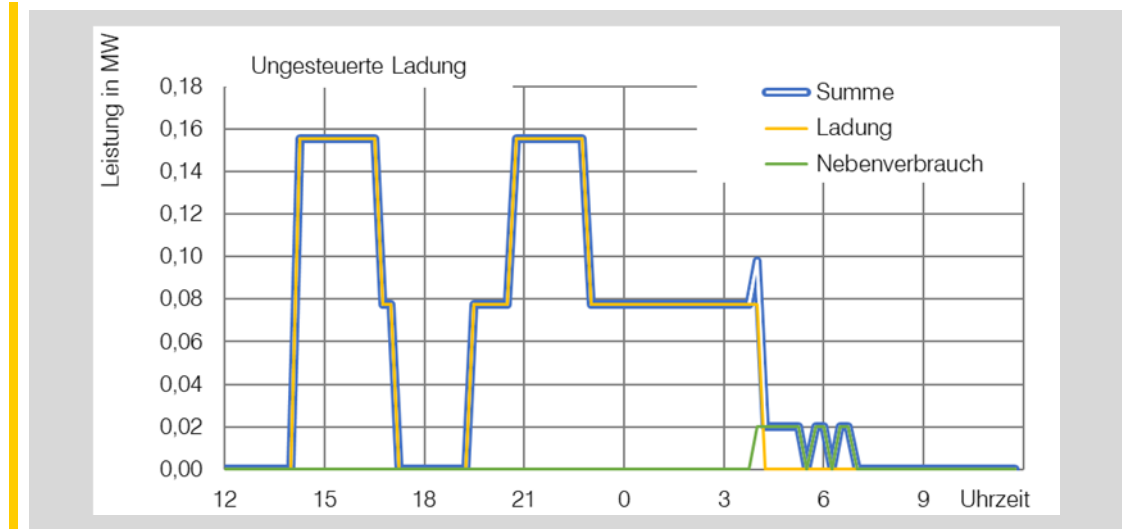


Abbildung 6.8: Ungesteuerte Ladung | Betriebshof Rimhorn

Der Betriebshof Rimhorn benötigt bei ungesteuerter Ladung eine maximale Spitzenleistung von 0,156 MW. Diese wird von 14-17 Uhr und von 21-23 Uhr abgerufen, wenn die meisten Fahrzeuge im Depot eingerückt sind und den Ladevorgang ausführen.

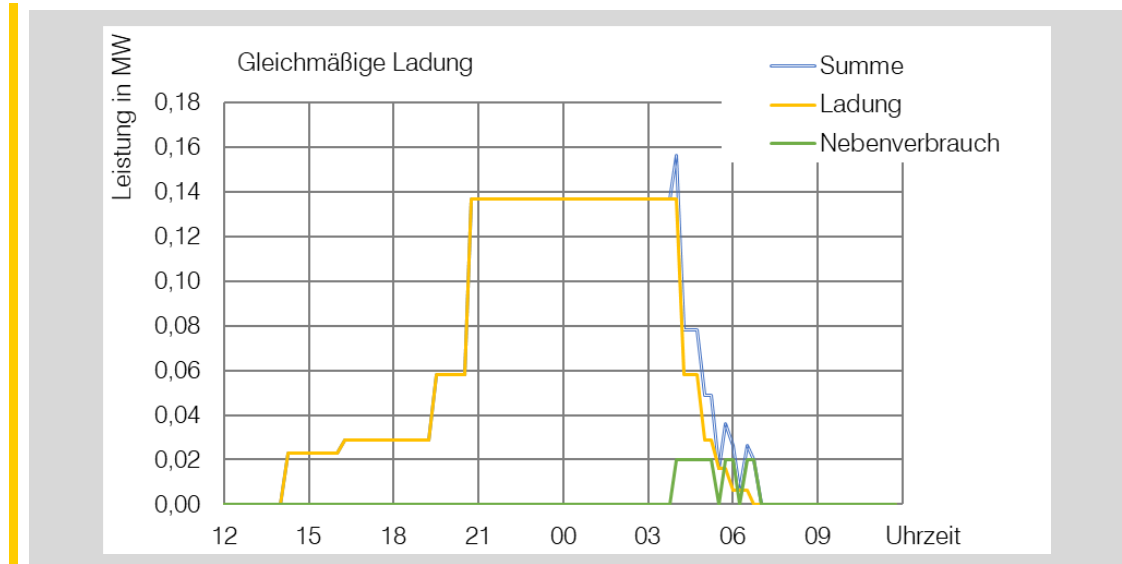


Abbildung 6.9: Gleichmäßige Ladung | Betriebshof Rimhorn

Bei gleichmäßiger Ladung kann der Leistungsbedarf reduziert werden. Die maximale Spitzenleistung von 0,157 MW ergibt sich aus den Ladevorgängen um

Infrastrukturanforderungen und -bedarfe und Analysen zur Energiebereitstellung

4 Uhr. Im Rahmen der gesteuerten Ladung reduziert sich der maximale Leistungsbedarf auf 0,156 MW.

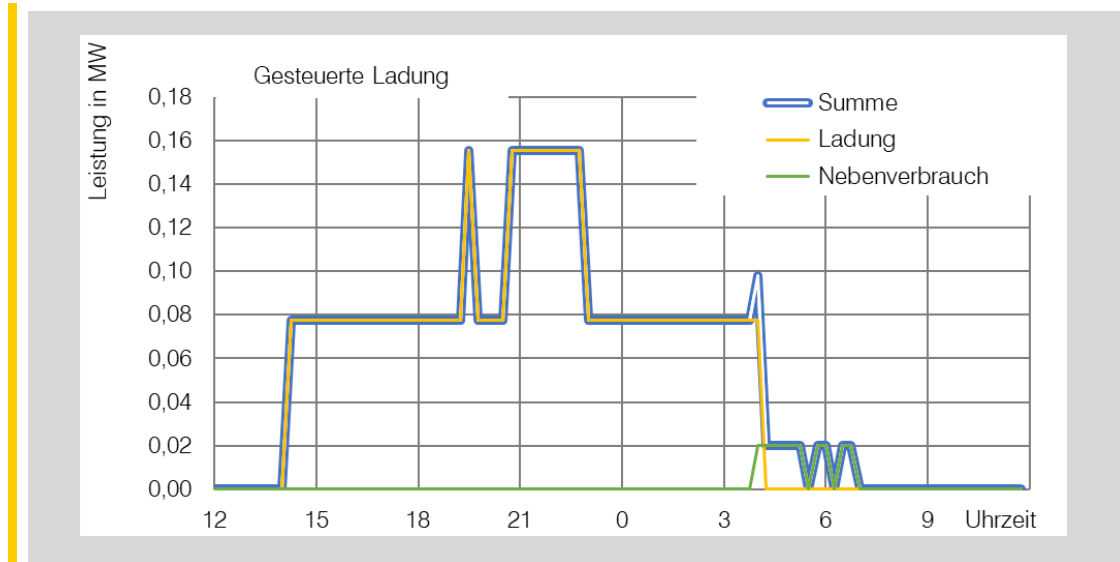


Abbildung 6.10: Gesteuerte Ladung | Betriebshof Rimhorn

Ergebnis

Die Ermittlung der Spitzenleistungsbedarfe wurde für alle Betriebshöfe und alle Lademodelle durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

ID	Standort	Ungesteuerte Ladung	Gleichmäßige Ladung	Gesteuerte Ladung
BE	Beerfelden	0,233 MW	0,160 MW	0,156 MW
HÖ	Höchst	0,156 MW	0,180 MW	0,078 MW
HU	Hummetroth	0,233 MW	0,185 MW	0,156 MW
MI	Michelstadt	0,700 MW	0,512 MW	0,389 MW
RE	Reichelsheim	0,233 MW	0,152 MW	0,156 MW
RI	Rimhorn	0,156 MW	0,157 MW	0,156 MW
WE	Weilbach	0,156 MW	0,140 MW	0,156 MW

Tabelle 6.1: Spitzenleistungsbedarfe je Betriebshof und Lademodell

Auf Betriebshöfen mit wenigen Fahrzeugen und langen Standzeiten, die zur Ladung genutzt werden können, kann eine gleichmäßige Ladung über die gesamte



Infrastrukturanforderungen und -bedarfe und Analysen zur Energiebereitstellung

Standzeit geringere Spitzenleistungsbedarfe aufweisen, wenn ein entsprechendes Lademanagement eingesetzt wird. Die gesteuerte Ladung durch die Staffelung der Ladeprozesse stellt jedoch das Lademodell dar, bei dem insgesamt die geringste Spitzenladeleistung erforderlich ist. Hierfür ist ebenfalls ein Lademanagement erforderlich. Dieses optimierte Lademodell ist die Grundlage für die weitere Auslegung der Ladeinfrastruktur.

Nach Auskunft des Netzbetreibers e-netz Südhessen¹⁶ stellt die elektrische Versorgung der Betriebshöfe technisch kein Problem dar. Für die notwendigen Investitionen wie Tiefbau und Kompaktstationen wurde eine grobe Kostenschätzung durchgeführt.

Für die geplanten Ladestellen wurden folgende überschlägigen Schätzkosten für die 20-kV-Anschlüsse und den 1-kV Anschluss ermittelt:

Standort	Maßnahme	Kosten
Beerfelden	20-kV-Anschlußlänge etwa 90 m	Kabellegung etwa 80.000,00 € + Transformatorstation ca. 130.000,00 € = etwa netto 210.000,00 €
Höchst	20-kV-Anschlußlänge etwa 15 m	Kabellegung etwa 27.000,00 € + Transformatorstation etwa 130.000,00 € = etwa netto 157.000,00 €
Hummetroth	20-kV-Anschlußlänge etwa 10 m	Kabellegung etwa 20.000,00 € + Transformatorstation etwa 130.000,00 € = etwa netto 150.000,00 €
Michelstadt	20-kV-Anschlußlänge etwa 10 m	Kabellegung etwa 20.000,00 € + Transformatorstation ca. 130.000,00 € = etwa netto 150.000,00 €
Reichelsheim	20-kV-Anschlußlänge etwa 10 m	Kabellegung etwa 23.500,00 € + Transformatorstation etwa 130.000,00 € = etwa netto 153.500,00 €
Rimhorn	1-kV-Anschlußlänge etwa 50 m	Kosten incl. Messwandlerschrank = etwa netto 35.000,00 €
Weilbach	Keine Information	Keine Information

Tabelle 6.2: Schätzung Maßnahmen und Kosten Netzbetreiber

Bei den Trafostationen wurde die Lieferung und Montage einer Kompaktstation mit einem 630-kVA-Transformator, SF6-Schaltanlage und Niederspannungsverteilung inkl. Baugrube in befestigter Oberfläche kalkuliert.

Die Projektskizzen mit den angenommenen Standorten der Stationen bzw. des Messwandlerschranks wurden der OREG zur Verfügung gestellt.

¹⁶ Quelle: E-Mail des Netzbetreibers e-netz Südhessen vom 06.09.2023 an OREG

Infrastrukturanforderungen und -bedarfe und Analysen zur Energiebereitstellung

Zu den vorgenannten Kosten kommt noch die Berechnung des Baukostenzuschusses (BKZ) hinzu. Der Netzbetreiber berechnet für die 20-kV Anschlüsse (Netzebene 5) gemäß „Positionspapier zur Erhebung von Baukostenzuschüssen im Bereich von Netzanschlüssen oberhalb der Niederspannung“ der Bundesnetzagentur einen BKZ von derzeit netto 96,03 €/kW.

Für den 1-kV Anschluss (Netzebene 7) wird ein BKZ von derzeit netto 89,00 €/kW berechnet. Gemäß der Niederspannungsanschlussverordnung (NAV) wird für die ersten 30 kW kein BKZ erhoben.

Für den Betriebshof in Weilbach ist der Netzbetreiber Bayernwerk zuständig. Hier konnte noch keine weiteren Informationen gegeben werden.

Neben der technisch möglichen Anschlussleistung sind noch weitere Aspekte zu beachten. Denn die Integration von Ladeinfrastruktur in bestehende Betriebshöfe stellt eine komplexe Aufgabe hinsichtlich der zur Verfügung stehenden Platzkapazitäten dar.

Um die Energieversorgung für die ermittelten Leistungsbedarfe je Betriebshof zu realisieren, ist entsprechende Ladeinfrastruktur erforderlich. Diese Komponenten umfassen jeweils eine Übergabestation, Transformatoren und Ladestationen mit Ladegeräten. Ausgehend von einer zu errichtenden Übergabestation zur elektrischen Anbindung des Betriebshofes und der Realisierung der Schutz- und Messstellenfunktionen erfolgt die weitere Verteilung im Betriebshof. In Abhängigkeit des Fahrzeughochlaufes sind die Betriebshöfe vorbereitend mit entsprechenden Transformatoren auszustatten. Ladegeräte und die Ladestationen mit den CCS-Ladern sind ebenfalls an den Fahrzeughochlauf anzupassen.

Die erste Ausbaustufe erfordert die Übergabestation und Transformatorenstationen. Im Anschluss je nach Ausbaustufe die Installation der Ladestationen entsprechend des geplanten Fahrzeughochlaufes. In der Anlage 10 sind die Infrastrukturkomponenten nach Jahr und Betriebshof dargestellt, entsprechend des Fahrzeughochlaufes.

Um eine möglichst hohe Versorgungssicherheit für die zur kritischen Infrastruktur gehörenden Busflotte gewährleisten zu können, wird in der Regel pro Elektrobuss ein Ladepunkt auf dem Betriebshof eingeplant. Wenn die Randbedingungen am Standort es zulassen, können weitere Schnellladepunkte zusätzliche Freiheitsgrade generieren. Dabei sind einige Punkte zu beachten:

- » Platz für zusätzliche Ladetechnik und den Ladestandort muss gegeben sein (dies kann bspw. auch der Havarieplatz sein)
- » Leistungsreserve beim Netzanschluss

Infrastrukturanforderungen und -bedarfe und Analysen zur Energiebereitstellung

- » Brandschutzanforderungen müssen eingehalten werden, ggf. ist ein zusätzlicher Brandabschnitt nötig
- » Ggf.: Lärmbelastung prüfen

Es ergeben sich folgende Vorteile:

- » Ggf.: vorgezogener Bauabschnitt und dadurch eine gute Möglichkeit Bestandsbetriebshöfe im Betrieb mit Ladetechnik zu ergänzen
- » Schnelles Nachladen von Fahrzeugen im Tagesverlauf (Verstärker, Schülerverkehre etc.) oder nach dem Einrücken bevor das jeweilige Fahrzeug in die Werkstatt / Wäsche / auf den finalen Stellplatz kommt
- » Rückfallebene, wenn dedizierte Ladegeräte defekt oder im Worst Case ein Brandabschnitt unbrauchbar geworden ist
- » Definiertes Testen des Batteriezustands, auch bei Speichern mit hohem Energieinhalt und hohen möglichen Ladeleistungen

Das mögliche Potenzial geht mit Nachteilen bezüglich zusätzlicher Kosten (Investition, Wartung) sowie dem notwendigen Platzbedarf, der auf Bestandsflächen tendenziell eine kritische Komponente darstellt, einher.

Fazit Ladeinfrastruktur

An jedem Busabstellort sollte ein Ladepunkt installiert werden. Die Ladeleistung kann für alle Ladepunkte mit 70 kW (netto) festgelegt werden. Die Standzeiten der Fahrzeuge dafür sind ausreichend. Um den Spitzen-Leistungsbedarf zu senken, bietet sich der Einsatz eines Lademanagementsystems in Verbindung mit einem Betriebshofmanagementsystem an, welches auf den Einsatz von Batteriebusen vorbereitet ist.

An Standorten mit Reserven bei Platz und Anschlusskapazität können zusätzliche Schnellladepunkte in Betracht gezogen werden. Diese sollten mindestens 100 kW als Ladeleistung je Ladepunkt bereitstellen können.

6.1.2 Auslegung der Tankinfrastruktur

Die Tankinfrastruktur unterscheidet sich in Abhängigkeit der H₂-Bereitstellungsform, zwischen drei verschiedenen Versorgungskonzepten. Prinzipiell wird zwischen der I) Nutzung vorhandener Tankinfrastruktur in der Region sowie der II) Nutzung eigener Tankinfrastruktur im Betriebshof unterschieden. Dabei kann die Bereitstellung des Wasserstoffs im Betriebshof über II.1) H₂-Vor-Ort-Erzeugung mittels Elektrolyse oder über II.2) H₂-Anlieferung per Trailer erfolgen.

- I) Nutzung vorhandener Tankinfrastruktur in der Region

Infrastrukturanforderungen und -bedarfe und Analysen zur Energiebereitstellung

Es werden insbesondere aktuelle Entwicklungen zu bereits in Planung befindlicher Tankinfrastruktur aufgenommen und hinsichtlich Anwendungsmöglichkeiten und Synergien für die OREG und die OdVB untersucht.

II) Nutzung eigener Tankinfrastruktur im Betriebshof

Die Auslegung der Wasserstoffinfrastruktur erfolgt prinzipiell basierend auf den bereits ermittelten Größen; das sind der tägliche Wasserstoffbedarf und das nächtliche Betankungszeitfenster mit der korrespondierenden Fahrzeuganzahl. Aus dem täglichen H_2 -Bedarf wird unter Berücksichtigung einer gewissen Betriebsreserve die Größe der vorzuhaltenden H_2 -Speichertanks ermittelt. Aus dem nächtlichen Betankungszeitfenster und der in dieser Zeit zu betankende H_2 -Menge wird die notwendige Verdichterkapazität abgeleitet. Auf Basis dieser Eingangswerte erfolgt die Konfiguration der Systemkomponenten für die betrachteten Szenarien.

Für den Einsatz von Brennstoffzellenbussen wird zunächst geprüft, ob in der Region bzw. in den Städten bereits bestehende oder geplante Wasserstoffinfrastrukturen für die Nutzung durch den Busverkehr der OdVB infrage kommen. Die Entfernung zu den identifizierten umstellbaren Linien ist dabei maßgebend. Nach der Einschätzung der Nutzung ggf. vorhandener Wasserstoffinfrastrukturen werden die Infrastrukturanforderungen für die Versorgung von Brennstoffzellenbussen auf dem Betriebshof bestimmt und ob eine entsprechende Tankinfrastruktur vor Ort vorgehalten werden muss bzw. kann.

Für eine Umstellung der Busflotte auf Brennstoffzellenbusse ist auf Grundlage der Energiebilanzierung mit einem Wasserstoffbedarf von 1.058 kg H_2 pro Tag zu rechnen. Um zukünftig auftretenden veränderten Tagesumläufen oder auch höheren Fahrzeugverbräuchen (z. B. an heißen Sommertagen) Rechnung zu tragen, wird eine Verbrauchsreserve von 10 % auf den täglichen Wasserstoffbedarf aufgeschlagen. Dies entspricht einer Wasserstoffmenge von 1.165 kg H_2 je Tag.

Für einen wirtschaftlichen Einsatz und Betrieb der Wasserstoffinfrastruktur, werden basierend auf Erfahrungswerten von Anlagenbetreibern H_2 -Bevorratungsmengen über zwei Arbeitstage ($2 \times 1.165 \text{ kg } H_2$) empfohlen. Technisch bedingt, da immer ein Restdruck im System verbleibt, müssen ca. 2.450 kg Wasserstoff in der Anlage sein um 2.330 kg H_2 betanken zu können.

Die ermittelten Werte fasst die nachfolgende Tabelle 6.3 zusammen. Daraus geht die Gesamtmenge an Wasserstoff zum Betrieb der Flotte hervor, noch nicht aber deren örtliche Verteilung. Die Bedienung sowie der Vorhalt an Wasserstoff muss folglich auf die unterschiedlichen Liegenschaften aufgeteilt werden.

Infrastrukturanforderungen und -bedarfe und Analysen zur Energiebereitstellung

Position	Aufsummierte Wasserstoffmenge
Energiebedarf Brennstoffzellenbusse	1.058 kg H ₂
Zusätzlich Verbrauchsreserve von 10 % (angepasste Umläufe, erhöhter HVAC-Verbrauch)	1.165 kg H ₂
Zweitagesbevorratung	2.330 kg H ₂
Zuschlag für nicht nutzbaren Restinhalt im Wasserstofftank	2.450 kg H ₂

Tabelle 6.3: Tägliche Wasserstoffbevorratungsmenge für die gesamte Busflotte

Dieser gesamte Wasserstoffbedarf verteilt sich auf die einzelnen Betriebshöfe entsprechend folgender Tabelle:

ID	Standort	Täglicher Wasserstoffbedarf [kg H ₂]	Anteil Wasserstoffbedarf [%]	Gesamtwasserstoffbevorratung [kg H ₂]
BE	Beerfelden	166	16%	384
HÖ	Höchst	77	7%	178
HU	Hummetroth	73	7%	169
MI	Michelstadt	466	44%	1.079
RE	Reichelsheim	122	12%	283
RI	Rimhorn	86	8%	199
WE	Weilbach	69	7%	160
	Gesamt	1.058	100%	2.450

Tabelle 6.4: Wasserstoffbedarfe je Betriebshof

In der Anlage 11 werden die konkreten Bedarfe an Versorgungsinfrastruktur für alle Betriebshöfe aufgezeigt.

Im Folgenden werden relevante Faktoren für den Bau und den Betrieb von Wasserstoffinfrastrukturen beschrieben.

Infrastrukturanforderungen und -bedarfe und Analysen zur Energiebereitstellung

Anschlussleistung

Die Anschlussleistung lässt sich aus den benötigten Komponenten abschätzen. Dabei haben Elektrolyseur, Verdichter und Kühleinheit der Reihenfolge nach den größten Einfluss auf die Anschlussleistung. Für eine Vor-Ort-Erzeugung mit Elektrolyse kann es durch die hohe erforderliche Anschlussleistung notwendig sein, eine Einspeisung über das Mittelspannungsnetz zu verwenden. Bei einer Tankstelle mit Wasserstoffanlieferung ist die Anschlussleistung im Vergleich mit der Elektrolyse deutlich niedriger und ein bestehender Niederspannungsanschluss reicht ggf. aus.

