



vischenkreis



400 VAC



Leitfaden für Busse mit alternativen Antrieben



NOW-GMBH.DE

24 VDC

DC

DC

DC

AC

Herausgeber

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)
 Invalidenstraße 44 | 10115 Berlin
 Referat G23 Elektromobilität
 E-Mail: Ref-g23@bmvi.bund.de

Koordination

NOW GmbH – Begleitforschung Innovative
 Antriebe im straßengebundenen ÖPNV
 Oliver Hoch
 Fasanenstraße 5 | 10623 Berlin
 Telefon: 030 / 311 6116-703
 E-Mail: oliver.hoch@now-gmbh.de
 www.now-gmbh.de

**Leitung der Begleitforschung Innovative Antriebe im
straßengebundenen ÖPNV**

Sphera Solutions GmbH
 Michael Faltenbacher
 Hauptstr. 111-113 | 70771 Leinfelden-Echterdingen
 Telefon: 0711 / 341 817 29
 E-Mail: MFaltenbacher@sphera.com

*Gemeinschaftsprojekt im Auftrag des BMVI mit
 hySOLUTIONS, VCDB, FhG IVI, Ingenieurgruppe IVV und SEK Consulting*

Redaktionsteam

Thoralf Knote (Verfasser)
 Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI
 Zeunerstraße 38 | 01069 Dresden
 Telefon: 0351 / 4640-628
 E-Mail: thoralf.knote@ivi.fraunhofer.de
 www.ivi.fraunhofer.de

Mit freundlicher Unterstützung durch

Michael Faltenbacher (Sphera Solutions GmbH)
 Sven-Erik Kratz (SEK Strategy Consulting GmbH)
 Christine Schwärzel-Lange (VCDB GmbH)

Gestaltung

kursiv Kommunikationsdesign | Katrin Schek
 Peter Frey, Angela Köntje

Erscheinungsjahr 2021

Seite	Inhalt
4	1 Einleitung
8	2 Batteriebusse
17	3 Brennstoffzellenbusse
24	4 Oberleitungsbusse
28	5 Kerntechnologien elektrisch angetriebener Busse
38	6 Klimawirkung
40	7 Überblick über die Antriebsformen
44	8 Nützliche Links

Gefördert durch:**Koordiniert durch:**

1 Einleitung

Die Zukunft des ÖPNV wird durch emissionsfreie Antriebe auch für die etwa 35.600¹ von VDV-Mitgliedsunternehmen betriebenen Linienbusse geprägt sein. Dabei stehen rein elektrische Antriebe und Fahrzeuge mit einer Brennstoffzelle im Vordergrund, da nur diese den Forderungen der Clean Vehicles Directive nach „quasi emissionsfreien Antrieben“ gerecht werden.

Wissen über die Möglichkeiten, aber auch die Grenzen der nachfolgend aufgeführten Antriebssysteme sind eine Grundvoraussetzung, um den technologischen

Wandel ausgehend von einer realistischen Erwartungshaltung in den richtigen Schritten bewältigen zu können.

Die Informationen adressieren ausdrücklich nicht auf dem Gebiet „Alternative Busantriebe“ erfahrene und seit Jahren tätige Fachleute. Vielmehr dienen die Informationen der Erlangung von Grundwissen.

Die Einführung von Bussen mit alternativen Antriebssystemen wird nur gelingen, wenn sie sich an den betrieblichen Anforderungen orientiert, wie sie heute

TABELLE 1 Betrachtete Bustechnologien

Batteriebusse	Brennstoffzellenbusse	Oberleitungsbusse
Vollader	BSZ als Hauptenergiequelle	Konventionelle Oberleitungsbusse
Gelegenheitslader	BSZ als Range-Extender	Hybrid-Oberleitungsbusse
Pulslder		

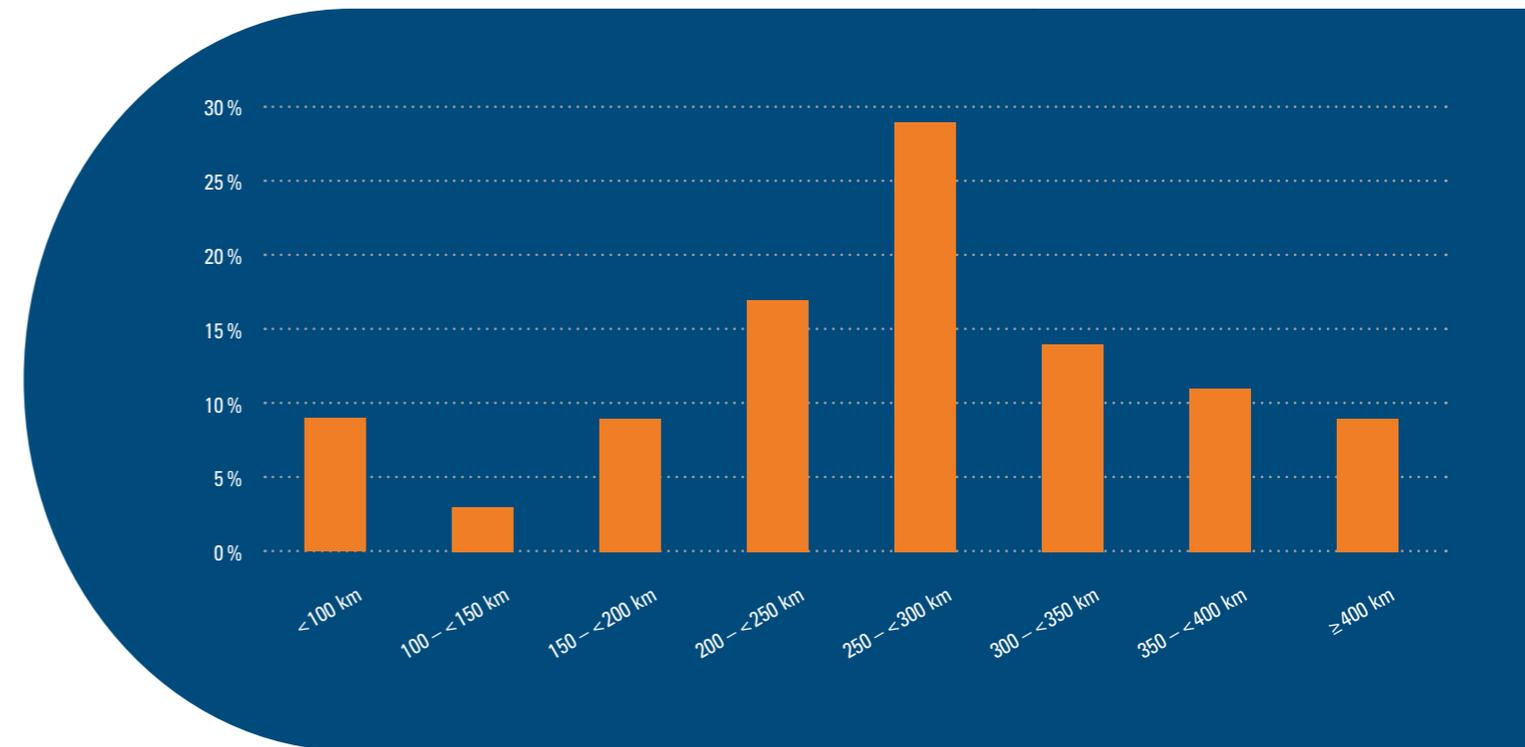
¹ Quelle: VDV-Statistik 2019/ Gesamtbestand an Kraftomnibussen in Deutschland ca. 81.000 (Quelle: KBA 01/2020)

hochoptimiert in Verkehrsbetrieben zu finden sind. Wesentliche Kenngröße ist die Reichweite der Fahrzeuge zwischen Nachlade- bzw. Tankvorgängen, es sei denn, dass sich insb. Nachladevorgänge in bestehende betriebliche Abläufe einpassen lassen.

Die Entscheidungsfindung für die Einführung von Bussen mit alternativen Antriebssystemen setzt

eine umfassende und komplexe Planung voraus, die vollständig zu erklären den Rahmen dieser Broschüre sprengen würde. Wesentliche Planungsschritte und die dafür notwendigen Informationen für grundlegende Entscheidungen sind in Grafik 2 aufgeführt. Notwendige Informationen, sofern sie nicht unternehmensspezifisch sind, werden in den nachfolgenden Kapiteln dargelegt.

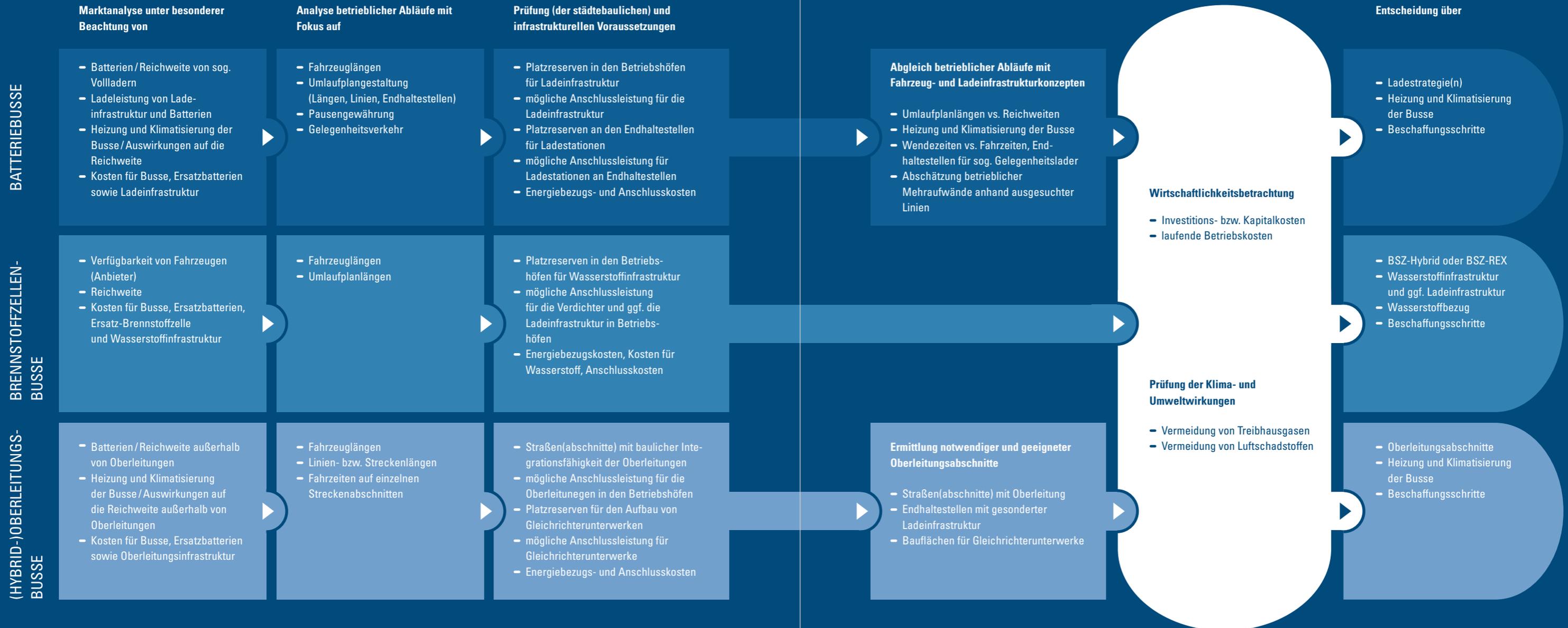
GRAFIK 1 Benötigte Reichweite von Bussen mit Alternativem Antrieb²



² Geringe Reichweiten unter 100 km für Gelegenheitslader

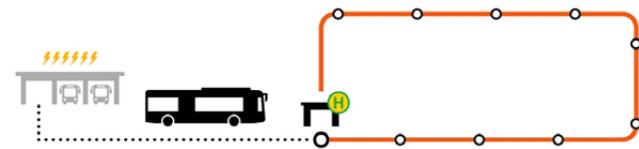
Quelle: VCDB GmbH, Befragung von 27 Verkehrsunternehmen

