



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

Koordiniert durch:



Umgesetzt durch:



Machbarkeitsstudie zur Einsatzmöglichkeit von Bussen mit alternativen Antrieben (E-Antrieb und Brennstoffzellentechnologie) bei der Halleschen Verkehrs AG (HAVAG)

Abschlussbericht

Auftraggeber: Hallesche Verkehrs-Aktiengesellschaft

Prof. Dr.-Ing. Thoralf Knote

Dresden, März 2024

Version	Autor	Datum	Änderungen
0.1	Knote	22.06.2023	Vorabstimmung Einführungsschritte mit HAVAG
0.2	Knote	05.09.2023	Erster vollständiger Entwurf für Abstimmung mit HAVAG
1.0	Knote	23.10.2023	Endfassung
2.0	Knote	14.12.2023	Berichtigung Anlage 2
3.0	Knote	05.01.2024	Überarbeitung Beschaffungsplan n. Rückmeldung HAVAG
4.0	Knote	01.03.2024	Anpassung Lastganglinie n. Rückmeldung HAVAG, Alternativstandort Freimfelder Straße 43, BKZ

Inhalt

1	Hintergrund und Einleitung	4
2	Stand der Technik	6
2.1	Datengrundlage	6
2.2	Batteriebusse – Ladestrategien	6
2.2.1	Volllader (auch Depotlader)	6
2.2.2	Gelegenheitsladung (auch Opportunity Charging)	7
2.2.3	Ultraschnellladen (auch Flash Charging)	7
2.2.4	Vergleich der Ladestrategien	8
2.3	Teiltechnologien	8
2.3.1	Grundsätzlicher Aufbau von Batteriebussen	8
2.3.2	Elektroenergiespeicher	9
2.3.3	Heizung	10
2.3.4	Klimatisierung	11
2.4	Kommerziell verfügbare Batteriebusse	12
2.4.1	Klein- und Midibusse	12
2.4.2	Solobusse (ca. 12 m)	17
2.4.3	Gelenkbusse (ca. 18,0 / 18,75 m)	21
2.4.4	Investitionskosten	24
2.5	Batteriebusse – Ladeinfrastruktur	24
2.6	Batteriebusse – Normungslage	27
2.7	Brennstoffzellenbusse – Grundlagen	28
2.8	Eigenschaften von Wasserstoff	28
2.9	Technischer Aufbau von Brennstoffzellenbussen	28
2.10	Stand der Technik und Ausblick	29
2.11	Kommerziell verfügbare Brennstoffzellenbusse	30
2.11.1	Klein- und Midibusse	30
2.11.2	Solo- und Gelenkbusse	30
2.11.3	Investitionskosten	33
3	Randbedingungen, Fahrzeugspezifikationen und Vorgehensweise	34
3.1	Randbedingungen	34
3.2	Fahrzeugspezifikationen	34
3.2.1	Batteriebusse	34
3.2.2	Brennstoffzellenbusse und Batteriebusse mit Brennstoffzellen-Range-Extender	36
3.3	Vorgehensweise	36
3.3.1	Voll- und Zwischenlader	37
3.3.2	Gelegenheitslader	37
3.3.3	Brennstoffzellenbusse	37
4	Bestandsaufnahme und technische Machbarkeit	38
4.1	Analyse der Fahrzeugflotte und betrieblichen Abläufe	38
4.2	Analyse der Betriebsabläufe	38
4.2.1	Batteriebusse – Voll- und Zwischenlader	38
4.2.2	Batteriebusse – Gelegenheitslader	40
4.2.3	Brennstoffzellenbusse	43
4.3	Zwischenfazit	44
5	Einführungsschritte	45
5.1	Einleitung	45
5.2	Definition der Einführungsschritte	45
5.3	Investitionskosten	46
5.4	Emissionsfreie Fahrleistungen	47
5.4.1	Batteriebusse	47
5.4.2	Brennstoffzellenbusse	47
6	Energieverbrauch und Ladeinfrastruktur	48
6.1	Energie- und Heizölverbrauch	48
6.2	Zeitlicher Ablauf des Ladeinfrastrukturaufbaus	48
6.3	Lade- und Anschlussleistungen	49
6.4	Ladezeiten	51
6.5	Aufbau der Ladeinfrastruktur	52
6.5.1	Betriebshof Freimfelder Straße	52

6.5.2	Ladestationen an Endhaltestellen	52
6.6	Investitions- und Betriebskosten für die Ladeinfrastruktur	55
6.7	Ergänzende Anmerkungen	56
6.8	Planungs-, Dispositions- und Überwachungssysteme	57
7	Wasserstoffverbrauch und Tankinfrastruktur	61
7.1	Wasserstoffverbrauch	61
7.2	Tankinfrastruktur auf dem Betriebshof	61
7.3	Betankung bei Dritten	63
8	Werkstattausrüstung, Schulungen und Brandschutz	64
8.1	Werkstattausrüstung für Batteriebusse	64
8.2	Werkstattausrüstung für Brennstoffzellenbusse	69
8.2.1	Sicherheitsaspekte	69
8.2.2	Umbaumaßnahmen Wasserstoff	70
8.2.3	Werkstattausrüstung	71
8.3	Schulungskosten	71
8.4	Brandschutz	73
8.5	Alternative Standorte	75
8.5.1	Betriebshof Rosengarten	75
8.5.2	Ersatzfläche auf dem Grundstück Freimfelder Straße 43	75
8.5.3	Variantenvergleich	76
9	Gesamtkosten und Kostenvergleiche	78
9.1	Mengenmodelle und Betrachtungshorizont	78
9.1.1	Dieselbusse	78
9.1.2	Batteriebusse	79
9.1.3	Brennstoffzellenbusse	79
9.1.4	Jahreslaufleistungen, Verbräuche und zusätzliche Fahrpersonalstunden	80
9.2	Fördermöglichkeiten	81
9.3	THG-Quote	82
9.4	Szenarien	83
9.5	Kostenvergleich Batteriebusse vs. Dieselbusse	83
9.5.1	Kalkulationsgrundlagen	83
9.5.2	Ergebnisse	84
9.6	Kostenvergleich Brennstoffzellenbusse vs. Dieselbusse	85
9.6.1	Kalkulationsgrundlagen	85
9.6.2	Ergebnisse	86
10	Klima- und Umweltaspekte	88
10.1	CO ₂ - und Luftschadstoffemissionen	88
10.1.1	Grundlagen	88
10.1.2	Berechnung der Emissionseinsparung durch den Einsatz von Batterie- und Brennstoffzellenbussen unter Berücksichtigung von Kraftstoffverbrauch und Jahresfahrleistung	91
10.2	Lärmreduktion	92
11	Einführungskonzept	94
11.1	Generelle Ausrichtung und zeitlicher Überblick	94
11.2	Erste Schritte	95
11.2.1	Generelles Projektmanagement	95
11.2.2	Abstimmungen mit Gremien	95
11.2.3	Fahrzeugbeschaffung	96
11.2.4	Beschaffung und Errichtung der Ladeinfrastruktur, Energielieferung	96
11.2.5	Arbeitsschutz, Bauliche Maßnahmen und Brandschutz	96
11.2.6	Erweiterungsfläche	97
11.2.7	Planungs-, Dispositions- und Überwachungssysteme	97
11.2.8	Mitarbeiterschulung	97
12	Zusammenfassung	98
	Anlage 1 – Lagepläne des Betriebshofs mit Ladeinfrastruktur – Bestandsfläche	100
	Anlage 2 – Lageplan des Betriebshofs mit Ladeinfrastruktur – inkl. Erweiterungsfläche	104
	Anlage 3 – Lagepläne der Abstellfläche inkl. Ladeinfrastruktur im Grundstück Freimfelder Straße 43	105

1 Hintergrund und Einleitung

Mit der Verabschiedung der Clean Vehicles Directive (CVD)¹ und deren nationaler Umsetzung in Form des Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetzes (SaubFahrzeugBeschG)² wurden durch die EU und die Bundesregierung die Weichen für die Umstellung von mit Diesel betriebenen Stadtbussen auf emissionsfreie Antriebe gestellt. Die darin vorgegebenen Beschaffungsquoten für saubere und emissionsfreie Stadtbusse der Klasse M3 I liegen bis Ende 2025 bei 45 % und danach bei 65 %.

Das SaubFahrzeugBeschG gestattet die hälftige Teilung der Quote in sog. saubere und emissionsfreie Busse. Für die Praxis hat dies jedoch nur eine marginale Bedeutung, da insb. Verkehrsunternehmen mit kleineren Busflotten kaum eine Drittelung ihres Fuhrparks in Diesel-, saubere und emissionsfreie Antriebe vornehmen werden. In Ermangelung einer effektiven bundes- oder länderübergreifenden Quotenregelung werden Unternehmen wie die Hallesche Verkehrs-Aktiengesellschaft (nachfolgend HAVAG) somit gezwungen sein, ihre Quote allein mit emissionsfreien Bussen, namentlich Batteriebusen oder Brennstoffzellenbusen zu erfüllen. Eine Ausnahme bilden Diesel- oder Erdgasbusse, deren Kauf vor dem 02.08.2021 vertraglich abgeschlossen wurde, unabhängig davon, wann deren Lieferung erfolgt.

Zwei weitere sich anbahnende gesetzliche Regelungen werden die Möglichkeiten zum Kauf von Dieselnissen der Klasse M3 I noch weiter einschränken.

Durch den EU-Rat und das EU-Parlament wurde am 17.01.2024 ein abgestimmter Gesetzesentwurf zur CO₂-Flottengrenzwertnormierung für schwere Nutzfahrzeuge veröffentlicht. Erhält dieser Vorschlag Gesetzescharakter, müssen ab dem Jahr 2030 mindestens 90 % der neu verkauften M3 I-Busse emissionsfrei sein. Ab dem Jahr 2035 steigt die Quote auf 100 %.

Ob es bis 2035 überhaupt noch M3 I-Busse mit Diesel- oder Erdgasmotor geben wird, ist jedoch fraglich. Im Dezember 2023 wurde durch den EU-Rat und das EU-Parlament eine vorläufige Einigung zur Neuregelung der EU-Schadstoffnorm, namentlich EURO 7 erzielt. Deren Inkrafttreten wird für das Jahr 2024 erwartet. Sie sieht für Busse der Klasse M3 I eine weitere Absenkung der Schadstoffgrenzwerte vor. Verschiedene Bushersteller, darunter Daimler Buses und MAN Truck & Bus haben angekündigt, keine Dieselmotoren der Schadstoffnorm EURO 7 für Stadtbusse zu entwickeln. Dies bedeutet, dass nach einer Übergangsfrist von 60 Monaten, also voraussichtlich im Jahr 2029, keine Dieselnisse der Klasse M3 I durch die benannten Hersteller lieferbar sein werden.

Im vorliegenden Dokument werden die Möglichkeiten für den Einsatz von Batterie- und Brennstoffzellenbusen im Liniennetz der HAVAG dargelegt. Im Detail wurden

- Batteriebusse mit verschiedenen Heizungsvarianten und Ladestrategien,
- Brennstoffzellenbusse,
- die zugehörige Lade- bzw. Tankinfrastruktur,
- die Ausrüstung des Betriebshofs,
- Personalschulungen,
- wirtschaftliche Aspekte sowie
- die Umweltwirkung

betrachtet.

Im ersten Teil werden der Stand der Technik sowie Entwicklungstrends beschrieben. Anschließend erfolgt eine Analyse der HAVAG-Busflotte unter Einbeziehung von Fahrzeugen, die von Nachauftragnehmern für HAVAG-Fahrplanleistungen zum Einsatz gebracht werden. Darauf aufbauend werden die technischen Einsatzmöglichkeiten unter den realen Bedingungen der HAVAG untersucht. Grundlage hierfür bildeten neben begründeten Annahmen zu relevanten technischen Parametern (z. B. Reichweiten) die von der HAVAG übergebenen Umlaufpläne. Darüber hinaus wurden Informationen zum Betriebshof übergeben.

Die Analysen gehen von der Maßgabe aus, möglichst keine oder nur unwesentliche Änderungen im Betriebsablauf zuzulassen.

Im dritten Teil der Studie wird die Lade-, Tank- und sonstige Infrastruktur im Betriebshof Freimfelder Straße beschrieben, quantifiziert und mit Kosten hinterlegt. Hierbei werden notwendige Flächenerweiterungen erläutert und begründet.

Eine Zusammenstellung der Investitions- und laufenden Betriebskosten, ein auf Fahrzeug-Kilometer bezogener Kostenvergleich mit Dieselnissen sowie die Quantifizierung der Klima- und Umweltwirkungen schließen die Analysen ab.

¹ Richtlinie (EU) 2019/1161 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20.06.2019 zur Änderung der Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge

² Gesetz über die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge (Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz – SaubFahrzeugBeschG vom 09.06.2021 (BGBl I S. 1691)

In einem letzten Schritt werden Einführungsschritte und die damit verbundenen Kosten beschrieben. Das Einführungskonzept orientiert sich zeitlich an dem ohnehin geplanten Fahrzeugerneuerungsprogramm der HAVAG.

2 Stand der Technik

2.1 Datengrundlage

Die nachfolgenden Kapitel enthalten eine Reihe von Aussagen zu Fahrzeugen und Ladetechnologien, die sich u. a. auf technische Details und Beschaffungskosten beziehen. Die Aussagen beruhen neben allgemeinen Erfahrungswerten auf der IVI-internen Datenbank *IVdat*. Die Datenbank *IVdat*, die aus Gründen der Vertraulichkeit nur von einem eingeschränkten Mitarbeiterkreis des Fraunhofer IVI vollständig eingesehen werden kann, wird seit etwa 14 Jahren mit aktuellen Informationen zu

- innovativen Antriebssystemen für Nutzfahrzeuge (hauptsächlich ÖPNV-Fahrzeuge),
- zugehöriger Nebenaggregate,
- zugehöriger Lade- und Tankinfrastruktur sowie
- Kostenstrukturen

aufgebaut und ständig aktualisiert. Die Daten werden hauptsächlich aus

- Marktbeobachtungen mit Hilfe öffentlich zugänglicher Daten,
- Gesprächen mit Herstellern sowie
- Gesprächen mit Verkehrsunternehmen

bezogen und sind in einen Teil mit öffentlich zugänglichen und auch referenzierten Daten sowie einen Teil mit vertraulichen Daten unterteilt. Alle vertraulichen Daten wurden anonymisiert und werden grundsätzlich nur in aggregierter Form bzw. als Bestandteil allgemeiner Aussagen verwendet. Angaben zu Kostenstrukturen werden nur als Anhaltswerte bzw. Preisbereiche in Berichte, Vorträge o. ä. eingearbeitet.

2.2 Batteriebusse – Ladestrategien

Trotz enormer Fortschritte in der Entwicklung von Batterietechnologien sind Batteriebusse derzeit und auch noch in absehbarer Zukunft hinsichtlich ihrer Reichweite eingeschränkt. Daraus folgt, dass Batteriebusse nur mit Umlaufplänen mit geringer bis mittlerer Fahrweite eingesetzt werden können bzw. fahrzeugseitige Energiespeicher im laufenden Betrieb nachgeladen werden müssen.

In jedem Fall ist vorab anhand einer Energiebilanzrechnung zu prüfen, ob sich eine Linie, ein Linienbündel bzw. ein Umlaufplan für den Betrieb von Batteriebussen eignet.

Für den Betrieb von Batteriebussen sind drei Nachladestrategien möglich, die in den Abbildungen 2-1 bis 2-3 dargestellt sind.

2.2.1 Volllader (auch Depotlader)

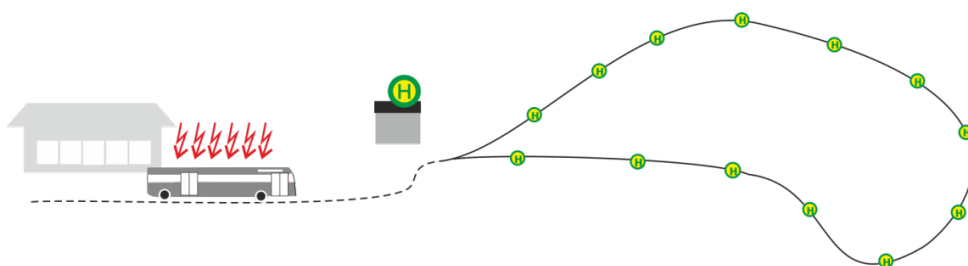


Abbildung 2-1
Volllader + Ganztageinsatz ohne Zwischenladung

Ein Nachladeregime, bei dem die elektrische Energie nur während der Betriebspausen (i. d. R. nachts) und zwischen den Verkehrsspitzen (Zwischenlader) auf dem Betriebshof nachgeladen wird, hat klare Vorteile hinsichtlich der zu installierenden Ladeinfrastruktur. Diese muss lediglich auf dem Betriebshof errichtet werden, wo Ladevorgänge außerhalb des öffentlichen Straßenraums unter weitgehend kontrollierbaren Bedingungen vorgenommen werden können. Hinzu kommt, dass die Energiespeicher zumeist schonend mit vergleichsweise geringer Ladeleistung geladen werden müssen.

Nachteile sind die Notwendigkeit entsprechend großer und kostenintensiver Elektroenergiespeicher sowie eingeschränkte Reichweiten zwischen den Nachladevorgängen auf dem Betriebshof.

Volllader sind weniger anfällig gegenüber Verspätungen, Sperrungen oder Umleitungen als andere Ladestrategien, da sie nicht auf Ladezeiten im Betrieb angewiesen sind. Verspätungen wirken sich jedoch auf die Reichweite aus, insb. bei rein elektrischen Heizungen.

Eine abgewandelte Form der Depotladung stellt die z. B. im niederländischen Eindhoven praktizierte Form der Nachladung dar. Dabei werden die Fahrzeuge aus dem laufenden Betriebsablauf abgezogen, um sie mit hoher Ladeleistung auf dem Betriebshof nachzuladen. Während der Ladezeiten erfüllen andere, frisch aufgeladene Fahrzeuge die Fahrplanaufgaben.

2.2.2 Gelegenheitsladung (auch Opportunity Charging)

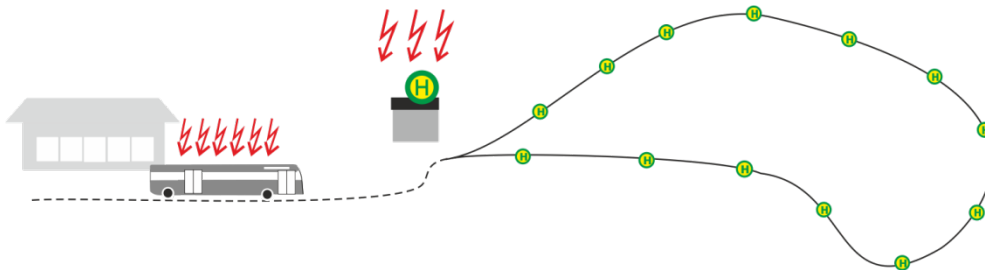


Abbildung 2-2
Nachladen +
Gelegenheitsladen
in Fahrpausen an
Endhaltestellen

Das Nachladen sowohl im Betriebshof als auch an den Endhaltestellen bzw. an Haltestellen mit längerer Wartezeit hat den Vorteil, dass bei richtiger Auslegung des Elektroenergiespeichers eine deutlich größere Reichweite ohne wesentliche Einschränkungen im Betriebsablauf erzielt werden kann. In vielen Fällen ist es sogar möglich, den Betriebsablauf, wie er mit Dieselbussen durchgeführt wird, vollständig und ohne zusätzlichen Fahrzeug- und Personalaufwand abzubilden.

Hinzu kommt, dass für diese Form des Nachladeregimes kleinere und besser in die Fahrzeuge integrierbare Elektroenergiespeicher notwendig sind.

Die notwendige Länge der Ladezeiten hängt von verschiedenen Faktoren ab, insb. von der Energiespeichergröße, der Umlaufplanlänge und der zeitlichen Lage von Lademöglichkeiten im Tagesverlauf. Überschläglich kann davon ausgegangen werden, dass bei Umlaufplänen von mehr als 250 km in Summe ein Sechstel der Fahrtzeiten als Wendezeiten mit Lademöglichkeit zur Verfügung stehen muss.

Den unbestrittenen Vorteilen stehen jedoch auch klare Nachteile gegenüber. So ist zusätzlich eine angepasste Ladeinfrastruktur im Liniennetz zu installieren, wofür in Summe deutlich höhere Kosten anfallen als bei einer ausschließlichen Nachladung im Betriebshof. Hinzu kommen evtl. Schwierigkeiten bei der baulichen Integration der Ladeinfrastruktur in den öffentlichen Straßenraum. Darüber hinaus ist ein solches Nachladeregime nur auf Linien einsetzbar, die eine geringe bis mäßige Verspätungsanfälligkeit aufweisen.

Den Mehrkosten für die Ladeinfrastruktur an den Endhaltestellen stehen aber geringere Kosten für die Ladeinfrastruktur im Betriebshof aufgrund geringerer Ladeleistungen sowie kleinere bordseitige Elektroenergiespeicher gegenüber. Grundsätzlich ist es auch möglich, auf die Nachladung im Betriebshof zu verzichten, jedoch bedingt dies zusätzliche Ladezeiten nach dem Ausrücken aus dem Betriebshof bzw. vor dem Einrücken in den Betriebshof.

2.2.3 Ultraschnellladen (auch Flash Charging)

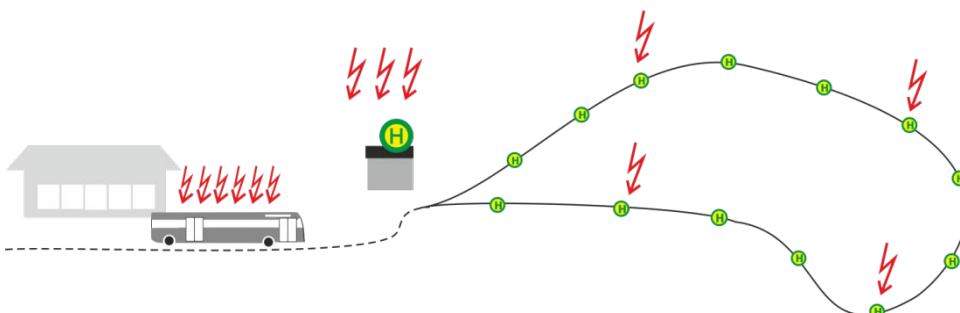


Abbildung 2-3
Nachladen + Unter-
wegsladen beim
Fahrgastwechsel an
Haltestellen und an
Endhaltestellen

Wird neben dem Nachladen auf dem Betriebshof sowie an Endhaltestellen auch Energie an Unterwegshaltestellen zugeführt, können noch kleinere Elektroenergiespeicher verwendet werden. Hinzu kommt, dass die Ladezeiten an den Endhaltestellen verringert werden können und dadurch die Verspätungsanfälligkeit eine geringere Rolle spielt.

Nachteilig sind der nochmals erhöhte Aufwand für die Ladeinfrastruktur sowie die Anforderungen an die Ladevorgänge an den Unterwegshaltestellen, die sinnvoll nur mit extrem hoher Ladeleistung durchgeführt werden können. Somit ist das Nachladekonzept nur auf Linien mit einer großen Anzahl von Fahrzeugen wirtschaftlich sinnvoll anwendbar.

2.2.4 Vergleich der Ladestrategien

Alle Ladestrategien haben Vor- und Nachteile, die in der nachfolgenden Tabelle qualitativ dargestellt werden. Ist eine Nachladung außerhalb des Betriebshofes notwendig, ergibt sich daraus eine deutlich geringere Flexibilität im Buseinsatz, da die Busse die Halte- oder Endhaltestellen mit Ladestationen anfahren müssen. Abweichende Linienführungen, z. B. durch Umleitungen, wenn diese mit deutlichen längeren Fahrweiten verbunden sind oder die Verlängerung einer Linie über die Endhaltestellen mit Ladestation hinaus sind nicht ohne weiteres möglich. Gleiches gilt für Sperrungen, längerfristige Baumaßnahmen oder Ähnliches, bei denen eine Ladestation nicht angefahren werden kann.

	Volllader	Gelegenheitslader	Ultraschnellladung
Reichweite	-	±	± ¹⁾
Flexibilität	+	- ²⁾	--
Kosten	+	±	--
Städtebauliche Integration	++	±	-
Technische Reife	±	±	±

¹⁾ entlang ihrer mit Ladeinfrastruktur ausgerüsteten Linie / ihres Linienbündels

²⁾ abhängig von Energiespeichergroße

Tabelle 2-1: Vergleich von Ladestrategien und der zugehörigen Technologien

2.3 Teiltechnologien

Nachfolgend werden die wichtigsten Teiltechnologien für Batteriebusse, sofern diese für deren Einsatzfähigkeit von besonderer Bedeutung sind, näher erläutert.

2.3.1 Grundsätzlicher Aufbau von Batteriebussen

Abbildung 2-4 zeigt den grundsätzlichen Aufbau von Batteriebussen.

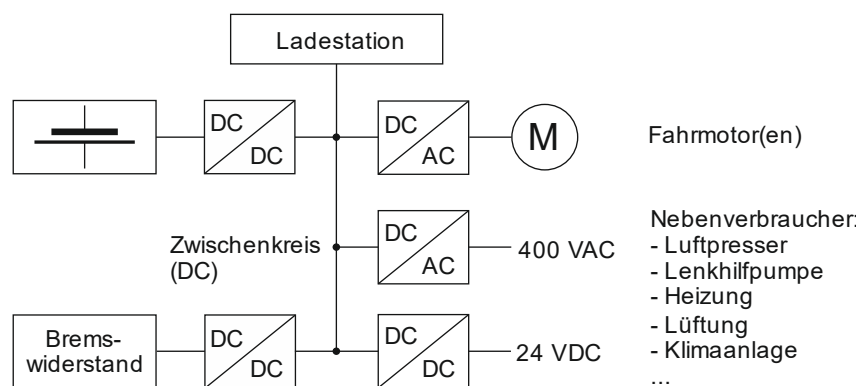


Abbildung 2-4
Grundaufbau einer
Traktionsausrüstung
von Batteriebussen
(ohne Steuerung)

Grundlage für die Traktionsausrüstung eines Batteriebusses stellt der sog. Gleichspannungs-Zwischenkreis dar, über den die Anbindung aller Komponenten der Traktionsausrüstung sowie der Nebenverbraucher erfolgt. In Abbildung 2-4 wird deutlich, dass in einem Batteriebus mehrere Spannungsebenen und -formen miteinander vereint werden müssen. Dies erfolgt über den Gleichspannungs-Zwischenkreis mit Hilfe von Umrichtern und Gleichspannungswandlern. Dabei wird die Gleichspannung (DC) auf dem Zwischenkreis in einem vorgegebenen Bereich gehalten. Eine typische Zwischenkreisspannung liegt z. B. bei 650 VDC. Ein Gleichspannungswandler zwischen Batterie und Zwischenkreis ist nicht zwingend erforderlich.

Bei der in den Fahrzeugen verbauten Leistungselektronik handelt es sich im Wesentlichen um die Umrichter, Gleichspannungswandler, den Bremswiderstand sowie die zugehörige Steuerung. Ergänzt wird die Traktionsausrüstung durch die Fahrmotoren. Je nach Definition werden auch die Elektroenergiespeicher und die Nebenverbraucher der Traktionsausrüstung zugerechnet.

Der Bremswiderstand hat eine ausschließliche Sicherheitsfunktion. Er dient dazu, den Zwischenkreis und die angeschlossenen Komponenten vor Überspannung zu schützen. Für Stadtbusse ist er jedoch nicht zwingend vorgeschrieben, sofern anderweitige Maßnahmen gegen Überspannung (z. B. permanente Reserve in der Traktionsbatterie) vorhanden sind.

Bei der Traktionsausrüstung handelt es sich bei den Grundtechnologien und z. T. auch bei den konkreten Komponenten um erprobte und technisch ausgereifte Technologien und Produkte, die nicht selten bereits seit Jahrzehnten eingesetzt werden. Davon unbenommen ist die Tatsache, dass es auch bei diesen Komponenten zu Ausfällen im Rahmen ihrer Neuentwicklung und -anwendung kommen kann.

Elektrisch angetriebene Nebenaggregate wie Luftpresse, Lenkhilfpumpen oder Lüfter stehen zur Verfügung, müssen aber als technisch noch nicht optimiert und ausgereift bezeichnet werden. Insbesondere die Geräuschentwicklung wird bei diesen Nebenaggregaten häufig noch kritisiert.

2.3.2 Elektroenergiespeicher

Obwohl Elektroenergiespeicher in den letzten Jahren enorme Fortschritte sowohl bezüglich ihrer Energie- und Leistungsdichte als auch hinsichtlich ihrer Nutzungsdauer erfahren haben, stellen sie nach wie vor die limitierende Technologie in Batteriebussen dar, da zum gegenwärtigen Zeitpunkt erzielbare Reichweiten noch nicht den gesamten Anforderungen eines Busbetriebs entsprechen.

Maßgebend für die Bewertung von Elektroenergiespeichern für mobile Anwendungen ist deren gewichtsbezogene Energiedichte. Diese liegt gegenwärtig auf Systemebene, also unter Einrechnung von Einhausungen, Nebenaggregaten etc., bei etwa 100 Wh / kg für Hochleistungs- und ca. 160 – 190 Wh / kg für Hochenergiebatterien (High Power bzw. High Energy-Batterien).

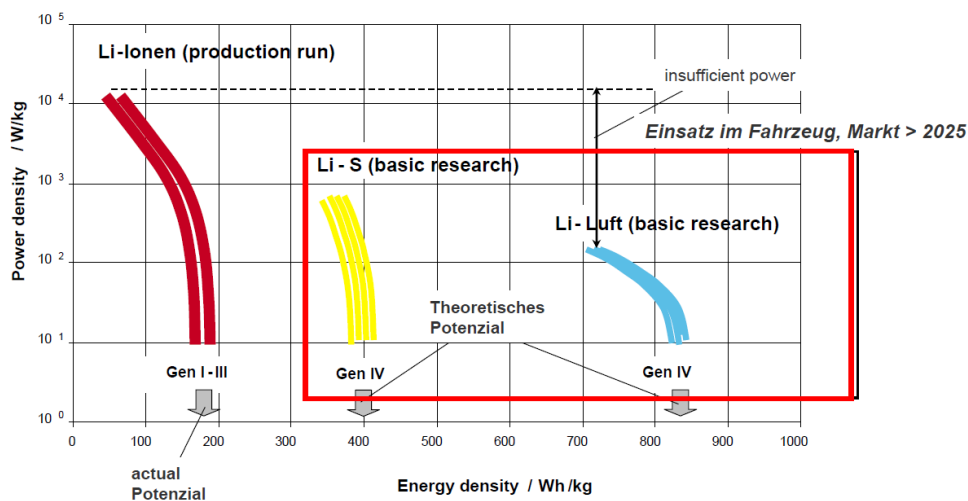


Abbildung 2-5
Energie- und
Leistungsdichten
von Batteriezellen;
Quelle: Hoppecke

Hinsichtlich der Entwicklung von Zelltechnologien muss zwischen aktuellen und zukünftigen Zelltechnologien unterschieden werden. Ein Beispiel hierfür zeigt Abbildung 2-5. Zelltechnologien, die derzeit kommerziell verfügbar und in mobilen Anwendungen zum Einsatz gebracht werden, haben noch ein Optimierungspotenzial von etwa 20 – max. 30 %. Es ist also davon auszugehen, dass mit diesen Zelltechnologien in den nächsten Jahren nicht alle Einsatzanforderungen an Batteriebusse erfüllt werden.

Zelltechnologien der sog. nächsten Generation werden voraussichtlich deutlich höhere Energiedichten aufweisen, wobei zurzeit noch offen ist, inwieweit dies mit einer geringeren Zyklenfestigkeit, die wiederum Auswirkungen auf die Lebensdauer hat, erkauft werden muss. Derartige Zelltechnologien befinden sich jedoch noch im Labor- oder Prototypenstatus und es muss davon ausgegangen werden, dass sie erst ab Mitte dieses Jahrzehnts kommerziell für mobile Anwendungen verfügbar sind.

Zu den Zelltechnologien der nächsten Generation zählen sog. Festkörperakkumulatoren (Feststoffbatterien). Deren theoretische Energiedichte (Wh / kg) liegt um ein Vielfaches über der von Lithium-Ionen-Batterien. Selbst unter der Annahme, dass nur ein Bruchteil der theoretischen Energiedichte in kommerziell verfügbaren Feststoffbatterien umgesetzt werden kann, sind für den Busbetrieb ausreichende Reichweiten ohne Nachladung möglich.

Neben der hohen Energiedichte zeichnen sich Feststoffbatterien durch eine Temperaturunabhängigkeit aus. Die genannten Vorteile werden jedoch durch geringe Leistungsdichten erkauft, da sich hohe elektrische Ströme nur schwer zwischen den Festkörperkomponenten einer solchen Batterie übertragen lassen. Hinzu kommt, dass zumindest einige Varianten der Feststoffbatterien mit höheren Betriebstemperaturen inkl. aktiver Heizung betrieben werden müssen.

Noch völlig offen ist die kommerzielle Verfügbarkeit von Feststoffbatterien. Einen ersten Ansatz bietet die französische Firma Blue Solutions, die u. a. EvoBus mit Feststoffbatterien (440 kWh) für den E-Citaro seit belieferte.

Feststoffbatterien, die ausreichend hohe Reichweiten für alle Busanwendungen bieten, werden voraussichtlich erst in der zweiten Hälfte dieses Jahrzehnts lieferbar sein.

Bei der Bewertung von Batterien ist darauf zu achten, dass

- vom angegebenen Nominalenergieinhalt i. d. R. nur 70 bis max. 80 % genutzt werden können und
- am Ende der definierten Nutzungsdauer nur noch 80 % der ursprünglichen Speicherfähigkeit zur Verfügung steht.

2.3.3 Heizung

Die für die Beheizung von Batteriebussen benötigte elektrische Energie wirkt sich direkt auf deren Reichweite und damit auf die Einsatzflexibilität aus.

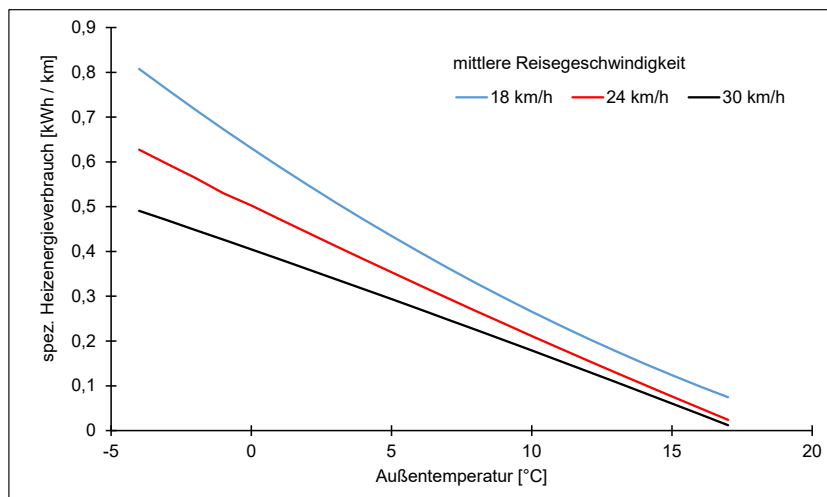


Abbildung 2-6
Heizenergiebedarf
eines Solobusses –
Messwerte Fraun-
hofer IVI

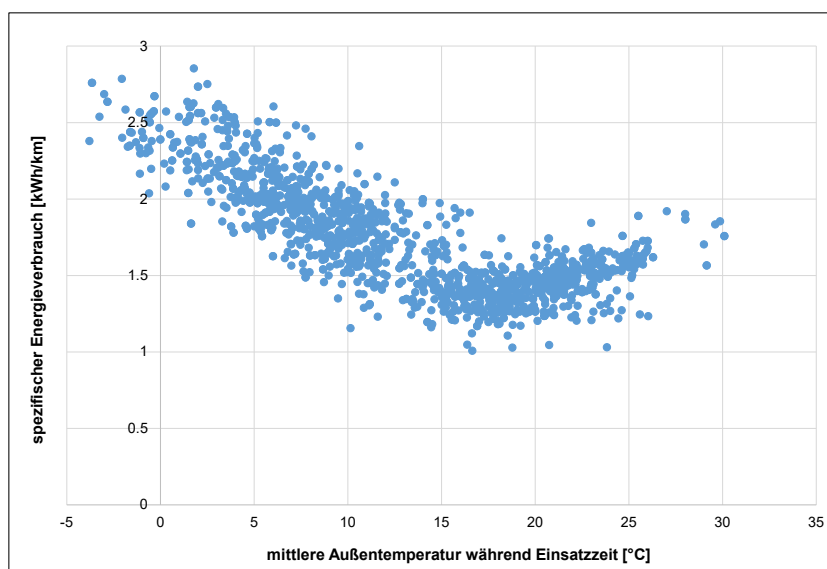


Abbildung 2-7
Gesamtenergiebe-
darf von Solo-
batteriebusen –
Messwerte

Abbildung 2-6 zeigt den Heizenergiebedarf von Solobussen in Abhängigkeit von der Außentemperatur und der Reisegeschwindigkeit. Dabei handelt es sich zunächst um die in kWh / km ausgedrückte Wärmemenge. Unterstellt man bei einer rein elektrischen Widerstandsheizung einen Wirkungsgrad von annähernd 1, wird deutlich, dass bei sehr niedrigeren Temperaturen (Temperaturwerte unterhalb der gemessenen Außentemperaturen) der

Heizenergiebedarf höher sein kann als der Verbrauch für die Traktion und andere Nebenverbraucher. Dieser liegt für Solobusse i. d. R. zwischen 0,9 und 1,4 kWh / km.

Abbildung 2-7 unterstreicht diese Aussage anhand von gemessenen Energieverbrauchswerten von Solobatteriebusen mit elektrischer Widerstandsheizung, die an kalten Tagen gegenüber moderaten Außentemperaturen (ca. 17°C) einen Energiemehrverbrauch von etwa 1,0 – 1,3 kWh / km aufweisen.

Wärmepumpen

Moderne Batteriebusse verfügen über energieeffiziente Wärmepumpen (z. B. Konvekta UltraLight 500 oder Aurora Borealis). Wärmepumpen erzeugen mit Hilfe von Umgebungswärme mehr im Fahrzeug nutzbare Wärmeenergie als dafür elektrische Energie aufgewendet wird. Deren Verhältnis zueinander wird als sog. Coefficient of Performance (COP) bezeichnet, der in Abhängigkeit von der Außentemperatur und dem Temperaturhub des Heizwassers innerhalb der Wärmepumpe zwischen 2,0 und 3,5 liegt, wobei der COP mit abnehmender Außentemperatur ebenfalls sinkt. Bei einem COP von 2,0 werden beispielhaft mit einer Kilowattstunde elektrischer Energie 2,0 kWh Wärmeenergie erzeugt.

Nichtsdestotrotz sind auch beim Einsatz effizienter Wärmepumpen Auswirkungen auf die Reichweite von Batteriebusen zu verzeichnen.

Infrarotheizung

Infrarotheizsysteme erwärmen angestrahlte Körperflächen mittels Infrarotstrahlen (3 – 100 µm). Im Gegensatz zu Konvektionsheizungen erfolgt nur eine geringere Erwärmung der gesamten Luft, wobei sich ein Wohlbefinden durch die direkte Strahlungswärme auch bei niedrigeren Innenraumtemperaturen einstellt. Nicht direkt angestrahlte Körperflächen bleiben jedoch weitgehend kalt, weshalb man häufig auch vom sog. Lagerfeueffekt spricht. Fahrgastinnenräume müssen daher mit mehreren Reihen von Infrarotstrahlern ausgerüstet werden, um Unbehaglichkeiten zu vermeiden.

Hinzu kommt, dass die Montage von Infrarotheizungen in Linienbussen baulichen Restriktionen unterworfen ist. So ist beispielsweise die Anbringung von Infrarotstrahlern gegenüber von Fenstern beschränkt, um Strahlungsasymmetrien zu vermeiden. Bei der Deckenanbringung sollte ein Abstand von etwa einem Meter zu Fahrgästen eingehalten werden, was praktisch kaum umsetzbar ist.

Zusammenfassend sind Infrarotheizungen bestenfalls als ergänzende Heizsysteme und zur Verringerung der Innenraumlufttemperatur und damit verbunden zur Minderung der Konvektionsverluste geeignet.

Hybridheizungen

Die beschriebenen Auswirkungen vollelektrischer Heizsysteme auf die Reichweite von Batteriebusen, die im Wesentlichen erst mit der Einführung deutlich energiedichterer Batterien überwunden werden können, erfordern für bestimmte Batteriebusanwendungen Hybridheizungen als Übergangstechnologie. Hybridheizungen (z. B. Valeo Thermo H) kombinieren elektrische und mit Brennstoff betriebene Heizelemente, wobei der Einsatz und die maximale elektrische Leistung angepasst werden können.

Eine weitere Form der Hybridheizung, die gegenwärtig von vielen Busherstellern angeboten wird, ist die Unterstützung der Wärmepumpe durch einen mit Flüssigbrennstoff betriebenen Zusatzheizer. Dieser kann im Heizkreislauf vor der Wärmepumpe angeordnet sein und erhöht die sog. Rücklauftemperatur in die Wärmepumpe hinein, wodurch der Energieaufwand für die Erhitzung des Heizwassers gesenkt werden kann. Durch ein intelligentes Heizmanagement kann die Zuschaltung des Zusatzheizers in Abhängigkeit von der Außentemperatur gesteuert werden. Üblich sind 0 – 5°C, unterhalb derer der Zusatzheizer schrittweise zugeschaltet wird. Liegen die Außentemperaturen darüber, ist ein rein elektrischer Batteriebusbetrieb ohne wesentliche Einschränkungen der Reichweite möglich.

Fazit

Unbestritten ist, dass ein Batteriebusbetrieb nur bei rein elektrischer Beheizung vollständig im Sinne des Klimaschutzes und der Luftreinhaltung argumentierbar ist. Um die Auswirkungen einer vollelektrischen im Vergleich zu einer Hybridheizung unter den betrieblichen Bedingungen der HAVAG bewerten zu können, werden nachfolgend verschiedene Heizungsvarianten untersucht.

2.3.4 Klimatisierung

Nachfolgend werden einige Aspekte bzgl. des Energiemehrverbrauchs durch die (Voll)klimatisierung von Bussen dargelegt.

Teil- bzw. ΔT -Klimatisierung

Von einer Teil- bzw. ΔT -Klimatisierung spricht man, wenn ab einer bestimmten Außentemperatur im Fahrgastinnenraum nur eine Temperaturdifferenz von 3 – 4 Kelvin unterhalb der Außentemperatur eingehalten wird (s. VDV-Schrift 236/1). Zwar reduziert diese Form der Klimatisierung auch die Reichweite eines Batteriebusse, jedoch spielt diese Reduzierung im Vergleich zur Beheizung der Fahrzeuge fast keine Rolle, da für das Heizen deutlich mehr Energie aufgebracht werden muss.

Vollklimatisierung

Bei Einsatz einer Vollklimatisierung wird an heißen Tagen die volle Kälteleistung und damit auch die volle elektrische Anschlussleistung abgerufen. Der damit verbundene Energiebedarf reduziert die Reichweite von Batteriebusen signifikant, wodurch der Einsatz einer Vollklimatisierung nur nach eingehender Bewertung der betrieblichen Auswirkungen zu empfehlen ist.

Fazit

Um betriebstechnisch akzeptable Reichweiten erzielen zu können, wird neben einer Vollklimatisierung für eine Übergangszeit auch der Einsatz von ΔT -Klimatisierungen untersucht.

2.4 Kommerziell verfügbare Batteriebusse

Batteriebusse werden von verschiedenen Busherstellern angeboten. Die nachfolgende Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und die Reihenfolge der Aufzählung stellt keine Wertung dar. Hinsichtlich der Konfigurationen wurden ausschließlich Werte aufgeführt, die offiziell bereits bekannt sind.

Allen Batteriebusen ist gleich, dass sie vornehmlich für den Einsatz in Städten und einer Höchstgeschwindigkeit von maximal 80 km/h konzipiert wurden. Die Beförderungskapazität hängt von der Batteriegröße ab, jedoch werden i. d. R. ausreichende Fahrgastzahlen erreicht. Diese liegen derzeit immer noch unter der Kapazität von Dieselbussen. Konkrete Beförderungskapazitäten sind den nachfolgenden Fahrzeugsteckbriefen zu entnehmen.