Brandschutz

Grundsätzlich ist die Wasserstofflagerung immer unter freiem Himmel zu verorten, um im Havariefall ein schnelles Verflüchtigen (nach oben) des Wasserstoffs zu gewährleisten. Kritische benachbarte Bereiche können bei Bedarf durch Brandschutzmauern geschützt werden. Eine Anordnung unter Hochspannungsleitungen ist nicht möglich.

Schleppkurven

Die Zapfsäulen (auch: Dispenser) der Wasserstofftankstelle müssen für den Fuhrpark zugänglich sein, sollten aber durch einen Anfahrschutz gegen ungewollte mechanische Einflüsse wirksam abgeschirmt werden.

Bei der Anlieferung des Wasserstoffs muss die Zugänglichkeit der Übergabepunkte zwischen Trailer und Druckspeicher der Tankstelle berücksichtigt werden.

Sicherheitsabstände

Für die einzelnen Komponenten der Wasserstoffinfrastruktur sind definierte Sicherheitsabstände einzuhalten, welche Einfluss auf die Kubatur bei der Anordnung der Komponenten haben. Diese Abstände lassen sich durch zusätzliche Maßnahmen (bspw. Schutzwände, die den Bereich der Tanks nach außen hin abschließen) verringern.

Für eine konkretisierte Umsetzungsplanung ist, abhängig von den ausgewählten Komponenten sowie dem beliefernden Trailer, eine Analyse der daraus resultierenden Sicherheitsabstände für das weitere Umfeld im Rahmen eines sicherheitstechnischen Gutachtens zu ermitteln.

Lärm

Aus lärmschutztechnischer Sicht sind die Verdichter-Einheiten als Emissionsquelle besonders zu berücksichtigen. Durch die Einhausung im Container erfolgt bereits eine Minderung des Emissionseintrages in die Umgebung. Typische Werte liegen im Bereich von 70 dB(A) in einem Abstand von 10 m. Eine genaue Untersuchung

Infrastrukturanforderungen und -bedarfe und Analysen zur Energiebereitstellung

der Lärmproblematik muss im Rahmen der Vorplanung für eine konkretisierte Umsetzungsplanung durchgeführt werden. Durch eine geeignete Positionierung hinter der Schutzwand des zugehörigen Trailer-Stellplatzes sowie ggf. weitere Lärmschutzmaßnahmen können die Lärmemissionen weiter gemindert werden.

Genehmigung

Die notwendigen Genehmigungsverfahren einer Wasserstoffinfrastruktur sind abhängig von der gelagerten Wasserstoffmenge und ob eine Vor-Ort-Erzeugung wie in II.1 vorliegt. Bei einer Vor-Ort-Erzeugung ist in jedem Fall ein Genehmigungsantrag nach § 4. BImSchG erforderlich.

In folgender Tabelle sind die erforderlichen Genehmigungsverfahren und zu beachtenden rechtlichen Rahmenbedingungen nach Mengenschwellen für den gelagerten Wasserstoff in Tonnen dargestellt, sofern keine Erzeugung vor Ort vorhanden ist und der Wasserstoff per Trailer angeliefert wird. Dabei muss die im Trailer gespeicherte Menge an Wasserstoff mit in die Betrachtung einbezogen werden. Die Beschreibungen der notwendigen Genehmigungsverfahren sind in der Anlage 11 beschrieben.

Rechtsgebiet	Anforderung	H ₂ -Mengenschwelle des gelagerten Wasserstoffs in Tonnen			Begründung
		< 3	3 ≤ ... < 5	5 ≤ ... ≤ 30	
Immissionschutz	Genehmigungsbedürftige Anlage	Nein, Baurecht beachten	Ja	Ja	4. BImSchV
	Genehmigungsverfahren	Nein	V	V	4. BImSchV
	Umweltverträglichkeitsprüfung	Nein	S	S	UVPG
	Industrieemissions-Richtlinie	Nein			4. BImSchV
Störfall	Grundpflicht	Nein	Nein	Ja	12. BImSchV
	Erweiterte Pflicht	Nein			12. BImSchV
Arbeitsschutz	Gefährdungsanalyse	Ja			ArbSchG

Infrastrukturanforderungen und -bedarfe und Analysen zur Energiebereitstellung

Rechts- gebiet	Anforderung	H ₂ -Mengenschwelle des gelagerten Wasserstoffs in Tonnen			Begründung
		< 3	3 ≤ ... < 5	5 ≤... ≤ 30	
Gefahr- stoffe	Gefährdungs- analyse (stoffbezogen)	Ja			Gefahrstoff- recht
Gefahren- abwehr	Alarmplan, Brandschutz- konzept	Ja			Gefahren- abwehr

Tabelle 6.5: Genehmigungsverfahren nach gelagerter Wasserstoff-Menge im Falle der Anlieferung¹⁷

6.1.2.1 Nutzung vorhandener Tankinfrastruktur in der Region

Für den Einsatz von Brennstoffzellenbussen wird zunächst geprüft, ob in der Region bzw. in den Städten bereits bestehende oder geplante Wasserstoffinfrastrukturen für die Nutzung durch den Busverkehr der OdVB infrage kommen. Die Entfernung zu den identifizierten umstellbaren Linien ist dabei maßgebend. Nach der Einschätzung der Nutzung ggf. vorhandener Wasserstoffinfrastrukturen werden die Infrastrukturanforderungen für die Versorgung von Brennstoffzellenbussen auf dem Betriebshof bestimmt und ob eine entsprechende Tankinfrastruktur vor Ort vorgehalten werden muss bzw. kann.

In der Region Odenwald gibt es Akteure und Projekte, die den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur in der Region entlang der Bereiche Herstellung, Speicherung, Transport, Verteilung und Nutzung von Wasserstoff unterstützen. Im Rahmen der Untersuchung des Einsatzgebietes fand eine Recherche aktueller Projekte und Konzepte statt.

Wasserstoffstrategie Hessen

Die Wasserstoffstrategie Hessens ist ein Plan des Bundeslandes Hessen, um die Nutzung von Wasserstoff als sauberer Energieträger voranzutreiben und die Energiewende zu unterstützen. Das Ziel ist Wasserstoff als wichtigen Baustein der zukünftigen Energieversorgung zu etablieren und damit zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen beizutragen sowie neue wirtschaftliche Chancen zu schaffen. Neben Wasserstoffproduktion, Wasserstofftransport und Wasserstoffinfrastruktur soll die Anwendung von Wasserstoff im Verkehrssektor

¹⁷ V = Vereinfachtes Verfahren gemäß § 19 BImSchG ohne Öffentlichkeitsbeteiligung

S = standortbezogene Vorprüfung des Einzelfalls gemäß § 7 4.BImSchV Absatz 2



Infrastrukturanforderungen und -bedarfe und Analysen zur Energiebereitstellung

stattfinden. Die Strategie sieht vor, Wasserstoff als Alternative zu fossilen Brennstoffen im Verkehrssektor zu fördern. Dies umfasst die Bereitstellung von Wasserstofftankstellen und den Einsatz von Wasserstoffbussen und -fahrzeugen.

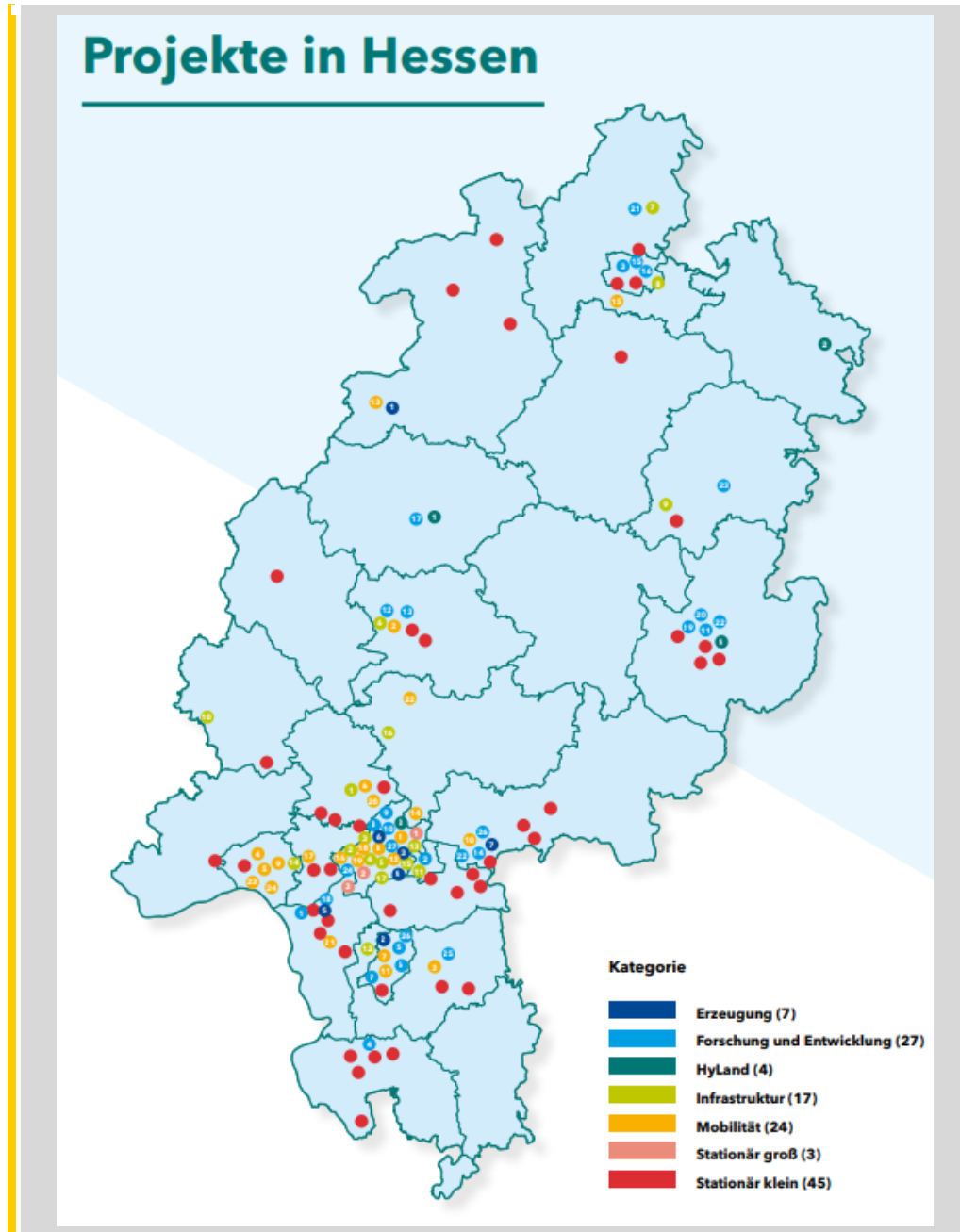


Abbildung 6.11: Wasserstoffstrategie Hessen¹⁸

¹⁸ Quelle: https://wirtschaft.hessen.de/sites/wirtschaft.hessen.de/files/2021-10/211025_Wasserstoffstrategie_Einzelseiten_kl.pdf

Infrastrukturanforderungen und -bedarfe und Analysen zur Energiebereitstellung

H2 Mobility

Die H2 Mobility baut deutschlandweit Wasserstofftankstellen für PKW und Busse auf. Gegenwärtig gibt es jedoch keine Wasserstofftankstellen im Bedienegebiet der OdVB und es sind derzeit auch keine Anlagen geplant. Nächstgelegene Wasserstofftankstellen sind in Aschaffenburg, Heidelberg oder Hirschberg geplant, die die für Busse übliche Druckstufe von 350 bar bereitstellen können.

Industriepark Frankfurt-Höchst

Im Industriepark Höchst fällt Wasserstoff in großen Mengen als Nebenprodukt an. Zusätzlich wird im Industriepark eine Wasserelektrolyse-Anlage errichtet, die mit Strom aus erneuerbaren Quellen grünen Wasserstoff produzieren wird. Der Wasserstoff kann über entsprechende Tankinfrastrukturen für die Wasserstoffbetankung für Züge und Busse genutzt werden. Es ist möglich, dass der Industriepark Höchst seine Bemühungen zur Nutzung von Wasserstoff im Verkehrssektor weiter ausbaut und weitere Wasserstoffbusse einführt.

Wasserstoffstrategie Kreis Bergstraße

Die Wasserstoff-Strategie des Kreises Bergstraße zielt darauf ab, die Region zu einer Wasserstoffmodellregion zu entwickeln. In Zusammenarbeit mit der Wirtschaft und als Teil der Wasserstoff-Modellregion Rhein-Neckar strebt der Kreis den Aufbau eines eigenen Wasserstoff-Ökosystems an. Die Strategie umfasst die gesamte Wertschöpfungskette von Wasserstoff, von der Erzeugung bis zur Anwendung. Die Schaffung einer Wasserstoff-Infrastruktur im Kreis Bergstraße soll dazu beitragen, umweltfreundlichen öffentlichen Verkehr zu ermöglichen. Der Kreis Bergstraße liegt strategisch sehr günstig, da die beiden (in Zukunft Wasserstoff transportierenden) Pipelines aus der Nord- und Ostsee sich hier treffen werden und somit den Windenergiereichen Norden mit dem Industriereichen Süden Deutschlands verbinden. Die Wasserstoffstrategie des Kreises Bergstraße¹⁹ steht derzeit vor Herausforderungen. Obwohl ab 2026 eine Flotte von Brennstoffzellenbussen geplant war und bereits 2023 ein Förderbescheid des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr vorlag, scheitert das Vorhaben nun an der Nichterteilung eines zweiten Zuwendungsbescheids für den Bau einer notwendigen Wasserstofftankstelle. Daher muss das Linienbündel vorerst mit Dieselnbussen ausgeschrieben werden. Eine gesicherte Finanzierung ist unerlässlich, da eine Verzögerung bei der Errichtung der notwendigen Infrastruktur ohne alternative Lösungen das Betriebskonzept gefährden würde. Zum aktuellen Zeitpunkt ergeben sich hier keine Synergien für einen Brennstoffzellenbusbetrieb.

¹⁹ Quelle: vrn.de, „Keine Wasserstoffbusse für Odenwald Mitte“

Infrastrukturanforderungen und -bedarfe und Analysen zur Energiebereitstellung

6.1.2.2 Nutzung eigener Tankinfrastruktur im Betriebshof

Für die Versorgung der Tankstelle wird die Anlieferung des Wasserstoffs per Vor-Ort-Erzeugung und per LKW betrachtet. Die Versorgung über Pipeline kommt aktuell nicht in Betracht, da es in der unmittelbaren Umgebung noch keine wasserstoffproduzierende Industrie respektive ein geeignetes Verteilnetz gibt.

Für das Betriebsmodell einer betriebsinternen Wasserstofftankstelle mit externer Wasserstoffbelieferung auf dem Betriebshof sind Betriebsabläufe und technisch-bauliche Anforderungen zu berücksichtigen. Grundsätzlich sollte eine Wasserstoffversorgungsinfrastruktur redundant aufgebaut sein. Dies ist entweder durch die entsprechende Ausgestaltung der eigenen Tankstelle oder die Möglichkeit zur Inanspruchnahme externer Dienstleister oder Infrastrukturen sicherzustellen. Nachfolgend werden die einzelnen Komponenten einer Wasserstofftankstelle für Vor-Ort-Erzeugung und Anlieferung von H₂ erklärt. Der Elektrolyseur ist nur bei Vor-Ort-Erzeugung erforderlich.

Trailerstellplätze

Im Regelfall sind mindestens zwei Trailerstellplätze erforderlich, um die Anlieferung des Wasserstoffs per LKW zu ermöglichen. Über die Trailerstellplätze erfolgt der Anschluss des Belieferungsfahrzeuges an die Abnahmestelle und Speicher. Die zweite Abnahmestelle des zweiten Trailerplatzes dient dazu, parallel einen weiteren Trailer nutzen zu können, falls der andere Trailerplatz noch belegt ist oder ein zeitweiser Defekt vorliegt. Bei der Vor-Ort-Erzeugung mit Elektrolyse ist der Trailerstellplatz als Rückfallebene vorgesehen (Defekt oder Wartung Elektrolyseur). Bei einer Wasserstoffanlieferung können in Anhängigkeit des Lieferkonzepts auch mehr als zwei Trailerstellplätze erforderlich sein.

Speichertanks

Die Speichertanks müssen ausreichend Speicherkapazität für die Abdeckung des täglichen Wasserstoffbedarfes der Busflotte zuzüglich einer Verbrauchsreserve bereitstellen. In den Speichertanks wird üblicherweise die doppelte Menge des täglichen Wasserstoffbedarfes zur Verfügung gestellt (Zweitagesbevorratung), um Lieferengpässe oder außerplanmäßige Einsätze abdecken zu können. Da der Verdichter technisch bedingt ein gewisses Mindestdruckniveau benötigt, kann nicht der gesamte in den Speichern gelagerte Wasserstoff zur Betankung genutzt werden. Ein gewisser Rest an Wasserstoff verbleibt aufgrund des Mindestdrucks in den Tanks. Somit ist die tatsächlich nutzbare Speicherkapazität geringer als die nominelle Speicherkapazität.

Infrastrukturanforderungen und -bedarfe und Analysen zur Energiebereitstellung

Verdichter

Der Verdichter dient dazu, den angelieferten Wasserstoff aus den Niederdrucktanks von 50 bar auf rund 500 bar für die Mitteldrucktanks zu verdichten. Damit wird die Betankung der Brennstoffzellenbusse durch Überströmen auf einer Druckebene von 350 bar ermöglicht. Der Verdichter in Kombination mit dem Mitteldruckspeicher bestimmt die Back-to-Back-Kapazität der Betankungsanlage, also die Anzahl der Busse, die hintereinander ohne wesentliche zeitliche Unterbrechung betankt werden können.

Nachfolgend ein exemplarischer Verdichter:

- » Verdichterkomponente: Twin IC 50 (Linde)
- » Verdichtungsmenge 56 kg/h
- » Spezifischer Energiebedarf 1 bis 2,8 kWh/kg
- » Elektrische Anschlussleistung 186 kW

Um den Tagesbedarf an Wasserstoff von 1.058 kg H₂ zu verdichten, sind also je nach Auslastung 1.058 – 2.963 kWh erforderlich.

Zur Sicherstellung der verdichteten Betankungsmenge an Wasserstoff ist in Abhängigkeit vom verfügbaren Betankungszeitfenster der Einsatz von zwei Verdichtern sinnvoll. Mit zwei entsprechenden Verdichtern können in 24 Stunden bis zu 2.688 kg H₂ verdichtet werden.

Eine Auslegung mit mehreren Verdichtereinheiten reduziert die Gefahr eines Totalausfalls der Versorgungsinfrastruktur erheblich. Außerdem muss die benötigte Wasserstoffmenge zum Anforderungsprofil der ein- und ausrückenden Fahrzeuge passen. Für den Anwendungsfall bei der OdVB werden je Standort zwei Verdichter empfohlen. Jede einzelne Verdichtereinheit besteht aus zwei Kompressoren, welche beide in einem 20-Fuß-Container untergebracht sind.

Auf Grundlage der ausgewählten Verdichterkomponenten kann die maßgeblich durch die Verdichter bestimmte notwendige elektrische Anschlussleistung für die Wasserstoffinfrastruktur ermittelt werden. Dabei handelt es sich um den Maximalwert. Bei der Auslegung mit zwei Verdichtern ist mit einer erforderlichen Anschlussleistung von 372 kVA zzgl. Verlusten, d. h. rund 400 kVA, zu rechnen.

Infrastrukturanforderungen und -bedarfe und Analysen zur Energiebereitstellung

Kühleinheit

Der Bedarf an Vorkühlung hängt stark von der Betankungsstrategie, den Betankungsprotokollen und der technologischen Entwicklung ab. Bei der Betrachtung wird von einer mittleren Kühlleistung ausgegangen.

Betankungseinheit

Die Betankungseinheit sollte für die Anzahl der Busse mit mindestens zwei Dispensern (Zapfsäulen) ausgerüstet sein. Diese sind durch einen entsprechenden Anfahrerschutz vor mechanischer Beschädigung zu schützen.

Sicherheitseinrichtungen

In einer Fahrzeugabstellung mit Überdachung ist auf eine ausreichende Belüftung und Sensierung zu achten, damit Ansammlungen von eventuell ausströmendem Wasserstoff vermieden werden können. Sollte ausströmender Wasserstoff detektiert werden, ist dieser durch Lüfter und Dachluken abzuleiten. Durch Schutzmauern um die Wasserstofftankstelle können eventuelle Gefahren verringert und notwendige Sicherheitsabstände reduziert werden.

Elektrolyseur (nur für die Vor-Ort-Erzeugung erforderlich)

Der Elektrolyseur wandelt z. B. über die am Markt verfügbaren Verfahren wie Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM - Elektrolyse) oder Alkalische Elektrolyse (AEL – Elektrolyse) Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff. Er muss in ausreichend großer Dimensionierung für die Abdeckung des täglichen Wasserstoffbedarfes ausgeführt sein. Es ist eine große elektrische Anschlussleistung für den Betrieb eines Elektrolyseurs erforderlich. Das verwendete Wasser muss eine besonders hohe Reinheit haben. Er arbeitet überwiegend kontinuierlich und speist so mithilfe des Verdichters die Speichertanks der Wasserstofftankstelle. Aufgrund des hohen Leistungsbedarfes wird er mit einem Transformator an das Mittelspannungsnetz angeschlossen.

