



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

Koordiniert durch:



Umgesetzt durch:



Machbarkeitsstudie zur Eignung vorhandener Betriebshöfe für die Umstellung auf emissionsfreie Antriebe im Main-Tauber-Kreis

Abschlussbericht

Auftraggeber: Verkehrsverbund Rhein-Neckar GmbH

Prof. Dr.-Ing. Thoralf Knotte

Dresden, März 2025

| Version | Autor | Datum | Änderungen |
|---------|--------|------------|--|
| 0.1 | Knotte | 03.07.2024 | Entwurf ohne unternehmensspezifische Rückmeldungen |
| 0.2 | Knotte | 25.07.2024 | Entwurf Abschlussbericht |
| 1.0 | Knotte | 23.10.2024 | Finale Version |
| 2.0 | Knotte | 10.03.2025 | Finale Version mit Berichtigungen |
| | | | |
| | | | |

Inhalt

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 4 |
| 2 | Stand der Technik | 5 |
| 2.1 | Datengrundlage | 5 |
| 2.2 | Batteriebusse – Teiltechnologien | 5 |
| 2.2.1 | Grundsätzlicher Aufbau von Batteriebussen | 5 |
| 2.2.2 | Elektroenergiespeicher | 6 |
| 2.2.3 | Heizung | 7 |
| 2.2.4 | Klimatisierung | 9 |
| 2.3 | Batteriebusse – Ladestrategien | 9 |
| 2.3.1 | Volllader (auch Depotlader) | 10 |
| 2.3.2 | Gelegenheitsladung (auch Opportunity Charging) | 10 |
| 2.3.3 | Ultraschnellladen (auch Flash Charging) | 11 |
| 2.3.4 | Vergleich der Ladestrategien | 11 |
| 2.4 | Kommerziell verfügbare Batteriebusse | 12 |
| 2.4.1 | Solobusse (ca. 12 m) | 12 |
| 2.4.2 | Gelenkbusse (ca. 18,0 / 18,75 m) | 16 |
| 2.4.3 | Investitionskosten | 18 |
| 2.5 | Batteriebusse – Ladeinfrastruktur | 18 |
| 2.6 | Batteriebusse – Normungslage | 21 |
| 3 | Bewertungskriterien | 23 |
| 4 | Betriebliche Bewertung | 24 |
| 4.1 | Randbedingungen | 24 |
| 4.2 | Datengrundlage | 24 |
| 4.3 | Fahrzeugspezifikationen | 24 |
| 4.4 | Vorgehensweise | 25 |
| 4.4.1 | Volllader | 26 |
| 4.4.2 | Gelegenheitslader | 26 |
| 4.5 | Ergebnisse | 26 |
| 4.5.1 | Volllader | 26 |
| 4.5.2 | Gelegenheitslader | 27 |
| 4.5.3 | Fazit | 28 |
| 5 | Betriebshöfe | 29 |
| 5.1 | Aufbau der Ladeinfrastruktur auf Betriebshöfen | 29 |
| 5.2 | Planungs-, Dispositions- und Überwachungssysteme | 30 |
| 5.3 | Werkstattausrüstung für Batteriebusse | 33 |
| 5.4 | Brandschutz | 35 |
| 5.5 | Betriebshöfe der untersuchten Verkehrsunternehmen | 36 |
| 5.5.1 | Ladeleistungen und Netzanschlussleistungen | 37 |
| 5.5.2 | | 38 |
| 5.5.3 | | 38 |
| 5.5.4 | | 38 |
| 5.5.5 | | 39 |
| 5.5.6 | | 39 |
| 5.5.7 | | 39 |
| 5.5.8 | | 40 |
| 5.5.9 | | 40 |
| 5.5.10 | | 40 |
| 5.5.11 | | 41 |
| 5.5.12 | | 41 |
| 5.6 | Investitions- sowie Wartungs- und Instandhaltungskosten | 41 |
| 5.7 | Schulungskosten | 43 |
| 5.8 | Eignung der Betriebshöfe für Brennstoffzellenbusse | 43 |
| 6 | Kostenvergleiche | 45 |
| 6.1 | Mengenmodell und Betrachtungshorizont | 45 |
| 6.1.1 | Dieselbusse | 45 |
| 6.1.2 | Batteriebusse | 45 |
| 6.2 | Fördermöglichkeiten | 46 |

| | | |
|---|---|-----------|
| 6.2.1 | Bundesförderung | 46 |
| 6.2.2 | Förderung durch das Land Baden-Württemberg | 46 |
| 6.3 | THG-Quote | 47 |
| 6.4 | Förderszenarien | 48 |
| 6.5 | Kostenvergleiche | 48 |
| 6.5.1 | Kalkulationsgrundlagen | 48 |
| 6.5.2 | Ergebnisse | 49 |
| 7 | Zusammenfassende Bewertung und Handlungsempfehlungen | 52 |
| 7.1 | Zusammenfassende Bewertung | 52 |
| 7.2 | Handlungsempfehlungen | 53 |
| 7.2.1 | Rahmenbedingungen | 53 |
| 7.2.2 | Auszuschreibende Verkehrsleistungen | 53 |
| 7.2.3 | Brennstoffzellenbusse | 54 |
| 7.2.4 | Kostenübersicht | 54 |
| Anlage 1 – Betriebshöfe – Grobskizzen der Ladeinfrastruktur und der Brandschutzmaßnahmen | | 56 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---------|---|
| AC | alternating current, Wechselstrom |
| CCS | Combined Charging System, in Deutschland etablierter Ladestandard |
| COP | Coefficient of Performance |
| DC | direct current, Gleichstrom |
| HVO 100 | Hydrotreated Vegetable Oil, Hydrierte Pflanzenöle ohne Beimischungen |
| ITCS | Intermodal Transport Control System, rechnergestütztes Betriebsleitsystem |
| MS | Mittelspannung |
| NMC | Nickel-Mangan-Cobalt |
| OCP | Open Charge Point Protocol – Kommunikationsprotokoll für die zentrale Steuerung von Ladegeräten |
| ÖPNV | Öffentlicher Personennahverkehr |
| SOC | State of Charge, Ladezustand einer Batterie |
| THG | Treibhausgase |
| VAS | Value Added Services |
| VDV | Verband Deutscher Verkehrsunternehmen |

1 Einleitung

Im vorliegenden Dokument werden die Möglichkeiten für den Einsatz von emissionsfreien Bussen im Gebiet der Verkehrsgesellschaft Main-Tauber mbH (nachfolgend VGMT) beschrieben.

Die VGMT selbst agiert nicht als Verkehrsunternehmen. Vielmehr werden die Verkehrsleistungen im Auftrag der VGMT durch insg. 10 Verkehrsunternehmen von 11 Betriebshöfen aus auf Basis von Verkehrsverträgen erbracht.

Die Struktur der agierenden Verkehrsunternehmen ist sehr heterogen. Neben großen Verkehrsunternehmen wie der SWEG Südwestdeutsche Landesverkehrs-GmbH sind auch kleine private Busunternehmen mit der Erbringung von Verkehrsleistungen betraut.

Gemäß Aufgabenbeschreibung und Angebot beschränken sich die Untersuchungen in der vorliegenden Studie auf Batteriebusse mit unterschiedlichen Ladestrategien.

Die Umstellung auf emissionsfreie Antriebe stellt Verkehrsunternehmen vor enorme Herausforderungen. Hierzu gehören insb. folgende Aspekte:

1. Speziell Batteriebusse können nach wie vor in vielen Fällen betriebliche Abläufe (Umlaufpläne) nicht 1:1 bedienen, da die Gesamtlänge eines Umlaufplans oft über der möglichen Reichweite von Batteriebussen liegt.
2. Die Integration der Ladeinfrastruktur sowie von notwendigen Brandschutzmaßnahmen in Bestandbetriebshöfen ist in vielen Betriebshöfen nur schlecht, in manchen Betriebshöfen nahezu unmöglich.
3. Betriebshöfe sind heute i. d. R. elektrotechnisch nicht so angebunden, dass eine Nachladung mehrerer Batteriebusse möglich ist. Daher ist die Anbindung an ein leistungsfähiges, übergeordnetes Netz notwendig. Hierbei handelt es sich i. d. R. um Mittelspannungsnetze.
4. Die Ausrüstung von Werkstätten, speziell mit Dacharbeitsständen und Portalkrananlagen ist aufgrund fehlender Platz- und Höhenreserven nicht immer möglich.
5. Speziell das Werkstatt- aber auch das Fahrpersonal ist nicht für den Umgang mit Batteriebussen, speziell der darin verbauten Hochvolttechnik geschult.
6. Nicht zuletzt ist die Umstellung auf Batteriebusse eine enorme finanzielle Herausforderung für private Verkehrsunternehmen dar.

Übergeordnetes Ziel bei der Umstellung des Linienbusverkehrs im VGMT-Netz auf Batteriebusse ist die Beibehaltung der aktuellen Auftragnehmerstruktur. Kernaufgaben der Studie sind daher,

- die Beschreibung einer Umstellungsstrategie mit gleichzeitiger Minimierung der Mehraufwände sowie
- die Eignung der gegenwärtig mit der Erbringung von Verkehrsleistungen beauftragten Verkehrsunternehmen zu bewerten.

Teil der Umstellungsstrategie kann es daher bewusst sein, dass bestimmte Linien oder Linienbündel, in der nächsten Vergabe für die Bedienung mit Dieselnissen, ggf. unter Verwendung von Biodiesel oder HVO 100 auszusprechen, um die Mehrkosten auf ein verträgliches Maß zu reduzieren.

Im vorliegenden Bericht werden zunächst die Kerntechnologien von Batteriebussen und der zugehörigen Ladeinfrastruktur beschrieben. Nach einer Definition der Bewertungskriterien werden im nächsten Schritt die Ergebnisse der betrieblichen Bewertungen (Energiebilanzierung von übergebenen Umlaufplänen) dargelegt. Anschließend erfolgt die Beschreibung der Betriebshöfe sowie der Möglichkeiten, Ladeinfrastrukturen sowie Brandschutzmaßnahmen in diese zu integrieren.

In einem weiteren Schritt werden die Mehrkosten eines Batteriebusseinsatzes gegenüber dem Betrieb von Dieselnissen beschrieben.

Abschließend erfolgen eine zusammenfassende Bewertung sowie die Darlegung von Empfehlungen für die schrittweise Umstellung auf Batteriebusbetrieb.

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 – Teiltechnologien

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

2.2.1 Grundsätzlicher Aufbau von Batteriebussen

Abbildung 2-1 zeigt den grundsätzlichen Aufbau von Batteriebussen.

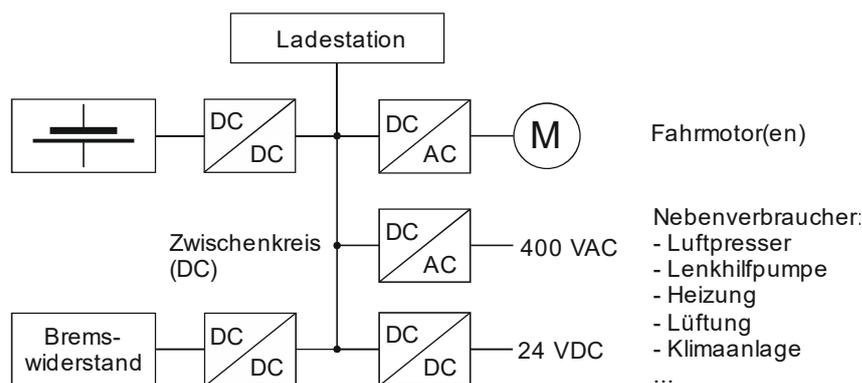


Abbildung 2-1
Grundaufbau einer
Traktionsausrüstung
von Batteriebussen
(ohne Steuerung)

Grundlage für die Traktionsausrüstung eines Batteriebusse stellt der sog. Gleichspannungs-Zwischenkreis dar, über den die Anbindung aller Komponenten der Traktionsausrüstung sowie der Nebenverbraucher erfolgt. In Abbildung 2-1 wird deutlich, dass in einem Batteriebus mehrere Spannungsebenen und -formen miteinander vereint werden müssen. Dies erfolgt über den Gleichspannungs-Zwischenkreis mit Hilfe von Umrichter 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.

2.2.2 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 Batteriebusen 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).

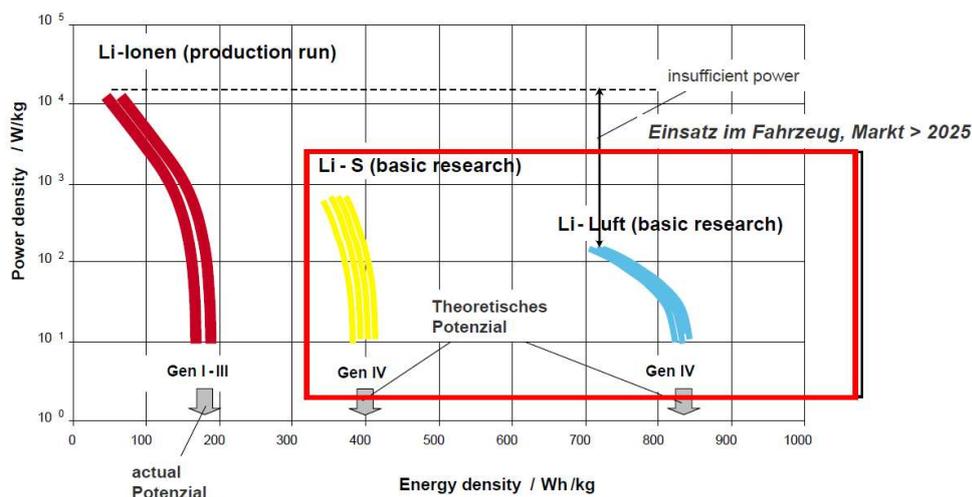


Abbildung 2-2
Energie- und
Leistungsdichten
von Batteriezellen;
Quelle: Hoppecke

Hinsichtlich der Entwicklung von Zelltechnologien muss zwischen aktuellen und zukünftigen Zelltechnologien unterschieden werden. Ein Beispiel hierfür zeigt Abbildung 2-2. Zelltechnologien, die derzeit kommerziell verfügbar sind 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.

Abbildung 2-3 gibt einen Überblick über in der Vergangenheit 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.

