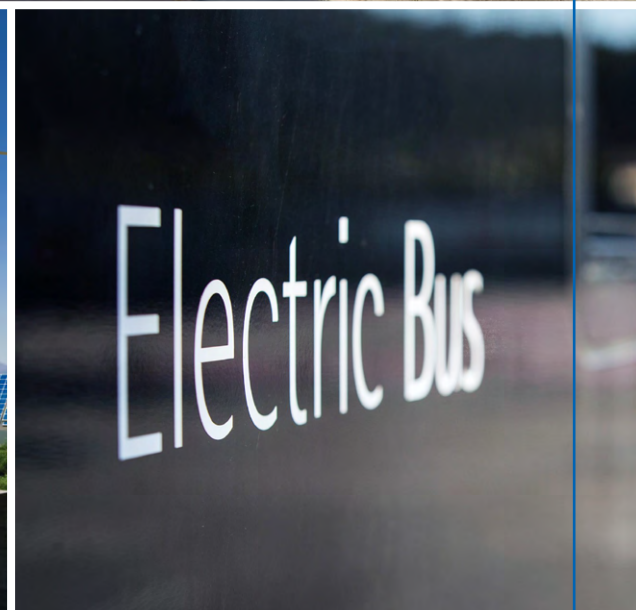




Elektrifizierung von KMU-Busunternehmen

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

 **LBO** | **DIEBUSUNTERNEHMEN**
Mitglied im bdo

Empfohlene Zitierweise:

VDE Renewables GmbH: Elektrifizierung von KMU-Busunternehmen,
Grundsatzstudie, Alzenau (April 2023)

Dieses Projekt (Förderkennzeichen 03EMK4213) wird durch das
Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) aufgrund
eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert

Autoren:

Patrick Zank, VDE Renewables GmbH, patrick.zank@vde.com
Patrick Heining, VDE Renewables GmbH

Disclaimer:

Alle folgenden Hinweise und Empfehlungen gelten nur als Richtwerte und sollen dabei
helfen, fundierte Entscheidungen zu treffen, bei Lieferanten die richtigen Fragen stellen
zu können oder auch die korrekten Begriffe zu verwenden. Die nachfolgenden Details
haben keinen Anspruch auf Vollständigkeit und sollen zur Orientierung dienen.

In keinem Fall sind die Verfasser in irgendeiner Stufe vertraglich, deliktisch, verschuldens-
unabhängig, haftpflichtig, gewährleistungspflichtig oder anderweitig haftbar für besondere,
zufällige oder Folgeschäden wie z. B. Verzögerung, Unterbrechung, Produktverlust,
Verlust erwarteter Gewinne oder Einnahmen.

Herausgeber:

VDE Renewables GmbH
Siemensstrasse 30
63755 Alzenau
Tel. +49 69 6308 5300
renewables@vde.com
www.vde.com/renewables

Titelbild:

AA+W / stock.adobe.com (Wasserstoff), Noel / stock.adobe.com (Ladesäulen),
scharfsinn86 / stock.adobe.com (Electric Bus und Bus mit Pantograf)

Design:

Medien&Räume | Kerstin Gewalt

April 2023

Inhalt

I	Management Summary	4
	Einleitung	5
II	Checklisten	8
III	Studie	9
1.	Batterieelektrische Fahrzeuge	11
1.1	Fahrzeugauswahl	11
1.1.1	Elektrobus	11
1.1.2	Oberleitungsbus	15
1.2	Energiemanagement	17
1.2.1	Gesamtenergiebedarfsermittlung	17
1.2.2	Wirkungsgrad	19
1.2.3	Netzanschluss	19
1.2.4	Energiebedarf	20
1.2.5	Ladeoptimierung	21
1.3	Aufbau des Betriebshofs	23
1.3.1	Ladeinfrastruktur	24
1.3.2	Werkstatt	28
1.3.3	Waschanlage	29
1.3.4	Gesicherte Ruhefläche	29
1.4	Betriebsabläufe	31
1.4.1	Umlaufplanung	31
1.4.2	Personal	31
1.4.3	Betriebsanweisungen	32
1.4.4	Notfallkonzepte	32
1.4.5	Brandschutz	33
2.	Brennstoffzellenfahrzeuge	35
2.1	Fahrzeugauswahl	36
2.2	Energiebedarf	37
2.2.1	Tankinfrastruktur	37
2.2.2	Logistik	37
2.2.3	Bauliche Anforderungen	38
2.2.4	Anforderungen an den Betrieb mit Wasserstoffbussen	39
3.	Antriebsunabhängige Bewertungen	40
3.1	Analyse der Ausgangslage	40
3.1.1	Grundlagen	40
3.1.2	Festlegung umzustellender Linien	41
3.1.3	Wartung und Service	41
3.2	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	42
3.3	Umweltbewertung	44
IV	Anhang	46
	Literaturverzeichnis	46
	Abbildungsverzeichnis	49
	Tabellenverzeichnis	49
	Begriffsverzeichnis	50
	Zusatzinformationen	52

I Management Summary

Der Umbau des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) und damit die Umstellung der Busflotten auf emissionsfreie Antriebe ist mit Chancen, aber auch mit Herausforderungen verbunden. Es gibt allerdings keinen Grund zur Sorge. Mit Hilfe einer durchdachten Planung und eines individuell angepassten Aufbaus der Ladeinfrastruktur bietet die Umstellung auf elektrische Antriebe die Möglichkeit, das Unternehmen neu und zukunftsorientiert aufzustellen. Eine frühzeitige Anpassung der Unternehmen auf die neuen Technologien kann den Verkehrsbetrieben einen strategischen Vorteil verschaffen. Dazu zählen unter anderem der gezielte Know-how-Aufbau und die Positionierung als innovativer Betrieb.

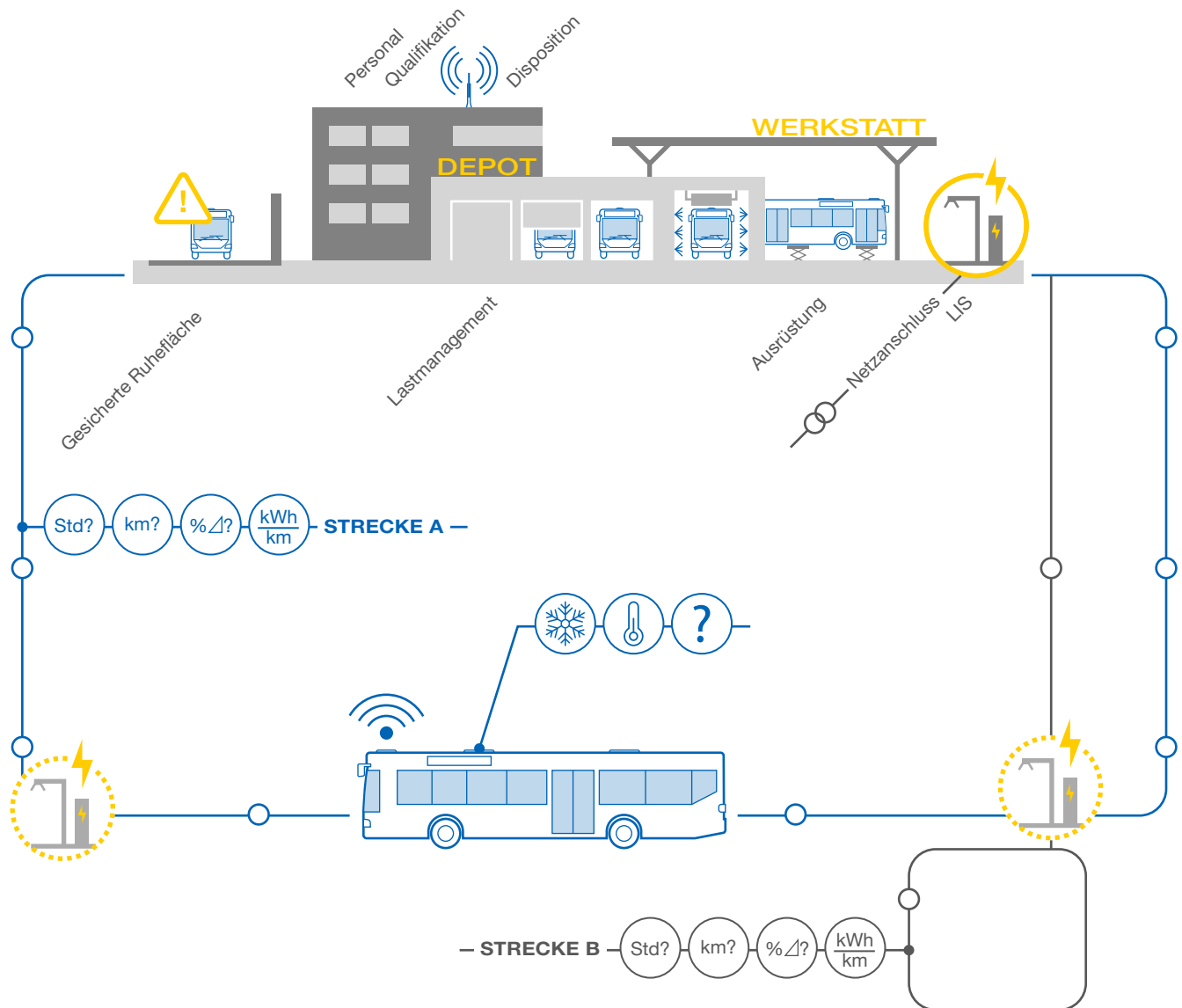
Diesen Chancen stehen die höheren Anschaffungskosten im Vergleich zu den etablierten Dieselmotoren sowie die geringere Reichweite der batterieelektrischen Busse gegenüber. Durch die geänderte Energiezuführung ist hier ebenfalls ein Umdenken von den gewohnten Mustern nötig. Die Umstellung auf elektrische Antriebssysteme beschränkt sich nicht auf die erwartbaren Anpassungen wie Planung, Errichtung und Betrieb der Infrastruktur. Sollen die Chancen der Umstellung vollumfänglich genutzt werden, müssen alle Unternehmensbereiche inkludiert werden und Anpassungen unter anderem in der Disposition, dem Personalmanagement und der Werkstatt erfolgen.

Insgesamt gilt es, die regulatorischen und herstellerspezifischen Vorgaben mit den lokalen Rahmenbedingungen in Einklang zu bringen. So individuell wie jedes Unternehmen ist auch die Umsetzung der Elektromobilität an den Betriebshöfen. Eine One-fits-all-Lösung gibt es nicht. Aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten sind eine sorgfältige Planung, Vorausschau und Vorbereitung für die Elektrifizierung des Fuhrparks nötig.

Dieses Transformationskonzept sollte Überlegungen von der Technologieauswahl, der Energiebedarfsermittlung und der Infrastruktur beinhalten und daraus den Betriebshofaufbau ableiten. Ebenso sollten Konzepte zu den zukünftigen Betriebsabläufen, zur Qualifizierung der Mitarbeiter sowie Sicherheits- und Notfallkonzepte enthalten sein.

Die vorliegende Studie soll dazu dienen, Betreibern von kleinen und mittleren Busunternehmen (KMU) die Aspekte der Umstellung auf Elektromobilität zu erläutern und die wichtigsten Anpassungsfaktoren aufzuzeigen. Hierzu wird zunächst eine übersichtliche Checkliste zur Verfügung gestellt, die man Punkt für Punkt durcharbeiten kann. Bereits geklärte Themen können als erledigt markiert werden. Zu allen anderen Themen finden sich im weiteren Verlauf der Studie ausführliche Erklärungen, die zur Entscheidungsfindung beitragen sollen. Über Infoboxen in den einzelnen Kapiteln werden weitergehende Informationen zu den Themen aufbereitet. Es wird insbesondere auf die spezifischen Themen für KMUs im ländlichen Raum eingegangen. Eine Übersicht der verschiedenen Themengebiete, die für eine Umstellung des Betriebs zu adressieren sind, ist in → Abbildung 1 dargestellt.

Dieses Projekt wird durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



Einleitung

Die Konzeptionierung des Verkehrs der Zukunft rückt immer weiter in die Aufmerksamkeit der Öffentlichkeit und auch der Markt der Busunternehmen befindet sich im Umbau: Es gilt die Mobilitätskonzepte der Zukunft umweltfreundlich, nachhaltig und frei von fossilen Brennstoffen zu gestalten.