Nachfolgend ein exemplarischer PEM-Elektrolyseur:

- » Elektrolyseur: MC500 (NEL)
- » Wasserstoffkapazität: 1.062 kg/ 24 h
- » Abmaße: Transformator und Elektrolyseurcontainer jeweils
12.2 m x 2.5 m x 3 m
- » Energiebedarf im Stack (ohne Nebenaggregate):
4,5 kWh/Nm³ → 50 kWh/kg
- » Ausgangsdruck: 30 bar

Infrastrukturanforderungen und -bedarfe und Analysen zur Energiebereitstellung

Technische Auslegung der Wasserstoff-Tankstellen mit Anlieferung des Wasserstoffs in Trailern auf den Betriebshof

Für die Versorgung der Tankstellen wird die Anlieferung des Wasserstoffs per LKW betrachtet.

Es wird ein Konzept mit gasförmigem Wasserstoff (GH_2) per Trailer-Anlieferung empfohlen. Die gasförmige Anlieferung kommt gegenüber flüssigem Wasserstoff ohne extrem niedrige Temperaturen aus und ist daher aktuell am weitesten verbreitet. Die Anschlussleistung wird maßgeblich durch die erforderliche Anschlussleistung der Verdichter bestimmt. Zur Betankung der Fahrzeugflotte auf einem Betriebshof sind folgende Komponenten notwendig:

- » Trailerstellplätze zur Anlieferung von Wasserstoff
- » Speichertanks für die erforderliche Menge Wasserstoff
 - Niederdruckspeicher (ND-Tanks) für die Aufnahme des angelieferten Wasserstoffs
 - Mitteldruckspeicher (MD-Tanks) für die Zwischenspeicherung des verdichteten Wasserstoffs
- » Verdichter
- » Kühleinheit
- » Betankungseinheit mit 2 Dispensern (Zapfstellen)
- » Zusätzliche Sicherheitseinrichtungen (H_2 -Sensierung, Belüftung, Schutzwände zur Minimierung des Sicherheitsabstandes)

Die Abbildung 6.12 zeigt exemplarisch eine typische Kubatur. In der darauffolgenden Tabelle sind die konkreten Elemente zusammengefasst. Es handelt sich dabei um eine erste, grobe technische Abschätzung, die im Einzelfall durch einen qualifizierten Fachplaner für Gasttankstellen zu verifizieren ist.

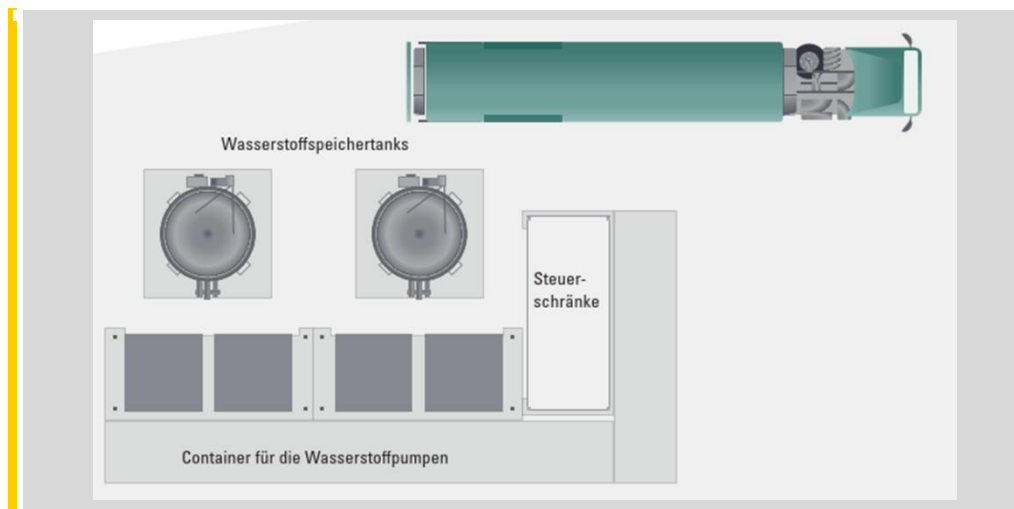


Abbildung 6.12: Übersichtsplan Wasserstofftankstelle (Quelle: NOW)

Infrastrukturanforderungen und -bedarfe und Analysen zur Energiebereitstellung

Komponente	Anzahl der Infrastrukturkomponenten						
	BE	HÖ	HU	MI	RE	RI	WE
Trailerstellplätze	2	2	2	2	2	2	2
Niederdruckspeicher	1	1	1	3	1	1	1
Mitteldruckspeicher	1	1	1	2	1	1	1
Verdichter	2	2	2	2	2	2	2
Kühleinheit	1	1	1	1	1	1	1
Dispenser	2	2	2	2	2	2	2
Zusätzliche Sicherheits-einrichtungen	1	1	1	1	1	1	1

Tankinfrastrukturkomponenten je Betriebshof (BE=Beerfelden, HÖ=Höchst, HU=Hummetroth, MI=Michelstadt, RE=Reichelsheim, RI=Rimhorn, WE=Weilbach)

Die Verteilung der Tankinfrastruktur auf verschiedene Betriebshöfe sowie der genaue Infrastrukturoberlauf sind in Anlage 11 beigefügt.

Fazit Tankinfrastruktur

In der Region befindet sich noch wenig lokale Wasserstoffinfrastruktur und ein Teil dieser befindet sich gerade erst in der Planung/ im Aufbau. Auch die redundante Absicherung durch nahegelegene Tankstellen mit einem Druckniveau von 350 bar ist nicht vorhanden. Folglich ist eine Nutzung vorhandener Tankinfrastrukturen für die OdVB aktuell und in naher Zukunft tendenziell nicht möglich.

Infolge nicht nutzbarer externer Wasserstoffinfrastrukturen ist der Aufbau stationärer Wasserstoffinfrastruktur auf den Betriebshöfen erforderlich. Im Fokus steht die Anlieferung von gasförmigem Wasserstoff (GH₂) per LKW-Trailer.

Für den Betrieb der gesamten Busflotte der OdVB mit Wasserstoff sind entsprechende Mengen Wasserstoff und die Betankungsinfrastruktur je Betriebshof vorzuhalten. Auf diese muss mit sehr hoher Verfügbarkeit zugegriffen werden können, um dem Status der kritischen Infrastruktur des Busbetriebs gerecht werden zu können.

Mit den vorliegenden Randbedingungen:

- » Sieben sich stark voneinander unterscheidende Standorte,
- » vorherrschende Platzbedingungen auf den Liegenschaften,
- » mitunter sehr geringen Distanzen zu lärmkritischen Anrainern sowie

Infrastrukturanforderungen und -bedarfe und Analysen zur Energiebereitstellung

- » mögliche Versorgung mit elektrischer Energie

geht die Errichtung einer eigenen Tankinfrastruktur auf einem der Betriebshöfe nur mit einem extrem hohen planerischen, zeitlichen ökonomischen Aufwand und damit verbundenem großen Erfolgsrisiko einher.

Die Betriebshofflächen sind tendenziell allesamt zu klein, um für die Phase des Fahrzeughochlaufs die Tankinfrastruktur für Diesel weiterhin vorzuhalten sowie eine hinreichend groß dimensionierte Wasserstofftankstelle errichten zu können. Des Weiteren sind durch benachbarte Wohn- und Gewerbegebiete teils sehr hohe Aufwände zu erwarten, um die geltenden lärmschutztechnischen Vorgaben einhalten zu können.

6.2 Konzeption der Fahrzeugabstellung mit Lade-/Tankinfrastruktur

Bei der Fahrzeugabstellung sind insbesondere die infrastrukturellen Besonderheiten der Ladesysteme zu beachten. Für den Betriebshof geeignete Ladesysteme sind meist als Säulen ausgeführt und müssen in die bestehenden Hallen oder Aufstellflächen integriert werden. Hierfür wurde ein Abstellkonzept für einen Betriebshof inklusive Fahrwege entworfen. Es wird geprüft, inwieweit Ladeinfrastruktur in die bestehende Abstellung integriert werden kann, jedoch muss aufgrund des Platzbedarfs der aufzustellenden Ladetechnik eine Anpassung des Abstellkonzeptes in Betracht gezogen werden. Bei Hallenabstellung oder anderweitiger Deckenmontage umfasst dies auch die Berechnung des Gewichtes der Ladetechnik und ermöglicht damit die Prüfung der Tragfähigkeit durch Dritte.

Die Umstellung der Fahrzeugflotte auf alternative Antriebe erfordert eine Lade- und/ oder Tankinfrastruktur, welche tiefgreifende Baumaßnahmen auf den Betriebshöfen zur Folge haben und einen höheren Platzbedarf benötigen. Das Ziel des Kapitels ist es daher, für eine definierte Fahrzeuganzahl den Flächenbedarf für verschiedene Varianten zu ermitteln, da die genauen Standorte der zukünftigen Betriebshöfe noch nicht bekannt sind.

Unter Berücksichtigung der technologiespezifischen Besonderheiten werden verschiedene Varianten zur Fahrzeugaufstellung für 30 Solobusse mit einer Länge von ca. 12 m und zwei Überlandbusse mit einer Länge von ca. 15 m untersucht. Dabei beinhaltet der Betriebshof mindestens ein Aufenthaltsgebäude mit sanitären Einrichtungen, Ein- und Ausfahrten, Mitarbeiterparkplätze und technologiespezifische Infrastruktur. Folgende Varianten werden betrachtet:

- » Variante 1: Blockaufstellung für batterieelektrische Busse mit Ladeinfrastruktur

Infrastrukturanforderungen und -bedarfe und Analysen zur Energiebereitstellung

- » Variante 2: Aufstellung „schräg“ (Fischgrätenaufstellung) für batterieelektrische Busse mit Ladeinfrastruktur
- » Variante 3: Blockaufstellung für Brennstoffzellenbusse mit Tankinfrastruktur

Jede Variante wird zusätzlich mit einem optionalen Werkstattgebäude untersucht.

Um die Eignung eines Standortes für alternative Antriebe einschätzen zu können, muss der grundlegende Flächenbedarf für die Abstellung einer Busflotte von insgesamt 32 Fahrzeugen mit Lade- oder Tankinfrastruktur ermittelt werden. Danach können weitere erforderliche Schritte zur Standortsuche für einen zukunftsfähigen Ausbau durchgeführt werden.

Im vorliegenden Bericht sind folgende Anforderungen an den Standort definiert:

- » Fahrzeugabstellung unter Berücksichtigung betrieblicher Abläufe, Schleppkurven und Verkehrsbeziehungen
- » Abstellung erfolgt als Freiabstellung oder als überdachte Fläche (Carport), keine Halle
- » Ladung abgestellter Batteriebusse über ein induktives Steckersystem
- » Tankinfrastruktur erfolgt als Vor-Ort-Betankung mit Anlieferung per Trailer, Wasserstoffbedarf ist in AP 3.2 definiert
- » Tankinfrastruktur unter Berücksichtigung von Sicherheitsabständen sowie Schleppkurven und Verkehrsbeziehungen zur Anlieferung von Wasserstoff per Trailer
- » Einteilung in Brandabschnitte mit einer geeigneten Maximalanzahl an Fahrzeugen entsprechend der Empfehlungen aus der VDV-Schrift 825, Abtrennung via Brandschutzmauern (rot dargestellt)

Infrastrukturanforderungen und -bedarfe und Analysen zur Energiebereitstellung

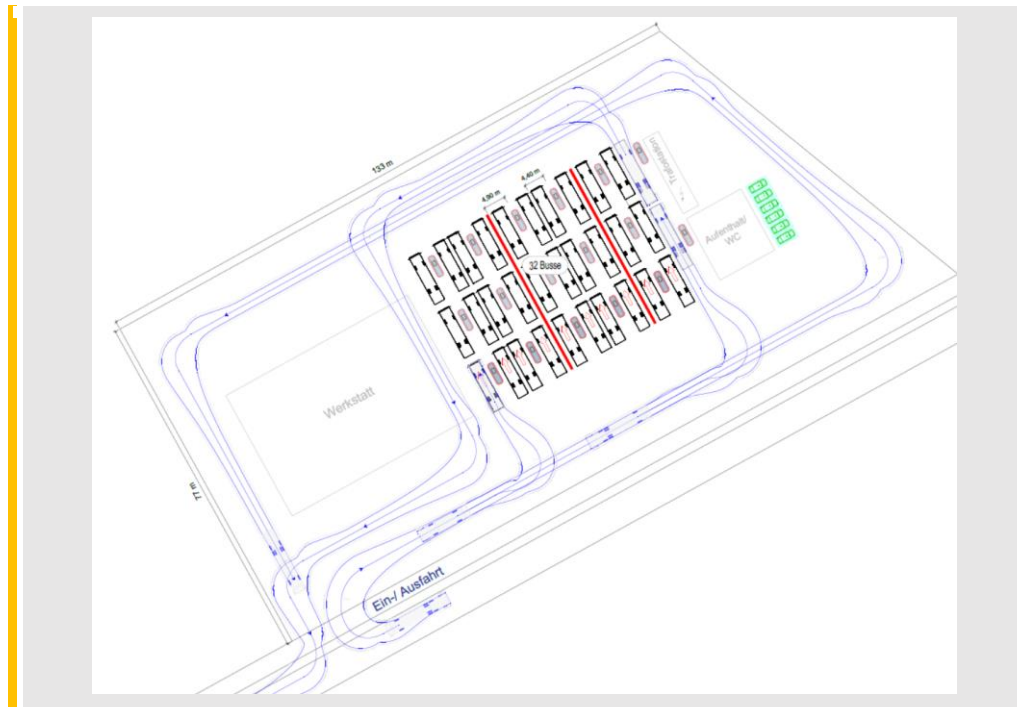


Abbildung 6.13: Fahrzeugabstellung - Variante Blockaufstellung mit Gebäude für die Werkstatt

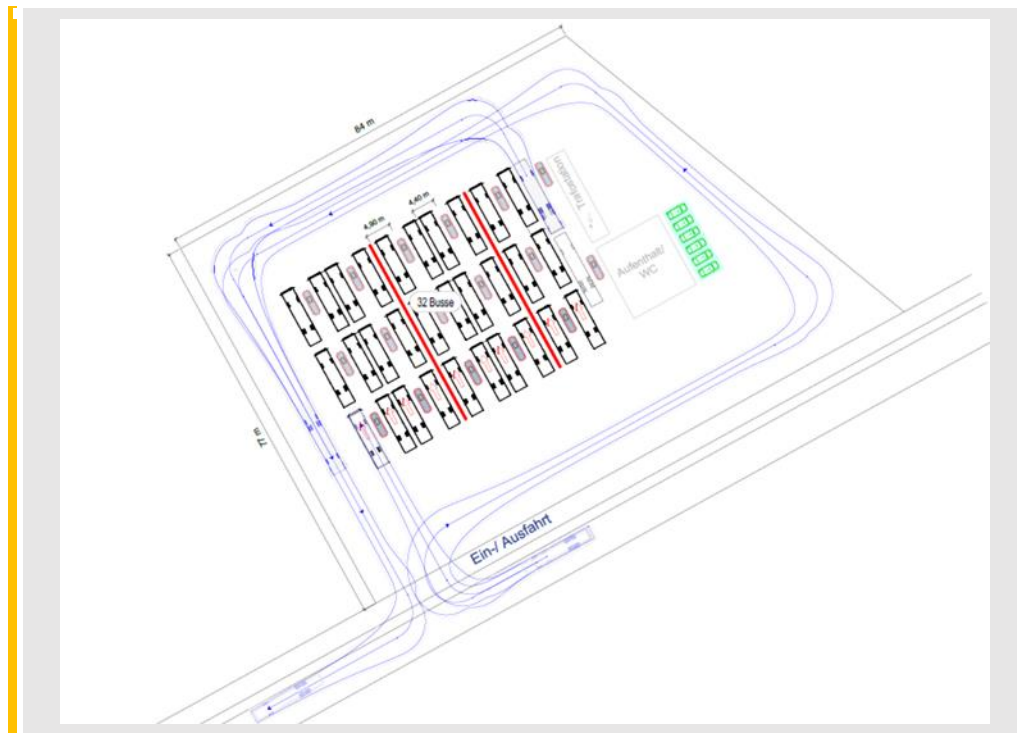


Abbildung 6.14: Fahrzeugabstellung - Variante Blockaufstellung ohne Gebäude für die Werkstatt

Infrastrukturanforderungen und -bedarfe und Analysen zur Energiebereitstellung

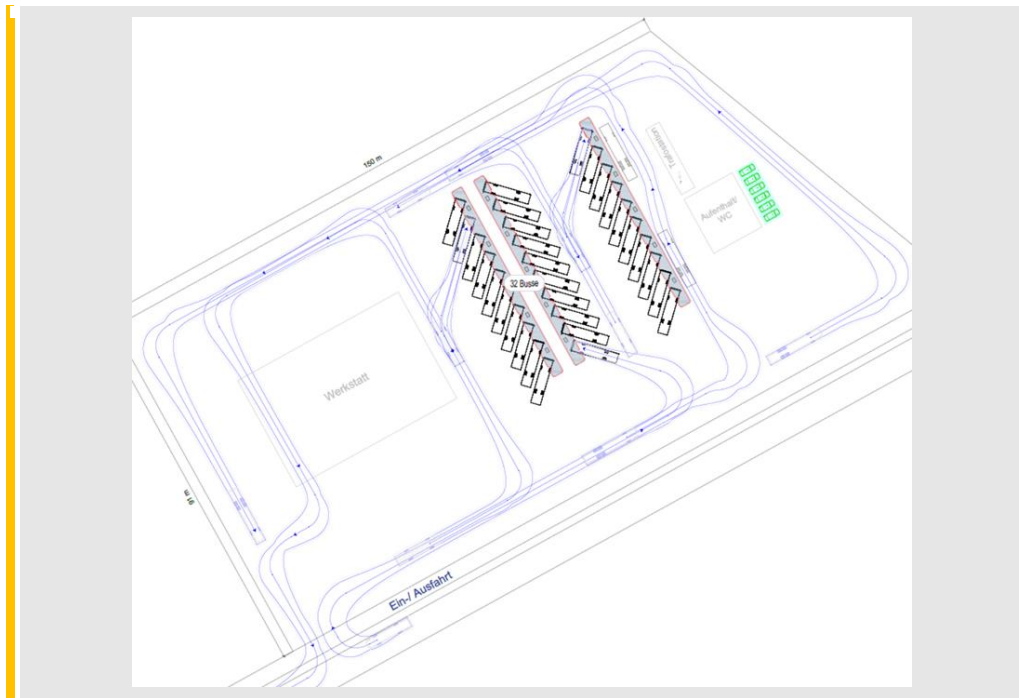


Abbildung 6.15: Fahrzeugabstellung - Variante Aufstellung „schräg“ (Fischgräte) und Blockaufstellung

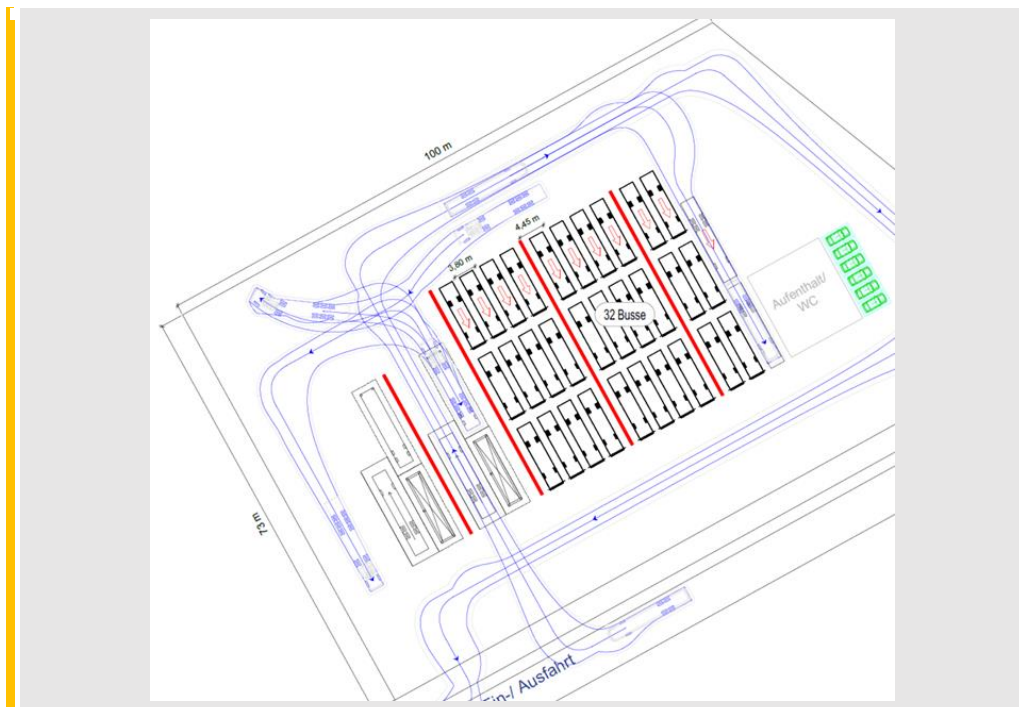


Abbildung 6.16: Variante Blockaufstellung mit H2-Tankinfrastruktur mobile Infrastruktur mit Gebäude für die Werkstatt