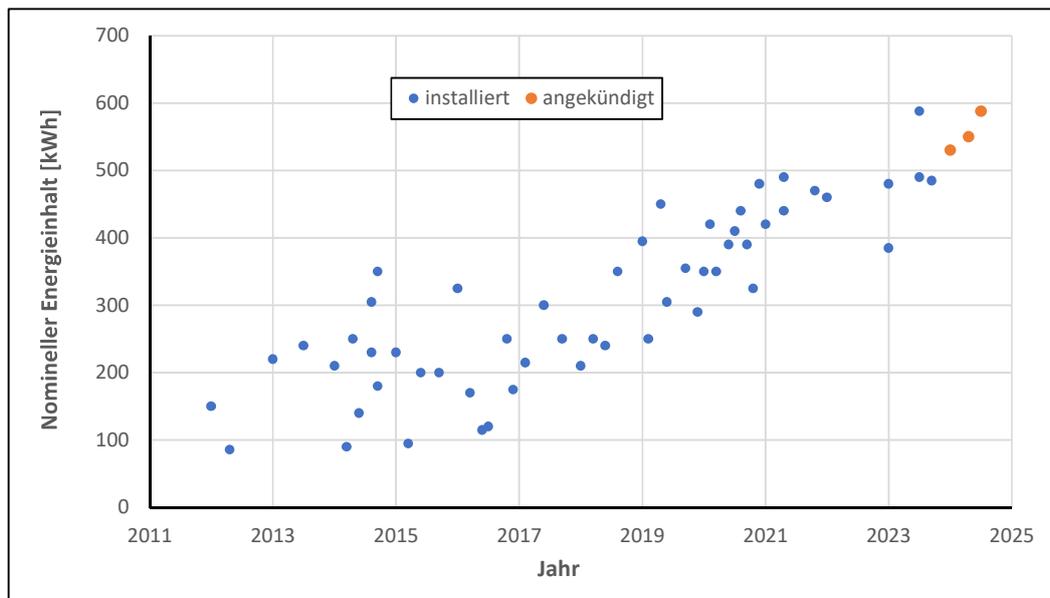


Abbildung 2-3
Bereits verbaute
(blau) und
angekündigte
(orange) Energie-
speichergrößen in
Solobatteriebussen
(Quelle: IVdat)

Bei einer vorsichtigen Extrapolation der Werte bis zum Jahr 2028 wird eine evolutionäre Weiterentwicklung bestehender Zelltechnologien mit einer Steigerung der gewichtsbezogenen Energiedichte um maximal 25 % unterstellt. Gleichzeitig wird bis etwa zum Jahr 2028 die Entwicklung moderner Heiztechnologien (z. B. Wärmepumpen) als abgeschlossen angesehen.

Zelltechnologien der sog. nächsten Generation werden voraussichtlich deutlich höhere Energiedichten aufweisen, wobei zurzeit noch offen ist, inwieweit dies mit einer geringeren Zyklfestigkeit, 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 nach 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 bot die französische Firma Blue Solutions, die u. a. EvoBus mit Feststoffbatterien (440 kWh) für den eCitaro 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.

2.2.3 Heizung

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

Abbildung 2-4 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.

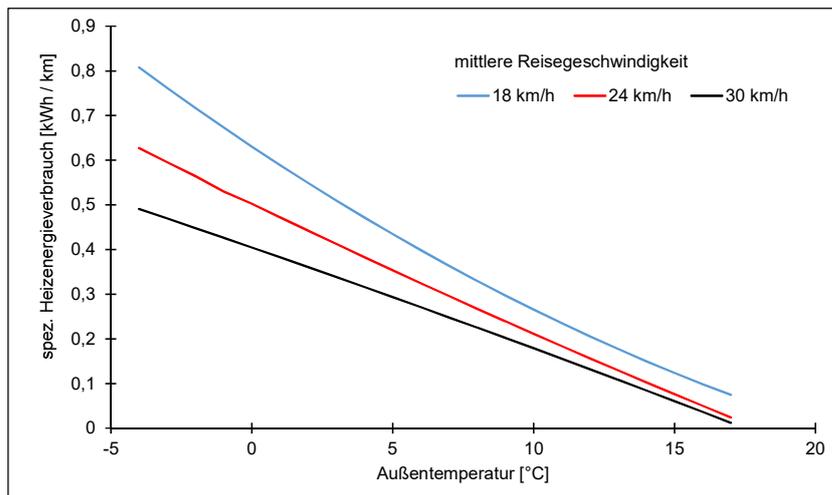


Abbildung 2-4
Heizenergiebedarf
eines Solobusses –
Messwerte Fraun-
hofer IVI

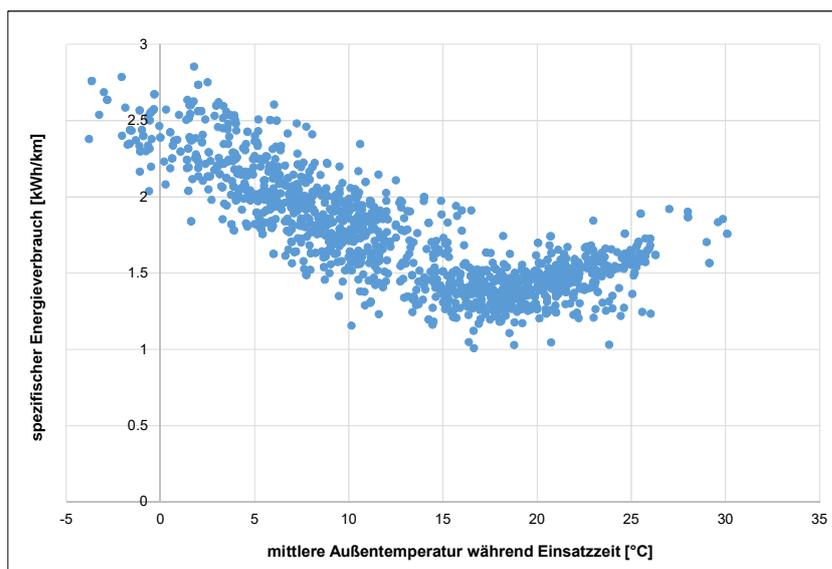


Abbildung 2-5
Gesamtenergiebe-
darf von Solo-
batteriebusen –
Messwerte

Abbildung 2-5 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 angestrahelte 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 angestrahelte Körperflächen bleiben jedoch weitgehend kalt, weshalb man häufig auch vom sog. Lagerfeuerteffekt spricht. Fahrgastinnenräume müssten daher mit mehreren Reihen von Infrarotstrahlern ausgerüstet werden, um Unbehaglichkeiten zu vermeiden.

Hinzu kommt, dass die Montage von Infrartheizungen 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 Infrartheizungen 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 Batteriebussen, 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 LVB bewerten zu können, werden nachfolgend verschiedene Heizungsvarianten untersucht.

2.2.4 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 Batteriebusses, 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 Batteriebussen signifikant, wodurch der Einsatz einer Vollklimatisierung nur nach eingehender Bewertung der betrieblichen Auswirkungen zu empfehlen ist. Inwiefern eine Vollklimatisierung für die Reichweitenermittlung maßgebend wird, hängt von der gewählten Heizungsform ab. Beim Einsatz einer rein elektrischen Heizung überwiegt der Reichweitenverlust aufgrund des deutlich höheren Energiebedarfs für die Beheizung. Sind hingegen die Busse mit einer Hybridheizung ausgestattet, wird je nach gewählter Einschalttemperatur der mit Brennstoff betriebenen Heizung der Energieverbrauch für die Vollklimatisierung dominant.

Fazit

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

2.3 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 Batteriebusen eignet.

Für den Betrieb von Batteriebusen sind drei Nachladestrategien möglich, die in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt sind.

2.3.1 Volllader (auch Depotlader)

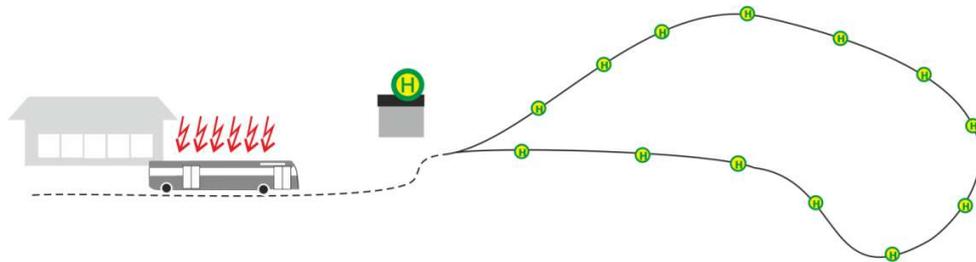


Abbildung 2-6
Volllader + Ganz-
tageseinsatz ohne
Zwischenladung

Ein Nachladeregime, bei dem die elektrische Energie nur während der Betriebspausen (i. d. R. nachts) und zwischen den Verkehrsspitzen (Zwischenladung) 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, erhöhte Anforderungen an die Netzanschlussleistung für einen Betriebshof sowie eingeschränkte Reichweiten zwischen den Nachladevorgängen.

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.

2.3.2 Gelegenheitsladung (auch Opportunity Charging)

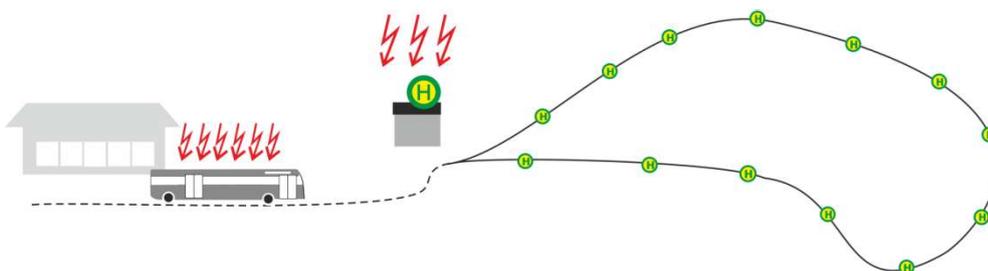


Abbildung 2-7
Nachladen +
Gelegenheitsladen
in Fahrpausen an
Endhaltestellen

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.

2.3.3 Ultraschnellladen (auch Flash Charging)

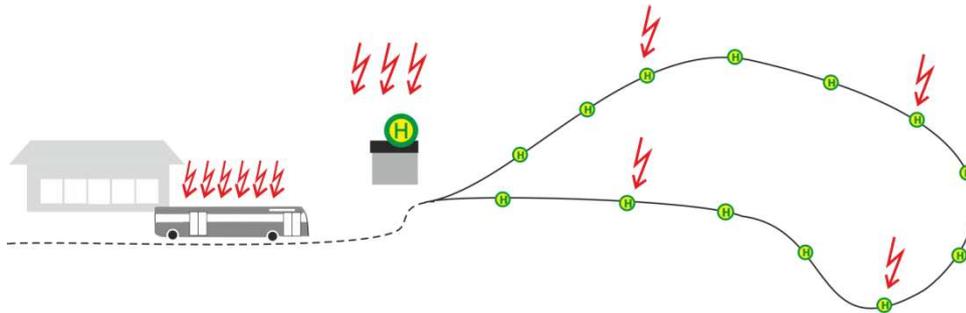


Abbildung 2-8
Nachladen + Unterwegsladen beim Fahrgastwechsel an Haltestellen und an Endhaltestellen

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 Ladeprozesse 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.

2.3.4 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

2.4 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.

2.4.1 Solobusse (ca. 12 m)

eCitaro



Abbildung 2-9
eCitaro

| | |
|-------------|---|
| Hersteller: | Daimler Buses GmbH |
| Türen: | 2 / 3 |
| Fahrgäste: | ca. 80 (abhängig von gewählter Batteriegröße) |
| Batterie: | NMC-Batterien der 2. Generation: max. 396 kWh ohne Pantograph, max. 330 kWh mit Pantograph (jeweils ca. 80 % nutzbar) angekündigte NMC-Batterien der 3. Generation: max. 588 kWh ohne Pantograph, max. 490 kWh mit Pantograph (jeweils ca. 80 % nutzbar) |
| Reichweite: | bis zu 300 km (NMC-Batterien der 3. Generation), abhängig vom Fahrzyklus und Heizungsform |
| Nachladung: | Steckerladung bis 150 kW, Ladung über Pantograph bis 300 kW |
| Heizung: | Wärmepumpe, Hybridheizung |
| Kosten: | ca. 620.000 € |

Solaris Urbino 12 electric



Abbildung 2-10
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) mit Pantograph bis zu 520 kWh (High Energy) ohne Pantograph Batterien mit bis zu 600 kWh angekündigt |
| Reichweite: | ca. 80 – 200 km, abhängig vom Fahrzyklus |

Nachladung: 450 kW / 200 kW
Steckerladung für Nachladung im Betriebshof bis zu 240 kW
Heizung: Wärmepumpe, Hybridheizung
Kosten: ca. 550.000 €

Citea SLF-120 Electric New Generation



Abbildung 2-11
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 2-12
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 2-13
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 2-14
EBUSCO 12 m

IRIZAR i2e



Abbildung 2-15
IRIZAR i2e auf der Linie 13 in
San Sebastian (altes Design)

| | |
|-------------|--|
| Hersteller: | IRIZAR S. Coop., Ormaiztegi, 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 € |

IVECO E-Way Full Electric 12 m



Abbildung 2-16
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 € |

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

VDL Citea SLF 181 Electric



Abbildung 2-17
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 2-18
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. 524 kWh High Energy+ Batterien mit bis zu 800 kWh angekündigt |
| Reichweite: | ca. 80 km / ca. 225 km, abhängig vom Fahrzyklus und Heizung |
| Nachladung: | bis zu 450 kW Steckerladung für Nachladung im Betriebshof bis zu 240 kW |
| Heizung: | Wärmepumpe, Hybridheizung |
| Kosten: | ca. 700.000 € |

IRIZAR iebus 18 m



Abbildung 2-19
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 € |

eCitaro Gelenk



Abbildung 2-20
eCitaro Gelenk

| | |
|-------------|---|
| Hersteller: | Daimler Buses GmbH |
| Türen: | 3 / 4 |
| Fahrgäste: | ca. 120 (abhängig vom gewählten Batteriepack) |
| Batterie: | NMC-Batterien der 2. Generation: max. 396 kWh ohne Pantograph, max. 330 kWh mit Pantograph (jeweils ca. 80 % nutzbar) angekündigte NMC-Batterien der 3. Generation: max. 686 kWh ohne Pantograph, max. 490 kWh mit Pantograph (jeweils ca. 80 % 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 2-21
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 € |

2.4.3 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 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 2.3.

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 2-22
Für die Nachladung von
Batteriebusen 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 in Hamburg, Strætó in Reykjavik).