Ein zentraler Bestandteil dieser Entwicklung wird der energieeffiziente E-Bus sein, egal ob in Form eines batterieelektrischen Fahrzeugs oder als Brennstoffzellenfahrzeug. Der rasche technische Fortschritt und die Anpassungen der Gesetze und Regularien führen dazu, dass die Verkehrsunternehmen grundlegende Entscheidungen treffen müssen. Nur so können die nötigen Investitionen langfristig die Wirtschaftlichkeit des Unternehmens sicherstellen. Die Folgen der Elektrifizierung sind weitreichender als nur der Beschluss zur Beschaffung neuer Busse. Eine Umstellung der Flotte erfordert systemseitige Anpassungen wie neue Ansätze zu Tank- und Ladekonzepten, Gestaltung der Depots und eine IT-basierte Disposition, bei der die Reichweite der Busse berücksichtigt wird.

Abbildung 1: Schematischer Aufbau der zu adressierenden Themen am Beispiel eines Betriebs mit batterieelektrischen Bussen.

Im Rahmen des zugrundeliegenden Projektes unterstützt VDE Renewables den Landesverband Bayerischer Omnibusunternehmen e. V. (LBO) und dessen Mitglieder bei der technischen Umsetzung. Andere Leitfäden fokussieren sich auf urbane Räume bzw. große kommunale Verkehrsunternehmen, da in Ballungsgebieten der Umstellungsdruck aufgrund der größeren Feinstaubbelastung höher ist. Ziel dieser Studie ist die gebündelte Untersuchung und Identifizierung der Herausforderungen von KMU abseits von Ballungsräumen bei der Implementierung der E-Mobilität, um daraus Handlungsempfehlungen abzuleiten.

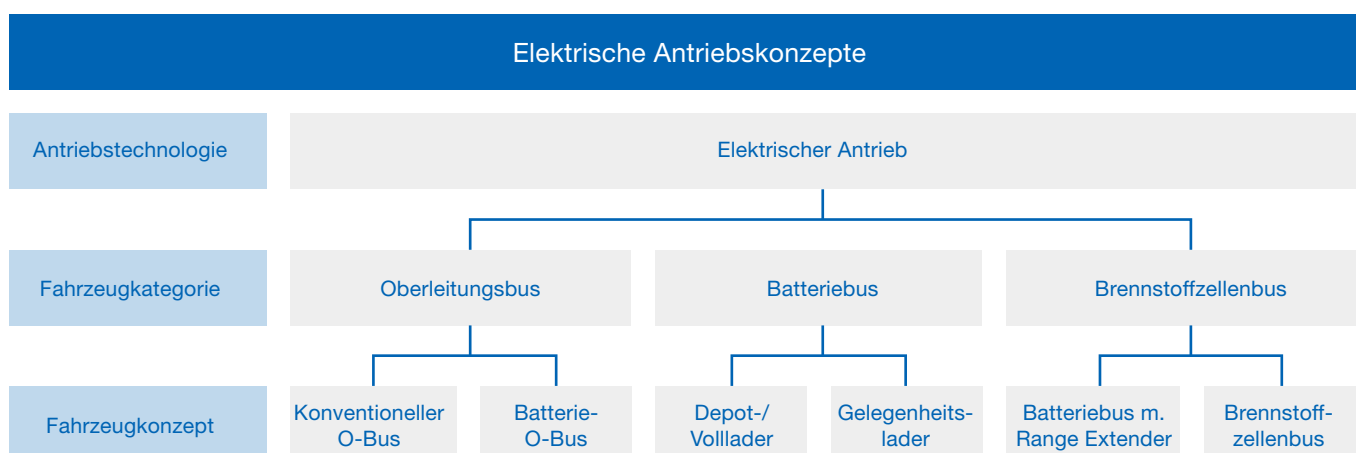
Dafür werden Checklisten mit den Themen erstellt, die im Speziellen für eine reibungslose Umstellung zur E-Mobilität zu adressieren sind. Zur Erläuterung der Checklisten und Darstellung der Hintergründe wird eine begleitende Studie erstellt.

Als Basis der Untersuchung wurden Interviews und Betriebshofbegehungen bei repräsentativen Mitgliedsbetrieben des LBO e. V. durchgeführt. Das Team der VDE Renewables möchte hier noch einmal den maßgeblichen Einfluss der zum Thema befragten Unternehmer hervorheben und sich herzlich für die bereitgestellten Informationen und die Mitwirkung an diesem Projekt bedanken.

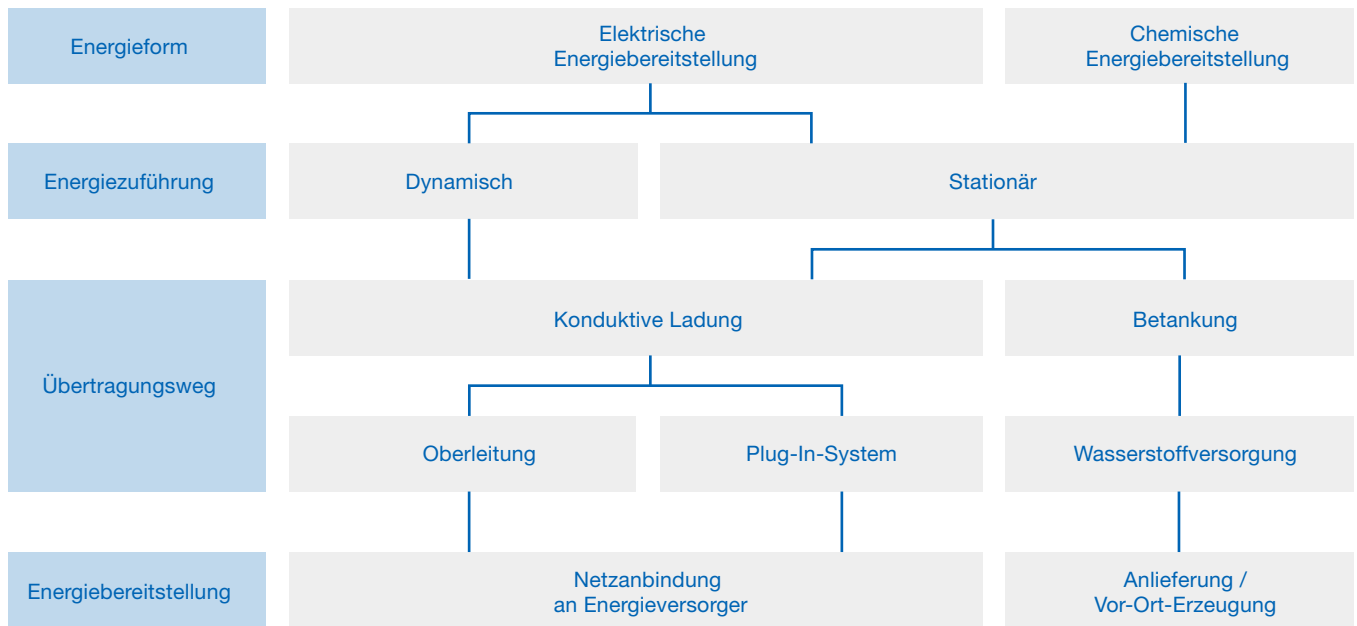
Aufgrund der vielfältigen Antriebskonzepte, unterschiedlichen Auslegungsvarianten und Umstufungsstufen ist die Auswahl des für den Betrieb passenden Elektrifizierungskonzeptes sehr komplex. Es existiert keine Standardlösung für Omnibusunternehmen, denn das Betriebskonzept muss individuell an die Gegebenheiten vor Ort angepasst werden. Jede Antriebsvariante bringt ihre spezifischen Vorteile, aber auch Nachteile, mit sich, die es abzuwägen gilt. Eine Übersicht der verschiedenen Auslegungsvarianten und Antriebsformen, die im Laufe dieser Studie vorgestellt werden, ist in → Abbildung 2 und → Abbildung 3 dargestellt. Die Begrifflichkeiten aus der Abbildung werden im weiteren Verlauf der Studie noch im Detail erläutert.

In der folgenden Studie wird von der Umstellung auf elektrische Antriebe gesprochen. Dies wird aber nicht in einem Schritt realisierbar sein. Sinnvoller ist es, in der Planung und Auslegung eine vollständige Elektrifizierung anzustreben, bei der Umsetzung jedoch mit den einfachen und kürzeren Linien zu beginnen. Durch die gesammelten Erfahrungen lassen sich die komplexeren Umläufe im Anschluss leichter umstellen.

Abbildung 2: Übersicht Elektrische Busse.
Teil 1 – Antriebskonzepte. Nach [1]



Versorgungsinfrastruktur für elektrisch angetriebene Busse



Es wird somit in fast allen Fällen zu einem Mischbetrieb kommen. Dies hat Auswirkungen auf die Auslegung der Tank- und Ladeinfrastruktur, da nur selten ausreichend Platzreserven verfügbar sind, um einen Parallelbetrieb beider Infrastrukturen zu ermöglichen. Der Mischbetrieb hat darüber hinaus Auswirkungen auf den Personalbedarf und die nötigen Qualifikationen der Werkstatt. Die Komplexität lässt sich hier durch Systeme wie „Bus-as-a-service“ oder Fremdvergaben verringern.

Abbildung 3: Übersicht Elektrische Busse. Teil 2 – Versorgungsinfrastruktur.
Nach [1]

II Checklisten

Die nachfolgenden Checklisten sind in die antriebsabhängigen – batterieelektrisch und Brennstoffzelle – sowie in die antriebsunabhängigen Aspekte untergliedert. Die Hintergründe und Informationen zu den einzelnen Themengebieten sind in der nachfolgenden Studie zu finden.

Batterieelektrische Fahrzeuge		
Fahrzeugauswahl	Elektrobus	
	Oberleitungsbus	
Energiemanagement	Gesamtenergiebedarfsermittlung	
	Wirkungsgrad	
	Netzanschluss	
	Energiebedarf	
	Ladeoptimierung	
Aufbau des Betriebshofs	Ladeinfrastruktur	
	Werkstatt	
	Waschanlage	
	Gesicherte Ruhefläche	
Betriebsabläufe	Umlaufplanung	
	Personal	
	Betriebsanweisungen	
	Notfallkonzepte	
	Brandschutz	

Brennstoffzellenfahrzeuge		
Fahrzeugauswahl	Konventioneller Brennstoffzellenbus	
	Brennstoffzellenbus mit Range Extender	
Energiebedarf	Tankinfrastruktur	
	Logistik	
	Bauliche Anforderungen	
	Anforderungen an den Betrieb mit Wasserstoffbussen	

Antriebsunabhängige Bewertungen		
Analyse der Ausgangslage	Grundlagen	
	Festlegung umzustellender Linien	
	Wartung und Service	
Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	Faktoren	
Umweltbewertung	Parameter	

III Studie

Für die effektive und kosteneffiziente Umstellung eines Busunternehmens auf Elektromobilität gilt es, verschiedene Punkte genauer zu betrachten. Für die gesetzlichen Rahmenbedingungen und zugrunde liegenden Strategien sei an dieser Stelle auf die „Gesetzeskarte Elektromobilität im ÖPNV“ der NOW verwiesen.¹

Bei diesem Antriebswechsel ist der Austausch der Verbrennerfahrzeuge durch elektrische nur ein kleiner Teil. Größter Punkt ist die Energiezuführung zur elektrischen Flotte: Die Ladeinfrastruktur (LIS) oder Tankinfrastruktur (TIS) und deren Versorgung. Der benötigte Umfang der LIS ist abhängig von der grundsätzlichen Wahl der Antriebsform der elektrischen Busse. Hier kann zwischen verschiedenen elektrischen Antrieben gewählt werden:

- E-Bus mit Batterie
 - Vollloader
 - Gelegenheitslader
- Oberleitungsbus
 - Konventionell
 - Hybrid
- E-Bus mit Brennstoffzelle (BZ) und Batterie
 - Brennstoffzelle (BZ-Hybrid)
 - Brennstoffzelle und Batterie Range Extender (BZ-REX)

Die Auswahl eines dieser Antriebskonzepte und ihrer LIS haben Auswirkungen auf das gesamte Unternehmen, von dem Aufbau des Betriebshof bis hin zu den täglichen Abläufen. Standzeiten müssen, in Abhängigkeit von Nutzungsprofil und Fahrzeugkategorie, im Voraus geplant und zur Ladung genutzt werden. Dies erfordert ein Umdenken und bringt neue Aufgaben sowohl für Fahrer als auch Disponenten mit sich.