2.4.1 Klein- und Midibusse

Mellor Sigma 7



Abbildung 2-8
Mellor Sigma 7; Quelle:
Mellor

Hersteller:	Mellor, Rochdale, Großbritannien
Länge/Breite:	6.990 mm / 2.080 mm bzw. 7.140 mm / 2.080 mm
Türen:	1
Fahrgäste:	26 (13 Sitzplätze)
Batterie:	127 kWh
Reichweite:	ca. 150 km, abhängig vom Fahrzyklus
Nachladung:	Steckerladung, 20 kW (AC), 75 kW (DC)
Heizung:	elektrisch
V_{max} :	unbekannt
Kosten:	unbekannt

Karsan e-Jest



Abbildung 2-9
Karsan e-Jest; Quelle:
Karsan

Hersteller: Karsan Otomotiv San. ve Tic. A.Ş., Türkei
Länge/Breite: 5.845 mm / 2.055 mm
Türen: 1
Fahrgäste: 10 + 2 Sitzplätze / 10 Stehplätze
Batterie: 44 kWh / 88 kWh
Reichweite: ca. 105 / 210 km, abhängig vom Fahrzyklus und Batteriegröße
Nachladung: Steckerladung, 50 kW / 80 kW
Heizung: elektrisch
 V_{\max} : 70 km/h
Kosten: unbekannt

Karsan e-Atak



Abbildung 2-10
Karsan e-Atak; Quelle:
Karsan

Hersteller: Karsan Otomotiv San. ve Tic. A.Ş., Türkei
Länge/Breite: 8.315 mm / 2.436 mm
Türen: 2
Fahrgäste: z. B. 18 Sitzplätze / 34 Stehplätze
Batterie: 220 kWh
Reichweite: ca. 250 km, abhängig vom Fahrzyklus und Batteriegröße
Nachladung: Steckerladung, 80 kW
Heizung: elektrisch
 V_{\max} : unbekannt
Kosten: unbekannt

BYD 8,7



Abbildung 2-11
BYD 8,7

Hersteller:	BYD, China, Ungarn, Vertrieb über BYD Europe mit Sitz in den Niederlanden
Länge/Breite:	8.750 / 2.455 mm
Türen:	2
Fahrgäste:	ca. 50 (max. 22 Sitzplätze)
Batterie:	174 kWh (High Energy)
Reichweite:	ca. 175 km, abhängig vom Fahrzyklus
Nachladung:	Steckerladung
Heizung:	Wärmepumpe
V_{\max} :	70 km/h
Kosten:	ca. 400.000 – 450.000 €

Mellor Sigma 9



Abbildung 2-12
Mellor Sigma 9; Quelle:
Mellor

Hersteller:	Mellor, Rochdale, Großbritannien
Länge/Breite:	9.450 / 2.350 mm
Türen:	2
Fahrgäste:	52 (25 Sitzplätze)
Batterie:	210 kWh
Reichweite:	ca. 200 km, abhängig vom Fahrzyklus
Nachladung:	Steckerladung 100 kW
Heizung:	elektrisch
V_{\max} :	unbekannt
Kosten:	unbekannt

Solaris Urbino 9 LE electric



Abbildung 2-13
Solaris Urbino 9 LE electric
Quelle: Solaris

- Hersteller: Solaris Bus & Coach s.a., Bolechowo, Polen
- Länge/Breite: 8.950 / 2.400 mm
- Türen: 2
- Fahrgäste: ca. 50 – 60 (max. 27 Sitzplätze in Klasse 1 bzw. max. 31 Sitzplätze in Klasse 2)
- Batterie: bis zu 350 kWh (High Energy)
- Reichweite: ca. 200 km, abhängig vom Fahrzyklus
- Nachladung: Steckerladung für Nachladung im Betriebshof (z. B. 80 kW), optional Pantograph
- Heizung: Wärmepumpe, Hybridheizung
- Kosten: ca. 500.000 €

VDL LLE-99 Electric



Abbildung 2-14
VDL LLE-99 Electric
Quelle: VDL

- Hersteller: VDL Bus & Coach bv, Valkenswaard, Niederlande
- Länge/Breite: 9.950 / 2.500 mm
- Türen: 2
- Fahrgäste: ca. 65
- Batterie: 216 kWh (High Power), optional 315 kWh (High Energy)
- Reichweite: ca. 180 – 200 km, abhängig vom Fahrzyklus
- Nachladung: Steckerladung für Nachladung im Betriebshof (z. B. 80 kW)
- Heizung: Wärmepumpe, Hybridheizung
- Kosten: ca. 530.000 €

SOR EBN 8 und 9,5



Abbildung 2-15
SOR EBN 9,5 Quelle: ŠJů,
Wikimedia Commons

Hersteller: SOR Libchavý spol. s r.o.
Länge/Breite: EBN 8: 8.000 / 2.525 mm / EBN 9,5: 9.790 / 2.525 mm
Türen: 2
Fahrgäste: ca. 40 / 60 (max. 16 / 26 Sitzplätze)
Batterie: 172 kWh
Reichweite: ca. 125 – 150 km, abhängig vom Fahrzyklus
Nachladung: Steckerladung
Heizung: elektrisch
 V_{\max} : 80 km/h
Kosten: ca. 500.000 €

IVECO E-Way Full Electric 9,5 m



Abbildung 2-16
IVECO E-Way Full Electric 9,5 m;
Quelle: IVECO

Hersteller: IVECO Bus
Länge/Breite: 9.510 / 2.330 mm
Türen: 2
Fahrgäste: ca. 60 (16 Sitzplätze)
Batterie: 245 kWh
Reichweite: ca. 180 – 225 km, abhängig vom Fahrzyklus
Nachladung: Steckerladung (100 kW)
Heizung: elektrisch
Kosten: ca. 500.000 €

MAN Lion's City 10 E



Abbildung 2-17
MAN Lion's City 10 E; Quelle:
MAN

Hersteller: MAN Truck and Bus
Länge/Breite: 10.575 / 2.550 mm
Türen: 2 / 3
Fahrgäste: max. 80
Batterie: 400 kWh (256 kWh nutzbar) NMC
Reichweite: ca. 250 – 275 km, abhängig vom Fahrzyklus
Nachladung: Steckerladung bis 150 kW
Heizung: Wärmepumpe, Hybridheizung
Kosten: ca. 540.000 €

2.4.2 Solobusse (ca. 12 m)

e-Citaro



Abbildung 2-18
e-Citaro

Hersteller: EvoBus GmbH
Türen: 2 / 3
Fahrgäste: ca. 80 (abhängig vom gewählten Batteriepack)
Batterie: NMC mit ca. 330 kWh / 396 kWh (jeweils ca. 80 % nutzbar)
NMC-Batterien der 3. Generation mit bis zu 588 kWh angekündigt
Reichweite: bis zu 200 km, abhängig vom Fahrzyklus
Nachladung: Steckerladung bis 80 kW,
optional höhere Ladeleistungen inkl. Ladung über Pantograph (330 kWh / 260 kW)
Heizung: Wärmepumpe, Hybridheizung
Kosten: ca. 620.000 €

Solaris Urbino 12 electric



Abbildung 2-19
Solaris Urbino 12 electric

Hersteller:	Solaris Bus & Coach s.a., Bolechowo, Polen
Türen:	2 / 3
Fahrgäste:	ca. 80 – 90 (max. 37 Sitzplätze)
Batterie:	bis zu 125 kWh (High Power) bis zu 396 kWh (High Energy / High Power) Batterien mit > 500 kWh angekündigt
Reichweite:	ca. 80 – 200 km, abhängig vom Fahrzyklus
Nachladung:	450 kW / 200 kW Steckerladung für Nachladung im Betriebshof (z. B. 80 kW)
Heizung:	Wärmepumpe, Hybridheizung
Kosten:	ca. 550.000 €

Citea SLF-120 Electric New Generation



Abbildung 2-20
CITEA SLF-120 Electric New
Generation der Firma VDL;
Quelle: VDL

Hersteller:	VDL Bus & Coach bv
Türen:	2 / 3
Fahrgäste:	ca. 80, abhängig von gewählter Batteriegröße
Batterie:	u. a. 306 kWh (bis zu 490 kWh)
Reichweite:	ca. 160 – 250 km, abhängig vom Fahrzyklus
Nachladung:	u. a. 320 kW (bis zu 430 kW) Steckerladung für Nachladung im Betriebshof
Heizung:	Wärmepumpe, Brennstoff auf Anfrage
Kosten:	ca. 550.000 €

SOR NS electric



Abbildung 2-21
SOR NS electric, Quelle: SOR

Hersteller:	SOR Libchavy spol. s r.o.
Türen:	2 / 3
Fahrgäste:	ca. 80 (max. 35 Sitzplätze)
Batterie:	242 kWh / 388 kWh, NMC
Reichweite:	ca. 140 – 160 km, abhängig vom Fahrzyklus
Nachladung:	Steckerladung
Heizung:	elektrisch
Kosten:	ca. 520.000 €

MAN Lion's City 12 E



Abbildung 2-22
MAN Lion's City 12 E

Hersteller:	MAN Truck and Bus
Türen:	2 / 3
Fahrgäste:	ca. 88
Batterie:	480 kWh (320 – 330 kWh nutzbar) NMC, Batterie mit höherem Energieinhalt angekündigt
Reichweite:	ca. 250 – 275 km, abhängig vom Fahrzyklus
Nachladung:	Steckerladung bis 150 kW
Heizung:	Wärmepumpe, Hybridheizung
Kosten:	ca. 600.000 €

EBUSCO

Hersteller:	EBUSCO GmbH, Helmond, Niederlande, Zulieferung aus China
Türen:	2 / 3
Fahrgäste:	ca. 75
Batterie:	> 350, > 400 oder > 500 kWh (Generation 2.2)
Reichweite:	ca. 250 - 350 km, abhängig vom Fahrzyklus und Batteriegröße
Nachladung:	nur Steckerladung für Nachladung im Betriebshof
Heizung:	elektrisch
Kosten:	ca. 550.000 €



Abbildung 2-23
EBUSCO 12 m

IRIZAR i2e



Abbildung 2-24
IRIZAR i2e auf der Linie 13 in
San Sebastian (altes Design)

Hersteller:	IRIZAR S. Coop., Ormaiztegui, Spanien
Türen:	2 / 3
Fahrgäste:	ca. 80
Batterie:	max. 395 kWh für Schnellladung / max. 430 kWh für Steckerladung
Reichweite:	ca. 250 – 275 km, abhängig vom Fahrzyklus
Nachladung:	(invertierter) Pantograph bis zu 150 kW Steckerladung für Nachladung im Betriebshof
Heizung:	elektrisch, Brennstoff auf Anfrage
Kosten:	ca. 550.000 €

Volvo 7900 Electric



Abbildung 2-25
Volvo 7900 Electric; Quelle:
busandcoachbuyer.com

Hersteller:	AB Volvo, Göteborg; Produktion zukünftig in Ägypten
Türen:	2 / 3
Fahrgäste:	ca. 85 – 90

Batterie: max. 470 kWh für Steckerladung
 Reichweite: ca. 250 – 275 km, abhängig vom Fahrzyklus
 Nachladung: 150 kW Steckerladung, mit Pantograph bis 300 kW
 Heizung: Wärmepumpe, Hybridheizung
 Kosten: unbekannt

IVECO E-Way Full Electric 12 m



Abbildung 2-26
 IVECO E-Way Full Electric 12 m;
 Quelle: sustainable-bus.com

Hersteller: IVECO Bus
 Türen: 2 / 3
 Fahrgäste: ca. 80 (27 Sitzplätze)
 Batterie: NMC (high energy) bis zu 385 kWh, Lithium-Titanat (LTO) bis zu 88 kWh
 Reichweite: ca. 200 – 225 km, abhängig vom Fahrzyklus
 Nachladung: 100 kW Steckerladung, LTO-Batterien bis zu 450 kW über Pantographen
 Heizung: elektrisch
 Kosten: ca. 580.000 €

2.4.3 Gelenkbusse (ca. 18,0 / 18,75 m)

VDL Citea SLF 181 Electric



Abbildung 2-27
 VDL Citea SLF 181 Electric

Hersteller: VDL Bus & Coach bv
 Türen: 3 / 4
 Fahrgäste: ca. 115 – 134
 Batterie: 429 oder 551 kWh (jeweils mit oder ohne Pantograph)
 613 oder 674 kWh (ohne Pantograph)
 Reichweite: ca. 150 – 300 km, abhängig vom Fahrzyklus
 Nachladung: s. o., zzgl. Steckerladung für Nachladung im Betriebshof

Heizung: elektrisch
Kosten: ca. 700.000 €

Solaris Urbino 18 electric



Abbildung 2-28
Solaris Urbino 18 electric

Hersteller: Solaris Bus & Coach s.a., Bolechowo, Polen
Türen: 3 / 4
Fahrgäste: ca. 120 – 135
Batterie: u. a. 175 kWh / 140 kWh nutzbar, Lithium-Titanat (LTO)
u. a. 553 kWh High Energy+
Reichweite: ca. 80 km / ca. 225 km, abhängig vom Fahrzyklus und Heizung
Nachladung: bis zu 450 kW
Steckerladung für Nachladung im Betriebshof
Heizung: Wärmepumpe, Hybridheizung
Kosten: ca. 700.000 €

IRIZAR iebus 18 m



Abbildung 2-29
IRIZAR iebus 18 m; Quelle:
IRIZAR

Hersteller: IRIZAR S. Coop., Ormaiztegi, Spanien
Türen: 3 / 4 / 5
Fahrgäste: ca. 100 – 110
Batterie: 714 kWh / 150 kW (Steckerladung)
470 kWh / 300 kW (Pantograph) / 200 kW (Steckerladung)
Reichweite: ca. 225 – 250 km, abhängig vom Fahrzyklus und Heizung
Nachladung: bis zu 600 kW
Steckerladung für Nachladung im Betriebshof
Heizung: elektrisch, Brennstoff auf Anfrage
Kosten: ca. 750.000 €

Volvo 7900 EA



Abbildung 2-30
Volvo 7900 EA; Quelle: Volvo

Hersteller:	AB Volvo, Göteborg; Produktion zukünftig in Ägypten
Türen:	3 / 4
Fahrgäste:	bis zu 150
Batterie:	max. 470 kWh für Steckerladung (18,0 m Länge) max. 565 kWh für Steckerladung (18,7 m Länge)
Reichweite:	ca. 200 km, abhängig vom Fahrzyklus
Nachladung:	150 kW Steckerladung / 450 kW über Pantographen
Heizung:	Wärmepumpe, Hybridheizung
Kosten:	unbekannt

eCitaro Gelenk



Abbildung 2-31
eCitaro Gelenk; Quelle:
ecomento.de

Hersteller:	EvoBus GmbH
Türen:	3 / 4
Fahrgäste:	ca. 120 (abhängig vom gewählten Batteriepack)
Batterie:	ca. 296 – 396 kWh NMC max. 686 kWh NMC 3. Generation angekündigt Feststoffbatterie (LMP) mit 441 kWh (ca. 320 kWh nutzbar)
Reichweite:	bis zu 300 km, abhängig vom Fahrzyklus und Heizung
Nachladung:	Steckerladung bis 150 kW, optional höhere Ladeleistungen inkl. Ladung über Pantographen
Heizung:	Wärmepumpe, Hybridheizung
Kosten:	ab 790.000 €

MAN Lion's City 18 E



Abbildung 2-32
MAN Lion's City 18 E

Hersteller:	MAN Truck and Bus
Türen:	3 / 4
Fahrgäste:	ca. 120
Batterie:	640 kWh (ca. 450 kWh nutzbar) NMC, Batterie mit höherem Energieinhalt angekündigt
Reichweite:	ca. 200 – 250 km, abhängig vom Fahrzyklus
Nachladung:	Steckerladung bis 150 kW
Heizung:	Wärmepumpe, Hybridheizung
Kosten:	ca. 720.000 €

2.4.4 Investitionskosten

Einen Überblick über die Anschaffungspreise für Batteriebusse gibt Tabelle 2-2. Zu beachten ist, dass die Stückkosten sehr von der Losgröße abhängen und gegenwärtig starken Schwankungen unterworfen sind. Ebenso ist unbekannt, wie zukünftige Preisentwicklungen aussehen werden. Es wird daher empfohlen, bei der Investitionsplanung bzw. bei der Beantragung von Fördermitteln einen Sicherheitszuschlag von 1,15 – 1,25 hinzuzurechnen, um Schwankungen nach oben abzusichern.

Kleinbus	Midibus ¹⁾	Solobus	Gelenkbus
ca. 270.000 €	ca. 250.000 – 540.000 €	520.000 – 650.000 €	650.000 – 900.000 €
¹⁾ 8,5 - 10,75 m			

Tabelle 2-2: Anschaffungspreise für Batteriebusse (Richtwerte, Preisstand 2023)

Im Vergleich mit Dieselbussen können Batteriebusse aus technischer Sicht voraussichtlich länger genutzt werden. Allerdings liegen hierzu noch keine Erfahrungen vor. Vergleiche mit Trolleybussen, die bis zu 20 Jahre genutzt werden, sind für die Fahrzeuge selbst unter Vorbehalt zulässig. Ausgenommen hiervon sind jedoch die Batterien, für die keine Erfahrungen hinsichtlich der Nutzungsdauer vorliegen und die innerhalb der Fahrzeugnutzungsdauer einmal getauscht werden müssen.

In der Praxis setzt dies jedoch in vielen Fällen eine Änderung der gesetzlichen (z. B. ÖPNV-Gesetz des Landes Sachsen-Anhalt) bzw. vertraglichen (Öffentliche Dienstleistungsaufträge) Regelungen voraus. Darin sind i. d. R. Vorgaben zum Maximalalter von Bussen und/oder zum Durchschnittsalter von Busflotten enthalten, die auf Dieselantrieben begründet sind.

2.5 Batteriebusse – Ladeinfrastruktur

Die Ladeinfrastruktur für Batteriebusse ist untrennbar mit der Ladestrategie verbunden. Ausführungen zu Ladestrategien finden sich im Kapitel 2.2.

Die Ladestrategie wird durch die zur Verfügung stehende Ladezeit und die notwendige Ladeleistung bestimmt. Dabei wird zwischen der sog. Langsamladung und Schnellladung unterschieden. Diese wiederum grenzen die

Ladeformen ab, die sich in die sog. Steckerladung sowie die Ladung mit automatisierten Systemen unterscheiden.



Combo 2 CCS-Stecker
Gleichstromladung



EN 62196 Typ 2, auch IEC Typ 2
Gleich- und Wechselstromladung

Abbildung 2-33
Für die Nachladung von
Batteriebussen geeignete
Steckertypen, Quelle: Internet

Die Steckerladung ist zumeist nur für niedrigere Ladeleistungen geeignet. I. d. R. kommt die Steckerladung nur auf Betriebshöfen zum Einsatz, jedoch sind auch Anwendungsfälle bekannt, bei denen Busse an einer Endhaltestelle mit Steckerladung nachgeladen werden (z. B. VHH, Strætó in Reykjavik).

Bei der Steckerladung ist weiterhin hinsichtlich der Platzierung der eigentlichen Ladetechnik zu unterscheiden. Diese kann im Fahrzeug untergebracht sein, wodurch der Anschluss an einen reinen Wechselstromanschluss möglich ist. Dem steht die Unterbringung der Ladetechnik in externen Ladegeräten bzw. -säulen mit Gleichstromausgang gegenüber. Diese werden i. d. R. an 400 VAC Drehstrom angeschlossen.



a) Heliox



b) BYD

Abbildung 2-34
Beispiele für Ladesäulen

Automatisierte Ladesysteme zeichnen sich dadurch aus, dass die Kontaktherstellung bei konduktiven Ladesystemen automatisiert erfolgt bzw. bei der induktiven Energieübertragung nicht notwendig ist. Sie kommen in erster Linie für die Nachladung an Endhaltestellen oder in Ausnahmefällen an Unterwegshaltestellen zur Anwendung (Gelegenheitsladung, auch als Opportunity Charging bezeichnet). Hierbei werden i. d. R. Ladeleistungen von 200 bis zu 650 kW (nur konduktiv) eingesetzt, um in möglichst kurzer Zeit eine hohe Energiemenge übertragen zu können. Mittels konduktiver Energieübertragung können bereits heute in Abhängigkeit der Eigenschaften der Energiespeicher Ladeleistungen von bis zu 1 MW übertragen werden.

Bei konduktiven Ladesystemen erfolgt die Kontaktherstellung über einen Kontaktkopf, der auf einem Pantographen oder einer sog. Schwinde montiert ist. Dabei kann der Pantograph oder die Schwinde auf dem Fahrzeugdach oder an einem Lademast angebracht sein. Beide Konzepte haben sowohl Vor- als auch Nachteile und es ist offen, welche Variante sich durchsetzen wird oder beide Konzepte am Markt bestehen bleiben werden. Innerhalb eines Bedienungsgebietes wird es jedoch notwendig sein, sich auf eine Lösung zu beschränken.



Abbildung 2-35
Ladestation für eine konduktive Energieübertragung an Endhaltestellen, aufgenommen an der Endhaltestelle der Linie 109 in Hamburg; Hersteller / Quelle: Siemens AG

Kontaktsysteme mit einem auf dem Dach des Batteriebusse angebrachten Pantographen werden in Europa von zwei Herstellern angeboten (Schunk, ABB-TOSA). Obwohl es hier noch keine Entscheidung gibt bzgl. der Frage, welcher Anbieter bzw. welches System sich durchsetzen wird, zeichnet sich ab, dass das Smart Charging System® der Fa. Schunk für dachmontierte Pantographen zumindest eine hohe Marktdurchdringung erreichen wird.



Abbildung 2-36
Beispiel für eine konduktive Energieübertragung an einer Endhaltestelle (Jena, Linie 14)

Systeme, bei denen der Pantograph auf der Infrastrukturseite an einem Mast o. ä. angebracht ist, werden von Siemens/Stemman und ebenfalls von der Fa. Schunk angeboten.

Beide Systemansätze können mit der gleichen Ladestation kombiniert werden, wobei aufgrund unterschiedlicher Sicherheitsanforderungen lediglich Anpassungen bei der Kommunikationstechnik erfolgen müssen.

Die Einhaltung der Kontaktierungsreihenfolge „Erdung - Plus + Minus - Control Pilot“ ergibt sich aus der physischen Form des Kontaktsystems. Daraus folgt die Notwendigkeit, Systeme des gleichen Anbieters auf der Fahrzeug- und der Infrastrukturseite zu verwenden, jedoch sind Umbauten und Anpassungen z. B. auf der Infrastrukturseite im Nachgang deutlich einfacher als bei einer induktiven Ladung.

Bei der Art der Kommunikation hat sich die leitungsbasierte Kommunikation durchgesetzt.



Abbildung 2-37
Sekundärspule im Fahrzeugboden, Quelle: VCDB GmbH

Als induktive Energieübertragung wird das kontaktlose Laden, also das Laden ohne direkte physische Verbindung zum Stromnetz, unter Nutzung elektromagnetischer Felder bezeichnet. Diese werden durch die Primärspule auf der Straßenseite erzeugt und in der Sekundärspule im Fahrzeug in elektrischen Strom gewandelt. Dabei erfolgt eine Leistungsübertragung von bis zu 200 kW. Die tatsächliche Leistung sowie der Wirkungsgrad sind abhängig von der Position des Fahrzeugs zur Primärspule und dem Luftspalt zwischen der Sekundär- und Primärspule.

Vorteil der induktiven Energieübertragung ist die weitgehend im Fahrbahnboden versenkte Infrastruktur. Dem stehen jedoch im Vergleich zu konduktiven Systemen deutlich höhere Kosten sowohl für die Technik als auch die bauliche Integration gegenüber. Hinzu kommt die eingeschränkte Übertragungsleistung von maximal 200 – 250 kW.

Es ist beim gegenwärtigen Wissensstand zu bezweifeln, dass induktive Energieübertragungssysteme für Batteriebusse auch weiterhin angeboten werden.

Ladesäulen und -geräte werden je nach Ladeleistung und Ausführung für 15.000 bis 75.000 € angeboten. Aufgrund ihrer geringen Anschlussleistung ist ein direkter Anschluss einzelner Geräte an das Niederspannungsnetz i. d. R. problemlos möglich. Sollen mehrere Ladesäulen bzw. -geräte angeschlossen werden, ist i. d. R. eine an das Mittelspannungsnetz anzuschließende Transformatorstation notwendig. Zusätzlich sind noch die Installationskosten für die Verkabelung zu beachten.

Ladestationen mit einer Ladeleistung von 200 kW und mehr sind für etwa 500 – 600 € pro Kilowatt Ladeleistung erhältlich. Für die Installation eines Lademastes müssen je nach Ausführung zwischen 5.000 und 45.000 € eingerechnet werden.

Schwer vorab kalkulierbar sind die Kosten für den Anschluss von Ladestationen, -säulen und -geräten. Aufgrund der hohen Ladeleistungen ist zumeist der Anschluss an das Mittelspannungs- oder Bahn(gleichstrom)netz notwendig. Je nach Entfernung zu einem ausreichend leistungsfähigen Anschluss können die Kosten mehrere 10.000 Euro betragen. Hinzu kommen noch die Kosten für den Mittelspannung-Niederspannungs-Transformator von ebenfalls mehreren 10.000 Euro sowie der Baukostenzuschuss (ca. 40 – 100 € pro angemeldetem kW).

Überschläglich fallen etwa 350.000 – 450.000 € pro Ladestation mit einem 300 kW-Ausgang an.

2.6 Batteriebusse – Normungslage

Batteriebusse unterliegen bereits einer Vielzahl von Normen und Sicherheitsstandards. Von Batteriebussen gehen daher nicht mehr Gefahren aus als z. B. von Dieselbussen. Besonders relevante Normen und Empfehlungen sind

- ECE R100.01 (elektrische Sicherheit – Vorgaben für die Zulassung von Elektrofahrzeugen)
- IEC 61508 (Sicherheit)
- ISO 26262 (Funktionale Sicherheit, derzeit für Batteriebusse nicht zwingend vorgeschrieben)
- VDE 0115 (Sicherheit gegen direktes und indirektes Berühren, u. a. einzuhaltende Abstände)
- VDV 230/1 Rahmenempfehlung für elektrisch betriebene Stadt-Niederflurlinienbusse (E-Bus).

Besonders relevante Normen und Empfehlungen sind

- VDE 0115 (Sicherheit gegen direktes und indirektes Berühren, u. a. einzuhaltende Abstände)
- ISO DIS 17409:2019 (Konduktive Energieübertragung Elektrofahrzeuge – Sicherheitsanforderungen)
- IEC 61851 – 1 (Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge)
- IEC 61851 – 23 (Gleichstromladegeräte für Elektrofahrzeuge)
- IEC 61851 – 23 – 1 (Gleichstromladegeräte für Elektrofahrzeuge mit automatisiertem Kontaktsystem)
- IEC 61851 – 24 (Kommunikation Ladegerät – Fahrzeug)
- ISO/IEC 15118 (High-Level Kommunikation Ladegerät – Fahrzeug – DC-Ladung)
- IEC 62196 – 3 (Steckverbindungen für die Ladung von Elektrofahrzeugen)
- EN 50696 (Automatisierte Kontaktsysteme für die Ladung von Elektrofahrzeugen)
- OCPP – Freier Ladepunkt-Kommunikationsstandard mit einem übergeordneten Managementsystem
- VDV 260 EBUS – Infrastruktur/Ladestellen (Entwurf)
- VDV-Schrift 261:01/2020 (Empfehlung zur Anbindung eines dispositiven Backends an einen Elektrobuss, ergänzend zur ISO-Norm 15118).

Bei der Beschaffung von Fahrzeugen und Ladeinfrastruktur ist insb. darauf zu achten, dass neben einer einheitlichen physischen Schnittstelle (Stecker und ggf. Form des automatisierten Kontaktsystems) eine einheitliche Kommunikation nach ISO/IEC 15118 bzw. IEC 61851 – 23 / IEC 61851 – 23 – 1 auf beiden Seiten gegeben ist. Für die Kommunikation mit einem übergeordneten Lademanagementsystem ist auf die Kompatibilität mit dem OCPP-Standard (siehe oben) zu achten.

Die Positionierung automatisierter Kontaktsysteme auf dem Fahrzeugdach wird durch EN 50696 festgelegt. Die Platzierung der Kontaktierung mittig zwischen den Vorderachsen ist inzwischen bei fast allen Herstellern Standard. Dabei ist es unerheblich, ob der Pantograph auf dem Fahrzeugdach oder an einem Mast montiert wird.

2.7 Brennstoffzellenbusse – Grundlagen

Wasserstoff ist grundsätzlich ein geeigneter chemischer Energiespeicher für mobile Anwendungen. Verwendung findet er hauptsächlich in Brennstoffzellenbussen, jedoch sind auch Versuche bekannt, Wasserstoff in Verbrennungsmotoren zu nutzen. Da gegenwärtig jedoch keine Linienbusse mit Wasserstoffverbrennungsmotor kommerziell verfügbar sind, konzentriert sich der vorliegende Bericht ausschließlich auf Brennstoffzellenbusse.

Brennstoffzellen werden grob unterschieden in sog. Festoxidbrennstoffzellen (engl. Solid Oxide Fuel Cell – SOFC) und Polymerelektrolytbrennstoffzellen (engl. Polymer Electrolyte Fuel Cell – PEFC). Für Fahrzeugantriebe kommen hauptsächlich PEFC zum Einsatz, in denen mit Hilfe von Wasserstoff sowie Luftsauerstoff elektrische Energie erzeugt wird. Nachfolgend werden ausschließlich Fahrzeuge mit Polymerelektrolytbrennstoffzellen betrachtet, wobei sich der Begriff „Brennstoffzelle“ auf diese Brennstoffzellenform bezieht.

2.8 Eigenschaften von Wasserstoff

Wasserstoff (H₂) ist ein farb- und geruchloses Gas mit einer gewichtsbezogenen sehr hohen Energiedichte von etwa 33 kWh / kg. Aufgrund seiner extrem geringen Dichte bei Normaldruck von 0,089 kg / m³ (zum Vergleich Luft: 1,2 kg / m³) ergibt sich jedoch eine sehr niedrige volumenbezogene Energiedichte, weshalb Wasserstoff für mobile Anwendungen nur in stark komprimierter Form nutzbar ist.

Reiner Wasserstoff ist nicht zündfähig, jedoch besteht bei einer Mischung mit Luft (4 – 77 % Volumenanteil) Explosionsgefahr.

Die Verwendung von Wasserstoff in Brennstoffzellen führt zu praktisch keinen nennenswerten Emissionen vor Ort. Wird der Wasserstoff mittels regenerativ erzeugter Elektroenergie hergestellt oder fällt er als Nebenprodukt in der chemischen Industrie an, handelt es sich zudem um einen nachhaltigen Energieträger.

2.9 Technischer Aufbau von Brennstoffzellenbussen

Brennstoffzellenbusse werden unterschieden in Fahrzeuge, in denen die Brennstoffzelle wahlweise als Range-Extender für die Ergänzung einer extern geladenen Batterie oder als einziger Energiewandler dient.

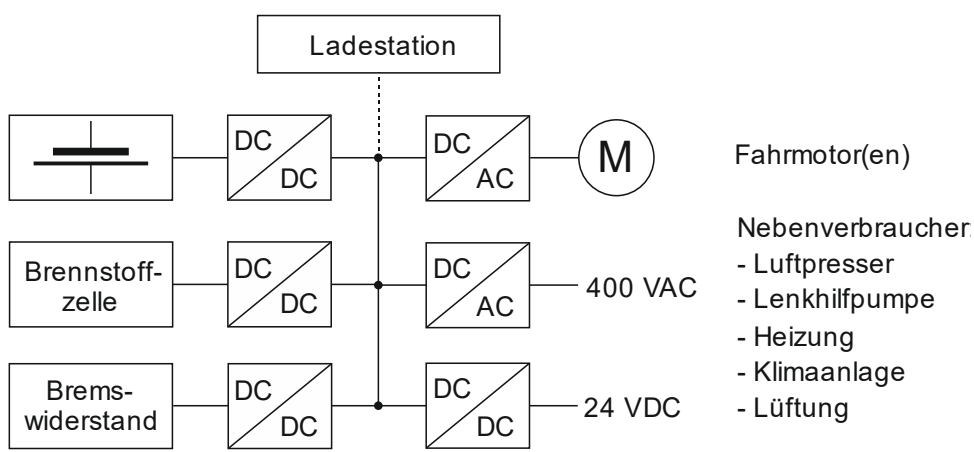


Abbildung 2-38
Schematischer Aufbau eines Antriebsstrangs mit Brennstoffzelle

Fahrmotor(en)

Nebenverbraucher:

- Luftpresser
- Lenkhilfpumpe
- Heizung
- Klimaanlage
- Lüftung
- ...

Aufgrund der hohen dynamischen Belastungen werden Brennstoffzellen nur in Kombination mit elektrischen Energiespeichern, i. d. R. Batterien, in Bussen verbaut. Abbildung 2-38 zeigt den schematischen Aufbau eines Brennstoffzellenantriebs.

Die Brennstoffzelle selbst ist wie die Batterie, der Antriebsmotor sowie weitere Aggregate über DC/DC bzw. DC/AC-Wandler an den sog. Zwischenkreis angeschlossen. Dieser wird zumeist auf einer Gleichspannung von etwa 360 – 750 VDC betrieben, weshalb er als Hochvolt-Anlage betrachtet wird. In seinem Grundaufbau ähnelt der Antriebsstrang denen in Batterie- oder Trolleybussen.

Die externe Zuführung elektrischer Energie über eine Ladestation oder ein Ladegerät ist i. d. R. nur bei Fahrzeugen vorgesehen, in denen die Brennstoffzelle als Range-Extender dient.

Ergänzt wird der Antriebsstrang durch das H₂-Versorgungssystem der Brennstoffzelle, das in Abbildung 2-39 schematisch dargestellt ist. Dessen Kern bilden Druckbehälter, in denen der mitgeführte Wasserstoff in komprimierter Form gespeichert wird. Bei Brennstoffzellenbussen wird der Wasserstoff i. d. R. auf maximal 350 bar verdichtet und in mehreren auf dem Dach untergebrachten Druckbehältern mitgeführt. Pkws führen Wasserstoff hingegen mit einem Druck von bis zu 700 bar mit, weshalb Brennstoffzellenbusse nicht an Dispensern für Pkw betankt werden können.

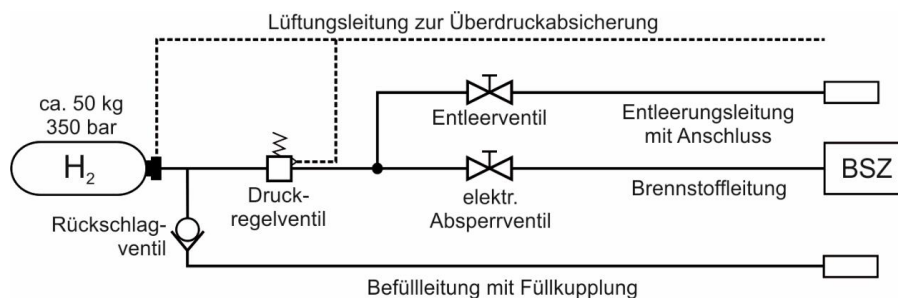


Abbildung 2-39
Schematischer
Aufbau der H₂-
Versorgung einer
Brennstoffzelle

Je nach Größe der mitgeführten Batterie sowie der Brennstoffzellenleistung spricht man entweder von einem Brennstoffzellenbus bzw. von einem Range-Extender-Brennstoffzellenbus.

In Brennstoffzellenbussen dient der mitgeführte Wasserstoff als Hauptenergiequelle und die Brennstoffzelle als Energiewandler. Die Batterie hat lediglich eine Puffer- bzw. Rekuperationsfunktion. Entsprechend klein sind die Batterien (etwa 30 – 40 kWh in Solobussen) ausgelegt bzw. entsprechend leistungsstark (ca. 80 kW in Solobussen) sind die verbauten Brennstoffzellen. Die Batterie wird außer ggf. nach Reparaturen nicht mit einem externen Ladegerät aufgeladen.

In Range-Extender-Brennstoffzellenbussen dient die deutlich größere Batterie als Hauptenergiequelle und stellt Energie für eine rein elektrische Reichweite von etwa 175 km zur Verfügung. Die kleiner dimensionierte Brennstoffzelle lädt die Batterie nach, um eine Reichweitenerhöhung zu realisieren.

Brennstoffzellenbusse vereinen somit wesentliche Merkmale eines Elektrobusses mit denen eines Gasbusses, was sich in der Komplexität des Antriebsstranges widerspiegelt.

2.10 Stand der Technik und Ausblick

Brennstoffzellenbusse haben nach wie vor mit einigen Herausforderungen zu kämpfen. Hierzu zählen die immer noch hohen Kosten, die nach wie vor nicht ausreichende Lebensdauer der Brennstoffzellen sowie die Komplexität des Antriebsstrangs.

Die Entwicklung von Brennstoffzellenbussen war jedoch in den letzten beiden Jahrzehnten durch deutliche Fortschritte hinsichtlich der Reichweiten, der Lebensdauer sowie der Beschaffungskosten gekennzeichnet. So sind insb. die Stückkosten von vormals bis zu 1,2 Mio. € pro Fahrzeug inzwischen auf etwa 580.000 – 630.000 € bei kleineren Stückzahlen (Solobusse) gefallen und es werden Reichweiten von über 300 km aufgrund signifikant gesunkener H₂-Verbräuche realisiert.

Brennstoffzellen für Anwendungen in Nutzfahrzeugen werden gegenwärtig mit einer garantierten Lebensdauer von 20.000 Betriebsstunden angeboten. Als nicht garantierter Erwartungswert werden zumeist 30.000 Betriebsstunden angegeben. Widersprüchlich sind die Angaben zum Tausch. Neben einem kompletten Tausch wird oft auch nur der Tausch des eigentlichen Brennstoffzellen-Stacks angegeben.

Unklar ist die weitere Entwicklung von Brennstoffzellenbussen, da deren Zukunft im Wesentlichen von der Entwicklung konkurrierender Batteriebusse abhängt. Gelingt es,

- elektrische Energiespeicher mit ausreichender Energiedichte für Reichweiten von etwa 350 – 400 km zu entwickeln und

- die Rohstoffversorgung für die Energiespeicher sicherzustellen, ist die Zukunft der deutlich komplexeren Brennstoffzellenbusse zumindest fragwürdig.

2.11 Kommerziell verfügbare Brennstoffzellenbusse

2.11.1 Klein- und Midibusse

Gegenwärtig werden Klein- und Midibusse nur in Ausnahmefällen (z. B. Rampini Hydron) mit Brennstoffzellenantrieb kommerziell angeboten. Wann mit einer breiteren Markteinführung zu rechnen ist, kann gegenwärtig nicht seriös vorausgesagt werden.

2.11.2 Solo- und Gelenkbusse

Aufgrund der limitierten Anbieterzahl existiert für Brennstoffzellenbusse derzeit praktisch kein Anbietermarkt, was auch an der eingeschränkten Anzahl unterschiedlicher Modelle zu erkennen ist, die nachfolgend aufgeführt werden.

Brennstoffzellenbusse werden derzeit kommerziell für den deutschen Markt nur von der belgischen Firma Van Hool, dem polnischen Hersteller Solaris und dem in Portugal beheimateten Hersteller Caetano angeboten.

Van Hool A12 Fuel Cell



Abbildung 2-40
Van Hool A12 Fuel Cell,
Quelle: Wallpapers4screen.com

- Länge: 12,225 m
- Kapazität: unbekannt
- Leergewicht: unbekannt
- Antrieb: 160 kW nominal (Siemens)
- V_{\max} : 80 km/h
- H₂-Tank: unbekannt

Caetano H2.CityGold



Abbildung 2-41
Caetano H2.CityGold

- Länge: 11,995 m
- Kapazität: 74
- Leergewicht: ca. 13,34 t
- Antrieb: z. B. 160 kW nominal / 180 kW Überlast (Siemens)
- V_{\max} : 80 km/h
- H₂-Tank: 37,5 kg / 350 bar

Solaris Urbino 12 hydrogen



Abbildung 2-42
Solaris Urbino 12 hydrogen

- Länge: 12,0 m
- Kapazität: 74
- Leergewicht: ca. 13 t
- Brennstoffzelle: 70 kW
- Antrieb: 170 kW nominal / 240 kW Überlast (ZF AVE 130)
- V_{\max} : 80 km/h
- H₂-Tank: 37,5 kg / 350 bar

Solaris Urbino 18 hydrogen



Abbildung 2-43
Solaris Urbino 18 hydrogen,
Quelle: Solaris

- Länge: ca. 18 m
- Kapazität: bis zu 138, davon bis zu 53 Sitze
- Leergewicht: unbekannt

- Brennstoffzelle: 100 kW
- Antrieb: 240 kW (TSA-Zentralmotor) / 2 x 125 kW (ZF AVE 130)
- V_{\max} : 80 km/h
- H₂-Tank: ca. 51 kg / 350 bar

Van Hool Exqui.City 18 Fuel Cell



Abbildung 2-44
Van Hool Exqui.City 18 Fuel Cell

- Länge: 18,61 m
- Kapazität: max. 143
- Leergewicht: 19,25 t
- Antrieb: 210 / 320 kW nominell (Siemens)
- V_{\max} : unbekannt
- H₂-Tank: 38,5 kg / 350 bar

Weitere Fahrzeuge werden von Anbietern angeboten, die als Neueinsteiger auf dem Busmarkt zu bezeichnen sind. Hierzu zählen u. a. der polnische Hersteller Ursus Bus, Arthur-Bus sowie die ungarische Goldi Mobility Kft. Bei allen bis hierhin beschriebenen Bussen handelt es sich um Brennstoffzellenbusse ohne Range-Extender-Funktion. Erste Hersteller bieten inzwischen auch Batteriebusse mit Wasserstoff-Range-Extender an. Zu nennen ist insb. der deutsche Hersteller EvoBus, der im ersten Halbjahr 2023 Solo- und Gelenkbusse unter dem Namen eCitaro Fuel Cell vorgestellt hat. Die Busse verfügen über Batterien mit einem nominellen Energieinhalt von bis zu 294 kWh (Solobusse) bzw. 392 kWh (Gelenkbusse). Zusätzlich führen die Fahrzeuge 25 kg (Solobusse) bzw. 30 kg (Gelenkbusse) Wasserstoff mit, der in einer 60 kW-Brennstoffzelle des Herstellers Toyota in elektrische Energie umgewandelt wird. Um für die Brennstoffzelle eine Lebensdauer von bis zu 40.000 Betriebsstunden realisieren zu können, wird die Brennstoffzelle phlegmatisiert und i. d. R. nur im mittleren Leistungsbereich betrieben.



Abbildung 2-45
eCitaro Fuel Cell, Quelle: EvoBus

Einen ähnlichen Ansatz verfolgt der französische Hersteller Safran mit seinem HyCity-Konzept (Abbildung 2-46). Bei diesem Fahrzeug kommt mit 135 kWh eine deutlich kleinere Batterie zum Einsatz. Gleiches gilt für die Brennstoffzelle (48 kW), die auf 28 – 32 kg Wasserstoff zurückgreifen kann. Angekündigt ist auch eine Gelenkbusvariante.

Darüber hinaus sind der türkische Hersteller Otokar mit seinem Kent C Hydrogen (12 m, 140 kWh-Batterie und 38 kg Wasserstoff) sowie der italienische Hersteller Rampini (8 m, 175 kWh-Batterie, 10,8 kg Wasserstoff) zu erwähnen.



Abbildung 2-46
Businova Hydrogen der Fa.
Safra. Quelle: Safra

2.11.3 Investitionskosten

Genau wie bei Batteriebusen hängen die Anschaffungskosten für Brennstoffzellenbusen von der Losgröße ab und unterliegen erheblichen Schwankungen. Zurzeit werden Solobusse mit Brennstoffzelle für etwa 590.000 – 680.000 € am Markt angeboten. Bei kleineren Stückzahlen liegen die Preise im oberen Drittel. Ebenso ist unbekannt, wie zukünftige Preisentwicklungen aussehen werden. Es wird daher empfohlen, bei der Investitionsplanung bzw. bei der Beantragung von Fördermitteln einen Sicherheitszuschlag von 1,15 – 1,25 hinzuzurechnen, um Schwankungen nach oben abzusichern.