Steckerverbindungen weisen eine höhere Kontaktqualität als automatisierte Kontaktsysteme auf, weshalb es seltener zu Kontaktproblemen und damit verbundenen Ladeabbrüchen kommt. Dem stehen der erhöhte Kraftaufwand bei der Kontaktherstellung und damit verbundene Akzeptanzprobleme gegenüber.

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 2-23
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 von den 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.

Beiden Varianten ist jedoch gemein, dass eine vergleichsweise genaue Fahrzeugpositionierung notwendig ist, um eine gute Kontaktqualität zu erzielen.



Abbildung 2-24
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 Batteriebus angebrachten Pantographen werden in Europa von drei Herstellern angeboten (Schunk, Siemens, 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 2-25
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/Stemmann 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 2-26
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 250 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 FDIS 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-Schrift 260 EBUS – Infrastruktur/Ladestellen (Entwurf)
- VDV-Schrift 261:01/2020 (Empfehlung zur Anbindung eines dispositiven Backends an einen Elektrobus, 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.

3 Bewertungskriterien

Die Bewertung zielt darauf ab, eine schrittweise Umstellungsstrategie mit einem Minimum an vermeidbaren Zusatzkosten zu definieren. Vermeidbare Zusatzkosten entstehen insb. dann, wenn für Batteriebusse ungeeignete Verkehrsleistungen bzw. zugehörige Linien umgestellt werden sollen.

Darüber hinaus lassen sich Zusatzkosten durch eine genaue Betrachtung der infrastrukturellen Voraussetzungen steuern und über einen längeren Zeitraum unter Beachtung gesetzlicher Vorgaben strecken. So hängen die Zusatzkosten für die Integration der Ladeinfrastruktur stark von den örtlichen Gegebenheiten auf einem Betriebshof ab. Im Extremfall ist ein Betriebshof nicht geeignet und es fallen Kosten für den Umzug auf einen anderen Standort an.

Für die Bewertung wurden daher folgende Bewertungskriterien einheitlich für alle Verkehrsunternehmen und Betriebshöfe verwendet:

1. B1 – Eignung der vom Verkehrsunternehmen bedienten Umlaufpläne für die 1:1-Umstellung auf Batteriebusbetrieb
2. B2 – notwendige Mehraufwände für den Neuzuschnitt von Umlaufplänen
3. B3 – für VGMT-Leistungen verwendete Fahrzeuglängen
4. I1 – Verfügbarkeit von Leistungsreserven im umliegenden Mittelspannungsnetz
5. I2 – Eignung eines Betriebshofes für
 - die Integration der Ladeinfrastruktur inkl. Transformatoren für die Gesamtflotte (I2-1)
 - die Integration von Brandschutzmaßnahmen, insb. die Schaffung von Brandabschnitten (I2-2)
 - die Integration einer Quarantänefläche (I2-3)
 - die Eignung der Werkstatt (I2-4)
 - verfügbare Platzreserven (I2-5)
6. I3 – Hochwassergefahr
7. K – Zusätzliche Kosten im Vergleich mit Dieselseinsatz.

Das Kriterium B3 berücksichtigt die Tatsache, dass der Markt an emissionsfreien Kleinbussen und deren Reichweite noch sehr eingeschränkt sind. Als positives Bewertungskriterium wird daher der überwiegende Einsatz von Dieselseitigen Bussen gewertet, zumal durch deren Substitution ein deutlich größerer Beitrag zum Klimaschutz geleistet werden kann.

Gleichwohl sich bei den Besichtigungen der Betriebshöfe ein unterschiedliches Bild hinsichtlich der handelnden Personen ergab, wird bewusst auf subjektive Bewertungen verzichtet. Gleiches gilt für die finanzielle Lage der Verkehrsunternehmen sowie die Qualifizierung ihrer Werkstattmitarbeiter.

4 Betriebliche Bewertung

4.1 Randbedingungen

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

Der Main-Tauber-Kreis hat ein typisch mitteleuropäisches Klima, das zwar im Mittel moderate Temperaturen aufweist, jedoch können warme Sommer- und kalte Wintertage auftreten. Abbildung 4-1 zeigt die Summenverteilung der Tagesmitteltemperaturen. An etwa einem Prozent aller Tage (durchschnittlich vier Tage pro Jahr) lagen die daraus abgeleiteten Tagesmitteltemperaturen unter $-9,3^{\circ}\text{C}$, an 99 % aller Tage lag der Wert unter $24,9^{\circ}\text{C}$. Beide Werte wurden für die Energieverbrauchsermittlungen verwendet.

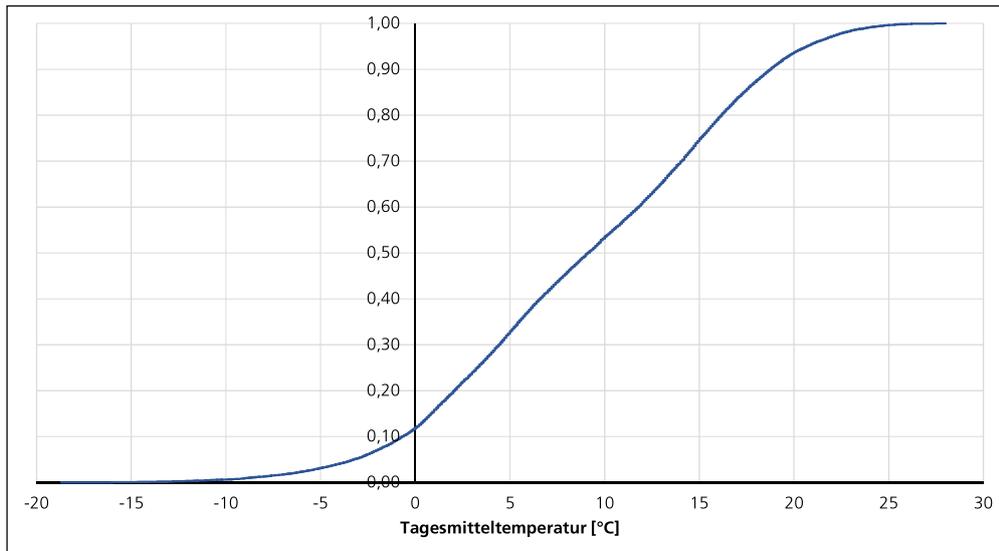


Abbildung 4-1
Summenkurve der
Tagesmitteltemperaturen –
Messstation Niederstetten –
von 1961 bis 2023, Quelle:
DWD

An kälteren Tagen hat dies ein Absenken der Fahrgastraumtemperatur unter die in der VDV-Schrift 236 vorgegebenen Werte zur Konsequenz, wobei zu beachten ist, dass die Außentemperaturen während der Haupteinsatzzeiten über den in Abbildung 4-1 angegebenen Temperaturen liegen. An extrem warmen Tagen wird der gewünschte Temperaturwert für den Fahrgastraum überschritten.

4.2 Datengrundlage

Als Grundlage für die durchgeführten Energiebilanzierungen dienten seitens der VGMT bereitgestellte Umlaufpläne mit dem Ist-Zustand. Diese wurden für die Verarbeitung in IVInet formatiert und anschließend analysiert. In Absprache mit einigen Verkehrsunternehmen wurden die Umlaufpläne angepasst, sofern tagsüber längere Aufenthaltszeiten außerhalb aber in der Nähe von Betriebshöfen festgestellt wurden.

Naturgemäß bilden die Umlaufpläne nur den Istzustand ab. Erfahrungen in anderen Projekten haben aber gezeigt, dass die grundsätzlichen Ergebnisse und Aussagen auch auf zukünftige Verkehrsleistungen in einem Liniennetz übertragen lassen, sofern keine grundlegenden Änderungen eingeführt werden.

4.3 Fahrzeugspezifikationen

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 (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 (z. B. unter 5°C).

Die betriebliche Bewertung erfolgte konservativ anhand von am Markt bereits verfügbaren bzw. fest angekündigten Batteriebusen. Um keine künstliche Beschränkung des Marktes an geeigneten Batteriebusen vorzunehmen, wurden bewusst niedrige Annahmen bzgl. der verbauten Batteriegrößen vorgenommen. Ebenso wurden vergleichsweise geringe Ladeleistungen angesetzt, um die Anforderungen an die Ladeinfrastruktur zu minimieren. Einen Überblick über die verwendeten Batteriegrößen und Ladelistungen ist Tabelle 4-1 zu entnehmen.

| | Nomineller Energieinhalt ¹⁾ | Ladeleistung Stecker | Ladeleistung Pantograph |
|---------------------|--|----------------------|-------------------------|
| Kleinbusse | 170 kWh / - | 75 kW | nicht verfügbar |
| Solobatteriebusse | 500 kWh / 440 kWh | 75 kW | 250 kW |
| Gelenkbatteriebusse | 580 kWh / 510 kWh | 100 kW | 250 kW |

¹⁾ Voll-lader / Gelegenheitslader

Tabelle 4-1: Angenommene Batteriegrößen (Neubatterien) und maximale Ladeleistungen

Zu beachten ist, dass von den nominellen Energieinhalten jeweils nur der nutzbare Energieinhalt für die nachfolgend beschriebenen Energiebilanzierungen verwendet wurde. Der nutzbare Energieinhalt unterscheidet sich von Hersteller zu Hersteller. Angesetzt wurden 80 % des speicherbaren Energieinhalts. Um eine Batteriealterung zu berücksichtigen, wurde der nutzbare Energieinhalt nochmals um 20 % reduziert. Somit wurden für die Energiebilanzierungen nur 64 % des nominellen Energieinhalts gemäß Tabelle 4-1 verwendet. Mit dieser Vorgehensweise ist auch das Batteriemangement des Herstellers Daimler Buses GmbH abgedeckt, der für die gesamte Lebensdauer einer Batterie einen nutzbaren Energieinhalt von 70 % des nominellen Energieinhalts einer Neubatterie garantiert.

4.4 Vorgehensweise

Die Ermittlung von Einsatzpotenzialen für Batteriebusse erfolgte mittels der Software *IVInet*. Hierbei handelt es sich um eine hausinterne Software, mit deren Hilfe verschiedene Fahrzeugkonfigurationen z. B. bzgl. ihrer Einsatzmöglichkeiten analysiert werden können. Unter anderem ist es möglich, die Einsatzmöglichkeiten von Batteriebusen 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.

Es wurde jeder Umlaufplan einer Energiebilanzierung unterzogen, um die Frage zu beantworten, ob dieser Umlaufplan mit Batteriebusen bedienbar ist. Dabei wurde der spezifische Energieverbrauch (kWh/km) getrennt für jede Einzelfahrt u. a. anhand

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

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

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.

4.4.1 Volllader

Die Analyse der Umlaufpläne zielt darauf ab, mittels Energiebilanzierung das Einsatzpotenzial für Volllader, also für Batteriebusse, die ausschließlich im Betriebshof nachgeladen werden, zu ermitteln. Volllader werden i. d. R. nur nachts geladen. Stehen tagsüber Standzeiten auf einem Betriebshof von mindestens 30 min zur Verfügung, wurden diese ebenfalls für die Nachladung eingerechnet.

4.4.2 Gelegenheitslader

Die Grobrasterung des Liniennetzes zielte darauf ab, mittels einer Energiebilanzierung das Einsatzpotenzial für Gelegenheitslader, also für Batteriebusse, die sowohl im Betriebshof als auch an ausgesuchten Endhaltestellen nachgeladen werden, zu ermitteln. Dabei wurden unterschiedliche Kombinationen für Endhaltestellen mit Ladeinfrastruktur betrachtet.

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 Aussetzungsfahrt, 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.

4.5 Ergebnisse

4.5.1 Volllader

Wie die Ergebnisse in der Tabelle 4-2 beispielhaft für Schultage zeigen, können mit Hybridheizungen ausgestattete Batteriebusse fast alle Umlaufpläne ohne jegliche Änderungen bedienen. Der Einsatz rein elektrischer Heizungen führt zu keinem wesentlichen Abfall des Bedienpotenzials für Volllader. Die Untersuchungen für Ferientage zeigen ein ähnliches Bild. Lediglich an Wochenenden ist ein höherer Anteil nicht bedienbarer Umlaufpläne zu beobachten.

| Unternehmen | Flotte für VGMT | Gesamtflotte | Fahrzeugeinsatz Mo – Fr Schule | Auf Batteriebus umstellbar ¹⁾ |
|-------------|-----------------|--------------|--------------------------------|--|
| | 18 | 19 | 14 | 12 / 10 |
| | 11 | 12 | 10 | 10 / 10 |
| | 10 | 41 | 9 | 8 / 6 |
| | 6 | 10 | 5 | 4 / 4 |
| | 6 | 22 | 3 | 2 / 2 |
| | 4 | 10 | 4 | 4 / 4 |
| | 16 | 22 | 14 | 10 / 9 |
| | 16 | 17 | 11 | 11 / 11 |
| | 16 | 17 | 17 | 17 / 16 |
| | 5 | 7 | 6 | 6 / 6 |
| | 11 | 28 | 9 | 9 / 9 |

¹⁾ Hybridheizung / reine Elektroheizung

Tabelle 4-2: Ergebnisse der betrieblichen Bewertung für Volllader – Schultage

Allerdings ist bei mehreren Umlaufplänen eine Zwischenladung während ohnehin geplanter Pausen auf einem Betriebsbahnhof notwendig, sodass die Busse in dieser Zeit nicht für Werkstattarbeiten oder Untersuchungen zur Verfügung stehen.

Insb. die Unternehmen [REDACTED] stellen Busse tagsüber längere Zeit an in der Nähe der Betriebshöfe befindlichen Bahnhöfen ab. Mit beiden Betrieben wurde daher vereinbart, die Abstellung jeweils auf dem Betriebsbahnhof unter Einbeziehung zusätzlicher Leerfahrten zu untersuchen. Ein ähnliches Abstellregime kommt beim Unternehmen [REDACTED] zur Anwendung, wobei eine Abstellung auf dem Betriebsbahnhof aufgrund der langen Leerfahrten als nicht zielführend bewertet wurde.

Ein deutlich größeres Problem stellt die Fremdadstellung von Bussen über Nacht dar. Insb. die Unternehmen [REDACTED] stellen Busse zwecks Minimierung der Leerkilometer außerhalb der Betriebshöfe auf speziellen Abstellflächen oder auf Betriebsbahnhöfen Dritter ab. Für die Energiebilanzierungen wurde untersucht, dass die Busse auf dem eigenen Betriebsbahnhof abgestellt werden. Ob dies betrieblich für die Unternehmen akzeptabel ist, kann seitens des Gutachters nicht endgültig bewertet werden. Die grundsätzliche Notwendigkeit wurde aber durch alle Unternehmen bestätigt.