Eine Ladelösung muss immer an die individuellen Anforderungen des Unternehmens und der Energieverfügbarkeit am Standort angepasst werden. Der Aufbau dieser Ladeinfrastruktur sollte daher fokussiert angegangen und mit ausreichenden personellen Kapazitäten geplant und umgesetzt werden. Auch die Zeitschiene sollte nicht unterschätzt werden. Daher ist es sinnvoll, zu Beginn eine detaillierte Planung für die Errichtung der Energieversorgung unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten durchzuführen.

Wird beabsichtigt, die verschiedenen Fördermöglichkeiten auf Bundes- und Landesebene in Anspruch zu nehmen, kann dies den Zeitbedarf zusätzlich erhöhen. Inhalte und Höhe der Förderung sind abhängig vom jeweiligen Förderaufruf, den es für jeden Einzelfall zu prüfen gilt. Die Förderungen können nicht nur den Fahrzeugkauf, sondern auch den Aufbau der passenden Infrastruktur und deren Installation finanziell unterstützen.²

Es gilt jedoch zu beachten, dass in der Regel mit der Bestellung der Komponenten und Umsetzung erst nach Eingang des Bewilligungsbescheids begonnen werden darf. Darüber hinaus müssen die Lieferzeiten sowohl der Fahrzeuge als auch der Infrastruktur einkalkuliert werden, die abhängig vom Lieferanten zwischen 9 und 14 Monaten dauern können.

¹ Siehe hierzu „Gesetzeskarte Elektromobilität im ÖPNV“ [49]

² Verschiedene Förderprogramme auf EU-, Bundes- und Landesebene finden sich im Förderfinder der NOW [52]

Für die Erweiterung des Fuhrparks um Elektromobilität müssen viele Beteiligte innerhalb und außerhalb ihres Unternehmens rechtzeitig informiert werden, um auch die Akzeptanz der Umstellung zu steigern. Ein wichtiger Stakeholder ist dabei der Netzbetreiber, der über die geplante Installation in jedem Fall in Kenntnis gesetzt werden muss und diese in Deutschland bei einer Leistung von mehr als 12 kVA zusätzlich genehmigen muss. Gegebenenfalls ist eine Erhöhung der Netzanschlussleistung notwendig, was wiederum bauliche Anpassungen nach sich zieht. Je nach Gemeinde bzw. Bundesland müssen hierfür auch baurechtliche Regelungen beachtet werden, die anzeige- oder genehmigungspflichtig sein können. Aus diesem Grund ist der Einbezug des zuständigen Bauamts in das Planungsvorhaben sinnvoll. Für die Umsetzung des Projekts werden zudem kompetente Handwerksbetriebe benötigt, insbesondere ein Elektrofachbetrieb.

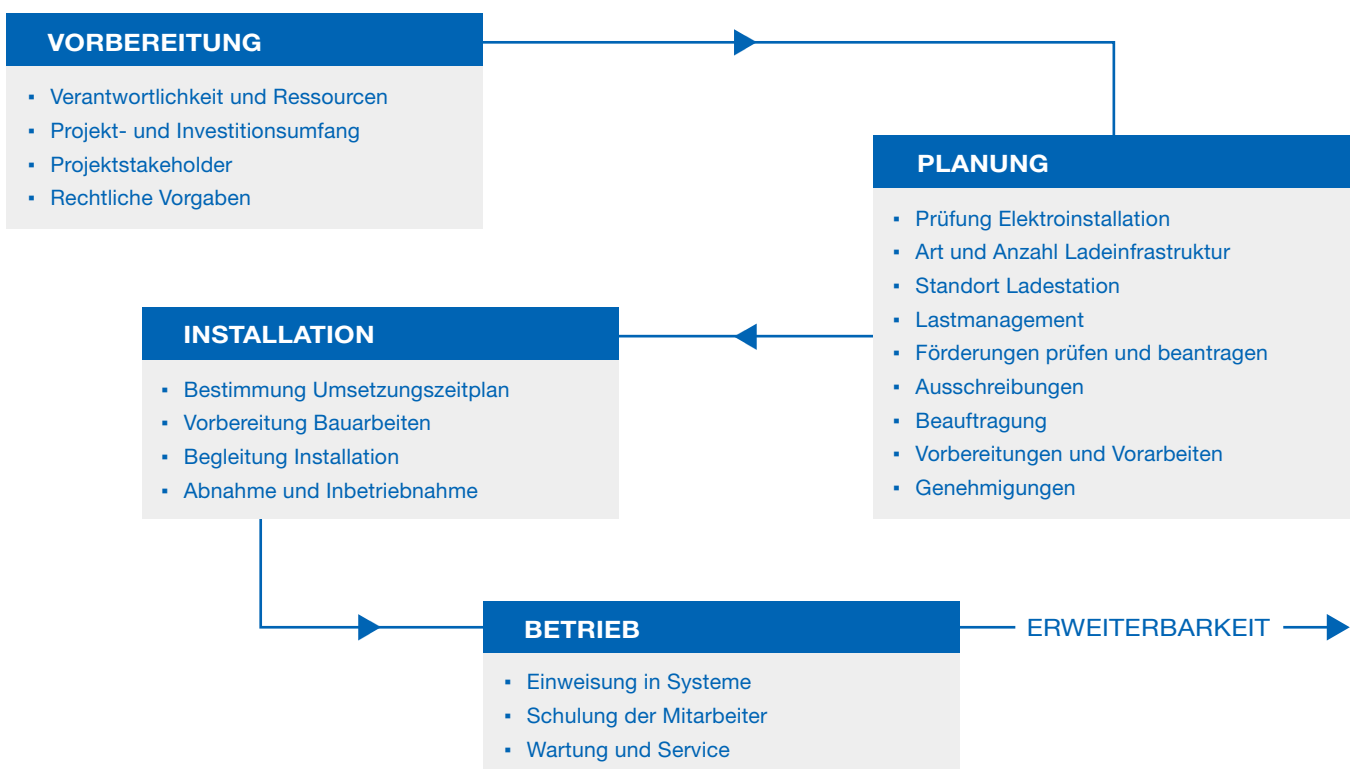
Als Vorbereitung sollten fundierte Analysen zum aktuellen Zustand des Betriebshofs und der Planung der Anpassungen durchgeführt werden. Durch einen passenden Zeitplan kann ein vollumfängliches Bild geschaffen werden, ohne die Umstellung beiläufig erledigen zu müssen. Nur dadurch kann gewährleistet werden, dass sich die hohen Investitionskosten zukünftig tragen werden und das Unternehmen langfristig wirtschaftlich arbeiten kann.

Auch die Umsetzungsdauer sollte nicht zu knapp eingeplant werden. Die Vorbereitung und Durchführung der Umstellung kann aufgrund der Konzepterstellung, Verfügbarkeit von Komponenten und Handwerkern sowie der Genehmigungsprozesse mehrere Monate in Anspruch nehmen.

Neben der Vorbereitung und der Umsetzung sollten von Beginn an auf eine skalierbare Lösung geachtet und mögliche Erweiterungen bereits eingeplant werden. Dadurch lassen sich zukünftige Anpassungen einfacher und schneller umsetzen, ohne dabei zusätzliche Kosten zu verursachen.

Die zentralen Phasen zur Umstellung auf emissionsfreie Antriebe sind in → Abbildung 4 dargestellt.

Abbildung 4: Projektphasen bei der Umstellung auf emissionsfreie Antriebe



1. Batterieelektrische Fahrzeuge

1.1 Fahrzeugauswahl

Bei der Beschaffung eines elektrisch angetriebenen Fahrzeugs kann die Auswahl zwischen verschiedenen Technologieansätzen getroffen werden, je nach Anwendungsfall zwischen einem batterieelektrischen Bus oder einem Oberleitungsbus. Diese beiden Klassen sollen im Folgenden mit ihren spezifischen Untergruppen vorgestellt werden.

1.1.1 Elektrobus

Ein Elektrobus, E-Bus, auch Batteriebus oder Akkubus genannt, besitzt weder Verbrennungsmotor, Abgasanlage noch Treibstofftank. Zu den charakteristischen Merkmalen eines E-Busses zählen der für den Antrieb zuständige Elektromotor, der entweder als Zentralmotor, als radnaher Motor oder als Radnabenmotor ausgeführt sein kann. Dieser Elektromotor wird von einer aufladbaren Batterie mit Energie versorgt, die durch einen Anschluss an das Stromnetz und durch Rekuperation geladen wird. Der schematische Aufbau eines Elektrobusse ist in → Abbildung 5 dargestellt.

Die Reichweite des Busses ist abhängig von der zur Verfügung stehenden Batteriekapazität und dem spezifischen Energieverbrauch je Kilometer. Dieser wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Dazu zählen ähnlich wie bisher bei Verbrennern die Fahrweise und die Topografie, aber auch Faktoren wie die Umgebungstemperatur. Zu beachten ist hier besonders der zusätzliche Energiebedarf des Klimatisierungskonzepts, da dieses im Falle einer elektrischen Heizung ebenfalls von der Batterie getragen werden muss. Eine Nutzung der Abwärme wie bei Verbrennungsmotoren ist bei einem batteriegetriebenen Fahrzeug (BEV) nicht möglich. Dadurch verringert sich insbesondere in den Wintermonaten die Reichweite. Somit sollte neben dem eigentlichen Energiebedarf für den Antrieb ein zusätzlicher Energiebedarf für die Nebengeräte im Bereich von 25–30 % einkalkuliert werden.³

Für E-Busse gibt es verschiedene Konzepte der Energieversorgung der Antriebsbatterie, um die notwendigen Ladevorgänge bestmöglich in das bestehende Betriebskonzept zu integrieren. Die am häufigsten Anwendung findenden Nachladungsvarianten sind die Depotladung, die Gelegenheitsladung und die Pulsladung.

Durch **Rekuperation** ist es möglich, die Energie, die beim Bremsen des Busses entsteht, in elektrische Energie zu wandeln und in die Batterie zurückzuspeisen. Dadurch kann die Reichweite des Busses und die Energieeffizienz gesteigert werden. Die Rekuperationsrate gibt an, wie hoch der Anteil der Energie ist, die beim Bremsen zurückgewonnen werden kann.

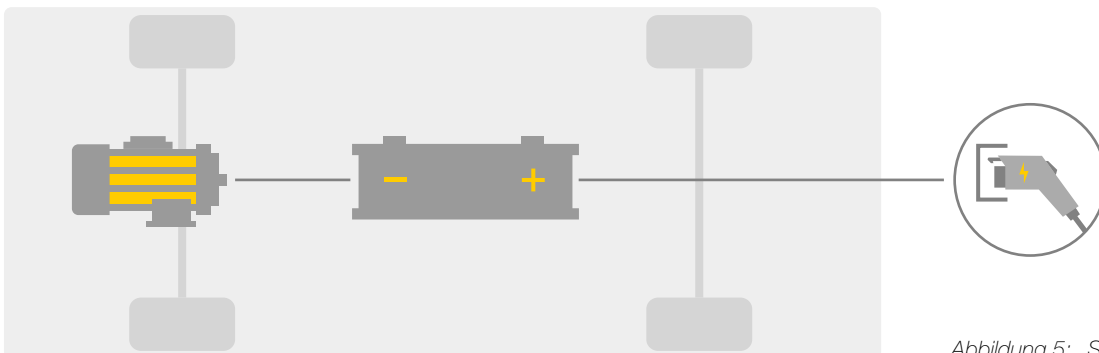


Abbildung 5: Schaubild Elektrobus. Nach [2]

³ Siehe hierzu Kapitel 1.2.2 Wirkungsgrad.

Exkurs Batteriewissen kompakt

Obwohl die Kosten für Batteriezellen in den letzten Jahren zunächst gesunken sind, ist die Batterie weiterhin das teuerste Bauteil in einem batteriegetriebenen Fahrzeug. Batterien für den Automotive-Bereich bestehen i. d. R. aus mehreren in Reihe und/oder parallel geschalteten Modulen, die sich wiederum aus einzelnen Zellen zusammensetzen. Diese Zellen können aus unterschiedlichen **Zelltypen (Zellchemie)** bestehen, welche die Eigenschaften der Batterie bestimmen.