Infrastrukturanforderungen und -bedarfe und Analysen zur Energiebereitstellung

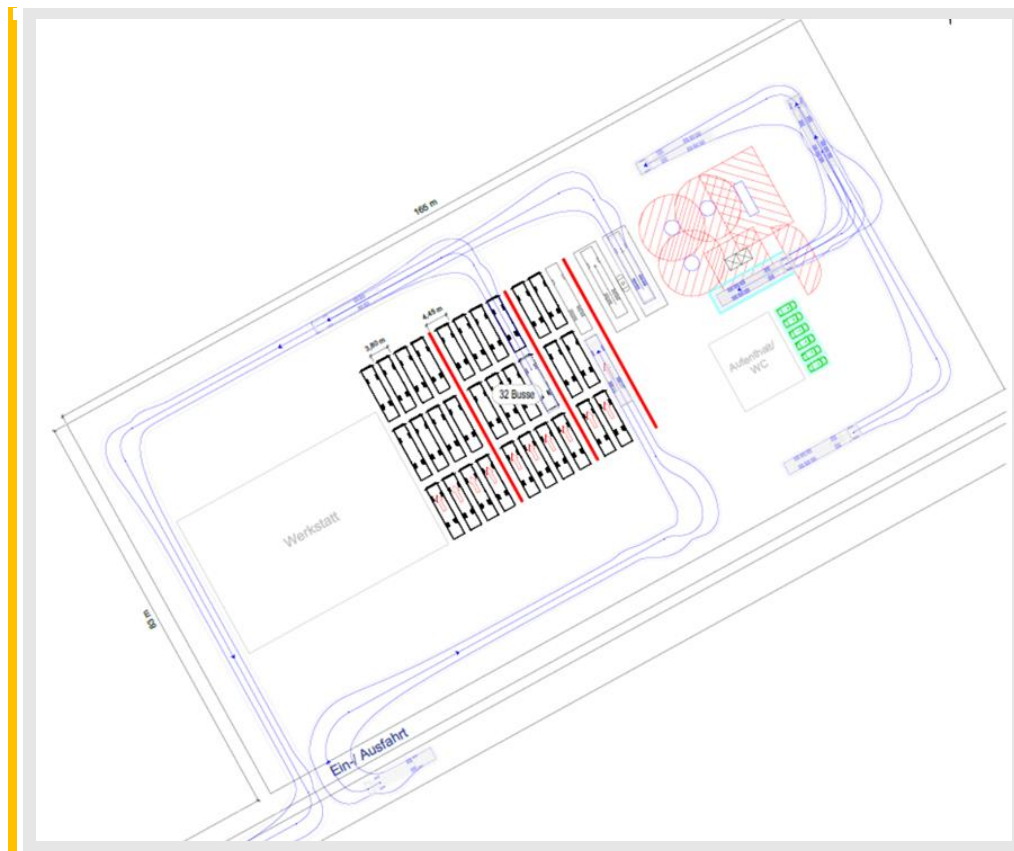


Abbildung 6.17: Variante Blockaufstellung mit H2-Tankinfrastruktur stationäre Infrastruktur mit Gebäude für die Werkstatt

Zusammenfassung aller Varianten nach Flächenbedarf:

	Variante	Länge	Breite	Flächenbedarf
1a	Blockaufstellung mit Werkstattgebäude für BEB ²⁰	133 m	77 m	ca. 11.450 m ²
1b	Blockaufstellung ohne Werkstattgebäude für BEB	84 m	77 m	ca. 7.650 m ²
2a	Schrägaufstellung mit Werkstattgebäude für BEB	150 m	91 m	ca. 15.250 m ²
2b	Schrägaufstellung ohne Werkstattgebäude für BEB	97 m	91 m	ca. 10.450 m ²

²⁰ BEB = batterieelektrische Busse

Infrastrukturanforderungen und -bedarfe und Analysen zur Energiebereitstellung

3a	Blockaufstellung mit Werkstattgebäude für BZ ²¹ -Fahrzeuge	165 m	83 m	ca. 13.750 m ²
3b	Blockaufstellung ohne Werkstattgebäude für BZ-Fahrzeuge	113 m	75 m	ca. 9.620 m ²
3c	Blockaufstellung ohne Werkstattgebäude für BZ-Fahrzeuge (mobile Tankstelle)	100 m	73 m	ca. 8.340 m ²

Tabelle 6.6: Variantenvergleich der Aufstellungen

Ein zukünftiger Betriebshofstandort bei der OdVB hat als primäre Aufgabe die reine Fahrzeugabstellung. D.h. eine Werkstatt mit entsprechender Instandhaltungstiefe sowie weitere Infrastruktur, wie eine Waschanlage, ist nach aktuellem Stand nicht vorgesehen. Ergänzt wird die Abstellung in Block- oder Schrägaufstellung um die entsprechende Elektroenergieversorgung durch eine Ladeinfrastruktur oder um die Tankinfrastruktur als Anlieferung per Trailer.

Bei einer Anpassung auf die Bedürfnisse alternativ angetriebener Busse sollte der Brandschutz mit betrachtet werden. Die noch in der Überarbeitung befindliche VDV-Schrift 825 „Auswirkungen der Clean Vehicles Directive im Linienbus auf Betriebshöfe und Werkstätten“ schlägt etwa 20 Fahrzeuge als Maximalanzahl je Brandabschnitt vor. Diese Zahl dient als grober Richtwert und hängt von individuellen Gegebenheiten vor Ort oder weiteren Randbedingungen ab. Eine konkrete Randbedingung kann bspw. die Vorgabe vom Versicherer sein. Im konkreten Fall wurde eine maximale Anzahl von 12 Fahrzeugen je Brandabschnitt berücksichtigt.

Grundsätzlich sollten vorab die Verkehrsbeziehungen auf dem Betriebshof definiert werden (im oder gegen den Uhrzeigersinn). Dabei sind möglichst wenige Vorfahrtssituationen zu bevorzugen. Ebenfalls sollte das Rückwärtsfahren von Solo- oder Maxibussen grundsätzlich vermieden werden. Diese Aspekte sind in die Fahrzeugabstellungskonzepte eingeflossen.

Nach Festlegung eines geeigneten Standorts sowie der favorisierten Antriebstechnologie kann anschließend eine Detailplanung des Betriebshofes durchgeführt werden. Hierbei kann die VCDB in der Umsetzungsplanung unterstützen.

²¹ BZ = Brennstoffzelle

Maßnahmen zur Effizienzsteigerung des Gesamtsystems oder zur Einbindung lokaler Erzeugungskapazitäten

7 Maßnahmen zur Effizienzsteigerung des Gesamtsystems oder zur Einbindung lokaler Erzeugungskapazitäten

In diesem Kapitel wird die Nutzung von gesteuertem Laden (Lade- und Last-Management), betrachtet. Damit einhergehend wird die notwendige IT-Infrastruktur konzeptioniert.

7.1 Grundlagen zum Lademanagement und Konzeption IT-Systemarchitektur

Um die Netzlast des Busbetriebshofs während der parallelen Nachladung einer Flotte von Vollladern zu minimieren, können über ein Lademanagement die Ladezyklen reguliert und über den kompletten verfügbaren Ladezeitraum verteilt werden. In Abhängigkeit von Batterie-Energieinhalten und Fahrplan sollten die Traktionsspeicher also möglichst zeitversetzt geladen werden.

Das betriebliche Konzept umfasst generell den Aufbau der IT-Systemarchitektur zur intelligenten Steuerung und Kontrolle aller den Busbetrieb betreffenden Prozesse auf dem Betriebshof während der Betriebsruhe sowie außerhalb des Betriebshofes während der Einsatzzeiten. Kern der elektrobus-spezifischen Funktionen der IT-Systeme soll ein Lademanagementsystem (LMS) für die Ladung von Elektrobussen sein.

Bezogen auf den Betrieb mit Elektrobussen werden das Lademanagementsystem, das Energiebeschaffungssystem und das Betriebshofmanagementsystem als Kernsysteme betrachtet. Im Folgenden werden Funktion und Optimierungsgrößen des Lademanagementsystems detailliert beschrieben.

7.1.1 Funktionsbeschreibung

Mit wachsender Anzahl der Elektrobusse und damit zunehmender Auslastung der Ladetechnik ist ein Lademanagementsystem sehr empfehlenswert. Es ist davon auszugehen, dass diese Systemkomponente zunächst ausschließlich für betriebshofseitig installierte Ladeinfrastruktur eingesetzt werden muss. Grundsätzlich sollte aber auch eine Integration weiterer Ladepunkte entweder auf der Strecke oder an einem nahen Abstellort möglich sein.

Maßnahmen zur Effizienzsteigerung des Gesamtsystems oder zur Einbindung lokaler Erzeugungskapazitäten

Das LMS steuert und überwacht die Ladeinfrastruktur und optimiert die Nutzung mit Blick auf ihren Wirkungsgrad und ihre Verfügbarkeit, die Betriebsflexibilität und Fahrzeugverfügbarkeit sowie ggf. den Zustand der Traktionsbatterie.

Kernaufgabe ist dabei die Erstellung eines Ladefahrplans für die Ladung der Elektrobusse. Dieser enthält folgende Informationen in Abhängigkeit von der Zeit in einem ausreichend genauen Zeitraster (bevorzugt Minutenwerte) für ein ausreichend großes Zeitfenster (bevorzugt nächste 24 Stunden):

- » Ladepunktzuordnung der Busse,
- » Benötigtes Ladezeitfenster pro Ladepunkt/ Bus,
- » Verfügbare Ladeleistung pro Ladepunkt/ Bus sowie
- » Gesamtladeleistung.

Das LMS steuert ausgehend von der Ladeoptimierung die folgenden Vorgänge in der Ladeinfrastruktur:

- » Ladestart initiieren,
- » Ladeleistung pro Ladepunkt regeln,
- » Ladeunterbrechungen (Pausen) aktivieren,
- » Ladestopp auslösen sowie
- » Ladezeitfenster verschieben.

Über die Open-Charge-Point-Protocol-Anbindung (OCPP) der Ladegeräte zum LMS können die jeweiligen Befehle ladepunktgenau von der Ladeinfrastruktur umgesetzt werden.

Zusätzlich zum reinen Ladevorgang kann ein Lademanagementsystem die Vorkonditionierung von Fahrzeugen am Ende des Ladevorgangs steuern. Dies hat den Vorteil, dass die Fahrzeuge zum geplanten Einsatzzeitpunkt bereits in gewünschtem Maße vorkonditioniert sind (z.B. der Innenraum klimatisiert oder geheizt, Traktionsbatterie konditioniert), ohne die dafür notwendige Energie aus der Traktionsbatterie entnehmen zu müssen und dadurch die Reichweite des Fahrzeugs negativ zu beeinflussen.

7.1.2 Optimierungsgrößen

Aus den folgend erläuterten Optimierungsgrößen sollte das Lademanagementsystem einen optimierten Ladefahrplan erstellen.

7.1.2.1 Wirkungsgrad

Wegen der hohen Energiebedarfe auf einem Elektrobusbetriebshof haben schon kleine Verluste entlang der Übertragungsstrecke von der Übergabestation zu den

Maßnahmen zur Effizienzsteigerung des Gesamtsystems oder zur Einbindung lokaler Erzeugungskapazitäten

Bussen hohe Auswirkungen auf den absoluten Energiebedarf am Netzanschlusspunkt und somit auf die Kosten für den Strombezug. Die Abhängigkeit von Auslastung und Wirkungsgrad muss daher vom LMS bei der tatsächlichen Ladepunktzuordnung als Antwort auf die Vorgaben aus dem Betriebshofmanagementsystems (BHMS) berücksichtigt werden. Auf diese Weise soll bei der Erstellung des Ladefahrplans der Wirkungsgrad der Ladegeräte und Umrichterstationen optimiert werden – da die an die Ladegeräte angeschlossenen Ladepunkte nicht unbedingt entsprechend ihrer Zugehörigkeit zu den Ladegeräten auf dem Betriebshof angeordnet sind.

Dazu muss das LMS die verschiedenen Wirkungsgradkurven der Trafos und Ladegeräte bzw. Umrichterstationen kennen und durch Optimierung des Leistungsbereiches einen möglichst hohen Wirkungsgrad für jedes einzelne Ladegerät und somit für jede Umrichterstation und jeden Trafo gewährleisten. Da der Wirkungsgrad jeder Komponente von ihrer Auslastung, also Ausgangsleistung, abhängt, müssen die Ladepunkte entsprechend besetzt und angesteuert werden, wobei übergeordnet die Vorgaben des BHMS einzuhalten sind.

Daten über den Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Auslastung erhält das LMS statisch über die von den Lieferanten der Ladetechnik und Kompaktstationen angegebenen Wirkungsgradkennlinien. Anhand der Wirkungsgradkennlinien ist die Verteilung der Ladeleistung auf die Ladepunkte zu optimieren. Theoretisch ist auch eine dynamische Information über die aktuellen Wirkungsgrade durch Messung denkbar. Diese ist nur sinnvoll, wenn kurzfristig Umlauf- und Ladefahrplan angepasst werden müssen. In diesem Fall sind die Daten dynamisch zu verarbeiten.

7.1.2.2 Betriebsflexibilität und Fahrzeugreserve

Das LMS soll größtmögliche Betriebsflexibilität ermöglichen, indem es die Ladung der Fahrzeuge an die Abläufe auf dem Betriebshof und den Fahrbetrieb anpasst. Folglich muss es die vom BHMS vorgegebenen Ladepunktzuordnung in Verbindung mit dem verfügbaren Ladezeitfenster je Ladepunkt entsprechend der Fahr- und Umlaufplanung und der geplanten Instandhaltungsmaßnahmen optimieren. Dabei wird die Variante mit der größtmöglichen Flexibilität bevorzugt. Zudem muss ausreichend Zeit für die Servicevorgänge vorgehalten werden und die Zuführung zum Service idealerweise flexibel vor oder nach einem Ladevorgang ausgeführt werden können, statt diese in einem festen zeitlichen Raster einzuplanen.

Ausreichende Betriebsflexibilität muss auch durch die Vorhaltung einer ausreichend großen Fahrzeugreserve gewährleistet sein. Das LMS muss hierfür eine ausreichende Ladung sowohl der planmäßig für den Betrieb vorgesehenen

Maßnahmen zur Effizienzsteigerung des Gesamtsystems oder zur Einbindung lokaler Erzeugungskapazitäten

Fahrzeuge entsprechend Fahr- und Umlaufplanung als auch der Verfügungswagen und Betriebshofreserve vorsehen.

Das Verkehrsunternehmen muss in der Lage sein, eine manuelle Priorisierung dieser Optimierungsgröße durchzuführen, um kurzfristig eine bestimmte Anzahl an Fahrzeugen für unerwartete Ereignisse bereitstellen zu können. Dies soll durch die Einstellung der Ladeoptimierung mit der kürzesten Ladezeit möglich sein. Die anderen Optimierungsgrößen des LMS müssen in diesem Fall in der Optimierung entsprechend hintenangestellt werden.

7.1.2.3 Gesundheits- und Alterszustand der Batterie

Derzeit gibt es noch kein physikalisches Modell, welches die Batteriealterung hinreichend zuverlässig beschreibt. Bekannt ist, dass der Alterungsvorgang vor allem von zu hohen Lade- und Entladeströmen (Kennwert ist die C-Rate, die den maximalen Ladestrom einer Batterie als Verhältnis von Kapazität zu einer Stunde Ladung oder Entladung angibt), Entladetiefen und zu hohen Temperaturen beschleunigt wird. Die Parameter des Ladevorgangs müssen also vom LMS genau gesteuert werden. Unabhängig vom Ladevorgang können mechanische Belastungen der Zellen den Alterungsvorgang beschleunigen. Ab einer Restkapazität (bezogen auf die initiale Kapazität zum Beginn des Lebens) von 80 % oder darunter zeigen die meisten Lithium-basierten Batterien eine Änderung ihres Alterungsverhaltens: Ihre Leistungskurve erfährt einen deutlichen Knick und die nichtlineare, rapide Alterung beginnt.

Hinsichtlich der Batteriealterung übernimmt das fahrzeugseitige BMS bereits die wichtigsten Aufgaben wie den Schutz vor zu hohen Ladeströmen und -spannungen sowie das Balancing der einzelnen Zellen/ Zellenstränge. Eine Optimierung nach Gesundheits- und Alterszustand der Batterie ist nach derzeitigem Wissensstand durch das LMS nicht direkt umzusetzen, da die Batterien aus Sicht der Ladeinfrastruktur eine Blackbox darstellen: In der Regel arbeiten die Batteriemagementsysteme als geschlossene Systeme mit einer proprietären Steuerung des Batterie- oder Fahrzeugherstellers.

Andererseits sind herstellerabhängig große Unterschiede in der Batterieauslegung und im Batteriemangement möglich. Dies betrifft vor allem die Zellchemie, die Verschaltung der Zellen sowie die Frage welcher Bereich der technisch möglichen Ladekapazität und -leistung dem Nutzer zur Verfügung gestellt wird.

Abhängig vom kommerziellen Modell können verschiedene Strategien je Bus sinnvoll sein. Beispielsweise könnte bei einer durch den Hersteller garantierten Batterielebensdauer oder einer Miete der Fahrzeugbatterie der Faktor Batteriealterung vom LMS außer Betracht gelassen werden. Für den Fall, dass das

Maßnahmen zur Effizienzsteigerung des Gesamtsystems oder zur Einbindung lokaler Erzeugungskapazitäten

wirtschaftliche Risiko beim Verkehrsbetrieb liegt, z. B. weil eine Garantie nicht die Batteriealterung abdeckt, muss die Ladung möglichst schonend und somit optimiert auf die Lebensdauer erfolgen.

Das LMS muss in jedem Fall Einstellmöglichkeiten zur batterieschonenden Ladung vorsehen, um neue Erkenntnisse zur Batteriealterung, eine geänderte Datenverfügbarkeit und verschiedene Nutzungsmodelle berücksichtigen zu können. Hierfür muss der Ladevorgang an jedem einzelnen Ladepunkt in Abhängigkeit vom angeschlossenen Bus und dem Zustand seiner Batterie mit Blick auf Ladeleistung und den Ladezustand des Fahrzeugs gesteuert werden können. Ebenso müssen Zeiten zum Balancing der Batteriezellen bei der Planung der Ladevorgänge berücksichtigt werden können.

Nicht alle Fahrzeugumläufe benötigen die volle Reichweite und somit Kapazität. Deswegen muss neben der Leistung auch der SOC zum Ende der Ladung als Parameter steuerbar sein, sodass nicht in jedem Fall eine Vollladung vorzunehmen ist. Dies könnte neben der Schonung der Batterie auch dazu dienen, bei kurzen Umläufen die zeitaufwändige Vollladung der restlichen 10 bis 20 % Kapazität zu vermeiden oder die Strombezugskosten durch Verschieben der Ladezeiten verstärkt zu senken. Ein möglicher Nachteil hierbei ist allerdings die geringere Flexibilität hinsichtlich Reservekapazität und kurzfristige Anpassung der Umlaufzuordnung als Reaktion auf betriebliche Erfordernisse.

7.1.3 Potential des Lademanagements

Durch das Gegenüberstellen von nicht optimierten Ladevorgängen (gestaffelte Ladung) und optimierten Ladevorgängen („gleichmäßige Ladung“) kann das Potential eines LMS herausgestellt werden. Optimierungsgröße ist hier die Begrenzung der Maximal- bzw. Spitzenleistung. Die Begrenzung der Leistung macht sich monetär in dem zu zahlenden leistungsabhängigen Teil der Stromkosten bemerkbar.

In der folgenden Abbildung ist die Lastkurve für einen Betriebstag zur Ladung von 62 Elektrobussen mit und ohne Optimierung kumuliert über alle Betriebshöfe dargestellt.

Maßnahmen zur Effizienzsteigerung des Gesamtsystems oder zur Einbindung lokaler Erzeugungskapazitäten

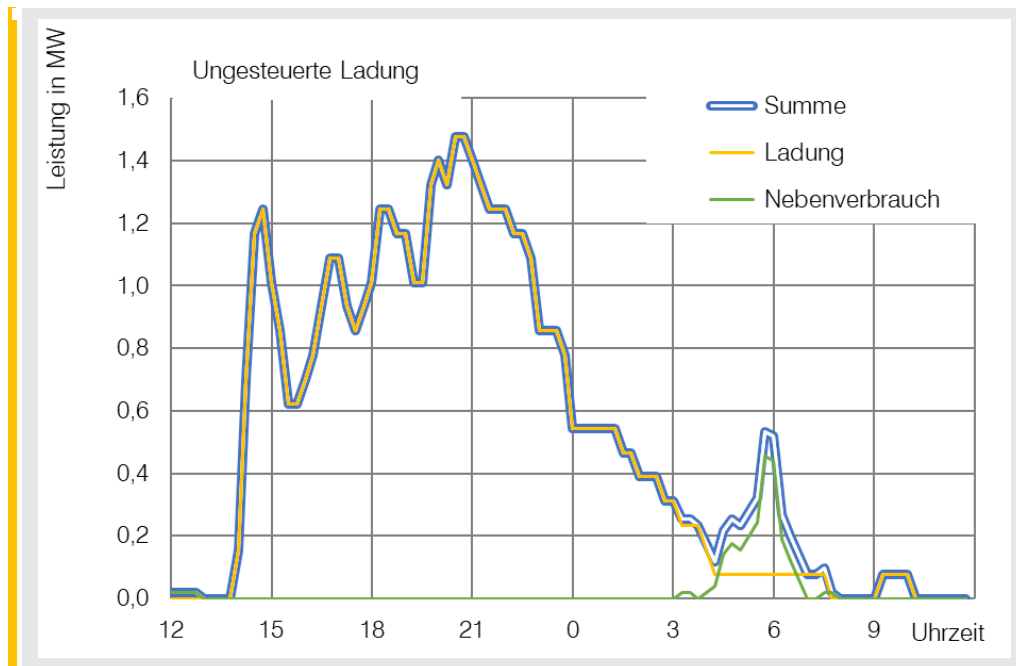


Abbildung 7.1: Lastkurve Ladung ohne Optimierung

In Abbildung 7.1 ist die Leistung über die Zeit für die gestaffelte Ladung mit fester Leistung von 70 kW dargestellt. Die gelbe Kurve gibt die Leistung zum Laden der Batteriebusse, die grüne Kurve die Leistung zum Vorkonditionieren der Fahrzeuge, beginnend 30 Minuten vor dem Ausrücken, und die blaue Kurve die Summe an. Mit Eintreffen der Batteriebusse gegen 14 Uhr steigt die Leistung stark an, bis sie gegen 21 Uhr ihr Maximum von 1,5 MW erreicht hat. Im weiteren Verlauf fällt die Leistung bis ca. 3 Uhr auf einen Leistungsbedarf von ca. 0,1 - 0,2 MW stark ab, der bis ca. 6 Uhr auf ca. 0,5 MW ansteigt. Dieser Anstieg ist durch den Stromverbrauch der gleichzeitig vorkonditionierenden Fahrzeuge zu begründen.