4.5.2 Gelegenheitslader

Wie die Ergebnisse für Volllader zeigen, besteht im VGMT-Liniennetz praktisch kein Bedarf für Gelegenheitslader. Dessen unbenommen wurde für Umlaufpläne bzw. Kombinationen aus Umlaufplänen, die gegenwärtig noch nicht mit Vollladern bedienbar sind, geprüft, inwieweit eine Nachladung an Endhaltestellen zu einer Erhöhung des Einsatzpotenzials für Batteriebusse beitragen würde. In Abstimmung mit dem VGMT wurden Endhaltestellen, an denen die Installation von Ladestationen nicht oder kaum möglich erscheint, nicht in die Betrachtungen einbezogen. Betrachtet wurden ausschließlich Batteriebusse mit rein elektrischer Heizung sowie deren Einsatz an Schultagen.

- Anzahl nicht mit Vollladern bedienbarer Umlaufpläne / Umlaufplankombinationen: 4
- davon zusätzlich bedienbar bei Ladestation
 - o am ZOB Tauberbischofsheim: 2
 - o zzgl. Tauberbischofsheim Wörtplatz: 2
 - o zzgl. Wertheim ZOB: 3
 - o zzgl. Würzburg Bahnhof: 3

- Anzahl nicht mit Vollladern bedienbarer Umlaufpläne / Umlaufplankombinationen: 3
- davon zusätzlich bedienbar bei Ladestation
 - o Wertheim Bahnhof: 1
 - o zzgl. Bestenheid, Bildungszentrum: 2

- Anzahl nicht mit Vollladern bedienbarer Umlaufpläne / Umlaufplankombinationen: 1
- davon zusätzlich bedienbar bei Ladestation
 - o am ZOB Wertheim: 1

- Anzahl nicht mit Vollladern bedienbarer Umlaufpläne / Umlaufplankombinationen: 1
- davon zusätzlich bedienbar bei Ladestation
 - o am Bahnhof Eubigheim: 0
 - o zzgl. Rosenberg Bahnhof: 1

- Anzahl nicht mit Vollladern bedienbarer Umlaufpläne / Umlaufplankombinationen: 7
- davon zusätzlich bedienbar bei Ladestation
 - o am Busparkplatz ZOB Wertheim: 3
 - o zzgl. Grünsfeld Parkplatz: 3
 - o zzgl. Bestenheid, Bildungszentrum: 4
- Zusätzlich Ladeinfrastruktur für Nachtladung, wenn nicht auf Betriebshof verlegbar:
 - o Busparkplatz am ZOB Wertheim (5 Ladegeräte)
 - o Grünsfeld Parkplatz (1 Ladegerät)
 - o Mondfeld Ort oder geeigneter Standort (1 Ladegerät)
 - o Pülfringen Kirche oder geeigneter Standort (1 Ladegerät)

- Anzahl nicht mit Vollladern bedienbarer Umlaufpläne / Umlaufplankombinationen: 1
- davon zusätzlich bedienbar bei Ladestation
 - o [REDACTED] 1
- Zusätzlich Ladeinfrastruktur für Nachtladung, wenn nicht auf Betriebshof verlegbar:
 - o [REDACTED]
 - o Abstellfläche Assamstadt (4 Ladegeräte)

4.5.3 Fazit

Unterstellt man eine weitere Zunahme des Energieinhalts der mitgeführten Batterien (s. Punkt 2.2.2) besteht innerhalb des VGMT-Liniennetzes praktisch kein oder bestenfalls ein sehr geringes Reichweitenproblem für Batteriebusse, die ausschließlich auf Betriebshöfen nachgeladen werden.

Mit Hilfe von Ladestationen an ausgesuchten Endhaltestellen können zusätzlich fast alle mit Vollladern derzeit nicht bedienbaren Umlaufpläne bedient werden. Insb. der finanzielle und organisatorische Aufwand für die Errichtung der Ladestationen steht jedoch in keinem vertretbaren Verhältnis zu der erzielbaren Steigerung des Einsatzpotenzials für Batteriebusse. Hinzu kommen unterschiedliche Batteriebusstypen (Voll- und Gelegenheitslader), was den organisatorischen Aufwand bis hin zu zusätzlichen Reservebussen erhöht. Es wird daher nicht empfohlen, Batteriebusse mit Gelegenheitsladung im VGMT-Netz einzusetzen. Alle weiteren Ausführungen beschränken sich daher auf den Einsatz von Vollladern.

5 Betriebshöfe

Alle nachfolgenden Überlegungen gehen von einer vollständigen Umstellung der Fuhrparks auf Batteriebusse aus. Dies gilt auch für Reisebusse sowie Busse, die nicht im Auftrag der VGMT zum Einsatz kommen. Hintergrund ist die Annahme, dass ein Betriebshof nur dauerhaft Bestand haben wird, wenn alle auf diesem Betriebshof stationierten Busse auf Batteriebusse umgestellt und nachgeladen werden können.

5.1 Aufbau der Ladeinfrastruktur auf Betriebshöfen

Den generellen Aufbau der Ladeinfrastruktur in einem Betriebshof zeigt Abbildung 5-1. Die Ladegeräte werden über Mittelspannungstransformatoren mit 400 V Drehstrom versorgt. Bei dem eigentlichen Ladestrom handelt es sich um Gleichspannung.

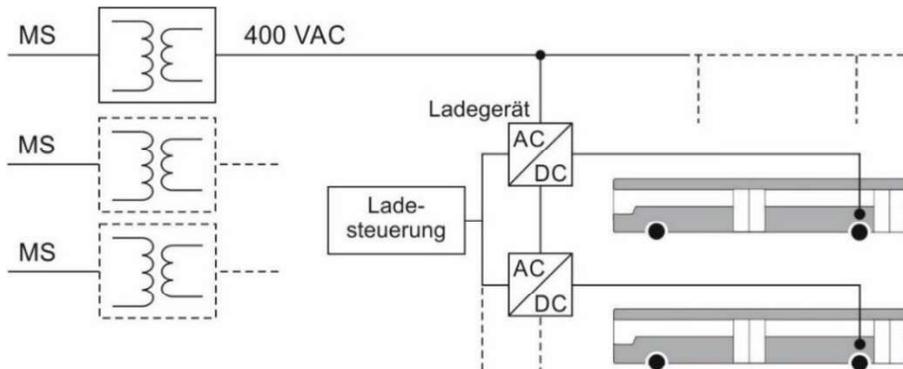


Abbildung 5-1
Prinzipieller Aufbau der Ladeinfrastruktur in einem Betriebshof

Aus Gründen der Versorgungssicherheit ist der Anschluss an zwei Mittelspannungskabel zu empfehlen.

Hinweise zur Integration der Ladeinfrastruktur in Betriebshöfen sind in der VDV-Schrift 825 zu finden. In vielen Betriebshöfen stellt die Integration der Ladeinfrastruktur, speziell der Ladegeräte und der Kabelzuführung zu den Batteriebussen eine Herausforderung dar. Bestandsanlagen sind räumlich in der Regel nicht dafür ausgelegt, zusätzlich Ladegeräte oder Ladeterminals zu installieren. Selbst die Integration von aufgehängten Ladekabeln samt Steckern in Abstellhallen kann aufgrund der notwendigen Verkehrswegebreiten zwischen Fahrzeugen schwierig sein. Der gelegentlich kolportierte Verlust von bis zu 30 % der Abstellplätze ist jedoch als übertrieben anzusehen.

Abbildung 5-2 zeigt eine typische Lösung für eine Abstellhalle. Stehen mehr als zwei Fahrzeuge hintereinander, muss zwischen Fahrzeugen sowie zu festen Einbauten ein Abstand von mindestens 90 Zentimetern eingehalten werden. Nach allgemeiner Lesart darf dieser sog. Verkehrswegeraum nicht durch seitlich in Batteriebusse gesteckte Stecker samt Kabel eingengt werden. Der seitliche Platzbedarf kann dadurch verringert werden, dass nur jeder zweite Zwischenraum mit Ladekabeln versehen wird. Dies setzt jedoch Batteriebusse mit Ladebuchsen (Inlets) auf beiden Seiten sowie ausreichende Abstände zwischen zwei Bussen in Fahrtrichtung voraus. Eine weitere Variante sind Ladebuchsen im Fahrzeugbug, was wiederum ausreichende Abstände zwischen den Bussen in Fahrtrichtung bedingt.

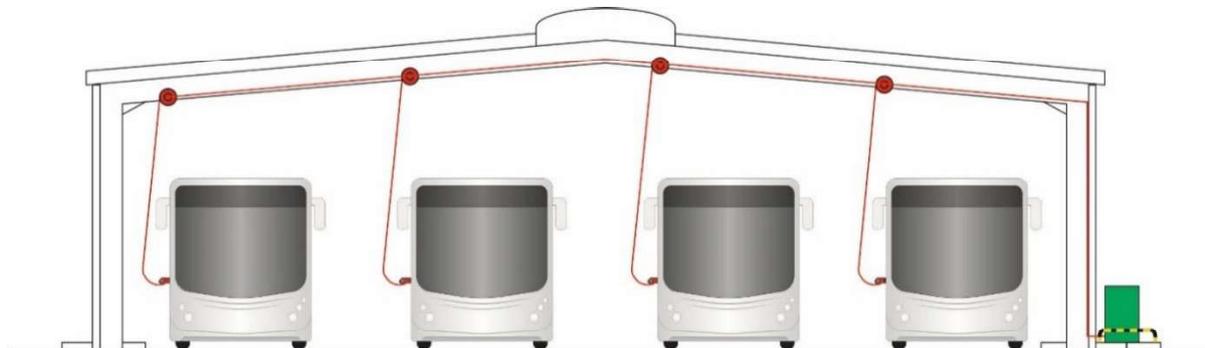


Abbildung 5-2
Überkopfführung der Ladekabel in den Abstellhallen (ohne Terminal)

Die Zuführung selbst erfolgt über Kabeltrommeln mit Rückspulfunktion oder einfache Aufhängungen (Abbildung 5-3). Empfohlen werden möglichst einfache Aufhängungen, da rückspulende Aufhängungen an kalten Wintertagen aufgrund der geringeren Flexibilität der Kabel Probleme bereiten können.



a) Kabeltrommel mit Rückspulfunktion;

b) einfache Aufhängung

Abbildung 5-3
Beispiele für
Kabelführungssysteme und
Satelliten

Um eine möglichst hohe Flexibilität bei Blockaufstellung zu erlangen, ist die vollständige Ausrüstung einer Aufstellspur mit Ladegeräten der gleichen Leistungsklasse zu empfehlen.

Die reine Powerline-Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Ladegeräten ist auf etwa 15 m Kabellänge begrenzt. Sind größere Kabellängen notwendig, sind sog. Satelliten notwendig, in der die Powerline-Kommunikation in eine andere Kommunikationsform umgewandelt wird. Für Satelliten werden auch häufig die Begriffe Terminal oder Ladeterminal verwendet. Eine Kabellänge von mehr als 150 m sollte vermieden werden.

5.2 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.

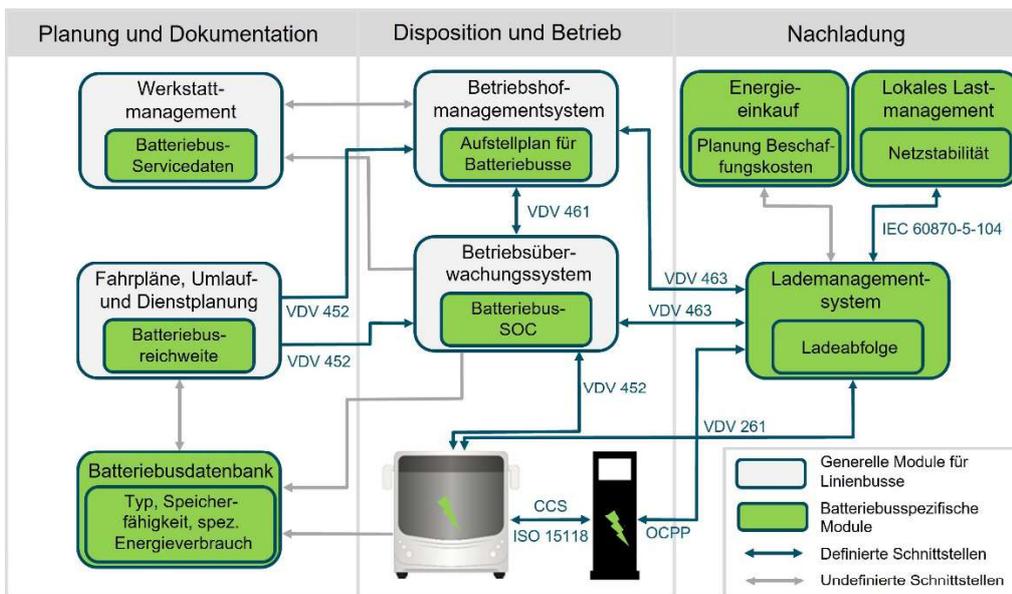


Abbildung 5-4
Überblick über die Planungs-, Dispositions- und Überwachungssysteme beim Einsatz von Batteriebussen

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

1. Lademanagementsystem

Lademanagementsysteme vereinigen fünf Funktionalitäten.

- 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.

- 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.
- 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.
- Lademanagementsysteme überwachen den Zustand der Ladeinfrastruktur, also die Einsatzbereitschaft von Ladegeräten und -stationen und melden diesen an das vorgelagerte Betriebsmanagementssystem.
- 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.

5.3 Werkstattausrüstung für Batteriebusse

Gemäß VDV-Schrift 822¹ 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.

Die VDV-Schrift 825² sieht keine grundsätzliche Separierung zwischen elektrisch angetriebenen Bussen und Dieselmotoren 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.

Aufgrund der größeren Anzahl an Dachaufbauten wird beim Betrieb von Batteriebussen die Installation von mindestens einem Dacharbeitsstand empfohlen. Dieser sollte die gesamte Länge des längsten Busses abdecken, vorzugsweise 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.

¹ VDV-Schrift 822 – Richtlinie für den Bau von Omnibusbetriebshöfen, 09/2016

² VDV-Schrift 825 – Auswirkungen der „Clean Vehicles Directive“ im Linienbus auf Betriebshöfe und Werkstätten, 11/2020

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 einen Dacharbeitsstand samt Krananlage und Anschlagmittel ist mit Kosten in Höhe von etwa 275.000 bis 300.000 € zu rechnen.