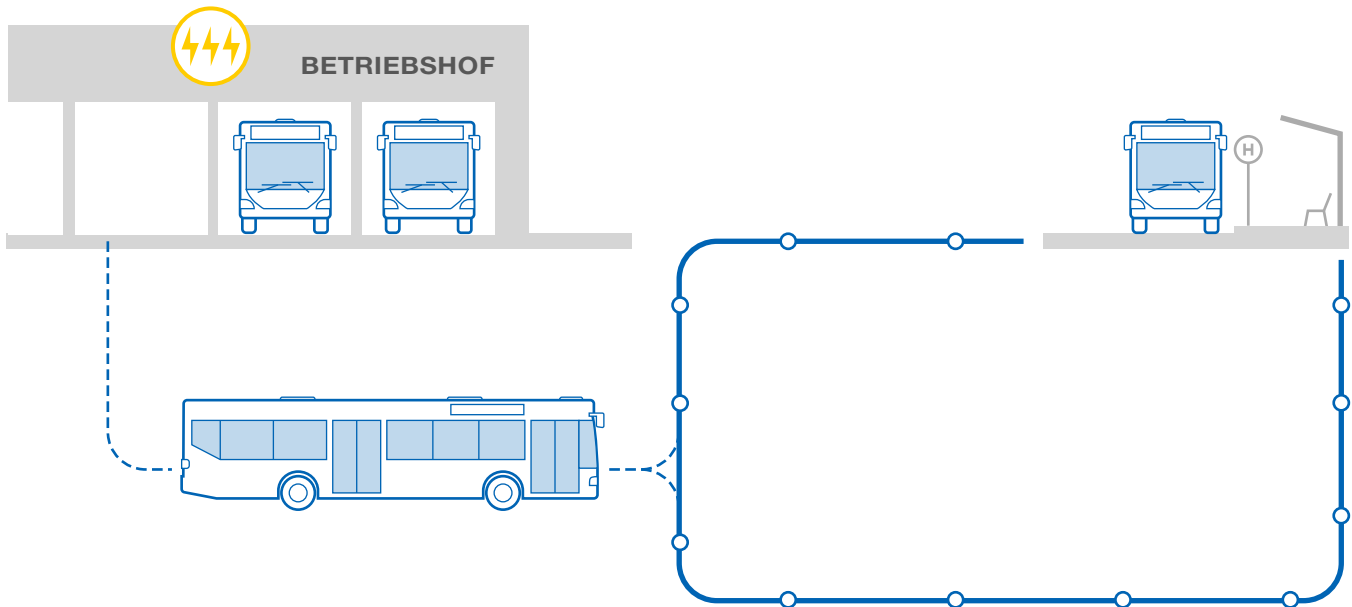
Hauptcharakteristika einer Batterie sind die Energiedichte (Wh/kg), woraus sich der Energieinhalt ableitet, und die Leistungsdichte (W/kg), welche die Lade- und Entladeleistung der Batterie bestimmt. Die aktuell am Markt verfügbaren Zellen besitzen entweder einen hohen Energiegehalt oder eine hohe Leistungsdichte, weshalb Automotive Batterien häufig in High-Energy- und High-Power-Batterien unterteilt werden. In Datenblättern wird häufig die gesamte Kapazität der Batterie angegeben. Allerdings führt die vollständige Nutzung des Speichers zu einer schnelleren Alterung der Batterie. Aus diesem Grund werden die Batterien in einem gewissen Ladefenster betrieben, das den Bereich zwischen dem minimalen und maximalen Ladezustand definiert. Abhängig von Zelltyp und Hersteller sind etwa 70–80 % des nominalen Energiegehalts der Batterie nutzbar.

Die Ladeleistung einer Batterie wird durch die Laderate (C) angegeben. Diese gibt das Verhältnis der Ladeleistung zur Kapazität an. Es gilt jedoch zu beachten, dass die Batterien nicht über das gesamte Ladefenster hinweg mit der vollen Ladeleistung geladen werden können, sondern dass mit Steigen des Ladezustandes (SoC) die Ladeleistung abnimmt. Die Ladezeit einer Batterie ergibt sich aus der Batteriekapazität und der verfügbaren Ladeleistung. Im Allgemeinen gilt: $\text{Ladezeit} = \text{Batteriekapazität} / \text{Ladeleistung}$. So dauert es ca. 3 Stunden, einen Bus mit einer 450 kWh Batterie bei einer Ladeleistung von 150 kW vollständig zu laden. Die Ladeleistung ist jedoch nicht über den gesamten Zeitraum des Ladevorgangs konstant, wodurch die tatsächlich Ladedauer etwas länger ist als die theoretisch berechnete.

Batterien zeigen im Laufe ihrer Nutzungsdauer Alterungserscheinungen. Die Zellen altern jedoch unterschiedlich und sind nie zu 100 % baugleich. Dies bewirkt, dass beim Laden und Entladen der Zellen unterschiedliche Ladungszustände innerhalb der Batterie auftreten. Um dies auszugleichen, muss regelmäßig ein sog. Zellbalancing durchgeführt werden, bei dem die Ladezustände der einzelnen Zellen ausgeglichen werden. Dieser Vorgang wird automatisch vom Batteriemanagementsystem (BMS) durchgeführt.

Die Batterien unterliegen sowohl einer nutzungsbedingten als auch einer kalendarischen Alterung, wobei die kalendarische Alterung im regulären Anwendungsfall vernachlässigt werden kann. Als marktüblicher Standard wird das Ende der Lebensdauer einer Batterie in einer mobilen Anwendung bei einer Restkapazität von ca. 80 % gegenüber dem Neuzustand angenommen.

Die Einteilung von Batterien erfolgt häufig auf Basis der eingesetzten **Zellchemie**. Zu den gängigsten Varianten zählen Zellen mit **Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid (NMC)** und **Lithium-Eisen-Phosphat (LFP)**. Die Bezeichnungen beziehen sich nur auf die Zusammensetzung der Kathode der Zelle. Diese ist jedoch nur ein Teil der Batterie. Die Eigenschaften werden von weiteren Komponenten beeinflusst. Für weitere Informationen zum Aufbau von Lithium-Ionen-Zellen sei an dieser Stelle auf das „Kompendium: Li-Ionen-Batterien“ des VDE verwiesen. [3]



Depotlader

Bei den Depotladern, auch Vollloader genannt, wird ein Ladekonzept gewählt, das eine Nachladung der Fahrzeuge während der Betriebspause, i. d. R. über Nacht, aber auch tagsüber, ermöglicht. Ein als Depotlader ausgelegter E-Bus besitzt meist eine Batterie mit großer Kapazität (im Bereich von 300–400 kWh) und ist aufgrund der eingesetzten Batterietechnologie nur begrenzt schnellladefähig.⁴ Die Aufladung der Batterie wird zu Zeiten durchgeführt, in denen das Fahrzeug länger auf dem Betriebshof steht. Das Funktionsprinzip eines Betriebs mit Depotladern ist in → Abbildung 6 dargestellt.

Abbildung 6: Funktionsprinzip eines Depotladers. Nach [2]

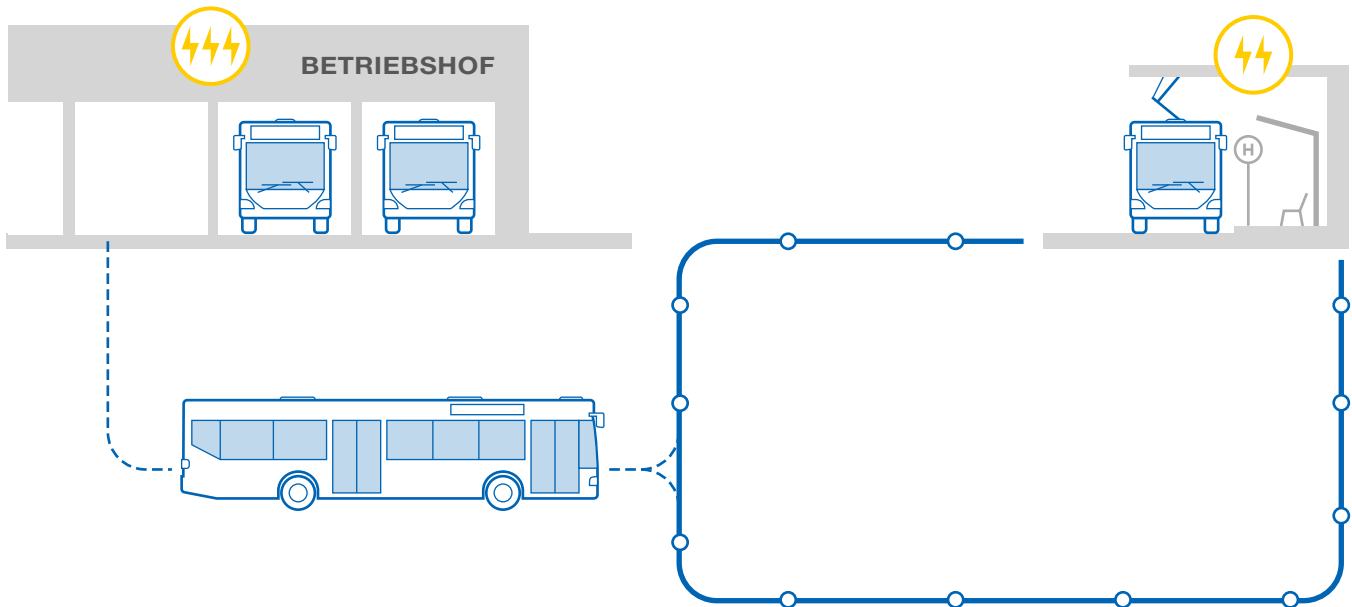
Depotlader kommen aufgrund ihrer relativ großen Reichweite dem bisherigen Betrieb mit Dieselbussen am nächsten. Allerdings ist ein Eins-zu-eins-Ersatz der alten Busse nicht auf allen Umläufen möglich, da momentan verfügbare Fahrzeugmodelle eine tägliche Fahrleistung von etwa 300 km abbilden können. Daher sind möglicherweise Anpassungen der Umläufe oder ein Mischbetrieb aus Depot- und Gelegenheitsladern nötig. Um die bisherige Verfügbarkeit der Fahrzeuge mit ausreichender Reichweite abzudecken, kann ein Mehrbedarf an Fahrzeugen und Fahrpersonalstunden nötig sein. Schätzungen der NOW und des Fraunhofer IVI gehen hierbei von Mehraufwänden im Bereich von 5–25 % aus, abhängig von lokalen Gegebenheiten. [4]

Ein Vorteil dieser Variante besteht darin, dass die Ladeinfrastruktur ausschließlich am Betriebshof errichtet werden muss, was den Installations- und Instandhaltungsaufwand verringert. Für ein auf Depotlader ausgelegtes Betriebskonzept gilt es zu klären, ob die Länge der Umläufe von der Reichweite der Fahrzeuge abgedeckt werden kann, eine Anpassung der Umlaufpläne möglich ist oder welche Mehraufwände die Alternative sind.

Gelegenheitslader (Opportunity Charging)

Gelegenheitslader, auch Opportunity Charger genannt, besitzen im Vergleich zu Depotladern meist eine geringere Batteriekapazität und benötigen daher mehrere Nachladungen über den Tag verteilt. Dabei wird so viel Energie in das Fahrzeug geladen, um einen weiteren reibungslosen Betrieb zu gewährleisten. Die Nachladungen erfolgen idealerweise während längerer Standzeiten,

⁴ Depotlader verwenden häufig Batterien, die für eine maximale Ladeleistung im Bereich der Nennkapazität ausgelegt sind. Daher besitzen sie in der Regel Laderaten im Bereich von $C \leq 1$.



der Wendezeiten, einer Fahrerpause an Endhaltestellen oder am Betriebshof. Dieser begrenzte Zeitslot hat zur Folge, dass innerhalb kurzer Zeit große Energiemengen übertragen werden müssen. Dazu werden Ladeleistungen bis zu 450 kW benötigt.⁵ Bei solch hohen Ladeleistungen werden meist Pantographen zur Energieübertragung verwendet, die auch aufgrund der kurzen Ladedauer des Busses sinnvoll sind. → Abbildung 7 zeigt den schematischen Aufbau eines Busbetriebs mit Gelegenheitsladern.