Preise für Gelenkbrennstoffzellenbusse sind nicht bekannt.

Über eine Nutzungsdauer von 14 Jahren hinweg ist mit einem einmaligen Tausch der Batterie (ca. 48.000 € für Solobusse) sowie der Brennstoffzelle (ca. 80.000 €) zu rechnen. Bei Range-Extender-Brennstoffzellenbussen liegen die Kosten für die Batterie deutlich darüber, hingegen sind die Kosten der Brennstoffzelle niedriger, bzw. muss diese nicht ausgetauscht werden.

3 Randbedingungen, Fahrzeugspezifikationen und Vorgehensweise

3.1 Randbedingungen

Als Grundlage für die Energiebilanzrechnungen ist es notwendig, für das Bedienungsgebiet der HAVAG maßgebende Wetterbedingungen, speziell Außentemperaturen zu bestimmen. Verwendet wurden die Werte der DWD-Station Leipzig/Halle. Dabei ist es nicht sinnvoll, Extrembedingungen zu betrachten, da diese zu einer technisch nicht realisierbaren Überdimensionierung der Fahrzeuge führen würden.

Das HAVAG-Bedienungsgebiet hat ein typisch mitteleuropäisches Klima, das zwar im Mittel moderate Temperaturen aufweist, jedoch können warme Sommer- und kalte Wintertage auftreten. Abbildung 3-1 zeigt die Summenverteilung der Tagesmitteltemperaturen. An etwa einem Prozent aller Tage (durchschnittlich vier Tage pro Jahr) lagen die daraus abgeleiteten Tagesmitteltemperaturen unter $-9,5^{\circ}\text{C}$, an 99 % aller Tage lag der Wert unter $24,5^{\circ}\text{C}$. Beide Werte wurden für die Energieverbrauchsermittlungen verwendet.

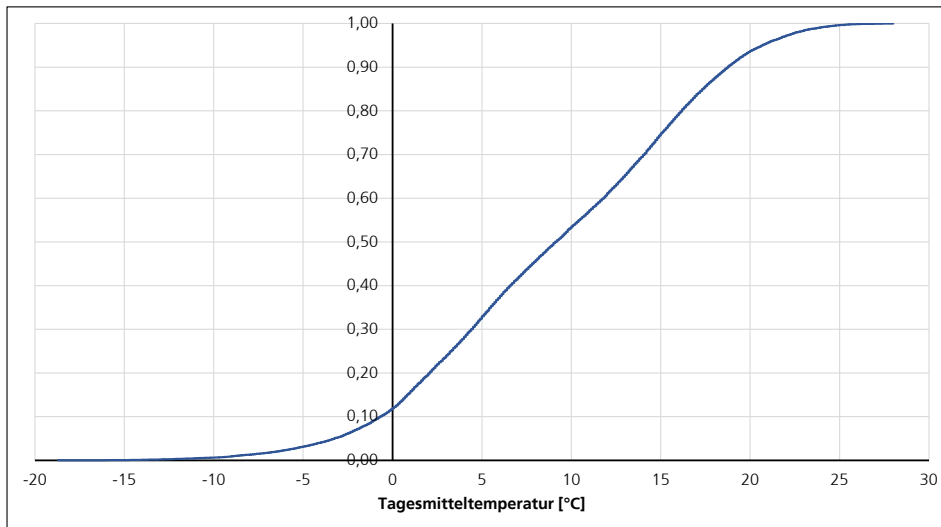


Abbildung 3-1
Summenkurve der
Tagesmitteltem-
peraturen – Mess-
station Leipzig/
Halle von 1972 bis
2022, Quelle: DWD

An kälteren Tagen hat dies ein Absenken der Fahrgastraumtemperatur unter die in der VDV-Schrift 236/1 vorgegebenen Werte zur Konsequenz, wobei zu beachten ist, dass die Außentemperaturen während der Haupteinsatzzeiten über den in Abbildung 3-1 angegebenen Temperaturen liegen. An extrem warmen Tagen wird der gewünschte Temperaturwert für den Fahrgastraum überschritten.

3.2 Fahrzeugspezifikationen

3.2.1 Batteriebusse

Batteriebusse werden berechtigterweise mit vollständig emissionsfreiem Antrieb assoziiert. Daraus leitet sich der verständliche Wunsch ab, elektrisch angetriebene Busse auch rein elektrisch zu beheizen. Da dies beim gegenwärtigen Stand der Technik jedoch enorme Auswirkungen auf die Reichweite und somit das Einsatzpotenzial hat, werden die Fälle

- rein elektrische Heizung (Wärmepumpe – Stand der Technik) / Vollklimatisierung,
- rein elektrische Heizung (technisch ausgereifte Wärmepumpe) / Vollklimatisierung und
- Brennstoffheizung bzw. Hybridheizung / ΔT -Klimatisierung

getrennt betrachtet. Beim Einsatz einer elektrischen Heizung ist die Vollklimatisierung aus energetischer Sicht nicht maßgebend, weshalb diese nicht gesondert betrachtet wird. Für Hybridheizungen wurde folgendes Betriebsregime unterstellt:

- rein elektrischer Betrieb bis zu einer mittleren elektrischen Anschlussleistung, die dem Wert der Klimaanlage für ΔT -Klimatisierung entspricht, und
- Betrieb mit Unterstützung durch die Hybridheizung an kälteren Tagen (unter 5°C).

Einen Überblick über die wichtigsten bei den Analysen genutzten Fahrzeugparameter beim gegenwärtigen Stand der Technik gibt Tabelle 3-1. Unterstellt wurden Fahrzeuge mit einer Fahrgastkapazität von mindestens 75 bzw. 90 Fahrgästen. Die Werte orientieren sich an am Markt verfügbaren bzw. in absehbarer Zukunft zur Verfügung

stehenden Fahrzeugen, wobei darauf verzichtet wurde, jeweils Maximalwerte zu verwenden, um die Anzahl von Lieferanten nicht künstlich einzuschränken.

	Dauerhafte Reichweite für Volllader		dauerhafte Speichergröße / Ladeleistung	
	Elektrische Heizung Vollklimaanlage	Brennstoff-/ Hybridheizung	Volllader	Gelegenheitslader
Gelenkbusse	150 – 200 km	225 – 250 km	420 kWh	350 kWh / 250 kW
Solobusse	175 – 200 km	225 – 250 km	310 kWh	310 kWh / 250 kW
Kleinbusse < 9 m	120 – 150 km	150 – 180 km	130 kWh	-

Tabelle 3-1: Fahrzeugparameter – Stand der Technik = Zeithorizont 1

Für eine Betrachtung bis zum Jahr 2035 ist es notwendig, zwei Entwicklungsschritte für Speichertechnologien einzubeziehen. Hierbei wird zwischen einem Zeithorizont bis 2027 und einem Zeitbereich ab 2027 unterschieden.

Abbildung 3-2 gibt einen Überblick über verbaute bzw. angekündigte Batteriegrößen für Solobatteriebusse. Deutlich wird ein kontinuierlicher Anstieg des Energieinhalts über die letzten Jahre hinweg. Dabei sind aber einige Randbedingungen zu beachten:

1. Im Betrachtungszeitraum wurde das zulässige Gesamtgewicht für Batteriebusse erhöht, was umgehend durch die Hersteller in schwerere Batterien umgemünzt wurde. Diesen Einmaleffekt wird es nicht mehr geben und z. T. notwendige Sonderreifengrößen müssen ggf. in Kauf genommen werden.
2. Gleichzeitig sind die Preise für Zellen dramatisch gefallen, was sich auch in den Batteriegrößen widerspiegelt. Der Preisverfall wird aber so nicht weitergehen.
3. Spricht man mit Batterieexperten, so hört man in letzter Zeit recht häufig, dass die Entwicklung für bestehende Li-Ionen-Technologien besser war als erwartet. Gleichzeitig wird aber immer wieder darauf hingewiesen, dass das theoretische Potenzial für Li-Ionen-Technologien und die Peripherie weitgehend ausgeschöpft ist.

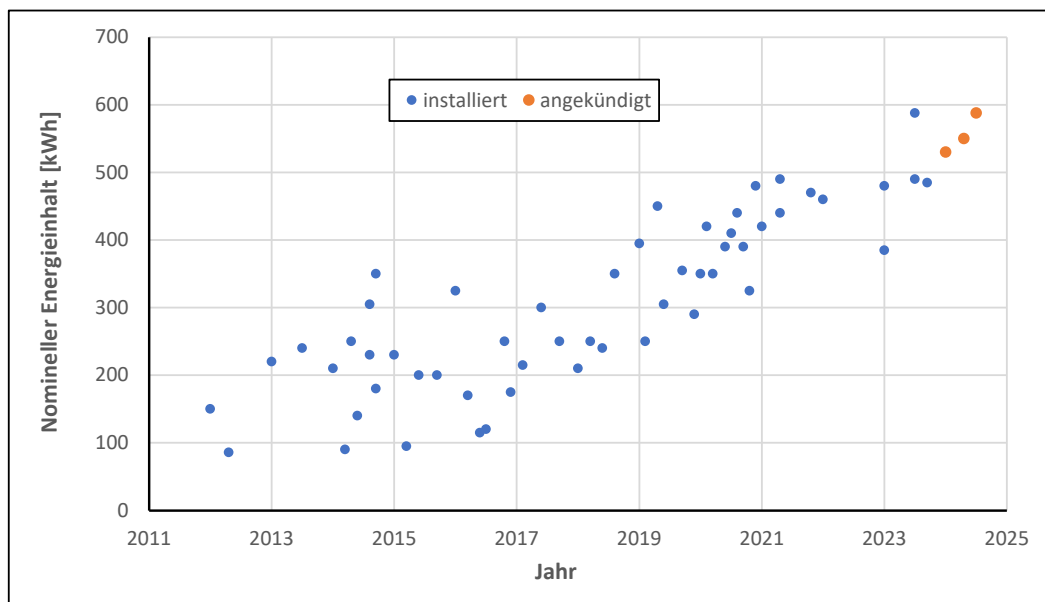


Abbildung 3-2
Bereits verbaute (blau) und angekündigte (orange) Energiespeichergrößen in Solobatteriebussen (Quelle: IVdat)

Bei einer vorsichtigen Extrapolation der Werte bis zum Jahr 2027 wird eine evolutionäre Weiterentwicklung bestehender Zelltechnologien mit einer Steigerung der Energiedichte um maximal 25 – 30 % unterstellt (Tabelle 3-2). Gleichzeitig wird bis zum Jahr 2027 die Entwicklung moderner Heiztechnologien (z. B. Wärmepumpen) als abgeschlossen angesehen.

	Dauerhafte Reichweite für Volllader		dauerhafte Speichergröße / Ladeleistung	
	Elektrische Heizung Vollklimaanlage	Brennstoff-/ Hybridheizung	Volllader	Gelegenheitslader
Gelenkbusse	200 – 250 km	250 – 275 km	450 kWh	450 kWh / 250 kW
Solobusse	200 – 250 km	250 – 275 km	350 kWh	350 kWh / 250 kW
Kleinbusse < 9 m	150 – 175 km	175 – 200 km	180 kWh	-

Tabelle 3-2: Fahrzeugparameter – Zeithorizont 2 (2027)

Für die Zeit nach 2027 wird die kommerzielle Verfügbarkeit neuer Zelltechnologien (z. B. Feststoffbatterien) mit dann deutlich größeren Energiedichten für Batterien in Vollladern (zusätzlich 80 % – 100 % gegenüber bestehenden Technologien) angenommen (Tabelle 3-3). Geringere Steigerungsraten von 50 – 70 % für die Energiedichte werden für schnellladefähige Batterien in Gelegenheitsladern unterstellt, da diese auch zukünftig nicht auf hohe Energiedichten ausgelegt sein werden.

	Dauerhafte Reichweite für Volllader		dauerhafte Speichergröße / Ladeleistung	
	Elektrische Heizung Vollklimaanlage	Brennstoff-/ Hybridheizung	Volllader	Gelegenheitslader
Gelenkbusse	225 – 275 km	275 – 300 km	500 kWh	500 kWh / 150 kW
Solobusse	225 – 270 km	300 – 350 km	450 kWh	450 kWh / 150 kW
Kleinbusse < 9 m	200 – 250 km	250 – 300 km	250 kWh	-

Tabelle 3-3: Fahrzeugparameter – Zeithorizont 3 (2030)

Speziell für den Zeithorizont 3 handelt es sich jedoch um reine Annahmen, da sich die genaue Entwicklung der Zelltechnologien nicht oder nur stark fehlerbehaftet vorhersagen lässt.

3.2.2 Brennstoffzellenbusse und Batteriebusse mit Brennstoffzellen-Range-Extender

Unter Beachtung der Einsatzbedingungen bei der HAVAG ist konservativ von einer Reichweite von etwa 300 – 325 km für Brennstoffzellenbusse auszugehen. Für Batteriebusse mit Brennstoffzellen-Range-Extender kann mit einer Reichweite von etwa 400 km (Solobusse) bzw. 350 km (Gelenkbusse) gerechnet werden.

Im Gegensatz zu Batteriebussen werden Brennstoffzellenbusse und Batteriebusse mit Brennstoffzellen-Range-Extender ausschließlich mit rein elektrischen Heizungen (Wärmepumpen) ausgerüstet.

3.3 Vorgehensweise

Die Ermittlung von Einsatzpotenzialen für Batteriebusse erfolgte mittels der Software *IVInet* und *IVision*. Hierbei handelt es sich um eine Softwarefamilie, mit deren Hilfe verschiedene Fahrzeugkonfigurationen z. B. bzgl. ihrer Einsatzmöglichkeiten analysiert werden können. Unter anderem ist es möglich, die Einsatzmöglichkeiten von Batteriebussen an bestehenden bzw. geplanten Betriebsabläufen (Umlaufplänen) zu spiegeln, wobei unterschiedliche Nachladestrategien betrachtet werden können.

Kernstück ist die sog. Energiebilanzierung von Umlaufplänen. Hierbei wird über einen Umlaufplan hinweg geprüft, ob zu jedem Zeitpunkt ausreichend elektrische Energie im Elektroenergiespeicher des Busses vorhanden ist. Ist zu jedem Zeitpunkt die Bedingung

$$E_{ES} + \Sigma E_{NL} \geq \Sigma E_{TR} + \Sigma E_{NV} + E_{RE}$$

E_{ES} nutzbarer Energieinhalt im Elektroenergiespeicher [kWh]

E_{NL} bis zum betrachteten Zeitpunkt im Betrieb nachladbare Energie [kWh]

E_{TR} bis zum betrachteten Zeitpunkt durch die Traktion verbrauchte Energie [kWh]

E_{NV} bis zum betrachteten Zeitpunkt durch Nebenverbraucher verbrauchte Energie [kWh]

E_{RE} nicht zu unterschreitende Energiereserve [kWh]

erfüllt, ist ein Umlaufplan für den Einsatz von Batteriebusen geeignet. Im Rahmen der Untersuchung kam die vereinfachte Energiebilanzierung zur Anwendung. Dabei wird der Energieverbrauch für die Traktion und die Nebenverbraucher schrittweise anhand von linienspezifischen Parametern [kWh/km] für vorab festzulegende Außentemperaturen und Fahrzeugkonfigurationen berechnet und aufsummiert. Die nachladbare Energie wird mittels der planmäßigen Wendezeiten unter Abzug einer vorab festzulegenden mittleren Verspätung ermittelt. Wird auf eine Nachladung im laufenden Betrieb verzichtet, wird der Wert $E_{NL} = 0$ gesetzt.

Mit Hilfe dieses Verfahrens ist es möglich, einen ersten Überblick über die Einsatzmöglichkeiten im gesamten Liniennetz zu erhalten. Ebenso können die notwendigen Standorte für Ladestationen in Busnetzen, insb. bei häufigen Linienwechseln bestimmt werden. Ziel ist es dabei, deren Anzahl zu minimieren.

3.3.1 Voll- und Zwischenlader

Die zeitlich strukturierte Analyse der Umlaufpläne zielt darauf ab, mittels vereinfachter Energiebilanzierung das Einsatzpotenzial für Voll- und Zwischenlader, also für Batteriebusse, die ausschließlich im Betriebshof nachgeladen werden, zu ermitteln. Volllader werden nur nachts geladen, wohingegen Zwischenlader auch tagsüber nachgeladen werden, sofern sie zwischendurch mindestens 30 min im Betriebshof abgestellt werden.

Mithin wurde jeder Umlaufplan einer vereinfachten Energiebilanzierung unterzogen, um die Frage zu beantworten, ob dieser Umlaufplan mit Voll- bzw. Zwischenladern bedienbar ist. Hierbei kamen vorab festgelegte Verbrauchsdaten für die unterschiedlichen Heizungsvarianten zum Einsatz, weshalb die Ergebnisse aus Vereinfachungsgründen als Reichweiten dargestellt werden.

3.3.2 Gelegenheitslader

Die Grobrasterung des Liniennetzes zielte darauf ab, mittels einer erweiterten vereinfachten Energiebilanzierung das Einsatzpotenzial für Gelegenheitslader, also für Batteriebusse, die sowohl im Betriebshof als auch an ausgesuchten Endhaltestellen nachgeladen werden, zu ermitteln.

Es wurde jeder Umlaufplan einer Energiebilanzierung unterzogen, um die Frage zu beantworten, ob dieser Umlaufplan mit Gelegenheitsladern bedienbar ist. Im Gegensatz zur Vorgehensweise bei Voll- bzw. Zwischenladern wurde der spezifische Energieverbrauch (kWh/km) getrennt für jede Einzelfahrt u. a. anhand

- des betrachteten Wetterszenarios,
- der unterstellten Heizungsform,
- des Fahrttyps (Linienfahrt, Leerfahrt),
- der mittleren Reisegeschwindigkeit gemäß Umlaufplan sowie
- der mittleren Fahrzeugauslastung einer Linie

ermittelt. Zusätzlich wurde eine mittlere Verspätung von drei Minuten über den Einsatztag hinweg variiert.

Die notwendige Energiereserve wurde für jeden Umlaufplan separat bestimmt. Sie ergibt sich aus dem notwendigen Energiebedarf für die kombinierte Absolvierung der längsten Linienfahrt sowie daran anschließend der längsten Ein- bzw. Aussetzfahrt, zzgl. eines Sicherheitsfaktors von 1,2. Hintergrund ist die gesetzte Forderung, dass bei Ausfall einer Ladestation ausreichend Zeitreserven für das Entsenden eines Ersatzbusses zur Verfügung stehen. Zusätzlich soll damit sichergestellt werden, dass Batteriebusse stets sicher zum Betriebshof zurückkehren können.

3.3.3 Brennstoffzellenbusse

Die Vorgehensweise zur Bewertung der technischen Eignung von Brennstoffzellenbussen entspricht der Vorgehensweise bei Batteriebusen, nur dass ausschließlich elektrische Heizungsformen betrachtet wurden und statt des Energieinhalts die Menge des verbrauchten Wasserstoffs bzw. dessen Reserven in den fahrzeugseitigen Druckbehältern als Bewertungsmaßstab verwendet wurde.

4 Bestandsaufnahme und technische Machbarkeit

4.1 Analyse der Fahrzeugflotte und betrieblichen Abläufe

Die Analyse der Fahrzeugflotte und der betrieblichen Abläufe erfolgte auf Grundlage folgender, seitens der HAVAG zur Verfügung gestellten Unterlagen:

- Fahrzeugliste mit geplanten Ersatzbeschaffungen
- Umlaufpläne mit Planungsstand 03/2023.

Die HAVAG hat gegenwärtig 40 Linienbusse in ihrem Bestand, die sich wie in Tabelle 4-1 dargestellt aufteilen.

Bustyp	Antrieb	Anzahl
Solobusse	Diesel	26
Solobusse	elektrisch	3
Gelenkbusse	Diesel / mild Hybrid	11

Tabelle 4-1: Zusammensetzung der HAVAG-Busflotte

Auffällig ist das geringe Flottendurchschnittsalter von im Schnitt rund 5,5 Jahren und die maximale Nutzungszeit von 12 Jahren. Die ältesten Fahrzeuge wurden Ende 2014 zugelassen. Daraus ergibt sich die komfortable Situation, in den nächsten zweieinhalb Jahren keine Ersatzbeschaffungen vornehmen zu müssen. Die nächsten Ersatzbeschaffungen sind für sechs Solobusse Ende 2026 vorgesehen, wobei es sich hierbei um fest vereinbarte Diesellieferungen handelt.

Für das Jahr 2027 besteht die Option, Subunternehmerleistungen wieder durch die HAVAG selbst erbringen zu lassen. Dadurch käme es zu einem Flottenaufwuchs von

- 3 Solo- und
- 2 Gelenkbussen.

Von der HAVAG-eigenen Busflotte werden laut der übergebenen Umlaufpläne von Montag bis Donnerstag

- 22 Solo- und
- 11 Gelenkbusse

für den Liniendienst benötigt, wobei Gelenkbusse in den Spitzenzeiten ohne Fahrzeugreserve betrieben werden. Für Gelenkbusse wird bei den nachfolgenden Betrachtungen mit Beginn der Umwandlung in emissionsfreie Fahrzeuge ein Reservefahrzeug vorgesehen.

Hinzu kommen die oben benannten Solo- und Gelenkbusse der Subunternehmer, sodass im Endausbau eine Ladeinfrastruktur für mindestens

- 25 Solo- und
- 13 Gelenkbusse

zzgl. einer Redundanz von etwa 10 – 15 % vorgehalten werden muss.

Durch die Subunternehmer werden weiterhin sechs Mini- und zwei Midibusse im Auftrag der HAVAG eingesetzt. Durch die geplante Verlängerung der Linie 23 kommt noch ein weiterer Minibus hinzu. Bei einer Wiedereingliederung der Leistungen wären für diese Fahrzeuge weitere 10 Lademöglichkeiten vonnöten.

4.2 Analyse der Betriebsabläufe

4.2.1 Batteriebusse – Voll- und Zwischenlader

Wie bereits erwähnt, wurden alle seitens der HAVAG zur Verfügung gestellten Umlaufpläne einer vereinfachten Energiebilanzierung unterzogen. Die Analysen wurden getrennt für Montag bis Donnerstag, Freitag, Samstag sowie Sonn- und Feiertage vorgenommen. Dabei wurden inkl. der Subunternehmer-Umlaufpläne 166 übermittelte Umlaufpläne für alle Verkehrstage einbezogen.

Die Ergebnisdarstellung erfolgt gemeinsam für Voll- und Zwischenlader. Die Betriebsdurchführung der HAVAG und der beauftragten Subunternehmer ist geprägt durch eine hochoptimierte Umlaufplangestaltung. Wie auch in anderen Verkehrsunternehmen werden Langläufer durch Kurzläufer, also Umlaufpläne während der Verkehrsspitzen ergänzt. Daraus ergeben sich die in Abbildung 4-1 beispielhaft für Montag bis Freitag dargestellten Bedienbarkeiten von Umlaufplänen beim gegenwärtigen Stand der Technik.

Zunächst wird deutlich, dass ein nicht unerheblicher Teil der Umlaufpläne derzeit noch nicht mit Batteriegleitbussen bedient werden kann, wenn eine ausschließliche Ladung im Betriebshof vorgenommen wird. Dies gilt selbst beim Einsatz von Hybridheizungen. Beim Einsatz von rein elektrischen Heizungen erhöht sich beim gegenwärtigen Stand der Technik die Anzahl nicht bedienbarer Umlaufpläne um den Wert 12.

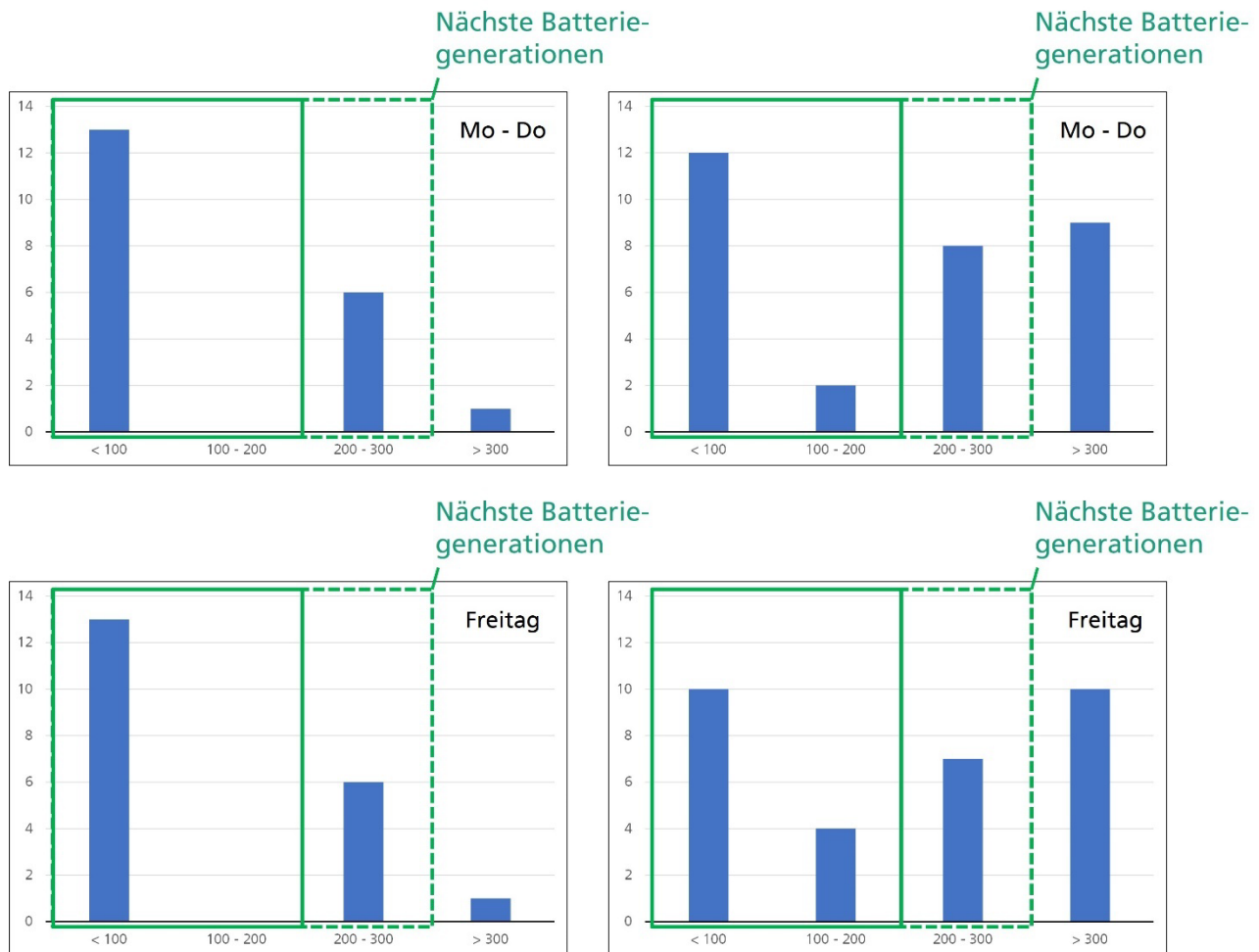


Abbildung 4-1
Einteilung der Umlaufpläne in Fahrweitenklassen – Gelenkbusse (links) und Solobusse rechts – grün = Bedienbarkeit mit Batteriebussen (Hybridheizung)

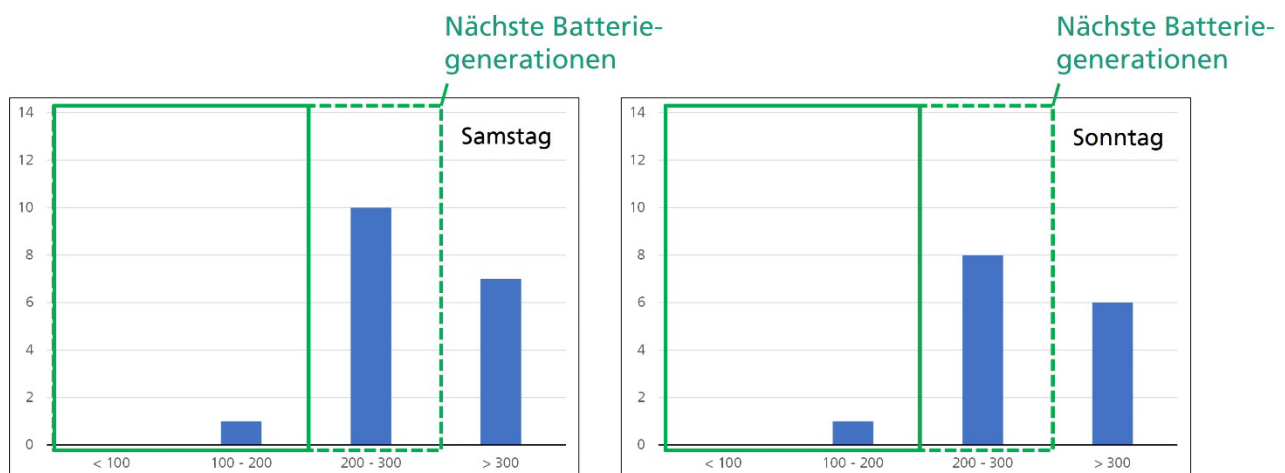


Abbildung 4-2
Einteilung der Umlaufpläne in Fahrweitenklassen – nur Solobusse – grün = Bedienbarkeit mit Batteriebussen (Hybridheizung)

Ein ähnliches Bild zeichnet sich an Wochenenden und Feiertagen (Abbildung 4-2 und für die Klein- und Midibusse).

Würde man trotzdem versuchen, den Busbetrieb auf Voll- und Zwischenlader umzustellen, wäre eine Anpassung der Umlaufpläne notwendig. Dabei wären

- Teile von langen Umlaufplänen den Kurzläufern zuzuordnen oder
- lange Umlaufpläne durch zusätzliche Fahrzeuge im Umlauf zu unterbrechen, um den Fahrzeugen eine Zwischenladezeit von etwa zwei Stunden im Betriebshof zu gewähren.

Bei einem entsprechenden Neuzuschnitt der Umlaufpläne ergeben sich die in Tabelle 4-2 aufgeführten Mehrbedarfe an Leer-Kilometern und Fahrpersonalstunden. Zusätzliche Fahrzeuge wären selbst unter Beachtung einer Werkstattreserve nicht notwendig.

	Zusätzliche Leer-km/a	Zusätzliche Fahrpersonal-Stunden/a
Gelenkbusse	14.010	934
Solobusse	66.480	4.432
Mini- / Midibusse	11.543	821

Tabelle 4-2: Mehrbedarf an Leer-Kilometern und Fahrpersonalstunden durch die Anpassung der Umlaufpläne an Batteriebusreichweiten (Stand der Technik)

Bei den angegebenen Werten handelt es sich um Maximalwerte, da sie anhand des aktuellen Standes der Technik und der damit verbundenen Reichweiten ermittelt wurden. Unterstellt man eine Weiterentwicklung der Speichertechnologien, verringert sich die Notwendigkeit eines Neuzuschnitts der Umlaufpläne und damit der Mehraufwände.

4.2.2 Batteriebusse – Gelegenheitslader

Wie im Punkt 2.2.2 bereits ausgeführt wurde, sind Batteriebusse für Gelegenheitsladung mit speziellen Batterien ausgerüstet, die eine höhere Ladeleistung (i. d. R. > 250 kW), dafür aber einen geringeren Energieinhalt besitzen. Für eine Nachladung sind Ladestationen und spezielle Kontaktsysteme (Pantographen) notwendig. Dafür notwendige Installationen auf dem Fahrzeugdach verringern zusätzlich die Batteriegröße bzw. den nominellen Energieinhalt.

In der Analyse wurden alle Endhaltestellen und Umlaufpläne betrachtet, unabhängig davon, ob die Umlaufpläne durch Voll- bzw. Zwischenlader bedient werden können. Die Endhaltestellen wurden in unterschiedlichen Kombinationen mit Ladeinfrastruktur (250 kW Ladeleistung) ausgerüstet. Dabei wurde zusätzlich zu der bereits heute mit einer Ladestation versehenen Endhaltestelle Kröllwitz in jedem Kombinationsschritt eine zusätzliche Endhaltestelle mit Ladestationen versehen.

In der nachfolgenden Darstellung wird jeder Umlaufplan für die Verkehrstage Montag bis Donnerstag farblich dahingehend gekennzeichnet, inwiefern er mit Gelegenheitsladern bedienbar wäre. Ausgehend von der Endhaltestelle Kröllwitz wird je Spalte eine Endhaltestelle zusätzlich mit Ladeinfrastruktur ausgestattet. In der Darstellung wird nur der Aufbaupfad mit den anfänglich größten Zugewinnen an bedienbaren Umlaufplänen beschrieben.

Die Analyse der Umlaufpläne für Freitage zeichnet ein vergleichbares Bild.

Unterstellt man je Endhaltestelle zwei unabhängige Lademöglichkeiten, so ist es möglich, mit zusammen 10 Ladestationen 36 Solo- und Gelenkbusse ohne jegliche Änderung im Betriebsablauf als Gelegenheitslader zu betreiben. Verglichen mit anderen Verkehrsunternehmen ist der Wert 3,6 Busse / Ladestation überdurchschnittlich hoch. Lediglich zwei Umlaufpläne wären überhaupt nicht auf Gelegenheitslader, aber derzeit auch nicht auf Volllader umstellbar.

Kröllwitz	Kröllwitz Heide-Uni-Kl.	Kröllwitz Heide-Uni-Kl. Büschdorf	Kröllwitz Heide-Uni-Kl. Büschdorf Südstadt	Kröllwitz Heide-Uni-Kl. Büschdorf Südstadt Rennbahnkreuz
18625	18625	18625	18625	18625
18630	18630	18630	18630	18630
18632	18632	18632	18632	18632
18634	18634	18634	18634	18634
18635	18635	18635	18635	18635
58603	58603	58603	58603	58603
58605	58605	58605	58605	58605
58613	58613	58613	58613	58613
58706	58706	58706	58706	58706
58707	58707	58707	58707	58707
58708	58708	58708	58708	58708
58709	58709	58709	58709	58709
58751	58751	58751	58751	58751
58752	58752	58752	58752	58752
58753	58753	58753	58753	58753
58754	58754	58754	58754	58754
58755	58755	58755	58755	58755
58765	58765	58765	58765	58765
OBS_18812	OBS_18812	OBS_18812	OBS_18812	OBS_18812
OBS_18813	OBS_18813	OBS_18813	OBS_18813	OBS_18813
18601	18601	18601	18601	18601
18602	18602	18602	18602	18602
18603	18603	18603	18603	18603
18604	18604	18604	18604	18604
18605	18605	18605	18605	18605
18606	18606	18606	18606	18606
18607	18607	18607	18607	18607
18608	18608	18608	18608	18608
18609	18609	18609	18609	18609
18616	18616	18616	18616	18616
18619	18619	18619	18619	18619
18620	18620	18620	18620	18620
18621	18621	18621	18621	18621
18622	18622	18622	18622	18622
18623	18623	18623	18623	18623
38610	38610	38610	38610	38610
38611	38611	38611	38611	38611
38612	38612	38612	38612	38612
38613	38613	38613	38613	38613
38614	38614	38614	38614	38614
38615	38615	38615	38615	38615
38617	38617	38617	38617	38617
38618	38618	38618	38618	38618
58601	58601	58601	58601	58601
58604	58604	58604	58604	58604
58610	58610	58610	58610	58610
58612	58612	58612	58612	58612
OBS_18801	OBS_18801	OBS_18801	OBS_18801	OBS_18801
OBS_18802	OBS_18802	OBS_18802	OBS_18802	OBS_18802
KOS_18808	KOS_18808	KOS_18808	KOS_18808	KOS_18808
OBS_18811	OBS_18811	OBS_18811	OBS_18811	OBS_18811

bedienbar
 eingeschränkt bedienbar
 nicht bedienbar

Abbildung 4-3
Bedienbarkeit der Umlaufpläne mit Gelegenheitsladern – Hybridheizung, Montag bis Donnerstag, Solo- und Gelenkbusse

Den größten Zugewinn erhält man durch die Ausstattung der Endhaltestellen Heide-Universitätsklinik und Büschdorf. An beiden Endhaltestellen ist die Installation der Ladeinfrastruktur problemlos möglich, wenn das Laden unmittelbar an einem Ankunfts- oder Abfahrtssteig zugelassen wird. Ladestationen an den Endhaltestellen Südstadt und Rennbahnkreuz sind ebenfalls, wenn auch mit einigen Einschränkungen installierbar. Allerdings ist hier der Zugewinn mit je zwei bedienbaren Umlaufplänen nur noch gering.

Statt der Endhaltestelle Rennbahnkreuz wäre es auch grundsätzlich möglich, die Endhaltestelle Südpark mit Ladestationen auszurüsten. Ohne die Verlagerung von Wendezeiten wäre dies jedoch mit deutlich geringeren Energiereserven verbunden.

Eine Verlagerung der Lademöglichkeiten von der Endhaltestelle Büschdorf in den Betriebshof Freimfelder Straße ist nicht zielführend. Zum einen wäre dann die Linie 43 nicht angebunden und zum anderen stünden selbst bei einer Umverteilung von Wendezeiten im Betriebshof nicht genügend Ladezeiten für die Linie 27 zur Verfügung.

Abbildung 4-4 zeigt die Bedienbarkeit von Umlaufplänen für die gleichen Verkehrstage, jedoch bei einem Einsatz von rein elektrischen Heizungen (Wärmepumpen, ergänzt durch Widerstandsheizungen). Die Ergebnisse sind ähnlich gut, allerdings bleiben fünf statt zwei Umlaufpläne nicht bedienbar, wodurch die Anzahl von elektrifizierbaren Bussen pro Ladestation auf den immer noch guten Wert von 3,3 fällt.

Kröllwitz	Kröllwitz Heide-Uni-Kl.	Kröllwitz Heide-Uni-Kl. Büschdorf	Kröllwitz Heide-Uni-Kl. Büschdorf Südstadt	Kröllwitz Heide-Uni-Kl. Büschdorf Südstadt Rennbahnkreuz
18625	18625	18625	18625	18625
18630	18630	18630	18630	18630
18632	18632	18632	18632	18632
18634	18634	18634	18634	18634
18635	18635	18635	18635	18635
58603	58603	58603	58603	58603
58605	58605	58605	58605	58605
58613	58613	58613	58613	58613
58706	58706	58706	58706	58706
58707	58707	58707	58707	58707
58708	58708	58708	58708	58708
58709	58709	58709	58709	58709
58751	58751	58751	58751	58751
58752	58752	58752	58752	58752
58753	58753	58753	58753	58753
58754	58754	58754	58754	58754
58755	58755	58755	58755	58755
58765	58765	58765	58765	58765
OBS_18812	OBS_18812	OBS_18812	OBS_18812	OBS_18812
OBS_18813	OBS_18813	OBS_18813	OBS_18813	OBS_18813
18601	18601	18601	18601	18601
18602	18602	18602	18602	18602
18603	18603	18603	18603	18603
18604	18604	18604	18604	18604
18605	18605	18605	18605	18605
18606	18606	18606	18606	18606
18607	18607	18607	18607	18607
18608	18608	18608	18608	18608
18609	18609	18609	18609	18609
18616	18616	18616	18616	18616
18619	18619	18619	18619	18619
18620	18620	18620	18620	18620
18621	18621	18621	18621	18621
18622	18622	18622	18622	18622
18623	18623	18623	18623	18623
38610	38610	38610	38610	38610
38611	38611	38611	38611	38611
38612	38612	38612	38612	38612
38613	38613	38613	38613	38613
38614	38614	38614	38614	38614
38615	38615	38615	38615	38615
38617	38617	38617	38617	38617
38618	38618	38618	38618	38618
58601	58601	58601	58601	58601
58604	58604	58604	58604	58604
58610	58610	58610	58610	58610
58612	58612	58612	58612	58612
OBS_18801	OBS_18801	OBS_18801	OBS_18801	OBS_18801
OBS_18802	OBS_18802	OBS_18802	OBS_18802	OBS_18802
KOS_18808	KOS_18808	KOS_18808	KOS_18808	KOS_18808
OBS_18811	OBS_18811	OBS_18811	OBS_18811	OBS_18811

bedienbar
 eingeschränkt bedienbar
 nicht bedienbar

Abbildung 4-4
Bedienbarkeit der Umlaufpläne mit Gelegenheitsladern – Elektroheizung, Montag bis Donnerstag, Solo- und Gelenkbusse

Ähnlich sehen die Ergebnisse für Wochenenden und Feiertage aus. Von den 34 für diese Verkehrstage analysierten Umlaufplänen kann beim Einsatz von Hybridheizungen nur ein Umlaufplan eines Subunternehmers nicht mit Gelegenheitsladern bedient werden. Kommen ausschließlich rein elektrische Heizungen zum Einsatz, wären sechs Umlaufpläne nicht auf Gelegenheitslader umstellbar.

Für die Klein- und Midibusse ist das Konzept der Gelegenheitsladung hingegen vollkommen ungeeignet. Selbst wenn man an den Endhaltestellen

- Hauptbahnhof,
- Am Steintor,
- Betriebshof und
- Friedhof Neustadt

Lademöglichkeiten installieren würde, könnten nicht einmal ansatzweise alle Umlaufpläne auf Gelegenheitslader umgestellt werden (Abbildung 4-5). Da eine ähnlich schlechte Bedienbarkeit bei Vollladern gegeben ist, ergibt sich fast zwangsläufig die Schlussfolgerung, diese Fahrzeugkategorie bei der Umstellung hintenanzustellen. Dafür wird vorbehaltlich von Angebotsänderungen eine ausschließliche Nachladung auf dem Betriebshof empfohlen.

18804	Mo - Do	
18805	Mo - Do	
18806	Mo - Do	
18807	Mo - Do	
38809	Mo - Do	
38810	Mo - Do	
58803	Mo - Do	
58901	Mo - Do	
58902	Mo - Do	
58903	Mo - Do	
15804	Fr	
15805	Fr	
15806	Fr	
15807	Fr	
15809	Fr	
15810	Fr	
55803	Fr	
55901	Fr	
55902	Fr	
55903	Fr	
16803	Sa	
16804	Sa	
16805	Sa	
16807	Sa	
16808	Sa	
17802	So	bedienbar
17803	So	eingeschränkt bedienbar
17805	So	bedienbar
17810	So	bedienbar
37801	So	nicht bedienbar
37804	So	nicht bedienbar

Abbildung 4-5
Bedienbarkeit der Umlaufpläne mit Gelegenheitsladern – Hybridheizung, alle Verkehrstage, Mini- und Midibusse

4.2.3 Brennstoffzellenbusse

Eine sehr gute Bedienbarkeit der HAVAG-Umlaufpläne ist mit Brennstoffzellenbussen gegeben (Abbildung 4-6). Fasst man alle Verkehrstage zusammen, sind bei konservativen Annahmen für die erzielbaren Reichweiten lediglich 18 Solobus- und einige Minibusumlaufpläne nicht bedienbar.

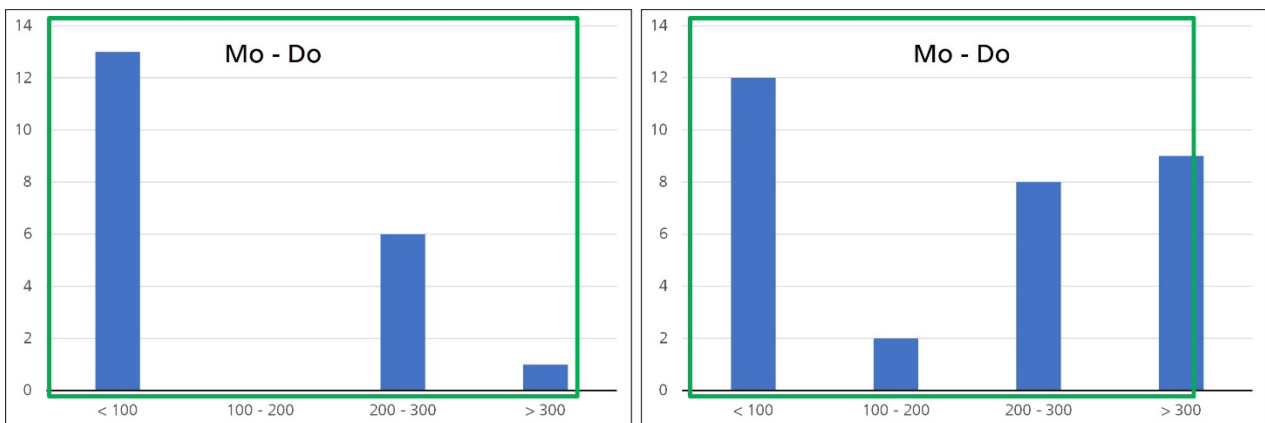


Abbildung 4-6
Einteilung der Umlaufpläne in Fahrweitenklassen – Gelenkbusse (links) und Solobusse (rechts) – grün = Bedienbarkeit mit Brennstoffzellenbussen

Die Mehrbedarfe an Leer-Kilometern und Fahrpersonalstunden sind in Tabelle 4-3 aufgeführt. Auch hier handelt es sich um eher konservative Werte basierend auf dem heutigen Stand der Technik. Zusätzliche Fahrzeuge wären nicht notwendig, wenn man eine ähnliche Verfügbarkeit wie bei Dieselnissen unterstellt.