Abbildung 5-5
Beispiel für einen Dacharbeitsstand

Einen Überblick über die notwendige batteriebuspezifische Ausrüstung einer Werkstatt für 25 Busse zeigt die nachfolgende Tabelle.

| Bezeichnung | Anzahl | Kosten je Einheit |
|---|--------|-------------------|
| Isolierte Spezialwerkzeuge – Set | (1) 2 | 400 € |
| Zweipolige Spannungsprüfer gemäß DIN EN 61243-3 | 1 | 300 € |
| Messgeräte für Isolations- und Potenzialausgleichsmessungen | 1 | 2.800 € |
| Laptop für Diagnosezwecke inkl. Software | 1 | 2.500 € |
| Wärmebildkamera | 1 | 850 € |
| Persönliche Schutzausrüstung gemäß DIN EN 1149 | 3 | 1.050 € |
| Schutzhandschuhe nach DIN EN 60903 | 2 | 300 € |
| Gesichtsschutz nach DIN EN 166 | 3 | 250 € |
| Defibrillator | 1 | 1.400 € |
| Transporthilfe für schwere Komponenten | 1 | 750 € |
| Absperrmaterialien, Set für einen Bus | 2 | 250 € |
| Mobiles Werkstattladegerät (40 kW) | 1 | 24.000 € |
| Dacharbeitsplatz samt Portalkran (750 kg Traglast, 5,1 m Höhe) inkl. Anschlagmittel | 1 | 275.000 € |

Tabelle 5-1: Werkstattausrüstung für Batteriebusse (Preisstand 2023, netto)

Insgesamt ergeben sich ergänzende Investitionskosten für die Ausrüstung einer Werkstatt in Höhe von etwa 312.000 €.

Für den Umgang mit Hochvoltbatterien wird folgendes Regime empfohlen:

- keine dauerhafte Lagerung von Ersatzbatterien, um einen Wertverlust durch kalendarische Alterung zu vermeiden
- kurzfristiger Lagerung in Transportbehältern nach Austausch von Batterien oder Modulen
- 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 mindestens der Aufbau eines Batterie-Sicherheitscontainers, wie in Abbildung 5-6 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 5-6
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.

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

5.4 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, und Brände vermehrt in Betriebshöfen, speziell während des Ladens ausbrechen werden.

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 Wassernebelerzeugung 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 VDV³ 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 für im VGMT-Netz agierenden Verkehrsunternehmen nicht vertretbar. Daher wurde versucht, möglichst kleine Brandabschnitte vorzusehen, sofern die örtlichen Gegebenheiten dies zulassen.

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, sollten zumindest die Hauptkabeltrassen so geführt werden, dass sie nicht direkt unter abgestellten Fahrzeugen hindurchführen.

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.

5.5 Betriebshöfe der untersuchten Verkehrsunternehmen

Das Liniennetz der VGMT wird von insg. 11 Betriebshöfen aus bedient. Hinzu kommen noch separate Abstellflächen, die aber nicht gesondert untersucht wurden.

In der Zeit vom 23. – 25.04.2024 wurden zusammen mit der VGMT alle Betriebshöfe besichtigt sowie mit Fotos und Skizzen dokumentiert. In Vorbereitung der Besichtigungen wurden anhand von Luftbildaufnahmen und digitalen Karten Lagepläne der Betriebshöfe erstellt. Diese wurden im Zuge der Besichtigungen ergänzt bzw. präzisiert und dienten als Grundlage für Grobskizzen zur Bewertung der Integrierbarkeit von Ladeinfrastruktur und Brandschutzmaßnahmen.

Des Weiteren konnten während der Besichtigungen Interviews mit Verantwortlichen vor Ort durchgeführt werden, die im Nachgang noch teilweise ergänzt wurden.

Für jeden Betriebshof wurde eine maßstäbliche Grobskizze erstellt, die jeweils einen möglichen Aufbau

- der vollständigen Ladeinfrastruktur
- einer Quarantänefläche (sofern möglich) sowie
- von Brandschutzmaßnahmen

darstellen. Alle Grobskizzen sind in der Anlage 1 zu finden. In den nachfolgenden Punkten werden jeweils eine kurze Beschreibung und Bewertung jedes einzelnen Betriebshofes vorgenommen.

³ VdS Schadenverhütung GmbH, VdS 0825 – Brandschutz in Betriebshöfen für Linienbusse, 03/2023

5.5.1 Ladeleistungen und Netzanschlussleistungen

Die Installation von Transformatoren und deren Anbindung an das Mittelspannungsnetz stellen Investitionen mit einem langen Nutzungszeitraum dar. Aus diesem Grund wurden für die Quantifizierung der Netzanschlussleistung folgende Annahmen getroffen:

- Es wurden kalte Wintertage (Schultage, Mo – Do) und Batteriebusse mit rein elektrischen Heizungen betrachtet.
- Es wurden Batteriebusse unterstellt, die über ausreichend große Batterien verfügen, um jeden Umlaufplan ohne Einschränkung absolvieren zu können, auch wenn derartige Fahrzeuge in den nächsten Jahren noch nicht verfügbar sein werden.

Es wurden zunächst die für jeden einzelnen Umlaufplan notwendigen Ladeleistungen ermittelt. Diese wurden auf standardisierte Ladegeräte mit einer maximalen Ladeleistung von 75 bzw. 100 kW normiert.

Die Tagesganglinie der Netzanschlussleistung wurde jeweils wie folgt ermittelt:

- Ermittlung des notwendigen Energiebedarfs für die Absolvierung jedes übergebenen Ist-Umlaufplans
- Ermittlung der notwendigen Ladezeit je betrachtetem Umlaufplan mithilfe der o. g. Ladeleistungen
- Ermittlung des möglichen Ladefensters (30 min nach Ankunft auf dem Betriebshof bis 15 min vor Verlassen des Betriebshofs) je Umlaufplan
- Anordnung der notwendigen Ladezeit innerhalb des Ladefensters
- je Umlaufplan 30 min Vorkonditionierung vor dem Verlassen des Betriebshofes
- Summierung der Ladeleistungen je 15 min-Zeitschritt
- 15 % Zuschlag für Wandler- und Leitungsverluste sowie Nebenverbraucher
- Hochrechnung der Tagesganglinie auf die gesamte Flottengröße inkl. Reisebusse
- Multiplikation mit einem Sicherheitszuschlag von 1,1.

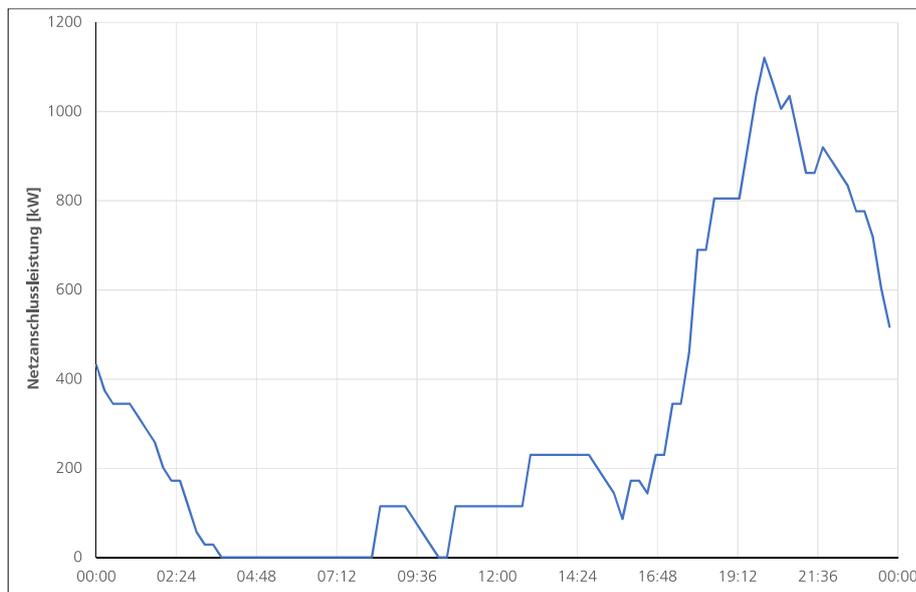


Abbildung 5-7
Beispielhafter Verlauf der Netzanschlussleistung in einem Betriebshof mit 20 Linienbussen im Regionalverkehr – maximaler Energieverbrauch (Winter) – ohne Lastoptimierung

Die sich typischerweise ergebende Tagesganglinie der Netzanschlussleistung ohne Last- bzw. Lademanagement zeigt beispielhaft Abbildung 5-7 für einen Betriebshof mit 20 Linienbussen im Regionalverkehr. Hierbei wurde unterstellt, dass 30 min nach Rückkehr auf den Betriebshof eine Ladung mit maximaler Ladeleistung in Abhängigkeit vom Ladezustand des Energiespeichers beginnt.

Der wannenförmige Verlauf der Netzanschlussleistung mit kleinen Leistungsspitzen im Tagesverlauf stellt sich bei jedem Verkehrsunternehmen ein, das hauptsächlich Linienbusse im Regionalverkehr betreibt. Lediglich die maximale Leistungsspitze sowie deren zeitliche Lage variieren. Daher wird darauf verzichtet, die Tagesganglinien für die einzelnen Betriebshöfe gesondert darzustellen. Nachfolgend wird daher ausschließlich die notwendige Netzanschlussleistung je Betriebshof ausgewiesen.

Die notwendigen Anschlussleistungen wurden in Netzanfragen über die VGMT an die Netzbetreiber mit Bitte um Auskunft bzgl.

- verfügbarer Leistungsreserven,

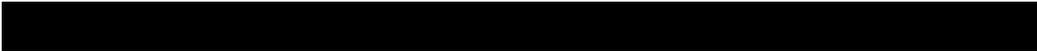
- Anschlusskosten sowie
 - Baukostenzuschlag
- weitergeleitet.

- Standort: [REDACTED]
- Gesamtflotte: [REDACTED]
- Integration von Ladeinfrastruktur: problemlos möglich, Anordnung der Ladepunkte unter Busport
- Anbindung an Mittelspannungsnetz: notwendige Anschlussleistung: ca. 1.400 kVA
Anschlusskosten: ca. 20.000 €
Baukostenzuschuss: 85 €/kW
Netzertüchtigung notwendig, innerhalb der nächsten drei Jahre fertig
- Integration von Brandschutzmaßnahmen: problemlos möglich
- Integration von Quarantänefläche: problemlos möglich
- Eignung von Werkstatt: gegeben
- Fahrzeugwäsche: separiert von Abstellhalle
- Anmerkung: Unterbrechung der PV-Anlage auf Busport zwecks Schaffung von Brandabschnitten notwendig, große Platzreserven für Übergangsphase vorhanden.

- Standort: [REDACTED]
- Gesamtflotte: [REDACTED]
- Integration von Ladeinfrastruktur: nur geteilt außerhalb der Abstellhalle möglich, lange Kabelwege notwendig, Aufständigung aufgrund von Hochwassergefahr notwendig
- Anbindung an Mittelspannungsnetz: notwendige Anschlussleistung: ca. 900 kVA
Anschlusskosten: ca. 15.000 €
Baukostenzuschuss: 94,5 €/kW
Verfügbarkeit von Leistungsreserven im Mittelspannungsnetz gegeben
- Integration von Brandschutzmaßnahmen: Brandabschnitte außerhalb der Abstellhalle möglich
- Integration von Quarantänefläche: nicht möglich
- Eignung von Werkstatt: nicht gegeben, zu niedrige Deckenhöhe
- Fahrzeugwäsche: nicht separiert von Abstellhalle
- Anmerkung: Hochwassergefahr, geringe Platzreserven für Übergangsphase vorhanden.

- Standort: [REDACTED]
- Gesamtflotte: [REDACTED]
- Integration von Ladeinfrastruktur: inner- und außerhalb der Abstellhalle möglich, lange Kabelwege notwendig, Ladeterminals bei Nachladung in Abstellhalle notwendig
- Anbindung an Mittelspannungsnetz: notwendige Anschlussleistung: ca. 3.000 kVA
Anschlusskosten: ca. 10.000 €

- Baukostenzuschuss: 85 €/kW
- Verfügbarkeit von Leistungsreserven im Mittelspannungsnetz gegeben
- Integration von Brandschutzmaßnahmen: Brandabschnitte inner- und außerhalb der Abstellhalle möglich
- Integration von Quarantänefläche: problemlos möglich
- Eignung von Werkstatt: gegeben
- Fahrzeugwäsche: separiert von Abstellhalle
- Anmerkung: große Platzreserven für Übergangsphase vorhanden.



- Standort: 
- Gesamtflotte: 
- Integration von Ladeinfrastruktur: außerhalb und bedingt in der Abstellhalle möglich
- Anbindung an Mittelspannungsnetz:
 - notwendige Anschlussleistung: ca. 750 kVA
 - Anschlusskosten: ca. 40.000 €
 - Baukostenzuschuss: 125 €/kW
 - Verfügbarkeit von Leistungsreserven im Mittelspannungsnetz gegeben
- Integration von Brandschutzmaßnahmen: Brandabschnitte inner- und außerhalb der Abstellhalle möglich
- Integration von Quarantänefläche: eingeschränkt möglich
- Eignung von Werkstatt: gegeben
- Fahrzeugwäsche: separiert von Abstellhalle
- Anmerkung: keine.



- Standort: 
- Gesamtflotte: 
- Integration von Ladeinfrastruktur: außerhalb und bedingt in der Abstellhalle möglich
- Anbindung an Mittelspannungsnetz:
 - notwendige Anschlussleistung: ca. 1.600 kVA zzgl. Fremdstellung
 - Anschlusskosten: ca. 35.000 €
 - Baukostenzuschuss: 85 €/kW
 - Netzertüchtigung notwendig, innerhalb der nächsten drei Jahre fertig
- Integration von Brandschutzmaßnahmen: Brandabschnitte außerhalb der Abstellhalle möglich
- Integration von Quarantänefläche: durch Flächenzukauf möglich
- Eignung von Werkstatt: gegeben
- Fahrzeugwäsche: separiert von Abstellhalle
- Anmerkung: Erweiterungsfläche erworben.



- Standort: 
- Gesamtflotte: 
- Integration von Ladeinfrastruktur: eingeschränkt in der Abstellhalle möglich
begehbare Übergabestation seitens Netzbetreiber gefordert
- Anbindung an Mittelspannungsnetz:
 - notwendige Anschlussleistung: ca. 750 kVA
 - Anschlusskosten: ca. 35.000 €

- Baukostenzuschuss: 210,95 €/kW
- Verfügbarkeit von Leistungsreserven im Mittelspannungsnetz gegeben
- Integration von Brandschutzmaßnahmen: Brandabschnitte innerhalb der Abstellhalle nicht möglich
- Integration von Quarantänefläche: nicht möglich
- Eignung von Werkstatt: nicht gegeben
- Fahrzeugwäsche: keine Waschanlage
- Anmerkung: Betriebshof für Batteriebusbetrieb weitgehend ungeeignet.