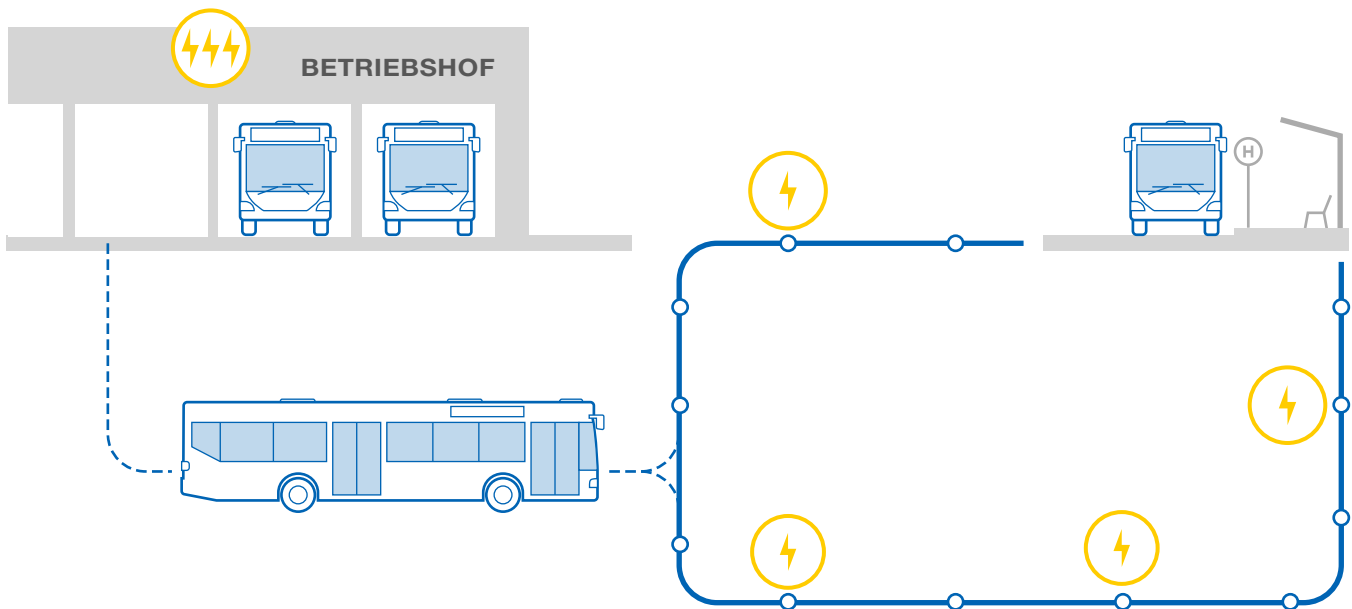
Abbildung 7: Funktionsprinzip eines Gelegenheitsladers. Nach [2]

Um das Konzept der Gelegenheitslader sinnvoll umzusetzen ist es notwendig, die LIS im öffentlichen Raum in der Nähe der Linie an geeigneten Stellen zu errichten, um die Zubringerfahrten möglichst zu reduzieren. Die Errichtung im öffentlichen Raum ist mit verschiedenen Herausforderungen verbunden, da jeder Ladepunkt eine Anschlussleistung im Bereich von bis zu 450 kW benötigt. Um Auswirkungen von Verspätungen oder technischen Störungen zu minimieren, können an Endhaltestellen mehrere Ladestationen eingeplant werden. Auch sollten die Ladepunkte unabhängig von der Belegung der Ladestationen räumlich nah genug aneinander sein, um flexibel auf ggf. auftretende Ausfälle oder Reichweitenprobleme reagieren zu können. Durch diese Redundanz kann der Betrieb auch bei längeren Verspätungen einzelner Busse oder durch Baustellen auf der Strecke aufrechterhalten werden.

Grundsätzlich ist es möglich, den Gelegenheitslader nur an Ladestationen außerhalb des Betriebshofes aufzuladen. Auf eine LIS am Betriebshof sollte dennoch nicht verzichtet werden, um die Fahrzeuge über Nacht und während längerer Standzeiten nachladen zu können. Allerdings ist dort eine Auslegung der LIS mit geringerer Ladeleistung ausreichend, wodurch ein Ausbau des Netzanschlusses möglicherweise vermieden werden kann.

Laut Untersuchungen des Fraunhofer IVI sollen an einer außerhalb aufgestellten Ladestation nicht mehr als 4–5 Batteriebusse betrieben werden, um gegenseitige Behinderungen zu vermeiden. [4] Eine größere Zahl an Bussen pro Ladestation kann zu Ladezeitverlusten und im Falle von Ausfällen einzelner Ladestationen zu einem instabilen Betrieb führen.

⁵ Für eine solche Energieübertragung sind sehr hohe Laderaten ($C > 3$) nötig. Um so etwas zu ermöglichen, werden in den Fahrzeugen High Power Batterien benötigt, die für Laderaten bis zu 6 C ausgelegt sind.



Im Gegensatz zu den Depotladern ist ein vollelektrisches Klimatisierungssystem leichter zu integrieren, wenn genug Aufenthaltszeiten am Ladepunkt eingeplant werden. Unter bestimmten Voraussetzungen ist bei dem Betriebskonzept mit Gelegenheitsladern mit keinem oder nur geringem Fahrzeugmehrbedarf zu rechnen.

Abbildung 8: Funktionsprinzip eines Pulsaders. Nach [2]

Darüber hinaus ist auch eine Mischform mit Depot- und Gelegenheitsladern als Betriebskonzept denkbar. Hierbei werden die Busse für eine gewisse Zeit tagsüber auf den Betriebshof zurückgeholt und dort mit hohen Ladeleistungen nachgeladen. Dies erspart im Vergleich zu den reinen Gelegenheitsladern die aufwendige Errichtung von Ladestationen im öffentlichen Raum. Allerdings ist hier mit einem Mehrbedarf an Fahrzeugen und Fahrpersonalstunden zu rechnen, der jedoch geringer ist als bei einem Betriebskonzept, das rein auf Vollbilder ausgelegt ist. Dieses Konzept eignet sich besonders dort, wo der Betriebshof in der Nähe der Linien liegt oder wo lange Umläufe bspw. in Verkehrsspitzen durch Kurzläufer ergänzt werden, die den restlichen Tag als Reservefahrzeug verfügbar sind.

Pulsader

Pulsader sind eine spezielle Art der Gelegenheitslader. Bei dieser Ladeart wird der Energiespeicher auch an jeder Haltestelle kurz mit einer sehr hohen Ladeleistung von 450 kW und mehr nachgeladen. Der Einsatz von Pulsadern ist nur auf Linien sinnvoll, auf denen sehr viele Fahrzeuge bedient werden müssen, da dieser mit einem sehr hohen Aufwand zum Ladeinfrastrukturaufbau verbunden ist. Außerdem führen die geringen Reichweiten der Fahrzeuge zu einem unflexiblen, liniengebundenen Einsatzszenario. Aus diesen Gründen werden Pulsader ihre Anwendung eher in Großstädten mit einem hohen Verkehrsaufkommen finden. Das Funktionsprinzip eines Pulsaders ist in → Abbildung 8 zu sehen.

1.1.2 Oberleitungsbus

Oberleitungsbusse, auch Trolley-Busse genannt, werden während der Fahrt mit einer Oberleitung verbunden und dadurch mit elektrischer Energie versorgt. Diese Energiezufuhr kann dabei konduktiv durch einen Stromabnehmer oder induktiv durch Ladeplatten mit Spulen erfolgen. Die Klasse der O-Busse lässt sich in konventionelle und hybride O-Busse unterteilen. Eine schematische Darstellung eines Oberleitungsbus ist in → Abbildung 9 dargestellt.

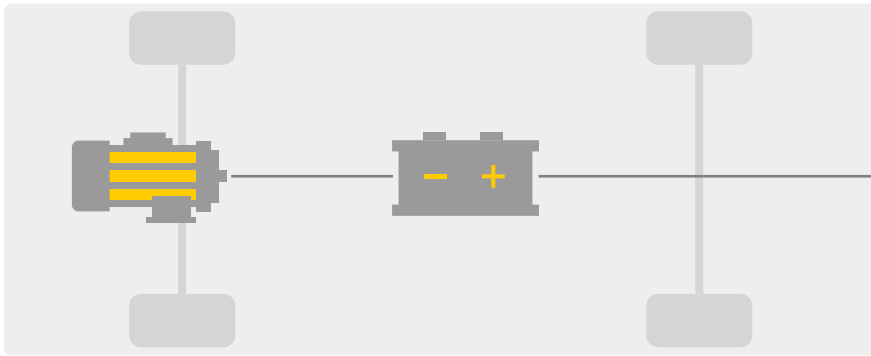


Abbildung 9: Schaubild eines Oberleitungsbusses. Nach [5]

Oberleitungsbus

Ein O-Bus wird auf der gesamten Linie durch eine Oberleitung mit Energie versorgt. Kurze Strecken, wie der Weg zum Betriebshof, können dabei mit einer geringeren Leistung durch eine kleine Batterie überbrückt werden. Diese Technologie findet schon lange Anwendung und ist erprobt. Sie ermöglicht einen lokal emissionsfreien Fahrbetrieb mit geringen Betriebskosten und langen Nutzungszeiten für Fahrzeuge und Infrastruktur. Allerdings führten die hohen Investitionskosten in die nötige Infrastruktur, die Integration in das Stadtbild und die hohen Fahrzeugkosten bisher zu einer geringen Marktdurchdringung. Der Einsatz dieser Technologie ist nur dort wirtschaftlich, wo die errichtete Infrastruktur von vielen Fahrzeugen genutzt werden kann.

Hybrid-Oberleitungsbus

Die Hybrid-O-Busse besitzen im Vergleich zu den konventionellen O-Bussen leistungsfähige Hochvoltbatterien. Dadurch können selbst größere Strecken ohne Anschluss an die Oberleitung und ohne Einbußen der Geschwindigkeit befahren werden.

Sie eignen sich besonders zur Erweiterung von bestehenden Oberleitungslinien, an denen die Erweiterung der Infrastruktur nicht möglich oder wirtschaftlich ist. Maßgeblich zur Auswahl der Fahrzeuge ist hier das Verhältnis der Zeiten von Fahrt mit Oberleitungsanbindung zur Gesamtzeit. Die Fahrzeit unter der Oberleitung sollte mindestens 40–50 % der Gesamtfahrzeit betragen. [3] Die Infrastruktur sollte vor allem dort ausgebaut werden, wo sich Endhaltestellen mit langen Wendezeiten oder Streckenabschnitte mit großem Energiebedarf, wie bspw. lange Steigungen, befinden. Durch die geringere Ausdehnung des Oberleitungsnetzes sind die Kosten für die Infrastruktur niedriger als für den konventionellen Oberleitungsbusbetrieb.

Durch die größere Reichweite kann die Nachladung der Busse auch im Stand an stationären Lademasten durchgeführt werden. Hier eignen sich als Aufstellorte der Ladeinfrastruktur ähnlich wie bei einem Gelegenheitslader Endhaltestellen und Wendepunkte mit längeren Aufenthaltszeiten.

Notizen zu Kapitel 1.1 Fahrzeugauswahl	Erledigt

1.2 Energiemanagement

Für einen reibungslosen Betriebsablauf ist es notwendig, sich im Voraus mit der Energiebereitstellung und auch dem Energiemanagement zu beschäftigen. Für eine Energieanalyse ist es zunächst sinnvoll, eine Gesamtenergiebedarfs-ermittlung durchzuführen, die sowohl die fahrzeugseitigen Verbräuche als auch den Bedarf der Nebenverbraucher miteinbezieht und den Einfluss anderer Parameter aufzeigt. Mit diesem ermittelten Wert und der einkalkulierten Wirkungsgradkette⁶ kann schließlich die Größenordnung des Netzanschlusses definiert werden. Mögliche Einspar- und Optimierungspotenziale des Energiemanagements bieten sowohl die Auswahl der Ladeplanung als auch verschiedene Umlauf- und Lastmanagementoptimierungen.