Für die Klein- und Midibusse handelt es sich aber um weitgehend theoretische Werte, da für diese Fahrzeugklassen gegenwärtig keine ausreichenden Erfahrungen aus der Praxis vorliegen.

	Zusätzliche Leer-km/a	Zusätzliche Fahrpersonal-Stunden/a
Gelenkbusse	-	-
Solobusse	19.275	1.285
Klein- / Midibusse	8.490	566

Tabelle 4-3: Mehrbedarf an Leer-Kilometern und Fahrpersonalstunden durch die Anpassung der Umlaufpläne an Brennstoffzellenbusreichweiten (Stand der Technik)

Eine vollständige Umstellung ohne jegliche Änderungen in den Betriebsabläufen wäre auf Batteriebusse mit Brennstoffzellen-Range-Extender möglich. Hierfür müsste aber neben einer Wasserstoffinfrastruktur parallel auch eine Ladeinfrastruktur aufgebaut werden. Dieser Kostenmehraufwand wäre nur gerechtfertigt, wenn deutlich mehr Umlaufpläne nicht mit anderen Antriebsformen umstellbar wären, es ggf. sogar zu einem Mehrbedarf an Fahrzeugen käme.

4.3 Zwischenfazit

Die Betriebsdurchführung bei der HAVAG ist für eine Umstellung auf

- Batteriebusse, die ausschließlich im Betriebshof nachgeladen werden (Voll- bzw. Zwischenlader),
- Batteriebusse mit Gelegenheitsladung oder
- Brennstoffzellenbusse

geeignet. Eine Beschaffung von Batteriebussen mit Brennstoffzellen-Range-Extender wird als nicht zielführend betrachtet.

Vor dem Hintergrund der Drittelregelung im Saubere Fahrzeuge Beschaffungsgesetzes, die eine bestimmte Quote an emissionsfreien Fahrzeugen vorschreibt und die Substitution der Quote für saubere Fahrzeuge durch ebenfalls emissionsfreie Fahrzeuge gestattet, wird von der zusätzlichen Einführung sauberer Fahrzeuge (z. B. Biogasbussen) abgeraten.

5 Einführungsschritte

5.1 Einleitung

Alle nachfolgenden Überlegungen gehen von einer mittel- bis langfristig vollständigen Umstellung der HAVAG-Busflotte auf Batterie- oder Brennstoffzellenbusse aus. Davon unbenommen ist die Möglichkeit, auch weiterhin Dieselbusse zu beschaffen, da dies die Regelungen des Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetzes grundsätzlich für einen Teil der Neubeschaffungen vorsehen.

Die gewählte Vorgehensweise dient dazu, die Obergrenze der Investitionskosten und gleichzeitig die Untergrenze der Kostendifferenz zwischen dem (anteiligen) Betrieb von emissionsfreien Fahrzeugen zu einem reinen Dieselbusbetrieb zu berechnen. Dieser auf den ersten Blick verwirrende Umstand ergibt sich aus der Tatsache, dass bei der Einführung von emissionsfreien Bussen Sprungkosten für die Lade- bzw. Tankinfrastruktur sowie die weitere Betriebshofausrüstung entstehen, die jeweils auf die Anzahl der beschafften Busse umzulegen sind. Werden weniger Busse beschafft, steigen pro Bus und somit auch pro Fahrzeugkilometer die anteiligen Kosten für die Infrastruktur.

Die Definition der Einführungsschritte wurde nach den folgenden fünf Grundprämissen vorgenommen:

1. Wie bereits erwähnt, wird eine Gesamtumstellung abgebildet.
2. Es werden nur ohnehin aus Alters- oder anderen fahrzeugseitigen Gründen zu ersetzende Fahrzeuge durch emissionsfreie Busse ersetzt.
3. Bereits fest vereinbarte Dieselbuslieferungen für die Jahre 2026 – 2030 werden nicht in emissionsfreie Busse gewandelt, Optionen hingegen schon.
4. Möglichst später Beginn der Umstellung von Gelenkbussen, um Abstellreserven für Gelenkbusse, die für die Schülerbeförderung geleast wurden und werden, zu erhalten.
5. Die Busse werden entsprechend ihrer Reichweite nur auf ausgesuchten Umlaufplänen eingesetzt.

5.2 Definition der Einführungsschritte

Gemäß der durch die HAVAG übermittelten Fahrzeugliste sind die in Tabelle 5-1 ausgewiesenen Fahrzeugneubeschaffungen geplant. Diese sind unabhängig von der Einführung emissionsfreier Antriebe notwendig, um den Anforderungen des Verkehrsvertrages gerecht zu werden.

Jahr	Neubeschaffung		davon emissionsfrei		Aufwuchs emissionsfreie Fahrzeugflotte ¹⁾
	Solobusse	Gelenkbusse	Solobusse	Gelenkbusse	
2026	6	-	-	-	3 / -
2027	6 + 3 ²⁾	2 ²⁾	4 + 3 ²⁾	2 ²⁾	10 / 2
2028	6	-	4	-	14 / 2
2029	6	-	4	-	18 / 2
2030	2	3	1	2	19 / 4
2033	-	2 + 1 ³⁾	-	2 + 1 ³⁾	19 / 7
2034	3	6	3	6	19 / 13
2038	6	-	6	-	25 / 13
2039	6 + 3 ²⁾	2 ²⁾	6 + 3 ²⁾	2 ²⁾	27 / 13
2040	6	-	6	-	29 / 13
2041	6	-	6	-	31 / 13
2042	2	3	2	3	32 / 14

¹⁾ Solobusse / Gelenkbusse ²⁾ zusätzliche Fahrzeuge bei Übernahme von Subunternehmerleistungen

³⁾ zzgl. Reservefahrzeug (s. Punkt 4.1)

Tabelle 5-1: Buserneuerungsprogramm und Umstellung auf emissionsfreie Fahrzeuge – Solo- und Gelenkbusse

In die Einführungsschritte, die eine vollständige Umstellung bis zum Jahr 2042 beschreiben, wurden drei Solo- und zwei Gelenkbusse für derzeit von Subunternehmern erbrachte Leistungen eingerechnet.

Den Umstellungsplan für die gegenwärtig ausschließlich von Subunternehmern betriebenen Mini- und Midibusse zeigt Tabelle 5-2. Die Umstellungsreihenfolge wurde so gewählt, dass zunächst Midibusse umgestellt werden und in den Jahren 2027 und 2028 zu ersetzende Minibusse nochmals mit Dieselantrieb beschafft werden. Damit ergibt sich bis zum Jahr 2030 ein Anteil emissionsfreier Fahrzeuge an der Gesamtzahl der neu zu ersetzenden

Fahrzeuge, die den gesetzlichen Forderungen entspricht. Eine vollständige Umstellung der Mini- und Midibusse wäre somit bis zum Jahr 2040 abgeschlossen.

Jahr	Neubeschaffung		davon emissionsfrei		Aufwuchs emissionsfreie Fahrzeugflotte ¹⁾
	Minibusse	Midibusse	Minibusse	Midibusse	
2027	1	1	-	1	- / 1
2028	1	1	-	1	- / 2
2030	1	-	1	-	1 / 2
2032	1	-	1	-	2 / 2
2033	1	-	1	-	3 / 2
2034	1	-	1	-	4 / 2
2039	1	-	1	-	5 / 2
2040	1	-	1	-	6 / 2

¹⁾ Minibusse / Midibusse

Tabelle 5-2: Buserneuerungsprogramm und Umstellung auf emissionsfreie Fahrzeuge – Mini- und Midibusse

Die beschriebenen Zeitschritte verstehen sich vorbehaltlich jedweder Änderungen in den gesetzlichen Vorgaben und der Verfügbarkeit von Dieselnissen. Die deutschen Bushersteller EvoBus und MAN haben z. B. angekündigt, keine Dieselnisse der Klasse M3 I mit der Abgasnorm Euro 7 entwickeln und auf den Markt bringen zu wollen. Wird die Abgasnorm Euro 7 ab dem Jahr 2027 für Linienbusse verbindlich, ist die Beschaffung von Dieselnissen ab diesem Zeitpunkt zumindest in Frage gestellt.

Aus dem Buserneuerungsprogramm wurden drei Zeithorizonte definiert, die eine vollständige Umstellung der Busflotte bis zum Jahr 2041 beschreiben (Tabelle 5-3). Die Zeithorizonte werden für die Darstellung des schrittweisen Aufbaus der Lade- bzw. Tankinfrastruktur genutzt.

Zeithorizont	Minibusse	Midibusse	Solobusse	Gelenkbusse	Bestand emissionsfreie Fahrzeuge
2026 – 2029	-	2	16 + 3	-	- / 2 / 19 / -
2030 – 2035	4	-	3	11	4 / 2 / 19 / 12
2036 – 2041	2	-	11	2	6 / 2 / 32 / 14

Tabelle 5-3: Zuordnung von Ersatzbeschaffungen mit emissionsfreien Antrieben zu Zeithorizonten

5.3 Investitionskosten

Für Batteriebusse ergeben sich die in Tabelle 5-4 aufgeführten Investitionskosten mit Preisstand 2023, unabhängig von der gewählten Heizungsvariante. Angegeben sind jeweils der angesetzte Stückpreis sowie die Gesamtkosten je Fahrzeugkategorie. In Summe ergeben sich rund 39,8 Mio. € Investitionskosten für die erste umgestellte Fahrzeugflotte zzgl. Inflation.

		Minibusse	Midibusse	Solobusse	Gelenkbusse
Anzahl		6	2	32	14
Fahrzeuge	Stückpreis	270.000 €	400.000 €	600.000 €	730.000 €
	gesamt	1,62 Mio. €	0,8 Mio. €	19,2 Mio. €	10,22 Mio. €
Ersatzbatterien	Stückpreis	70.000 €	100.000 €	150.000 €	180.000 €
	gesamt	0,42 Mio. €	0,2 Mio. €	4,8 Mio. €	2,52 Mio. €
Gesamt		2,04 Mio. €	1,0 Mio. €	24,0 Mio. €	12,74 Mio. €

Tabelle 5-4: Investitionskosten für Batteriebusse inkl. Ersatzbatterien (Preisstand 2023, netto)

Wie bereits erwähnt, sind gegenwärtig kaum Mini- und Midibusse mit Brennstoffzellenantrieb am Markt verfügbar, weshalb eine Prognose der Investitionskosten nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich ist. Setzt man die in Tabelle 5-5 angegebenen Stückpreise an, ergeben sich Investitionskosten in Höhe von rund 39,5 Mio. €.

		Minibusse ¹⁾	Midibusse ¹⁾	Solobusse	Gelenkbusse
Anzahl		6	2	32	14
Fahrzeuge	Stückpreis	340.000 €	420.000 €	610.000 €	750.000 €
	gesamt	2,04 Mio. €	0,82 Mio. €	19,52 Mio. €	10,5 Mio. €
Ersatzbatterien	Stückpreis	25.000 €	40.000 €	48.000 €	50.000 €
	gesamt	0,15 Mio. €	0,2 Mio. €	1,54 Mio. €	0,7 Mio. €
Ersatzbrennstoffzelle	Stückpreis	25.000 €	45.000 €	80.000 €	85.000 €
	gesamt	0,15 Mio. €	0,09 Mio. €	2,56 Mio. €	1,19 Mio. €
Gesamt		2,34 Mio. €	1,11 Mio. €	23,62 Mio. €	12,39 Mio. €

¹⁾ Stückpreise = Schätzwerte

Tabelle 5-5: Investitionskosten für Brennstoffzellenbusse inkl. Ersatzbatterien und -brennstoffzellen (Preisstand 2023, netto)

5.4 Emissionsfreie Fahrleistungen

5.4.1 Batteriebusse

Um die elektrischen Fahrleistungen ermitteln zu können, wurden jedem pro Zeithorizont beschafften Bus unter Beachtung von Verfügbarkeiten und Reserven Umlaufpläne bzw. Kombinationen von Umlaufplänen zugeordnet. Dabei wurde versucht, unter Beachtung möglicher Reichweiten und ggf. notwendiger Zwischenladezeiten ein Maximum an elektrischen Fahrleistungen zu erzielen.

Zeithorizont	Mini- / Midibusse	Solobusse	Gelenkbusse
planmäßig	650.945	2.121.714	645.941
2026 – 2029	156.914	1.421.999	121.628
2030 – 2035	341.795	1.421.999	535.731
2036 – 2041	650.945	2.121.714	645.941

Tabelle 5-6: Maximal elektrifizierte Fahrleistungen pro Jahr – Hybridheizung

Bereits mit dem Zeithorizont bis 2029 werden etwa 45 % aller jährlichen Fahrzeugkilometer elektrifiziert, wenn man eine Verfügbarkeit der Batteriebusse von 90 % unterstellt (Tabelle 5-6). Darin enthalten ist die vollständige Elektrifizierung aller Solobus-Leistungen an Wochenenden und Feiertagen.

Bei einem Einsatz von Elektroheizungen sinken die im Zeithorizont bis 2029 elektrifizierbaren Fahrleistungen, insb. für Solobusse um etwa 10 %.

5.4.2 Brennstoffzellenbusse

Durch die höheren Reichweiten könnten beim Einsatz von Brennstoffzellenbussen bereits im Zeithorizont bis 2029 etwa 10 – 15 % mehr Fahrzeugkilometer emissionsfrei betrieben werden. Für die nachgelagerten Zeithorizonte ändert sich im Vergleich mit Batteriebussen (Hybridheizung) nichts.

6 Energieverbrauch und Ladeinfrastruktur

Alle nachfolgenden Überlegungen gehen von einer vollständigen Umstellung des HAVAG-Fuhrparks auf Batteriebusse aus.

6.1 Energie- und Heizölverbrauch

Die Berechnung der Energieverbräuche unterstellt eine Umstellung aller Umlaufpläne unter Beachtung der aufgeführten Mehraufwände, wobei der Planungsstand 03/2023 als Berechnungsgrundlage genutzt wurde. Dabei wurden zwei Varianten für die Fahrzeugheizung berücksichtigt:

- Variante 1: Hybridheizung (elektrisch mit Brennstoffzusatzheizung)
- Variante 2: rein elektrisch.

In der Realität wird es eine Übergangsphase geben, in der Batteriebusse mit beiden Heizungsvarianten parallel eingesetzt werden, sodass in diesem Zeitraum der Energieverbrauch zwischen den Varianten 1 und 2 liegen und der Heizölverbrauch schrittweise zurückgehen wird.

	Max. Tagesenergieverbrauch Variante 1 [kWh/d]	Jahresenergieverbrauch Variante 1 [MWh/a]	Jahresverbrauch an Heizöl Variante 1 [l/a]	Jahresenergieverbrauch Variante 2 [MWh/a]
Planmäßig ohne zusätzliche Leerkilometer	20.780 (Montag – Donnerstag)	490 2.760 970	6.500 84.900 38.800	550 3.400 1.160
Zus. Leerkilometer	480 (Montag – Donnerstag)	8,7 86,4 21,0	115 2.660 840	9,8 106,4 25,2
Verbrauchsdaten: 0,75 kWh/km / 1,3 kWh/km / 1,5 kWh/km 0,01 l/km / 0,04 l/km / 0,06 l/km 0,85 kWh/km / 1,6 kWh/km / 1,8 kWh/km				

Tabelle 6-1: Energie- und Heizölverbrauch (gerundete ca.-Angaben) – Klein- und Midi- / Solo- / Gelenkbusse

6.2 Zeitlicher Ablauf des Ladeinfrastrukturaufbaus

Entsprechend der im Kapitel 5 definierten Einführungsschritte werden die nachfolgend aufgeführten Ausbaustufen für die Ladeinfrastruktur im Betriebshof festgelegt. Für den Endausbau wird die Anzahl der Ladegeräte entsprechend der Anzahl der Montag bis Donnerstag eingesetzten Busse zzgl. einer Reserve von ca. 10 – 15 % festgelegt.

Tabelle 6-2 gibt einen Überblick über den Aufbau der Ladeinfrastruktur. Die zugehörigen Lagepläne sind in Anlage 1 zu finden. Es wird eine Transformatorenleistung von insg. 3,9 MVA vorgesehen, wodurch ausreichende Leistungsreserven für zukünftige Änderungen in den Betriebsabläufen und zusätzliche Fahrplanleistungen vorgehalten werden (vergl. mit Tagesgang der Anschlussleistung in der Abbildung 6-4).

	Ausbaustufe 1	Ausbaustufe 2	Endausbau
Zeithorizont	2026 – 2029	2030 – 2035	2036 – 2041
Transformatorenleistung	2,6 MVA	3,9 MVA	3,9 MVA
Anzahl Ladegeräte 150 kW	19	22	22
Anzahl Ladegeräte 100 kW	5	17	25
Anzahl Ladegeräte 50 kW	-	5	8
Anzahl Werkstattladegeräte	1	1	1

Tabelle 6-2: Ausbaustufen für die Dimensionierung der Ladeinfrastruktur [Anzahl Ladegeräte]

Um eine möglichst flexible Betriebsdurchführung zu ermöglichen, wurde weiterhin darauf geachtet, Aufstellspuren getrennt für die einzelnen Fahrzeuglängen mit Lademöglichkeiten zu versehen. Ebenso wurde in einer Aufstellspur jeder Stellplatz mit einem Ladegerät gleicher Leistung ausgestattet. Daraus ergibt sich eine etwas höhere Redundanz als die ursprünglich geplanten 10 – 15 %. Eine aus ökonomischen Aspekten ratsame Reduzierung der Redundanz führt entweder zu Restriktionen in den Betriebsabläufen (Stellplätze mit und ohne Ladegerät in einer Aufstellspur) oder zu einer sehr knapp bemessenen Redundanz.

Eine frühzeitige Betrachtung der Endausbaustufe ist unabhängig vom Zeitpunkt ihrer Umsetzung notwendig, um z. B. ausreichend dimensionierte Kabel und entsprechende Transformatoren bereits in der ersten bzw. zweiten Ausbaustufe vorzusehen.

Insgesamt ist die Installation von 55 Ladegeräten sowie einem Werkstattladegerät notwendig, wenn von einer vollständigen Umstellung ausgegangen wird (Tabelle 6-2). Durch die zusätzlichen Ladegeräte verfügt die HAVAG über eine ausreichend hohe Flexibilität, um zukünftig auf zusätzliche Fahrplanleistungen reagieren zu können.

6.3 Lade- und Anschlussleistungen

Die Analyse der zur Verfügung gestellten Umlaufpläne zeigte, dass eine einheitliche Ausrüstung mit 150 bzw. 100 kW-Ladegeräten für die Midi-, Solo- und Gelenkbusse auch für einen rein elektrischen Betrieb ohne Zusatzheizung sinnvoll ist. Für die Minibusse sind i. d. R. geringere Ladeleistungen von maximal 50 kW ausreichend. Beim Entwurf der Ladeinfrastruktur wurde wiederum darauf geachtet, dass in einer Aufstellspur nur Ladegeräte mit der gleichen maximalen Ladeleistung angeordnet werden.

Für die Dimensionierung der Lade- und Anschlussleistungen ist es notwendig, neben der Fahrzeuganzahl sowie deren Ein- und Ausrückezeitpunkten das zugrundeliegende Laderegime zu definieren. Vor dem Hintergrund der vergleichsweise geringen Busanzahl wurde zunächst nur ein händisches Laderegime betrachtet:

- Batteriebusse werden tagsüber zwischengeladen, sofern sie mind. eine halbe Stunde auf dem Betriebshof abgestellt werden
- Batteriebusse werden etwa 30 min nach der letzten Rückkehr auf den Betriebshof mit maximal möglicher Ladeleistung nachgeladen.

Betrachtet wurde ein Endausbauzustand, bei dem alle Batteriebusse ihren Umlaufplan mit rein elektrischer Heizung absolvieren können. Diese auf den Planungshorizont von etwa 2041 ausgerichtete Betrachtungsweise stellt sicher, dass später in den Nachtstunden auftretende Leistungsspitzen korrekt dargestellt werden. Nur so ist eine ausreichende Dimensionierung von Anfang an möglich. Zzgl. wurde ein Verlust von 15 % zwischen Steckverbindung und Netzanschluss berücksichtigt.

Eingerechnet wurden neben den aktuellen Fahrplanleistungen notwendige Umlaufpläne für zukünftige Taktverdichtungen auf 10 bzw. 20 Minuten. Nicht eingerechnet wurden hingegen Schulbusleistungen, da deren zukünftiger Umfang gegenwärtig nicht abgeschätzt werden kann. Hinzu kommt, dass die Nachladung flexibel in den späteren Nachmittag gelegt werden kann, weshalb die Schulbusleistungen keine Auswirkungen auf die Netzanschlussleistung haben werden.

Mit den jeweils ermittelten Energiebedarfswerten wurden die notwendigen Ladezeiten ermittelt. Diese wurden anschließend überlagert, um die Netzanschlussleistung zu berechnen. Die resultierende Netzanschlussleistung für den Endausbauzustand zeigt Abbildung 6-1 ohne die Einbeziehung von Subunternehmerleistungen.



Abbildung 6-1
Verlauf der Netzanschlussleistung – maximaler Energieverbrauch (Winter) im Endausbau – ohne Lastoptimierung und ohne Subunternehmerleistungen

Diese ist aufgrund des bewusst einfach gehaltenen Laderegimes als obere Grenze zu betrachten. Da es in diesem Arbeitsschritt um die Dimensionierung der vorgelagerten Infrastruktur geht, wäre die Berücksichtigung eines auf Leistungsminimierung ausgelegten Lademanagements kontraproduktiv, da damit die Gefahr einer Unterdimensionierung einhergehen würde. Die Netzanschlussleistung läge in diesem Fall bei etwa 3 MVA.

Abbildung 6-2 zeigt für die gleiche Flottengröße den Verlauf der Netzanschlussleistung beim Einsatz eines Lade- bzw. Lastmanagementsystems. Dieses versucht, Ladezeiten und -leistungen innerhalb der möglichen Zeitfenster flexibel hin und her zu schieben. Damit wird in den Nachtstunden eine Reduzierung der Anschlussleistung auf

etwa 2,5 MVA erreicht. Ebenso wichtig ist die Glättung der Leistungsspitze am Vormittag, die durch die Nachladung einrückender Fahrzeuge nach der Frühspitze hervorgerufen wird.

Weitere signifikante Lastspitzenreduzierungen werden im Endausbau jedoch nur durch den Einsatz eines Pufferspeichers möglich sein.

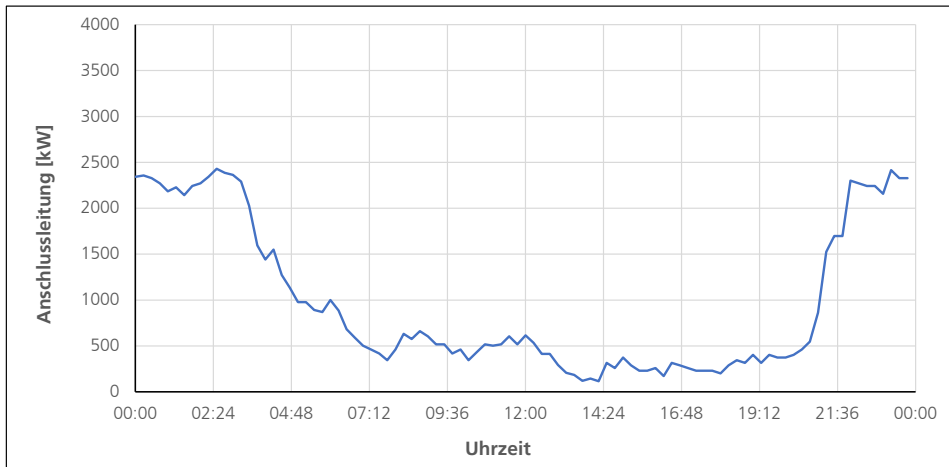


Abbildung 6-2
Verlauf der Netzanschlussleistung – maximaler Energieverbrauch (Winter) im Endausbau – mit Lastoptimierung aber ohne Subunternehmerleistungen

Bezieht man die Subunternehmerleistungen in die Betrachtungen mit ein, erhöht sich folgerichtig die Netzanschlussleistung. Ohne Lade- bzw. Lastmanagement käme es zu einer Leistungsspitze von etwa 3,8 MVA (Abbildung 6-3). Durch ein Lade- und Lastmanagement lässt sich die maximale Netzanschlussleistung auf etwa 3,4 MVA reduzieren (Abbildung 6-4).

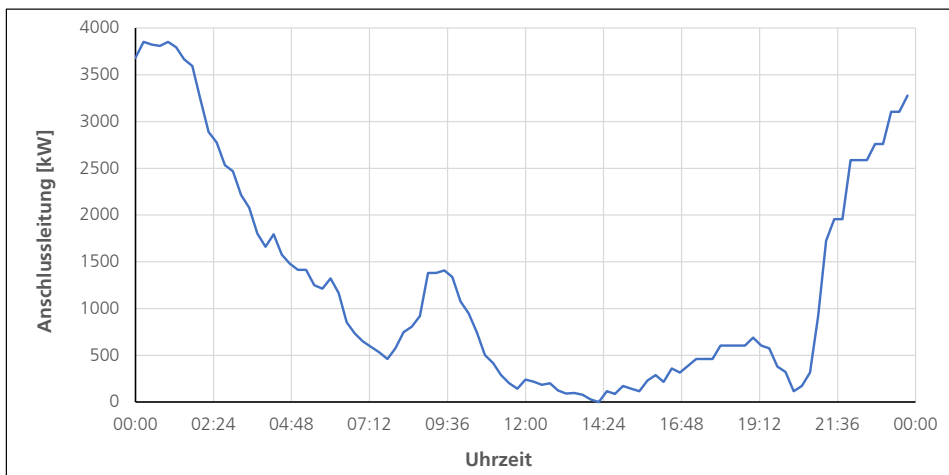


Abbildung 6-3
Verlauf der Netzanschlussleistung – maximaler Energieverbrauch (Winter) im Endausbau – ohne Lastoptimierung aber mit Subunternehmerleistungen

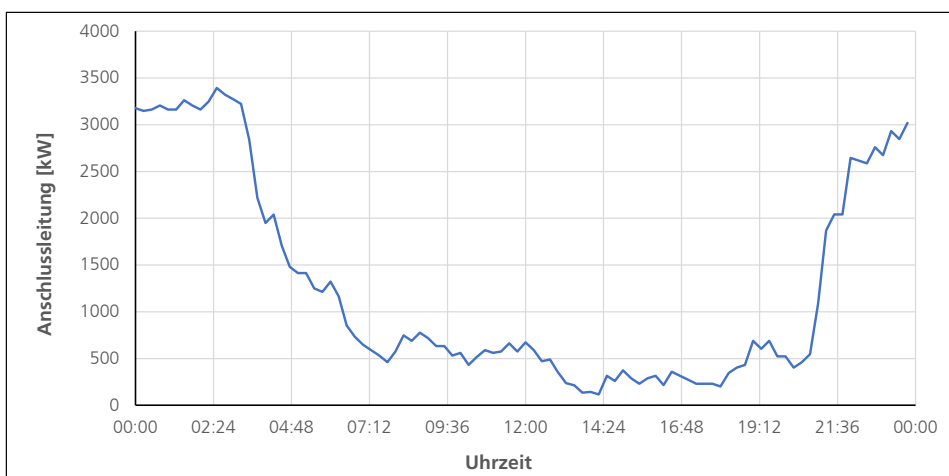


Abbildung 6-4
Verlauf der Netzanschlussleistung – maximaler Energieverbrauch (Winter) im Endausbau – mit Lastoptimierung und mit Subunternehmerleistungen

6.4 Ladezeiten

Die Zeit für die Nachladung einer Traktionsbatterie ist von mehreren Faktoren abhängig. Sie ist jedoch in einer verallgemeinerten Formel darstellbar, für deren Verständnis die nachfolgende Abbildung dienen soll. Darin ist ein typischer, wenn auch vereinfachter Verlauf der Ladeleistung in Abhängigkeit vom Ladezustand der Batterie dargestellt. Zunächst wird deutlich, dass Batterien nur im zugelassenen Ladefenster, auch als SOC-Fenster bezeichnet, nachgeladen werden. Das zugelassene SOC-Fenster hängt von der Zellchemie ab und dient dem Schutz der Batterie vor zu schneller Alterung. Daher schränken Hersteller vor dem Hintergrund zu leistender Garantien das zulässige SOC-Fenster zusätzlich ein. Als Faustregel kann man von etwa 80 % des nominellen Energieinhalts einer Batterie ausgehen.

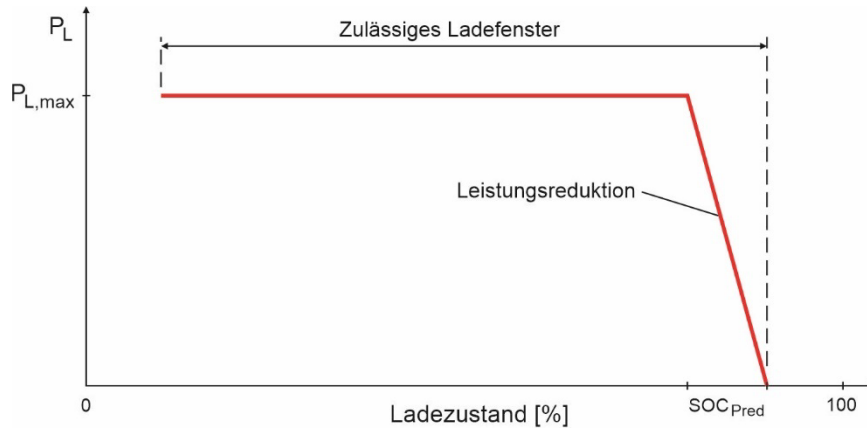


Abbildung 6-5
Verlauf der Ladeleistung über dem Ladezustand

Über einen weiten Bereich des Ladezustands kann eine Batterie mit voller Ladeleistung geladen werden. Überschreitet der Ladezustand einen bestimmten Wert (im Bereich von 75 – 85 % Ladezustand), kommt es zu einer Leistungsreduktion. Diese Vorgehensweise kann man auch bei der Nachladung von Batterien für Funktelefone oder Laptops beobachten. Oft verläuft die Leistungsreduktion nicht linear, sondern in mehreren Stufen, was aber für das grundsätzliche Verständnis ohne Belang ist.

Die Zeit für die vollständige Nachladung eines Busses t_L (angegeben in Stunden) lässt sich überschläglich und in verallgemeinerter Form mit folgender Formel berechnen:

$$t_L = \begin{cases} \frac{E_{P,max}}{P_{L,max}} + 2 \cdot \frac{E_L - E_{P,max}}{P_{L,max}} & \text{für } E_L > \frac{E_{nom}}{100} \cdot SOC_{Pred} \\ 2 \cdot \frac{E_L - E_{P,max}}{P_{L,max}} & \text{für } E_L \leq \frac{E_{nom}}{100} \cdot SOC_{Pred} \end{cases}$$

E_{nom} nomineller Batterieinhalt einer Batterie [kWh]

SOC_{Pred} SOC-Bereich mit Reduktion der Ladeleistung [%], ca. 10 %

E_L gesamte nachzuladende Energie [kWh]

$E_{P,max}$ Energie, die mit voller Ladeleistung nachgeladen werden kann [kWh] = $E_L - \frac{E_{nom}}{100} \cdot SOC_{Pred}$

$P_{L,max}$ maximale Ladeleistung, durch das Ladegerät oder die Batterie vorgegeben [kW]

Für die praktische Anwendung ist diese bereits vereinfachte Formel jedoch recht umständlich, weshalb die Ladezeit weiter vereinfacht wie folgt berechnet werden kann:

$$t_L = \frac{E_L}{P_{L,max}} \cdot 1,3$$

Nicht weniger kompliziert ist die Ermittlung der nachzuladenden Energie, da diese ebenfalls von verschiedenen Faktoren abhängt. Hierzu zählen in erster Linie die Länge eines Umlaufplans und der spezifische Energieverbrauch. Dieser ist u. a. abhängig

- vom Fahrzeugtyp,
- von der Fahrzeugauslastung,
- von den Höhenprofilen,
- von der Jahreszeit bzw. Außentemperatur sowie
- von der angestrebten Behaglichkeitskennlinie im Fahrzeug und der Heizungsform.

Da Verkehrsbetriebe ihre Einsatzplanung nicht in Abhängigkeit von der Außentemperatur bzw. der Jahreszeit vornehmen können, muss stets der energieintensivste Fall angesetzt werden. Für Halle/Saale sind dies die Wintermonate und die in Abbildung 3-1 dargestellte Temperaturverteilung.

Wie bereits im Kapitel 6.3 beschrieben, wurden für alle Ist-Umlaufpläne die notwendigen Ladezeiten unter der Annahme einer rein elektrischen Heizung, kalter Wintertage und ausreichend großen Batterien ermittelt.

6.5 Aufbau der Ladeinfrastruktur

6.5.1 Betriebshof Freimfelder Straße

Den prinzipiellen Aufbau der Ladeinfrastruktur in einem Betriebshof zeigt Abbildung 6-6. Die Ladegeräte werden über Mittelspannungstransformatoren mit 400 V Drehstrom versorgt. Bei dem eigentlichen Ladestrom handelt es sich um Gleichspannung.

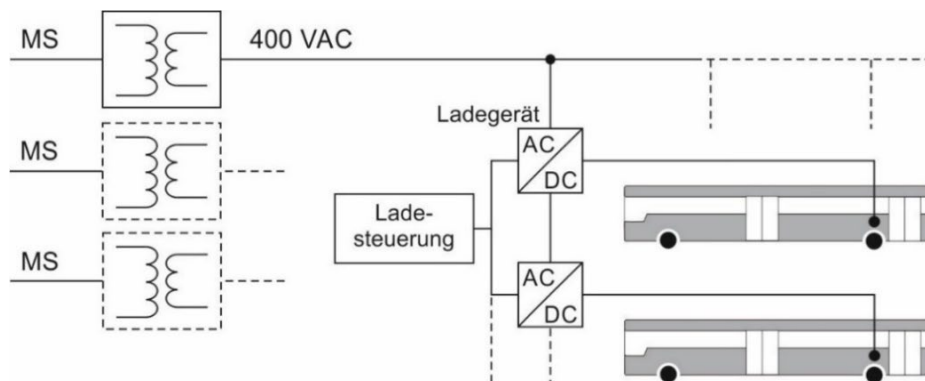


Abbildung 6-6
Prinzipieller Aufbau der Ladeinfrastruktur in einem Betriebshof

Einen Überblick über den schrittweisen Aufbau der Ladeinfrastruktur gibt Anlage 1. Dargestellt werden die Ausbaustufen für die in Tabelle 6-2 angegebenen Zeiträume.

Den Grundansatz zeigt Abbildung 6-7 beispielhaft für die Solobusse. Die Ladegeräte werden gesichert durch Anfahrtschutzvorrichtungen zwischen den Aufstellplätzen angeordnet. Um Platz zu sparen, werden in einer Flucht die Ladegeräte für jeweils zwei Aufstellspuren platziert. Dieser Ansatz setzt jedoch voraus, dass zukünftig ausschließlich Fahrzeuge mit Inlets auf beiden Fahrzeugseiten über der ersten Achse beschafft werden. Die drei bereits im Bestand befindlichen Batteriebusse können vorläufig an den bestehenden Ladepunkten weiter geladen werden. Ab Ausbaustufe 2 muss eines dieser Fahrzeuge auf eine Aufstellspur mit Lademöglichkeit auf der rechten Fahrzeugseite (z. B. die Ladepunkte 3, 4 oder 5) ausweichen. Zum Zeitpunkt des Endausbaus werden die drei Bestandsfahrzeuge voraussichtlich ohnehin ausgemustert sein.

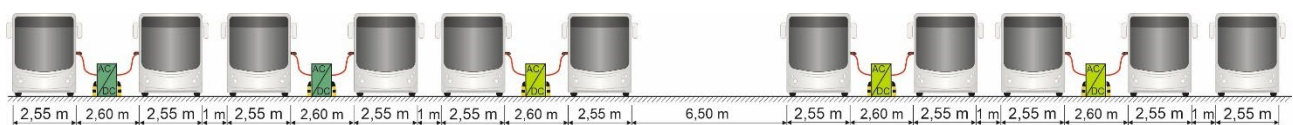


Abbildung 6-7
Aufbau der Ladeinfrastruktur im Betriebshof Freimfelder Straße – Beispiel Solobusse

Die Installation der Ladeinfrastruktur und Maßnahmen zum Brandschutz (s. Punkt 8.4) führen zu einem erheblichen Verlust an Stellflächen. Zwar können alle HAVAG-Busse weiterhin abgestellt und geladen werden, jedoch sind kaum noch Abstellreserven, auch für andere elektrische Fahrzeuge der HAVAG vorhanden.

6.5.2 Ladestationen an Endhaltestellen

Den grundsätzlichen Aufbau einer Ladestation für Gelegenheitslader zeigt Abbildung 6-8. Es ist abweichend davon der Anschluss an die Gleichspannungsversorgung der Straßenbahn möglich, jedoch liefern die meisten Hersteller nur Varianten, bei denen ein Anschluss an das Mittelspannungsnetz vorgenommen wird. Ein direkter Anschluss an das Niederspannungsnetz ist i. d. R. nicht möglich.

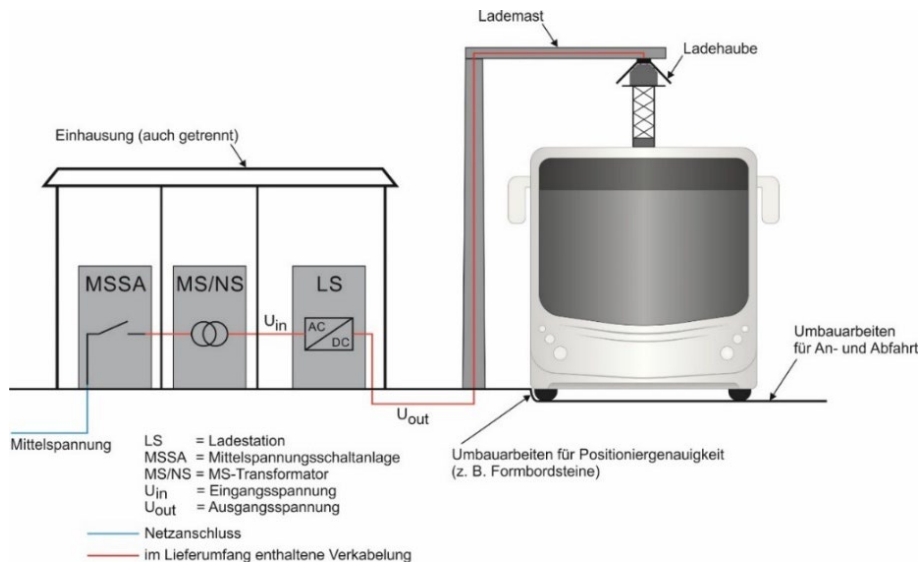
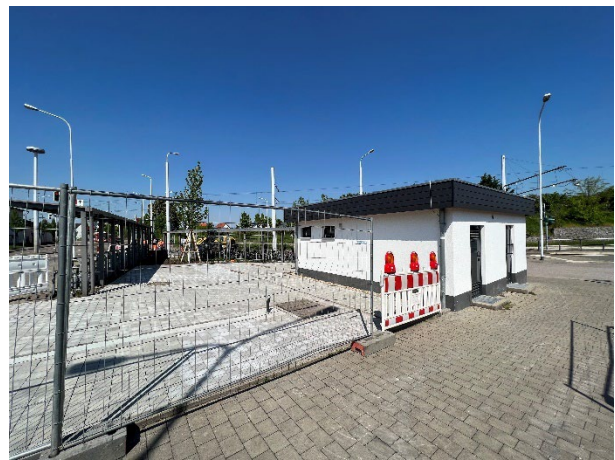


Abbildung 6-8
Prinzipieller Aufbau einer
Ladestation an einer
Endhaltestelle

Die räumlichen und baulichen Situationen an den relevanten Endhaltestellen (s. Punkt 4.2.2) gestatten die Installation der notwendigen Ladestationen. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen, dass an allen Endhaltestellen ausreichende Platzreserven vorhanden sind. Lediglich an der Endhaltestelle Südstadt ist mit einer abseitigen Installation der Einhausung samt Transformator und Ladestation und ggf. Grunderwerb zu rechnen. Für die Endhaltestelle Südpark ist mit den Eigentümern der umliegenden Flächen Einvernehmen herzustellen. Eine weitere Herausforderung stellt die Lage der Endhaltestelle unmittelbar neben einem Wohngebäude dar, da sowohl die Kontaktierungsgeräusche als auch die Lärmbelästigung durch Ventilatoren als störend empfunden werden.

Je Endhaltestelle ist aufgrund der Anzahl nachzuladender Busse mit zwei Lademöglichkeiten zu rechnen, was aus Gründen der Redundanz und der Betriebssicherheit ohnehin angezeigt ist.



Endhaltestelle Buschdorf



Endhaltestelle Heide-Universitätsklinikum



Endhaltestelle Kröllwitz



Endhaltestelle Rennbahnkreuz



Endhaltestelle Südstadt



Endhaltestelle Südpark (Bildquelle: Google Earth)

Abbildung 6-9

Endhaltestellen mit Potenzial für Ladestationen

6.6 Investitions- und Betriebskosten für die Ladeinfrastruktur

Die nachfolgend aufgeführten Kosten beruhen je Kostenposition bzw. Stückpreis auf Mittelwerten aus der Datenbank IVdat. Allerdings handelt es sich bei Batteriebusen und der zugehörigen Ladeinfrastruktur um einen gegenwärtig sehr dynamischen Markt. Ebenso ist unbekannt, wie zukünftige Preisentwicklungen aussehen werden. Es wird daher empfohlen, bei der Investitionsplanung bzw. bei der Beantragung von Fördermitteln einen Sicherheitszuschlag von 1,15 – 1,25 hinzuzurechnen, um Schwankungen nach oben abzusichern.

	Ausbaustufe 1	Ausbaustufe 2	Endausbau
Netzanschlussleistung	2,6 MVA	3,9 MVA	3,9 MVA
Baukostenzuschuss	102.500 €	102.500 €	82.000 €
Transformatorgebäude	72.200 €	5.550 €	-
Transformatoren komplett	131.350 €	95.800 €	34.550 €
MSR-Technik inkl. USV	11.350 €	11.350 €	11.350 €
MS/NS/DC-Verkabelung	140.185 €	49.958 €	7.600 €
Ladegeräte komplett ¹⁾	1.457.000 €	1.465.000 €	675.000 €
sonst. bauliche Maßnahmen	34.750 €	47.000 €	2.250 €
sonstige Kosten ²⁾	134.157 €	52.864 €	17.388 €
Lademanagement	100.000 €	50.000 €	50.000 €
Gesamt	2.083.492 €	1.830.021 €	830.138 €

¹⁾ 150 kW-Ladegerät: 70.000 € / 100 kW-Ladegerät: 65.000 € / 50-kW-Ladegerät: 50.000 €, inkl. Fundament, Errichtung, kurzem Kabel und Stecker

²⁾ HOAI-Planungskosten, Verwaltungskosten, interne Baunebenleistungen, Baustelleneinrichtung

Tabelle 6-3: Investitionskosten für die Ladeinfrastruktur im Betriebshof (gerundete Schätzwerte, Preisstand 2023, netto)

Die Investitionskosten der einzelnen Ausbaustufen in Tabelle 6-3 basieren auf dem gegenwärtig bekannten Preisstand 2023. Für die Ladeinfrastruktur im Endausbau ergeben sich Investitionskosten in Höhe von etwa 4,74 Mio. €.