GRAFIK 2 Schritte für die Entscheidungsfindung



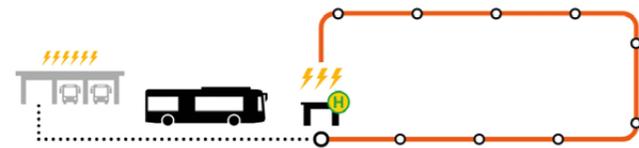
2 Batteriebusse

GRAFIK 3 Übersicht über Ladestrategien für Batteriebusse



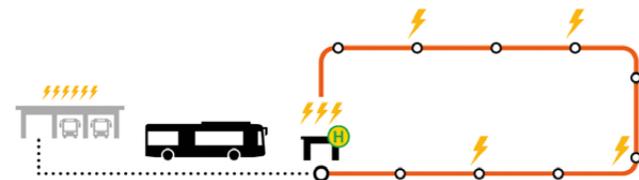
Volllader (Betriebshof-, Depot- oder Übernachtladung)

- Flexible Lade- und Betriebsstrategie
- Ladeinfrastruktur nur im Betriebshof
- Limitiert durch Reichweite, insb. bei vollelektrischer Heizung
- Fahrzeugmehrbedarf



Gelegenheitslader (Opportunity Charging)

- Liniengebundener Einsatz
- Ladeinfrastruktur auch an Endhaltestellen
- Vollelektrische Heizung leicht integrierbar
- Unter bestimmten Voraussetzungen kein Fahrzeugmehrbedarf



Pulsloader (Flash-Charging oder Ultraschnellladung)

- Unflexibler liniengebundener Einsatz
- Hoher Ladeinfrastrukturaufwand (auch an Unterwegshaltestellen)
- Vollelektrische Heizung leicht integrierbar
- i. d. R. kein Fahrzeugmehrbedarf

Eine Mischform zwischen Voll- und Gelegenheitsladern stellt die Nachladung im Betriebshof mit hohen Ladeleistungen von 250 kW und mehr dar. Dabei werden die Batteriebusse im Laufe des Tages für etwa 30 – 60 min auf den Betriebshof zurückgeholt, um sie dort mit hoher Ladeleistung nachzuladen. Zwar ist hierfür, verglichen mit Gelegenheitsladern, ein geringerer Aufwand bei der Errichtung der Ladeinfrastruktur notwendig, jedoch sind zusätzliche Fahrzeuge und mehr Fahrpersonal notwendig.

Volllader werden ausschließlich auf Betriebshöfen nachgeladen und bieten im Vergleich zu Gelegenheits- oder Pulsladern im Rahmen ihrer Reichweite die größtmögliche Flexibilität. Sie können sowohl im Stadt- als auch im Regionalverkehr eingesetzt werden, da sie nicht regelmäßig Ladestationen anfahren müssen. Umleitungen oder Straßensperrungen, die die Erreichbarkeit von Ladestationen verhindern würden oder deren Ausfall spielen daher keine Rolle. Ebenso wird der Einsatz von Vollladern weniger durch Verspätungen beeinflusst.

Den Vorteilen stehen zumindest kurz- bis mittelfristig die noch limitierten Reichweiten von Batteriebusen gegenüber. Diese beträgt für zweiachsige Solobusse derzeit je nach Verkehrsverhältnissen und gewählter Heizungsform (rein elektrisch, Hybridheizung) zwischen 150 und 200 km. Für die nächsten Jahre angekündigt sind Reichweiten von etwa 250 km, auch für Gelenkbusse. Bis zum Ende des Jahrzehnts kann von 300 km Reichweite ausgegangen werden, auch über die gesamte Nutzungszeit eines Batteriebusses.

Bei der Gelegenheitsladung werden planmäßige Aufenthaltszeiten an Endhaltestellen dazu genutzt, die Batterien mithilfe hoher Ladeleistungen nachzuladen. I. d. R. werden Gelegenheitslader ergänzend auch auf Betriebshöfen nachgeladen und hauptsächlich im Stadtverkehr eingesetzt.

In vielen Fällen ist es möglich, mittels Gelegenheitslader Linien oder Linienbündel zu bedienen, ohne bestehende Betriebsabläufe ändern zu müssen (keine zusätzlichen Fahrzeuge). Durch Energiebilanzierungen im Detail zu prüfende Voraussetzung sind jedoch regelmäßig wiederkehrende und ausreichend lange Aufenthaltszeiten an Ladestationen.

Gelegenheitsladung ist i. d. R. ohne Zusatzaufwände möglich, wenn ca. 1/6 (Hybridheizung) bzw. 1/4,5 (rein elektrische Heizung) der Fahrzeit als Aufenthaltszeit an Ladestationen zur Verfügung steht.

Nicht geeignet sind Gelegenheitslader auf Linien mit hoher Verspätungsanfälligkeit, bei häufigen Linienwechseln sowie bei unterschiedlichen Endhaltestellen über den Tagesverlauf hinweg.

Bei der Pulsladung werden die Batteriebusse auch an Unterwegshaltestellen mit sehr hoher Ladeleistung (≥ 450 kW) nachgeladen. I. d. R. sind keine zusätzlichen Fahrzeuge oder Fahrpersonalstunden erforderlich. Ebenso besteht eine geringere Anfälligkeit gegenüber Verspätungen, jedoch ist Pulsladung aufgrund des hohen Ladeinfrastrukturaufwandes nur auf Linien mit sehr vielen Fahrzeugen einsetzbar. Weitere Hemmnisse sind die Notwendigkeit, Ladestationen auch in Innenstadtbereichen installieren zu müssen sowie die Erfordernis, Haltestellen mit Ladestationen immer anfahren zu müssen. Wie Gelegenheitslader sind Pulsloader ebenfalls anfällig gegenüber Sperrungen und Umleitungen.

Vor diesem Hintergrund und aufgrund immer leistungsfähigerer Batterien werden Linien mit Pulsladung eher die Ausnahme bleiben.



Beispiele für Batteriebusse

Quelle: Fraunhofer IVI

Ladeinfrastruktur

Batteriebusse werden mithilfe von Ladegeräten (Ladeleistung bis zu 150 kW) oder -stationen (Ladeleistung i. d. R. größer 200 kW) nachgeladen. Hierbei dominiert die kontaktbasierte Energieübertragung.

Steckverbindungen

Steckverbindungen bestehen aus der fahrzeugseitigen Buchse (auch Inlet genannt) und dem Stecker, bei dem es sich eigentlich um eine elektrische Kupplung handelt. Als Standard setzt sich zunehmend das Gleichstromladen mittels CCS-Inlet und CCS- bzw. Combo-2-Stecker durch.



CCS-Stecker für ausschließliches Gleichstromladen

Quelle: Fraunhofer IVI

Automatisierte Kontaktsysteme

Automatisierte Kontaktsysteme dienen der Übertragung hoher Ladeleistungen (derzeit bis zu einem Megawatt), sind jedoch auch für kleinere Ladeleistungen, z. B. im Betriebshof geeignet. In Europa kommen derzeit im Wesentlichen drei automatisierte Kontaktsysteme zum Einsatz.

- Stemman ChargingPANTO
- Schunk Smart Charging
- TOSA

Alle drei Systeme haben Vor- und Nachteile, die individuell durch Verkehrsbetriebe und Kommunen gegeneinander abgewogen werden müssen. Die wichtigsten Bewertungskriterien sind

- Integrationsfähigkeit im öffentlichen Straßenraum inkl. Beachtung des freizuhaltenden Lichtraumes,
- Integrationsfähigkeit in Betriebshöfen,
- durch das System tolerierte Positionsabweichungen,
- Gewicht und Bauraum auf dem Fahrzeug,
- baulicher Aufwand für den Lademast.

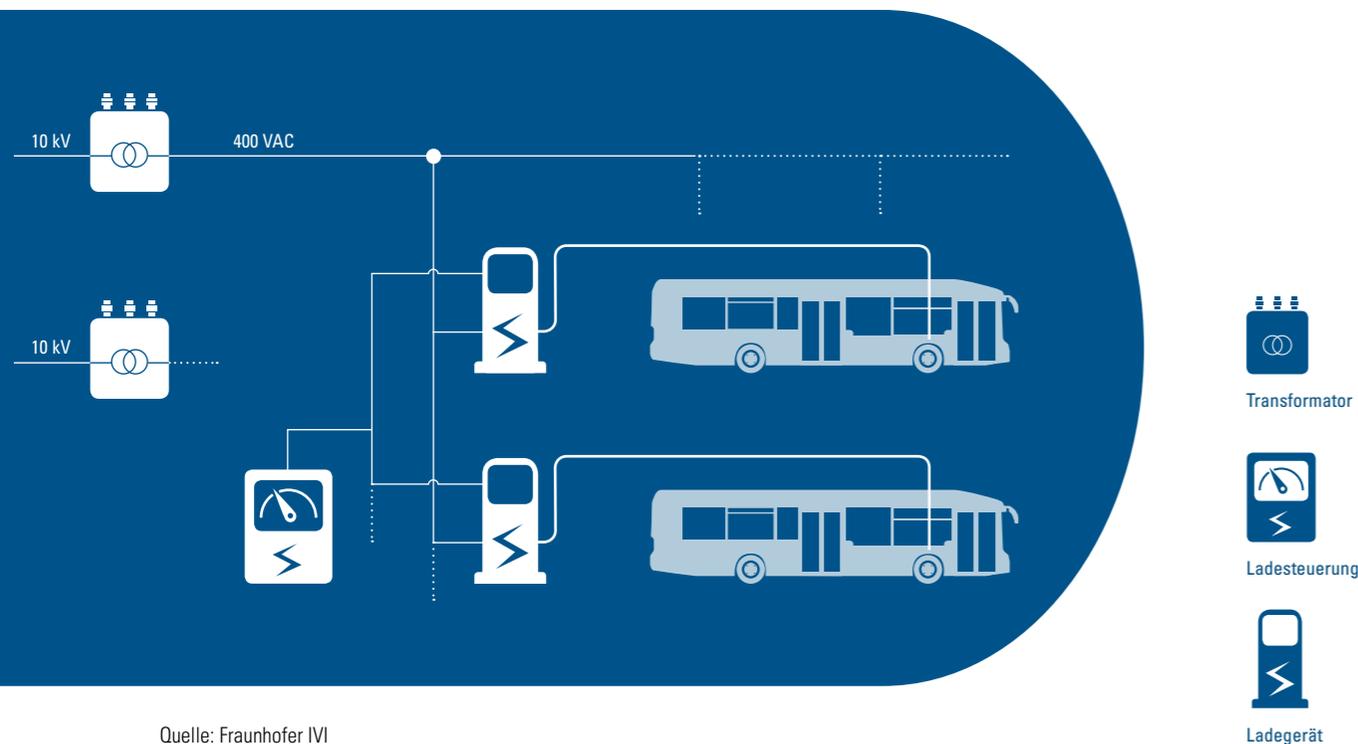
Infrastruktur – Betriebshöfe

Die Ladeinfrastruktur auf Betriebshöfen und i. d. R. auch Ladestationen außerhalb von Betriebshöfen werden über Mittelspannungstransformatoren an das Mittelspannungsnetz (10 oder 20 kV) angeschlossen. Die Leistung der Ladegeräte auf Betriebshöfen sowie die resultierende Gesamtanschlussleistung ist von verschiedenen Faktoren abhängig und muss indivi-

duell ermittelt werden. Pro 50 Busse ist mit einer Anschlussleistung von etwa zwei bis drei MVA zu rechnen.

Der Verlust von Stellplätzen variiert und hängt von der Positionierung der Ladegeräte und der Kabelzuführung ab. In jedem Fall sollte ein Verlust von etwa 10 % eingerechnet werden.