In Abbildung 7.2 ist die Leistung während der gleichmäßigen Ladung über die Standzeit aufgetragen. Im Vergleich zur gestaffelten Ladung tritt hier keine ausgeprägte Leistungsspitze auf. Der Leistungsbedarf entsteht im Zeitraum von 21 bis 6 Uhr, wobei der maximale Leistungsbedarf ca. 1,3 MW beträgt. Zwischen 3 Uhr und 6 Uhr sinkt die Leistung auf einen Wert von ca. 0,1 MW, welcher bis 12 Uhr weiter abfällt.

Maßnahmen zur Effizienzsteigerung des Gesamtsystems oder zur Einbindung lokaler Erzeugungskapazitäten

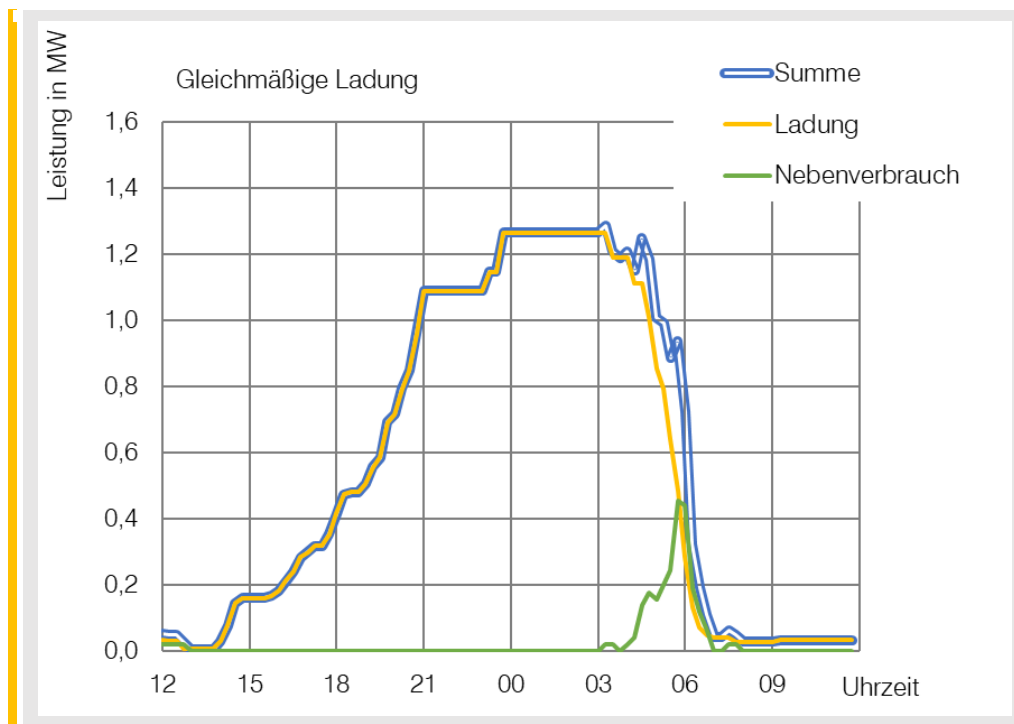


Abbildung 7.2: Lastkurve Ladung mit Optimierung

Durch eine Optimierung der Ladevorgänge kann die Spitzenleistung von 1,5 MW auf 1,3 MW gesenkt werden. Dies entspricht einer Reduzierung der Leistungsspitze um ca. 13 %.

In der Tabelle 7.1 sind die Werte für die Spitzenleistung mit und ohne Optimierung sowie die Energiewerte für ein Jahr für den Einsatz von 62 Elektrobusen aufgeführt.

Anzahl Batteriebusse	Leistungsbedarf ohne Optimierung	Leistungsbedarf mit Optimierung	Jahresenergiebedarf
62	1,5 MW	1,3 MW	11,9 MWh/a

Tabelle 7.1: Spitzenleistung mit und ohne Optimierung

Die Netzentgelte sind stark vom Energieversorger bzw. vom Netzbetreiber abhängig. Um mögliche Einsparpotentiale aufzuzeigen, wurden von mehreren Netzbetreibern die leistungsabhängigen Netzentgelte berechnet. Der ermittelte Mittelwert wurde in der Berechnung herangezogen (Arbeitspreis 35 ct/kWh, Leistungspreis 82 €/kW x Jahr, vgl. Preisliste Tennet 2023). die in Tabelle 7.2 aufgeführten beispielhaften Netzentgelte wurden für jeden Betrachtungsfall, in Abhängigkeit des spezifischen Leistungs- und Jahresenergiebedarfs ermittelt.



Maßnahmen zur Effizienzsteigerung des Gesamtsystems oder zur Einbindung lokaler Erzeugungskapazitäten

Anzahl Batteriebusse	Stromkosten ohne Optimierung	Stromkosten mit Optimierung	Einsparpotenzial durch Optimierung
62	127.165 €	110.765 €	16.400 €

Tabelle 7.2: Stromkosten mit und ohne Optimierung

Da die Leistungsbedarfe nicht über einen einzelnen Energiebezugspunkt aufgenommen werden, sondern sich über 7 Betriebshöfe verteilen, ist das Gesamteinsparpotenzial durch eine Optimierung der Ladeverläufe geringer als in der beschriebenen kumulierten Betrachtung.

So ergibt sich beispielsweise auf den Betriebshof Michelstadt bezogen ein Einsparpotenzial durch den Einsatz eines Lademanagementsystems von ca. 0,18 MW Spitzenleistung, was einer jährlichen Einsparung von ca. 15.000 € entspricht. Bei allen anderen Betriebshöfen fällt das Einsparpotenzial deutlich geringer aus: Beim Betriebshof Reichelsheim beträgt die Reduktion der Leistungsspitze nur ca. 4 kW, was einem jährlichen Einsparpotenzial von ca. 400 € entspricht.

Daraus lässt sich ableiten, dass der Einsatz eines Lademanagementsystems auf jenen Betriebshöfen lohnenswert ist, auf welchen sich durch die gezielte Steuerung Überlagerung von mehreren gleichzeitigen Ladevorgängen eine deutliche Reduktion der Leistungsspitze erzielen lässt. Dies ist im Einzelfall zu prüfen, weil sonst die Anschaffungs- und Betriebskosten eines Lademanagementsystems die Einsparpotenziale übersteigen.

Betriebswirtschaftliche und umweltbilanzielle Betrachtung der Auswirkungen der Umstellung auf alternative Antriebe

8 Betriebswirtschaftliche und umweltbilanzielle Betrachtung der Auswirkungen der Umstellung auf alternative Antriebe

Auf Grundlage der Eingangsdaten, der Energiebilanzierung, der Fahrzeugkonfiguration und der Auslegung der Lade- bzw. Tankinfrastruktur erfolgt eine ökonomische und ökologische Bewertung der Flottenhochlaufkonzepte.

Hierzu werden zuerst die Investitions- und Betriebskosten, die bei der Einführung des alternativ angetriebenen Busbetriebs entstehen, mithilfe des Moduls BeSystO[®]-TCO ermittelt. Dabei werden die jeweiligen Stückkosten von Fahrzeugen und Infrastruktur-Elementen betrachtet.

In der Fortführung erfolgt eine Gesamtkostenanalyse unter Einbeziehung wesentlicher Parameter. Dazu wird eine Betrachtung des festgelegten Nutzungszeitraums durchgeführt, woraus sich eine jährliche Aufstellung aller Investitions- und Betriebskosten ergibt.

8.1 Datengrundlage

Im Zuge der Datenerfassung bei der OREG und der OdVB wurden neben den Daten für die technisch-betriebliche Untersuchung auch eine Reihe von wirtschaftlichen Basisdaten aufgenommen, die als Parameter in die wirtschaftlichen Untersuchungen eingehen. Außerdem gehen die im Rahmen der vorgehenden Analyse ermittelten Laufleistungen, Einsatzzeiten, Energieverbräuche, Fahrzeug- und Infrastruktur-Auslegungen in die Berechnung ein. Die ökonomische Analyse erfolgt mit dem Programm BeSystO[®]-TCO.

Investitionskosten

Es fließen sämtliche Investitionskosten unter Berücksichtigung der exakten Systemauslegung in die Betrachtung ein. Als Investitionskosten sind folgende Kostengruppen mit ihren einzelnen Bestandteilen zu unterscheiden:

- » Fahrzeug
 - Grundfahrzeug
 - Energiespeicher
- » Lade-/ Tankinfrastruktur
 - Ladeinfrastruktur Betriebshof
- » Sonstige Kosten
 - Personal

Betriebswirtschaftliche und umweltbilanzielle Betrachtung der Auswirkungen der Umstellung auf alternative Antriebe

- sonstige Projektkosten

Die Grundlage für die Ermittlung der Investitionskosten bilden verifizierte Kosten, welche fortlaufend mit den am Markt verfügbaren Technologien und den dazugehörigen Kosten abgeglichen werden.

Betriebskosten

In der Gesamtkostenbetrachtung sind neben den Investitionskosten auch sämtliche Betriebskosten enthalten. Die berücksichtigten Betriebskosten umfassen:

- » Kraftstoff- bzw. Energiekosten,
- » AdBlue,
- » Wartung und Instandhaltung sowie
- » Fahrpersonal.

Die Verbräuche und Kosten für Dieseldieselkraftstoff basieren auf Angaben der OREG und der OdVB. Die Kosten für elektrische Energie wurden anhand der errechneten Energiemengen und Erzeugungsarten der Energieträger ermittelt. Die für das Fahrpersonal angesetzten Kosten basieren ebenfalls auf Angaben der OREG und der OdVB. Für die Entwicklung sämtlicher Betriebskostenpositionen sind Kostenprognosen einschlägiger Quellen hinterlegt, zudem gehen Schätzungen der VCDB sowie Angaben der OREG und der OdVB in die Berechnung ein. Im Betrachtungszeitraum auftretende jährliche Preisänderungen durch Inflation i. H. v. 2 % werden in der Kostenbetrachtung berücksichtigt.

Für die Kosten der Betriebsmittel wurden folgende Preisentwicklungen angesetzt (Startpreis jeweils im Jahr 2024):

- » Betrachtungszeitraum: 2024 -2053
- » Inflationsrate: 2 %, Kapitaldienst: 5 %
- » Abschreibung – Busse: 9 Jahre, Energiespeicher: 8 Jahre
- » Personalkosten: 34,27 €/ h
- » Vergleich zwischen reinem Dieselhochlauf zu Hochlauf mit stufenweisem Ersatz durch batterieelektrische Busse

Betriebswirtschaftliche und umweltbilanzielle Betrachtung der Auswirkungen der Umstellung auf alternative Antriebe

Fahrzeugart	Investitionskosten	Wartungskosten	Verbrauch
Diesel SB	260.000 €	0,25 € / km	34,0 l / 100km
Diesel Klein	150.000 €	0,25 € / km	18,0 l / 100km
BEB SB	550.000 € (inkl. 140.000 € Batterie)	0,20 € / km	1,35 kWh / km
BEB Klein	400.000 € (inkl. 140.000 € Batterie)	0,20 € / km	1,20 kWh / km

Abbildung 8.1: Eingangsdaten Gesamtkostenbetrachtung

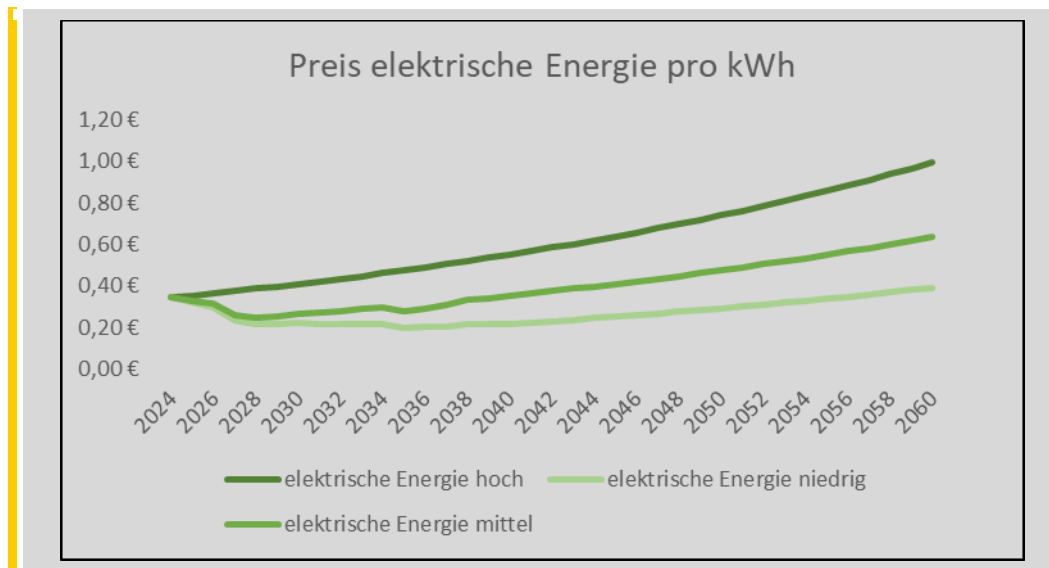


Abbildung 8.2: Preisentwicklungsszenarien elektrische Energie

Bei den unterschiedlichen Hochlaufszenerarien wird in den folgenden Ergebnissen zwischen den drei Fällen „niedrig, „mittel“ und „hoch“ unterschieden. Dies bezieht sich auf die Ergebnisse mit den hier aufgeführten unterschiedlichen Preisentwicklungen für elektrische Energie.

Die mittleren Wartungskosten je Fahrzeugtechnologie und Infrastruktur sind:

- » Dieselbus: 0,25 €/ km
- » Batterieelektrischer Bus: 0,20 €/ km
- » Ladeinfrastruktur: jährlich 2 % der Investitionskosten

Betriebswirtschaftliche und umweltbilanzielle Betrachtung der Auswirkungen der Umstellung auf alternative Antriebe

Gesamtkosten

In der Gesamtkostenberechnung werden die Investitions- und Betriebskosten über den gewählten Betrachtungszeitraum zusammengeführt. Die Ausweisung der Gesamtkosten erfolgt dabei jährlich. Daher sind als besonders wichtige Eingangsgrößen folgende Angaben heranzuziehen:

- » Laufleistungsparameter
 - Jahreskilometerleistung (pro Fahrzeug und Jahr)
 - Jahresbetriebsdauer (pro Fahrzeug und Jahr)
- » Verbrauchswerte pro Kilometer
 - Dieselfahrzeug (Diesel, AdBlue)
 - Elektrofahrzeug (elektrische Energie)

Dabei sind in der Jahreskilometerleistung sowohl die Einsatz- als auch die Leerkilometer enthalten. In der Jahresbetriebsdauer sind ausschließlich die Fahrzeiten, keine Wendezeiten berücksichtigt. In den Verbrauchswerten sind die jahreszeitlichen Schwankungen der Energiebedarfe berücksichtigt, indem die Anzahl der Monate, in denen der Fahrzeuginnenraum temperiert wird, einbezogen wird.

Es erfolgt eine differenzierte Bewertung der untersuchten Antriebstechnologien mit einer Gegenüberstellung der unterschiedlichen Flottenhochlaufszenerarien. Für die Gesamtkostenberechnung ist neben der Systemauslegung und den genannten Investitions- und Betriebskosten außerdem die Definition folgender Zeitangaben notwendig:

- » Einsatzdauer Fahrzeuge, Infrastruktur und Personal,
- » Abschreibungsdauer Fahrzeuge und Infrastruktur sowie
- » Betrachtungszeitraum.

8.2 Ermittelte Kosten

In diesem Abschnitt werden die ermittelten Kosten getrennt nach Investitionskosten Fahrzeuge und Infrastruktur, den Betriebs- und Wartungskosten und den Kosten für verbrauchte Betriebsmittel aufgeführt.

Investitionskosten Fahrzeuge

Im ersten Flottenhochlauf ergeben sich über den gesamten Betrachtungszeitraum die folgenden Summen der Investitionskosten für Fahrzeuge:

- | | |
|---------------------------------|-----------------|
| » Vergleichsanalyse Dieselbusse | 44,011 Mio. EUR |
| » batterieelektrischen Bussen | 96,220 Mio. EUR |

Betriebswirtschaftliche und umweltbilanzielle Betrachtung der Auswirkungen der Umstellung auf alternative Antriebe

Im nachfolgenden Diagramm ist die Verteilung der Investitionskosten über den Betrachtungszeitraum dargestellt. Emissionsfreie Fahrzeuge gehen erst ab 2026 in Betrieb, weshalb bis zu diesem Zeitpunkt die Investitionskosten aufgrund der Beschaffung von neuen Dieselnissen identisch sind.

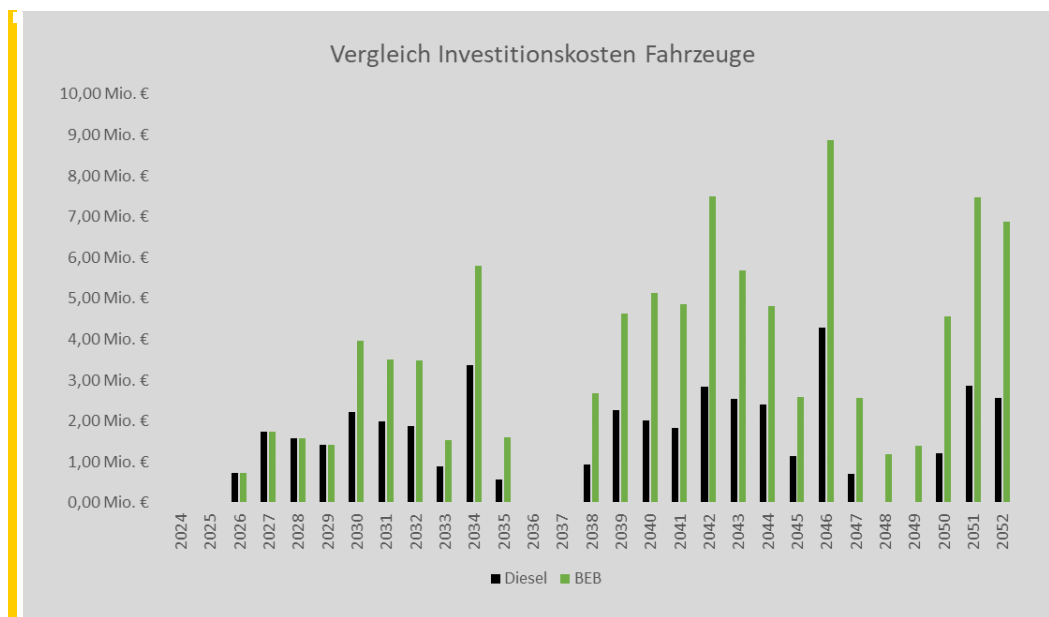


Abbildung 8.3: Investitionskosten pro Jahr für Fahrzeuge

Im Diagramm ist ersichtlich, dass für batterieelektrische Busse erhebliche Mehrinvestitionen zu erwarten sind. Diese Mehrinvestitionen können durch eine Förderung teilweise kompensiert werden. Weiterhin ist zu beachten, dass ggf. bis zum Ende des Betrachtungszeitraums keine oder nur sehr wenige Dieselnisse am Markt verfügbar sein werden. Einige Fahrzeughersteller haben angekündigt, ab 2030 nur noch emissionsfreie Busse im Portfolio zu haben²².