Werden nicht alle Fahrzeuge auf elektrischen Antrieb umgestellt, ergeben sich folgerichtig niedrigere Kosten. Diese können jedoch nicht anhand der Fahrzeugzahl linear herunterskaliert ermittelt werden, da bestimmte Sprungkosten (z. B. Kabelgräben oder Transformatorgebäude) weitgehend unabhängig von der Anzahl der Ladegeräte sind.

Gegenwärtig existieren noch keine seriösen Datengrundlagen für die Berechnung der Betriebskosten für die Ladeinfrastruktur. Es werden daher Parallelen zu den Werten der Standardisierten Bewertung³ gezogen. Die jährlichen Wartungs- und Instandhaltungskosten werden wie folgt angesetzt:

- Kabel und bauliche Anlagen: 1,4 % / a bezogen auf die Investitionskosten

³ Standardisierte Bewertung von Verkehrsweginvestitionen des öffentlichen Personennahverkehrs

- Transformatoren: 1,4 % / a bezogen auf die Investitionskosten
- Ladegeräte / PLC-Satelliten: 2,0 % / a bezogen auf die Investitionskosten.

Daraus ergeben sich die in Tabelle 6-4 aufgeführten jährlichen Wartungs- und Instandhaltungskosten, die sich in der Endausbaustufe zu rund 81.000 €/a addieren.

Der Eigenenergieverbrauch wurde den Energieverbrauchswerten der Batteriebusse mit einem Faktor von 1,15 bereits zugeschlagen.

Für die Betreuung der Ladeinfrastruktur werden pro Jahr 250 Arbeitsstunden mit einem HAVAG-Kostensatz von 48,23 €/h angesetzt.

	Ausbaustufe 1	Ausbaustufe 2	Endausbau
MS/NS/DC-Verkabelung	1.800 €	700 €	100 €
Transformatorengebäude	1.000 €	100 €	-
Transformatoren kompl.	1.800 €	1.300 €	500 €
MSR-Technik inkl. USV	200 €	200 €	200 €
Ladegeräte komplett	29.100 €	29.300 €	13.500 €
sonst. baul. Maßnahmen	500 €	700 €	-
Gesamt	34.400 €	32.300 €	14.300 €

Tabelle 6-4: Betriebskosten für die Ladeinfrastruktur im Betriebshof (gerundete Schätzwerte)

Für eine vollständige Ausrüstung der relevanten Endhaltestellen wären die nachfolgend aufgeführten Ladestationen bzw. -möglichkeiten notwendig. Es wird von einer maximalen Ladeleistung von 300 kW ausgegangen.

Die Investitionskosten können in Abhängigkeit von den örtlichen Gegebenheiten und den Anschlussbedingungen erheblich schwanken, weshalb die in Tabelle 6-5 angegebenen Kosten nur als Richtwerte anzusehen sind. Für die Endhaltestelle Kröllwitz wurden nur die Kosten für die Erweiterung der bestehenden Anlage um eine weitere Lademöglichkeit angesetzt.

Endhaltestelle	Anzahl Lademöglichkeiten	Kosten
Kröllwitz	2	130.000 €
Heide-Universitätsklinikum	2	350.000 €
Rennbahnkreuz	2	350.000 €
Südstadt	2	380.000 €
Büschdorf	2	350.000 €

Tabelle 6-5: Ladestationen and Endhaltestellen und deren Kosten (gerundete Schätzwerte, Preisstand 2023, netto)

Ohne Berücksichtigung der Eigenverbräuche fallen als Betriebskosten jährlich etwa 26.500 €. Hinzu kommen zusätzlich rund 100 Arbeitsstunden zu je 48,23 € für die Betreuung der Ladestationen.

6.7 Ergänzende Anmerkungen

Neben Straßenbahnen und Linienbussen verfügt die HAVAG noch über eine Reihe weiterer Nutzfahrzeuge, die über den Betriebshof verteilt abgestellt werden. Zwar sind diese Fahrzeuge gegenwärtig noch nicht oder in deutlich geringerem Maße von den Vorgaben des Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetzes betroffen, jedoch muss davon ausgegangen werden, dass diese Fahrzeuge zukünftig auch mit emissionsfreien Antrieben ausgerüstet sein werden.

Werden diese Fahrzeuge auf Batterieantrieb umgestellt, wäre eine Verteilung der Ladeinfrastruktur auf die gegenwärtigen Standorte der benannten Fahrzeuge aufgrund der Kabelanbindung an die Transformatorstation nicht nur überproportional teuer, sondern wäre auch mit unnötigen Leitungsverlusten verbunden. Zwar ist dies nicht Gegenstand der vorliegenden Studie, jedoch wird empfohlen, die Zusammenfassung des HAVAG-Nutzfahrzeugparks auf einer gemeinsamen Fläche zu prüfen. Eine geeignete Erweiterungsfläche nördlich des aktuellen Busabstellplatzes wird im Punkt 8.1 im Zusammenhang mit der Werkstatturnrüstung beschrieben.

6.8 Planungs-, Dispositions- und Überwachungssysteme

Die Einführung von Batteriebusen setzt Ergänzungen der Planungs-, Dispositions- und Überwachungssysteme eines Verkehrsbetriebes voraus. Diese müssen wesentliche Spezifika von Batteriebusen, namentlich

- deren eingeschränkte Reichweite,
- der sog. Reichweitenangst im Fahrbetrieb sowie
- ihre Abhängigkeit von einer Ladeinfrastruktur

berücksichtigen

Für das Verständnis der nachfolgenden Ausführungen ist es notwendig, einige technische und organisatorische Zusammenhänge beim Laden von Batteriebusen näher zu erläutern.

Zusammenspiel zwischen Fahrzeug und Ladegerät bzw. Ladestation

Grundsätzlich gilt, dass das Fahrzeug, genaugenommen das Batteriemanagementsystem den Ladevorgang steuert. Dies gilt sowohl für die Initialisierung eines Ladevorgangs als auch für die Ladeleistung (gesteuert über den Ladestrom). Ebenso geht die Initiative für die Vorkonditionierung und deren Steuerung vom Fahrzeug aus. Hierfür wurde mit der ISO 15118 ein Standard entwickelt, der die Kommunikation zwischen einem Fahrzeug und einem Ladegerät regelt. Nach anfänglichen Kommunikationsproblemen ist zunehmend ein gutes Funktionieren dieses Zusammenspiels herstellerübergreifend zu beobachten. Trotzdem sollte man bei der Planung der Inbetriebnahme von einem Abstimmungsbedarf ausgehen.

Um einen Ladevorgang oder die Vorkonditionierung beginnen zu können, benötigt das Fahrzeug einen „Hinweis“ durch Dritte. Im einfachsten Fall erfolgt dies durch die physische Verbindung des Fahrzeugs mit z. B. einem Ladegerät. Ob dabei eine zusätzliche Tasterbetätigung im Fahrzeug erfolgen muss oder das Einstecken des Steckers (Plug & Charge) ausreicht, ist ohne Belang. Für den Start der Vorkonditionierung oder beim Einsatz eines die Anschlussleistung minimierenden Lademanagements, ist es unpraktisch, z. B. die Ladung manuell am Fahrzeug zu starten. Für diese Fälle muss das Fahrzeug durch z. B. das Lademanagementsystem zu einer Handlung aufgefordert werden. Hierfür wurden in der VDV-Schrift 261 Empfehlungen für die Anbindung der Batteriebusse an ein dispositives Backend (Lademanagementsystem) erarbeitet, die als Ergänzung zur ISO 15118 sog. Value Added Services (VAS) für die o. g. Aufgaben definieren. Der Datenaustausch kann dabei direkt zwischen dem Backend und dem Fahrzeug oder über ein angeschlossenes Ladegerät erfolgen.

Zusammengefasst ist es notwendig, bei der Beschaffung auf die Kompatibilität der Fahrzeuge und der Ladegeräte mit der ISO 15118 und der VDV-Schrift 261 zu achten. Ebenso muss geklärt werden, wie das zu beschaffende Fahrzeug vom Backend „kontaktiert“ werden kann.

Zusammenspiel zwischen Lademanagementsystem und der Ladeinfrastruktur

Die Kommunikation zwischen einem Lademanagementsystem (Backend) und einzelnen Ladegeräten bzw. Ladestationen ist im OCPP-Standard geregelt. OCPP steht dabei für Open Charge Point Protocol. Bei der Beschaffung der Ladegeräte ist somit auf deren Kompatibilität mit dem OCPP-Standard, möglichst in dessen aktueller Version 2.0 zu achten.

Zusammenspiel zwischen Lademanagementsystem und vorgelagerten Systemen

Ein Lademanagementsystem benötigt vom ITCS und dem Betriebshofmanagementsystem Informationen zum Einsatz der Fahrzeuge (s. u.). Für die Vereinheitlichung des Datenaustauschs zwischen einem Lademanagementsystem und dem vorgelagerten Betriebshofmanagementsystem bzw. dem ITCS wurde daher die VDV-Schrift 463 entwickelt. In dieser Schrift werden folgende Anwendungsfälle definiert:

- Umlaufdisposition und Weitergabe der Ladeanforderung durch die vorgelagerten Systeme ITCS und BMS an das Lademanagementsystem inkl. Neuanforderung (bei Fahrzeugrückkehr) und Neuanforderungen (bei dispositiven Änderungen)
- Anforderungen von Vorkonditionierungen durch die vorgelagerten Systeme an das Lademanagementsystem
- Übergabe von Informationen zu Lade- und Vorkonditionierungsprozessen vom Lademanagementsystem an die vorgelagerten Systeme
- Übergabe von Informationen zum aktuellen Status der angeschlossenen Ladegeräte und -stationen vom Lademanagementsystem an die vorgelagerten Systeme.

Einen Überblick über die Erweiterung der bestehenden Planungs-, Dispositions- und Überwachungssysteme gibt die nachfolgende Darstellung.

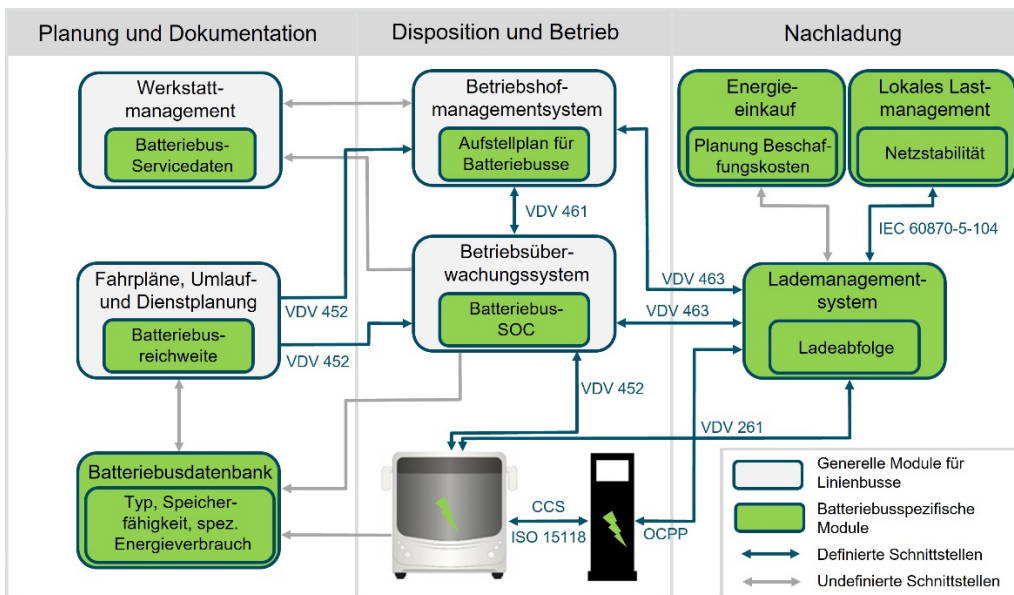


Abbildung 6-10 Überblick über die Planungs-, Dispositions- und Überwachungssysteme beim Einsatz von Batteriebussen

Die Planungs-, Dispositions- und Überwachungssysteme sind beim Einsatz von Batteriebussen ergänzend zu den Planungs-, Überwachungs- und Betriebs Hofmanagementsystemen um folgende Funktionen zu erweitern:

1. Lademanagementsystem

Lademanagementsysteme vereinigen fünf Funktionalitäten.

- a. Übergeordnetes Ziel ist die Sicherstellung einer pünktlichen Nachladung der Batteriebusse vor ihrer Vorkonditionierung bzw. vor Beginn ihrer Einsatzfahrt. Hierzu verwenden Lademanagementsysteme folgende Informationen:
 - Fahrzeugkennung je Abstell- bzw. Ladeplatz
 - Fahrzeugdaten (mind. nutzbarer Energieinhalt der Batterie und maximale Ladeleistung, ergänzend Historiendaten zum spezifischen Energieverbrauch in kWh/km und Wetterinformationen)
 - Geplanter Abfahrtszeitpunkt des einem Abstellplatz zugeordneten Fahrzeugs
 - ergänzende Angaben zur geplanten Fahraufgabe (Umlaufplan)
 - Ladezustand der Batterie (SOC – State of Charge)

Vereinfacht ausgedrückt ermittelt das Lademanagementsystem den notwendigen Zeitraum und die notwendige Ladeleistung für die Nachladung der Batterie, wobei zwei Strategien möglich sind:

- Vollständige Nachladung der Batterie
- Nachladung der Batterie nur insofern, wie die anstehende Fahraufgabe dies erfordert.

Insbesondere für die Nachladung über Nacht wird das Ziel der vollständigen Nachladung der Batterie dominieren. Eine Teilaufladung kommt insb. dann in Betracht, wenn Fahrzeuge tagsüber nachgeladen und Tageszeiten mit Hochlastpreisen weitgehend vermieden werden sollen.

- b. Dem Lademanagement ebenfalls zugeordnet wird die Vorkonditionierung von Fahrzeugen rechtzeitig vor ihrer Einsatzfahrt. Je nach Außentemperatur sind hierfür 15 bis etwa 45 min notwendig. Die hierfür notwendige Energie wird dabei von den Ladegeräten bereitgestellt, um den Ladezustand der Batterien nicht schon vor einem Umlaufplan herabzusetzen.
- c. Eine nachgeordnete Aufgabe besteht in der Minimierung der vom Mittelspannungsnetz bezogenen Leistung, um den zu zahlenden Leistungspreis zu minimieren. Hierbei versucht das Lademanagement unter Beachtung der zuvor beschriebenen Ziele die Ladezeiten und Ladeleistungen so zu verteilen, dass die gesamte Leistungsanforderung der Ladegeräte minimal wird. Einen quantitativen Eindruck für das Beispiel der HAVAG gibt Abbildung 6-2 im Vergleich mit Abbildung 6-1.

- d. Lademanagementsysteme überwachen den Zustand der Ladeinfrastruktur, also die Einsatzbereitschaft von Ladegeräten und -stationen und melden diesen an das vorgelagerte Betriebshofmanagementsystem.
- e. Obwohl Ladeabbrüche oder das Laden mit zu geringer Leistung zunehmend seltener auftreten, kann man in der Konfiguration der IT-Landschaft nicht davon ausgehen, dass Ladevorgänge stets ohne Unterbrechung vollständig im alleinigen Zusammenspiel zwischen Ladegerät und Fahrzeug ausgeführt werden. Die Überwachung von Ladevorgängen und damit einhergehend von Ladezuständen (SOC) ist daher eine Grundvoraussetzung für die Fahrzeugdisposition und ggf. die Einleitung von Maßnahmen bei Ladeabbrüchen. Beide Funktionen können in das Lademanagementsystem integriert sein. Kommt z. B. aufgrund der Flottengröße kein Lademanagementsystem zum Einsatz, sollten die genannten Funktionen separat installiert werden. Hierfür bieten sowohl die Bushersteller als auch die Lieferanten von Ladeinfrastruktur separate Lösungen an.

2. Fahrzeugüberwachung im Betrieb

Es wird empfohlen, das bestehende Betriebsüberwachungssystem um Warnmeldungen über niedrige Ladezustände von Batterien in Fahrzeugen, die sich aktuell im Linieneinsatz befinden, zu ergänzen. Hierbei besteht die Möglichkeit einer dauerhaften Anzeige der Ladezustände aller im Einsatz befindlicher Fahrzeuge oder die Beschränkung auf Warnungen. Je nach Gesamtarchitektur der Systeme können die Meldungen über das Lademanagementsystem oder direkt über den ITCS-Datenaustausch erfolgen. In jedem Fall sind die Bushersteller zur Bereitstellung der Daten zu verpflichten.

3. Fahrzeugdatenbank

Für die Einsatz- und Umlaufplanung ist es notwendig, für jedes einzelne Fahrzeug den spezifischen Energieverbrauch sowie die Restkapazität der Batterie zu kennen. Aus diesen Daten müssen Rückschlüsse auf die maximal noch mögliche Reichweite gezogen werden, die mit zunehmendem Batteriealter abnimmt. Nur so ist es bei der Einsatzplanung möglich, Fahrzeuge einem passenden Umlaufplan zuzuordnen bzw. die Umlaufplanung an die Möglichkeiten der Flotte anzupassen. Dies gilt nicht nur für große Flotten mit Fahrzeugen mehrerer Hersteller, sondern auch für kleine, weitgehend homogene Flotten.

4. Optimierung der Energieeinkaufs

Sobald zeitabhängige Stromtarife verstärkt Einzug gehalten haben, wird die Optimierung des Energieeinkaufs eine größere Rolle einnehmen. Hierbei geht es im Zusammenspiel mit dem Lademanagementsystem um die Vermeidung von Hochlastpreisen. Hierbei handelt es sich jedoch um eine zeitlich nachgelagerte Funktion.

5. Anpassung des Werkstattmanagementsystems

Bei der Anpassung des Werkstattmanagementsystems (sofern vorhanden) sind batteriebusstypische Wartungsarbeiten und Prüfungen zu beachten. Hinweise hierzu werden abschließend bei der Fahrzeugbeschaffung durch die Hersteller bereitgestellt.

6. Einführung eines Ladeinfrastrukturmanagementsystems

Die eigentliche Überwachung der Funktionsfähigkeit der Ladeinfrastruktur für dispositive Zwecke ist Teil des Lademanagementsystems. Ziel eines Ladeinfrastrukturmanagementsystems ist vordergründig die Sicherstellung und Dokumentation von Wartungsarbeiten sowie die Dokumentation von Reparaturarbeiten inkl. Fehlerdokumentation.

Hersteller von Planungs-, Betriebshofmanagement- und Betriebsüberwachungssystemen bieten inzwischen Ergänzungen zu den klassischen Funktionen an. Hierzu gehört insb. das Lademanagementsystem mit unterschiedlichen Funktionalitäten.

Für einen Verkehrsbetrieb bedeutet dies, die bestehenden Systeme um die notwendigen Funktionalitäten bzw. weitere Systeme zu erweitern. Hierfür wird folgende Vorgehensweise empfohlen:

1. Definition der batteriebusstypischen Ziele und Anforderungen an die benannten Systeme unter Beachtung der Flottengröße. Mindestanforderungen sind:
 - Zustandsüberwachung der Ladeinfrastruktur (Funktionsfähigkeit der Ladegeräte)
 - Ladezustandsüberwachung während und nach der Ladung

- Fehlermeldungen bei Unregelmäßigkeiten während der Ladung (z. B. Ladeabbrüche)
- 2. Anfrage beim Hersteller der gegenwärtig genutzten Planungs-, Überwachungs- und Dispositionsprogramme hinsichtlich deren Erweiterung
- 3. Abstimmung mit den Systemanbietern bzgl. der notwendigen Daten, Datenformate und Schnittstellen für die Einrichtung der benannten Funktionen und Systeme. Hierbei sollten auch die hausinternen IT-Verantwortlichen einbezogen werden.
- 4. Übernahme der Daten von 3. in Ausschreibungsunterlagen (Lastenheft) für Busse und Ladegeräte. Um hierbei keine nicht erfüllbaren Musskriterien zu formulieren, empfiehlt es sich, vorab mit Herstellern sog. Industriedialogveranstaltungen durchzuführen. Als Alternative besteht natürlich auch die Möglichkeit, statt Muss- sog. Sollkriterien zu formulieren und die Schnittstellen- und Datenformatbeschreibung im Nachgang, z. B. in den technischen Gesprächen durchzuführen.
- 5. Ausschreibung von Lademanagementsystem
- 6. Beschaffung ergänzender Funktionen für die bestehenden Planungs-, Betriebshofmanagement- und Betriebsüberwachungssysteme.

7 Wasserstoffverbrauch und Tankinfrastruktur

Alle nachfolgenden Überlegungen gehen wiederum von einer vollständigen Umstellung des HAVAG-Fuhrparks auf Brennstoffzellenbusse aus.

7.1 Wasserstoffverbrauch

Den Jahresverbrauch an Wasserstoff sowie den Tagesspitzenbedarf zeigt die nachfolgende Tabelle. Neben dem Wasserstoffverbrauch finden sich auch Angaben zum Elektroenergieverbrauch der Tankstelle wieder. Dieser liegt bei etwa 3 kWh / kg H₂ und summiert sich auf rund 825 MWh pro Jahr.

	Max. Tages-H ₂ - Verbrauch [kg/d]	Jahres-H ₂ -Verbrauch [kg/a]	Jahres-Energie- verbrauch [kWh]
Planmäßig ohne zusätzliche Leerkilometer	1.270	32.550 169.750 71.050	820.000
Zus. Leerkilometer	10	- 425 1.550	5.900

Tabelle 7-1: Wasserstoffverbrauch (gerundete ca.-Angaben) – Klein- / Solo- / Gelenkbusse

Für das Vertanken der jährlich rund 275 t Wasserstoff sind zwei unabhängig voneinander betreibbare Tankvorrichtungen (Dispenser) zu installieren. Wasserstoffvorrat mit ausreichendem Überströmdruck ist nach der folgenden Formel vorzuhalten:

$$H_{2,res} = d \cdot n_{Bus} \cdot H_{2,ver} \cdot SF$$

mit

$H_{2,res}$ vorzuhaltender Wasserstoff [kg]

d Anzahl der Tage ohne H₂-Produktion bzw. Anlieferung (mind. zwei Tage)

n_{Bus} Anzahl der täglich zu betankenden Busse

$H_{2,ver}$ pro Betriebstag verbrauchter Wasserstoff (Tabelle 7-1)

SF Sicherheitszuschlag (z. B. 1,2)

Unabhängig von der Wahl der Wasserstoffversorgung ist stets eine Vorratslagerung (empfohlen für zwei Tage) sowie eine Betankungsanlage notwendig. Für die HAVAG ergibt sich eine empfohlene Vorratshaltung von etwa 3.000 kg Wasserstoff.

7.2 Tankinfrastruktur auf dem Betriebshof

Die Betankung von Fahrzeugen mit Wasserstoff ist aufgrund der fortgeschrittenen Technik für Nutzer vergleichbar einfach und so sicher wie die Betankung mit Flüssigkraftstoffen.



Abbildung 7-1
Zapfpistole für Wasserstoff
(Quellen: bisenergytoday.com /
deutschlandfunkkultur.de)

Für die Betankung eines Brennstoffzellenbusses werden je nach Tankgröße und Restwasserstoffgehalt etwa 10 – 12 min benötigt, wobei eine schnelle Betankung eine Kommunikation zwischen Fahrzeug und Betankungsanlage voraussetzt. Die Kommunikation zwischen der Betankungsanlage und den Fahrzeugen ist in den Normen SAE J2799 und das Betankungsprotokoll in SAE J2601 geregelt.

Die möglichen Varianten für den Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur auf den Busbetriebshöfen zeigt Abbildung 7-2. Für die HAVAG kommen aufgrund der Flottengröße nur die Varianten

- Anlieferung von komprimiertem Wasserstoff in Trailern (GH₂-Trailer) und
- Vor-Ort-Erzeugung

in Frage.

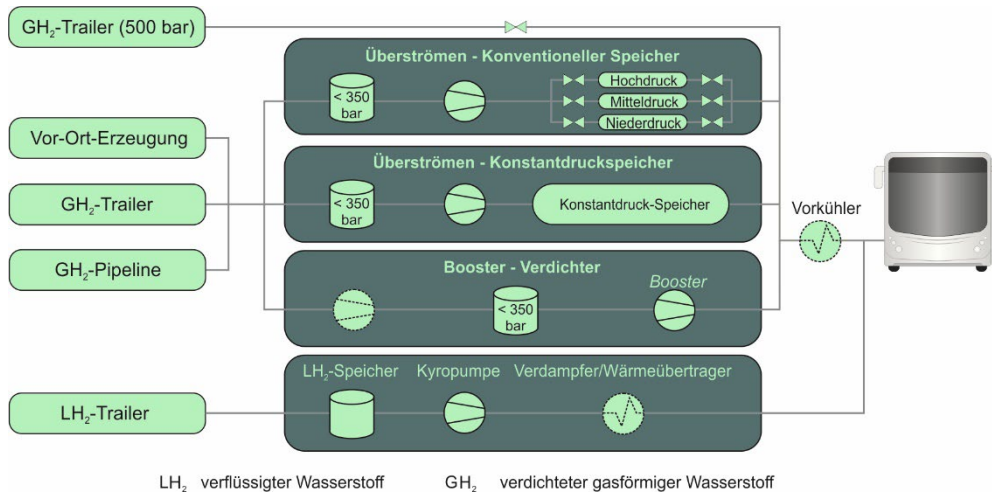


Abbildung 7-2
Varianten für den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur (Quelle: Sphera)

Bei der Anlieferung von Wasserstoff in Trailern werden diese entweder direkt an die Tankanlage angeschlossen oder der Wasserstoff wird über verschiedene Druckstufen für die Überleitung in die Druckgasbehälter der Fahrzeuge zwischengelagert. Zu beachten ist, dass sich die Trailer (mind. 2 Stk.) im Besitz des Abnehmers (in diesem Fall HAVAG) befinden und von einem Logistikunternehmen zum Transport und die Zwischenlagerung von Wasserstoff verwendet werden. Andere Liefermodelle, z. B. Pay-Fuel-Verträge sehen hingegen vor, dass sich die Trailer im Besitz des Lieferanten befinden.

Die Eigenerzeugung vor Ort setzt eine ausreichend dimensionierte und redundant aufgebaute Systemlandschaft, bestehend aus Elektrolyseuren zusätzlichen Verdichtern und Druckgasbehältern voraus.

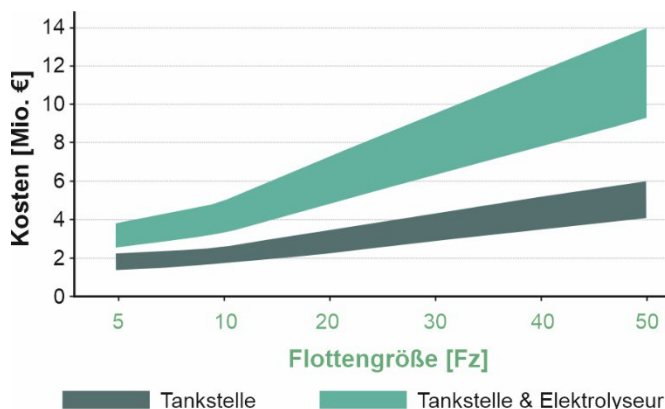


Abbildung 7-3
Kosten einer Wasserstoffinfrastruktur (Quelle: Sphera)

Die Kosten für die reine Betankung von Brennstoffzellenbussen betragen rund 4,3 – 4,8 Mio. € für 50 Busse (Abbildung 7-3). Dieser Wert kann jedoch nicht beliebig nach unten skaliert werden, wodurch für eine Grundausstattung zur Betankung weniger Busse mit ca. 1,8 – 2,0 Mio. € gerechnet werden muss. Hinzu kommen umfangreiche Anforderungen an die Wartung und Kontrolle der Tankanlage. Die damit verbundenen jährlichen Wartungs- und Instandhaltungskosten belaufen sich auf etwa 5 % der Investitionskosten, in Summe also rund 225.000 €. Für die Trailer sind zusammen Kosten von rund 300.000 € anzusetzen.

Zusätzlich werden für die Betreuung der Tankinfrastruktur pro Jahr ebenfalls 250 Arbeitsstunden mit einem Kostensatz von 48,23 €/h angesetzt.

Ähnlich verhält es sich mit den Kosten für eine Anlage zur Wasserstoffherzeugung. Auch hier fallen aufgrund der hohen Sprungkosten bereits für wenige Busse Kosten in Höhe von etwa 3,0 – 3,5 Mio. € an. Für 50 Busse belaufen sich die Kosten zusammen mit der Tankanlage auf ca. 10 Mio. €.

Die Komponenten einer Wasserstofftankinfrastruktur können in Betriebshöfen aus technischer Sicht flexibel jedoch nach Möglichkeit im Freien angeordnet werden (Aufstellung in Containern). Der Flächenbedarf ergibt sich aus folgenden Einzelkomponenten:

- Komponenten der eigentlichen Tankstelle (Verdichter, Speicher, Dispenser etc.)
- mindestens zwei Stellplätze für Trailer bei einem Anlieferkonzept für eine reibungslose Wasserstoffversorgung
- Sicherheitsabstände je nach Komponenten zwischen 3 – 5 Metern, welche sich durch geeignete Maßnahmen (z. B. Schutzwände, Poller etc.) reduzieren lassen
- Vorrichtungen zum Anfahrschutz.

Zu beachten ist, dass für die Sicherheitsabstände i. d. R. keine benachbarten Grundstücke und insb. keine angrenzenden Verkehrsflächen in Anspruch genommen werden können. Einen Überblick über den Flächenbedarf der Wasserstoffinfrastruktur in Abhängigkeit von der Flottengröße gibt die nachfolgende Abbildung (Richtwerte). Inkl. Schutzabstände ist von einem Flächenbedarf von ca. 600 m² bei der Anlieferung von Wasserstoff auszugehen.

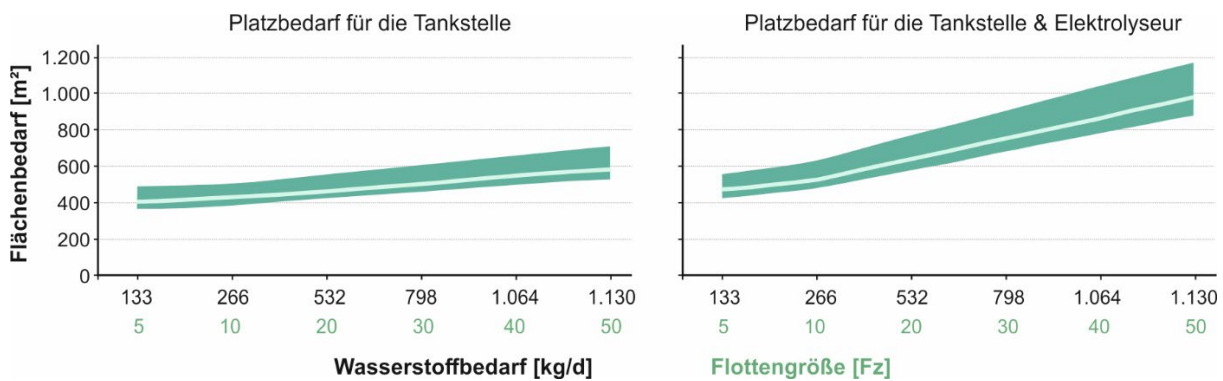


Abbildung 7-4
Platzbedarf einer Wasserstoffinfrastruktur (Quelle: Sphera)

Geeignete Standorte für die Wasserstofftankinfrastruktur sind im Bestandsgelände der HAVAG im Betriebshof Freimfelder Straße nicht vorhanden.

7.3 Betankung bei Dritten

Insbesondere in der Übergangsphase zwischen Diesel- und Brennstoffzellenantrieben ist es von Vorteil, die Busse an Wasserstofftankstellen Dritter zu betanken. Daher wurde unter Einbeziehung entsprechender Informationsplattformen geprüft, ob es in oder um Halle/Saale herum Möglichkeiten zur Betankung von Brennstoffzellenbussen gibt.

Unabhängig von der Tatsache, dass Brennstoffzellenbusse u. a. aufgrund der unterschiedlichen Normdrücke in den fahrzeugseitigen Druckgasbehältern i. d. R. nicht an Wasserstofftankstellen für Pkw tanken können, existiert in akzeptabler Entfernung zum HAVAG-Bedienungsgebiet derzeit nur eine Möglichkeit, Wasserstoff für mobile Anwendungen zu tanken. Die von der Firma H2 Mobility betriebene Tankstelle befindet sich in der Blücherstraße. Laut Auskunft der Betreiberfirma ist eine Betankung von Nutzfahrzeugen mit 350 bar-Druckgasbehältern nicht möglich. Planungen für die Errichtung einer für Nutzfahrzeuge geeigneten Tankstelle in Halle/Saale oder Umgebung existieren bei der Betreiberfirma nicht.

8 Werkstattausrüstung, Schulungen und Brandschutz

8.1 Werkstattausrüstung für Batteriebusse

Gemäß VDV-Schrift 822⁴ ist bei Werkstätten und Abstellanlagen eine Hallentorhöhe von 4,00 m zur Berücksichtigung von Fahrzeugen mit höheren Dachaufbauten vorzusehen. Wird diese Einfahrtshöhe eingehalten, können sie auch von Batterie- oder Brennstoffzellenbussen passiert werden. Gemäß der seitens der HAVAG übersandten Pläne beträgt die lichte Höhe der Werkstatthallentore 4,15 m.

Für Arbeitsstände in Werkstätten sind gemäß VDV-Schrift 822 Rastermaße für das längste Fahrzeug (HAVAG: Gelenkbusse mit 18 m Länge) zzgl. vier Meter anzusetzen. Die Nettolänge der HAVAG-Werkstatthalle beträgt etwa 34 m. Somit ist es nicht möglich, gleichzeitig zwei Gelenkbusse hintereinander aufzustellen. Ein Gelenk- und ein Solobus können hingegen hintereinander aufgestellt werden. Erschwerend kommt hinzu, dass der Rollenprüfstand auf der mittleren Spur so platziert ist, dass bei seiner Belegung kein weiteres Fahrzeug auf dieser Spur gewartet oder repariert werden kann (Abbildung 8-1).



Abbildung 8-1
Rollenprüfstand

Der seitliche Abstand zwischen den Achsen von zwei nebeneinanderliegenden Arbeitsständen ist gemäß VDV-Schrift 822 mit sechs Metern zu bemessen. Zwischen der Achse eines Arbeitsstandes und festen Wänden soll der Abstand 3,60 m nicht unterschreiten. In der Werkstatthalle der HAVAG sind drei Spuren auf einer Gesamtbreite von etwa 12,5 m angeordnet. Laut der benannten VDV-Schrift wäre für diese drei nebeneinander angeordneten Spuren eine Breite von 19,20 m notwendig. Die ohnehin zu geringe Breite der Werkstatthalle, die nur ein beengtes Arbeiten zulässt, macht den Aufbau eines Dacharbeitsstandes (s. u.) unmöglich.



Abbildung 8-2
Seitliche Abstände
bei der Belegung
der linken Spur

⁴ VDV-Schrift 822 – Richtlinie für den Bau von Omnibusbetriebshöfen, 09/2016

Hinzu kommt, dass die Belegung der linken Spur aufgrund der dann verbleibenden seitlichen Abstände aus Sicht des Arbeitsschutzes (Fluchtwege) zumindest fragwürdig ist (Abbildung 8-2). Ähnlich beengt sind die Verhältnisse auf der rechten Spur (Abbildung 8-3).



Abbildung 8-3
Seitliche Abstände
bei der Belegung
der linken Spur

Arbeitsstände in Werkstätten für Linienbusse werden gemäß VDV-Schrift 822 unterschieden in

- bodenebene Fahrzeugstandplätze mit bedarfsgerechter Minimalausstattung,
- Arbeitsstände mit Bodengrube,
- Arbeitsstände mit Dacharbeitsplatz und
- Arbeitsstände mit Hebevorrichtung.

Werden Prüfungen durch das Verkehrsunternehmen durchgeführt, ist ein Prüfstand mit folgender Ausrüstung vorzusehen:

- Arbeitsgrube mit Heber (HAVAG: 2 Arbeitsgruben mit Heber, davon 1 x Prüfstand)
- Bremsenprüfstand – Rollenprüfstand, unabhängig von übrigen Arbeitsständen und jederzeit zugänglich, auch für Prüfung der Fahrtengeräte nutzbar (HAVAG: regulärer Arbeitsstand auf der mittleren Spur)
- AU-Prüfgeräte (HAVAG: stehen seitlich in der Halle, was bei Prüfungen zu einer Teilblockade der linken Spur führt)
- Druckluftprüfgeräte (vorhanden)
- Prüfplatz für Beleuchtungseinrichtungen (Scheinwerferprüfrichtlinie, vorhanden).

Aus Lärmschutzgründen sollte der Prüfplatz für Abgasuntersuchung separiert von den übrigen Arbeitsständen angeordnet werden. Dies ist in der Werkstatthalle der HAVAG nicht gegeben.

Die benannte VDV-Schrift enthält Empfehlungen für die Anzahl von Arbeitsständen in Abhängigkeit von der Flottengröße. Rechnet man zu den 40 Bestandsfahrzeugen der HAVAG

- die Fahrzeuge für die Erbringung der Subunternehmerleistungen,
- eine etwas höhere Fahrzeugreserve aufgrund einer neuen und noch nicht ausgereiften Antriebstechnologie sowie
- einen Zuwachs von 10 % aufgrund weiterer Fahrplanleistungen

hinzu, ist für die Auslegung der Werkstatt eine Flottengröße von 50 Fahrzeugen anzusetzen. Dazu kommen noch etwa 15 Lastkraftwagen, 22 Transporter und 17 Pkw, die ebenfalls in der Werkstatt betreut werden.

Laut der benannten VDV-Schrift wären für 50 Busse sechs Arbeitsstände vorzusehen:

- 1 Arbeitsstand für die Fahrzeugversorgung (in der Werkstatt)
- 1 Fahrzeugstand für die Fahrzeugwäsche (bei der HAVAG separat neben der Busabstellung angeordnet)
- 1 Bremsenprüfstand mit Arbeitsgrube
- 1 Arbeitsstand für Karosserie- und Lackierarbeiten (Karosserie in Werkstatt, Lackierung im Lackierstand der Straßenbahnen)
- 2 Arbeitsstände für Instandsetzungsarbeiten.

Die VDV-Schrift 825⁵ sieht keine grundsätzliche Separierung zwischen elektrisch angetriebenen Bussen und Dieselsebussen vor. Ebenso wird die Anzahl der Arbeitsstände gegenüber der VDV-Schrift 822 weder erhöht noch verringert. Bei Arbeiten an Hochvoltanlagen ist das betreffende Fahrzeug jedoch mit geeigneten Absperrmaterialien gegen Berührung durch Dritte zu sichern. Dies ist aufgrund der zu geringen seitlichen Platzreserven in der HAVAG-Werkstatthalle nur sehr eingeschränkt möglich.

Um die übrigen Fahrzeuge zu berücksichtigen, werden neben dem Fahrzeugstand für die Fahrzeugwäsche sechs Arbeitsstände in drei Spuren für schwere Nutzfahrzeuge vorgesehen. Davon werden zwei hintereinanderliegende Arbeitsstände mit einer Grube ausgestattet. Eine weitere Spur wird für Pkw und Transporter vorgesehen, jedoch wird diese in der Breite so dimensioniert, dass auch schwere Nutzfahrzeuge aufgestellt werden können.

Aufgrund der größeren Anzahl an Dachaufbauten wird beim Betrieb von Batteriebussen die Installation eines Dacharbeitsstandes empfohlen. Dieser sollte die gesamte Länge des längsten Busses abdecken, vorzugshalber auf beiden Seiten. Über der Arbeits- und Lauffläche des Dacharbeitsstandes ist eine lichte Höhe von 2,10 m vorzusehen. Setzt man die Höhe der Dachoberkante mit etwa drei Metern an, ergibt sich eine lichte Höhe von mindestens 5,10 m. Die Breite der Lauffläche muss mindestens 90 cm betragen. Zwischen der Konstruktion des Dacharbeitsplatzes und einfahrenden Bussen muss bis zu einer Höhe von zwei Metern ein beidseitiger Sicherheitsabstand von jeweils 0,5 m eingehalten werden.

Ergänzt wird der Dacharbeitsstand durch eine Krananlage. Diese ist so auszulegen, dass einzelne Batteriepacks gehoben und verfahren werden können. Das Gewicht von Batteriepacks schwankt von Hersteller zu Hersteller. Eine Traglast von 750 kg ist jedoch ausreichend. Für Dacharbeitsstände samt Krananlage und Anschlagmittel ist mit Kosten in Höhe von etwa 275.000 € zu rechnen.

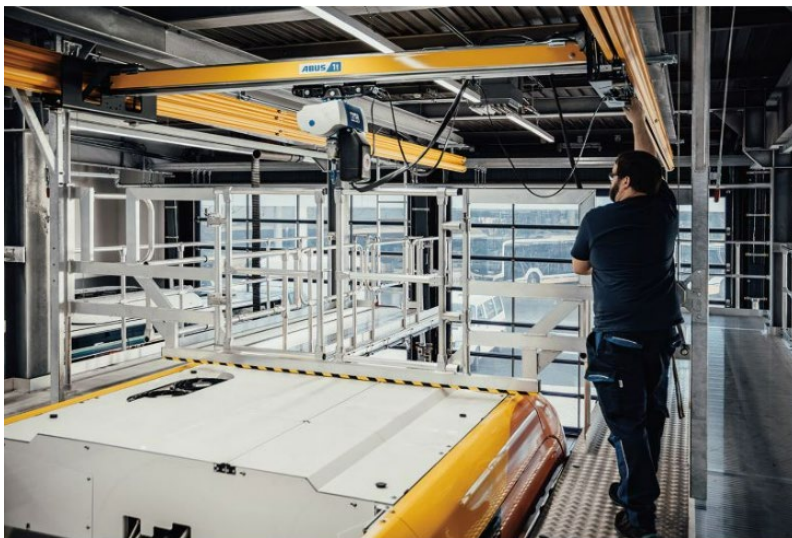


Abbildung 8-4
Dacharbeitsstand samt Portalkran
(Quelle: Krause-Werke)

Die Werkstatthalle der HAVAG ist nicht für die Installation eines Dacharbeitsstandes und schon gar nicht für den Einbau eines Portalkranes geeignet, da weder in der Fläche und insb. nicht in der Höhe ausreichende Platzreserven vorhanden sind. Selbst für die Installation eines mobilen Dacharbeitsplatzes und eines mobilen Portalkranes reichen die vorhandenen Höhen und seitlichen Flächenreserven nicht aus.

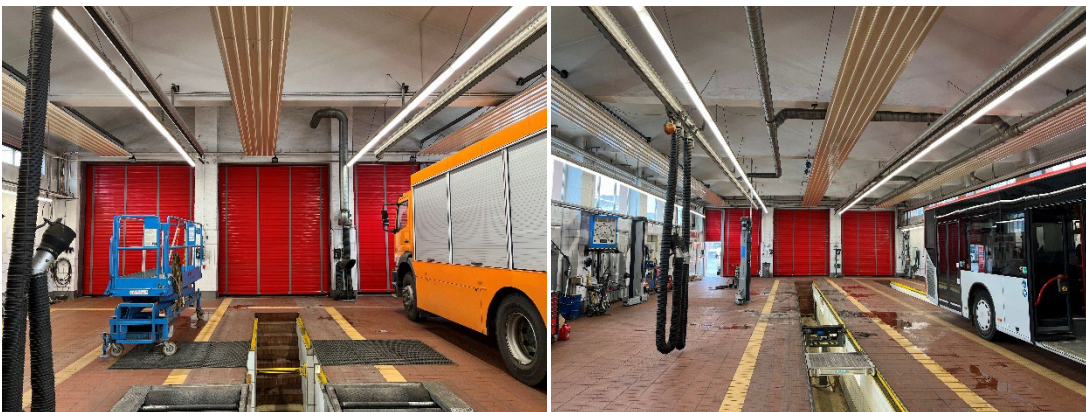


Abbildung 8-5
Werkstatthalle
der HAVAG

⁵ VDV-Schrift 825 – Auswirkungen der „Clean Vehicles Directive“ im Linienbus auf Betriebshöfe und Werkstätten, 11/2020

Die HAVAG betreibt gegenwärtig bereits drei Batteriebusse mit dachseitig montierten Pantographen. Gemäß Vorgeben des Herstellers EvoBus dürfen Arbeiten an den Pantographen nur vorgenommen werden, wenn über dem Fahrzeugdach eine lichte Höhe von mindestens 2,6 m gegeben ist. Wie in Abbildung 8-5 unschwer zu erkennen ist, sind die geforderten Sicherheitsräume über den Bussen nicht vorhanden.