GRAFIK 4 Schematischer Aufbau der Ladeinfrastruktur auf einem Betriebshof



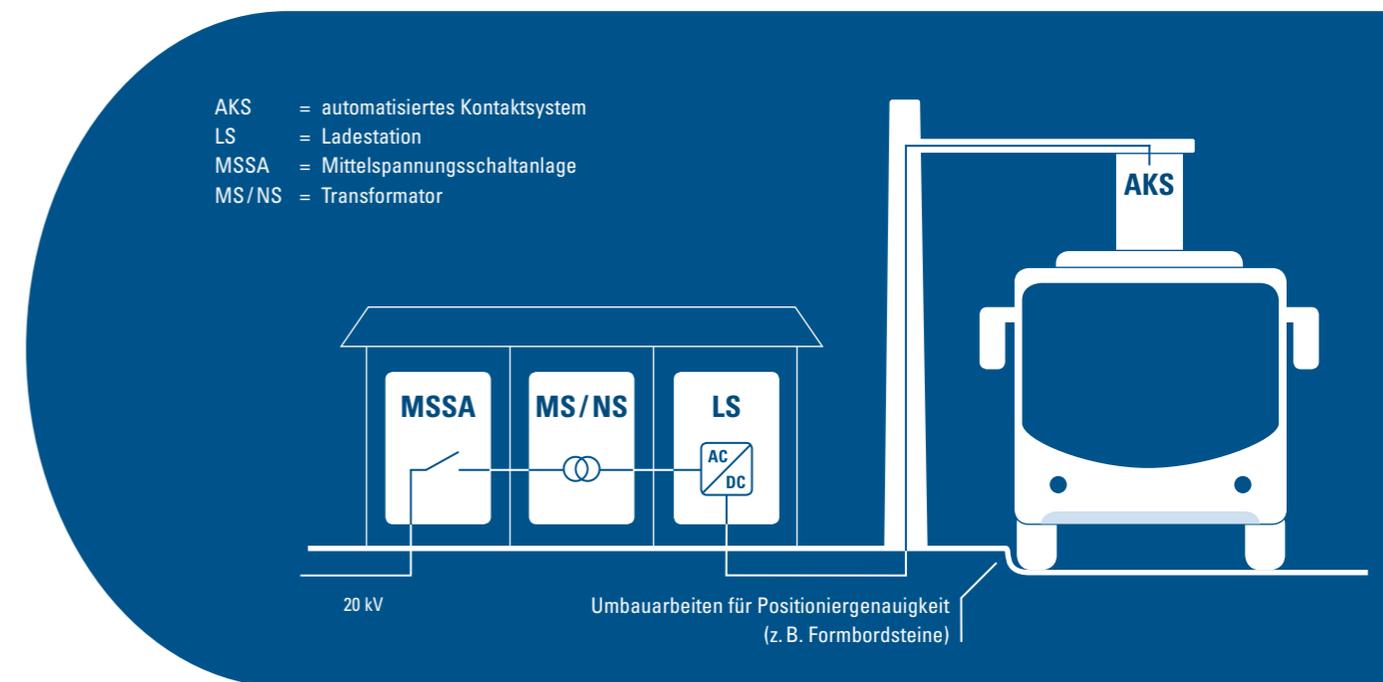
Quelle: Fraunhofer IVI

Infrastruktur – Ladestationen

Ladestationen werden i. d. R. ebenfalls über Mittelspannungstransformatoren versorgt, da vorhandene Niederspannungsnetze oft keine ausreichenden Leistungsreserven aufweisen. Der Anschluss an ein Gleichspannungsnetz von z. B. Straßenbahnen ist unter bestimmten Bedingungen ebenfalls möglich.

Ladestationen werden fast ausschließlich mit automatisierten Kontaktsystemen ausgestattet. Daher ist es notwendig, bei der Wahl der Standorte für die Lademasten sicherzustellen, dass die Fahrzeuge innerhalb der Positionierungstoleranzen der automatisierten Kontaktsysteme abgestellt werden können.

GRAFIK 5 Schematischer Aufbau einer Ladestation mit Anschluss an ein 20 kV-Mittelspannungsnetz



Quelle: Fraunhofer IVI

Standardisierung und Kommunikation

Wesentliche Festlegungen zu technischen Parametern finden sich in der IEC 61851-1, -23 und -23-1.

Kommunikation von Ladegeräten bzw. -stationen und den Fahrzeugen:

- IEC 61851-24 (Kommunikation Ladegerät – Fahrzeug)
- ISO/IEC 15118 (High-Level Kommunikation Ladegerät – Fahrzeug – DC-Ladung)
- VDV-Schriften 260 und insb. 261 (Kommunikation mit dispositiven Backend)
- OCCP-Standard – Open Charge Point Protocol (Kommunikation mit Managementsystem).

Kosten

Für eine erste Wirtschaftlichkeitsrechnung können 0,2 €/kWh als Energiebezugskosten herangezogen werden. Die Kosten für Wartung und Instandhaltung liegen maximal 4 Cent/Fz-km unter denen von Dieselnissen.

- Kosten Ladegeräte:
ca. 500 – 800 €/kW maximale Ladeleistung
zzgl. Installations- und Verkabelungsaufwand
- Kosten Ladestationen (1 x 300 kW):
ca. 350.000 – 450.000 €
zzgl. Anschlusskosten und Baukostenzuschlag,
inkl. Lademast und bauliche Umgestaltung
- Mittelspannungstransformatoren:
1 MVA-Kompakttransformator:
ca. 40.000 – 50.000 € zzgl. Installations- und
Verkabelungsaufwand
- 2 MVA-Verteilertransformator:
ca. 80.000 – 120.000 €
komplett inkl. Technikgebäude
- Baukostenzuschläge:
ca. 40 – 80 € pro angemeldeter Kilowattstunde
Bezugsleistung

Die Anschlusskosten hängen von der Verfügbarkeit eines leistungsfähigen Mittelspannungsanschlusses ab. Bis zu einer Gesamtanschlussleistung von 4 MVA können i. d. R. Anschlüsse an bestehende Leitungen hergestellt werden. Darüber hinaus ist zumeist ein separater Anschluss an ein Umspannwerk notwendig. Bis zum Vorliegen einer ausreichenden Datengrundlage sollten für die Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen der Ladeinfrastruktur jährlich 2,0 – 2,5 % der Investitionskosten angesetzt werden.

TABELLE 2 Investitionskosten für Fahrzeuge – Anhaltswerte

	Midibusse	Solobusse	Gelenkbusse
Vollader	400.000 – 480.000 €	520.000 – 650.000 €	k. a. D. ¹⁾
Gelegenheitslader	k. a. D. ¹⁾	550.000 – 690.000 €	650.000 – 850.000 €
Batterien²⁾	150.000 – 180.000 €	180.000 – 220.000 €	250.000 – 300.000 €

TABELLE 3 Mittlerer Energieverbrauch – Stadtverkehr³⁾

	Midibusse	Solobusse	Gelenkbusse
Elektrische Heizung	1,3 kWh/km	1,5 kWh/km	1,8 kWh/km
Hybridheizung	1,1 kWh/km 0,03 l/km ⁴⁾	1,3 kWh/km 0,04 l/km ⁴⁾	1,6 kWh/km 0,06 l/km ⁴⁾

1) k. a. D. = keine ausreichende Datengrundlage

2) ein Tausch während Nutzungszeit des Busses

3) Der Energieverbrauch im Regionalverkehr liegt unter den angegebenen Werten.

4) Heizöl



Dacharbeitsstand im Betriebshof Hamburg Alsterdorf
Quelle: Hamburger Hochbahn AG

So nicht bereits vorhanden, ist die Anschaffung von Dacharbeitsständen inkl. Krananlage (ca. 1,0 t Traglast) notwendig. Je nach Ausführung entstehen dabei Kosten von etwa 75.000 – 220.000 € pro Dacharbeitsstand. Zusätzlich sind Spezialwerkzeuge für Arbeiten an Hochvoltanlagen sowie persönliche Schutzausrüstungen zu beschaffen. Die Kosten hierfür variieren, gemessen an den Aufwendungen für Batteriebusse und für die Ladeinfrastruktur sind sie jedoch fast vernachlässigbar.

Notwendige Schulungen unterteilen sich in verschiedene Stufen und Mitarbeiterkategorien (insb. Fahrer und Werkstattpersonal). Dabei ist in allgemeine Schulungen zum Umgang mit Hochvoltanlagen und fahrzeugspezifischen Schulungen zu unterscheiden. Die anfallenden Schulungskosten variieren in Abhängigkeit von der Anzahl zu schulender Mitarbeiter und dem Schulungskonzept. Die Kosten sind im Vergleich zu den Investitionskosten für die Fahrzeuge und die Ladeinfrastruktur jedoch eher gering.

3 Brennstoffzellenbusse

GRAFIK 6 Übersicht über Brennstoffzellenbusse



Brennstoffzelle als Hauptenergiequelle („BSZ-Hybrid“)

- H₂-Betankung auf dem Betriebshof oder an Tankstellen Dritter
- keine Ladeinfrastruktur notwendig
- Reichweiten decken bereits viele betriebliche Anforderungen ab.



Brennstoffzelle als Rangeextender („BSZ-REX“)

- Nachladung der Batterien auf dem Betriebshof
- H₂-Betankung auf dem Betriebshof oder an Tankstellen Dritter
- Reichweiten decken bereits viele betriebliche Anforderungen ab.



Beispiel für Typ 4-Druckbehälter für Wasserstoff

Quelle: Hexagon

Brennstoffzellenbusse verfügen ebenfalls über einen Elektromotor der das Fahrzeug antreibt. Die dafür notwendige Elektroenergie wird vollständig oder teilweise durch die Brennstoffzelle (BSZ) bereitgestellt.

Der BSZ-Hybrid besitzt eine kleine Batterie, deren Aufgabe es ist, durch die BSZ bereitgestellte Energie zwischen zu speichern und bei Bedarf zusätzliche Leistung für den Antriebsstrang bereitzustellen. Weiterhin nimmt sie beim Bremsen durch Rekuperation gewonnene Energie auf. Als Hauptenergiequelle dient eine leistungsfähige BSZ (und damit Wasserstoff). Für einen 12 m-BSZ-Hybrid-Bus liegt die BSZ-Leistung zwischen 60 und 85 kW.

BSZ-REX verfügen über eine deutlich größere und extern geladene Batterie (> 200 kWh) und nutzen primär die darin gespeicherte Energie zum Antrieb des Fahrzeugs. Die BSZ sorgt für eine kontinuierliche Nachladung der Batterie während des Betriebs und vergrößert so die Reichweite des Fahrzeugs. Durch diesen kontinuierlichen, statischen Betrieb der Brennstoffzelle kann sie im Vergleich zu BSZ-Hybrid-Bussen deutlich kleiner dimensioniert werden (ca. 30 kW für Solobusse).

Beide Antriebsformen weisen typischerweise Reichweiten von 300 – 400 km auf und sind damit für den Stadt- und Regionalverkehr geeignet. Für die Betankung eines Brennstoffzellenbusses werden je nach Tankgröße und Restwasserstoffinhalt ca. 10 min benötigt. Die Kommunikation zwischen der Tankstelle und den Fahrzeugen ist in den Normen SAE J2799 und das Betankungsprotokoll in SAE J2601 geregelt.

In Europa kommerziell verfügbare Linienbussen sind ausschließlich mit sog. Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen (kurz PEMFC für Proton Exchange Membrane Fuel Cell) ausgestattet. Diese erzeugen aus Wasserstoff und Luftsauerstoff elektrische Energie. Als Abprodukte entstehen bei diesem Vorgang Wasser und Wärme.

PEM-Brennstoffzellen haben auf Zellebene einen elektrischen Wirkungsgrad von etwa 60 %, der jedoch durch periphere Systeme (z. B. Kühlung) noch deutlich herabgesetzt wird. Die Betriebstemperaturen von PEM-Brennstoffzellen liegen im Bereich von 60 – 90°C, weshalb die Abwärme für das Heizen der Fahrzeuge genutzt werden kann.

Wasserstoffinfrastruktur

Wasserstofferzeugung / Quellen:

Wasserstoff entsteht als Beiprodukt bei verschiedenen Prozessen in der chemischen Industrie oder wird aus Erdgas mittels Dampfreformierung bzw. durch die Elektrolyse von Wasser gewonnen. Je nach Größe der Busflotte und den lokalen Randbedingungen (Nähe zur chemischen Industrie, Nähe zu einem Windpark usw.) kann die Entscheidung entweder für einen Bezug des Wasserstoffs von Dritten oder für die eigene Herstellung ausfallen.