- Standort: [REDACTED]
- Gesamtflotte: [REDACTED]
- Integration von Ladeinfrastruktur: außerhalb der Abstellhalle möglich
- Anbindung an Mittelspannungsnetz: notwendige Anschlussleistung: ca. 1.600 kVA
Anschlusskosten: ca. 10.000 €
Baukostenzuschuss: 85 €/kW
Verfügbarkeit von Leistungsreserven im Mittelspannungsnetz gegeben
- Integration von Brandschutzmaßnahmen: Brandabschnitte außerhalb der Abstellhalle möglich
- Integration von Quarantänefläche: bei geplantem Flächenzukauf möglich
- Eignung von Werkstatt: gegeben
- Fahrzeugwäsche: separiert von Abstellhalle
- Anmerkung: Erwerb einer Erweiterungsfläche geplant.

- Standort: [REDACTED]
- Gesamtflotte: [REDACTED]
- Integration von Ladeinfrastruktur: auf Bestandsabstellflächen möglich, Freiabstellung
- Anbindung an Mittelspannungsnetz: notwendige Anschlussleistung: ca. 1.250 kVA
Anschlusskosten: ca. 25.000 €
Baukostenzuschuss: 85 €/kW
Verfügbarkeit von Leistungsreserven im Mittelspannungsnetz gegeben
- Integration von Brandschutzmaßnahmen: Brandabschnitte möglich
- Integration von Quarantänefläche: eingeschränkt möglich
- Eignung von Werkstatt: gegeben, mobiler Dacharbeitsstand vorhanden
- Fahrzeugwäsche: separiert
- Anmerkung: keine.

- Standort: [REDACTED]
- Gesamtflotte: [REDACTED]
- Integration von Ladeinfrastruktur: auf Bestandsabstellflächen möglich, Freiabstellung, Aufständigung aufgrund von Hochwassergefahr notwendig
- Anbindung an Mittelspannungsnetz: notwendige Anschlussleistung: ca. 1.250 kVA
Anschlusskosten: ca. 20.000 €
Baukostenzuschuss: 85 €/kW

- Integration von Brandschutzmaßnahmen: Verfügbarkeit von Leistungsreserven im Mittelspannungsnetz gegeben
- Integration von Quarantänefläche: Brandabschnitte nicht möglich
- Eignung von Werkstatt: nicht möglich
- Fahrzeugwäsche: keine Werkstatt
- Anmerkung: keine Waschanlage
- Anmerkung: nur Abstellplatz mit Sozialtrakt, [REDACTED]
[REDACTED] Hochwassergefahr.



- Standort: [REDACTED]
- Gesamtflotte: [REDACTED]
- Integration von Ladeinfrastruktur: auf Bestandsabstellflächen möglich, Freiabstellung
- Anbindung an Mittelspannungsnetz: notwendige Anschlussleistung: ca. 500 kVA
Anschlusskosten: ca. 30.000 €
Baukostenzuschuss: 85 €/kW
Verfügbarkeit von Leistungsreserven im Mittelspannungsnetz gegeben
- Integration von Brandschutzmaßnahmen: Brandabschnitte möglich
- Integration von Quarantänefläche: bedingt möglich
- Eignung von Werkstatt: gegeben
- Fahrzeugwäsche: nicht separiert von Abstellhalle
- Anmerkung: Betriebsaufgabe geplant.



- Standort: [REDACTED]
- Gesamtflotte: [REDACTED]
- Integration von Ladeinfrastruktur: auf Bestandsabstellflächen möglich, Freiabstellung und Abstellhalle
- Anbindung an Mittelspannungsnetz: notwendige Anschlussleistung: ca. 2.050 kVA
Anschlusskosten: ca. 40.000 €
Baukostenzuschuss: 85 €/kW
Verfügbarkeit von Leistungsreserven im Mittelspannungsnetz gegeben
- Integration von Brandschutzmaßnahmen: Brandabschnitte möglich
- Integration von Quarantänefläche: nicht möglich
- Eignung von Werkstatt: bedingt gegeben
- Fahrzeugwäsche: separiert von Abstellhalle
- Anmerkung: sehr beengte Verhältnisse, Erweiterungsfläche mit stringenten Umweltauflagen vorhanden.

5.6 Investitions- sowie Wartungs- und Instandhaltungskosten

Die Investitionskosten für die Ladeinfrastruktur sowie Brandschutzmaßnahmen wurden anhand der Grobskizzen (Anlage 1) ermittelt. Es wurde bei jedem Betriebshof das Mengengerüst für

- den Baukostenzuschlag,
- den Netzanschluss,

- Transformatoren inkl. Mittelspannungsschaltanlage und Niederspannungsverteilung,
- die Verkabelung,
- Ladegeräte und wo notwendig Ladeterminals sowie
- bauliche Maßnahmen

ermittelt, anschließend mit Kostensätzen (IVIdat) multipliziert und aufaddiert.

Die nachfolgend aufgeführten Kosten beruhen je Kostenposition bzw. Kostensatz auf Mittelwerten aus der benannten Datenbank. 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.

| Unternehmen | Gesamtflotte | Gesamtkosten [€] | Kosten pro Bus [€] |
|-------------|--------------|------------------|-------------------------|
| | 19 | 1,741 Mio. | 91.650 |
| | 12 | 1,292 Mio. | 107.600 |
| | 41 | 3,597 Mio. | 87.750 |
| | 10 | 0,718 Mio. | 71.850 |
| | 22 | 2,050 Mio. | 136.700 ¹⁾²⁾ |
| | 10 | 0,662 Mio. | 94.500 |
| | 22 | 2,961 Mio. | 134.600 ²⁾ |
| | 17 | 1,570 Mio. | 98.100 |
| | 17 | 1,525 Mio. | 89.700 |
| | 7 | 0,592 Mio. | 84.500 |
| | 28 | 1,312 Mio. | 100.900 ¹⁾ |

¹⁾ bezogen auf Teilflotte ²⁾ inkl. Baumaßnahmen für Flächenerweiterung

Tabelle 5-2: Investitionskosten in die Ladeinfrastruktur und in Brandschutzmaßnahmen

Jede Kalkulation von Investitionskosten für die Ladeinfrastruktur und Brandschutzmaßnahmen steht aufgrund der vergleichsweise hohen Sprungkosten für den Netzanschluss, die Transformatoren, die Verkabelung und Brandschutzmaßnahmen vor einem nicht sauber auflösbaren Dilemma. Hierbei geht es um die Frage, für welche Flottengröße die Berechnungen vorgenommen werden. Rechnet man die Sprungkosten während der Anfangsphase des Flottenaufbaus mit ein, ergibt sich in zugehörigen Kostenvergleichen ein verzerrtes Bild. Daher wurden die Kosten für einen vollständigen Ausbau der Ladeinfrastruktur und aller Brandschutzmaßnahmen (Anlage 1) ermittelt und anschließend für die Kostenvergleiche auf Kosten je Bus umgerechnet.

Eine weitere Herausforderung ist die Frage nach der Anrechenbarkeit von Kosten. Betrachtet man die Kosten in Tabelle 5-2, so fallen die überproportional hohen Kosten für die Betriebshöfe Hettinger und Seitz auf. Für beide Betriebshöfe wurden Baukosten für die Herrichtung der Erweiterungsflächen eingerechnet.

Die Kostenunterschiede pro Bus generell ergeben sich darüber hinaus aus den unterschiedlichen Bedingungen vor Ort, insb. die Kosten für die Verkabelung oder Hochwasserschutz. Darüber hinaus sind nicht alle notwendigen Brandschutzmaßnahmen, insb. Brandschutzmauern und Quarantäneflächen auf allen Betriebshöfen notwendig bzw. integrierbar.

Gegenwärtig existieren noch keine seriösen Datengrundlagen für die Berechnung der Betriebskosten für die Ladeinfrastruktur. Es werden daher Parallelen zu den Werten der Standardisierten Bewertung⁴ gezogen. Die jährlichen Wartungs- und Instandhaltungskosten werden wie folgt angesetzt:

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

Daraus ergeben sich die in Tabelle 5-3 aufgeführten jährlichen Wartungs- und Instandhaltungskosten. Der Eigenenergieverbrauch wird den Energieverbrauchswerten der Batteriebusse mit einem Faktor von 1,15 zugeschlagen. Enthalten sind des Weiteren Personalkosten für die Betreuung der Ladeinfrastruktur.

⁴ Standardisierte Bewertung von Verkehrsweginvestitionen des öffentlichen Personennahverkehrs

| Unternehmen | Gesamtflotte | W&I-Kosten gesamt [€/a] | W&I-Kosten pro Bus [€/a] |
|-------------|--------------|-------------------------|--------------------------|
| | 19 | 43.300 | 2.280 |
| | 12 | 34.300 | 2.860 |
| | 41 | 70.400 | 1.720 |
| | 10 | 26.100 | 2.610 |
| | 22 | 42.300 | 2.820 ¹⁾ |
| | 10 | 24.450 | 3.490 |
| | 22 | 46.000 | 2.090 |
| | 17 | 45.500 | 2.840 |
| | 17 | 42.300 | 2.640 |
| | 7 | 23.750 | 1.480 |
| | 28 | 32.600 | 2.040 ¹⁾ |

¹⁾ bezogen auf Teilflotte

Tabelle 5-3: Jährliche Wartungs- und Instandhaltungskosten für die Ladeinfrastruktur und Brandschutzmaßnahmen

5.7 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 5-4. 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 |

Tabelle 5-4: Notwendige Schulungen für den Betrieb von Bussen mit Hochvoltanlage

Die Schulungskosten für die einzelnen Stufen wurden anhand von Kostensätzen pro Bus berechnet und werden jeweils aufsummiert in den Kostenvergleichen im Kapitel 6 zusammengefasst.

5.8 Eignung der Betriebshöfe für Brennstoffzellenbusse

Von Brennstoffzellenbussen geht bei richtigem Umgang keine größere Gefahr als von Dieselnbussen 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 Brennstoffzellenbusse 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
- Abgrenzung des Bereichs, in dem in einer Werkstatt an Brennstoffzellenbussen gearbeitet wird, zumindest bei Arbeiten an gasführenden Bauteilen
- Absaugvorrichtungen bei Arbeiten an gasführenden Teilen
- Vermeidung von Zündquellen in Bereichen, in denen baubedingt die Bildung von explosionsfähigen Luft-Wasserstoff-Gemischen nicht ausgeschlossen werden kann.

Für die Betriebshöfe wurde geprüft, inwiefern die Abstellhallen und Werkstätten grundsätzlich für die Abstellung von Brennstoffzellenbussen geeignet sind. Als geeignete Lüftung wurde dabei das Vorhandensein einer Lüftung (Oberlichter mit Möglichkeit der Öffnung) an einer definiert höchsten Stelle bzw. eine natürliche Luftkonvektion in Abstellhallen betrachtet. Die Ausrüstung mit explosionsgeschützter Stelltechnik sowie das Vorhandensein von Zündquellen wurden dabei vernachlässigt.

| Unternehmen | Lüftung Werkstatt | Lüftung Abstellhalle |
|-------------|---|---|
| [REDACTED] | vorhanden, Wellblech quer zur Steigrichtung | natürliche Konvektion |
| [REDACTED] | nicht gegeben | nicht gegeben |
| [REDACTED] | vorhanden, Wellblech quer zur Steigrichtung | nicht gegeben |
| [REDACTED] | nicht gegeben | nicht gegeben |
| [REDACTED] | nicht gegeben | Freiaufstellung |
| [REDACTED] | eingeschränkt gegeben | eingeschränkt gegeben |
| [REDACTED] | Werkstatt im Umbau | Freiaufstellung |
| [REDACTED] | vorhanden | Freiaufstellung |
| [REDACTED] | keine Werkstatt | Freiaufstellung |
| [REDACTED] | nicht gegeben | ggf. Freiaufstellung |
| [REDACTED] | eingeschränkt gegeben | eingeschränkt gegeben ggf. Freiaufstellung |

Tabelle 5-5: Ausstattung der Werkstätten und Abstellhallen für Brennstoffzellenbusse mit Lüftungsvorrichtungen bzw. natürlicher Luftkonvektion

Die Ergebnisse in Tabelle 5-5 zeigen, dass die Werkstätten und Abstellhallen in ihrem Ist-Zustand nicht oder nur sehr eingeschränkt für Brennstoffzellenbusse geeignet sind.

Sofern die Betankung mit Wasserstoff auf eigenen Betriebshöfen erfolgen soll, sind ausreichende Platzreserven von mindestens rund 500 m² für die Anlieferung, die Lagerung, die Verdichtung und das Vertanken von Wasserstoff an mindestens zwei unabhängigen Dispensern notwendig.

Von den betrachteten Betriebshöfen bieten lediglich die Betriebshöfe der Firmen [REDACTED] [REDACTED] die notwendigen Platzreserven.

6 Kostenvergleiche

6.1 Mengenmodell und Betrachtungshorizont

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
 - 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.

Analog zur Berechnung der Investitionskosten für die Ladeinfrastruktur wird eine Gesamtbetrachtung durchgeführt, für die jedoch Kostenunterschiede je Fahrzeug-Kilometer ausgewiesen werden. Da der weit überwiegende Teil der Verkehrsleistungen mit Solobussen in unterschiedlicher Ausführung erbracht werden, beschränken sich die Kostenvergleiche auf diese Fahrzeuglänge.

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

6.1.1 Dieselbusse

Dieselbusse werden im vorliegenden Vergleich als Referenzantriebe betrachtet. Dabei wird bewusst darüber hinweggesehen, dass

- die Verfügbarkeit von geeigneten Dieselbussen ab etwa 2029 (Euro 7) ungewiss ist und
- die EU-Vorgaben zur CO₂-Flottengrenzwertenormierung die Beschaffung von Dieselbussen ab dem Jahr 2030 extrem erschweren werden.

Der Vergleich mit Dieselbussen dient vielmehr dazu, eine für Verkehrsbetriebe griffige Vergleichsgrundlage zu nutzen. Je Verkehrsunternehmen wurde jeweils die Anzahl von Solobussen für den Linienverkehr in die Berechnungen einbezogen.