²² Quellen: <https://www.electrive.net/2023/06/05/MAN-wird-keine-euro-7-busse-auf-die-strasse-bringen>; <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/daimler-bus-e-bus-elektrobus-stadtbus-klimaneutral-klimaschutz-wissing-verkehrswende-101.html>

Betriebswirtschaftliche und umweltbilanzielle Betrachtung der Auswirkungen der Umstellung auf alternative Antriebe

Betriebs- und Wartungskosten Fahrzeuge

Mit den angesetzten Preisen für die Betriebsmittel ergeben sich daraus folgende Kosten:

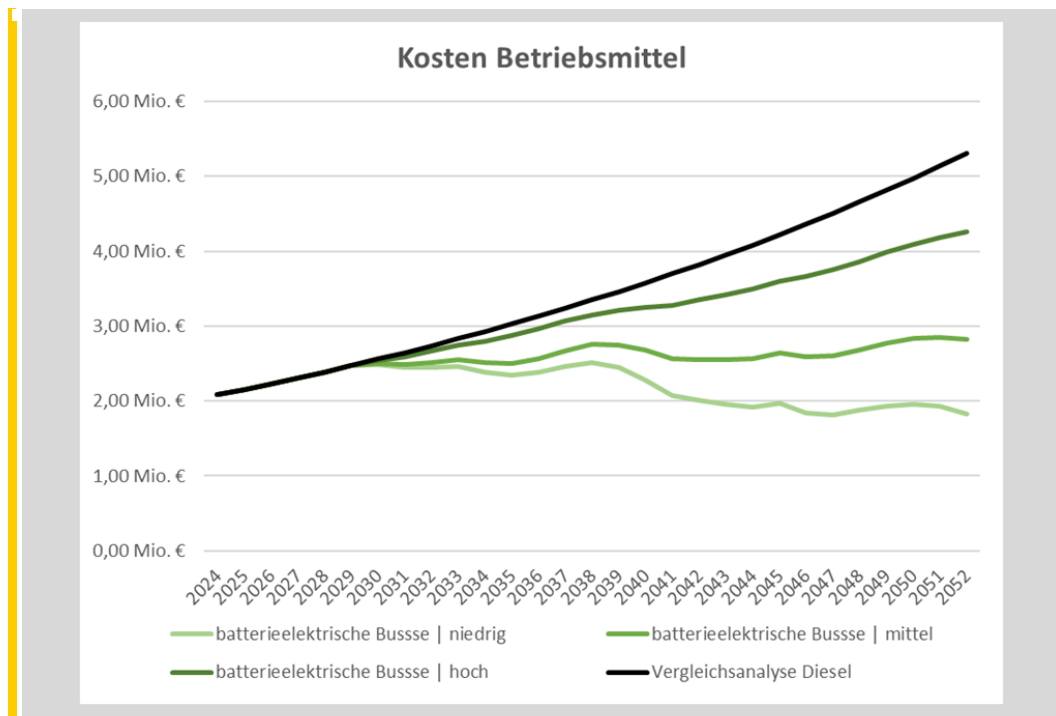


Abbildung 8.4: Kosten Betriebsmittel

Hochlauf	Summe Betriebsmittelkosten ganzer Zeitraum
Diesel	100,7 Mio. EUR
BEB – Batterieelektrische Busse	63,4 Mio. EUR – 74,1 Mio. EUR – 90,4 Mio. EUR

Abbildung 8.5: Kosten Betriebsmittel

Dabei beinhalten die Kosten folgende Betriebsmittel:

- » Vergleichsanalyse Diesel: Hier werden die Kosten für Diesel und AdBlue sowie die CO₂-Kosten berücksichtigt.
- » Umstellung auf batterieelektrische Busse: Hier werden die Kosten für elektrische Energie berücksichtigt. Aufgrund des kontinuierlichen Hochlaufs sind anteilig auch Kosten für Dieselsebusse (Diesel, AdBlue, CO₂) enthalten.

Da erst ab 2026 emissionsfreie Fahrzeuge in Betrieb gehen, sind die Kosten bis dahin identisch. Erst mit der Beschaffung von neuen emissionsfreien Fahrzeugen ist eine Senkung der Kosten für Betriebsmittel erkennbar, da in allen

Betriebswirtschaftliche und umweltbilanzielle Betrachtung der Auswirkungen der Umstellung auf alternative Antriebe

Preisentwicklungsszenarien, elektrische Energie vorteilhafter im Vergleich zum Diesel ist. Bei der niedrigen Preisentwicklung der elektrischen Energie können zur Vergleichsanalyse mit Diesel bis zu zwei Drittel an Kosten für Betriebsmittel eingespart werden.

Gesamtkosten

Neben der Berechnung von Einzel-Investitionskosten erfolgt eine Gesamtkostenanalyse unter Einbeziehung relevanter Parameter.

Die TCO-Analyse liefert eine Gesamtkostenübersicht wesentlicher Investitions- und Betriebskosten als Lebenszyklusbetrachtung. Es erfolgt ein Betriebskostenvergleich zwischen Diesel- und alternativen Buseinsatz. Dabei werden die spezifischen Mehrkosten der alternativen Antriebstechnologie je km ausgewiesen.

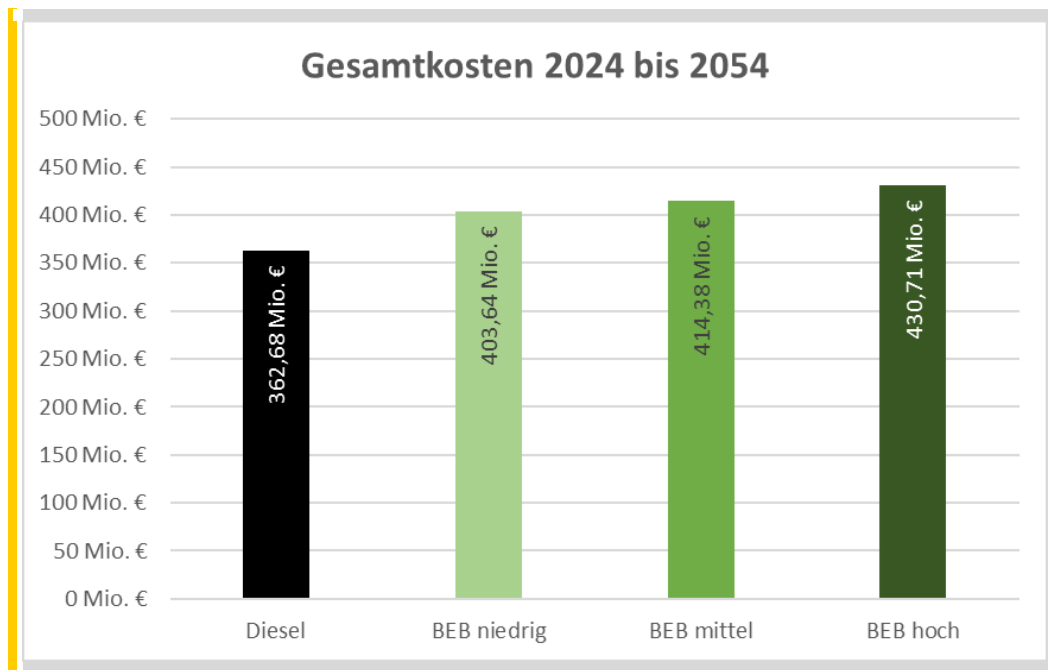


Abbildung 8.6: Überblick aller Gesamtkosten für alle Szenarien

Hochlauf	Preis pro Kilometer (Durchschnitt 2025 bis 2054)
Diesel	1,70 EUR
BEB – Batterieelektrische Busse	1,90 EUR – 1,95 EUR – 2,02 EUR

Abbildung 8.7: Überblick aller Gesamtkosten für alle Szenarien

Über den gesamten Betrachtungszeitraum ergibt sich eine Summe aller Kosten von ca. **362,68 Mio. EUR** für die Vergleichsanalyse Diesel. Für batterieelektrische

Betriebswirtschaftliche und umweltbilanzielle Betrachtung der Auswirkungen der Umstellung auf alternative Antriebe

Busse mit mittlerer Preisentwicklung der elektrischen Energie ergibt sich eine Summe aller Kosten von ca. **414,38 Mio. EUR**.

Die Gesamtkosten berücksichtigen alle technologiebezogenen Kosten. Investitionskosten für bspw. allgemeine Betriebshofgebäude oder Grunderwerbskosten sind nicht enthalten.

Gesamt betrachtet entstehen durch die Anschaffung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben erhebliche Mehrkosten im Vergleich zur Anschaffung von Dieselnissen. Diese konnten bislang durch aktuelle Förderrichtlinien auf Bundesebene reduziert werden. Die passende BMDV-Richtlinie wurde nach insgesamt drei Aufrufen jedoch im Februar 2024 in einen inaktiven Zustand versetzt. Innerhalb der Calls war eine Förderung von 80 % der Fahrzeugmehrkosten und 40 % der Infrastrukturkosten zu erwerben. Ob und wann die Richtlinie wieder aktiviert wird ist zum Zeitpunkt des Berichtes unklar. Aktuell versucht der VDV die Notwendigkeit und Dringlichkeit dem Ministerium zu spiegeln.

Folglich richtet sich der Blick nach Fördermitteln auf Landesebene, welche teils ähnliche Förderquoten mit unterschiedlichen Programmen realisieren. So hat Hessen 2017 die Richtlinie „Förderung von Elektrobussen und für den Betrieb erforderlicher Infrastruktur“ aufgestellt, die derzeit überarbeitet wird. Weitere Möglichkeiten der Förderung bestehen darüber hinaus über das hessische Mobilitätsgesetz oder mit EU-Mitteln aus dem EFRE-Programm über die Landesförderbank, die Wirtschafts- und Infrastrukturbank Hessen (WIBank).

Für die Abschätzung im Folgenden gilt: Unter der Annahme, dass die oben genannten Förderquoten für den gesamten Zeitraum der Kostenbetrachtung gelten, ergeben sich die in Abbildung 8.8 aufgeführten Investitionskosten für Fahrzeuge und Infrastruktur. Hier ist zum einen festzustellen, dass die Investitionen für die Infrastruktur wesentlich geringer ins Gewicht fallen als die für Fahrzeuge. Insgesamt sind in der Abbildung die minimalen und maximalen Mehrkosten ausgewiesen, je nachdem wie sich die Förderungsrichtlinien nach 2030 entwickeln.

Betriebswirtschaftliche und umweltbilanzielle Betrachtung der Auswirkungen der Umstellung auf alternative Antriebe

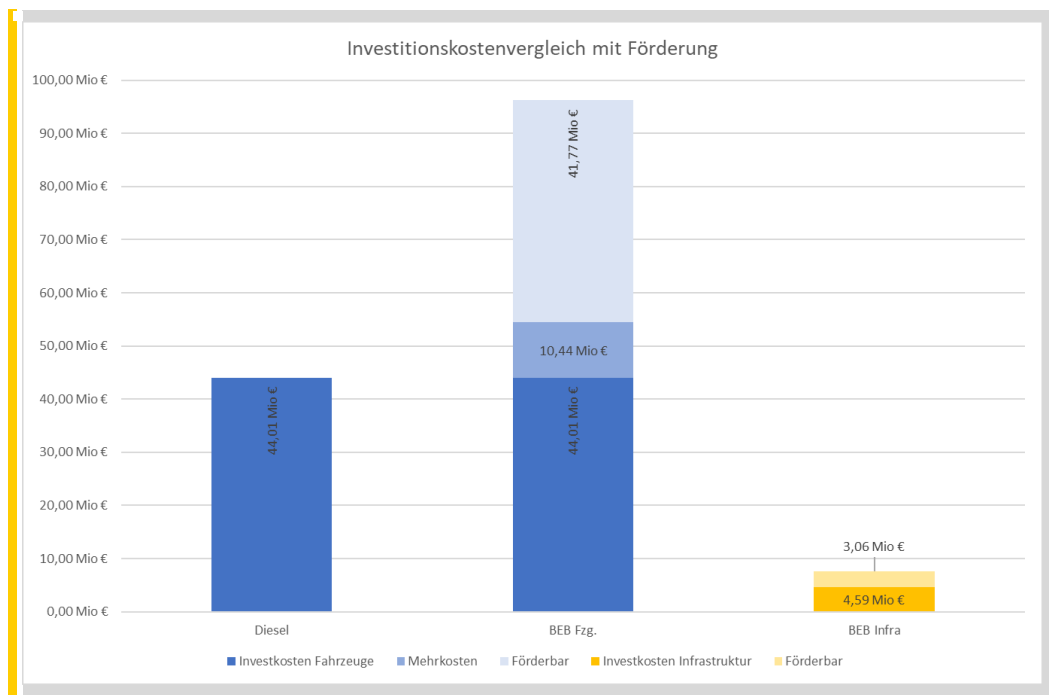


Abbildung 8.8: Investitionskosten mit Förderung – gesamter Betrachtungszeitraum

Angeht die hohen Investitionskosten ist die Inanspruchnahme von Fördermitteln unverzichtbar. Diese sind notwendig, um den finanziellen Aufwand für den Übergang zu Elektrobussen zu bewältigen. Letztendlich zeigen diese Ausgaben nicht nur das Engagement für umweltfreundliche Mobilität, sondern sind auch ein wichtiger Schritt für die Stärkung der lokalen Akteure und der Region.

Abschließend für die Gesamtkostenbetrachtung sind in Abbildung 8.9 und Abbildung 8.10 noch einmal die Zusammensetzung der Gesamtkosten für die Vergleichsanalyse mit nur Dieselfahrzeugen und dem Hochlauf des vollständigen Ersatzes bei der Anschaffung ab 2026 mit batterieelektrischen Fahrzeugen zu sehen. Hervorzuheben ist, dass die Personalkosten mit einem fast gleichgebliebenen Anteil einer der größten Kostenpunkte sind. Während die Investitionskosten bei batterieelektrischen Fahrzeugen steigen, werden gleichzeitig auch die Betriebskosten geringer.

Betriebswirtschaftliche und umweltbilanzielle Betrachtung der Auswirkungen der Umstellung auf alternative Antriebe

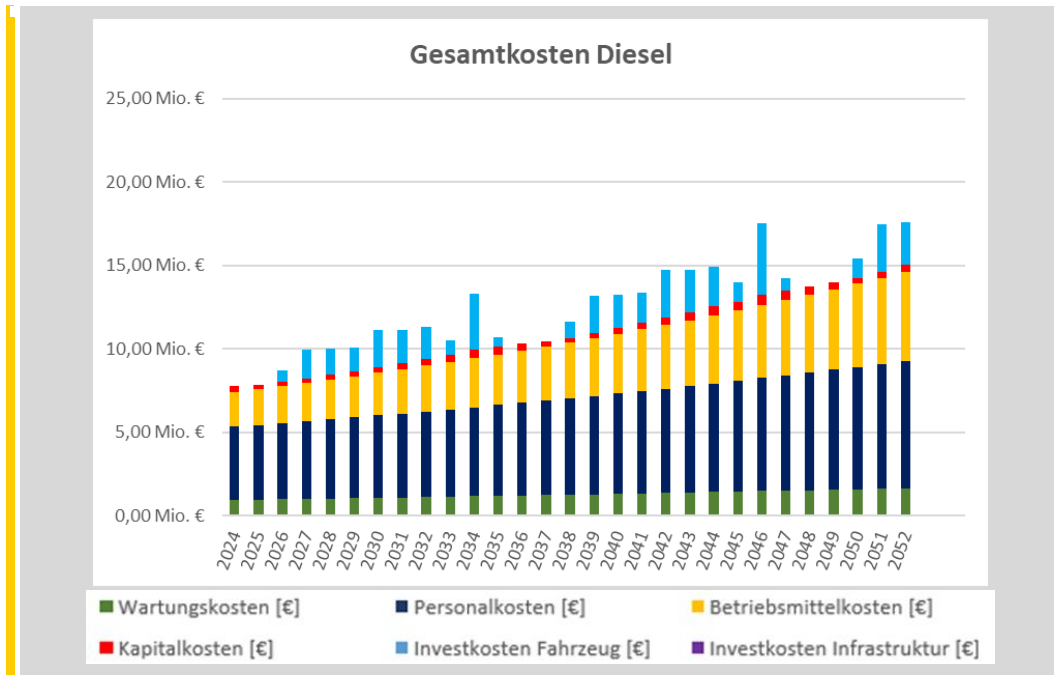


Abbildung 8.9: Gesamtkosten für Dieselbusse

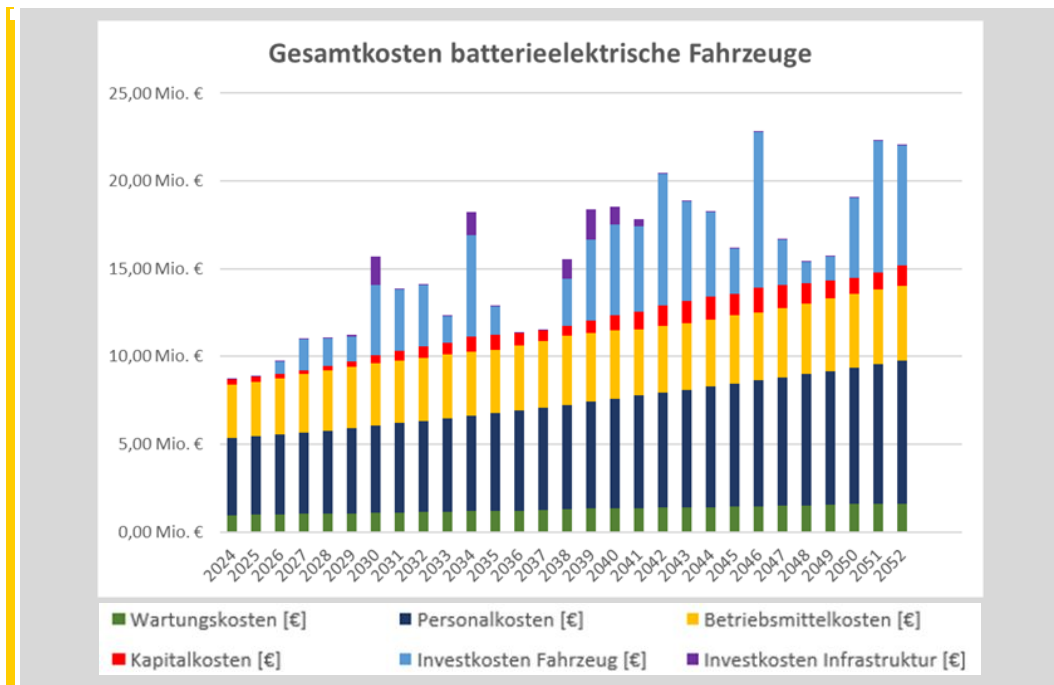


Abbildung 8.10: Gesamtkosten für batterieelektrische Busse

Betriebswirtschaftliche und umweltbilanzielle Betrachtung der Auswirkungen der Umstellung auf alternative Antriebe

8.3 Ausweisung von Umweltparametern und Umweltkosten

Mit der Umstellung von fossil betriebenen Bussystemen auf emissionsfreie Bussysteme sind positive ökologische Effekte zu erwarten. So werden anhand der Lauflistung und des entsprechenden Energieverbrauchs die Emissionen von Treibhausgasen und Luftschadstoffen quantifiziert und monetarisiert. Diese umfassen:

- » Kohlenstoffdioxid-Äquivalente (CO₂-e),
- » Stickoxide (NO_x),
- » Kohlenmonoxid (CO),
- » Kohlenwasserstoff (HC) sowie
- » Particulate Matter (PM).

Es erfolgt eine Differenzierung der Energieverbräuche in folgende drei Wirkungsketten:

- » Well-to-Tank (Energieprozesse): Erfassung des Energieverbrauchs bzw. aller indirekten Emissionen der Kraftstoffbereitstellung von der Quelle bis zum Tank / Energiespeicher im Fahrzeug. Der Energieverbrauch umfasst auch die Verluste bei der Herstellung und dem Transport der Energieträger z. B. in Hochspannungsleitungen.
- » Tank-to-Wheel (Fahrzeugprozesse): Erfassung des Energieverbrauchs und aller direkten Emissionen des Fahrzeugbetriebes. Beim Verbrauch wird vom Endenergieverbrauch gesprochen.
- » Well-to-Wheel (Fahrzeug- und Energieprozesse): Summe aus Well-to-Tank und Tank-to-Wheel, also aus direkten und indirekten Emissionen. Beim Verbrauch wird von Primärenergieverbrauch gesprochen, der neben dem Endenergieverbrauch alle Verluste aus der Vorkette miteinschließt.

Die ökologische Bewertung im Sinne der lokalen THG-Emissionen umfasst nur den Betrieb der Fahrzeuge und beinhaltet keine Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus des Fahrzeuges einschließlich der Rohstoffgewinnung, Herstellung und Entsorgung.

Den Berechnungen ist die grundsätzliche Haltung unterstellt, dass der Fahrbetrieb mit Batterie nur dann wirklich ökologisch sinnvoll ist, wenn Strom aus regenerativen Energiequellen verwendet wird. Zudem ist die Verwendung von erneuerbaren Energien in der Regel Voraussetzung für die etwaige Inanspruchnahme einer Förderung für Fahrzeuge und/ oder Infrastruktur. Daher wurde in der Berechnung der Treibhausgas-Emissionen die Nutzung von 100 % erneuerbarem Strom für den Fahrbetrieb angenommen und somit ein erneuerbarer Strommix zugrunde gelegt. Daraus ergeben sich geringfügige

Betriebswirtschaftliche und umweltbilanzielle Betrachtung der Auswirkungen der Umstellung auf alternative Antriebe

Treibhausgasemissionen in der Vorkette der Energieträger sowie durch Netzverluste, berechnet gemäß der „Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger“ vom Umweltbundesamt. Lokale Luftschadstoffemissionen beim Betrieb der emissionsfreien Busse fallen nicht an.

Demgegenüber stehen die Energieverbräuche und Emissionen für den Betrieb der Flotte mit Dieselnissen. Die Energieverbräuche und Treibhausgasemissionen wurden gemäß der europäischen Norm EN 16258 „Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr)“ berechnet, die Luftschadstoffemissionen gemäß HBEFA „Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs“.

Die angesetzten Kostenfaktoren für die Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen sind der „Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten“ vom Umweltbundesamt entnommen. Von allen genannten Publikationen wurde die jeweils aktuelle Fassung verwendet.

In den nächsten Teilabschnitten werden die jährlichen Treibhausgas-Emissionen als Kohlenstoffdioxid-Äquivalente, die direkten lokalen Luftschadstoffe sowie die Umweltkosten berechnet.