Wasserstoffbedarf:

Der tägliche Wasserstoffbedarf ergibt sich aus der Anzahl der Fahrzeuge, deren Größe sowie den Fahrleistungen. Dabei ist mit Blick auf die Versorgungssicherheit pro Fahrzeugkilometer folgender spezifischer

Wasserstoffverbrauch anzusetzen:

- BSZ-Hybrid 12 m: ca. 0,09 – 0,1 kg/km
- BSZ-Hybrid 18 m: ca. 0,12 – 0,14 kg/km
- BSZ-Rex 12 m: ca. 0,04 – 0,05 kg/km (zzgl. Elektroenergie für die Batterieladung)
- BSZ-Rex 18 m: ca. 0,08 – 0,09 kg/km (zzgl. Elektroenergie für die Batterieladung)

Für die Betankung eines Solobusses (12 m) sind somit rund 25 kg und für einen Gelenkbus etwa 33 kg Wasserstoff pro Tag vorzuhalten (jeweils 250 km/d, BSZ-Hybrid).

Wasserstoffinfrastruktur – Bereitstellung von Wasserstoff

Die Bereitstellung von Wasserstoff kann über verschiedene Wege erfolgen:

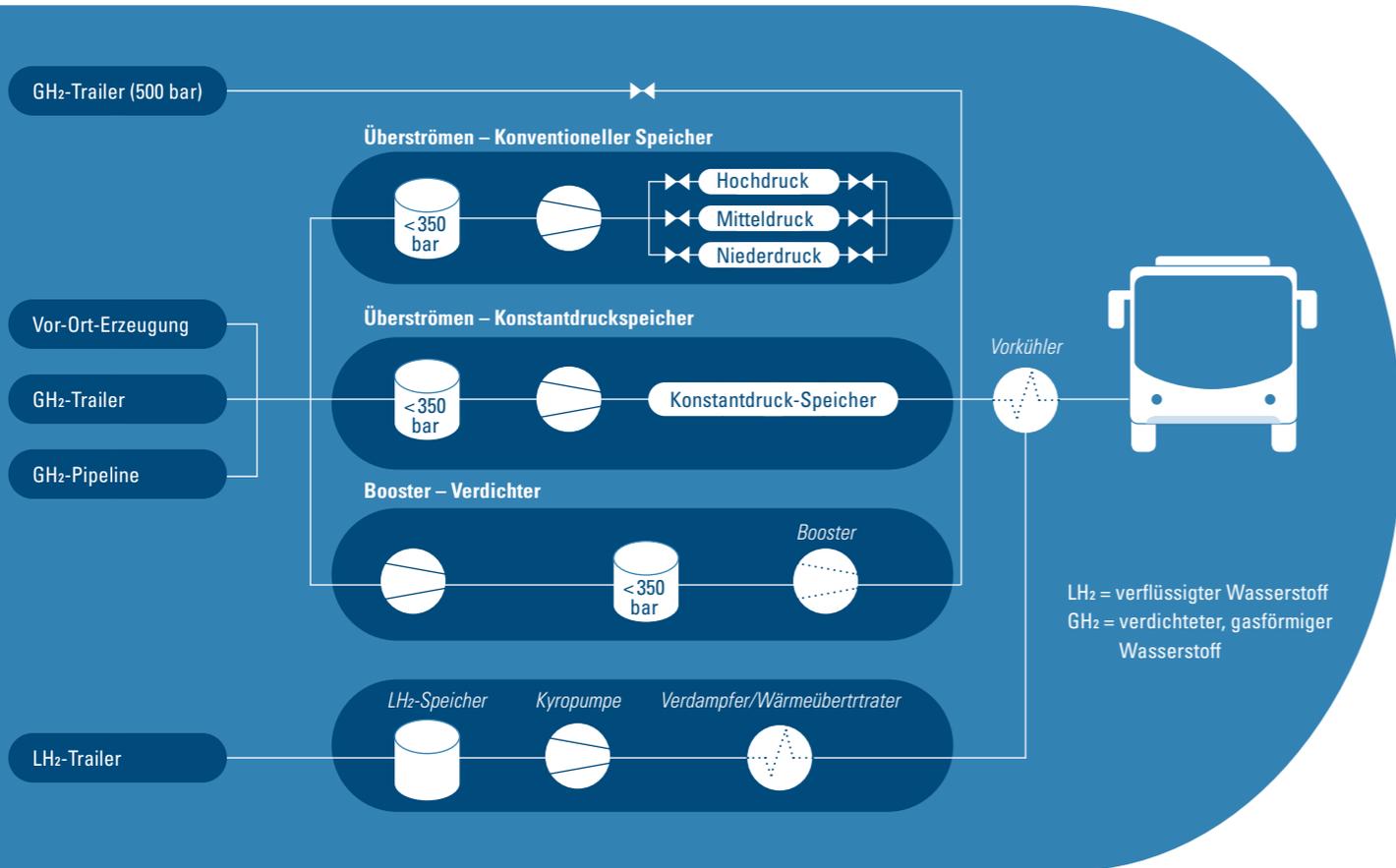
- Anlieferung von gasförmigem Wasserstoff mit Trailern (200 – 500 bar / 400 – 1.200 kg H₂)
- Anlieferung von flüssigem Wasserstoff mit Trailern (bis zu 4.000 kg H₂)
- Anlieferung per Rohrleitung (nur bei unmittelbarer Nähe zum Erzeuger)
- Vor-Ort-Erzeugung (i. d. R. PEM-Elektrolyse)
- Nutzung von geeigneten Tankstellen Dritter, insb. bei kleineren Busflotten.

Wasserstoffinfrastruktur – Tankstelle

Unabhängig davon, ob der Wasserstoff durch Dritte angeliefert oder vor Ort selbst erzeugt wird, ist eine Tankstelle vonnöten. Wasserstoff liegt zumeist

gasförmig vor. Er wird i. d. R. nicht in das Fahrzeug gepumpt, sondern strömt aufgrund des Druckunterschiedes zwischen dem Speichertank der Tankstelle und den Druckbehältern auf der Fahrzeugseite in das Fahrzeug über.

GRAFIK 7 Schematischer Aufbau einer Wasserstofftankstelle – dargestellt in verschiedenen Varianten



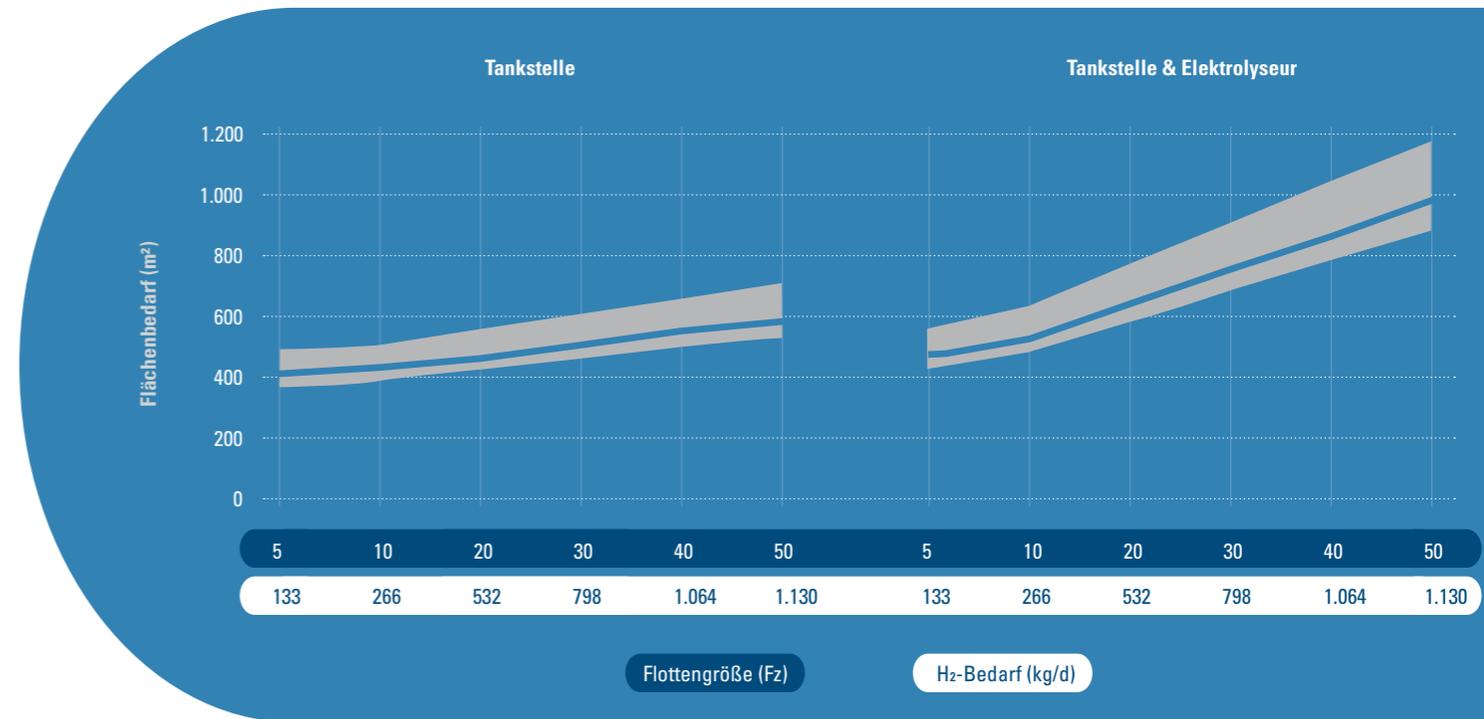
Die Größe der Speicher und die Leistungsfähigkeit der Verdichter richten sich primär nach der Größe der Busflotte und der gewünschten Versorgungssicherheit. Eine Zwei-Tages-Bevorratung kann als guter Kompromiss zwischen Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit angesehen werden.

Die Komponenten einer Wasserstoffinfrastruktur können in Betriebshöfen aus technischer Sicht flexibel

jedoch nach Möglichkeit im Freien angeordnet werden (Aufstellung in Containern). Bei der Ermittlung des Platzbedarfs sind die Sicherheitsabstände zu Nachbargrundstücken und Verkehrsflächen zu beachten.

Insbesondere die Verdichtung von Wasserstoff auf 500 bar aber ggf. auch die Wasserstofferzeugung vor Ort setzen einen leistungsfähigen Anschluss an das Stromnetz voraus.

GRAFIK 8 Flächenbedarf für Wasserstoffinfrastruktur in Betriebshöfen – Richtwerte



Kosten

Wasserstoff ist je nach örtlichen Gegebenheiten für etwa 5,50 bis 9,00 €/kg erhältlich. Bei einem spezifischen Wasserstoffverbrauch von 0,075 kg/km ergeben sich somit Kosten von rund 41 – 68 €/100 km. Der Preis für mittels Elektrolyse erzeugten Wasserstoff hängt dabei unmittelbar von den Energiebezugskosten für dessen Erzeugung ab und wird bei fallenden Strompreisen, Umlagen und Abgaben sinken.

Zu Wartungs- und Instandhaltungskosten von Brennstoffzellenbussen liegen derzeit noch keine ausreichenden Erkenntnisse vor. Ein großer Teil dieser Kosten ist jedoch nicht antriebspezifisch. Daher sollte

bis zum Vorliegen ausreichender Daten von in etwa gleichen Kosten oder Kostenvorteilen für Dieselsebuse von 5 – 10 Cent/Fz-km ausgegangen werden.

Die Investitionskosten für die Wasserstoffinfrastruktur ergeben sich primär aus der Frage, ob Wasserstoff vor Ort erzeugt werden soll. Darüber hinaus spielen örtliche Gegebenheiten sowie die Flottenzusammensetzung eine Rolle.

Die Wartungs- und Instandhaltungskosten hängen vom abgeschlossenen Service-Vertrag ab und belaufen sich jährlich auf etwa zwei bis fünf Prozent der Investitionskosten.