Um die Ergebnisse miteinander vergleichbar zu halten, wurde ein einheitliche mittlere jährliche Laufleistung von 50.000 km pro Linienbus angesetzt

6.1.2 Batteriebusse

Wie in Kapitel 4 gezeigt wurde, sind die Umlaufpläne selbst beim jetzigen Stand der Technik sehr gut 1:1 mit Batteriebussen bedienbar. Daher wird von keinem Fahrzeugmehrbedarf ausgegangen, jedoch von Neuzuschnitten der Umlaufpläne. Dabei ist von keinem oder nur einem sehr geringen Mehrbedarf an Fahrpersonalstunden,

Leer-Kilometern und Zusatzverbräuchen auszugehen. Für einige Verkehrsunternehmen liegt der Wert bei null, maximal ist pro Jahr mit einem relativen Mehraufwand an Leer-Kilometern von 3,5 % der Jahreslaufleistung und einem Mehraufwand an Fahrpersonalstunden von 3,6 % der jährlichen Dienstplanmasse auszugehen. Die Werte beziehen sich auf Batteriebusse mit rein elektrischer Heizung.

6.2 Fördermöglichkeiten

6.2.1 Bundesförderung

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 Batteriebussen 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 Referenzwerte für die Kosten 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 Batteriebusse vor:
 - o 270.000 € für Kleinbusse
 - o 450.000 € für Midibusse
 - o 570.000 € für Solobusse
 - o 730.000 € 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. €.
- Da sich die Förderung der Fahrzeuge allein auf die Mehrkosten zwischen emissionsfreien und Dieselbussen bezieht, ist das sog. Grundfahrzeug ausdrücklich nicht Gegenstand der Förderung. Dadurch darf die BMDV-Förderung mit einer Landes- oder anderweitigen Busförderung für Dieselbusse kumuliert werden. Weist eine Landesförderung spezielle Fördersätze für emissionsfreie Fahrzeuge aus, dürfen diese hingegen nicht mit der Bundesförderung kombiniert werden.
- In den bisherigen Förderrunden war das Fördervolumen jeweils deutlich überzeichnet. Gegenwärtig konzentriert sich das BMDV auf die Förderung von Verkehrsbetrieben, die bis dato noch keine emissionsfreien Linienbusse betreiben.

6.2.2 Förderung durch das Land Baden-Württemberg

Richtlinie zur Förderung umweltfreundlicher emissionsarmer ÖPNV-Linienbusse und Bürgerbusse zur Ergänzung des öffentlichen Personennahverkehrs des Ministeriums für Verkehr des Landes Baden-Württemberg (Richtlinie Busförderung) vom 17. August 2023

Die Richtlinie bietet die Möglichkeit, Investitionsmehrkosten von Batteriebussen gegenüber vergleichbaren Dieselsebussen zu fördern (Zuwendungsfähige Kosten). Die Förderintensität beträgt für kleine Unternehmen 80 % und für mittlere und große Unternehmen 75 %, wobei ab dem Förderjahr 2025 ein jährliches Abschmelzen von 5 % vorgesehen ist.

Die zuwendungsfähigen Kosten ergeben sich wiederum aus Referenzwerten für Dieselsebuse und Preisobergrenzen für vergleichbare Batteriebusse. Hierbei orientiert sich das Land Baden-Württemberg an den Werten der Bundesförderung gemäß Punkt 6.2.1. Die Beihilfen sind je Unternehmen auf 500.000 € in drei Steuerjahren begrenzt, was defacto zu einer Limitierung der Förderung auf zwei Solobatteriebusse in drei Jahren führt.

6.3 THG-Quote

Basierend auf der Renewable Energy Directive II der Europäischen Union und des Bundes-Immissionsschutzgesetzes – BImSchG (§ 37) sind Quotenverpflichtete (Mineralölfirmen) 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 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:

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

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)

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

AF_{AE} Anpassungsfaktor für Antriebseffizienz von Elektroantrieben: 0,4

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

0,0036 Umrechnungsfaktor zwischen GJ und kWh.

Für das Jahr 2023 lag 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).

Ein Blick auf die 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 Beimischung 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 rund 50 % des derzeit maximal möglichen THG-Quotenerlöses angesetzt.

Angesetzt werden 6.000 € pro Bus und Jahr. 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.

6.4 Förderszenarien

Die Ergebnisse der Vergleichsrechnungen sind neben den Annahmen zu Kostensätzen 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 Förderszenarien betrachtet:

- Förderszenario 1: - Förderung der Fahrzeuge und Infrastruktur durch den Bund (s. Kapitel 6.2.1)
- THG-Quoten-Erlöse gemäß Kapitel 6.3
- Förderszenario 2: - Förderung der Fahrzeuge durch das Land Baden-Württemberg (s. Kapitel 6.2.2) mit einem Fördersatz der Mehrkosten gegenüber Dieseln von 70 % und einer Beachtung der Maximalförderung von 500.000 € in drei Steuerjahren
- THG-Quoten-Erlöse gemäß Kapitel 6.3
- Förderszenario 3: - keine Förderung der Fahrzeuge und Infrastruktur durch den Bund oder das Land
- THG-Quoten-Erlöse gemäß Kapitel 6.3
- Förderszenario 4: - keine Förderung der Fahrzeuge und Infrastruktur
- keine THG-Quoten-Erlöse.

Die Förderszenarien 1 und 3 stecken das Spektrum hinsichtlich der Förderung ab. Zwischen diesen beiden Förderszenarien 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 Förderszenario betrachtet wird.

6.5 Kostenvergleiche

Der Kostenvergleich wird als Gegenüberstellung von Diesel- und Batteriebusbetrieb, bezogen auf einen Zeitraum von 10 Jahren, vorgenommen. Darin enthalten sind alle Kosten, die sich zwischen den einzelnen Antriebsformen unterscheiden. Mithin handelt es sich nicht um einen Vergleich der Vollkosten.

6.5.1 Kalkulationsgrundlagen

Die vereinheitlichten Kalkulationsgrundlagen werden in den nachfolgenden Ausführungen und Tabellen dargestellt, soweit sie nicht bereits in früheren Kapiteln angegeben wurden.

| Bezeichnung | Einheit | Wert(e) |
|---|---------|---------|
| Fahrzeugpreis (voll ausgestattet) | €/Bus | 310.000 |
| Kalkulatorischer Zins | % | 6,0 |
| Abschreibungszeitraum | a | 8 |
| Nutzungszeitraum | a | 10 |
| Instandhaltungs- und Wartungskosten pro Fahrzeug-k ¹ | €/Fz-km | 0,39 |
| Jährliche Versicherung pro Fahrzeug, Vollkasko und Haftpflicht | €/a | 3.300 |
| Spezifische Diesel- und Heizölkosten ¹⁾ | €/km | 0,43 |
| Spezifische AdBlue-Kosten ^{1) 2)} | €/km | 0,007 |

¹⁾ basierend auf 1,3 €/l Diesel und 0,85 €/l Heizöl ²⁾ basierend auf 0,42 €/l AdBlue

Tabelle 6-1: Kennzahlen Fahrzeugkalkulation Dieselbusse

Für Batteriebusse liegt nach wie vor keine zuverlässige Datengrundlage bzgl. der Wartungs- und Instandhaltungskosten vor, da die verfügbaren Zahlen stark durch die noch mangelnde Produktreife im Vergleich mit Dieseln geprägt sind. Gelegentlich kolportierte Einsparungen von bis zu 30 % gegenüber Dieseln sind

jedoch als unrealistisch anzusehen, da sehr viele Kosten antriebsunabhängig sind. Daher wurde mit einer Differenz von -4 Cent je Fahrzeug-Kilometer gerechnet.

Die Versicherungen für Batteriebusse unterscheiden sich erheblich von Anbieter zu Anbieter. Der Wert in Tabelle 2-1 spiegelt einen mittleren Wert inkl. Zusatzkosten für die Gebäudeversicherung wider.

| Bezeichnung | Einheit | Wert(e) |
|--|---------|---------|
| Fahrzeugpreis (voll ausgestattet) | €/Bus | 620.000 |
| Abschreibungszeitraum Fahrzeug / Batterie | a | 8 / 8 |
| Nutzungszeitraum Fahrzeug / Batterien | a | 10 / 10 |
| Instandhaltungs- und Wartungskostendifferenz pro Fahrzeug-km ¹⁾ | €/Fz-km | -0,04 |
| Jährliche Versicherung pro Fahrzeug, Vollkasko und Haftpflicht ²⁾ | €/a | 3.900 |
| Spezifische Energiekosten ²⁾ | €/km | 0,32 |
| Spezifische Heizölkosten | €/km | 0,03 |
| Schulungskosten | €/Bus | 4.000 |
| Fahrpersonalkosten | €/h | 25 |

¹⁾ im Vergleich mit Dieselsebussen ²⁾ basierend auf 0,35 €/kWh ³⁾ basierend auf 0,85 €/l Heizöl

Tabelle 6-2: Kennzahlen Fahrzeugkalkulation Batteriebusse mit Hybridheizung

In Tabelle 6-3 werden abschließend die Abschreibungs- und Nutzungszeiträume der Ladeinfrastrukturen, der Werkstattausrüstung sowie die Prozentsätze für die Ermittlung von deren jährlichen Wartungs- und Instandhaltungskosten aufgelistet.

| | 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 / 35 | 1,4 |
| | Baukostenzuschuss | 25 / 35 | - |
| | Ladegeräte komplett | 10 / 10 | 2,0 |
| | sonst. Bauliche Maßnahmen | 25 / 35 | 1,4 |
| | sonstige Kosten ¹⁾ | 25 / 35 | - |
| Werkstattausrüstung | Dacharbeitsplätze 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 Bauebenenleistungen, Baustelleneinrichtung

Tabelle 6-3: Kennzahlen für die Kalkulation der Infrastrukturkosten

6.5.2 Ergebnisse

Die den Differenzkosten zugrundeliegenden Kosten für Batteriebusse beschreiben diejenigen Kosten, die unmittelbar durch deren Einsatz verursacht werden. Entsprechend wurden die äquivalenten Kosten für Dieselsebuss berücksichtigt. Neben den Kapitalkosten fließen hier auch laufende Kosten für Elektroenergie bzw. Diesel und AbBlue, Wartung und Instandhaltung, Schulungen und Versicherungen ein. Ebenso enthalten sind die Mehrkosten durch zusätzliche Leerkilometer für Batteriebusse. Nicht mit enthalten sind hingegen alle diejenigen Kosten,

die auch bei beiden Antriebsformen gleich sind. Hierzu gehören u. a. die ohnehin anfallenden Fahrpersonalkosten, Abschreibungen auf Gebäude und bereits vorhandene Anlagen sowie sonstige Allgemeynkosten.

Die in Tabelle 6-4 aufgeführten Differenzkosten pro Fahrzeug-Kilometer unterscheiden sich zwischen den einzelnen Verkehrsunternehmen in Abhängigkeit von den fahrzeugbezogenen Infrastrukturkosten sowie den betrieblichen Mehraufwänden. Die Kostendifferenz gegenüber dem Diesellbusbetrieb wird dabei hauptsächlich durch die Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturkosten bestimmt. Die Investitionsmehrkosten werden durch die geringeren Betriebskosten nur teilweise aufgefangen.

| Unternehmen | Differenzkosten bei Förderung gemäß | | | |
|-------------|-------------------------------------|------------|------------|------------|
| | Szenario 1 | Szenario 2 | Szenario 3 | Szenario 3 |
| | 0,58 | 1,04 | 1,18 | 1,30 |
| | 0,56 | 1,14 | 1,22 | 1,34 |
| | 0,57 | 1,07 | 1,14 | 1,26 |
| | 0,57 | 1,04 | 1,16 | 1,28 |
| | 0,59 | 1,14 | 1,26 | 1,38 |
| | 0,56 | 0,95 | 1,13 | 1,25 |
| | 0,59 | 1,19 | 1,23 | 1,35 |
| | 0,58 | 1,17 | 1,19 | 1,30 |
| | 0,56 | 1,13 | 1,15 | 1,27 |
| | 0,56 | 1,07 | 1,22 | 1,34 |
| | 0,56 | 1,13 | 1,19 | 1,31 |

Tabelle 6-4: Differenzkosten zwischen Batterie- und Diesellbusbetrieb pro Fahrzeug-Kilometer [€/Fz-km]

Im Szenario 2 verzerrt die Begrenzung der Fördersumme auf 500.000 € in drei Steuerjahren bzw. zwei Batteriebusse die Kostendifferenzen zwischen den Verkehrsunternehmen, da die Förderintensität bei Verkehrsunternehmen mit einer kleinen für VGMT-Leistungen eingesetzten Flotte höher ist als bei größeren Flotten. Hinzu kommt, dass unterstellt wurde, dass die Förderung ausschließlich für Batteriebusse im Auftrag der VGMT in Anspruch genommen wird.

Die Differenzkosten werden ebenfalls von den gewählten Randbedingungen beeinflusst. Deren Wirkungen werden nachfolgend erläutert.

Nutzungszeit der Busse

Die Nutzungszeit der Busse wurde auf die typische Vertragslaufzeit von 10 Jahren (8 + 2) begrenzt. Dabei wurde unterstellt, dass Verkehrsunternehmen kalkulatorisch keine Weiternutzung der Busse einrechnen. Dies gilt insb. für Batteriebusse, da eine weitere Nutzungszeit mit einem Batterietausch verbunden wäre. Würde man

- a) längere Vertragslaufzeiten zulassen und
- b) für Batteriebusse höhere Maximal- und Durchschnittsalter zugestehen

sinken die Differenzkosten.

Abschreibungs- und Nutzungszeit der Ladeinfrastruktur

Wie Tabelle 6-3 zu entnehmen ist, wurden bei den Vergleichsrechnungen für die Ladeinfrastrukturkomponenten technisch bedingte Abschreibungs- und Nutzungszeiten angesetzt. Für private Verkehrsunternehmen stellt dieser kalkulatorische Ansatz ein unternehmerisches Risiko dar, da die Zeiten deutlich über den Nutzungszeiten liegen. Wie sich ein Verkehrsunternehmen letztendlich entscheidet, kann von außen nicht bewertet werden. Schließlich haben Verkehrsunternehmen mit bereits installierter Ladeinfrastruktur bei Folgeausschreibungen klare Wettbewerbsvorteile. Um hier einen Kompromiss zu finden, wurden die Abschreibungs- und Nutzungszeit der Ladegeräte und damit der teuersten Komponenten auf 10 Jahre begrenzt.

Folgt ein Verkehrsunternehmen diesem Ansatz nicht und kalkuliert mit einer Nutzungszeit von 10 Jahren für die gesamte Ladeinfrastruktur, steigen die Differenzkosten substantiell an.