1.2.1 Gesamtenergiebedarfsermittlung

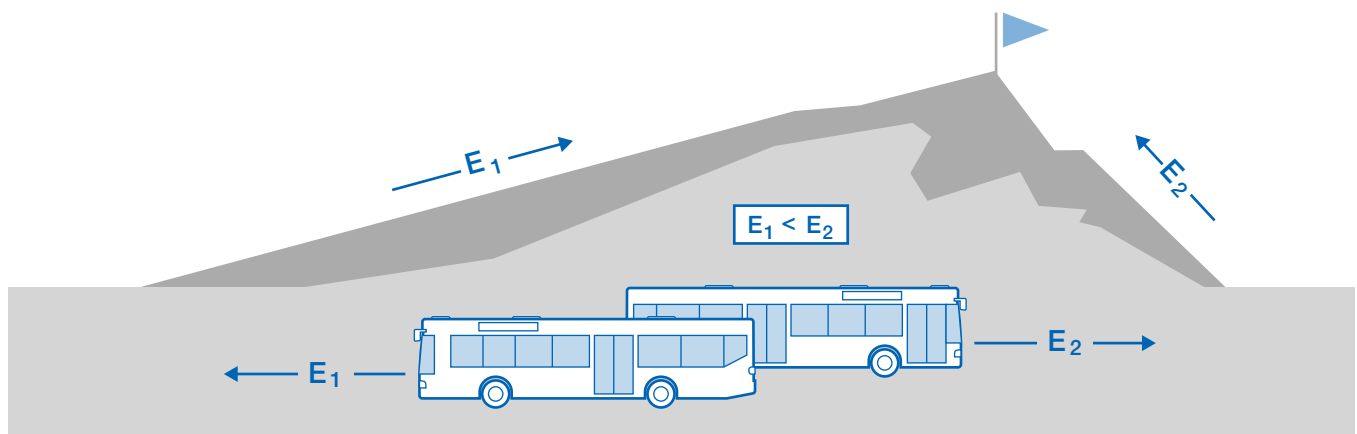
Der Gesamtenergiebedarf eines E-Busses ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Wie auch bei konventionell angetriebenen Fahrzeugen spielen hier die „klassischen“ Faktoren wie Umlauflänge und Fahrweise eine Rolle. Darüber hinaus sollten in einer Betrachtung mindestens die folgenden Parameter inkludiert sein:

- Fahrzeuggröße
- Beladung/Passagierauslastung
- Fahrcharakteristik (u. a. Reisegeschwindigkeit)
- Topografie
- Absenkung an Haltestellen
- Wetterbedingungen (Heizungs- und Klimatisierungskonzept)

Die klassischen Faktoren können sich, ebenfalls wie bei den bekannten Dieselmotoren, von Hersteller zu Hersteller unterscheiden. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, sich bei der Fahrzeugauswahl mit den verschiedenen Lieferanten für Elektrobusse auseinander zu setzen und deren Fahrzeugmodelle genau miteinander zu vergleichen. Hilfreich für eine solche Bewertung ist die vorherige Definition des genauen Anwendungsfalls durch Ermittlung der Daten zu Umlauflänge, durchschnittlicher Beladung und Reisegeschwindigkeit. Zur Eingrenzung der Topografie ist kein genaues Höhenprofil nötig.

Verbraucht ein E-Bus sehr viel Energie auf langen Steigungsstrecken, so kann durch eine Umkehrung der Fahrtstrecke durch das nötige Bremsen und damit **Rekuperieren** möglicherweise so viel Energie zurückgewonnen werden, dass die Gesamtreichweite des Busses deutlich erhöht wird. Zur Verdeutlichung dieser Zusammenhänge ist die Abhängigkeit des Energiebedarfs von der Fahrtstrecke in → Abbildung 10 grafisch dargestellt.

Abbildung 10: Einfluss der Umlaufrichtung auf den Energiebedarf der Busse. Durch eine Anpassung der Strecke kann der Gesamtenergiebedarf verringert werden.



⁶ Siehe hierzu Kapitel 1.2.2 Wirkungsgrad.

Hier kann entweder auf die Neigungsdaten des Landkreises zurückgegriffen werden oder die Höhenunterschiede in hügelig (< 50 m), sehr hügelig (50 – 150 m) oder bergig (> 150 m) eingeteilt werden. Abhängig von der Topografie und der daraus resultierenden Fahrcharakteristik kann es sinnvoll sein, die Richtung einiger Umläufe anzupassen.

Werden Haltestellen angefahren, bei denen ein Absenken des Busses nötig ist (Kneeling), kann dies den Energiebedarf des Busses zum Teil stark erhöhen. Grund hierfür ist der Energiebedarf des Druckluftkompressors, da die Speicherung der Energie in Form eines Druckluftspeichers sehr ineffizient ist. Im Hinblick auf die daraus resultierende Reichweiteneinschränkung gilt es bereits bei der Ausschreibung abzuwägen, ob ein Zwangskneeling an jeder Haltestelle notwendig ist oder ob ein bedarfsgerechtes Kneeling ausreichend ist.

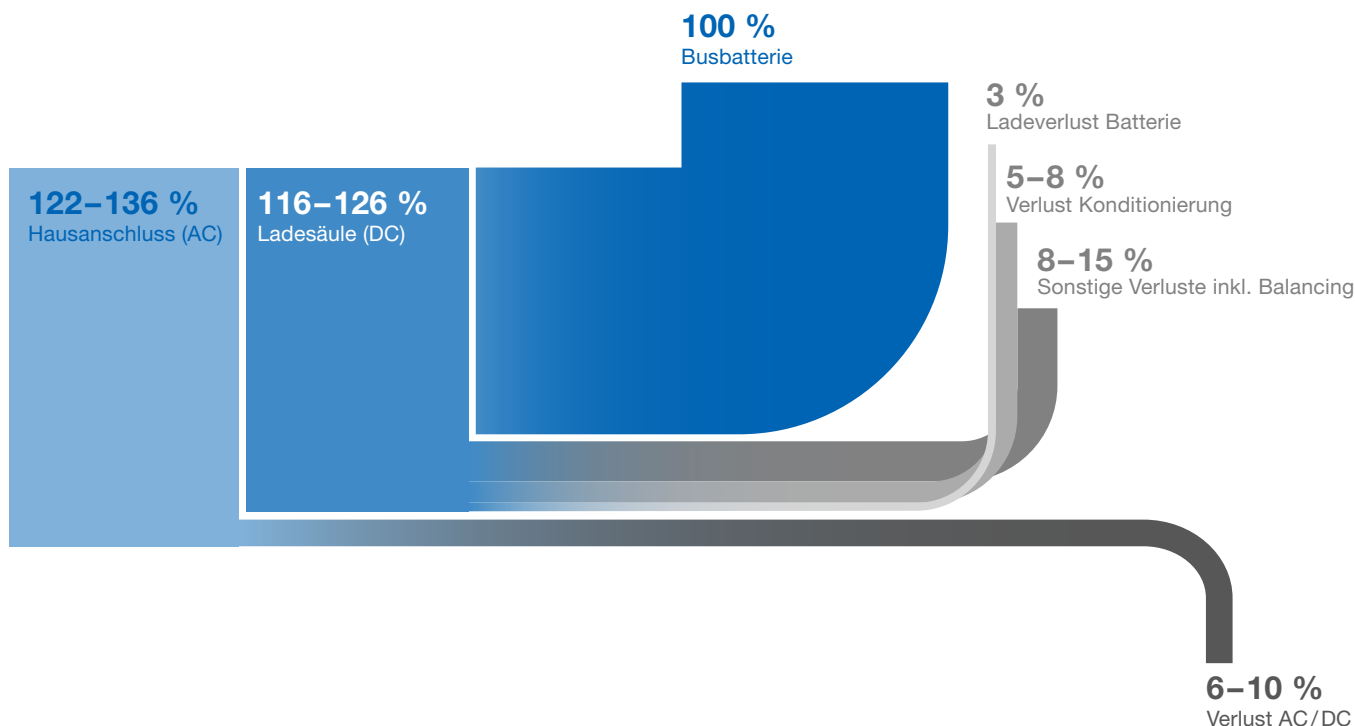
Zur Bestimmung des Energiebedarfs eines Umlaufs sollte maßgeblich ein Tag im Winter mit hoher Verkehrslast angenommen werden. Alternativ kann auch mit kürzeren Einsatz- und verlängerten Standzeiten kalkuliert werden, um eine Nachladung zwischen den Fahrten zu ermöglichen. Grund für die Reichweitenreduktion ist hauptsächlich der Energiebedarf des Heizungs- und Klimatisierungssystems, da nicht wie in Verbrennerfahrzeugen die schon vorhandene Abwärme aus dem Motorraum genutzt werden kann.

Bei der Auslegung der Heizungs- und Klimatisierungskonzepte kann auf verschiedene Systeme zurückgegriffen werden. Die Art der Klimatisierung und Heizung können mitunter eine enorme Auswirkung auf die Reichweite eines Batteriebusses haben und damit stark das Betriebskonzept und dessen Kosten beeinflussen. Als Grundlage für die Auswahl dient die lokale Temperaturverteilung im Fahrgastraum und die Vorgaben zur Innenraumtemperatur in den Linienbussen.

Als Heizungskonzept kann beispielsweise ein rein elektrisches System gewählt werden, das ohne Zusatzgeräte betrieben werden kann und eine insgesamt hohe Energieeffizienz besitzt. Allerdings muss die dafür benötigte Energie aus der Antriebsbatterie des Fahrzeugs bezogen werden, was wiederum die Reichweite einschränkt. Der Mehrbedarf eines elektrisch beheizten 12-Meter-Solobusses liegt abhängig von der Umgebungstemperatur zwischen 20 – 66 % gegenüber dem Jahresdurchschnitt. [6]

Alternativ können zusätzlich eingebaute Geräte die Beheizung des Fahrgastraums übernehmen. Eine Variante ist der Einbau von Wärmepumpen. Bei diesen kann durch den Einsatz mit Kohlenstoffdioxid (CO_2), das als Kältemittel klimaneutral ist, der zusätzliche Energiebedarf durch die Heizung bei sonst gleichen Bedingungen auf etwa 1,3 kWh/km reduziert werden. [6]

Als Kompromiss zu den emissionsarmen Heiztechnologien kann als Übergang der Einsatz einer Brennstoffzusatzheizung, auch Hybridheizung genannt, erwogen werden. Diese Verbrennungsheizungen, die bspw. mit Heizöl oder Ethanol betrieben werden können, ermöglichen den Einsatz der Busse ohne Reichweitenverluste auch an kalten Tagen. Dabei muss allerdings der Wartungsaufwand des zusätzlichen Brennstoffsystems mit einkalkuliert werden. Abhängig von dem Technologiefortschritt der Batterie und den zukünftigen Effizienzsteigerungen kann der Einsatz einer Hybridheizung einen reibungslosen Übergang vom Verbrennerbus zum elektrischen Bus erleichtern.



1.2.2 Wirkungsgrad

Zusätzlich zu den Energiebedarfen der offensichtlichen Verbraucher im Elektrobus ist es nötig, das gesamte Energiesystem zu betrachten. Grund hierfür ist der Verbrauch der Hilfsanlagen. Betrachtet man den kompletten Bedarf vom Netzübergabepunkt, dem Hausanschluss, bis zur in der Batterie ankommenden Energie kann mit Leistungsverlusten im Bereich von ca. 22–36 % gerechnet werden. Diese breite Streuung der Verluste wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Allein die Ladeinfrastruktur hat aufgrund ihres Wirkungsgrads bei der Wandlung von Wechsel- auf Gleichstrom zum Laden der Batterie Effizienzverluste im Bereich von 6–10 %. Zusätzlich wird weitere Energie zum Balancing der Batterien oder dem Vorkonditionieren der Fahrzeuge benötigt. Diesen Mehrbedarf gilt es unbedingt mit in die Energieplanung einzubeziehen, um den Netzanschluss ausreichend zu dimensionieren und eine ausreichende Energieversorgung der Fahrzeuge zu gewährleisten. Eine Übersicht der zu betrachtenden Faktoren und ihr Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf ist in → Abbildung 11 zu sehen.

Abbildung 11: Auswirkungen des Wirkungsgrades auf den Gesamtenergiebedarf am Beispiel einer DC-Ladesäule. Nach [6]

1.2.3 Netzanschluss

Nach Erstellung der Energiebedarfsermittlung inklusive Betrachtung der Wirkungsgrade kann der nötige Netzanschluss ausgewählt werden. Aufgrund des zu erwartenden hohen Energiebedarfs ist es sehr wahrscheinlich, dass der bisherige Hausanschluss nicht ausreichend ist und eine Erhöhung der Anschlussleistung benötigt wird. Hier gilt es zu beachten, dass sich der Strompreis neben dem eigentlichen Verbrauch ebenfalls an der vom Anbieter „reservierten“ Anschlussleistung orientiert. Je nach benötigter Spitzenlast und Stromtarif können sich für das Überschreiten eines festgelegten Wertes die Preise automatisch anpassen, was sich wiederum negativ auf die zuvor erstellte wirtschaftliche Kalkulation auswirkt.

Aufgrund der erhöhten Anschlussleistung ist meist ein Anschluss des Betriebshofes über Transformatoren an das Mittelspannungsnetz (meist 10 oder 20 kV) notwendig. Daher ist es sinnvoll, frühzeitig den Netzbetreiber in die Planungen miteinzubeziehen. Dieser besitzt, falls das Netz bereits an seiner Kapazitätsgrenze ist, das Recht, den Antrag wegen Ertüchtigungen am Netz zurückzustellen.