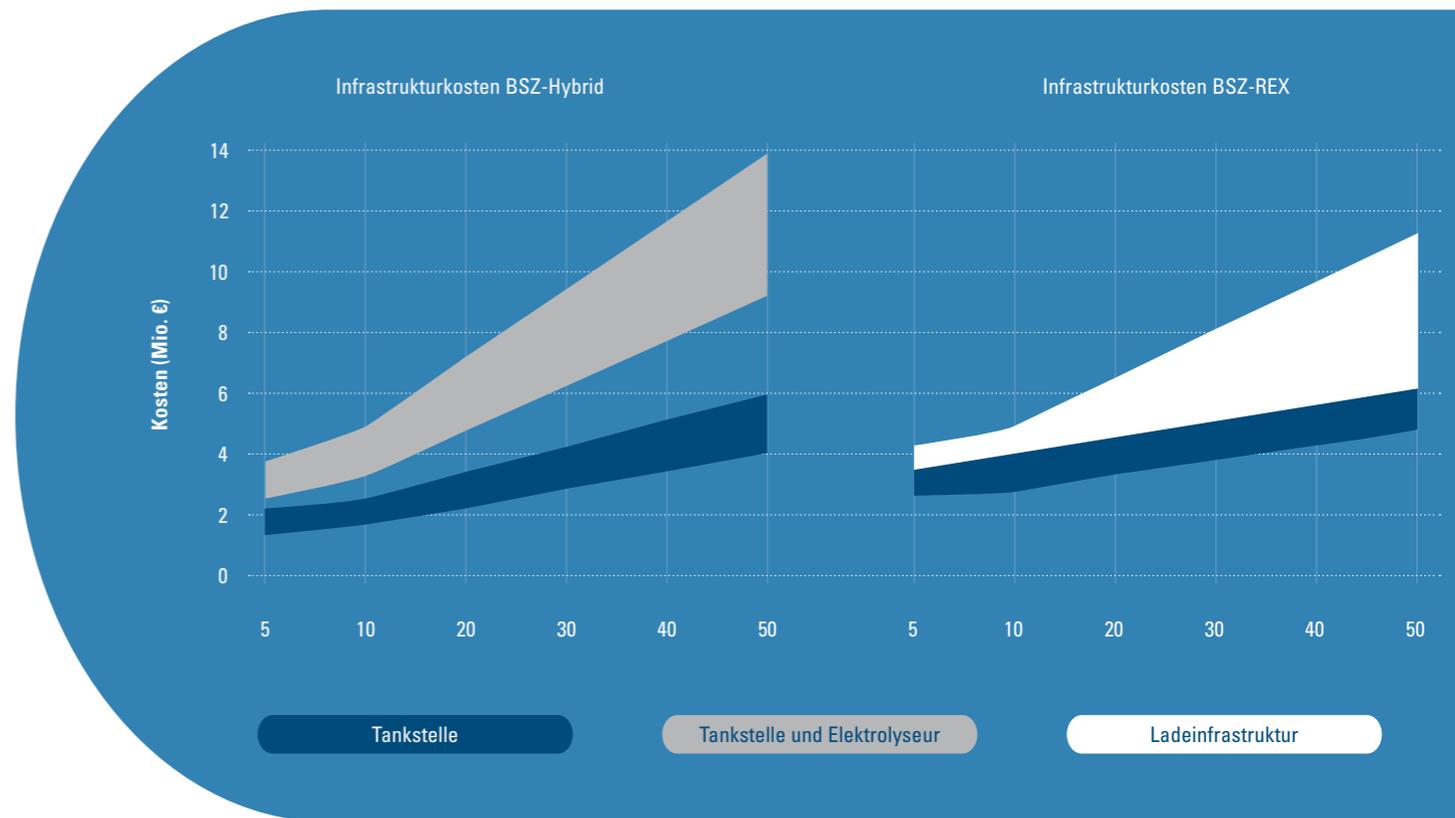
Beim Einsatz von BSZ-REX-Fahrzeugen fallen zusätzlich Kosten für die Ladeinfrastruktur an!

TABELLE 4 Investitionskosten für Fahrzeuge – Anhaltswerte

	Solobusse	Gelenkbusse ¹⁾
BSZ-Hybrid/BSZ-REX	580.000 – 650.000 €	800.000 – 850.000 €
Batterie²⁾ für BSZ-Hybrid	50.000 – 60.000	k. a. D. ³⁾
Brennstoffzelle²⁾	100.000 – 140.000 €	k. a. D. ³⁾

- 1) nur geringe Datengrundlage
- 2) ein Tausch während der Nutzungszeit des Busses; ggf. über Servicevertrag
- 3) k. a. D. = keine ausreichende Datengrundlage

GRAFIK 9 Indikative Kosten für die Errichtung der Wasserstoffinfrastruktur



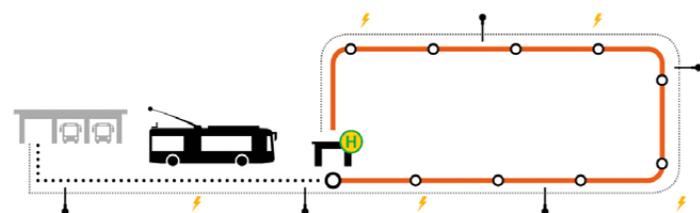
Quelle: Sphera Solutions GmbH

Hinzu kommen Kosten für die Ertüchtigung von Abstellhallen und Werkstätten (Belüftung, Wasserstoffwarnanlage) sowie die Ausrüstung der Werkstätten mit z. B. Dacharbeitsständen, die sich in Summe auf mehrere Zehn- bis mehrere Hunderttausend Euro belaufen können.

Ergänzend zu den Schulungsmaßnahmen für Batteriebusse ist die Sensibilisierung bzgl. Wasserstoff notwendig. Werkstattpersonal ist zusätzlich im Umgang mit Gasanlagen zu schulen.

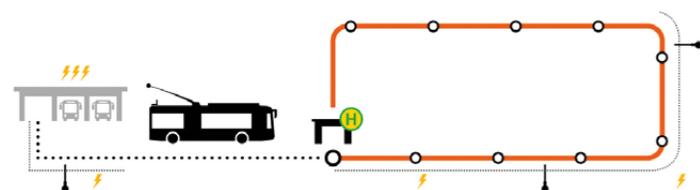
4 Oberleitungsbusse

GRAFIK 10 Überblick über die Betriebsstrategie von Oberleitungsbussen



Konventionelle Oberleitungsbusse

- Oberleitungen entlang gesamter Strecke, auf den Wegen zum Betriebshof und i. d. R. im Betriebshof notwendig
- Hilfsfahraggregat oder Batterie nur für Fahrten mit verminderter Leistung über kurze Distanzen geeignet



Hybrid-Oberleitungsbusse

- Oberleitungen nur teilweise notwendig
- Oberleitungen im Betriebshof nur zur Nachladung
- Batterie ermöglicht Fahrten mit voller Leistung
- kein Hilfsfahraggregat verbaut

Oberleitungsbusse, häufig auch als Trolleybusse bezeichnet, sind eine seit Jahrzehnten erprobte und robuste Technologie, die ihre Eignung in vielen Städten der Welt bereits nachgewiesen hat. Sie sind insb. auf stark befahrenen Linien eine Alternative zu anderen Antriebsformen, da dort die Infrastruktur durch viele Fahrzeuge genutzt wird, womit sich deren Kosten auf mehr Fahrzeug-Kilometer verteilen.



Hybrid-Oberleitungsbus in Gdynia
Quelle: VCDB GmbH

Hybrid-Oberleitungsbusse verfügen über eine ausreichend große und leistungsfähige Batterie, um längere Distanzen abseits von Oberleitungen mit normaler Geschwindigkeit zurücklegen zu können. Die tatsächlich zurücklegbaren Entfernungen ohne Oberleitung hängen ab von

- der Fahrzeugkonfiguration, speziell der Batteriegröße,
- der Fahrzeugauslastung, den Reisegeschwindigkeiten und dem Höhenprofil auf Abschnitten ohne Oberleitung sowie
- längeren Aufenthalten an Endhaltestellen ohne Oberleitung.

Hybrid-Oberleitungsbusse sind daher insb. für die Verlängerung bestehender Oberleitungsbus-Linien und die Vermeidung von Oberleitungen in städtebaulich sensiblen Bereichen geeignet. Der Anteil einer Linie, der mit Oberleitungsabschnitten versehen werden muss, hängt von den örtlichen Gegebenheiten ab. Als Faustregel kann gelten, dass mindestens etwa 40 bis 50 % einer Linie mit Oberleitungen versehen werden müssen.

Hybrid-Oberleitungsbusse setzen ein sicheres Ein- und Ausdrahten der Stromabnehmer voraus, wobei zumindest das Eindrahten nur im Stand möglich ist:

- händisches Eindrahten über Fangseile (ggf. unterstützt durch kleine Eindrahttrichter),
- halbautomatisches Eindrahten mittels Eindrahttrichter,
- automatische Eindrahtsysteme.

Oberleitungsinfrastruktur

Die Oberleitungsnetze sind in einzelne elektrisch voneinander getrennte Speiseabschnitte unterteilt und bestehen aus

- Gleichrichterunterwerken zur Bereitstellung der Gleichspannung,
- Speiseleitungen sowie
- den an Masten angebrachten Oberleitungen.

Gleichrichterunterwerke wandeln die auf der Netzseite anliegende Wechselspannung in Gleichstrom (i. d. R. 580 – 750 VDC) um. Mit einem Gleichrichterunterwerk kann je nach Anzahl der Fahrzeuge ein Speiseabschnitt mit einer Länge von etwa 4 – 5 km versorgt werden, wobei die Oberleitungen über Speiseleitungen mit den Gleichrichterunterwerken verbunden sind. Besteht ein Gleichrichterunterwerk aus mehreren Abgangsfeldern, können damit mehrere Speiseabschnitte bedient werden.

Kosten

Die Investitionskosten sind für konventionelle und Hybridoberleitungsbusse verschieden. Die Wartungs- und Instandhaltungskosten von Oberleitungsbussen liegen etwa 4 Cent/Fz-km unter denen von Dieselnbussen. Die Verfügbarkeit ist in etwa gleich. Der spezifische Energieverbrauch pro Kilometer ist mit dem von Batteriebussen vergleichbar.



Beispiel für eine Oberleitung im Betriebshof inkl. Eindrahtrichter
Quelle: VCDB GmbH

TABELLE 5 Investitionskosten für Fahrzeuge – Anhaltswerte

	Solobusse	Gelenkbusse
Konventionelle Oberleitungsbusse	540.000 – 610.000 €	580.000 – 750.000 €
Hybrid-Oberleitungsbusse	580.000 – 670.000 €	720.000 – 950.000 €
Batterien ¹⁾	70.000 – 90.000 €	90.000 – 110.000 €

¹⁾ ein Tausch während der Nutzungszeit des Busses

Die Kosten für Oberleitungssysteme hängen stark von den örtlichen Gegebenheiten ab, insbesondere von

- der Streckenführung (gerade Strecke vs. Kurven, Plätze und weiträumige Kreuzungen),
- den Anschlussbedingungen der Gleichrichterunterwerke sowie
- der Notwendigkeit kostenintensiver Oberleitungskomponenten wie Weichen und Kreuzungen.

Überschläglich fallen Kosten von etwa 750.000 – 1,2 Mio. € pro Doppelkilometer Oberleitung (Hin- und Rückrichtung) inkl. Gleichrichterunterwerk und Speiseleitungen an. Können aufwändige Aufhängevorrichtungen (z. B. auf weiträumigen Kreuzungen) sowie Weichen und Kreuzungen weitgehend durch den Einsatz von Hybrid-Oberleitungsbussen vermieden werden, sinken die Kosten für die Infrastruktur signifikant ab.

Die jährlichen Wartungs- und Instandhaltungskosten belaufen sich auf etwa 2,0 bis 2,5 % der Investitionskosten.

5 Kerntechnologien elektrisch angetriebener Busse

Energiespeicher – Batterien

Bei der Ladung von Batteriezellen wird anliegende elektrische Energie in chemische Energie gewandelt. Bei der Entladung durch das Anschließen eines Verbrauchers wird die gespeicherte chemische Energie in elektrische Energie zurückgewandelt.