Personalkostensätze

Um die Differenzkosten miteinander vergleichbar zu halten, wurden einheitliche Personalkostensätze verwendet. Die dadurch erzeugte Ergebnisverzerrung ist jedoch gering, da nur reichweitenbedingte Mehraufwände an Fahrpersonalstunden betrachtet wurden.

Sonstige Kostenansätze sowie Risikoaufschläge und Gewinnmargen

Bei den Kostenbetrachtungen dominieren die Kapitalkosten für Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur, gefolgt von den Kosten für Diesel und Elektroenergie. Wie die vergangenen zwei Jahre gezeigt haben, sind Prognosen zu deren Preisentwicklungen sowie zur allgemeinen Preissteigerung weitgehend spekulativ, weshalb mit aktuellen Kostensätzen gerechnet wurde. Insb. das Verhältnis von Diesel- zu Energiepreis beeinflusst jedoch die Kostendifferenzen.

Der individuelle Umgang mit Risikoaufschlägen und Gewinnmargen kann nicht bewertet werden, da es sich hierbei um elementare Betriebsgeheimnisse und unternehmerische Entscheidungen handelt. Aus vergleichbaren Projekten ist jedoch bekannt, dass inhabergeführte Verkehrsunternehmen zu höheren Risikoaufschlägen bei bis dato nicht eingesetzten Technologien, sprich Batteriebusen und Ladeinfrastruktur neigen.

Förderung und THG-Quotenerlöse

Förderprogramme für Batteriebusse und Ladeinfrastruktur waren in der Vergangenheit z. T. vielfach überzeichnet. Die Wahrscheinlichkeit einer Förderzusage ist somit gering und vor allem vorab nicht kalkulierbar.

Wie bereits im Punkt 6.3 dargelegt, sind THG-Quotenerlöse extrem volatil und deren Höhe nicht seriös für einen längeren Zeitraum kalkulierbar.

In Summe wird empfohlen, Entscheidungen für die Ausschreibung von Batteriebusleistungen nicht auf den Differenzenkosten der Förderszenarien 1, 2 und 3 basieren zu lassen.

7 Zusammenfassende Bewertung und Handlungsempfehlungen

7.1 Zusammenfassende Bewertung

Wie bereits erwähnt, erfolgt die Bewertung der einzelnen Verkehrsunternehmen anhand weitgehend objektivierbarer Bewertungskriterien. Die beiden nachfolgenden Tabellen zeigen die Ergebnisse für die betrieblichen und infrastrukturellen Bewertungskriterien.

| Unternehmen | Bewertungskriterium | | |
|-------------|---------------------|-----------------|----|
| | B1 ¹⁾ | B2 | B3 |
| [REDACTED] | + / o | + ²⁾ | ++ |
| [REDACTED] | ++ / ++ | ++ | ++ |
| [REDACTED] | + / o | + ²⁾ | ++ |
| [REDACTED] | + / + | + | o |
| [REDACTED] | + / + | + ²⁾ | ++ |
| [REDACTED] | ++ / ++ | ++ | ++ |
| [REDACTED] | o / o | - ²⁾ | ++ |
| [REDACTED] | ++ / ++ | - ²⁾ | ++ |
| [REDACTED] | ++ / + | ++ | ++ |
| [REDACTED] | ++ / ++ | ++ | ++ |
| [REDACTED] | ++ / ++ | ++ | ++ |

¹⁾ Hybrid- / rein elektrische Heizung ²⁾ insb. durch zusätzliche Leerfahrten für die Nachladung im Betriebshof

++ sehr gut + gut o neutral - schlecht -- sehr schlecht

B1 – Eignung der vom Verkehrsunternehmen bedienten Umlaufpläne für die 1:1-Umstellung auf Batteriebusbetrieb

B2 – notwendige Mehraufwände für den Neuzuschnitt von Umlaufplänen

B3 – für VGMT-Leistungen verwendete Fahrzeuglängen

Tabelle 7-1: Bewertung anhand betrieblicher Aspekte

| Unternehmen | Bewertungskriterium | | | | | | |
|-------------|---------------------|------|------|------|-------|------|----|
| | I1 | I2-1 | I2-2 | I2-3 | I2-4 | I2-5 | I3 |
| [REDACTED] | o ²⁾ | ++ | + | ++ | ++ | ++ | ++ |
| [REDACTED] | ++ | - | - | -- | -- | -- | -- |
| [REDACTED] | ++ | ++ | + | ++ | ++ | ++ | ++ |
| [REDACTED] | ++ | o | + | o | ++ | - | ++ |
| [REDACTED] | o ²⁾ | + | + | ++ | ++ | + | ++ |
| [REDACTED] | ++ | -- | -- | -- | - | -- | ++ |
| [REDACTED] | ++ | + | ++ | ++ | ++ | + | ++ |
| [REDACTED] | ++ | ++ | + | o | ++ | - | ++ |
| [REDACTED] | ++ | ++ | -- | -- | n. v. | -- | - |
| [REDACTED] | ++ | - | + | o | ++ | -- | ++ |
| [REDACTED] | ++ | - | + | -- | o | o | ++ |

¹⁾ unter Einrechnung der Erweiterungsflächen ²⁾ in etwa drei Jahren verfügbar

++ sehr gut + gut o neutral - schlecht -- sehr schlecht n. b. nicht bekannt n. v. nicht vorhanden

I1 – Verfügbarkeit von Leistungsreserven im umliegenden Mittelspannungsnetz

I2 – Eignung eines Betriebshofes für

- die Integration der Ladeinfrastruktur inkl. Transformatoren für die Gesamtflotte (I2-1)
- die Integration von Brandschutzmaßnahmen, insb. die Schaffung von Brandabschnitten (I2-2)
- die Integration einer Quarantänefläche (I2-3)
- die Eignung der Werkstatt (I2-4)
- verfügbare Platzreserven (I2-5)

I3 – Hochwassergefahr

Tabelle 7-2: Bewertung anhand der Eignung des Bestandsbetriebs Hofes

Auf eine explizite Bewertung anhand der Differenzkosten wurde verzichtet. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Verkehrsunternehmen liegen mit Ausnahme derjenigen Unternehmen, für die Erweiterungsflächen eingezeichnet wurden, unterhalb der Modellgenauigkeit.

7.2 Handlungsempfehlungen

7.2.1 Rahmenbedingungen

Vertragslaufzeiten

Empfohlen wird die Prüfung von Vertragslaufzeiten, da die gegenwärtig üblichen Vertragslaufzeiten im Widerspruch zu den Nutzungszeiten der Busse und zu den Abschreibungs- und Nutzungszeiten der Ladeinfrastruktur stehen.

Vorlaufzeiten und Übergangsfristen

Die Lieferzeiten für Batteriebusse und die Zeiten bis zur Errichtung der Ladeinfrastruktur belaufen sich auf mindestens 14 bzw. 18 Monate ab Unterzeichnung der Lieferverträge. Verkehrsunternehmen benötigen daher bis zum Beginn eines Batteriebusbetriebs längere Übergangsfristen von bis zu zwei Jahren.

Fahrzeugalter

Aufgrund der nach wie vor substantiell höheren Fahrzeuginvestitionskosten für Batteriebusse wirken sich vertraglich bedingt niedrige Nutzungszeiten stärker auf die kalkulatorisch anzusetzenden Kapitalkosten aus. Leider ist es noch nicht möglich, eine optimale Nutzungszeit vorzugeben, da diese elementar von den Nutzungszeiten der Batterien abhängen. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt wäre eine vertraglich gesicherte Nutzungszeit von 14 – 15 Jahren mit einem einmaligen Batterietausch und ohne Vorgaben zu einem Refurbishing optimal. Mit zunehmenden Nutzungs- und Garantiezeiten für Batterien, die heute bereits bei etwa 10 Jahren liegen, kann sich dieses Optimum in den nächsten Jahren noch verschieben. Daher wird empfohlen, Vorgaben zum Fahrzeug- bzw. Flottenalter an der Entwicklung der Batterienutzungszeiten festzumachen.

Fahrzeugklasse

Das Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungsgesetz gilt gegenwärtig ausschließlich für Linienbusse der Klasse M3 I. Werden Fahrzeuge der Klasse M3 II ausgeschrieben, fallen diese nicht unter die Quotenregelungen des genannten Gesetzes.

7.2.2 Auszuschreibende Verkehrsleistungen

Die nachfolgenden Ausführungen unterstellen, dass zukünftige Verkehrsleistungen für Busse der Klasse M3 I ausgeschrieben werden, mithin also unter die Quotenregelung des Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungsgesetzes fallen.

Basierend auf den oben aufgeführten Bewertungen wird empfohlen, hinsichtlich der Ausschreibung von auslaufenden Verträgen primär jedoch nicht ausschließlich mit folgenden Verkehrsunternehmen in vertiefende Gespräche (Markterkundung) zu treten:

- [REDACTED]
- [REDACTED]
- [REDACTED]
- [REDACTED]
- [REDACTED]

Die genannten Unternehmen betreiben an Schultagen 66 der insgesamt 103 im Auftrag der VGMT eingesetzten Linienbusse (71 von 111 Bussen unter Beachtung einer 10 %-Fahrzeugreserve). Eine vollständige Umstellung würde somit theoretisch einer fast vollständigen Erfüllung der Vorgaben des Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungsgesetzes für saubere und emissionsfreie Busse entsprechen.

Es wird jedoch nicht empfohlen, alle Verkehrsleistungen, die gegenwärtig von den genannten Verkehrsunternehmen erbracht werden, zwingend für Batteriebusse auszuschreiben. Vielmehr sollten pro Linienbündel Verkehrsleistungen für mindestens vier bis sechs Batteriebusse (kritische Masse) ausgeschrieben werden, um auch die gesetzlichen Forderungen für emissionsfreie Busse (ab 2025 32,5 %) zu erfüllen. Weitere Batteriebusleistungen können optional als Diesel- bzw. HVO 100-Leistungen ausgeschrieben werden (ggf. Wertungskriterium).

Weiterhin wird empfohlen, vor der Ausschreibung von Verkehrsleistungen für Dieselbusse mit HVO 100 die Verfügbarkeit an örtlich geeigneten Tankstellen zu prüfen, da die kleineren Verkehrsunternehmen über keine eigene Tankstelle verfügen.

Im Sinne einer hohen Betriebssicherheit bei gleichzeitiger Kostenoptimierung wird nicht empfohlen, die ausschließliche Bedienung einer Linie mit Batteriebusen zu fordern. Vielmehr sollte es den Verkehrsunternehmen innerhalb der ausgeschriebenen Verkehrsleistungen freigestellt sein, einen festzulegenden Anteil an Fahrzeug-Kilometern mit Batteriebusen zu erbringen. Die Vorgaben können mit Anreizen für den Einsatz von Batteriebusen kombiniert werden.

Da HVO 100 ohne jegliche Anpassungen für Dieselmotoren genutzt werden kann, wird die Überwachung der tatsächlichen Erbringung einen erhöhten Aufwand an Nachweispflichten und Kontrollen, z. B. von Tankbelegen, nach sich ziehen.

7.2.3 Brennstoffzellenbusse

Grundsätzlich ist es möglich, statt Batteriebusen auch Brennstoffzellenbusse zur Erfüllung der Vorgaben des Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungsgesetzes einzusetzen. Grundvoraussetzung hierfür sind

- ein redundanter Bezug von ausreichend reinem Wasserstoff bzw. mindestens zwei voneinander unabhängige H₂-Tankstellen für Nutzfahrzeuge (350 bar, entsprechende Vorhaltemengen) in akzeptabler Nähe zu den Betriebshöfen,
- ausreichend Platzreserven für den Aufbau einer Tankinfrastruktur sowie
- zumindest eine geeignete Werkstatt mit notwendigen Abtrennungen und Lüftung an definiert höchsten Stellen.

Die Betriebshöfe sind in ihrem Ist-Zustand nur eingeschränkt für Brennstoffzellenbusse geeignet und bedürfen z. T. substantieller Umbauarbeiten.

Dessen unbenommen sollte es den Verkehrsunternehmen im Rahmen einer technologieoffenen Ausschreibung in ihrer unternehmerischen Entscheidung überlassen bleiben, inwiefern die Forderung nach emissionsfreien Verkehrsleistungen mit Brennstoffzellen- oder Batteriebusen erbracht werden. Eine gezielte Ausschreibung von Brennstoffzellenbusleistungen wird vor dem Hintergrund der Unternehmensstruktur und der Voraussetzungen auf den Betriebshöfen nicht empfohlen.

7.2.4 Kostenübersicht

Die vollständige Umstellung aller VGMT-Busverkehrsleistungen auf Batteriebusse wäre basierend auf einem Preisstand von 2023 / 2024 mit Investitionskosten in Höhe von

- ca. 67,3 Mio. € für die Fahrzeuge,
- ca. 16,5 Mio. € für Ersatzbatterien und
- ca. 10,2 Mio. € als anteilige Kosten für die beschriebene Umrüstung der Betriebshöfe inkl. der Installation der anteiligen Ladeinfrastruktur und Netzanbindung

verbunden. Würden hingegen weiterhin ausschließlich Dieselbusse zum Einsatz kommen, wäre dies mit Investitionskosten für die Fahrzeuge in Höhe von etwa 34,2 Mio. € verbunden.

Die Umstellung von rund 65 % der Busse auf elektrische Antriebe (s. o.) hätte wiederum basierend auf einem Preisstand von 2023 / 2024 Investitionskosten in Höhe von

- ca. 40,9 Mio. € für die Fahrzeuge,
- ca. 9,9 Mio. € für Ersatzbatterien und
- ca. 7,1 Mio. € als anteilige Kosten für die beschriebene Umrüstung der Betriebshöfe inkl. der Installation der anteiligen Ladeinfrastruktur und Netzanbindung

zur Folge. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass ausgesuchte Linien bzw. Linienbündel vollständig für eine Umstellung zu betrachten sind.

Auch wenn nicht abschließend bewertet werden kann, wie die Verkehrsunternehmen

- die notwendigen Investitionskosten innerhalb welcher Zeiträume abschreiben und
- die anfänglichen Sprungkosten gleichmäßig auf den gesamten Fuhrpark umrechnen,

ist mit Nettomehrkosten pro Fahrzeugkilometer von im Schnitt etwa 0,56 €/Fz-km (mit Bundesförderung) bis ca. 1,25 – 1,38 €/Fz-km ohne jegliche Förderung zu rechnen. Hinzu kommen Risikoaufschläge sowie natürlich eine Gewinnmarge, wobei beides nicht abgeschätzt werden kann.