Treibhausgas-Emissionen:

Für die Treibhausgas-Emissionen aller Hochlaufsznarien wurden sowohl die direkten (Fahrzeugprozess) als auch die indirekten Emissionen (Energieprozess) betrachtet. Die Summe ergibt die jährlichen Emissionen Well-to-Wheel und ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

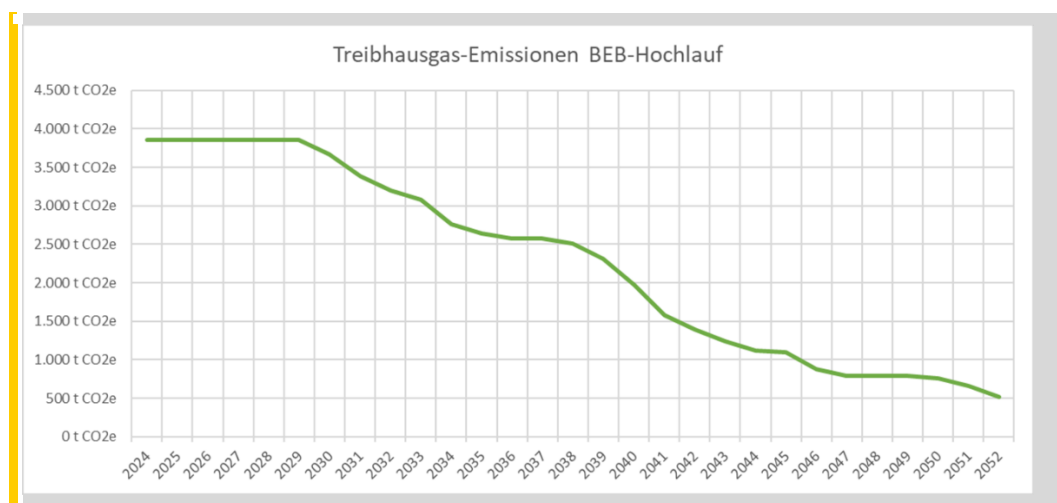


Abbildung 8.11: Treibhausgas-Emissionen Well-to-Wheel

Betriebswirtschaftliche und umweltbilanzielle Betrachtung der Auswirkungen der Umstellung auf alternative Antriebe

Bis Ende 2029 sind die Emissionen gleich, da erst zu diesem Zeitpunkt das erste emissionsfreie Fahrzeug angeschafft wird. Danach lässt sich erkennen, dass der batterieelektrische Bus im Vergleich zum Brennstoffzellenbus größere Treibhausgas-Einsparungen ermöglicht. Die lokalen Emissionen vom Fahrzeug sind bei beiden Elektrobustechnologien nicht vorhanden. Insgesamt können die Treibhausgas-Emissionen durch mehr Elektrobusse und weniger Dieselsebusse reduziert werden. In den nachfolgenden Abbildungen werden die Emissionen für die zwei Hochlaufszenerarien jeweils Well-to-Tank (WTT) und Tank-to-Wheel (TTW) dargestellt.

In den Abbildungen wird deutlich erkennbar, dass der Dieselsebus mit seinen lokalen Emissionen einen großen Anteil an den Gesamtemissionen ausmacht. Beide Elektrobustechnologien verursachen im Vergleich zum Dieselsebus nur in der Energieerzeugung indirekte Treibhausgas-Emissionen.

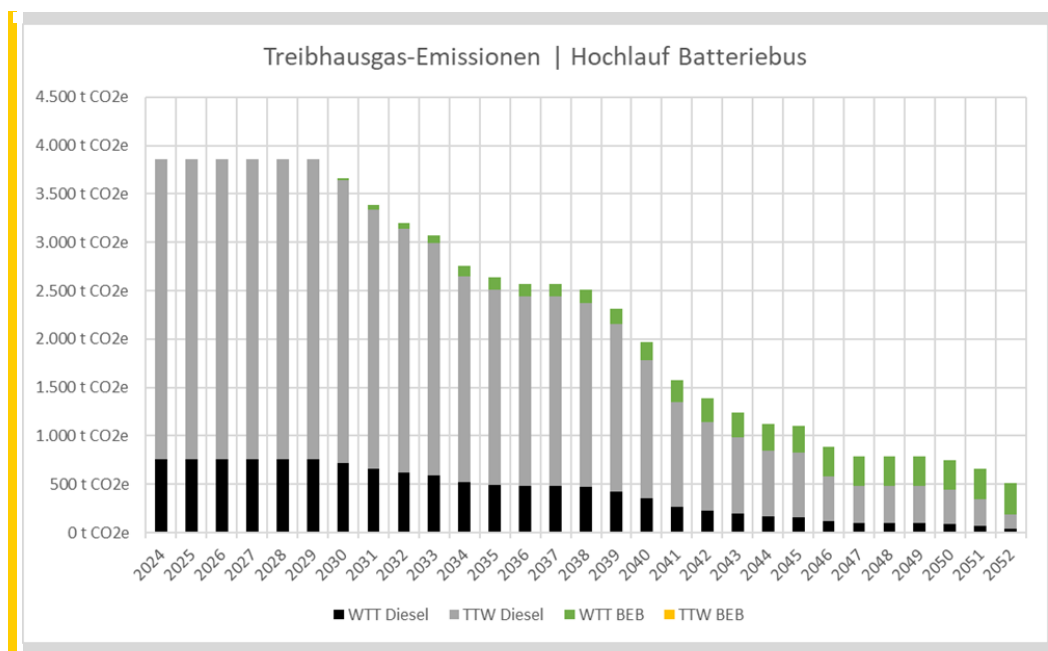


Abbildung 8.12: Treibhausgas-Emissionen

Umweltkosten

Über den gesamten Betrachtungszeitraum ergeben sich für die zwei Hochlaufszenerarien folgende Umweltkosten:

Betriebswirtschaftliche und umweltbilanzielle Betrachtung der Auswirkungen der Umstellung auf alternative Antriebe

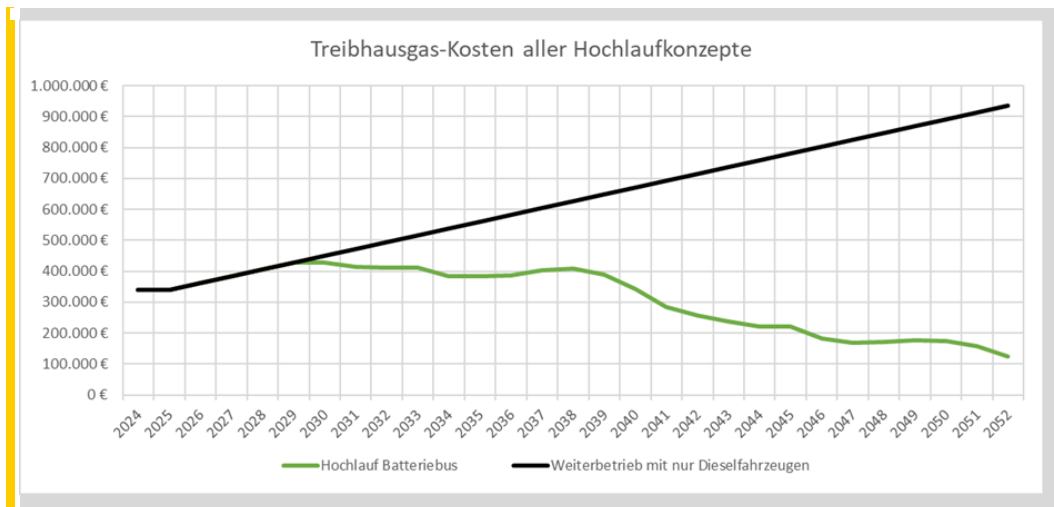


Abbildung 8.13: Treibhausgas-Kosten aller Hochlaufkonzepte

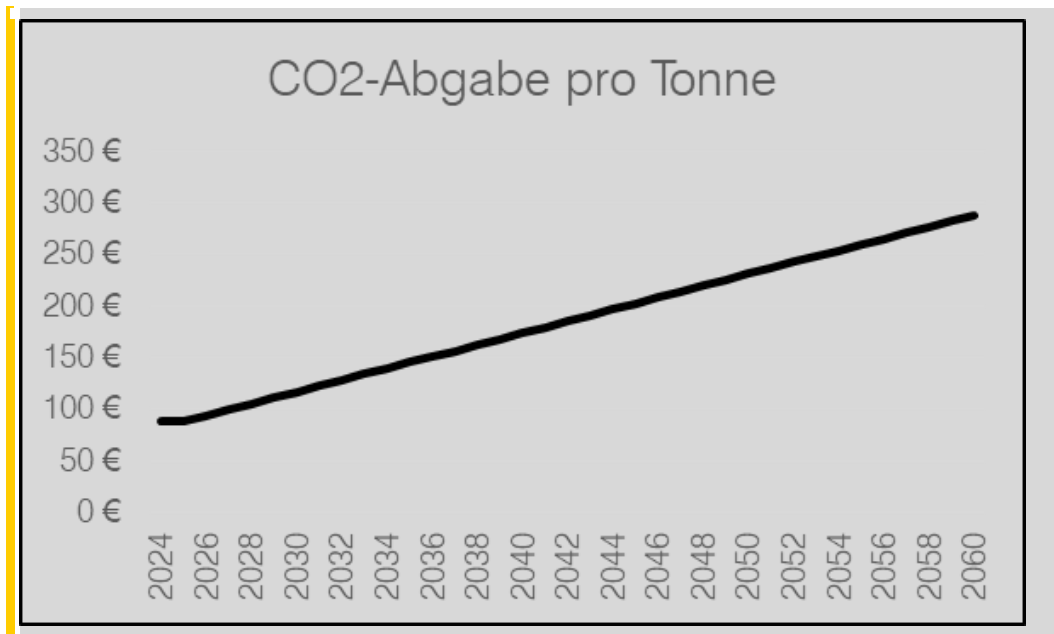


Abbildung 8.14: Umweltkosten CO2 pro Tonne

Die höchsten Umweltkosten entstehen bei einem Weiterbetrieb mit Dieselfahrzeugen über den gesamten Betrachtungszeitraum ohne alternative Antriebe. Ein Weiterbetrieb ist alleine durch die Vorgaben des SaubFahrzeugBeschG für Fahrzeuge der Klasse M3 der Klasse I nicht möglich. Umso mehr Elektrofahrzeuge in der Flotte vorhanden sind bei gleichbleibender Flottengröße, desto geringer werden die Umweltkosten. Im Vergleich der Hochlaufkonzepte zum Weiterbetrieb mit ausschließlich Dieselfahrzeugen können somit Umweltkosten in Höhe von bis 25 Millionen Euro vermieden werden.

Betriebswirtschaftliche und umweltbilanzielle Betrachtung der Auswirkungen der Umstellung auf alternative Antriebe

Lokale Emissionen von Luftschadstoffen

Die Luftschadstoffemissionen gemäß HBEFA anhand der Fahrleistungen der Fahrzeuge ergeben sich nur für Dieselfahrzeuge. Bei Elektrobussen sind die Luftschadstoffemissionen nicht relevant. Die Emissionen über den gesamten Betrachtungszeitraum werden in der nachfolgenden Tabelle für Tank-to-Wheel dargestellt.

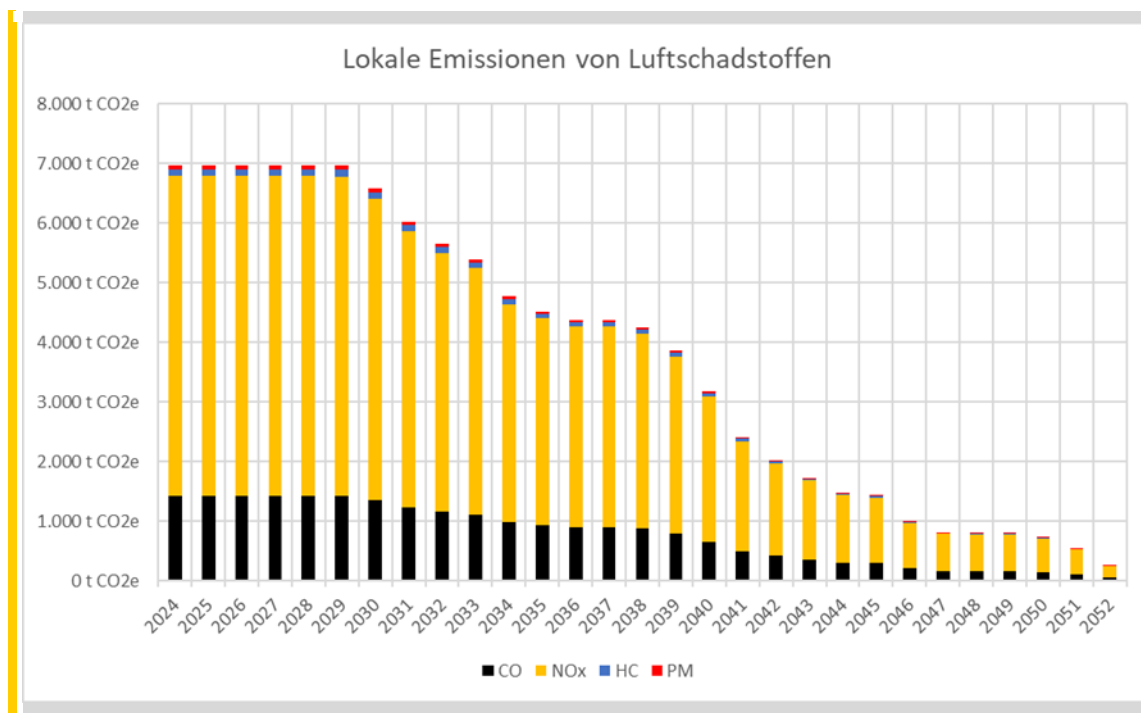


Abbildung 8.15: Lokale Emissionen von Luftschadstoffen

Hochlauf	CO	HC	NO _x	PM
Weiterbetrieb mit Dieselfahrzeugen ohne alternative Antriebe	41,34 t	3,43 t	155,32 t	1,88 t
ab 2040 Beschaffung 100% emissionsfreie Fahrzeuge	22,24 t	1,84 t	83,58 t	1,01 t

Tabelle 8.1: Luftschadstoffemissionen gemäß HBEFA

9 Bewertung der favorisierten Antriebskonzepte

Für beide favorisierten Antriebskonzepte wurde die erforderliche Energieversorgungsinfrastruktur untersucht und ausgelegt. Zur Betankung der Brennstoffzellenfahrzeuge ist eine eigene Infrastruktur mit Fokus auf die Anlieferung von gasförmigem Wasserstoff (GH_2) per LKW-Trailer notwendig, da sich in der Region noch wenig lokale Wasserstoffinfrastruktur befindet. Ein Tankvorgang dauert etwa 8 bis 9 Minuten bei entsprechender Back-to-back-Kapazität der Betankungsinfrastruktur. Im Vergleich zum Batteriebus benötigt die Tankinfrastruktur größere Platzkapazitäten und komplexere Genehmigungsverfahren. Dafür ist im Gegensatz für die Ladeinfrastruktur eine starke Einbindung in die Betriebsabläufe notwendig, da die Ladeprozesse über mehrere Stunden vollzogen werden. Für zukünftige Betriebshöfe ist eine Ladeleistung von 75 kW (brutto) pro Ladepunkt ausreichend. Die Ladevorgänge werden während des nächtlichen Depotaufenthalts durchgeführt, es sollten aber auch Dienstwechsel oder Pausenzeiten des Fahrpersonals zur Ladung genutzt werden. Die Betankung von Wasserstoff kann ebenfalls teilweise am Tag erfolgen, wenn Fahrzeuge gemäß dem bestehenden Umlaufkonzept zum Dienstwechsel ins Depot ein- und kurz darauf wieder ausrücken. Überwiegend würde die Betankung jedoch während der nächtlichen Betriebspause erfolgen.

Die ökonomische und ökologische hat gezeigt, dass hohe Investitionskosten zu erwarten sind. Im Vergleich der Technologien sind höhere Kosten beim Brennstoffzellenbus zum batterieelektrischen Bus aufgrund höherer Kosten für die Fahrzeugbereitstellung, die Betriebsmittel, die Wartungskosten und der benötigten Infrastruktur sichtbar. Die höheren Investitionskosten im Vergleich zu Fahrzeugen mit konventionellen Antrieben können ggf. teilweise durch eine Förderung kompensiert werden. Aufgrund der größeren Menge an erneuerbaren Energiequellen zur Herstellung von grünem Wasserstoff ist der Brennstoffzellenbus im Vergleich zum Batteriebus ökologisch schlechter gestellt. Bei beiden Antriebskonzepten können dennoch im Vergleich zum Diesibus große Mengen von Treibhausgasen und lokalen Luftschadstoffen vermieden werden.

Aus **technischer** Sicht wirkt sich der systemwirkungsgradbedingte, deutlich höhere Traktionsenergieverbrauch des Brennstoffzellenbusses nachteilig gegenüber dem Batteriebus aus. Des Weiteren ist aktuell für die H_2 -Anlieferung kaum grüner Wasserstoff in betriebsrelevanten Mengen verfügbar. Es handelt sich zumeist um sogenannten grauen Wasserstoff aus Dampfreformierung, welcher aus Erdgas gewonnen wird. Da keine Fremdbetankung mit grünem Wasserstoff in der Region möglich ist, müsste grüner Wasserstoff kosten- und platzintensiv selbst auf dem Betriebsgelände getankt sowie per LKW-Trailer fast täglich in jedem Betriebshof angeliefert werden.

Bewertung der favorisierten Antriebskonzepte

Aus **betrieblicher** Sicht ist die Einführung der Brennstoffzellentechnologie aufwendiger. Die Errichtung einer Wasserstofftankstelle, die Ausrichtung einer möglichen Werkstatt und die Schulung des Personals ist aufgrund der Komplexität der Technologie umfangreicher. Der aktuelle Linienbetrieb hingegen kann durch den Brennstoffzellenbus eins-zu-eins abgebildet werden. Der Batteriebusbetrieb mit ausschließlicher Nachladung im Betriebshof erfordert aktuell keinen zusätzlichen Fahrzeugeinsatz und damit einhergehend ist der Personaleinsatz für alle Technologien identisch. Bedingt durch die aktuell noch eingeschränkte Reichweite sind Batteriebusse im Liniennetz weniger flexibel einsetz- und disponierbar, was aber im Bedienebiet der OdVB dennoch möglich ist. Es ist allerdings erwartbar, dass zukünftig, und bis zur ersten Fahrzeugbeschaffung, die Batteriespeichergößen und damit auch die Reichweiten steigen werden.

Zusätzlich zu den Fahrzeugen und der Infrastruktur sind Werkstattbedarfe und Personalschulungen umzusetzen. Die baulichen Anpassungen einer Werkstatt sind von entscheidender Bedeutung für ihre Effizienz und Sicherheit. Angefangen bei der Dachhöhe und Traglast bis hin zu Sicherheitsvorrichtungen trägt jedes Detail zur optimalen Funktionalität bei. Ein wesentliches Element ist der Dacharbeitsstand mit Kran, der nicht nur die Wartung von Fahrzeugen erleichtert, sondern auch die Sicherheit der Arbeiter gewährleistet. Mit einem Investitionsaufwand von etwa 250.000 € stellt er eine bedeutende Kapitalausgabe dar, die jedoch langfristig rentabel ist. Die Infrastruktur für Ladestationen ist ein weiterer wichtiger Aspekt, insbesondere mit dem Aufkommen von Elektrofahrzeugen. Mobile Ladegeräte mit einer Kapazität von 50 kW sind unverzichtbar, um eine flexible und schnelle Aufladung zu ermöglichen. Ihr Preis liegt bei etwa 15.000 €, was eine sinnvolle Investition für die Ausrüstung der Werkstatt darstellt. Für eine präzise Diagnose und effektive Reparatur ist hochwertige Diagnose- und Testausrüstung unerlässlich. Spezialwerkzeug für Hochvolt-Systeme (HV) ist ein Beispiel hierfür und erfordert eine Investition von rund 25.000 €. Diese Ausgaben zahlen sich durch eine verbesserte Arbeitsqualität und Kundenzufriedenheit aus. Die Verfügbarkeit von Ersatzteilen ist ein weiterer kritischer Faktor für den reibungslosen Betrieb einer Werkstatt. Batteriecontainer sind oft benötigt und kosten etwa 2.000 €. Durch die Sicherstellung einer schnellen und zuverlässigen Ersatzteilbeschaffung kann die Werkstatt ihre Effizienz maximieren und Stillstandszeiten minimieren.

In Anbetracht der zunehmenden Integration von Elektrobussen in den öffentlichen Verkehr ist eine gründliche Personalschulung aufbauend auf den bestehenden Qualifikationen mit der angestrebten Wertschöpfungstiefe von entscheidender Bedeutung. Die Komplexität der Elektrobustechnologie erfordert ein gut geschultes Team, das in der Lage ist, mit den spezifischen Anforderungen und Herausforderungen umzugehen. Von der Sicherheit im Umgang mit Hochvoltssystemen bis hin zur effizienten Fahrzeugbedienung und -wartung ist die

Bewertung der favorisierten Antriebskonzepte

Schulung von Mitarbeitern unerlässlich, um einen reibungslosen Betrieb zu gewährleisten.

Für die zwei emissionsfreien Technologien wird eine neue, kostenintensive Infrastruktur auf den Betriebshöfen benötigt. Ebenfalls werden aktuell für die emissionsfreien Fahrzeuge höhere Investitionskosten benötigt als für Dieselfahrzeuge. Aus **ökonomischer und ökologischer** Sicht ist die Beschaffung von Brennstoffzellenfahrzeugen inklusive Infrastruktur mit höheren Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten verbunden. Eine Inanspruchnahme von Fördermitteln durch Bund, Land oder Kommune zur Kompensation der Mehrkosten von emissionsfreien Bussen ist empfehlenswert. Aufgrund der benötigten elektrischen Energie zur Herstellung von grünem Wasserstoff können weniger Treibhausgase im Vergleich zum Batteriebus vermieden werden.

Die **Marktverfügbarkeit** von Brennstoffzellenbussen ist limitiert. Die Auswahl der Hersteller für 12 m - Brennstoffzellenbusse beschränkt sich auf einen kleinen Anbieterkreis. Beim Batteriebus nähert sich für 12 m - Gefäßgrößen die Typenvielfalt dem Dieselbusangebot an. Bei der Markteinführung neuer Batteriebusgenerationen sind bereits deutliche Steigerungen der verfügbaren Energieinhalte im Vergleich zu den vergangenen Jahren zu verzeichnen. Dementsprechend steigt auch die erzielbare Reichweite sukzessive an.