Batterien für mobile Anwendungen bestehen i. d. R. aus mehreren Modulen, die sich wiederum aus in Reihe und/oder parallel zusammengeschalteten Batteriezellen zusammensetzen. Es existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Zelltypen (Zellchemie), die sich hinsichtlich der für mobile Anwendungen wesentlichen Eigenschaften unterscheiden:

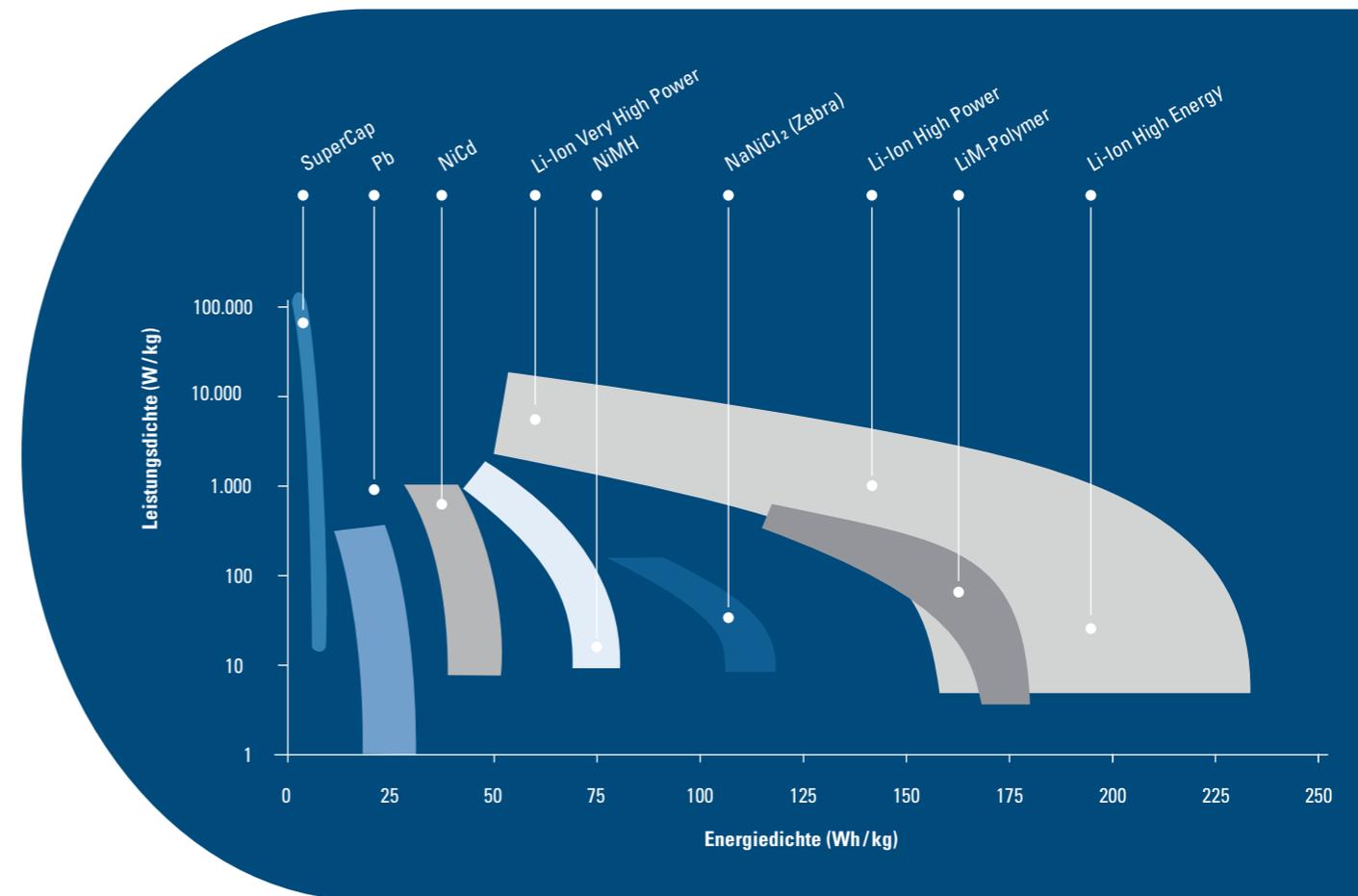
- Energiedichte (Wh/kg bzw. Wh/l, woraus sich der Energieinhalt ableitet)
- Leistungsdichte (W/kg bzw. W/l, woraus sich die Lade- und Entladeleistungen ergeben)

- Nutzungsdauer bzw. Zyklenfestigkeit (Anzahl der vollständige Lade- und Entladevorgänge bis zum Erreichen des definierten Nutzungsendes)
- Sicherheit
- Kosten

Bis dato ist es noch nicht gelungen, in mobilen Anwendungen verwendbare Batterien zu entwickeln, die sowohl hohe Energie- als auch Leistungsdichten aufweisen. Deshalb wird häufig in High-Energy- und High-Power-Batterien unterschieden.

Bei Batterien ist zwischen nominalem sowie nutzbarem Energieinhalt zu unterscheiden. Ein vollständiges Laden bzw. Entladen einer Batterie führt u. a. zu einer vorschnellen Alterung, weshalb Batterien grundsätzlich nur in sog. Ladefenstern betrieben werden. Als Faustregel gilt, dass ca. 70 bis 85 % des nominalen Energieinhaltes nutzbar ist.

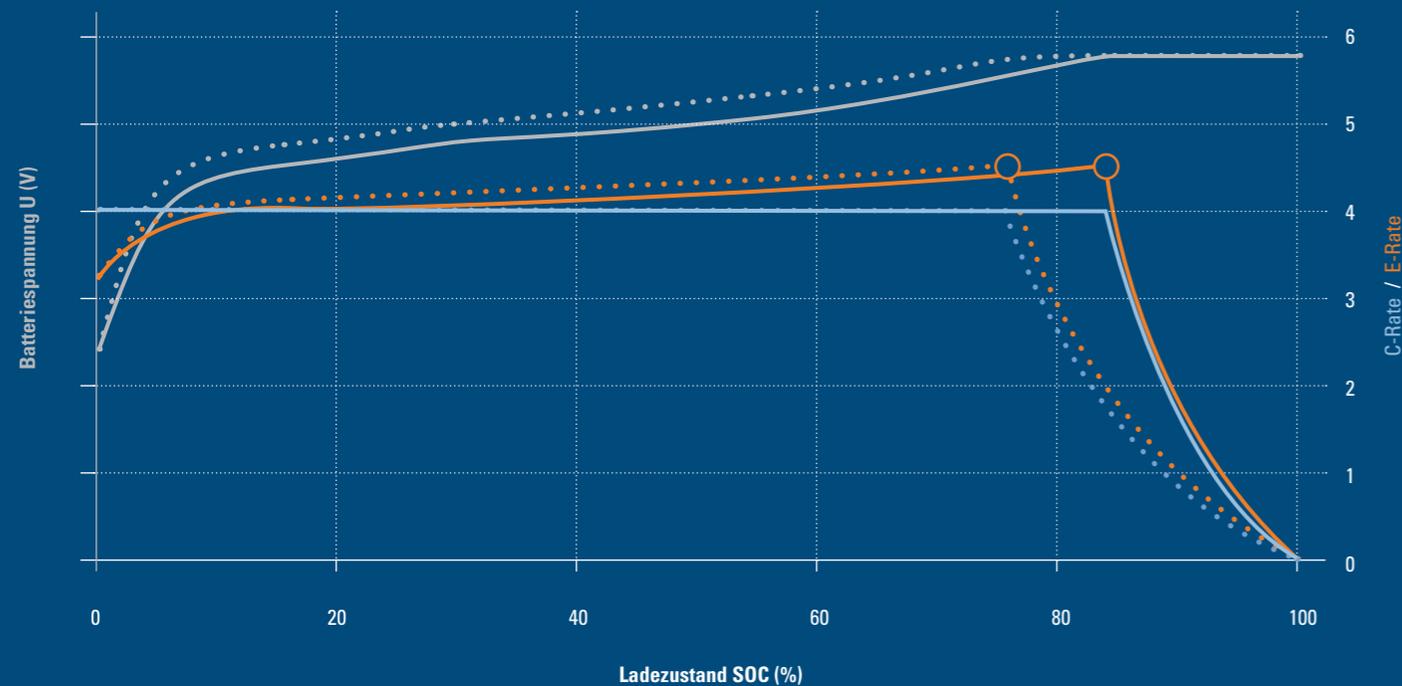
GRAFIK 11 Gravimetrische Energie- und Leistungsdichten von Batteriezellen



Die Ladeleistung bestimmt die Energiemenge, die in einer bestimmten Zeit in eine Batterie eingespeichert werden kann. Sie kann mit Kilowatt als Absolutwert oder über die sog C-Rate angegeben werden. C-Rate = 1 bzw. 1C entspricht demjenigen Ladestrom, mit dem

eine Batterie in genau einer Stunde vollständig nachgeladen wäre. Zu beachten ist, dass Batterien nicht über das gesamte Ladefenster hinweg mit der vollen Ladeleistung geladen werden können.

GRAFIK 12 Typischer Verlauf der Ladeleistung in Abhängigkeit vom Ladezustand (SOC)



Quelle: Fraunhofer IVI

Die Entladeleistung ist i. d. R. ausreichend, um die Fahrzeuge zu beschleunigen und parallel die Nebenaggregate zu betreiben.

Batteriezellen altern unterschiedlich und sind auch nie zu 100 % baugleich. Dadurch kommt es beim Laden und Entladen zu Unterschieden beim Ladezustand der einzelnen Zellen. Daher müssen Batterien regelmäßig

einem sog. Zellbalancing unterworfen werden, bei dem die Ladezustände der einzelnen Zellen ausgeglichen werden. Das Balancing wird automatisch vom Batteriemanagementsystem (BMS) durchgeführt.

Batterien unterliegen sowohl einer kalendarischen als auch einer nutzungsbedingten Alterung, wobei i. d. R. die Alterung durch Nutzung überwiegt. Batterien gelten per Definition für mobile Anwendungen als nicht mehr nutzbar, wenn die Speicherfähigkeit auf 80 % des Wertes im Neuzustand abgesunken ist. Bei einer normalen Nutzung der Batterien (ca. 60.000 km/a) werden heute bereits Nutzungszeiten von sechs bis acht Jahren erreicht.

Obwohl die Kosten für Batteriezellen in den letzten Jahren enorm gesunken sind, stellen Batterien bei Batteriebusen den mit Abstand größten Einzelkostenpunkt dar. Dabei sind jedoch enorme Preisunterschiede zu verzeichnen:

- High-Energy-Batterien: ca. 650 – 750 € / kWh
- High-Power-Batterien: ca. 800 – 1.200 € / kWh

Für die Zukunft werden weitere Preisdegressionen vorhergesagt, jedoch ist dabei zu beachten, dass diese sich zumeist auf Zellen oder auf Batterien für den Massenmarkt der Pkw beziehen.

Brennstoffzellen

Bei Brennstoffzellen von in Europa kommerziell verfügbaren Linienbussen handelt es sich ausschließlich um sog. Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen (kurz PEMFC für Proton Exchange Membrane Fuel Cell). PEM-Brennstoffzellen bestehen aus zwei durch eine Membran getrennte Elektroden. Die Membran dient dabei als Ionenleiter, wobei nur die Wasserstoffprotonen durchgelassen werden, um mit zuvor durch Elektronen reduziertem Sauerstoff der Luft eine chemische Reaktion einzugehen. Als Abprodukte entstehen bei diesem Vorgang Wasser und Wärme.

PEM-Brennstoffzellen haben auf Zellebene einen elektrischen Wirkungsgrad von etwa 60 %, der jedoch durch periphere Systeme (z. B. Kühlung) noch deutlich herabgesetzt wird. Die Betriebstemperaturen von PEM-Brennstoffzellen liegen im Bereich von 60 – 90°C, weshalb die Abwärme für das Heizen der Fahrzeuge genutzt werden kann.