Die HAVAG beabsichtigt nach eigenem Bekunden, Reparaturen an Hochvoltkomponenten inkl. Batterien perspektivisch selbst vorzunehmen. Hierfür ist ein separater Raum vorzusehen, der in den Nebenräumen der HAVAG-Werkstatt gegenwärtig nicht vorhanden ist. Mithin wäre die Auslagerung dieser Arbeiten in die Straßenbahnwerkstätten notwendig, was Arbeitsabläufe unnötig erschweren würde.



Abbildung 8-6
Frontansicht der HAVAG-Kfz-Werkstatt

Fasst man die aufgeführten Fakten zusammen, ist eine Erweiterung der Kfz-Werkstatt auf dem Betriebsgelände der HAVAG nahezu unumgänglich. Dies betrifft insbesondere die Breite und Höhe der Werkstatthalle, idealerweise aber auch deren Länge, um zwei Gelenkbusse hintereinander aufstellen zu können. In Abbildung 8-6 wird jedoch deutlich, dass zwischen der Werkstatt und der Grundstücksgrenze keine Platzreserven vorhanden sind. Auf der anderen Seite der Werkstatt befindet sich eine für die HAVAG-Betriebsabläufe wichtige Umfahrungsstraße. Damit wäre de facto ein Komplettneubau an einer anderen Stelle notwendig.

Wird seitens der HAVAG ein Werkstattneubau in Betracht gezogen, so sollte dieser in der unmittelbaren Nähe zur Busabstellfläche vorgenommen werden. Dadurch werden auch die beträchtlichen Wege zwischen der Busabstellfläche und der Kfz-Werkstatt reduziert. Da auch in diesem Bereich des Betriebshofes praktisch keine Flächenreserven zur Verfügung stehen, bleibt als Erweiterungsfläche nur die in Abbildung 8-7 gekennzeichnete Kleingartenanlage übrig.



Abbildung 8-7
Mögliche Erweiterungsfläche des HAVAG-Betriebshofes Freimfelder Straße; Bildquelle: Google Earth

Eine Nutzung der gekennzeichneten Fläche ist darüber hinaus aus folgenden Gründen dringend angezeigt:

- Durch zusätzliche Abstellflächen können bei der Fahrzeugabstellung mehr Brandabschnitte vorgesehen werden, wodurch das Risiko bei Fahrzeugbränden verringern werden würde. Siehe hierzu auch Punkt 8.4

(Brandschutz). Die Anzahl der Batteriebusse je Brandabschnitt könnten dann auf ein für die HAVAG akzeptables Maß reduziert werden.

- Die zusätzlichen Flächen würden die Zusammenfassung der Ladeinfrastruktur für alle HAVAG-Nutzfahrzeuge ermöglichen (s. Punkt 6.7).
- Steht für die Fahrzeugabstellung mehr Fläche zur Verfügung, kann der Standort der Transformatorstation zentral zwischen den Stellplätzen der Busse und anderer Nutzfahrzeuge gewählt werden. Dadurch käme es zu einer deutlichen Reduzierung der Verluste in den Niederspannungskabeln zwischen den Transformatoren und den Ladegeräten.

Einen groben Überblick über die Gestaltung der Ladeinfrastruktur sowie den Neubau der Buswerkstatt unter Einbeziehung der o. g. Erweiterungsfläche gibt Anlage 2.

Unabhängig vom Standort der HAVAG-Kfz-Werkstatt sind für die Werkstattausrüstung der HAVAG die nachfolgend aufgeführten antriebsspezifischen Werkzeuge und persönlichen Schutzausrüstungen vorzusehen. Die Kosten in Tabelle 8-1 summieren sich für eine Erstausrüstung auf rund 283.000 €. Hinzu kommen Maßnahmen zur Löschwasserrückhaltung in Höhe von geschätzten 250.000 €.

Bezeichnung	Anzahl	Vorhanden?	Kosten
Isolierte Spezialwerkzeuge	2	nein	800 €
Zweipolige Spannungsprüfer gemäß DIN EN 61243-3	2	nein	300 €
Messgeräte für Isolations- und Potenzialausgleichsmessungen	1	nein	2.800 €
Laptop für Diagnosezwecke inkl. Software	2	ja	-
Wärmebildkamera	1	nein	850 €
Persönliche Schutzausrüstung gemäß DIN EN 1149	8	nein	1.050 €
Schutzhandschuhe nach DIN EN 60903	8	nein	300 €
Gesichtsschutz nach DIN EN 166	2	nein	250 €
Defibrillator	1	nein	1.400 €
Transporthilfe für schwere Komponenten	1	ja	-
Abspermaterialien	1	ja	-
Mobiles Werkstattladegerät	1	80 kW	-
Dacharbeitsplatz samt Portalkran (750 kg Traglast, 4,5 m Höhe) inkl. Anschlagmittel	1	nein	275.000 €
Absperrschieber zur Löschwasserrückhaltung			250.000 €

Tabelle 8-1: Werkstattausrüstung für Batteriebusse (Preisstand 2023, netto)

Für den Umgang mit Hochvoltbatterien wird folgendes Regime empfohlen:

- keine dauerhafte Lagerung von Ersatzbatterien, um einen Wertverlust durch kalendarische Alterung zu vermeiden
- Austausch von Batterien oder Modulen durch Hersteller inkl. kurzfristiger Lagerung in Transportbehältern, perspektivisch durch HAVAG
- Verbleib von ggf. mechanisch beschädigten Batterien im Unfallfahrzeug auf gesonderter Aufstellfläche bis zur Fahrzeugreparatur oder dessen Abtransport
- Verbleib von thermisch oder anderweitig auffälligen Batterien im Fahrzeug auf gesonderter Aufstellfläche bis zur Fahrzeugreparatur oder dessen Abtransport.

Sollte eine längere Lagerung gewünscht sein, ist der Aufbau eines Batterie-Sicherheitscontainers, wie in Abbildung 8-8 dargestellt, notwendig. Diese dürfen grundsätzlich im Innenbereich aufgestellt werden, jedoch wird aus Sicherheitsgründen eine Außenaufstellung empfohlen.

Die Kosten eines Sicherheitscontainers für die Lagerung von Batteriemodulen auf bis zu drei Euro-Paletten beläuft sich auf etwa 19.500 € (klimatisiert ca. 35.000 €) zzgl. der Kosten für einen Elektroanschluss.



Abbildung 8-8
Sicherheitscontainer für die
Lagerung von Hochvoltbatterien
(Quelle: PROTECTO)

Verunfallte Batteriebusse müssen bei einer starken mechanischen Beeinträchtigung auf einer separaten Abstellfläche im Freien (Quarantäneplatz) abgestellt werden, bis das Schadensbild an der Batterie geklärt bzw. diese ausgetauscht oder repariert wurde. Gleiches gilt für Fahrzeuge mit thermisch oder anderweitig auffälligen Batterien. Hinsichtlich der Abmaße existieren unterschiedliche Vorgaben. Als vernünftiger Kompromiss ist die Vorgabe in der VDV-Schrift 825 anzusehen, die um die Fahrzeuge herum eine Abstandsfläche von 5,5 m vorsieht. Die HAVAG hat bereits einen Quarantäneplatz eingerichtet. Mit einer Breite von 3,65 ist es notwendig, bei einem abgestellten Fahrzeug die nebenliegende Fahrstraße teilweise zu sperren. Neben dem bereits eingerichteten Quarantäneplatz befindet sich eine Löschwasserzisterne. Bei der Verlängerung des Quarantäneplatzes für Gelenkbatteriebusse ist darauf zu achten, den in Abbildung 8-9 zu erkennenden Löschwasseranschluss nicht zu blockieren.



Abbildung 8-9
Quarantäneplatz im HAVAG-
Betriebshof

Eine Forderung für Quarantäneplätze ist die Möglichkeit, Löschwasser zurückhalten zu können. Der Einbau einer Auffangvorrichtung für den Bestandsplatz wird nicht als angemessen angesehen. Bei der Erweiterung der Betriebshoffläche ist die Quarantänefläche entsprechend der normativen Vorgaben vorzusehen. Als Übergangslösung sind Absperrschieber in der Kanalisation zu prüfen.

8.2 Werkstattausrüstung für Brennstoffzellenbusse

8.2.1 Sicherheitsaspekte

Von Brennstoffzellenbussen geht bei richtigem Umgang keine größere Gefahr als von Dieselnissen aus. Wesentliche Gefahrenquellen sind

- austretender Wasserstoff mit Bildung eines ausreichend großen und explosionsfähigen Luft-Gas-Gemischs,
- das sehr selten zu beobachtende Bersten eines unter Druck stehenden Wasserstofftanks sowie
- spannungsführende Teile der Hochvolt-Anlage.

Abgestellte Wasserstoffbusse ohne Schädigung an gasführenden Bauteilen sowie Fahrzeuge, an denen Arbeiten an nicht gasführenden Bauteilen vorgenommen werden, gelten als betriebsmäßig dicht. Trotzdem ist aufgrund der Anforderungen der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) für Werkstätten und Abstellhallen eine Gefährdungsbeurteilung erforderlich. Darin eingeschlossen ist eine Beurteilung der explosionsgefährdeten Bereiche. Zwar besitzt ein Verkehrsunternehmen bei der Erstellung von Explosionsschutzdokumenten weiten Spielraum, jedoch sollten sowohl Abstellhallen als auch Werkstätten mit folgenden Ausstattungsmerkmalen versehen werden:

- sichere Entlüftung an den höchsten Stellen einer Werkstatt bzw. einer Abstellhalle zur Vermeidung von explosionsfähigen Luft-Wasserstoff-Gemischen
- Installation von Wasserstoffsensoren mit einer Warnanlage und einer Zwangslüftung, zumindest im Werkstattbereich
- Vermeidung von Zündquellen in Bereichen, in denen baubedingt die Bildung von explosionsfähigen Luft-Wasserstoff-Gemischen nicht ausgeschlossen werden kann.

Besondere Anforderungen bestehen bei Arbeiten an Fahrzeugen, nicht nur an gasführenden Bauteilen sowie nach Unfällen, insb. dann, wenn das Schadensbild an gasführenden Bauteilen nicht genau bekannt ist. Hierzu wird auf die BGI 5108 „Wasserstoffsicherheit in Werkstätten“ der BG Bahnen verwiesen.

8.2.2 Umbaumaßnahmen Wasserstoff

Brennstoffzellenbusse stellen besondere Anforderungen an Werkstätten, um die Bildung eines explosionsfähigen Gas-Luft-Gemischs (primärer Explosionsschutz) bzw. dessen Zündung (sekundärer Explosionsschutz) zu verhindern. Aufgrund seiner geringen Dichte steigt Wasserstoff sehr schnell nach oben und sammelt sich innerhalb geschlossener Räume an deren höchster Stelle.



Abbildung 8-10
Dachdetails in der HAVAG-Kfz-
Werkstatt

Die Eignung der HAVAG-Kfz-Werkstatt für Reparaturen an Brennstoffzellenbussen, zumindest an gasführenden Anlagen, ist nur sehr eingeschränkt gegeben. Zwar gibt es in der Werkstatthalle definierte höchste Punkte, jedoch eine sich bildenden Gas-Luft-Gemisch nicht nach außen entweichen, da die Oberlichter weiter unten angeordnet sind und nicht mit geeigneter Stelltechnik ausgerüstet sind (Abbildung 8-10).

Erschwerend kommt hinzu, dass die montierten Heizungen und Beleuchtungseinrichtungen nicht explosionsgeschützt sind und die Separierung eines Hallenteils für Arbeiten an gasführenden Teilen nicht möglich ist. Daher ist für die gesamte Werkstatthalle ein primärer Explosionsschutz (Verhinderung eines zündfähigen Luft-Wasserstoff-Gemischs) notwendig. Durch die Separierung der Hallendachkonstruktion in 8 Abschnitte mittels massiver Querbinder hat dies eine aufwändige Ausrüstung mit Wasserstoffsensoren zur Folge. Eine Übersicht über die mit einem Umbau verbundenen Kosten gibt Tabelle 8-2. Es ergeben sich Investitionskosten von rund 50.000 €. Hinzu kommen jährliche Wartungs- und Instandhaltungskosten, die mit 1,5 % der Investitionssumme für die H₂-Sensoren und die ATEX-Stelltechnik, also 450 € angesetzt werden.

Einbringung einer Gasprallwand in Höhe Oberkante Oberlichter	15.000
Nachrüstung ATEX-Stelltechnik	9.500
H ₂ -Sensoren inkl. Anlage	20.000
Gesamt	49.500

Tabelle 8-2: Umbaukosten für Fahrzeugabstellhallen und die Werkstatt
– gerundete ca.-Werte [€]

8.2.3 Werkstattausstattung

Für Brennstoffzellenbusse ist die gleiche Werkstattausrüstung wie für Batteriebusse notwendig (abzüglich Ladegeräte), da der technische Aufbau dem von Batteriebussen, die mit einer zusätzlichen Energieerzeugung ausgestattet sind, ähnelt. Für die Ausrüstung der Werkstatt wurden zusätzlich mobile Gasprüf- bzw. -warngeräte inkl. Ladestation sowie Lecksuchspray und weitere Verbrauchsmittel für zusammen etwa 1.750 € angesetzt.

8.3 Schulungskosten

Für die Ermittlung der Schulungskosten ist zwischen zu schulenden bzw. zu sensibilisierenden Personenkreisen sowie zwischen Hochvolt-Schulungen sowie fahrzeugspezifischen Schulungen zu unterscheiden.

Ein Schulungskonzept für den Umgang mit Fahrzeugen mit Hochvoltanlage zeigt Tabelle 8-3. Dieses besteht aus drei Stufen mit insgesamt sieben Unterstufen, die sich jeweils auf die auszuübenden Tätigkeiten beziehen.

Stufe	Fahren		Service		Wartung, Instandhaltung und Reparatur			
	A		B		C			
Unterstufe	A	B 1	B 2		C 1	C 2	C 3	C 4
Tätigkeiten an nicht HV-eigensicheren Bussen	Fahrer, Verkehrsfunkwagen, Mitarbeiter Leitstelle	Busse reinigen, Werbung	Busse bergen, abschleppen		nichtelektrotechnische Arbeiten (Service und mechanische Arbeiten)	Elektrotechnische Arbeiten im spannungsfreien Zustand	Arbeiten unter Spannung bei Fehlersuche und Prüfarbeiten	Übernahme der Unternehmensverantwortung
Sensibilisierung	X	X	X		X	X	X	X
Unterweisung	X		X		X	X	X	X
Schulung	X				X	X	X	X
Schulung durch	Schulungsleiter und Teamleiter	Teamleiter o. ä.	Teamleiter o. ä.		Schulungsleiter	Schulungsleiter	Schulungsleiter	Schulungsleiter
Anzahl Mitarbeiter		extern	9		9 ¹⁾	7	4	1

¹⁾ Schulung bereits erfolgt

Tabelle 8-3: Notwendige Schulungen und Schulungsumfang für den Betrieb von Bussen mit Hochvoltanlage

Für die Fahrpersonalschulung wurden alle Personen mit einer Busfahrberechtigung eingerechnet, wobei es sich hierbei um unterteilte Schulungen handelt. Zuerst wird der allgemeine Umgang mit Hochvoltanlagen vermittelt. In einem zweiten Schritt wird das Fahrpersonal nach dem Train-the-Trainer-Prinzip an den Fahrzeugen geschult.

Position	Anzahl Personal	Dauer	Stunden-/ Tagessatz	Gesamtkosten
Personalkosten Fahrer/Dispatcher	119	4 h	20,86 €/h	9.929 €
Kosten Schulungsleiter HV	-	5 d	1.600 €/d	8.000 €

Tabelle 8-4: Schulungskosten Fahrpersonal für den Umgang mit Hochvoltanlagen in Bussen (A und B2) – gerundet

Position	Anzahl Teamleiter / Fahrer	Dauer	Stundensatz	Gesamtkosten
Personalkosten für Schulung Teamleiter durch Hersteller	12	8 h	20,86 €/h	2.003 €
Schulungskosten durch Hersteller				ca. 3.000 €
Personalkosten Teamleiter o. ä.	je 10 Fahrer	4 h	20,86 €/h	918 €
Personalkosten Fahrer	109	4 h	20,86 €/h	9.095 €
Kosten für drei Fahrzeugtypen				ca. 40.800 €

Tabelle 8-5: Schulungskosten Fahrpersonal für den Umgang mit den Bussen (A und B2) – gerundet

Für die Stufe B1 wurde eine Sensibilisierung durch einen Teamleiter in einem Termin mit einer Dauer von anderthalb Stunden unterstellt. Die Kosten für externes Reinigungspersonal wurden entsprechend des übermittelten Verrechnungssatzes berücksichtigt.

Position	Anzahl Teamleiter / Externe	Dauer	Stundensatz	Gesamtkosten
Personalkosten Teamleiter o. ä.	1	1,5 h	20,86 €/h	31 €
Personalkosten Reinigung	5	1,5	35,10	263 €

Tabelle 8-6: Kosten für Sensibilisierung von Reinigungspersonal und Externen für den Umgang mit den Bussen (B1) – gerundet

Die nachfolgenden Tabellen beschreiben die notwendigen Schulungsmaßnahmen, die die Stufe C2 bis C3 umfassen. Die Schulungskosten für die Stufe C4 liegen unter 1.000 €.

Position	Anzahl Werkstattmitarbeiter	Dauer	Stunden- / Tagessatz	Gesamtkosten
Personalkosten Werkstattmitarbeiter	7	40 h	22,88 €/h	6.406 €
Kosten Schulungsleiter HV	-	5 d	2.200 €/d	11.000 €

Tabelle 8-7: Schulungskosten Werkstattpersonal für den Umgang mit Hochvoltanlagen in Bussen (C2) – gerundet

Position	Anzahl Werkstattmitarbeiter	Dauer	Stunden- / Tagessatz	Gesamtkosten
Personalkosten Werkstattmitarbeiter	4	8 h	22,88 €/h	732 €
Kosten Schulungsleiter HV	-	1 d	2.200 €/d	2.200 €

Tabelle 8-8: Schulungskosten Werkstattpersonal für den Umgang mit Hochvoltanlagen in Bussen (C3) – gerundet

Position	Anzahl Werkstattmitarbeiter	Dauer	Stunden- / Tagessatz	Gesamtkosten
Personalkosten Werkstattmitarbeiter	9	35 h	22,88 €/h	7.207 €
Kosten Schulungsleiter Hersteller	1	2 x 5 d	-	ca. 30.000 €
Kosten für drei Fahrzeugtypen				ca. 111.621 €

Tabelle 8-9: Fahrzeugspezifische Schulungskosten für das Werkstattpersonal – gerundet

Kosten und Dauer von fahrzeugspezifischen Schulungen durch Hersteller unterliegen enormen Schwankungen, weshalb die Kosten in Tabelle 8-9 als grobe Schätzungen zu betrachten sind.

Die Kosten beinhalten

- Personalkosten für die Zeit der Schulungen,
- Kosten für den Schulungsleiter sowie
- Kosten für Schulungsunterlagen.

Insgesamt fallen Schulungskosten in Höhe von etwa 207.000 € an, wenn man von drei Fahrzeugtypen ausgeht. Davon werden alle Kosten in Höhe von 152.400 €, die auf busspezifische Schulungen entfallen als einmalige Kosten betrachtet. 54.600 € werden pauschal als aller fünf Jahre wiederkehrende Kosten angesetzt.

Für den Umgang mit Brennstoffzellenbussen fallen die gleichen Hochvolt-bezogenen Schulungsmaßnahmen wie für Batteriebusse an. Ergänzend ist eine Schulung für den Umgang mit Gasanlagen (Tabelle 8-10) in Höhe von rund 4.800 € erforderlich. Die Kosten werden pauschal aller fünf Jahre wiederkehrend angesetzt.

Position	Anzahl Werkstattmitarbeiter	Dauer	Stunden- / Tagessatz	Gesamtkosten
Personalkosten Werkstattmitarbeiter	9	8 h	22,88 €/h	1.647 €
Kosten Schulungsleiter Gasanlagen	1	2 x 1 d	1.600 €/d	3.200 €

Tabelle 8-10: Schulungskosten Werkstattpersonal für den Umgang mit Gasanlagen

8.4 Brandschutz

In der Fachwelt herrscht weitgehend Einigkeit darüber, dass Batterie- und Brennstoffzellenbusse nicht häufiger brennen werden als Dieselbusse. Im Gegenteil wird sogar unisono davon ausgegangen, dass aufgrund der fehlenden Hauptursachen für Dieselbusbrände (Überhitzungen im Motorbereich und Leckagen von Diesel- und Ölleitungen) weniger Brände zu verzeichnen sein werden. Konsens herrscht jedoch auch darüber, dass die Intensität von Bränden größer und deren Beherrschbarkeit geringer sein wird. Hinzu kommt, dass die Brandschäden aufgrund der deutlich teureren Fahrzeuge höher anzusetzen sind.

Das Thema Brandschutz für Batterie- und Brennstoffzellenbusse ist bis auf geforderte bauliche Maßnahmen der maßgebenden Bauordnungen und die Vorgaben zum Explosionsschutz weitgehend unreguliert und in vielerlei Hinsicht auch Neuland für alle Beteiligten.

Weitgehend Konsens herrscht gegenwärtig darüber, dass einmal in Brand geratene Batterie- oder Brennstoffzellenbusse aufgrund der hohen Brandlast der Batterien so gut wie nicht löschar sind und das Übergreifen auf andere Busse kaum verhindert werden kann. Sprinkler- bzw. Anlagen zur Wassernebelherzeugung können mithin nur einen Beitrag leisten, entstehende Überhitzungen der Batterien, sog. Thermal Runaways, durch massive Kühlung zu verzögern, um eine Evakuierung anderer Fahrzeuge vornehmen zu können.

Folgende bauliche Maßnahmen, für die es jedoch keine gesetzlichen Forderungen oder Normen gibt, werden gegenwärtig diskutiert:

1. Freiluftabstellung!

2. Untergliederung der Busabstellung in einzelne Brandabschnitte, wobei die Größe der Brandabschnitte durch jeden Verkehrsbetrieb individuell festzulegen ist. Bei der Festlegung sollte sich jeder Verkehrsbetrieb darüber im Klaren sein, dass Busse eines Brandabschnittes bei Bränden in einem Bus nur schwer zu retten sein werden.
3. Abtrennung der Brandabschnitte durch Mauern und/oder durch Abstand.
4. Führung von Kabelwegen außerhalb der Hauptbrandlastbereiche.
5. Aufstellung von Ladegeräten und Transformatoren außerhalb von Gebäuden.
6. Errichtung von Not-Aus-Ringen zur Abschaltung der gesamten Ladeinfrastruktur in Brandfällen oder sonstigen Notsituationen.
7. Unterteilung von Werkstätten in Brandabschnitte.
8. Eine Branderkennung außerhalb von Batterien hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Eingriffsmöglichkeiten durch Mitarbeiter oder Einsatzkräfte im betroffenen Brandabschnitt. Wärmedetektoren neigen zudem in Sommer bei erhitzten Fahrzeugdächern zu Fehldetektionen.
9. Insb. von Umweltbehörden und Feuerwehren ist bekannt, dass diese gesonderte Auffangbecken für Löschwasser, zumindest aber Absperrventile in der Abwasserleitung fordern, um ein Eindringen von Löschwasser in die Kanalisation zu verhindern. Hierfür gibt es nach Wissen des Autors jedoch keine explizite gesetzliche bzw. normative Vorgabe.

Wie bereits erwähnt, ist die Unterteilung der Abstellflächen für Batterie- oder Brennstoffzellenbusse in einzelne Brandabschnitte ein wirksames Mittel zur Risikominimierung. Genaugenommen geht es dabei um die Minimierung von Brandfolgen bzw. des Schadensmaßes. In einer Publikation des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherer zusammen mit dem VDV⁶ werden Hinweise auf die Größe von Brandabschnitten bzw. auf die in einem Brandabschnitt abzustellende Fahrzeugzahl gegeben. Die in der Publikation genannten 20 Busse je Brandabschnitt sind jedoch für die HAVAG nicht anwendbar, da die Folgen auf die Betriebsabläufe bei einem Verlust dieser Fahrzeuge gravierend wären. Daher wurde versucht, kleiner Brandabschnitte bei der Fahrzeugabstellung zu definieren, was aber aufgrund der beengten Verhältnisse und dem zusätzlichen Platzbedarf für die Ladeinfrastruktur nur sehr eingeschränkt möglich ist. Insgesamt wurden sechs Brandabschnitte durch Abstand bzw. die Installation einer vier Meter hohen Mauer (Feuerwiderstandsklasse 60) vorgesehen. Notwendig wären jedoch eine zusätzliche Unterteilung der Ladeplätze 1 – 17 sowie größere Abstände zwischen der Abstellfläche der Gelenkbusse und umliegenden Abstellplätzen. Dies lässt sich jedoch nur durch die Einbeziehung der Erweiterungsfläche umsetzen.

Aufgrund der hohen energetischen Dichte von Batterien und der darin verbauten Materialien sind Batteriebusbrände sehr heiß und intensiv. Dadurch kann es zu einer Beschädigung von Betonflächen unter den Fahrzeugen kommen. Um eine Beschädigung von Kabeln im Brandfall zu minimieren, werden zumindest die Hauptkabeltrassen so geführt, dass sie nicht direkt unter abgestellten Fahrzeugen hindurchführen.

Es wurden für jeden Brandabschnitt separate Not-Aus-Ringe für eine komplette Spannungsfreisaltung vorgesehen und die der Kostenermittlung berücksichtigt.

Neben üblichen Brandschutzmaßnahmen sind folgende organisatorische Maßnahmen vorzusehen:

1. Absprachen mit Feuerwehren, Versicherungen und zuständigen Baubehörden.
2. Einbindung der Ladeinfrastruktur in die Feueralarmkette, um alle Ladegeräte im Brandfall sofort automatisch spannungsfrei zu schalten.
3. Forderung nach einer permanenten Überwachung der Energiespeicher bei eingeschalteten bzw. geladenen Fahrzeugen an die Fahrzeughersteller und Etablierung einer Meldekette beim Auftreten von Anomalien. Im ausgeschalteten Zustand sollte mind. alle 30 min eine Überprüfung durch „Aufwecken“ der Fahrzeuge erfolgen.
4. Einbindung der Feuerwehr in die Meldekette.
5. Etablierung betriebsinterner Rettungspläne, die insb. auf die Evakuierung von abgestellten Fahrzeugen unter Beachtung des Eigenschutzes abzielen.
6. Überprüfung der Löschwasserversorgung aus vorhandenen Hydranten: Zielgröße: 192 m³/h.

⁶ VdS Schadenverhütung GmbH, VdS 0825 – Brandschutz in Betriebshöfen für Linienbusse, 03/2023

8.5 Alternative Standorte

8.5.1 Betriebshof Rosengarten

Aufgrund der beengten Verhältnisse auf der vorhandenen Fläche des Betriebshofs Freimfelder Straße wurde parallel geprüft, inwieweit eine Verlagerung der Batteriebusflotte in den Betriebshof Rosengarten möglich wäre. Wie Abbildung 8-11 zeigt, stehen maximal etwa 7.200 m² Fläche zur Verfügung, wobei weitere Einschränkungen durch z. B. einen Löschwasserteich bestehen. Diese Fläche ist kleiner als die derzeit im Betriebshof Freimfelder Straße zur Verfügung stehende Abstellfläche, wodurch nur eine Teilverlagerung möglich wäre. Dadurch wären Teile der Ladeinfrastruktur (Transformatoren, Netzanschluss, Verkabelung) doppelt vorzunehmen. Des Weiteren sprechen das Fehlen der Buswerkstatt und verkomplizierte Betriebsabläufe gegen eine Nutzung des Betriebshofs Rosengarten.

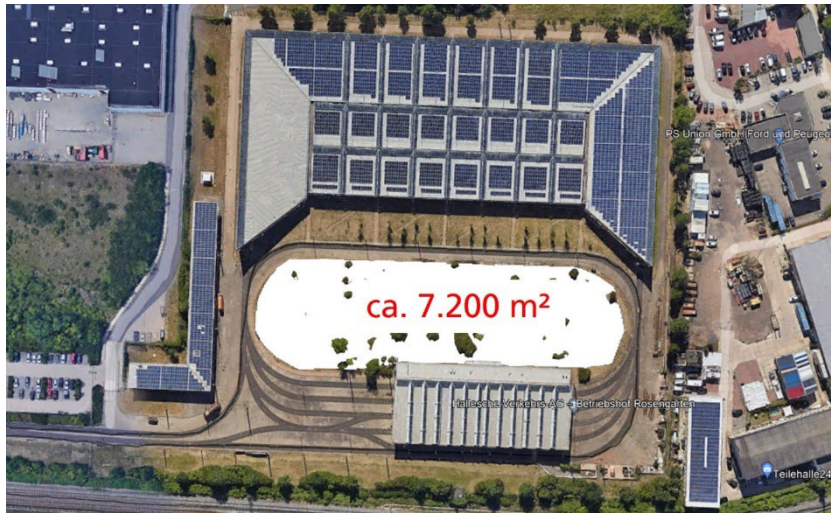


Abbildung 8-11
Maximal verfügbare Abstellfläche im Betriebshof Rosengarten (Bildquelle: Google Earth)

8.5.2 Ersatzfläche auf dem Grundstück Freimfelder Straße 43

Ebenfalls geprüft wurde die Eignung der Fläche auf dem Grundstück Freimfelder Straße 43, die sich nordöstlich des bestehenden Betriebshofes befindet (s. Abbildung 8-12).

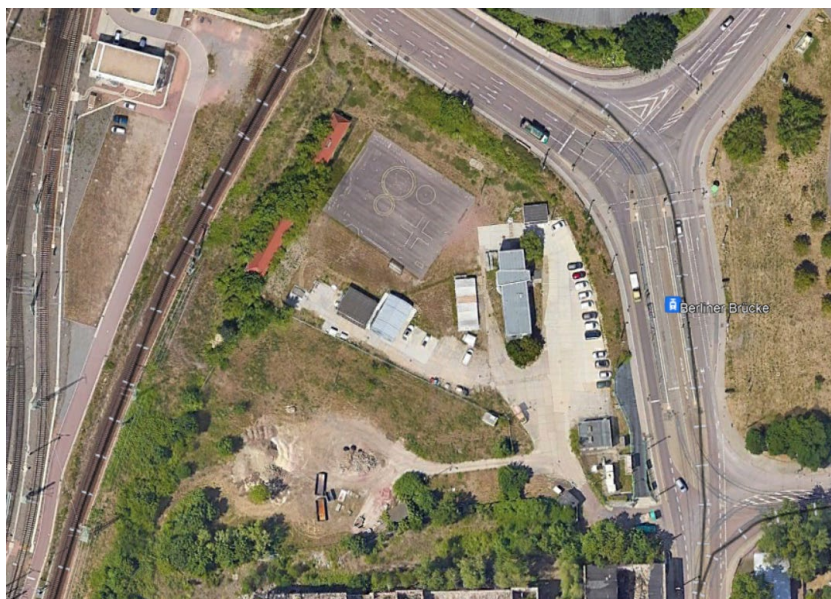


Abbildung 8-12
Fläche auf dem Grundstück Freimfelder Straße 43 (Bildquelle: Google Earth)

Drei verschiedene Varianten sind in der Anlage 3 dargestellt. Unabhängig von der Aufstellung der Busse wird deutlich, dass

- die notwendigen Abstellplätze und die zugehörige Ladeinfrastruktur vorgesehen werden können, jedoch
- die Fläche nicht ausreicht, um auch noch eine Werkstatt sowie eine Quarantänefläche zu integrieren.

Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Abstellfläche räumlich getrennt von der Werkstatt angeordnet wäre. Diese wäre aufgrund sonstiger Flächenrestriktionen nur auf der gegenwärtigen Busabstellfläche zu errichten.

8.5.3 Variantenvergleich

Einen Vergleich zwischen der Erweiterungsfläche gemäß Kapitel 8.1 und dem Alternativstandort Freimfelder Straße 43 zeigt die nachfolgende Tabelle.

Kriterium	Erweiterungsfläche (Stadt)		Freimfelder Straße 43 (EVH)	
Gesamtfläche [qm]		18.400		13.600
davon Bestand [m ²]		8.000		
davon Zukauf [m ²]	+	8.400	-	13.600
davon externe Buswerkstatt [m ²]		2.000		
Aufwand Ankauf Fläche	=	Eigentum Stadt	+	Eigentum EVH
Preis Fläche Zukauf	+	292.810 €	-	477.855 €
Topographie	=	Höhenanpassung erforderlich	-	Böschungfläche (Brutto vs. Netto) sehr ungünstiger Flächenzuschnitt
Altlasten im Boden		unbekannt		unbekannt
Werkstattfläche	+	neben Abstellflächen	-	nicht integrierbar
Lagerfläche	+		-	nicht integrierbar
Logistik (Material)	+		-	nicht integrierbar
Einbindung Sicherheitskonzept HAVAG	+		+	Zusatzaufwand
Abstellordnung	+		-	extrem eingeeengt, Schleppkurven z. T. ohne Reserven, große Brandabschnitte notwendig
Sonstige HAVAG-Nutzfahrzeuge	+	kompakte Anordnung	-	nicht integrierbar
Quarantänefläche	+		-	nicht integrierbar
Löschwasser	+	Zisterne 210 m ³	-	nicht vorhanden
Ladeinfrastruktur / Versorgung Mittelspannung (MS)	+	Leistungsreserve im MS-Netz ausreichend	-	Leistungsreserve im MS-Netz nicht ausreichend
	+	bestehende MS-Anlage Freimfelde nutzbar	+	MS-Anlage komplett neu zu errichten
			+	Transformatorstation nah an Ladepunkten installierbar
Logistik (Fahrpersonal)	+		-	Wegstrecke Disposition – Abstellung
Abstand Batteriebusse bzw. Ladeinfrastruktur zu Gastankstelle	°/°		+	ausreichende Abstände möglich
Anbindung	°/°		-	Querung Freimfelder Str. / LSA

+ gut / = neutral / - negativ / unbekannt / °/° nicht relevant

Tabelle 8-11: Vergleich der Erweiterungsfläche mit dem Grundstück Freimfelder Straße 43

Zur Untersetzung der Aussagen in Tabelle 8-11 werden nachfolgend einige Aspekte näher quantifiziert.

Netzanschluss

Laut Auskunft des zuständigen Netzbetreibers steht im benachbarten Mittelspannungsnetz am Standort Freimfelder Straße 43 eine maximale Leistungsreserve von 3,5 MW zur Verfügung. Die in Abbildung 6-4 dargestellte Tagesganglinie der erforderlichen Netzanschlussleistung weist bereits für eine vollständig elektrifizierte Bestandsflotte einen Bedarf von etwa 3,4 MW bei Einsatz eines Lastmanagements aus. Eine Erweiterung von Fahrplanleistungen oder die Durchführung von Schul- und sonstigen Gelegenheitsfahrten mit Batteriebussen ist somit durch die zur Verfügung stehende Netzreserve nicht abgedeckt.

Die Kosten für den Netzanschluss in Höhe von etwa 10.000 € entsprechen in etwa denen am Standort Freimfelder. Eine Kostenparität besteht ebenso für den Baukosten in Höhe von 82 €/kW.

Gehwege für Fahrpersonal

Gegenwärtig meldet sich das Fahrpersonal vor und nach einer Ausfahrt in der Disposition an und ab. Diese ist im in einem Gebäude direkt neben der Busabstellfläche untergebracht. Zwischen der Disposition und der Fläche Freimfelder Straße 43 ist ein Fußweg von etwa 800 m zurückzulegen. Setzt man eine Gehgeschwindigkeit von 1,2 m/s an, ergibt sich pro Ein- und Ausfahrt ein Zeitbedarf von etwa 11 min.

Gegenwärtig verlassen Linienbusse der HAVAG und Linienbusse der Subunternehmer etwa 18.450 mal den Betriebshof Freimfelder Straße und kehren ebenso oft zurück. Hinzu kommen Schulbusleistungen und sonstige Sonderfahrten. Betrachtet man allein die Aus- und Einfahrten im Linienverkehr, ergeben sich somit pro Jahr rund 6.830 zusätzliche Fahrpersonalstunden. Setzt man hierfür einen Stundensatz von 20,86 €/h an, ergeben sich jährliche Fahrpersonalkosten in Höhe von rund 142.500 €. Durch die Erweiterung der Fahrplanleistungen steigen die Kosten auf etwa 152.000 € pro Jahr.

Fahrwege für Werkstattfahrten

Planmäßig wird jeder HAVAG-Bus wie folgt in der Werkstatt betreut:

- Sicherheitsprüfung aller drei Monate
- Zwischenprüfung nach sechs Einsatzwochen

In Summe erfolgen acht planmäßige Werkstattaufenthalte pro Bus und Jahr. Zusätzlich werden noch vier Reparaturen pro Bus und Jahr angesetzt.

Für den Ablauf wird folgendes Regime unterstellt:

- Abstellung der Busse durch Fahrpersonal vor der Werkstatt
- Überführung der Busse nach dem Werkstattaufenthalt zur Fläche auf der Freimfelder Straße 43 (ca. 850 m Fahrweg)
- Rückweg zur Werkstatt zu Fuß.

Rechnet man die Fahrzeuge der Subunternehmer mit ein, werden die 54 zu berücksichtigenden Busse 650 mal pro Jahr überführt. Setzt man pro Fahrt etwa 5 min Differenzzeit zu einer Abstellung auf einer nähergelegenen Abstellfläche an, fallen pro Jahr 36 zusätzliche Arbeitsstunden und 1.230 € Personalkosten an.

Fazit

Deutlich wird, dass die Erweiterungsfläche deutlich mehr Vorteile bietet als die Fahrzeugabstellung am Alternativstandort Freimfelder Straße 43. Als Haupthindernis ist die nicht ausreichende Leistungsreserve im Mittelspannungsnetz anzusehen. Des Weiteren spricht der räumliche Abstand zwischen der Abstellfläche und einem möglichen Werkstattstandort gegen die Fahrzeugabstellung am Alternativstandort Freimfelder Straße 43.

9 Gesamtkosten und Kostenvergleiche

9.1 Mengenmodelle und Betrachtungshorizont

Vergleichende Gesamtkostenvergleiche für die schrittweise Einführung von emissionsfreien Linienbussen sind einem nicht auflösbaren Dilemma hinsichtlich des Mengenmodells ausgesetzt. Grundsätzlich gibt es zwei Betrachtungsweisen, die sich im Mengenmodell und den zu verwendenden Kostensätzen widerspiegeln:

- Betrachtung eines auszuwählenden Einführungsschrittes, im vorliegenden Fall z. B. Zeithorizont 1.
 - o Vorteile:
 - zeitnahe Betrachtungsweise
 - halbwegs solide abschätzbare Kostensätze unter Beachtung der gegenwärtigen Preisturbulenzen
 - o Nachteile:
 - extreme Verzerrung des Einflusses von Infrastruktur- und Schulungskosten, da sich unvermeidliche Sprungkosten anteilig auf weniger Fahrzeuge verteilen
 - Betrachtung nicht aller Bustypen
 - kein Gesamtkostenüberblick
- Gesamtbetrachtung aller Einführungsschritte und der damit jeweils verbundenen Ausbauschritte für die Infrastruktur.
 - o Vorteile:
 - keine Verzerrung des Einflusses von Infrastruktur- und Schulungskosten
 - gemeinsame Betrachtung aller Bustypen
 - Gesamtkostenüberblick
 - o Nachteile:
 - weit in der Zukunft liegender Betrachtungshorizont
 - große Unsicherheiten bzgl. Preisentwicklungen.

Aufgrund der Tatsachen, dass Gelenkbusse erst ab dem Zeithorizont 2 umgestellt werden und Midi- und Minibusse eine untergeordnete Rolle spielen, wird eine Gesamtbetrachtung für alle Solo- und Gelenkbusse durchgeführt, wobei die Ergebnisse getrennt je Fahrzeuglänge angegeben werden.

Da Preissteigerungsraten zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht seriös abschätzbar sind, wurden sämtliche Investitions- sowie Wartungs- und Instandhaltungskosten für den Preisstand 2023 berechnet.

9.1.1 Dieselbusse

Dieselbusse werden im vorliegenden Vergleich als Referenzantriebe betrachtet. Bei einer angenommenen Erneuerung der Dieselbusflotte in den kommenden Jahren wäre mit Investitionskosten in Höhe von etwa 14,5 Mio. € zu rechnen (Tabelle 9-1).

	Solobusse	Gelenkbusse
Anzahl	32	14
Stückpreis	293.335 €	371.490 €
Kosten für Dieselbusse	9.386.720 Mio. €	5.200.860 Mio. €

Tabelle 9-1: Überblick über die Ersatzinvestitionskosten für Dieselbusse (Mild-Hybrid, Preisstand 2023, netto)

Da die technischen Analysen gezeigt haben, dass beim Einsatz von für Batterie- oder Brennstoffzellenbusse keine zusätzlichen Fahrzeuge notwendig wären, wird die Flottenzusammensetzung auch für diese Antriebsformen angesetzt.

9.1.2 Batteriebusse

Die nachfolgende Betrachtung bezieht sich ausschließlich auf Batteriebusse mit Hybridheizung. Es werden sowohl Voll- als auch Gelegenheitslader miteinander verglichen.

Bei einer vollständigen Umstellung der Teilflotte auf Volllader ist basierend auf den heutigen Preisständen mit Gesamtkosten für die Erstinvestitionen und Schulungen in Höhe von ca. 42 Mio. € zu rechnen (Tabelle 9-2). Gelegenheitslader bedürfen im Betriebshof einer deutlich geringeren Ladeleistung, da sie zumeist mit vergleichsweise hohem Ladestand der Batterien einrücken. Die dadurch geringeren Investitionskosten im Betriebshof werden jedoch durch die Investitionskosten an den Endhaltestellen überkompensiert.

	Solobusse	Gelenkbusse
Anzahl	32	14
Kosten für Batteriebusse	19,2 Mio. €	10,22 Mio. €
Kosten für Ersatzbatterien	4,8 Mio. €	2,52 Mio. €
Kosten Ladeinfrastruktur im Betriebshof	4,74 Mio. € für Volllader (nur anteilig zu berücksichtigen) 3,87 für Gelegenheitslader (nur anteilig zu berücksichtigen)	
Kosten Ladeinfrastruktur an Endhaltestellen	1,56 Mio. €	
Kosten Lademanagement	0,2 Mio. € (nur anteilig zu berücksichtigen)	
Kosten Werkstattausrüstung	0,283 + 0,250 Mio. € (nur anteilig zu berücksichtigen)	
Schulungskosten	0,207 Mio. € (nur anteilig zu berücksichtigen)	

Tabelle 9-2: Überblick über die Erstinvestitionskosten für Batteriebusse (indikative Kostenschätzung, Preisstand 2023, netto)

In die Kosten der Werkstattausrüstung wurde deren Neubau sowie die dafür notwendige Flächenerweiterung nicht mit eingerechnet, da dieser aus Sicht des Autors ohnehin angezeigt ist (s. Punkt 8.1).

Bis zum Jahr 2033 würden die nachfolgend aufgeführten Kosten (Preisstand 2023) anfallen. Darin bereits enthalten sind die Kosten für die Ladeinfrastruktur für die 2034 zu beschaffenden Batteriebusse, da diese im Wesentlichen im Jahr 2033 errichtet und in Betrieb genommen werden muss. In die 19 Solobatteriebusse ist der Ersatz für die drei bereits vorhandenen Fahrzeuge mit eingerechnet.

	Solobusse	Gelenkbusse
Anzahl	19	7
Kosten für Batteriebusse	11,4 Mio. €	5,11 Mio. €
Kosten für Ersatzbatterien	2,85 Mio. €	1,26 Mio. €
Kosten Ladeinfrastruktur im Betriebshof	3,93 Mio. € für Volllader 3,15 Mio. € für Gelegenheitslader	
Kosten Ladeinfrastruktur an Endhaltestellen	1,21 Mio. €	
Kosten Lademanagement	0,15 Mio. €	
Kosten Werkstattausrüstung	0,283 + 0,250 Mio. €	
Schulungskosten	0,207 Mio. €	

Tabelle 9-3: Überblick über die Erstinvestitionskosten für Batteriebusse (indikative Kostenschätzung, Preisstand 2023, netto) bis zum Jahr 2033

Hinzu kommen noch Investitionskosten in Höhe von etwa 2,02 Mio. € für zwei Midi- und drei Minibatteriebusse. Die Kosten für die zugehörige Ladeinfrastruktur sind bereits in Tabelle 9-2 enthalten.