Die derzeit noch größeren Risiken der **technischen Verlässlichkeit** bei Brennstoffzellenbussen gehen mit der schwächeren Marktdurchdringung und somit auch geringeren Erprobung im realen Betrieb einher. Nimmt die Beschaffung von Brennstoffzellenbussen durch Verkehrsbetriebe aufgrund technologischer oder preislich vorteilhafter Entwicklungen in den nächsten Jahren deutlich zu, wäre künftig mit einem Angleichen der Technologien zu rechnen.

Die anspruchsvolle Topografie und das ausgedehnte Liniennetz der OdVB sind hohe Anforderungen an alternative Antriebstechnologien. Anhand der detaillierten Untersuchung der technischen, betrieblichen und wirtschaftlichen Vorteile und Nachteile der jeweiligen Technologien konnte im Rahmen der Machbarkeitsstudie eine geeignete Lösung gefunden werden. Die Machbarkeitsstudie bildet die Basis für den technologischen Wandel hin zu emissionsfreien Antrieben.

Ergebnis

Im **Ergebnis der Machbarkeitsstudie** ist nach Bewertung aller untersuchten Kriterien der **Batteriebus als Depotlader** mit einer konduktiven Ladung über ein Plug-In-System in vielfacher Hinsicht objektiv besser zu bewerten und stellt somit das für die OREG und die OdVB am besten geeignete Antriebskonzept dar.

Während der ersten Testläufe mit einem batterieelektrischen Bus im Citybus-Verkehr sowie auf Steigungs- und Überlandstrecken konnten

Bewertung der favorisierten Antriebskonzepte

Verkehrsunternehmen und Fahrgäste bereits wertvolle Praxiserfahrungen sammeln. Bereits damals konnte das Fahrzeug eine überzeugende Laufleistung aufweisen und bot ein angenehmes Fahrgefühl und Komfort. Ein entscheidender Faktor war zudem die Leistungsfähigkeit der Akkus, die den Bus mühelos über den Tag hinweg betriebsbereit hielten.

Auch die aktuelle Machbarkeitsstudie bestätigt die Einsatzfähigkeit von Batteriebussen auf fast allen Umläufen. Es ist sinnvoll diese Umläufe mit wenig Aufwand und Kosten zuerst umzustellen.

Die in der folgenden Tabelle dargestellten Umläufe sind die Ausnahme und nicht direkt mit batterieelektrischen Bussen als Depotlader elektrifizierbar.

Befahrbarkeit	Umläufe (Betriebshof)	Betroffene Linien	Fahrzeugtyp	Gesamtstrecke [km]
Kritisch	(21) 10009 (Beerfelden)	54, 51, 53, 55	Midibus	270
Nein	(5) 70105 (Rimhorn)	20, 21, 22, 23	Solobus	475
	(8) 501011 (Weilbach)	39	Solobus	422
	(13) 4011401 (Höchst)	35, 24, 31, 30, 34, 23, 21	Solobus	560
	(33) 10010/10020 (Michel.)	20	Solobus	435
	(58) 60101 (Hummetroth)	35	Solobus	418
	(62) 101202 (Michel.)	2, 4, 42	Midibus	258
	(63) 1012201 (Michel.)	1	Midibus	256
	(64) 1012203 (Michel.)	4, 3	Midibus	270
	(65) 1012204 (Michel.)	1, 4	Midibus	281

Abbildung 9.1: Umsetzbarkeit der Umläufe mit Elektrobusbetrieb

Hier sind zum derzeitigen Stand der Technik Anpassungen in der Umlaufplanung oder ein Fahrzeugmehrbedarf erforderlich. Die Ergänzung des Depotladerkonzeptes durch die Einrichtung eines Ladepunktes am Bahnhof Höchst ermöglicht die Durchführung des Umlaufs 60101 für die Linie 35. Hingegen ist bei der Einrichtung von Ladepunkten in Michelstadt, Beerfelden oder Erbach vorerst keine Veränderung zu erwarten. Weitere Umläufe sind aktuell ggf. durch Brennstoffzellenbusse realisierbar, wenn entsprechend grüner Wasserstoff und die erforderliche Infrastruktur zur Verfügung steht. Doch auch bei Brennstoffzellenbussen mit Zusatzheizgerät gibt es noch folgende nicht befahrbare Umläufe

- » 70105
- » 501011
- » 4011401

Letztlich spielt aber auch die Einschätzung der OREG, der OdVB und des Landkreises sowie deren individuelle unternehmerische Gewichtung der einzelnen Kriterien eine entscheidende Rolle bei der Technologieentscheidung.

10 Umsetzungs- und Handlungsempfehlung

Die Umstellung auf emissionsfreie Antriebe bei der OREG und der OdVB soll schrittweise erfolgen. Entscheidend ist der durch die Entscheidungsträger zu fassender Beschluss für die zum Einsatz kommende alternative Antriebstechnologie. Sobald dieser vorliegt ist ein Umstellungsplan zu entwickeln, der neben betrieblichen Aspekten, wie Neu-/Wiederbeschaffungszyklen für Fahrzeuge, ebenfalls gesetzliche Vorgaben, wie Beschaffungsquoten der Clean Vehicles Directive²³, berücksichtigt. Es ist ein Betriebskonzept für den Elektrobuseinsatz festzulegen, welches das gewählte Fahrzeugkonzept und Ladekonzept sowie erforderliche betriebliche Anpassungen beinhaltet. Für das entwickelte Betriebskonzept ist ein Finanzierungsplan aufzustellen, der zu bestätigen ist.

Mit Projektbeschluss kann mit dem Vorhaben begonnen werden. Die Umstellung der Busflotte auf Elektrobusbetrieb ist durch einen tiefgreifenden Systemwechsel gekennzeichnet. Insbesondere das erforderliche Zusammenspiel von Fahrzeugen und Ladeinfrastruktur erfordert eine umfassende Koordination aller projekt-relevanten Prozesse und Leistungen. Ein frühzeitiges Einbinden aller am Projekt Beteiligten fördert dabei eine weitgehende reibungslose Projektumsetzung.

Im Ergebnis der Machbarkeitsstudie ist nach Bewertung aller untersuchten Kriterien der Batteriebus als Depotlader mit einer konduktiven Ladung über ein Plug-In-System in vielfacher Hinsicht objektiv besser zu bewerten und stellt somit das für die OREG und die OdVB am besten geeignete Antriebskonzept dar.

Mit batterieelektrischen Depotladern können bei den gegebenen Rahmenbedingungen und mit Nutzung eines Zusatzheizgerätes etwa 84 Prozent der vorhandenen Umläufe zum „Begin Of Life“ der Traktionsbatterie gefahren werden. Ohne Inanspruchnahme des Zusatzheizgerätes sind 77 Prozent der Umläufe direkt umstellbar.

Durch eine Umlaufoptimierung besteht kein zusätzlicher Bedarf an Solobussen für den Einsatz von Batteriebussen. Die neuen Technologien bieten eine effiziente Alternative, die den bisherigen Bedarf an herkömmlichen Solobussen deckt. Des Weiteren können die derzeit nicht erfüllbaren Umläufe durch die geschickte Aufteilung und den Einsatz von anderen Bussen mit früher endenden Umläufen

²³ Mittel- bis langfristig sind die Vorgaben der Clean Vehicles Directive (CVD) und des Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetzes (SaubFahrzeugBesch) in der Beschaffungsplanung zu berücksichtigen. Maßgebend sind die Beschaffungsquoten für die zwei Referenzzeiträume bis 2030. Für Beschaffungen ab 2031 existiert derzeit noch keine Gesetzesgrundlage. Es steht lediglich fest, dass die Quoten des 2. Referenzzeitraumes fortgelten, falls für den Zeitraum ab dem 1. Januar 2031 keine neuen Mindestziele festgelegt werden.

Umsetzungs- und Handlungsempfehlung

bedient werden, wodurch kein weiterer Bedarf entsteht. Allerdings besteht ein Fahrzeugmehrbedarf von 2 Kleinbussen speziell im Bereich der Batteriebusse. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, die Flotte entsprechend den spezifischen Anforderungen der verschiedenen Technologien zu optimieren

Um die Energieversorgung für die ermittelten Leistungsbedarfe je Betriebshof zu realisieren, ist entsprechende Ladeinfrastruktur erforderlich. Diese Komponenten umfassen jeweils eine Übergabestation, Transformatoren und Ladestationen mit Ladegeräten. Ausgehend von einer zu errichtenden Übergabestation zur elektrischen Anbindung des Betriebshofes und der Realisierung der Schutz- und Messstellenfunktionen erfolgt die weitere Verteilung im Betriebshof. In Abhängigkeit des Fahrzeughochlaufes sind die Betriebshöfe vorbereitend mit entsprechenden Transformatoren auszustatten. Ladegeräte und die Ladestationen mit den CCS-Ladern sind ebenfalls an den Fahrzeughochlauf anzupassen.

Die erste Ausbaustufe erfordert die Übergabestation und Transformatorenstationen. Im Anschluss je nach Ausbaustufe die Installation der Ladestationen entsprechend des geplanten Fahrzeughochlaufes. Nach Auskunft des Netzbetreibers stellt die elektrische Versorgung der Betriebshöfe technisch kein Problem dar.

An jedem Busabstellort sollte ein Ladepunkt installiert werden. Die Ladeleistung kann für alle Ladepunkte mit 70 kW (netto) festgelegt werden. Die Standzeiten der Fahrzeuge dafür sind ausreichend. Um den Spitzen-Leistungsbedarf zu senken, bietet sich der Einsatz eines Lademanagementsystems in Verbindung mit einem Betriebshofmanagementsystem an, welches auf den Einsatz von Batteriebussen vorbereitet ist. An Standorten mit Reserven bei Platz und Anschlusskapazität können zusätzliche Schnellladepunkte in Betracht gezogen werden. Diese sollten mindestens 100 kW als Ladeleistung je Ladepunkt bereitstellen können.

Nach der Technologieentscheidung und Festlegung des umzusetzenden Betriebskonzeptes erfolgt die konkrete Planung zur Integration des Gesamtsystems, die Beschaffung aller Systemkomponenten, deren Umsetzung und Integration sowie final die Gesamtinbetriebnahme und Aufnahme des Linienbetriebs.

In zeitlicher Hinsicht definieren generell folgende fünf Projektstufen den Projektablauf: 1. Projektvorbereitung, 2. Planung, 3. Ausführungsvorbereitung, 4. Ausführung, 5. Projektabschluss.

Über Umfang und zeitliche Einordnung der nächsten Projektschritte hat die OREG und die OdVB zu entscheiden. Eine Orientierung für den Projektablauf sollen die folgenden Ausführungen geben.

Umsetzungs- und Handlungsempfehlung

1. Projektvorbereitung: Mit Vorliegen der Machbarkeitsstudie wurden alle Technologiealternativen für den Elektrobusbetrieb bezüglich technisch-betrieblicher, wirtschaftlicher und ökologischer Aspekte analysiert und hinsichtlich des Einsatzes bei der OREG und der OdVB bewertet. Auf Grundlage der Ergebnisse aus der Machbarkeitsstudie kann ein Umstellungskonzept definiert werden, welches maßgebend für die sukzessive Umstellung der Busflotte auf Elektrobusbetrieb ist.

Die aktuelle OdVB-Busflotte besteht aus Klasse-II-Fahrzeugen und fällt somit derzeit noch nicht in den Geltungsbereich der CVD. Die Nutzungsdauer der Fahrzeuge der Kategorie A und B ist auf 12 Jahre definiert.

Entsprechend des neuen EU-Kommissions-Vorschlags werden die Emissionsziele für „Überlandbusse“ angesetzt:

- » 45 % Emissionsreduktion ab 2030
- » 65 % Emissionsreduktion ab 2035
- » 90 % Emissionsreduktion ab 2040

Im folgenden Diagramm ist der Hochlauf emissionsfreier Busse dargestellt. Der Fokus liegt auf der Beschaffung der Busse im jeweiligen Jahr unter Berücksichtigung der geltenden Beschaffungsquoten.

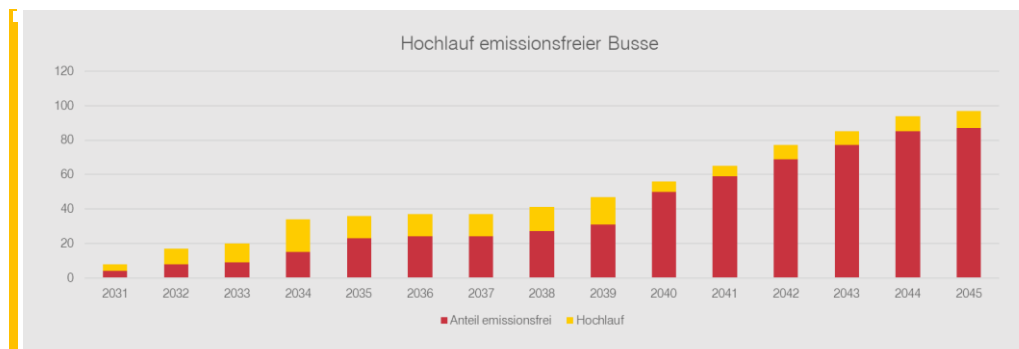


Abbildung 10.1: Hochlauf emissionsfreier Busse

Es wurden nur emissionsfreie Fahrzeuge betrachtet, um die Diversität der Antriebstechnologien gering zu halten. Ansonsten müssten für alle Antriebstechnologien separate Infrastrukturen, z. B. Ladeinfrastruktur für Elektrobusse und Tankinfrastruktur für Erdgas sowie konventionelle Dieselmotoren einschließlich AdBlue, vorgehalten werden.

Zunächst sollten die Solobusse der Kategorie-A-Fahrzeuge (Hauptlinien) umgestellt werden denn diese machen den Großteil der Fahrleistung aus und die Marktverfügbarkeit und Reichweitenleistung ist für den Odenwald gegeben. Die Umstellung längerer Kleinbuslinien ist von der Entwicklung der Reichweite der

Umsetzungs- und Handlungsempfehlung

Batteriebusse abhängig oder kann durch Anpassungen in der Umlaufplanung durchgeführt werden. Das Konzept der Batteriebusse mit Depotladung wird durch die Kategorie-B-Fahrzeuge (Nebenlinien) unterstützt die unter Nutzung der Betriebspausen tagsüber im Betriebshof nachladen können um andere Umläufe verstärken zu können.

2. Planung: Sobald das Betriebskonzept und der Umstellungsplan als abgestimmt vorliegen, ist unter Berücksichtigung aller fachspezifischen Anforderungen schrittweise das Planungskonzept aufzustellen. Hauptbestandteil ist die konkrete Planung der notwendigen Infrastruktur, die Konzeption der Fahrzeuge sowie eine genaue Analyse und Planung der Platzverhältnisse auf den Betriebshöfen. Des Weiteren ist die Ausrichtung der Werkstatt und der IT-Systemarchitektur auf die neue Technologie zu planen. Baubehördlich bewilligungspflichtige Baumaßnahmen sind zu identifizieren und im Rahmen des Baugenehmigungsverfahrens die Baugenehmigung zu erwirken. Der Zeitraum von der Erstellung der Bauantragsunterlagen bis zum Ausreichen der Baugenehmigung hat maßgeblichen Einfluss auf die Dauer dieser Projektstufe. Alle fachspezifischen Zusammenhänge, Vorgänge und Bedingungen sind im Rahmen dieser Projektstufe zu klären und im Planungskonzept verbal und zeichnerisch darzulegen. Ein Projektzeitplan sowie Kosten- und Finanzierungsplan sind aufzustellen. Sofern angestrebt wird, Fördermittel zur Kofinanzierung des Vorhabens einzuwerben, sind auf Grundlage des erarbeiteten Planungskonzepts die zuwendungsfähigen Kosten zu ermitteln und im Förderantrag zu begründen. Die Notwendigkeit der angestrebten Förderung ist durch den systembedingten Mehraufwand bei der Einführung von Elektrobussen und zugehörigen Systemkomponenten zu belegen. Nicht zuletzt ist der ökologische Mehrwert aufzuzeigen.

Umsetzungs- und Handlungsempfehlung

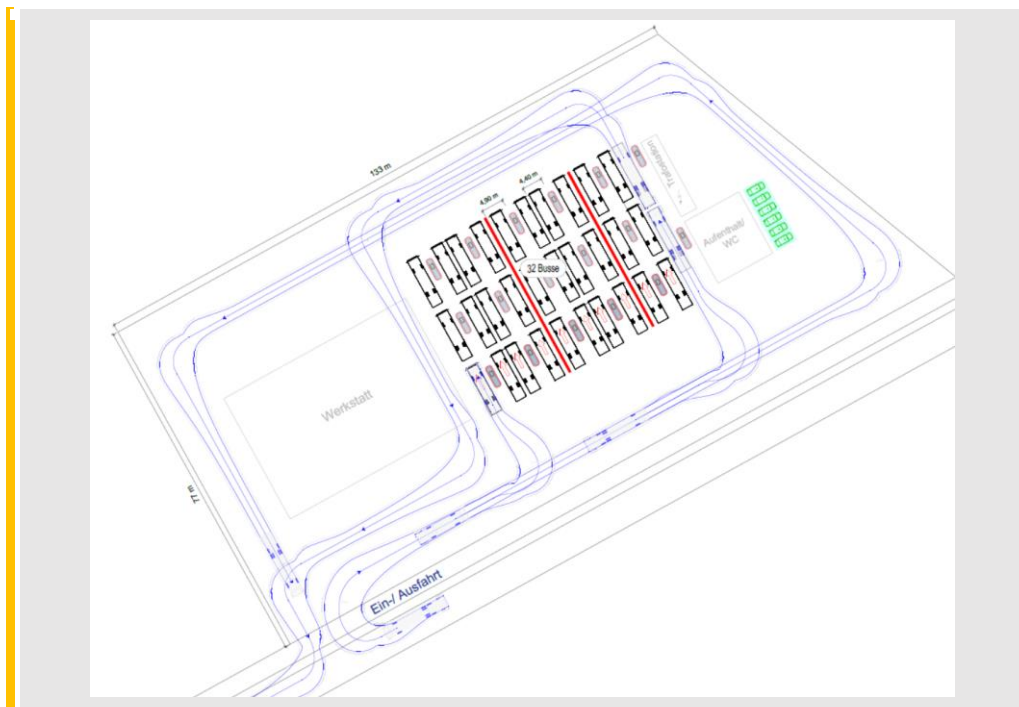


Abbildung 10.2: Exemplarische Fahrzeugabstellung - Variante Blockaufstellung mit Gebäude für die Werkstatt

3. Ausführungsvorbereitung: Sobald die Projektplanung durchgeführt wurde, der genehmigte Bauplan feststeht, die Grundstücksfragen geklärt sind und die Finanzierung, bestenfalls durch das Bereitstellen öffentlicher Zuwendungen, gesichert ist, startet offiziell das Projekt. Es sind nun alle die Ausführungsvorbereitung betreffenden Maßnahmen umzusetzen. Mit dem Ziel, alle für die Projektumsetzung erforderlichen Leistungen an die ausführenden Firmen zu vergeben, ist für alle Leistungsbilder eine ausführungsfähige Planung zu erstellen. Diese stellt die Grundlage für die Ausschreibung der Leistungen dar. Die Durchführung der Ausschreibungs- und/oder Vergabeverfahren für die Beschaffung und Integration aller für das Elektrobussystem relevanten Komponenten – Fahrzeug, Infrastruktur, IT-Systeme, Werkstatteinrichtung, sicherheitstechnische Maßnahmen – ist wesentlicher Bestandteil dieser Projektstufe.

4. Ausführung: Mit Auftragserteilung beginnt die Ausführung der bezuschlagten Leistungen. Es erfolgt die Lieferung, Errichtung und Inbetriebnahme aller Systemkomponenten. Die Ausführungsleistungen umfassen die Fertigung und Lieferung der Fahrzeuge, die Lieferung und Installation der Ladeinfrastruktur, die Ausführung der Bauleistungen, die Umsetzung sicherheitstechnischer Maßnahmen, die Entwicklung und Modifizierung der IT-Systeme, die Ausstattung der Werkstatt mit elektrobusspezifischen Einrichtungs- und Ausrüstungsgegenständen sowie die Durchführung der Fahr- und

Umsetzungs- und Handlungsempfehlung

Werkstattpersonalschulungen. Auf Einhaltung der vertraglich vereinbarten Leistungen, Kosten und Termine ist durch den Auftraggeber hinzuwirken.

5. Projektabschluss: Abschließend erfolgen die Überprüfung, Abnahme und offizielle Übergabe des fertiggestellten Gesamtsystems. Eventuelle Mängel werden erfasst, behoben und alle relevanten Unterlagen übergeben, um den Übergang zur Nutzung zu ermöglichen. Nach erfolgreicher Integration des Gesamtsystems in den bestehenden Betriebsablauf erfolgt der Probebetrieb, vorzugsweise außerhalb des realen Betriebs oder unter realen Einsatzbedingungen, mit der Option zu jederzeitigem Wechsel auf Dieselseinsatz im Problemfall. Im Probebetrieb sollten verschiedene betriebliche und verkehrliche Szenarien getestet werden. Nach Demonstration der vollen Betriebsfähigkeit des Systems kann die neue Antriebstechnik in den Regelbetrieb überführt werden.

Anlagenverzeichnis

- Anlage 1: Grundlagen-Workshop
- Anlage 2: Technologische Grundlagen
- Anlage 3: Technologievergleich BOB-BEB-BZB
- Anlage 4: Anforderungen und Rahmenbedingungen im Linienbetrieb der OdVB
- Anlage 5: BeSysO-Eingangsdaten
- Anlage 6: VDV-Datenerhebung
- Anlage 7: Bestandsaufnahme Instandhaltungstiefe
- Anlage 8: Bestandsaufnahme Personalqualifizierung
- Anlage 9: Bestandsaufnahme Werkstattausrüstung
- Anlage 10: Auslegung der Ladeinfrastruktur
- Anlage 11: Auslegung der Tankinfrastruktur