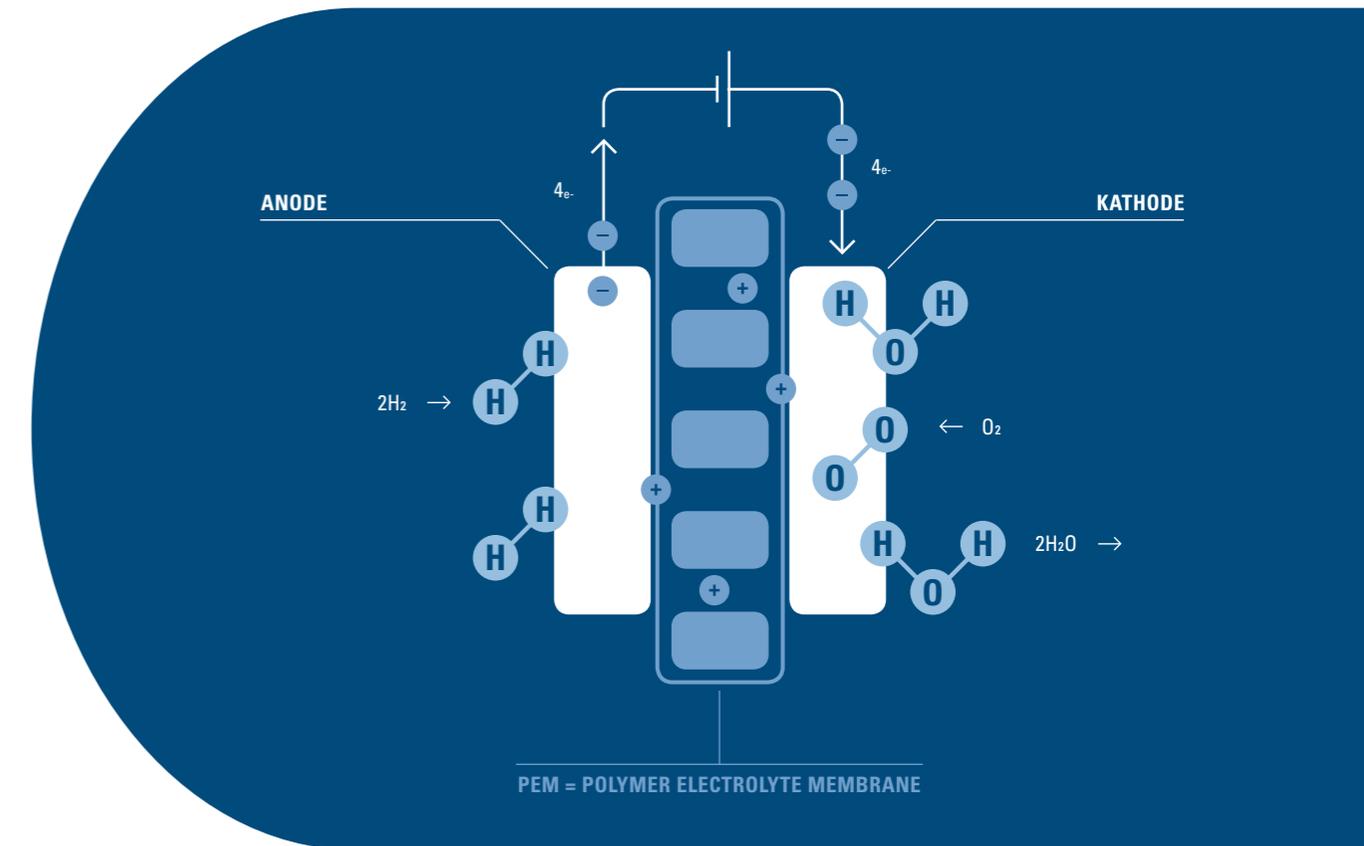
Aufgrund der Empfindlichkeit der Membran gegenüber Verschmutzungen benötigen PEM-Brennstoffzellen sehr reinen Wasserstoff, was in der Norm SAE J2719 geregelt ist. Abweichungen davon können von Hersteller zu Hersteller möglich sein. Da sehr reiner Wasserstoff nicht überall verfügbar ist, sollte im Vorfeld einer Ausschreibung geprüft werden, ob und zu welchen Kosten dieser zu beziehen ist, bzw. welche Abweichungen von der o. g. Norm zulässig sind.

In Bussen verbaute PEM-Brennstoffzellen haben, sofern sie als Hauptenergiequelle dienen, i. d. R. eine elektrische Leistung zwischen 60 und 85 kW und können somit auftretende Leistungsspitzen nicht abdecken. Ebenso sind PEM-Brennstoffzellen nicht für hohe Leistungsdynamiken, wie sie im DC-Zwischenkreis elektrisch angetriebener Fahrzeuge zu finden sind, ausgelegt. Daher ist es notwendig, stark ansteigende und abfallende Leistungen sowie Leistungsspitzen mithilfe einer Batterie abzufangen, wobei es sich um High-Power-Batterien mit einem nominellen Energiegehalt von etwa 28 – 40 kWh bei Solobussen handelt.

Unter anderem durch die Hybridisierung mit Batterien ist es im letzten Jahrzehnt gelungen, die Nutzungsdauer von PEM-Brennstoffzellen deutlich zu erhöhen. Moderne PEM-Brennstoffzellen erreichen bereits eine

Nutzungsdauer von bis zu 30.000 Betriebsstunden und damit etwa sechs bis acht Jahre, was jedoch immer noch einen Tausch während der Busnutzungszeit nach sich zieht.

GRAFIK 13 Prinzipieller Aufbau einer PEM-Brennstoffzelle



Antriebsmotoren

Alle beschriebenen Antriebsformen verfügen über einen oder mehrere elektrische Antriebsmotoren. Die Konzepte unterscheiden sich in erster Linie bzgl. ihrer Lage gegenüber den Rädern.

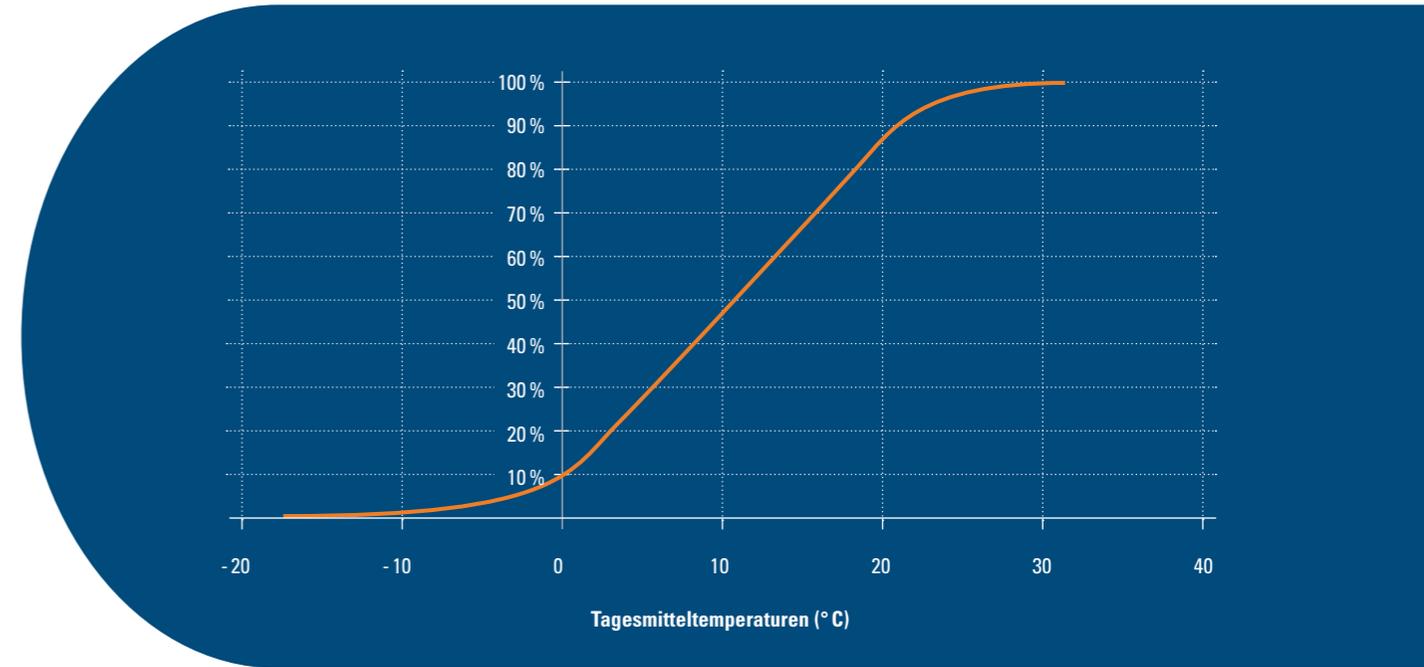
Bei der Bewertung der Antriebsmotoren ist zwischen der Dauerleistung sowie der Spitzenleistung zu unterscheiden. Bei der Spitzenleistung, die insb. für lange Steigungsstrecken von Bedeutung ist, muss deren Zeitdauer beachtet werden.

TABELLE 6 Formen von Antriebsmotoren

Zentralmotor	<ul style="list-style-type: none"> robust und kostengünstig niedrigere Energieeffizienz 	 <p>1)</p>
Radnahe Motoren	<ul style="list-style-type: none"> hohe Packagingflexibilität hohe Energieeffizienz 	 <p>2)</p>
Radnabenmotoren	<ul style="list-style-type: none"> hohe Packagingflexibilität höchste Energieeffizienz 	 <p>3)</p>

- 1) Quelle: Siemens
- 2) Quelle: ZF
- 3) Quelle: Ziehl-Abegg

GRAFIK 14 Summenkurve der Tagesmitteltemperaturen – Berlin Alexanderplatz



Quelle: Fraunhofer IVI anhand von DWD-Daten

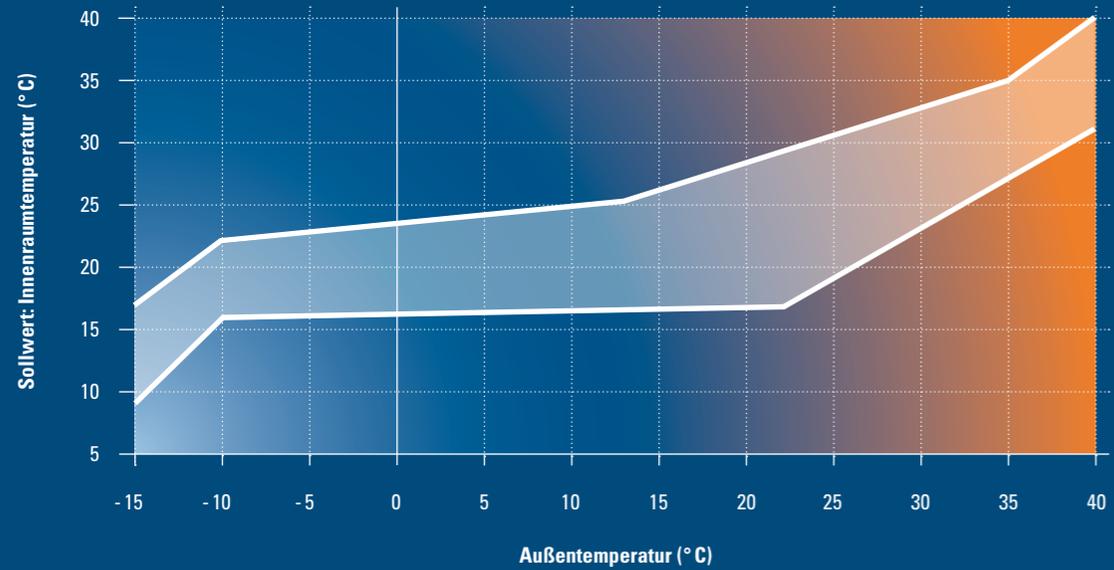
Heizung, Klimatisierung, Druckluftverbrauch

Heizung und Klimatisierung

Die Art der Klimatisierung und die verwendete Heiztechnologie haben enorme Auswirkungen auf die

Reichweite, insb. von Batteriebusen, und damit auf Betriebskonzepte und Kosten. Als Ausgangspunkt der Überlegungen dienen die lokalen Temperaturverteilungen sowie Vorgaben zur Innenraumtemperatur von Linienbussen. Für Außentemperaturen sollte dabei nicht auf Maximalwerte zurückgegriffen werden.