9.1.3 Brennstoffzellenbusse

Bei einer vollständigen Umstellung der Flotte auf Brennstoffzellenbusse ist mit Gesamtkosten für die Erstinvestitionen und Schulungen in Höhe von ca. 41,6 Mio. € zu rechnen.

	Solobusse	Gelenkbusse
Anzahl	32	14
Kosten für Brennstoffzellenbusse	19,52 Mio. €	10,5 Mio. €
Kosten für Ersatz-Batterien	1,54 Mio. €	0,7 Mio. €
Kosten für Ersatz-Brennstoffzellen	2,56 Mio. €	1,19 Mio. €
Kosten Tankinfrastruktur	4,5 Mio. €	
Kosten Trailer	0,3 Mio. €	
Kosten Werkstattausrüstung	0,285 + 0,250 Mio. €	
Kosten H ₂ -Sicherheit	0,05 Mio. €	
Schulungskosten	0,211 Mio. €	

Tabelle 9-4: Überblick über die Erstinvestitionskosten für Brennstoffzellenbusse (indikative Kostenschätzung, Preisstand 2023, netto)

9.1.4 Jahreslaufleistungen, Verbräuche und zusätzliche Fahrpersonalstunden

Für die Jahresfahrleistungen der HAVAG-Solo- und Gelenkbusse wurden zunächst die übermittelten Werte angesetzt. Die übermittelten Jahresfahrleistungen decken neben den Fahrplanleistungen auch operative sowie geplante Schienenersatzverkehre, die ausschließlich mit HAVAG-eigenen Bussen gefahren werden, ab. Vereinfachend wurden die übermittelten Werte auch für die Laufleistungen der Subunternehmer übernommen. Der dabei entstehende Fehler kann als vernachlässigbar angesehen werden.

Ergänzend werden in Tabelle 9-5 die zusätzlich durch die beschränkte Reichweite verursachten Leerkilometer (Fahrzeugtausch) aufgeführt. Wie bereits im Punkt 4.2.1 erwähnt, handelt es sich dabei um Maximalwerte, basierend auf dem gegenwärtigen Stand der Technik. Vor dem Hintergrund sich weiterentwickelnder Technologien und dem Umstellungsbeginn im Jahr 2027 handelt es sich mithin um Werte auf der sicheren Seite. Für Gelegenheitslader wird von keinen Zusatzbedarfen ausgegangen.

	Solobusse	Gelenkbusse
Anzahl	32	14
Mittlere Jahresfahrleistung	66.261 Fz-km	39.979 Fz-km
Planmäßige Jahresfahrleistung	2.120.350 Fz-km	559.710 Fz-km
Zusätzliche jährliche Fz-km – Batteriebusse (Volllader)	66.480 Fz-km	14.010 Fz-km
Zusätzliche jährliche Fz-km – Brennstoffzellenbusse	19.275 Fz-km	-

Tabelle 9-5: Jährliche Fahrleistungen

	Solobusse	Gelenkbusse
Zusätzliche FP-h – Batteriebusse	4.432 h	934 h
Zusätzliche FP-h – Brennstoffzellenbusse	1.285 h	-

Tabelle 9-6: Zusätzliche jährliche Fahrpersonalstunden

Die zusätzlichen Fahrpersonalstunden beim Einsatz von Batterie- bzw. Brennstoffzellenbussen sind in Tabelle 9-6 aufgelistet.

Die nachfolgenden drei Tabellen weisen die durchschnittlichen Verbräuche von Diesel, AdBlue, Elektroenergie, Heizöl und Wasserstoff aus.

	Solobusse	Gelenkbusse
Dieselverbrauch	0,35 l/km	0,49 l/km
AdBlue-Verbrauch	0,016 l/km	0,025 l/km

Tabelle 9-7: Durchschnittliche Diesel- und AdBlue-Verbräuche

	Solobusse	Gelenkbusse
Elektroenergieverbrauch ¹⁾	1,3 kWh/km	1,5 kWh/km
Heizölverbrauch	0,04 l/km	0,06 l/km

¹⁾ inkl. Verluste in der Ladeinfrastruktur von 15 %

Tabelle 9-8: Durchschnittliche Elektroenergie- und Heizölverbräuche

	Solobusse	Gelenkbusse
Wasserstoffverbrauch	0,08 kg H ₂ /km	0,11 kg/km

Tabelle 9-9: Durchschnittliche Wasserstoffverbräuche

Für die Kalkulationen werden folgende Einkaufspreise angesetzt:

- Diesel: 1,37 €/l
- Ad Blue: 0,32 €/l
- Elektroenergie: 0,37 €/kWh
- Wasserstoff: 7,5 €/kg / 9,5 €/kg / 11,5 €/kg (Szenarienbetrachtung)

9.2 Fördermöglichkeiten

Die nachfolgend kurz erläuterten Fördermöglichkeiten wurden als Szenarien berücksichtigt.

Richtlinie zur Förderung alternativer Antriebe von Bussen im Personenverkehr des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) vom 07.09.2021 (jetzt Bundesministerium für Digitales und Verkehr)

Die Richtlinie bietet folgende Fördermöglichkeiten:

- Förderung der Mehrkosten von alternativ angetriebenen Bussen i. H. v. 80 % der Mehrkosten ggü. einem vergleichbaren Referenz-Dieselbus (Grundfahrzeug), wobei für Dieselbusse und Busse mit alternativen Antrieben Referenzwerte vorgegeben werden.
- Förderung der Lade-, Betankungs- und Werkstattinfrastruktur i. H. v. 40 %.
Die förderfähigen Positionen für die Elektroenergiebereitstellung wurden sehr weit gefasst. Vereinfachend gesprochen sind bis auf die Netzanschlusskosten eigener Transformatoren (Kundenstation) alle notwendigen Installationen förderfähig. Dabei ist es unerheblich, ob die elektrische Energie für die Nachladung von Batteriebusen oder die Erzeugung und Abgabe von Wasserstoff genutzt wird.
- Nicht gefördert werden Kosten für Personal, Schulung, Erwerb von Grundstücken, Wartungskosten.

Hinweise:

- Seitens des Fördermittelgebers werden Referenzkosten eines Dieselreferenzfahrzeugs vorgegeben. Diese betragen
 - o 120.000 € für Kleinbusse
 - o 220.000 € für Midibusse
 - o 230.000 € für Solobusse
 - o 320.000 € für Gelenkbusse
- Weiterhin gibt der Fördermittelgeber Obergrenzen bzgl. anrechenbarer Kosten für Batterie- und Brennstoffzellenbusse vor:
 - o 270.000 € / 340.000 € für Kleinbusse
 - o 450.000 € / 550.000 € für Midibusse
 - o 570.000 € / 590.000 € für Solobusse
 - o 730.000 € / 800.000 € für Gelenkbusse

Während die Kostenobergrenzen für Klein- und Midibusse auskömmlich erscheinen, sind die Kosten für Solo- und Gelenkbusse bei kleinen Chargen eher zu knapp bemessen.

- Der Fördermittelgeber beschränkt gemäß Richtlinie das Fördervolumen pro Vorhaben auf 30 Mio. €, was jedoch für die hier angestellte Vergleichsuntersuchung nicht maßgeblich ist.

- Da sich die Förderung der Fahrzeuge allein auf die Mehrkosten zwischen emissionsfreien und Dieselnissen bezieht, ist das sog. Grundfahrzeug ausdrücklich nicht Gegenstand der Förderung. Dadurch darf die BMDV-Förderung mit einer Landes- oder anderweitigen Busförderung für Dieselnisse kumuliert werden. Weist eine Landesförderung spezielle Fördersätze für emissionsfreie Fahrzeuge aus, dürfen diese hingegen nicht mit der Bundesförderung kombiniert werden.

9.3 THG-Quote

Basierend auf der Renewable Energy Directive II der Europäischen Union und des Bundes-Immissionsschutzgesetzes – BimSchG (§ 37) sind Quotenverpflichtete (Mineralölfirmer) gezwungen, einen Beitrag zur Minderung der CO₂-Emissionen zu leisten. Da dies im Wesentlichen nur durch den Einsatz von Biokraftstoffen als Beimischung zu fossilen Brennstoffen möglich ist und die Verfügbarkeit von Biokraftstoffen eingeschränkt ist, sind derartige Firmen gezwungen, Privatpersonen und anderen Unternehmen, die einen aktiven Beitrag zum Klimaschutz leisten, deren CO₂-Einsparungen abzukaufen. Hierzu gehört z. B. der Einsatz von Elektrofahrzeugen oder die Bereitstellung von Wasserstoff, sofern dieser elektrisch mit zu 100 % aus erneuerbaren Quellen stammender Energie erzeugt wird.

Um hierbei im Bereich der Fahrzeuge möglichst einfach vorgehen zu können, wurden für verschiedene Fahrzeugkategorien mit rein elektrischem Antrieb pauschale THG-Quoten festgelegt. Diese basieren für Batteriebusse (Klasse M3) auf einem angenommenen Jahresenergieverbrauch von 72.000 kWh. Ein Nachweis über die tatsächlichen Energieverbräuche ist dabei nicht notwendig. Ebenso wird keine Unterscheidung bzgl. der Fahrzeuglänge vorgenommen. Ob eine fossile betriebene Zusatzheizung hier ausschließend bzw. schädlich wirkt, konnte nicht ermittelt werden.

Die sich daraus maximal ergebende THG-Quote (CO₂-Einsparungen je Bus in kg CO₂-Äquivalent) wird wie folgt berechnet:

$$CO_2 - \text{Einsparung je Batteriebus} = (KBW \cdot (1 - MQ) - THGE_{EE} \cdot AFAE) \cdot AF_{EE} \cdot 72.000 \text{ kWh} \cdot 0,0036$$

KBW Kraftstoffbasiswert (94,1 kg CO₂-Äquivalent je GJ)

MQ Prozentsatz um den die Treibhausgasemissionen der in Verkehr gebrachten Kraftstoffe im Vergleich zum Kraftstoffbasiswert sinken müssen (2023: 8 % bzw. 0,08, bis 2030 auf 25 % bzw. 0,25 steigend)

THGE_{EE} THG-Emissionen für elektrische Energie (2023: 135 kg CO₂-Äquivalent je GJ)

AFAE Anpassungsfaktor für Antriebseffizienz (Elektroantriebe = 0,4)

AF_{EE} Anrechnungsfaktor (für in mobilen Anwendungen genutzte Elektroenergie: 3)

0,0036 Umrechnungsfaktor zwischen GJ und kWh.

Für das Jahr 2023 liegt die pro Batteriebus berechnete CO₂-Einsparung somit pauschal bei 25.938 kg. Daraus berechnet sich der pro Bus maximal erzielbare THG-Quoten-Erlös:

$$\text{max. THG - Quotenerlös je Batteriebus} = CO_2 - \text{Einsparung je Batteriebus} \cdot AB = 15.653 \text{ €}$$

AB Ausgleichsbetrag, den ein Quotenverpflichteter entrichten muss, wenn er seine THG-Minderungsziele verfehlt (0,6 € / kg CO₂-Äquivalent).

Eine direkte Anrechnung der THG-Quote für Brennstoffzellenbusse existiert hingegen nicht. Hier sieht der Gesetzgeber aber die Anrechnung einer THG-Quote für jedes produzierte Kilogramm Wasserstoff vor:

$$CO_2 - \text{Einsparung je kg H}_2 = (KBW \cdot (1 - MQ) - THGE_{H_2} \cdot AFAE) \cdot AF_{BSZ} \cdot 0,1201 = 19,93 \text{ kg CO}_2/\text{kg H}_2$$

THGE_{H₂} THG-Emissionen für grünen Wasserstoff (2023: 9,1 kg CO₂-Äquivalent je GJ)

AF_{BSZ} Anrechnungsfaktor (für in mobilen Anwendungen genutzten Wasserstoff: 2)

0,1201 Umrechnungsfaktor zur Berücksichtigung des Heizwertes von Wasserstoff.

Pro Kilogramm grünem Wasserstoff ist somit eine maximale THG-Quote von 11,96 € erzielbar, wenn man wiederum den o. g. Ausgleichsbetrag zugrunde legt. Diese kann einem Busbetreiber wie folgt zugutekommen:

1. Der Hersteller und ggf. Tankstellenbetreiber ist eine Dritte Partei und diese gibt die THG-Quote in Form niedrigerer Abgabepreise an den Busbetreiber weiter.
2. Der Busbetreiber ist gleichzeitig auch der Hersteller von Wasserstoff und kann für jede erzeugte Tonne Wasserstoff die THG-Quote beantragen.

Ein Blick auf die drei Formeln zeigt, dass THG-Quotenerlöse sehr volatil sein können. So lagen bspw. im Jahr 2022 die Treibhausgasemissionen bei der Erzeugung von Elektroenergie noch bei 119 kg CO₂-Äquivalent je GJ.

Wesentlich bedingt durch den Ukrainekrieg wurde im Jahr 2023 wieder mehr Elektroenergie in Kohlekraftwerken erzeugt, was zu dem oben angegebenen Wert geführt hat.

Ein zweiter wichtiger Wert ist der Ausgleichsbetrag in der zweiten Formel. Der aufgeführte Wert stellt einen Maximalwert dar. Dieser wird jedoch praktisch nie erreicht, da Quotenverpflichtete auch andere Möglichkeiten haben, ihre THG-Minderungsziele zu erreichen, z. B. durch die Beimengung von Biokraftstoffen.

Die mittels THG-Quoten auszugleichenden Einsparungsvorgaben für Mineralölkonzerne werden in den nächsten Jahren steigen. Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass eine sinkende Nachfrage nach Mineralölprodukten, z. B. durch die zunehmende Verbreitung von Elektrofahrzeugen, die Preise pro Tonne CO₂ senken werden. In die gleiche Richtung wird auch das zunehmende Angebot an THG-Quoten durch mehr Elektrofahrzeuge und Wasserstoffproduzenten wirken. Daher werden nur 60 % des derzeit maximal möglichen THG-Quotenerlöses angesetzt.

	Solobusse	Gelenkbusse
Batteriebusse		9.700 €
Brennstoffzellenbusse	20.630 €	16.206 €

Tabelle 9-10: Pro Fahrzeug angesetzte THG-Quotenerlöse pro Jahr

Die in Tabelle 9-10 aufgelisteten THG-Quotenerlöse beruhen auf einem CO₂-Preis von 0,3 €/kg CO₂, wovon im Fall einer H₂-Anlieferung 0,2 €/kg CO₂ an den Verkehrsbetrieb weitergegeben werden. Zu beachten ist, dass die Erlöse enormen Einfluss auf die Kostenvergleiche haben. Dadurch kann es bei fallenden oder steigenden CO₂-Preisen zu deutlich abweichenden Ergebnissen kommen.

9.4 Szenarien

Die Ergebnisse der Vergleichsrechnungen sind neben den Annahmen zu Kostensätzen naturgemäß stark abhängig von den Annahmen hinsichtlich der Förderung von Fahrzeugen und Infrastruktur. Um die damit verbundenen Auswirkungen auf die Ergebnisse transparent darzulegen, werden drei unterschiedliche Szenarien betrachtet:

- Szenario 1:
 - Förderung der Fahrzeuge und Infrastruktur durch den Bund (s. Kapitel 9.2)
 - Förderung von Ersatzbatterien und -brennstoffzellen durch den Bund (80 %)
 - THG-Quoten-Erlöse gemäß Kapitel 9.3
- Szenario 2:
 - Förderung der Fahrzeuge und Infrastruktur durch den Bund (s. Kapitel 9.2)
 - keine Förderung von Ersatzbatterien und -brennstoffzellen
 - THG-Quoten-Erlöse gemäß Kapitel 9.3
- Szenario 3:
 - keine Förderung der Fahrzeuge und Infrastruktur durch den Bund
 - keine Förderung von Ersatzbatterien und -brennstoffzellen
 - keine THG-Quoten-Erlöse

Die Szenarien 1 und 3 stecken das Spektrum hinsichtlich der Förderung ab. Zwischen diesen beiden Szenarien gibt es eine Vielzahl von Variationsmöglichkeiten, die z. B. ein Abschmelzen der Förderintensität oder verringerte THG-Quoten-Erlöse berücksichtigen würden. Diese im Detail zu beschreiben ist praktisch unmöglich, weshalb nur ein mittleres Szenario betrachtet wird.

9.5 Kostenvergleich Batteriebusse vs. Dieselbusse

Der Kostenvergleich wird als Gegenüberstellung von Diesel- und Batterie- bzw. Brennstoffzellenbusbetrieb, bezogen auf einen Zeitraum von 12 Jahren, vorgenommen. Darin enthalten sind alle Kosten, die sich zwischen den einzelnen Antriebsformen unterscheiden. Mithin handelt es sich nicht um einen Vergleich der Vollkosten.

9.5.1 Kalkulationsgrundlagen

Die Kalkulationsgrundlagen werden in den nachfolgenden Ausführungen und Tabellen dargestellt, soweit sie nicht bereits in früheren Kapiteln angegeben wurden. Sie beziehen sich nur auf Solo- und Gelenkbusse.

Bezeichnung	Einheit	Wert(e)
Kalkulatorischer Zins	%	3,0
Abschreibungszeitraum	a	12
Nutzungszeitraum	a	12
Instandhaltungs- und Wartungskosten pro Fahrzeug-km ¹⁾	€/Fz-km	0,45 / 0,56
Jährliche Versicherung pro Fahrzeug, Vollkasko und Haftpflicht ¹⁾	€/a	2.727 / 1.796

¹⁾ Solobusse / Gelenkbusse

Tabelle 9-11: Kennzahlen Fahrzeugkalkulation Dieselbusse

Bezeichnung	Einheit	Wert(e)
Abschreibungszeitraum Fahrzeug / Ersatzbatterie	a	12 / 6
Nutzungszeitraum Fahrzeug / Ersatzbatterien	a	12 / 6
Instandhaltungs- und Wartungskostendifferenz pro Fahrzeug-km ¹⁾	€/Fz-km	-0,04
Jährliche Versicherung pro Fahrzeug, Vollkasko und Haftpflicht ²⁾	€/a	3.178 / 3.357
Feuer-Differenzversicherung pro Fahrzeug	€/a	302,40
Jährliche Mehrkostenversicherung für alle Fahrzeuge	€/a	6.600

¹⁾ im Vergleich zu Dieselbussen ²⁾ Solobusse / Gelenkbusse – für Gelenkbatteriebusse skaliert

Tabelle 9-12: Kennzahlen Fahrzeugkalkulation Batteriebusse mit Hybridheizung

	Bezeichnung	AfA / Nutzungsdauer in Jahren	Instandhaltungskosten in Prozent bezogen auf Investition
Ladeinfrastruktur	Transformatoren komplett	20 / 30	1,4
	Transformatorengebäude	25 / 35	1,4
	MSR-Technik inkl. USV	10 / 15	2,0
	MS/NS/DC-Verkabelung	25 / 30	1,4
	Baukostenzuschuss	25 / 30	-
	Ladegeräte komplett	10 / 14	2,0
	sonst. bauliche Maßnahmen	25 / 35	1,4
	sonstige Kosten ¹⁾	25 / 35	-
Werkstattausrüstung	Dacharbeitsplatz inkl. Portalkran	14 / 20	1,4
	Hochvolt-Spezial-Werkzeuge und Schutzausrüstung, Prüf-/Messtechnik	5 / 10	2,0
	Laptops f. Fahrzeugdiagnosesystem	3 / 5	2,0

¹⁾ HOAI-Planungskosten, Verwaltungskosten, interne Baunebenleistungen, Baustelleneinrichtung

Tabelle 9-13: Kennzahlen für die Kalkulation der Infrastruktur

9.5.2 Ergebnisse

Einen Überblick über die Gesamtkosten, die Eigenanteile sowie die geförderten Kosten für die betrachteten Szenarien zeigen Tabelle 9-14 und Tabelle 9-15. Bei gleichbleibenden antriebsspezifischen Gesamtkosten unterscheiden sich die Eigenanteile an den Investitionskosten sowie die geförderten Kosten je nach Szenario zueinander. Die jährlichen spezifischen Kosten beschreiben diejenigen Kosten, die unmittelbar durch die Einführung von Bussen mit alternativen Antrieben hervorgerufen werden. Neben den Kapitalkosten fließen hier auch laufende Kosten für Elektroenergie, Wartung und Instandhaltung, Schulungen und Versicherungen ein. Ebenso enthalten

sind die Mehrkosten durch zusätzliche Leerkilometer. Nicht mit enthalten sind hingegen alle diejenigen Kosten, die auch bei einem Dieselbusbetrieb anfallen würden. Hierzu gehören u. a. die ohnehin anfallenden Fahrpersonalkosten, Abschreibungen auf Gebäude und bereits vorhandene Anlagen sowie sonstige Allgemerkosten.

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Investitions- und Erstschulungskosten ¹⁾ [Mio. €]	41,45	41,45	41,45
Eigenanteil [Mio. €]	22,37	28,34	41,45
Geförderte Kosten [Mio. €]	19,00	13,11	-
Jährliche spezifische Kosten ¹⁾ [Mio. €]	4,59	5,14	6,81
Differenz zu Dieselbusbetrieb ²⁾ [€/Fz-km]	0,59 / 0,59	0,77 / 0,89	1,28 / 1,91

¹⁾ Kosten, die unmittelbar mit der Einführung von Batteriebusen samt Ladeinfrastruktur im Zusammenhang stehen

²⁾ Solobusse / Gelenkbusse, bei Bezugnahme auf planmäßige Dieselbusfahrweiten

Tabelle 9-14: Ergebnisse des Kostenvergleichs für Batteriebusse – Volllander

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Investitions- und Erstschulungskosten ¹⁾ [Mio. €]	42,10	42,10	42,10
Eigenanteil [Mio. €]	22,84	28,72	42,10
Geförderte Kosten [Mio. €]	19,26	13,37	-
Jährliche spezifische Kosten ¹⁾ [Mio. €]	4,41	5,02	6,70
Differenz zu Dieselbusbetrieb [€/Fz-km]	0,54 / 0,56	0,72 / 0,85	1,24 / 1,89

¹⁾ Kosten, die unmittelbar mit der Einführung von Batteriebusen samt Ladeinfrastruktur im Zusammenhang stehen

Tabelle 9-15: Ergebnisse des Kostenvergleichs für Batteriebusse – Gelegenheitslader

Die Differenzkosten zum Dieselbusbetrieb zeigen die extreme Abhängigkeit der Ergebnisse von den angesetzten Förderszenarien. Zwischen Voll- und Gelegenheitsladern kommt es zu einer weitgehenden Kostenparität.

9.6 Kostenvergleich Brennstoffzellenbusse vs. Dieselbusse

9.6.1 Kalkulationsgrundlagen

Die Kalkulationsgrundlagen für die Brennstoffzellenbusse sowie die zugehörige Infrastruktur sind Tabelle 9-16 und Tabelle 9-17 zu entnehmen.

Bezeichnung	Einheit	Wert(e)
Abschreibungszeitraum Fahrzeug / Ersatzbatterie / Ersatz-BSZ	a	12 / 6 / 6
Nutzungszeitraum Fahrzeug / Ersatzbatterien / Ersatz-BSZ	a	12 / 6 / 6
Instandhaltungs- und Wartungskostendifferenz pro Fahrzeug-km ¹⁾	€/Fz-km	±0
Jährliche Versicherung pro Fahrzeug, Vollkasko und Haftpflicht	€/a	3.178 / 3.357
Kosten H ₂	€/kg	7,50 / 9,50 / 11,50
Durchschnittlicher Stromverbrauch (durch Betrieb Tankanlage)	kWh/kg H ₂	3,00

¹⁾ im Vergleich zu Dieselbussen

Tabelle 9-16: Kennzahlen Fahrzeugkalkulation Brennstoffzellenbusse

Anzuliefernden Wasserstoff wird am Markt zu sehr unterschiedlichen Preisen angeboten, die im Wesentlichen durch die Entfernung zwischen dem Produktions- und dem Verbrauchsort definieren. Für die Vergleichsrechnungen wurden drei verschiedene Kostensätze verwendet, in die mögliche THG-Quoten-Erlöse durch den Erzeuger nicht eingerechnet wurden. Diese wurden jeweils direkt als abziehbare Kosten gemäß Tabelle 9-10 in die Kalkulationen einbezogen. Die verwendeten Kostensätze sind im unteren Bereich des Kostenspektrums für Wasserstoff angesiedelt. Für die Produktion eines Kilogramms Wasserstoff mittels Elektrolyse sind etwa 53 kWh elektrische Energie notwendig. Bei einem Kilopreis von 9,50 € dürfte demnach der anzusetzende Energiepreis den Wert von knapp 0,18 € nicht überschreiten. Dies ist bei den gegenwärtigen Energiepreisen nur als realistisch zu

betrachten, wenn für die Wasserstoffproduktion überschüssige regenerativ erzeugte Elektroenergie verwendet wird, die ansonsten nicht produziert werden würde.

	Bezeichnung	AfA / Nutzungsdauer in Jahren	Instandhaltungskosten in Prozent bezogen auf Investition
Infrastruktur	Tankinfrastruktur	verschieden	5,0
	H ₂ -Trailer	10 / 14	5,0
	Nachrüstung ATEX-Stelltechnik	10 / 20	2,0
	H ₂ -Sensoren inkl. Anlage	5 / 10	2,0
Werkstattausrüstung	Dacharbeitsplätze inkl. Portalkräne	14 / 20	1,4
	Hochvolt-Spezial-Werkzeuge und Schutzausrüstung, Prüf-/Messtechnik	5 / 10	2,0
	Laptops f. Fahrzeugdiagnosesystem	3 / 5	2,0
	Gasprüf-/Warngeräte inkl. Zubehör	5 / 10	2,0

Tabelle 9-17: Kennzahlen für die Kalkulation der Infrastruktur für Brennstoffzellenbusse

9.6.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse des Vergleichs von Diesel- mit Brennstoffzellenbetrieb zeigen die nachfolgenden Tabellen für drei unterschiedliche Wasserstoffbezugspreise. Auffällig ist die Abhängigkeit der Ergebnisse von den angesetzten THG-Quoten-Erlösen bei einem Vergleich von Szenario 3 mit den Szenarien 1 und 2. Für eine Investitionsentscheidung ist es daher zumindest fragwürdig, diese basierend auf der Annahme dauerhaft hoher THG-Quoten-Erlöse zu treffen.

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Investitions- und Erstschulungskosten ¹⁾ [Mio. €]	41,84	41,84	41,84
Eigenanteil [Mio. €]	19,04	23,83	41,84
Geförderte Kosten [Mio. €]	22,80	18,01	-
Jährliche spezifische Kosten ¹⁾ [Mio. €]	4,58	5,02	7,66
Differenz zu Dieselbusbetrieb ²⁾ [€/Fz-km]	0,50 / 0,80	0,64 / 1,05	1,52 / 2,40

¹⁾ Kosten, die unmittelbar mit der Einführung von Brennstoffzellenbussen samt Tankinfrastruktur im Zusammenhang stehen

²⁾ Solobusse / Gelenkbusse, bei Bezugnahme auf planmäßige Dieselbusfahrweiten

Tabelle 9-18: Ergebnisse des Kostenvergleichs für Brennstoffzellenbusse (Kosten Wasserstoff = 7,50 €/kg)

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Investitions- und Erstschulungskosten ¹⁾ [Mio. €]	41,84	41,84	41,84
Eigenanteil [Mio. €]	19,04	23,83	41,84
Geförderte Kosten [Mio. €]	22,80	18,01	-
Jährliche spezifische Kosten ¹⁾ [Mio. €]	5,05	5,49	8,12
Differenz zu Dieselbusbetrieb ²⁾ [€/Fz-km]	0,66 / 1,02	0,80 / 1,27	1,64 / 2,62

¹⁾ Kosten, die unmittelbar mit der Einführung von Brennstoffzellenbussen samt Tankinfrastruktur im Zusammenhang stehen

²⁾ Solobusse / Gelenkbusse, bei Bezugnahme auf planmäßige Dieselbusfahrweiten

Tabelle 9-19: Ergebnisse des Kostenvergleichs für Brennstoffzellenbusse (Kosten Wasserstoff = 9,50 €/kg)

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Investitions- und Erstschulungskosten ¹⁾ [Mio. €]	41,84	41,84	41,84
Eigenanteil [Mio. €]	19,04	23,83	41,84
Geförderte Kosten [Mio. €]	22,80	18,01	-
Jährliche spezifische Kosten ¹⁾ [Mio. €]	5,51	5,95	8,59
Differenz zu Dieselbusbetrieb ²⁾ [€/Fz-km]	0,82 / 1,24	0,96 / 1,49	1,84 / 2,84

¹⁾ Kosten, die unmittelbar mit der Einführung von Brennstoffzellenbussen samt Tankinfrastruktur im Zusammenhang stehen

²⁾ Solobusse / Gelenkbusse, bei Bezugnahme auf planmäßige Dieselbusfahrweiten

Tabelle 9-20: Ergebnisse des Kostenvergleichs für Brennstoffzellenbusse (Kosten Wasserstoff = 11,50 €/kg)

Unterstellt man hingegen weitgehend gleichbleibende THG-Quoten-Erlöse, ist zumindest eine weitgehende Kostenparität zu Batteriebusen bis zu einem Wasserstoffpreis von 7,50 €/kg gegeben.

Weiterhin sind die im Vergleich mit anderen Verkehrsunternehmen hohen Differenzkosten zum Dieselbusbetrieb durch die hohen Fahrzeugpreise für die Mild-Hybrid-Fahrzeuge geprägt. Dadurch sinken die förderfähigen Kosten je Brennstoffzellen- bzw. Batteriebus, da sich diese auf die Differenzkosten zwischen Dieselbussen und Bussen mit emissionsfreiem Antrieb beziehen.

1 0 Klima- und Umweltaspekte

10.1 CO₂- und Luftschadstoffemissionen

10.1.1 Grundlagen

Als Grundlage für die nachfolgenden Betrachtungen werden die im Handbuch der Emissionsfaktoren (HBEFA 4.1 Stand 2019) zu Grunde gelegten Schadstoffemissionen herangezogen.

Auf der Grundlage regelmäßiger Schadstoffmessungen stellt das HBEFA Faktoren für den Ausstoß von potenziellen Schadstoffen aus relevanten Kraftfahrzeugen zur Verfügung. Diese Werte gelten in der Ausgabe 4.1 für alle aktuellen Abgasnormen. Man unterscheidet hierbei in die Fahrzeugkategorien

- Personenkraftwagen (Pkw),
- leichte Nutzfahrzeuge (LNF),
- schwere Nutzfahrzeuge (SNF), bestehend aus Lastkraftwagen (Lkw), Lastzügen (LZ) und Sattelzügen (SZ)
- Linienbus (LBus),
- Reisebus (RBus) und
- Kraftrad (KR)

Für diese werden Schadstoffemissionen im warmen Betriebszustand sog. Motoremissionen berechnet und in der Einheit g/km ausgegeben. Kaltstartzuschläge und Verdampfungsemissionen sowie Emissionen aus Klimaanlage können zusätzlich für die Kategorien Pkw und LNF ausgegeben werden.

Stoff	Beschreibung
mKr	Kraftstoffverbrauch
HC	Kohlenwasserstoffe
CO	Kohlenmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid (im HBEFA berechnet aus Anteilen von NO _x)
NO _x	Stickstoffoxid als NO ₂ -Äquivalent
CO ₂ (total)	Gesamt-CO ₂ , berechnet aus dem Treibstoffverbrauch
CO ₂ (rep)	CO ₂ -Ausstoß, ohne Berücksichtigung des Anteils von Bio-Kraftstoffen
PM	Partikelmasse

Zusätzlich können Blei, SO₂, die Partikelanzahl und weitere, z. T. abgeleitete Schadstoffkomponenten ausgegeben werden.

Tabelle 10-1: Auswahl Schadstoffkomponenten des HBEFA 4.1

Die Werte für die ausgegebenen Motoremissionen unterscheiden sich nach dem jeweils betrachteten Land, dem Bezugsjahr, typischen Verkehrszusammensetzungen und -abläufen sowie Streckenlängsneigungen. Eine Differenzierung der Emissionsfaktoren nach sog. Fahrzeugschichten (Fahrzeuggröße, Abgasnorm) in den jeweiligen Fahrzeugkategorien wird durch HBEFA ebenfalls unterstützt.

Für eine erste Abschätzung der Schadstoffeinsparungen durch den Einsatz von Elektrobussen wurden die durch HBEFA bereitgestellten aggregierten Angaben für den Flottenmix der Fahrzeugkategorien in einer Innerortssituation (Hauptstraße mit zul. Geschwindigkeit von 50 km/h mit +/- 4 % Geländeneigung) in Deutschland ausgewählt. Als Bezugsjahr zur Berechnung der Umweltauswirkungen wurde das Jahr 2020 gewählt. Die im HBEFA verwendeten Unterschiede im Flottenmix der Bezugsjahre 2020 und 2025 zeigt ein Vergleich der folgenden Abbildungen beispielhaft. Gemäß HBEFA erfolgt dabei die Integration der Schadstoffemissionsklasse bis EURO-6d/VI für Benzin- und Diesel-Pkw/Lkw ab dem Bezugsjahr 2020 sowie eine Berücksichtigung alternativer Antriebe.

Zusammensetzung Flottenmix 2020, Deutschland nach Emissionskonzept

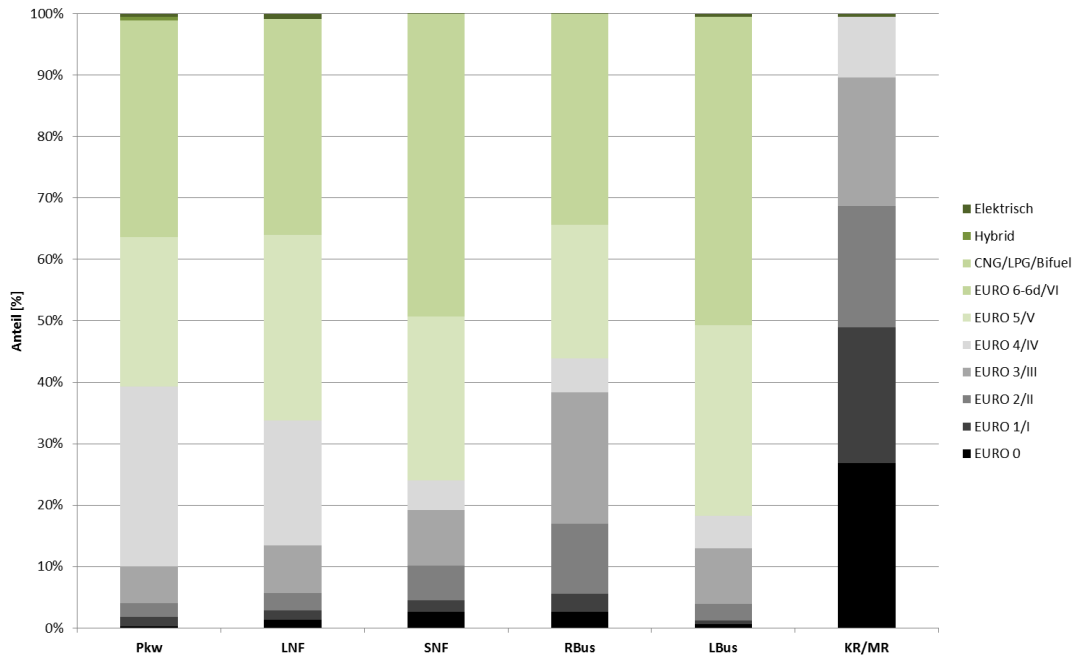


Abbildung 10-1
Flottenmix 2020 HBEFA
nach Fahrzeugkategorie
und Emissionsstufe

Zusammensetzung Flottenmix 2025, Deutschland nach Emissionskonzept

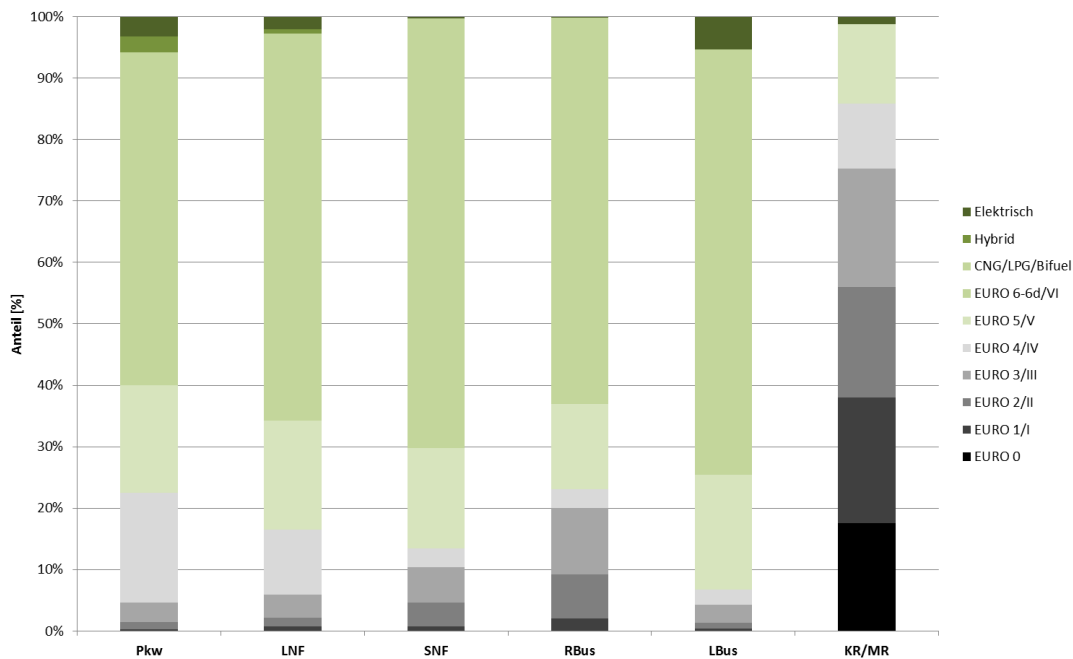


Abbildung 10-2
Prognose Flottenmix 2025
HBEFA nach Fahrzeug-
kategorie und Emissions-
stufe

Die daraus resultierenden Emissionen pro Fahrzeugkategorie und Kilometer zeigen die folgenden Abbildungen. Deren Berechnung erfolgt auf Grundlage der bereitgestellten warmen Emissionen für alle Fahrzeugkategorien. Daraus ist klar erkennbar, dass die durchschnittlichen Emissionen der Linienbusse im innerörtlichen Verkehr die Emissionen der schweren Nutzfahrzeuge (SNF) teilweise deutlich übersteigen.

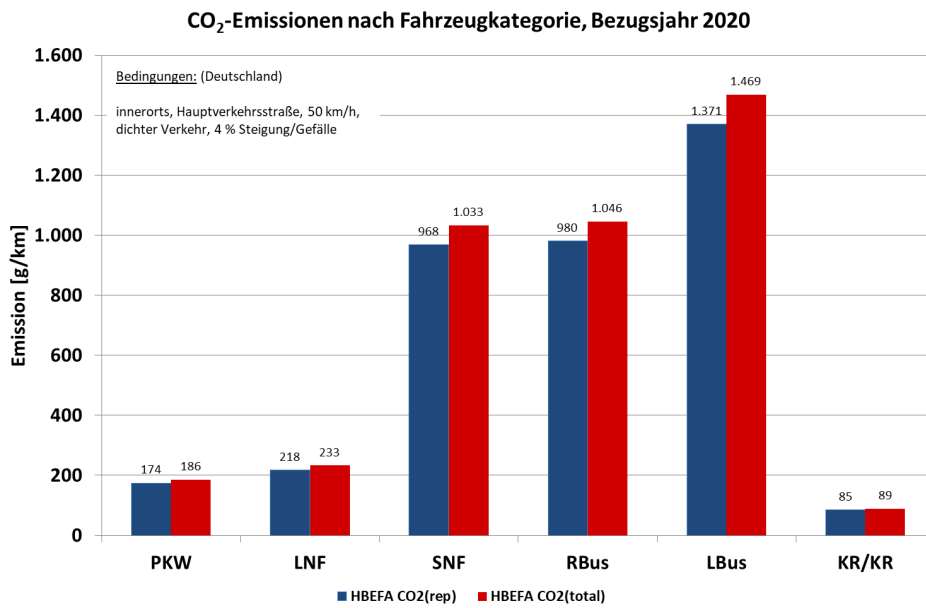


Abbildung 10-3
CO₂-Emissionen
(warm)

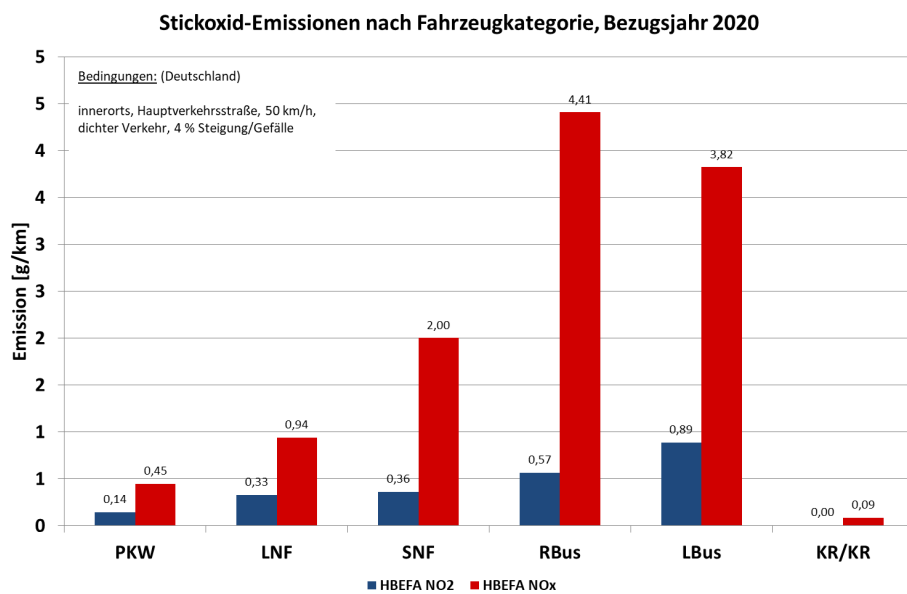


Abbildung 10-4
NO₂- und NO_x-
Emissionen (warm)

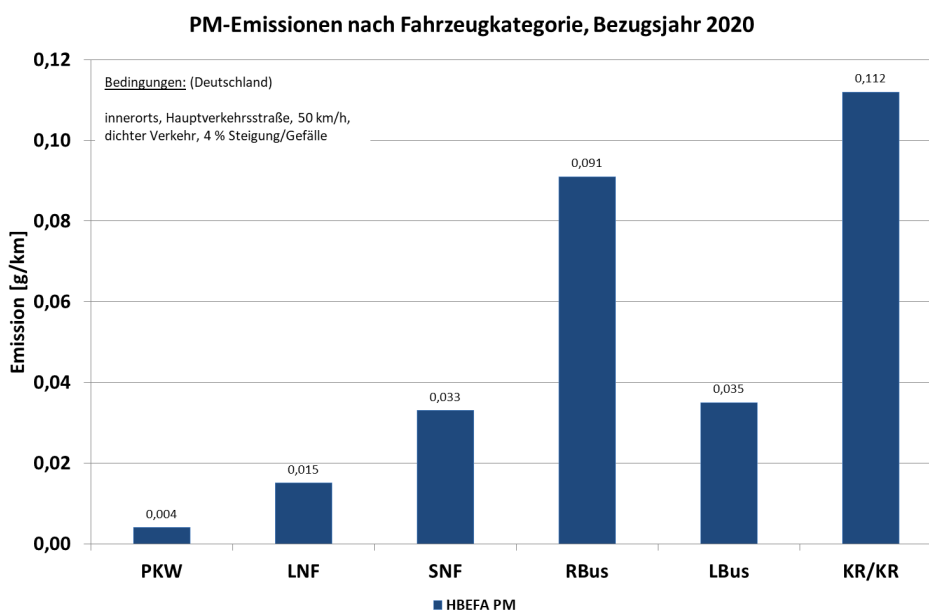


Abbildung 10-5
Partikelmasse-
Emissionen (warm)

10.1.2 Berechnung der Emissionseinsparung durch den Einsatz von Batterie- und Brennstoffzellenbussen unter Berücksichtigung von Kraftstoffverbrauch und Jahresfahrleistung

Zur Ermittlung der Einsparungspotentiale durch den Einsatz von Batterie- bzw. Brennstoffzellenbussen erfolgen Berechnungen zur Ermittlung der CO₂-Emissionen über den direkten Zusammenhang zwischen Kraftstoffverbrauch und Jahresfahrleistung. Unter Berücksichtigung von HBEFA wird hierfür fortführend ein Umrechnungsfaktor genutzt, der auf Grundlage der Menge des verbrannten Kraftstoffes und des darauffolgend unmittelbar freigesetzten CO₂ berechnet wird. Als erforderliche Kennwerte zum Durchschnittsverbrauch und der Jahresfahrleistung der zu elektrifizierenden Fahrzeuge sind folgende Werte anzusetzen:

	Solobusse	Gelenkbusse
Ø Jahresfahrleistung pro Fzg. [km]	64.700	36.980
Ø Dieselverbrauch [l/km]	0,32	0,49
Ø Elektroenergieverbrauch [kWh/km]	1,3	1,5
Ø H ₂ -Verbrauch [l/km]	0,075	0,11

Tabelle 10-2: Durchschnittliche Jahresfahrleistung und Verbräuche

Die daraus resultierenden CO₂-Einsparungen werden direkt aus den Dieselverbräuchen unter der Annahme von zu 100 % regenerativ erzeugter Elektroenergie bzw. Wasserstoff berechnet. Die Verbrennung eines Liters Diesel setzt etwa 2,65 kg CO₂ frei. Für die mit deren Erzeugung (Vorkette) verbundenen CO₂-Emissionen existieren in der Literatur verschiedene Angaben. Für die Berechnung wurden 0,34 kg CO₂ pro Liter Diesel für die Vorkette angesetzt, wodurch sich insgesamt 2,99 kg CO₂ pro Liter Diesel ergeben.