Abhängig vom Netzausbau ist der Mittelspannungsanschluss mit zusätzlichen Kosten für die Erdarbeiten zur Verlegung des Kabels verbunden. Darüber hinaus kann der Netzbetreiber eine Kostenbeteiligung zur sicheren Stromlieferung aufgrund des erhöhten Leistungsbedarfs in Form eines Baukostenzuschusses erheben. Es ist notwendig, einen Mittelspannungstransformator zu errichten, der neben den Kosten mit langen Lieferzeiten verbunden ist. Für diesen sind ggf. weitere bauliche Maßnahmen am Betriebshof notwendig, um den regulatorischen Ansprüchen bspw. an den Hochwasserschutz zu genügen. Bei der Dimensionierung des Transformators sollte außerdem eine mögliche Erweiterung der Ladeinfrastruktur und der damit verbundene Energiemehrbedarf einkalkuliert werden, um die Zukunftsfähigkeit der Investition zu sichern. Allerdings sollte der Transformator auch nicht zu groß gewählt werden, da dadurch ebenfalls die Standby-Leistungsaufnahme steigt und damit die verbundenen Stromkosten.

1.2.4 Energiebedarf

Das Ladekonzept ist abhängig von den gewählten Fahrzeugen und somit vom Betriebskonzept. Daher muss das Ladekonzept entsprechend der benötigten Ladeleistungen der Fahrzeuge ausgelegt werden. Abhängig davon, ob Depot- oder Gelegenheitslader verwendet werden, müssen Anpassungen im Ladekonzept erfolgen.

Bei Depotladern ist die Batterie generell größer ausgelegt, um die nötige Reichweite zu gewährleisten. Da jeder Depotlader über Nacht für den nächsten Einsatztag geladen werden muss, wird in diesem Fall für jeden Bus mindestens ein Ladepunkt benötigt. In Betriebspausen ist meist ausreichend Zeit für einen langsamen Ladevorgang. Dies ermöglicht die Nutzung einer LIS mit geringeren Leistungen. Üblicherweise wird hierfür das Laden über Wechselstrom (AC-Laden) angewendet. Dieses langsame Laden mit geringer Leistung hat darüber hinaus einen positiven Einfluss auf die Lebensdauer der Batterie, da sie beim Ladevorgang nicht so stark beansprucht wird. Es ist jedoch beim gleichzeitigen Anschluss mehrerer leerer Busse an die LIS zu beachten, dass zu Beginn des Ladevorgangs die Leistungsaufnahme aus dem Netz hoch sein kann. Diese Leistungsspitze kann durch die Nutzung eines Lastmanagementsystems vermieden werden.⁷

Bei Gelegenheitsladern ist es im Gegensatz zu den Depotladern nicht zwingend notwendig, für jeden Bus einen Ladepunkt zu installieren, da durch eine bedarfsgerechte Umlauf- und Ladeplanung die Verfügbarkeit der Ladepunkte berücksichtigt werden kann. Allerdings wird bei Gelegenheitsladern eine leistungsstärkere LIS benötigt, da aufgrund der kurzen Ladezeiten sehr schnell eine große Menge an Energie vom Netz in die Fahrzeuge transportiert werden muss. Dabei wird als Ladeart das Gleichstrom-Laden (DC-Laden) angewendet, welches schnellere Energieübertragung bzw. Ladeströme ermöglicht. Auch bei der LIS für Gelegenheitslader ist die maximale Ladeleistung zu betrachten und in die jeweilige Netzanschlussplanung miteinzubeziehen.

⁷ Siehe hierzu Kapitel 1.2.5 Ladeoptimierung

1.2.5 Ladeoptimierung

Wurde der Gesamtenergiebedarf ermittelt, lässt sich das Lademanagement über verschiedene Möglichkeiten optimieren. Nachfolgend sind die verschiedenen IT-Systeme aufgeführt, durch die eine geringere Auslegung des Netzanschlusses möglich ist. Die Verwendung solcher Softwaresysteme bietet für den Anwender verschiedene Vorteile. Durch intelligentes Lademanagement in Kombination mit einem flexiblen Strompreistarif kann die Wirtschaftlichkeit verbessert werden. Die Monitoring-Systeme ermöglichen eine Echtzeitüberwachung, wodurch z. B. eine frühzeitige Fehlererkennung stattfinden kann. Sie ermöglichen im Falle einer Störung den Zugriff von Spezialisten auf die Daten über Fernwartung. Intelligente Systeme unterstützen den Betreiber darüber hinaus bei der Betriebsplanung durch Simulationsmöglichkeiten oder die Ableitung von Kennzahlen und Nutzungsprofilen zur Optimierung des Energieverbrauchs oder der Umweltbilanz.

Lademanagement

Um alle Fahrzeuge gleichzeitig mit Energie zu beliefern, wird theoretisch eine hohe Leistung am Betriebshof benötigt. Allerdings ist dieses parallele Laden nur selten nötig und bei langen Standzeiten lassen sich die Ladevorgänge in Zeitbereiche mit geringer Belastung verschieben. Dies lässt sich durch ein Lademanagement umsetzen, da es in Echtzeit die entstehenden Lasten ermittelt und die verfügbare Leistung optimal auf die angeschlossenen Fahrzeuge verteilt. Eine Priorisierung einzelner Ladepunkte ist dabei jederzeit möglich, sodass dringend benötigte Fahrzeuge rechtzeitig bis zur Abfahrt vollgeladen werden können. Der Einsatz eines Lademanagements ermöglicht die Steuerung der individuellen Ladeleistung und den Zeitpunkt der Ladevorgänge der einzelnen Busse.

Darüber hinaus ist der Einsatz eines solchen IT-gestützten Lademanagements besonders beim Einsatz einer größeren Zahl von Batteriebusen empfehlenswert, um die simultanen Ladevorgänge zu verringern und dadurch Lastspitzen und folglich auch die Netzentgelte zu minimieren. Somit bietet die Nutzung eines solchen Systems nicht nur Einsparpotenzial beim Netzausbau, sondern auch bei den laufenden Kosten im Betrieb. Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) empfiehlt daher die Nutzung eines Lastmanagements schon ab einer Flottengröße von drei Fahrzeugen. [7]

Diese Lastmanagementsysteme sind in verschiedenen Ausführungen am Markt zu erhalten. Beim einfachen und günstigen Master-Slave-System steuert eine Master-Ladestation die übrigen Slave-Ladepunkte und verteilt die verfügbare Leistung an die angeschlossenen Fahrzeuge. Nachteil dieses Systems ist die Bindung an einen Ladestationstyp und die schwierige Skalierbarkeit. Darüber hinaus ist dieses System störungsanfälliger, da bei Ausfall des Masters alle verbundenen Slave-Module ebenfalls betroffen sind. Als Alternative gibt es offene Systeme mit standardisierten Schnittstellen zu AC- und DC-Ladestationen. Dadurch wird die Abhängigkeit von einem Hersteller vermieden und die Anbindung zusätzlicher Ladepunkte oder andere Funktionalitäten wie Abrechnungen oder netzdienliches Laden durch eine Verknüpfung an Fremdsysteme ermöglicht. Der grundsätzliche Aufbau eines Lastmanagementsystems ist in → Abbildung 12 dargestellt.

Lademanagementsysteme können in statische oder dynamische Lastmanagementsysteme unterteilt werden. Bei einem statischen Lademanagementsystem wird die maximal zum Laden verfügbare Leistung auf einen bestimmten Wert festgesetzt. Dieser Wert dient als Strombegrenzer. Die zur Verfügung stehende Ladeleistung wird über die angeschlossenen Fahrzeuge verteilt. Durch die Aufteilung der Leistung verlängert sich die Ladedauer der Fahrzeuge.

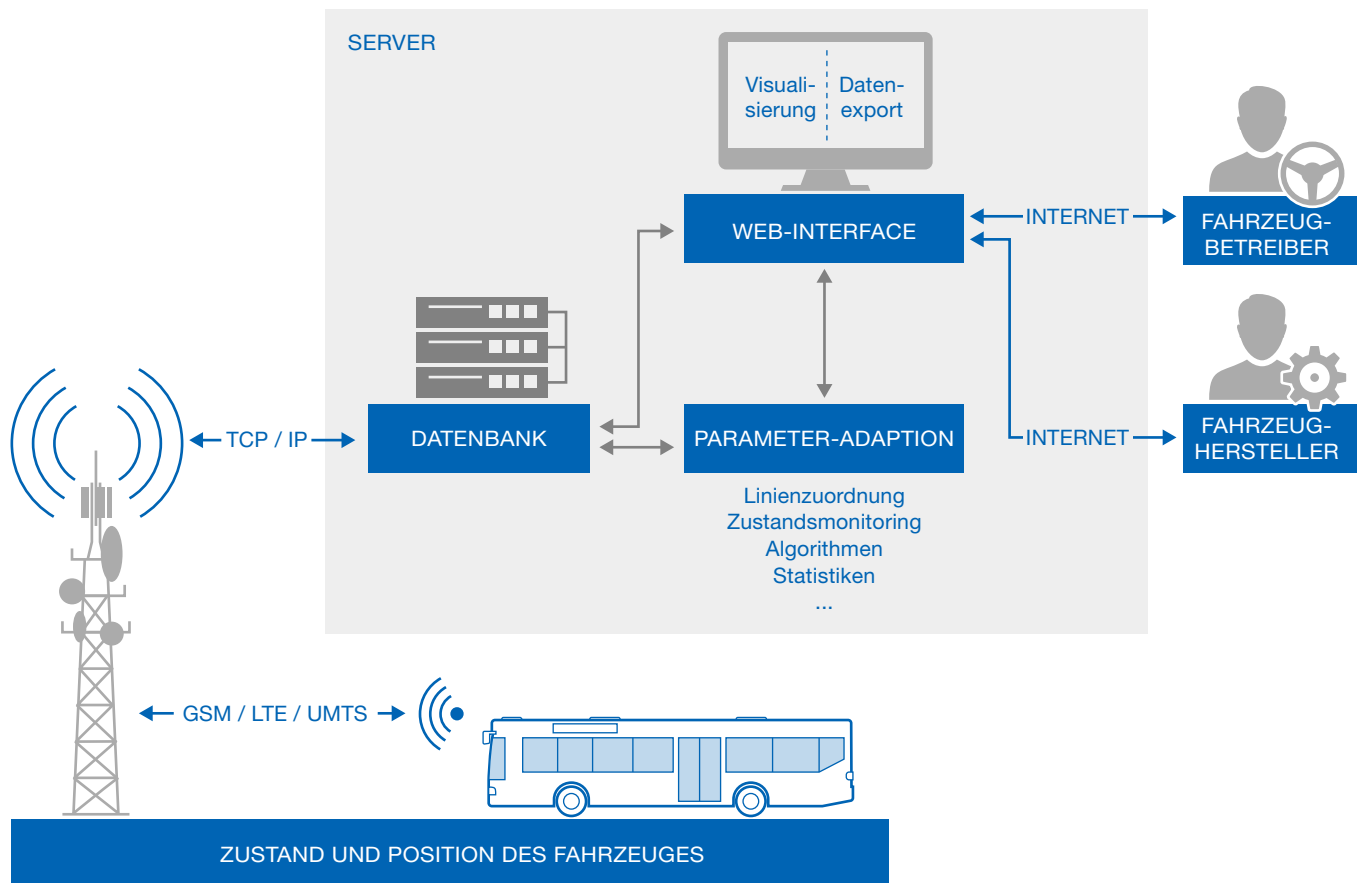


Abbildung 12: Grundsätzlicher Aufbau eines Lastmanagementsystem. Nach [6]

Ein dynamisches Lastmanagement hingegen erlaubt eine Verringerung der Maximallast bei gleichzeitiger Gewährleistung der Flottenverfügbarkeit. Die Busse können durch ein solches Managementsystem passende Strecken zugewiesen bekommen, um anderen Bussen genug Ladezeiten zu ermöglichen. Auch Priorisierungen der einzelnen Fahrzeuge sind möglich, sodass beim Anschluss eines Busses dieser mit voller Leistung geladen wird und die restlichen Busse runtergeregelt werden.

Zusätzlich zu den Verbrauchern wie der LIS und der Gebäudelast können über das dynamische Lastmanagementsystem lokale Erzeuger wie Photovoltaikanlagen oder stationäre Batteriespeicher mit in der Energiekalkulation berücksichtigt werden. Dies ermöglicht ein zusätzliches Reduktionspotenzial der auftretenden Lastspitzen sowie ein strompreisoptimiertes Ladeverhalten bei nächtlichen Tarifvergünstigungen.