GRAFIK 15 Behaglichkeitskennfeld gemäß VDV-Schrift 236



Quelle: VDV

Moderne Wärmepumpen reduzieren den Energieverbrauch für die Beheizung der Fahrzeuge, verringern aber trotzdem die Reichweite, an kalten Tagen ca. um ein Drittel. Die Kombination mit einer Brennstoffheizungen (Hybridheizung) sollte daher für eine

Übergangszeit erwogen werden. Da bei Brennstoffzellenbussen die Abwärme der Brennstoffzelle genutzt werden kann, ist deren Reichweite weniger von der Außentemperatur abhängig.

Druckluftverbrauch

Druckluft ist eine vergleichsweise ineffiziente Energiespeicherform, weshalb insb. das Kneelingregime (Zwangskneeling an jeder Haltestelle vs. Kneeling bei Bedarf) für Batteriebusse in Hinblick auf Reichweitenreduzierungen genau abzuwägen ist.

6 Klimawirkung

Alle beschriebenen Antriebsformen gelten als lokal emissionsfrei, jedoch sagt dies nichts über die Klimawirkung im Vergleich zu Dieselnbussen aus, da der Ort von Treibhausgas-Emissionen für das Klima keine Rolle spielt. Treibhausgase entstehen

- bei der Produktion der Fahrzeuge bzw. von Ersatzteilen,
- bei der Erzeugung und Bereitstellung von Kraftstoffen, Elektroenergie bzw. Wasserstoff (Vorkette) sowie
- bei deren Verbrauch in den Fahrzeugen.

Bei Bussen sind aufgrund der hohen Fahrleistungen der Verbrauch und damit auch die Vorkette dominierend.

Maßgebend für die Klimawirkung der beschriebenen Antriebsformen ist die Art der Elektroenergieerzeugung sowie die Erzeugungsform von Wasserstoff.

¹⁾ Quelle: Sphera Solutions GmbH

Laut Umweltbundesamt wurden in Deutschland im Jahr 2019 pro verbrauchter Kilowattstunde Elektroenergie etwa 427 g CO₂ emittiert. Wird die Elektroenergie ausschließlich aus erneuerbaren Quellen erzeugt, sinkt dieser Wert auf etwa 65 g ab, da hierbei die CO₂-Emissionen für die Herstellung von Produktionsanlagen mit einzurechnen sind.

Wird Wasserstoff mittels Dampfreformierung aus z. B. Erdgas erzeugt und durch Busse verbraucht, entstehen pro Kilogramm Wasserstoff rund 10 kg CO₂¹⁾. Der Verbrauch von mittels Elektrolyse erzeugtem Wasserstoff ist mit 24,3 (Strommix Deutschland) bzw. 3,7 kg (regenerative Quellen) CO₂ pro Kilogramm Wasserstoff verbunden.

Wie die Ergebnisse der nachfolgenden Übersicht zeigen, vermeiden rein elektrisch angetriebene Busse sowie BSZ-REX-Busse bereits unter der Annahme des deutschlandweiten Strommixes verglichen mit Dieselnbussen CO₂-Emissionen. BSZ-Hybrid-Busse sind hingegen nur klimafreundlicher, wenn der Wasserstoff entweder mittels Dampfreformierung oder durch Einsatz von regenerativ erzeugter Elektroenergie hergestellt wurde.

TABELLE 7 CO₂-Einsparungen durch den Einsatz alternativer Antriebsformen im Vergleich zu Dieselnbussen

	Dieselnbus	Rein elektrische Antriebe	BSZ-Hybrid	BSZ-REX ¹⁾
Verbrauch pro 100 km ²⁾	40 l / 55 l	130 kWh / 170 kWh	8 kg H ₂ / 12 kg H ₂	90 kWh / 120 kWh 2,4 kg H ₂ / 3,6 kg H ₂
CO ₂ -Emissionen pro 100 km				
Diesel	119,6 kg / 164,5 kg ³⁾			
Strommix Deutschland		55,5 kg / 72,5 kg	194,4 kg / 291,6 kg ⁴⁾	96,8 kg / 138,7 kg ⁴⁾
nur regenerative Quellen		8,5 kg / 11,0 kg	29,6 kg / 44,4 kg ⁴⁾	14,7 kg / 21,1 kg ⁴⁾
Einsparungen zu Dieselnbus				
Strommix Deutschland		64,1 kg / 92,0 kg	-74,8 kg / -127,1 kg ⁴⁾	22,8 kg / 25,8 kg ⁴⁾
nur regenerative Quellen		111,1 kg / 153,5 kg	90,0 kg / 120,1 kg ⁴⁾	104,9 kg / 143,4 kg ⁴⁾

¹⁾ rein elektrische Reichweite: 175 km, Gesamtfahrweite: 250 km pro Tag

²⁾ Solobus / Gelenkbus

³⁾ 2,99 kg CO₂ pro Liter Diesel inkl. Vorkette

⁴⁾ mittels Elektrolyse erzeugter Wasserstoff

7 Überblick über die Antriebsformen

TABELLE 8 Überblick über die Antriebsformen

	VOLLLADER	GELEGENHEITSLADER	PULSLADER
Schematischer Aufbau			
Reichweite ¹⁾	ca. 150 – 180 km (elektr. Heizung) ca. 200 km (Hybridheizung) perspektivisch: 250 km (2025) 300 km (2030)	unbegrenzt, wenn ausreichende Ladezeiten zur Verfügung stehen	unbegrenzt, wenn ausreichende Ladezeiten zur Verfügung stehen
Fahrzeugmehrbedarf ²⁾	mittel (abhängig von Reichweite und Betriebsabläufen)	gering – mittel (abhängig von Betriebsabläufen)	gering
Flexibilität	innerhalb von Reichweite hoch	gebunden an Endhaltestellen mit Ladestationen	gebunden an Haltestellen mit Ladestationen
Batterie	große Batterie (High-Energy)	möglichst große Batterie (High-Energy / High-Power)	kleine Batterie (High-Power)

ÜBERBLICK ÜBER DIE ANTRIEBSFORMEN

Gleichspannungs-
wandler

Brennstoffzelle

Ladegerät

Wechselrichter

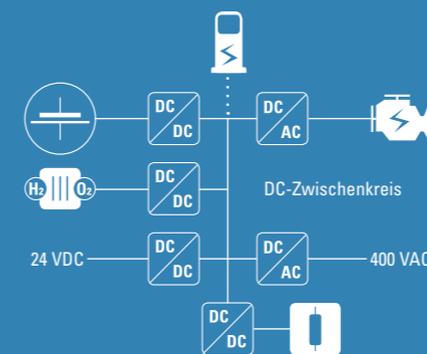
Elektromotor

Ladestation

Oberleitung

Bremswiderstand

BRENNSTOFFZELLENBUSSE



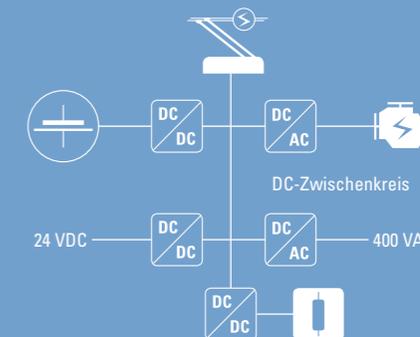
ca. 300 – 400 km

gering

innerhalb von Reichweite hoch

Größe abhängig vom Konzept

(HYBRID)OBERLEITUNGSBUSSE



unbegrenzt, wenn ausreichende Fahrzeiten unter Oberleitungen
zur Verfügung stehen

gering

(teilweise) gebunden an Strecken mit Oberleitungen

kleine Batterie (High-Power)

	VOLLLADER	GELEGENHEITSLADER	PULSLADER
Infrastruktur	Ladeinfrastruktur in Betriebshöfen	Ladeinfrastruktur in Betriebshöfen und an Endhaltestellen	Ladeinfrastruktur in Betriebshöfen und an Haltestellen
Städtebauliche Integration der Infrastruktur	keine Infrastruktur außerhalb von Betriebshöfen	i. d. R. möglich	in Innenstadtbereichen abhängig von Platzreserven
Kosten Fahrzeuge (Anhaltswerte)	Solobus: 520 – 650 T€ Gelenkbus: k. a. D. ⁷⁾ Batterie: 200 T€ / 300 T€ Betriebskosten ⁴⁾ : geringer Personalkosten ⁵⁾ : höher	Solobus: 550 – 690 T€ Gelenkbus: 650 – 850 T€ Batterie: 180 T€ / 300 T€ Betriebskosten ⁴⁾ : geringer Personalkosten ⁵⁾ : etwa gleich	k. a. D. ⁷⁾ überschläglic Kosten von Gelegenheitsladern nutzbar Betriebskosten ⁴⁾ : geringer Personalkosten ⁵⁾ : etwa gleich
Kosten Infrastruktur	Ladegerät (150 kW): 75 T€ Für 50 Busse zzgl. Verkabelung: ca. 3,75 Mio. € zzgl. Transformatoren und Netzanschlusskosten jährliche Kosten: 2 – 2,5 % der Investition	Ladegerät (75 kW): 55 T€ Für 50 Busse zzgl. Verkabelung: ca. 2,75 Mio. € Ladestation (300 kW): 400 T€ zzgl. Transformatoren und Netzanschlusskosten jährliche Kosten: 2 – 2,5 % der Investition	Ladegerät (50 kW): 45 T€ Für 50 Busse zzgl. Verkabelung: ca. 2,25 Mio. € Ladestation (450 kW): 450 T€ zzgl. Transformatoren und Netzanschlusskosten jährliche Kosten: 2 – 2,5 % der Investition
Technische Reife	Serienreife	Serienreife	Kleinserienreife

BRENNSTOFFZELLENBUSSE

Lager- und Tankinfrastruktur in Betriebshöfen
Ladeinfrastruktur bei BSZ-REX

keine Infrastruktur außerhalb von Betriebshöfen

Solobus: 580 – 650 T€
Gelenkbus: 800 – 850 T€
Batterie: 50 – 60 T€
BSZ: 100 – 140 T€
Betriebskosten⁴⁾: höher
Personalkosten⁵⁾: etwa gleich

5 – 6 Mio. € für 50 Busse bei Anlieferung von Wasserstoff
10 – 14 Mio. € für 50 Busse bei Eigenerzeugung von Wasserstoff

jährliche Kosten: 2 – 5 % der Investition⁶⁾

BSZ-Hybrid: Kleinserien- bis Serienreife
BZS-REX: Prototypen

ÜBERBLICK ÜBER DIE ANTRIEBSFORMEN

(HYBRID)OBERLEITUNGSBUSSE

Oberleitungsinfrastruktur in und außerhalb von Betriebshöfen

insb. in Innenstadtbereichen abhängig von Straßenraumgestaltung und -umfeld

Solobus: 540 – 670 T€
Gelenkbus: 580 – 950 T€
Batterie: 80 T€ / 100 T€

Betriebskosten⁴⁾: geringer
Personalkosten⁵⁾: etwa gleich

750 T – 1,2 Mio. € pro Doppelkilometer
i. d. R. geringer bei Einsatz von Hybrid-Oberleitungsbussen

jährliche Kosten: 2 – 2,5 % der Investition

Serienreife

1) abhängig von Verkehrsverhältnissen, Fahrgastnachfrage und Höhenprofil

2) gegenüber Dieselbusbetrieb unter der Annahme von gleicher Verfügbarkeit

3) Platzbedarf kann zu Stellplatzverlusten führen

4) gegenüber Dieselbusbetrieb inkl. Energie-, Wartungs- und Instandhaltungskosten

5) gegenüber Dieselbusbetrieb

6) abhängig von abgeschlossenem Servicevertrag

7) k. a. D. = keine ausreichende Datengrundlage

8 Nützliche Links

- <https://www.starterset-elektromobilität.de>
 - Projektübersicht 2019/2020 Zero Emission Busse in Deutschland
 - Förderübersicht Busse im ÖPNV (2019)
 - Marktübersicht Fahrzeuge und Infrastruktur
 - Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV
- Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge (Clean Vehicles Directive) vom 20.06.2019