Regenerativ erzeugte Elektroenergie ist jedoch nicht gleichzusetzen mit CO₂-freier Erzeugung, da CO₂-Emissionen für die Errichtung der Erzeugungsanlagen eingerechnet werden müssen. Es wird auf die Zahlen des Umweltbundesamtes aus dem Jahr 2019 zurückgegriffen, die je kWh regenerativ erzeugter Elektroenergie 65 g CO₂-Emissionen ausweisen. Ein ähnlicher Ansatz gilt für mittels erneuerbarer Energie erzeugtem Wasserstoff, für den 3,7 kg CO₂ je Kilogramm anzusetzen sind.

Die CO₂-Einsparung durch die Substitution von Dieselbussen durch Batteriebusse gibt die nachfolgende Tabelle wieder.

	Solobusse	Gelenkbusse
Anzahl Fahrzeuge	32	14
Dieselgesamtverbrauch [l/a]	662.528	253.683
CO ₂ -Einsparung Traktion und Nebenverbraucher [t/a]	1.981	759
CO ₂ -Emissionen Zusatzheizer [t/a]	83	31
Gesamtverbrauch Elektroenergie [MWh/a]	2.692	777
CO ₂ -Emissionen regenerative Elektroenergie [t/a]	175	50
Gesamtverbrauch Wasserstoff [t/a]	155	57
CO ₂ -Emissionen regenerativer Wasserstoff [t/a]	575	211

Tabelle 10-3: Jährliche CO₂-Einsparung

Jährlich kommt es somit bei einer vollständigen Umstellung der Busflotte zu CO₂-Einsparungen in Höhe von etwa 2.515 t für Batteriebusse mit rein elektrischer Heizung bzw. 2.401 t für Batteriebusse mit Dieselzusatzheizer. In der Realität werden die Einsparungen zwischen diesen beiden Werten liegen, da sukzessiv Busse mit rein elektrischer Heizung und genügender Reichweite verfügbar sein werden.

Beim Einsatz von Brennstoffzellenbussen kommt es hingegen zu jährlichen CO₂-Einsparungen in Höhe von 1.954 t.

Zur Ermittlung der Emissionskennwerte für relevante Luftschadstoffe (NO₂, NO_x, PM) bestehen unterdessen keine belastbaren Umrechnungsfaktoren zwischen Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemission. Auf Grundlage der angeführten Emissionsfaktoren nach HBEFA, die als kilometerbezogene Werte für Linienbusse⁷ in verschiedenen Verkehrssituationen verallgemeinert vorliegen, wurde für die Busse daher ein Korrekturwert (KW) ermittelt, welcher eine Abschätzung der Schadstoffemissionen zulässt. Verwendet wurde der CO₂-Emissionsfaktor für das Jahr 2020 in Höhe von 1.469 g CO₂/km⁸ (siehe Abbildung 10-3). Setzt man die Durchschnittsverbräuche der Dieselbusse an, ergeben sich mit folgender Gleichung die Korrekturwerte gemäß Tabelle 10-4.

$$KW = \frac{CO_2(\text{direkt})}{CO_2(\text{HBEFA})}$$

mit CO₂ (direkt) anhand des Dieserverbrauchs direkt ermittelte CO₂-Emissionen
 CO₂ (HBEFA) mittels HBEFA und den Fahrweiten ermittelte CO₂-Emissionen

	Solobusse	Gelenkbusse
CO ₂ (direkt) [g/km]	957	1.465
CO ₂ (HBEFA) [g/km]	1.469	1.469
Korrekturwert KW	0,651	0,997

Tabelle 10-4: Korrekturwerte

Die Emissionsfaktoren für relevante Luftschadstoffe wurden anschließend mittels des Korrekturwertes angepasst. Durch die Multiplikation mit der jährlichen Gesamtfahrleistung der umzustellenden Busse, ergibt sich danach eine Minderung je Luftschadstoff wie folgt:

	HBEFA-Emissionskennwert [g/km]	Korrigierte HBEFA-Emissionskennwerte [g/km] ¹⁾	Luftschadstoffminderung [kg/a]
NO ₂	0,885	0,576 0,882	1.649
NO _x	3,822	2,488 3,811	7.124
PM	0,035	0,023 0,035	66

¹⁾ Solo- / Gelenkbusse

Tabelle 10-5: Jährliche Emissionsminderung für ausgewählte Luftschadstoffe

Luftschadstoffemissionen für Dieselzusatzheizungen sind nicht bekannt, weshalb sie in die Betrachtungen nicht einbezogen wurden.

10.2 Lärmreduktion

Batterie- und Brennstoffzellenbusse werden gemeinhin mit geringeren Geräuschemissionen assoziiert, was bezogen auf den Antrieb auch unbestritten ist. Seriöse und für den Praxiseinsatz verallgemeinerbare Angaben zu Außengeräuschen liegen jedoch nicht vor. Hinzu kommt, dass Geräuschmessungen unter normierten Bedingungen, insb. hinsichtlich der Fahrbahnbeschaffenheit durchgeführt werden, die eine Verallgemeinerung auf „normale“ Straßen nur bedingt zulassen, bei denen ab Geschwindigkeiten von mehr als 30 km/h die antriebsunabhängigen Fahrgeräusche eine zunehmende Rolle spielen.

Aus Einzelmessungen von Fahrzeugen sowie Vergleichsmessungen sind folgende öffentlich gemachte Anhaltswerte bekannt, wobei deren Werbecharakter zu beachten ist:

⁷ Anmerkung: im HBEFA wird nicht nach einzelnen Linienbusgrößen unterschieden

⁸ Verkehrssituation: innerorts, Hauptverkehrsstraße, Geschwindigkeit 50 km/h, +/- 4 % Geländeneigung

Messbezug	Quelle	Messwerte
Unterschied zwischen Diesel- und elektrischem Antrieb beim Verlassen von Haltestellen	Volvo	74 gegenüber 67 dB(A)
Unterschied zwischen Diesel- und elektrischem Antrieb im Leerlauf	Volvo	56 gegenüber 44 dB(A)
Geräuschreduktion von Batteriebusen gegenüber Dieselbusen beim Anfahren	Solaris	relative Reduktion um 16 %

Tabelle 10-6: Beispiele für den Vergleich der Geräuschemissionen von Diesel- zu Batteriebusen

Ergänzend werden in der hausinternen Datenbank *IVIdat* enthaltene Messdaten von Batteriebusen verschiedener Hersteller in anonymisierter Form aufgeführt:

- Fahrgeräusche beschleunigte Vorbeifahrt nach ECE-R51: Ø 76,9 dB(A)
- Innengeräusche nach DIN ISO 5128
 - o Konstantfahrt 50 km/h: 69,0 dB(A) – 70 dB(A)
 - o Volle Beschleunigung bis 60 km/h: Ø 70,1 dB(A)
 - o Standgeräusch mit Lüftung Stufe 1: 50,3 – 63,8 dB(A).

1 1 Einführungskonzept

11.1 Generelle Ausrichtung und zeitlicher Überblick

Für die HAVAG-Busflotte wird eine schrittweise Umstellung auf Batteriebusse angeregt. Eine (teilweise) Umstellung auf Brennstoffzellenbusse wird hingegen aus folgenden Gründen nicht empfohlen:

1. Zwar sind die HAVAG-Betriebsabläufe mit gegenwärtig verfügbaren Batteriebussen nicht 1:1 umstellbar, jedoch sind aufgrund von vergleichsweise vielen Kurzläufern keine zusätzlichen Fahrzeuge notwendig.
2. Bei Batteriebussen handelt es sich im Vergleich zu Brennstoffzellenbussen um eine deutlich einfachere Antriebstechnologie.
3. Das Angebot an Batteriebussen ist deutlich größer als das für Brennstoffzellenbusse.
4. Die Umstellung auf Batteriebusse ist mit geringeren Kosten als die Umstellung auf Brennstoffzellenbusse verbunden.
5. Auf dem bestehenden Betriebshofgelände der HAVAG in der Freimfelder Straße bestehen keine Platzreserven für die Errichtung der Wasserstoff-Tankinfrastruktur.
6. Gegenwärtig bestehen im Bedienungsgebiet der HAVAG keine Möglichkeiten, Wasserstoff bei Dritten zu tanken, wodurch die Infrastruktur- bzw. Lieferkosten insb. in der Anfangsphase der Umstellung in die Höhe getrieben werden.

Die Kosten für Voll- bzw. Zwischenlader und Gelegenheitslader unterscheiden sich nicht wesentlich. Dabei ist zu beachten, dass die Kosten auf dem aktuellen Stand der Technik ermittelt wurden. Es wird daher empfohlen, eine Entscheidung hinsichtlich der Ladestrategie auf das Jahr 2025 und den dann aktuellen Stand der Technik zu verschieben, da die Beschaffung der ersten Batteriebusse aus liefervertraglichen Gründen erst im Jahr 2027 ansteht.

Einen Überblick über die schrittweise Umstellung zwischen den Jahren 2027 bis etwa 2042 zeigt die nachfolgende Tabelle. Für Mini- und Midibusse wird auf Kapitel 5.2 verwiesen.

Jahr	Neubeschaffung		davon emissionsfrei		Aufwuchs emissionsfreie Fahrzeugflotte ¹⁾
	Solobusse	Gelenkbusse	Solobusse	Gelenkbusse	
2026	6	-	-	-	3 / -
2027	6 + 3 ²⁾	- ³⁾	4 + 3 ²⁾	-	10 / -
2028	6	-	4	-	14 / -
2029	6	-	4	-	18 / -
2030	2	2	1	-	19 / -
2033	-	2 + 1 ⁴⁾	-	2 + 1 ⁴⁾	19 / 3
2034	3	7 + 2 ²⁾	3	7 + 2 ²⁾	19 / 12
2038	6	-	6	-	25 / 12
2039	6 + 3 ²⁾	-	6 + 3 ²⁾	-	27 / 12
2040	6	-	6	-	29 / 12
2041	6	-	6	-	31 / 12
2042	2	2	2	2	32 / 14

¹⁾ Solobusse / Gelenkbusse ²⁾ zusätzliche Fahrzeuge bei Übernahme von Subunternehmerleistungen

³⁾ Übernahme der Gelenkbusleistungen erst im Jahr 2034 ⁴⁾ zzgl. Reservefahrzeug (s. Punkt 4.1)

Tabelle 11-1: Einführungsschritte

	Ausbaustufe 1	Ausbaustufe 2	Endausbau
Zeithorizont	2026 – 2029	2030 – 2035	2036 – 2041
Transformatorenleistung	2,6 MVA	3,9 MVA	3,9 MVA
Anzahl Ladegeräte 150 kW	17	22	22
Anzahl Ladegeräte 100 kW	5	17	25
Anzahl Ladegeräte 50 kW	-	5	8
Anzahl Werkstattladegeräte	1	1	1

Tabelle 11-2: Ausbaustufen für die Ladeinfrastruktur

Der Einführung von Batteriebusen läuft zeitlich um etwa zwei bis drei Monate voraus die Installation der Ladeinfrastruktur, die analog in drei zeitlich abgestimmte Ausbaustufen eingeteilt ist (Tabelle 11-2). Dabei sind die Verantwortlichkeiten und Leistungsabgrenzungen gemäß Tabelle 11-3 zu beachten.

Maßnahme	Verantwortlicher
Netzanschluss	Verkehrsbetrieb in Kooperation mit Netzbetreiber
Errichtung von Transformatoren als Kundenstation	Verkehrsbetrieb in Kooperation mit Netzbetreiber
Niederspannungsverkabelung zwischen Transformatoren und Ladegeräten	Verkehrsbetrieb
Fundamente für Ladegeräte und ggf. Überdachung	Verkehrsbetrieb
Weitere bauliche Maßnahmen	Verkehrsbetrieb
Ladegeräte samt Kabel, Stecker, PLC-Satelliten und Kabelrückholung liefern, montieren, anschließen und in Betrieb nehmen	Lieferant der Ladegeräte
Kabelverlegung zwischen Ladegeräten und Ladepunkten	Lieferant der Ladegeräte
Problembeseitigung Ladegeräte Fahrzeuge	Lieferanten der Ladegeräte / Busse
Dispositions- und Überwachungssysteme	Dritte, Abstimmung zw. Lieferanten und Verkehrsbetrieb

Tabelle 11-3: Verantwortlichkeiten und Leistungsabgrenzungen bei der Errichtung der Ladeinfrastruktur

11.2 Erste Schritte

11.2.1 Generelles Projektmanagement

Die Einführung von Batteriebusen ist in vielerlei Hinsicht eine Zäsur für Verkehrsbetriebe, da fast alle Bereiche davon unmittelbar betroffen sind. Neben positiven Erwartungen sind auch immer wieder Zugangshemmnisse gegenüber der neuen Technologie, insb. im Werkstattbereich und in der Umlauf- und Dienstplanung zu beobachten. Es empfiehlt sich daher, eine Arbeitsgruppe ins Leben zu rufen, in der zumindest folgende Fachbereiche vertreten sind:

- Werkstatt
- Betrieb
- Fahrdienst
- Infrastruktur
- IT-Verantwortliche
- Betriebsrat.

Weiterhin wird empfohlen, einen Hauptverantwortlichen mit möglichst viel Durchgriffsbefugnissen inkl. Aufgabendelegation zu benennen. Neben der internen Durchsetzung notwendiger Maßnahmen sollte der Hauptverantwortliche auch als Ansprechpartner gegenüber Dritten agieren. In vielen Fällen wurde diese Aufgabe an leitende Mitarbeiterinnen oder Mitarbeiter, zumeist aus den Bereichen Werkstatt oder Betrieb übergeben. Hierbei war und ist nicht selten eine zeitliche und fachliche Überforderung zu beobachten.

Dem Hauptverantwortlichen projektspezifisch untergeordnet sind Verantwortliche für die Ladeinfrastruktur, möglichst mit elektrotechnischem Hintergrund und die Fahrzeuge zu benennen.

11.2.2 Abstimmungen mit Gremien

Obwohl gesetzlich z. T. vorgeschrieben, bedarf die Einführung von Batteriebusen der Zustimmung durch z. B. den Aufsichtsrat. Dessen Information ist daher unabdingbar. Ebenso wird die Information des Stadtrates empfohlen. In diesem Zuge sollte abschließend die Form der Fahrzeugheizung kommuniziert und festgelegt werden. Alle für die Information des Aufsichtsrates oder sonstiger politischer Gremien notwendigen Daten finden sich im vorliegenden Bericht. Es wird empfohlen, klar die Unwägbarkeiten hinsichtlich der Kostenentwicklung zu kommunizieren.

Ein besonderer Aspekt in der Diskussion mit der Politik, speziell dem Aufgabenträger gilt dem Fahrzeugalter. Batteriebusse benötigen eine Nutzungsdauer von etwa 14 – 15 Jahre, um bei einem einmaligen Batterietausch halbwegs akzeptable Mehrkosten einzuhalten. Ebenso wird es für eine Übergangszeit notwendig sein, die Fahrzeugreserve leicht anzuheben, da Batteriebusse eine geringere Reichweite als Dieselbusse haben und noch nicht deren Verfügbarkeiten aufweisen. Zusätzliche Batteriebusse zu beschaffen ist zwar grundsätzlich möglich, wirtschaftlich aber zumindest fragwürdig. Es wird daher empfohlen, mit dem Aufgabenträger eine Öffnungsklausel für auszumusternde Dieselbusse, die als zusätzliche Reserve fungieren, zu verhandeln. Gleiches gilt für die Anhebung des zulässigen Flottendurchschnittsalters und des Maximalalters von Fahrzeugen.

11.2.3 Fahrzeugbeschaffung

Gegenwärtig betragen die Lieferzeiten für Batteriebusse etwa 12 – 13 Monate ab technischer Klärung. Ladegeräte und Transformatoren benötigen ähnliche Lieferzeiten.

Trotz einschlägiger Normen (z. B. ISO 15118) sind nach wie vor Probleme beim Laden von Batteriebussen zu beobachten, die ursächlich auf Fehler bei der Kommunikation mit der Ladeinfrastruktur zurückzuführen sind. Es wird empfohlen, diesen Aspekt über die nächsten zwei bis drei Jahre am Markt zu beobachten. In Abhängigkeit von den Ergebnissen sollte darüber entschieden werden, die Batteriebusse zusammen mit den Ladegeräten auszuschreiben. Dabei ist die Ausschreibung dann so zu gestalten, dass der Bushersteller als Generalauftragnehmer auftritt und der Lieferant der Ladegeräte als dessen Unterauftragnehmer agiert. Hintergrund dieser Vorgehensweise ist die Übertragung der Verantwortung für das reibungslose Zusammenspiel zwischen Fahrzeugen und Ladegeräten an genau einen Hersteller. Bei der Ausschreibung ist zu beachten, dass die angestrebten Losgrößen ein typisches Ziel für Neueinsteiger auf dem europäischen Busmarkt darstellen.

11.2.4 Beschaffung und Errichtung der Ladeinfrastruktur, Energielieferung

Hinsichtlich der Beschaffung der Ladegeräte wird auf Punkt 11.2.3 verwiesen.

Für die Sicherstellung einer pünktlichen Inbetriebnahme der Ladegeräte wird die zeitnahe Beauftragung der Vor- und Ausführungsplanung gemäß HOAI für die elektrischen Anlagen und die baulichen Maßnahmen dringend empfohlen. Hierbei ist von Beginn an der Netzbetreiber einzubeziehen.

Zeitlich ist im Planungsprozess der elektrische Teil zu priorisieren, um rechtzeitig die Beschaffung des Transformators inkl. Mittelspannungsschaltanlage und Gebäude einleiten zu können.

Parallel ist mit dem Energielieferanten ein entsprechender Vertrag abzuschließen. Sobald die Festlegung zur Heizungsform vorgenommen wurde und die anzustrebenden Jahresfahrleistungen bekannt sind, steht der Autor dieses Berichtes zur Verfügung, um die zu erwartenden Energieverbräuche für die Verhandlungen mit dem Energielieferanten abzuschätzen.

11.2.5 Arbeitsschutz, Bauliche Maßnahmen und Brandschutz

Für eine zügige Errichtung der Ladeinfrastruktur ist die zeitnahe Beauftragung der Vor- und Ausführungsplanung notwendig.

Folgende Institutionen sind dringend in die Planung einzubeziehen bzw. sind darüber zu informieren:

1. Bau- und Umweltbehörde
Obwohl die Einführung von Batteriebussen und die Errichtung der Ladeinfrastruktur keine wesentlichen Beeinträchtigungen des Stadtbildes oder der Umwelt darstellen, sollten die Bau- und die Umweltbehörde frühzeitig informiert werden.
2. Feuerwehr
Es wird empfohlen, bei der Vor- und Ausführungsplanung die zuständige Feuerwehr einzuvernehmen, um deren Forderungen und Wünsche einfließen zu lassen. Zu beachten ist, dass das Thema Batteriebusse auch für Feuerwehren ein weitgehend neues Thema ist, was in der Vergangenheit zu teilweise nicht umsetzbaren oder teuren Forderungen geführt hat und immer noch führt. Zu nennen seien bspw. nicht umsetzbare Fahrzeugreparaturen oder Rückhaltebecken für Löschwasser. In der Diskussion sollte daher auf die Begründung der Forderungen und bestehende Normen und Gesetze geachtet werden. Sobald die ersten Fahrzeuge geliefert wurden, ist ein Termin mit der Feuerwehr zu vereinbaren, um diese mit der Fahrzeugspezifik vertraut zu machen. Dabei sollte eine Kopie der vom Fahrzeughersteller bereitzustellenden Rettungskarte übergeben werden.

3. Berufsgenossenschaft
Obwohl bei den übergebenen Vorüberlegungen typische Forderungen der Berufsgenossenschaft (z. B. ausreichende Breiten zwischen den Fahrzeugen) beachtet wurden, sollte die Berufsgenossenschaft insb. bei der Ausrüstung der Werkstatt einvernommen werden.
4. Versicherung
Seitens des Sachversicherers wurden aus Sicht des Autors überzogene und in der Praxis nur schwer umsetzbare Forderungen gegenüber der HAVAG aufgemacht. Insb. die verlangte Separierung von Diesel- und Batteriebusse, für die es keine normative Vorgabe gibt, erschwert und verteuert die Umstellung. Dies gilt insb. dann, wenn die Ladeinfrastruktur ausschließlich auf der Bestandsabstellfläche untergebracht werden muss. Es wird angeregt, in einem Termin mögliche Alternativen zu diskutieren.

11.2.6 Erweiterungsfläche

Die weitergehende Einführung von Batteriebussen setzt einen Werkstattneubau voraus, da die Bestandswerkstatt weder über die notwendige Länge, Breite und insb. Höhe verfügt. Am gegenwärtigen Standort der Buswerkstatt ist ein Neubau nur unter massiven Eingriffen in benachbarte Einrichtungen der Straßenbahn und unter Aufgabe der Straße C möglich.

Mithin steht die zeitnahe Entscheidung über die Einbeziehung der Erweiterungsfläche im Osten der aktuellen Betriebshoffläche an. Deren Nutzung würde nicht nur einen Werkstattneubau ermöglichen. Das vergrößerte Flächenangebot würde einen besseren Brandschutz durch größere Abstände zwischen den Bussen bzw. kleinere Brandabschnitte und die Zentralisierung der Ladeinfrastruktur für alle HAVAG-Nutzfahrzeuge ermöglichen.

11.2.7 Planungs-, Dispositions- und Überwachungssysteme

S. Punkt 6.8!

11.2.8 Mitarbeiterschulung

Hinweise zu notwendigen Mitarbeiterschulungen sind Punkt 8.3 entnehmen. Nicht fahrzeugspezifische Schulungen werden von mehreren Anbietern, z. B. TÜV Süd und Dekra angeboten. Fahrzeugspezifische Schulungen sind im Zuge der Busbeschaffung als Lieferumfang des Lieferanten einzuplanen. Gleiches gilt für die Schulungen an der Ladeinfrastruktur.

1 2 Zusammenfassung

Die Umstellung auf emissionsfreie Antriebe wird die HAVAG vor enorme organisatorische, planerische und finanzielle Herausforderungen stellen. Der vorliegende Bericht enthält die Ergebnisse einer eingehenden Analyse der Bestandsflotte und der Betriebsabläufe, um den Umstellungsprozess mit minimalem Mehraufwand und zeitlich sinnvoll gestaffelt vorzunehmen.

Untersucht wurden Batterie- und Brennstoffzellenbusse als Alternativen zu den gegenwärtig betriebenen Dieseln. Für Batteriebusse wurden zwei Ladestrategien (Voll- bzw. Zwischenlader und Gelegenheitslader) untersucht.

Die Analyse der Betriebsabläufe (Umlaufpläne) zeigte deutlich, dass gegenwärtig ein substantieller Anteil der Umlaufpläne nicht 1:1 auf Batteriebusse umstellbar ist, da deren Reichweiten dafür noch nicht hoch genug sind. Da der Betriebsablauf der HAVAG jedoch neben einigen Langläufern auch eine erhebliche Anzahl von Kurzläufern (nur Früh- oder Spätspitze) aufweist, ist es durch eine Neuorganisation der Betriebsabläufe möglich, alle Fahrplanleistungen ohne zusätzliche Fahrzeuge mit Batteriebussen der aktuellen Generation zu bedienen. Dabei sind jedoch zusätzliche Ein- und Aussetzfahrten in Kauf zu nehmen. Ebenso wird zumindest für die Anfangszeit der Einsatz von Hybridheizungen notwendig sein.

Der Einsatz von Gelegenheitsladern ist mit keinen oder nur unwesentlichen betrieblichen Mehraufwänden verbunden. Allerdings müssten an den Endhaltestellen Büschdorf, Heide-Universitätsklinikum, Kröllwitz, Rennbahnplatz und Südstadt insgesamt neun weitere Schnellademöglichkeiten errichtet werden. Hinsichtlich der Kosten bestehen zwischen den beiden Ladestrategien keine wesentlichen Unterschiede.

Eine Bedienung mit Brennstoffzellenbussen ist technologisch ebenso möglich, jedoch ist deren Beschaffung aus folgenden Gründen nicht zielführend:

1. Bei Brennstoffzellenbussen handelt es sich im Vergleich mit Batteriebussen um eine deutlich komplexere Antriebstechnologie, was mit Mehraufwänden in der Wartung und Instandhaltung verbunden ist.
2. Das Angebot an Batteriebussen ist deutlich größer als das für Brennstoffzellenbusse. Der dadurch vorhandene Wettbewerb spiegelt sich in niedrigeren Beschaffungspreisen wider.
3. Die Umstellung auf Batteriebusse ist mit geringeren Kosten als die Umstellung auf Brennstoffzellenbusse verbunden. Hierbei spielen die volatilen und gegenwärtig sehr hohen Wasserstoffbezugpreise eine entscheidende Rolle.
4. Auf dem bestehenden Betriebshofgelände der HAVAG in der Freimfelder Straße bestehen keine Platzreserven für die Errichtung der Wasserstoff-Tankinfrastruktur.
5. Gegenwärtig bestehen im Bedienungsgebiet der HAVAG keine Möglichkeiten, Wasserstoff bei Dritten zu tanken, wodurch die Infrastruktur- bzw. Lieferkosten insb. in der Anfangsphase der Umstellung in die Höhe getrieben werden.

Grundsätzlich geht die Studie von einer vollständigen Umstellung auf Batteriebusse aus, für die ein Zeitraum von etwa 15 Jahren zwischen 2027 und 2042 vorgesehen ist. Der Umstellungsplan orientiert sich am Alter der Bestandsfahrzeuge sowie der vertraglichen Bindung zum Kauf von Dieseln bis zum Jahr 2030 und wurde nach der Prämisse erarbeitet, nur ohnehin auszutauschende Fahrzeuge durch Batteriebusse zu ersetzen. Damit werden die zusätzlichen Kosten minimiert. Eine Kürzung bzw. Streckung des Umstellungszeitraums ist jedoch im Rahmen der Regelungen des Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetzes grundsätzlich möglich.

Einer zeitnahen Entscheidung bedarf der Neubau der Buswerkstatt und deren Standort, da die Bestandswerkstatt nicht für Batteriebusse geeignet ist. Es wird nachdrücklich empfohlen, für den Neubau der Buswerkstatt die Kleingartenfläche im Osten des Betriebshofes Freimfelder Straße zu erwerben. Die Betriebshoferweiterung wird als unabdingbar angesehen.

Neben dem Bau einer ausreichend dimensionierten und zeitgemäßen Buswerkstatt bietet die Betriebshoferweiterung zusätzliche Vorteile:

1. Implementierung weiterer und insb. kleinteiliger Brandabschnitte, um im Falle eines Brandes die Anzahl der betroffenen Busse auf ein für die HAVAG verträgliches Maß zu reduzieren
2. Energetisch günstige Platzierung der Transformatoren (Minimierung der Leitungsverluste)
3. Ausbaureserven im Falle von Leistungserweiterungen auch unter Beachtung kleinteiliger Brandabschnitte
4. Zusammenfassung der Ladeinfrastruktur für die gesamte Nutzfahrzeugflotte der HAVAG
5. Einrichtung einer normgerechten Quarantänefläche.

Eine (teilweise) Verlagerung von Batteriebussen in den Betriebshof Rosengarten ist nicht zielführend, da

1. die dort vorhandene Fläche keine Vorteile gegenüber der Bestandsabstellfläche im Betriebshof Freimfelder Straße bietet,

2. der Aufbau von zwei Ladeinfrastrukturen mit zusätzlichen Kosten verbunden wäre,
3. die Fahrzeuge weit von der Buswerkstatt abgestellt wären und
4. dieser Schritt zusätzliche betriebliche Restriktionen und Mehraufwände zur Folge hätte.

Die Nutzung der Fläche auf dem Grundstück Freimfelder Straße 43 wird ohne weitere angrenzende Flächen ebenfalls nicht empfohlen, da insb. der Abstand zu einem Werkstattneubau im Bestandsbetriebshof ungünstige technologische Abläufe zur Folge hätte. Des Weiteren ist die Leistungsreserve im Mittelspannungsnetz nicht ausreichend, um damit weitere Fahrplanleistungen abzudecken.

Die Umstellung auf Busse mit emissionsfreien Antrieben ist mit deutlichen Mehrkosten im Vergleich mit Dieselnissen verbunden. Für die vollständige Umstellung der HAVAG-Busflotte auf Batteriebusse (Volllader) fallen nach heutigem Preisstand Erstinvestitionskosten von insg. rund 45,3 Mio. € an, die sich aufteilen in ca. 39,8 Mio. € für die Fahrzeuge (inkl. Subunternehmer-Leistungen) samt Ersatzbatterien und gut 5,5 Mio. € für die Ladeinfrastruktur, die Werkstattausrüstungen und Schulungen.

Auch wenn für diese Investitionskosten Fördermöglichkeiten durch den Bund zur Verfügung stehen, ist mit spürbaren Mehrkosten gegenüber einem Dieselnissenbetrieb zu rechnen. Diese werden auch nicht vollständig durch sogenannte THG-Quoten-Erlöse, die ohnehin sehr volatil sind, kompensiert. Für Solobusse ist je nach Fördermöglichkeit und THG-Quotenerlösen beim heutigen Preisstand mit Mehrkosten von 0,54 – 1,28 €/Fz-km und für Gelenkbusse mit 0,56 – 1,91 €/Fz-km zu rechnen.

Ohnehin sind Kostenprognosen gegenwärtig nur sehr bedingt möglich, da insb. Energie- und Dieselnissepreise kaum seriös über einen längeren Zeitraum vorhersehbar sind und in Batteriebusen Materialien (z. B. Lithium, seltene Erden) verbaut werden, bei denen eine Verwicklung in internationale Handelskriege nicht auszuschließen ist.

Den Mehrkosten stehen in Abhängigkeit des Heizungskonzepts jährliche Einsparungen an CO₂-Emissionen zwischen rund 2.401 und 2.515 t gegenüber, sofern regenerativ erzeugte Elektroenergie unterstellt wird.

Lokal werden pro Jahr etwa 1.649 kg NO₂, 7.124 kg NO_x und 66 kg PM eingespart.

Anlage 1 – Lagepläne des Betriebshofs mit Ladeinfrastruktur – Bestandsfläche

Die nachfolgenden Lagepläne zeigen die Entwicklung der Ladeinfrastruktur in drei Ausbaustufen gemäß Tabelle 6-2:

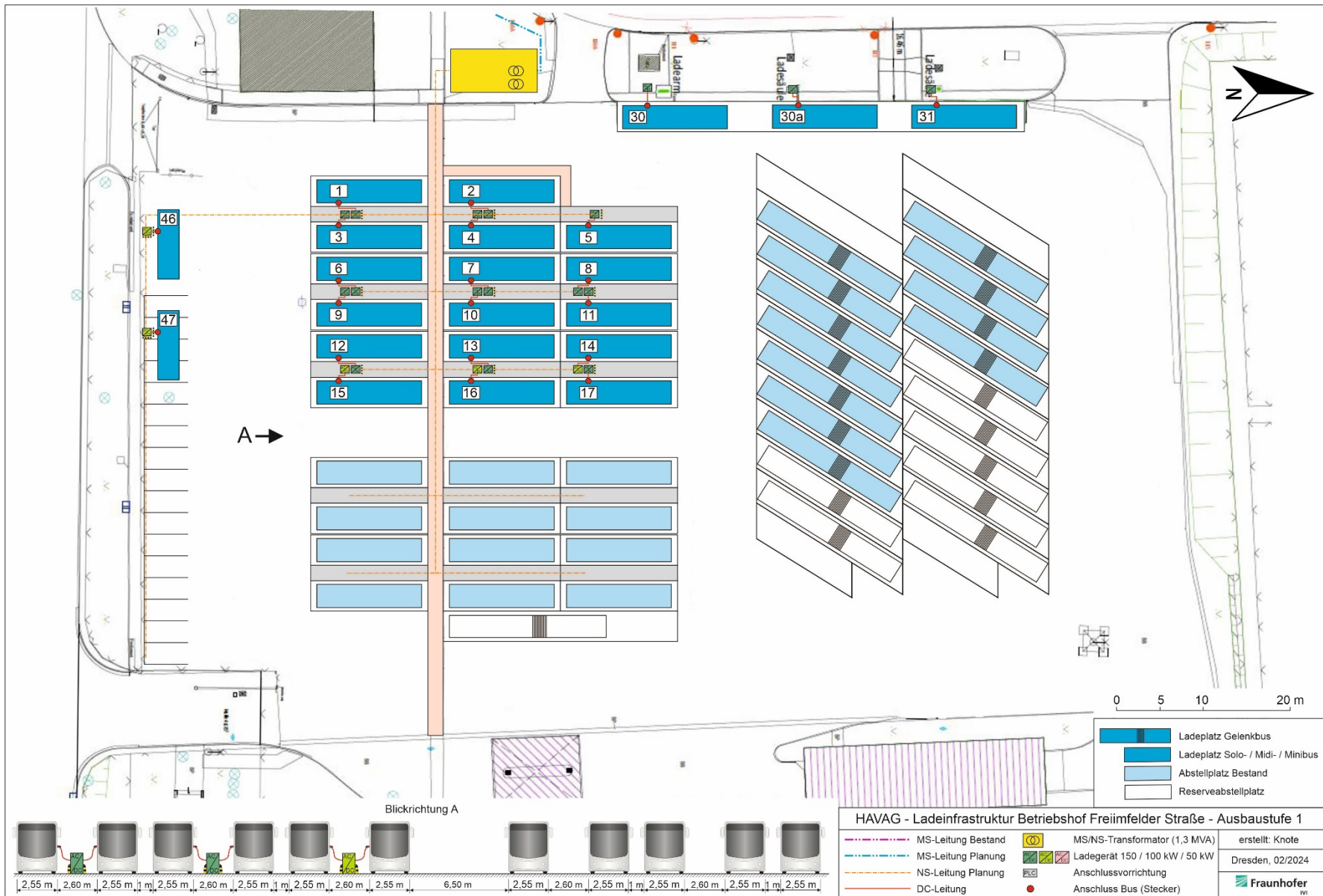
- Ausbaustufe 1: 2026 – 2029
- Ausbaustufe 2: 2030 – 2035
- Endausbau: bis etwa 2041

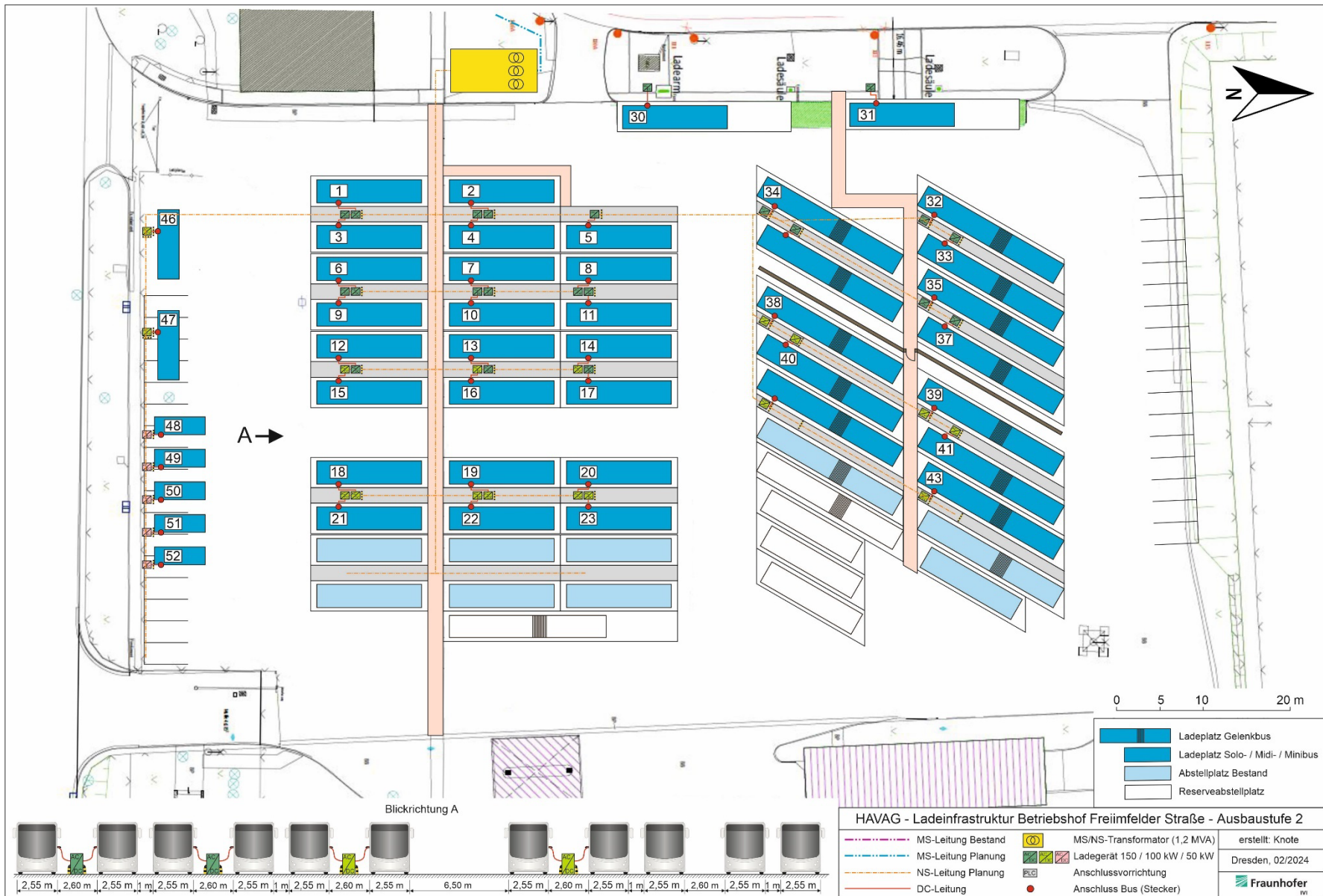
Zwischenschritte sind selbsterklärend und können anhand der Ladepunktnummern eigenständig abgeleitet werden.

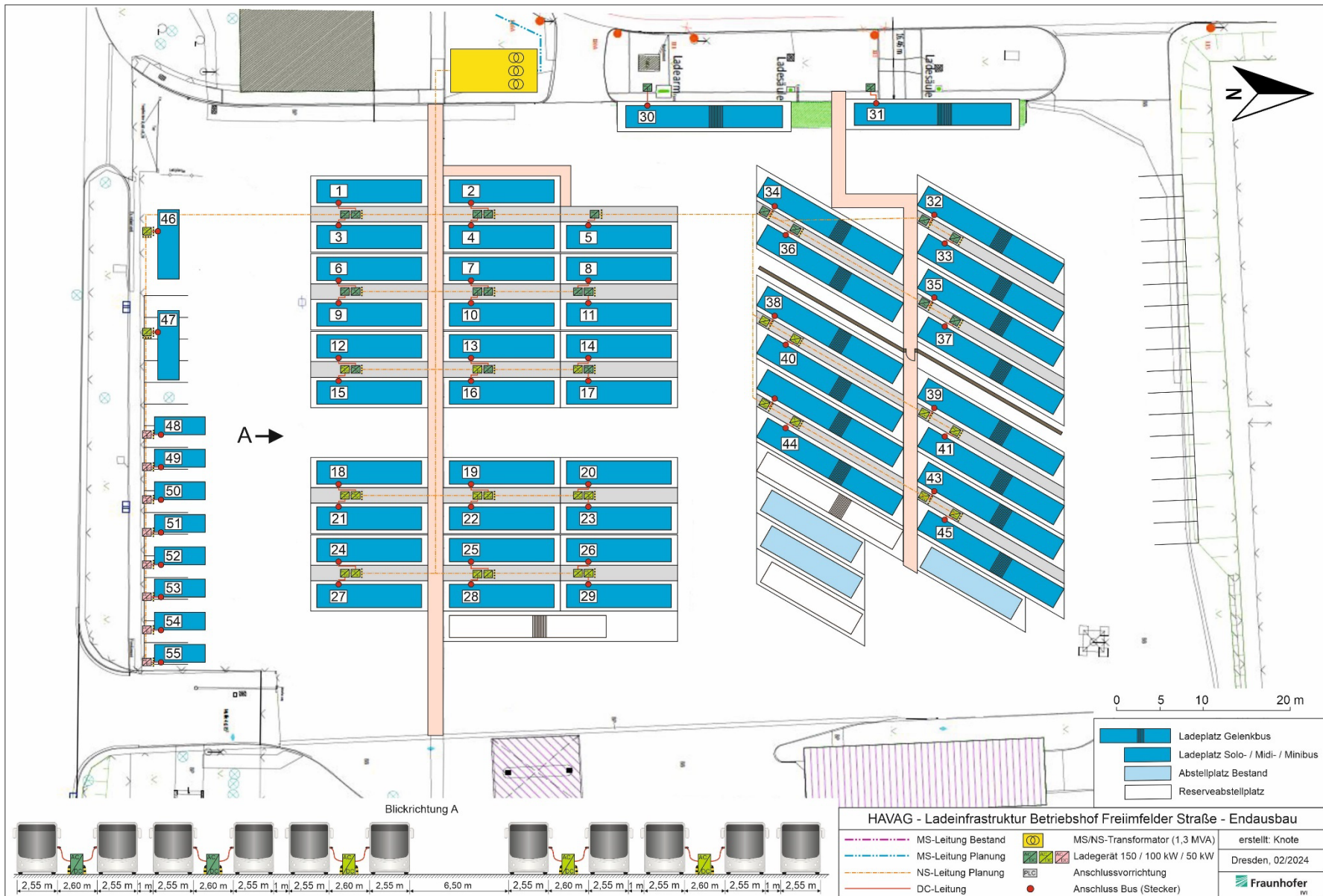
Dargestellt sind

- der Standort der Transformatorstation,
- der Standort und die Ladeleistung jedes einzelnen Ladegerätes,
- die Kabeltrassen sowie
- Brandschutzmaßnahmen.

Nicht dargestellt sind zusätzliche Brandschutzwände für die Abtrennung der Diesel- von den Batteriebussen. Bleibt diese Forderung seitens der Versicherung bestehen, kann dies nur durch wandernde Brandschutzwände erreicht werden, da die vorhandenen Platzreserven keine weiteren Unterteilungen mehr zulassen.







Anlage 2 – Lageplan des Betriebshofs mit Ladeinfrastruktur – inkl. Erweiterungsfläche



Anlage 3 – Lagepläne der Abstellfläche inkl. Ladeinfrastruktur im Grundstück Freimfelder Straße 43