Dispositionsoftware

Eine Dispositionsoftware ermöglicht eine softwaregestützte Fahrzeug- und Fahrereinteilung und bietet die zentrale Verwaltung der Fahrdaten. Eine solche Software kann dem Busunternehmen bei vorgegebenen Linien und Fahrtstrecken unter Berücksichtigung verschiedener technischer Randbedingungen wie Ladephasen und verbleibenden Reichweiten die Planung des Betriebes erleichtern. Auch können durch solche Programme Effizienzdaten gesammelt werden und die Umläufe optimiert werden. Auf Basis dieser Daten können außerdem strategische Entscheidungen getroffen werden und Kalkulationen für zukünftige Ausschreibungen individuell erstellt werden.

Die Verwendung einer Dispositionsoftware unterstützt den Disponenten bei der Fahrzeugauswahl durch eine intelligente Streckenplanung in Abhängigkeit des aktuellen SoC der verschiedenen Fahrzeuge. Reicht die Reichweite eines Busses, beispielsweise an einem sehr kalten Wintertag, nicht mehr

für die zuvor geplante Umlaufstrecke, so schlägt das System automatisch einen Bus mit höherer Reichweite vor und lässt den Bus mit geringer Reichweite entweder auf einer anderen Strecke einsetzen oder ruft ihn zum Betriebshof für eine Nachladung zurück.

Des Weiteren ermöglicht und steuert die Dispositionssoftware das Vorkonditionieren der Fahrzeuge mit einem elektrischen Heizungskonzept vor Arbeitsbeginn und noch während das Fahrzeug an der LIS angeschlossen ist, was einen direkten Einsatz ohne Reichweiteneinbußen ermöglicht.

Über das System kann gleichzeitig eine Nutzerverwaltung durchgeführt werden, die es ermöglicht, das Ladeverhalten und damit den Energieverbrauch der Strecke bzw. dem Fahrer zuzuschreiben. Diese Zuweisung erfolgt im Allgemeinen über Ladekarten oder RFID-Chips, mit denen der Fahrer sich beim Anschluss des Fahrzeugs an die LIS authentifizieren muss.

Für solche Systeme ist die Integration als Betriebshofmanagementsystem (BHMS) sinnvoll. Die genauen Anforderungen an ein BHMS und die zugehörigen Schnittstellen sind in der Schrift 463 des Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) zu finden. [8]

Notizen zu Kapitel 1.2 Energiemanagement	Erledigt

1.3 Aufbau des Betriebshofs

Der Aufbau des Betriebshofs sollte die Sicherung des Zutritts von unbefugten Personen gewährleisten. Darüber hinaus sind die Bauvorschriften der örtlichen Behörden zu beachten. Durch die Verwendung eines elektrischen Antriebskonzeptes kann auch die Aufteilung des Betriebshofs beeinflusst werden. Grund hierfür ist hauptsächlich der Platzbedarf der Ladeinfrastruktur und der dazugehörigen Komponenten. Bei der Planung und Auswahl des Standortes der LIS sollten die Lage der Komponenten und der Verkehrswege, die Zugänglichkeit sowohl für die Fahrzeuge als auch für den Service, die Anschlussbedingungen der Stromversorgung und die Erweiterbarkeit miteinbezogen werden. Je nach Montageort muss bei der Auswahl der LIS die vorgeschriebene Schutzklasse (z. B. IP54 bei Aufstellung im Freien) beachtet werden. Befindet sich der Betriebshof innerhalb eines Wasserschutzbereiches, so ist die Wasserschutzbehörde aufgrund möglicher Versiegelungen zu kontaktieren.

Insgesamt ist ein Mehrbedarf an Fläche wahrscheinlich. Dieser ist auf die ggf. höhere Anzahl der Fahrzeuge, Ladeinfrastruktur und dadurch nötigen Anpassung der Verkehrswege zurückzuführen. Außerdem gilt es zu beachten, dass es durch die umfassenden Bauarbeiten auf dem Betriebshof zu Störungen im Betriebsablauf kommen kann.

1.3.1 Ladeinfrastruktur

Die Auswahl eines geeigneten Systems ist von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig:

- Technische Realisierbarkeit
- Energiebedarf
- Energieeffizienz
- Verfügbarer Platz
- Kosten
- Verfügbarkeit der Komponenten

Diese Faktoren beeinflussen die Art, die Positionierung sowie die Montage der LIS. Werden beispielsweise freistehende Ladestationen gewählt, ist es sinnvoll, sie mit einem Anfahrschutz zu versehen, um Schäden zu verhindern. Wird die LIS im Außenbereich verwendet, kann ein zusätzlicher Witterungsschutz sinnvoll sein.

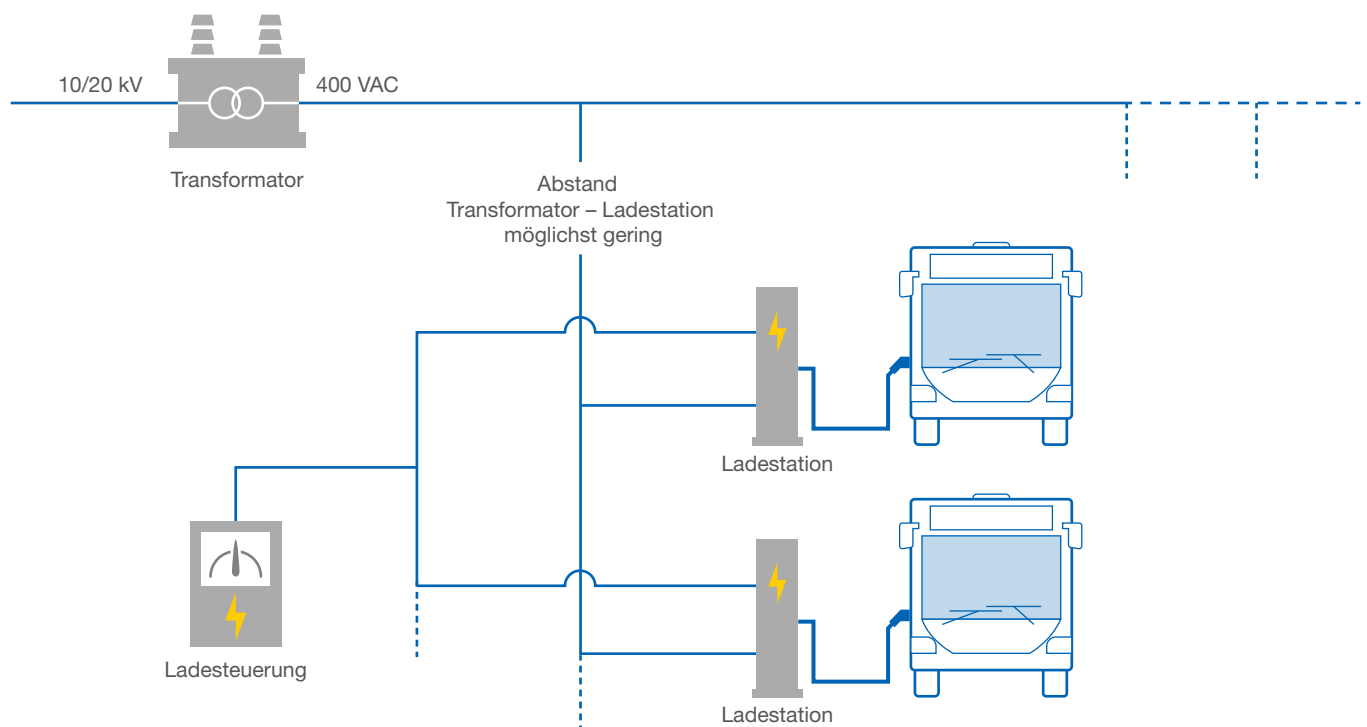
Des Weiteren ist die in Deutschland gültige Anzeige- bzw. Genehmigungspflicht für die Inbetriebnahme der Ladeinfrastruktur zu beachten.

Aufbau

Unter der Ladeinfrastruktur können alle Komponenten zusammengefasst werden, die an der Energiezuführung beteiligt sind. Sie beginnt am Netzübergabepunkt mit dem Mittelspannungstransformator und läuft über die Kabelzuführungen und Schaltschränke zu den verschiedenen Ladepunkten. Der konkrete Aufbau ist stark von den örtlichen Gegebenheiten abhängig und bietet viele Anpassungsmöglichkeiten, um den benötigten Anforderungen zu entsprechen.

→ Abbildung 13 zeigt schematisch den Aufbau der Ladeinfrastruktur vom Netzanschluss bis zu den Ladegeräten.

Abbildung 13: Aufbau der Ladeinfrastruktur am Betriebshof. Nach [4]



Im Allgemeinen gilt es für die Integration von Ladegeräten und Transformatoren die besonderen Anforderungen der Komponenten zu beachten, wie den Brandschutz oder die Klimatisierung. Es ist daher sinnvoll, das Abstell- und Ladekonzept der Busse vor der Umsetzung mit der Sachversicherung, dem Brandschutzbeauftragten und der Feuerwehr abzustimmen.

Der Aufbau der LIS muss gemäß geltender Normen und Betriebsanweisungen des Herstellers durch fachkundiges Personal erfolgen, um die Sicherheit der Angestellten im Betrieb zu gewährleisten. Dazu sollte jeder Ladepunkt über eine geeignet dimensionierte und separat abgesicherte Stromversorgung angeschlossen werden. Sollte ein System mit im Erdboden verlegten Leerrohren gewählt werden ist es sinnvoll, diese großzügig zu dimensionieren, um künftige Erweiterungen ohne größeren Aufwand zu ermöglichen.

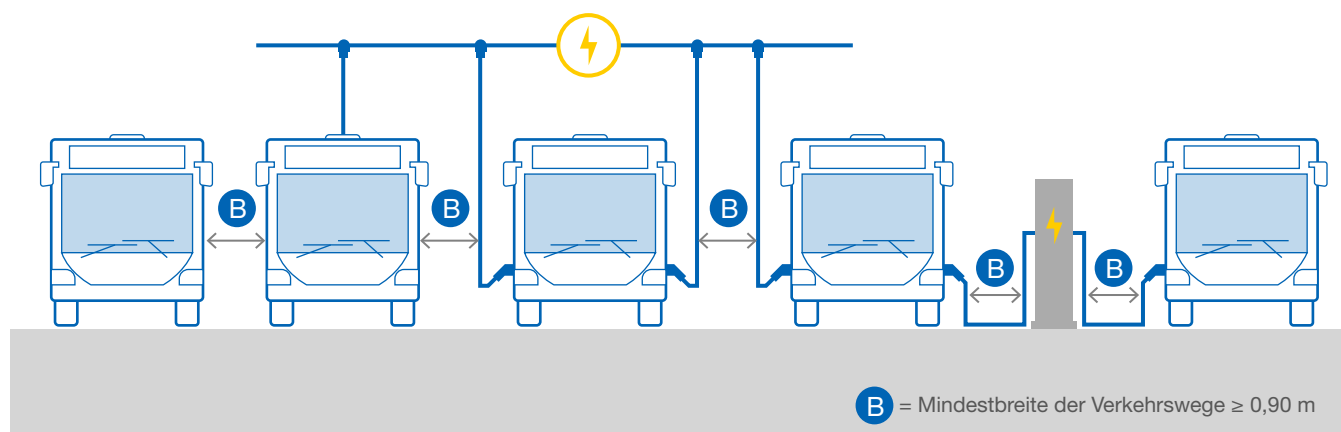
Der Mittelspannungstransformator sollte auf der Energiebedarfsermittlung basieren. Daraus ergibt sich die benötigte Leistungsklasse. Für die Positionierung des Transformators müssen die Vorgaben des Netzbetreibers und andere Aufstellvorgaben beachtet werden. Über den kompletten Strompfad, vom Transformator über die Schaltschränke bis zum Ladepunkt, sollte darauf geachtet werden, die Abstände und somit die Leitungswege zu minimieren, um die elektrischen Leitungsverluste gering zu halten.

Abhängig von der verfügbaren Fläche am Betriebshof kann die LIS entweder zentralisiert oder dezentralisiert aufgebaut werden. Bei einer dezentralen LIS hat jeder Parkplatz eine eigene Ladesäule, die separat an das Gebäudenetz angeschlossen wird. Bei zentralisierten Ladesystemen befinden sich alle elektrischen Komponenten in einem zentralen Schaltschrank, der die E-Busse mit Energie versorgt und das Laden von dort steuert.

Die Ladeinfrastruktur kann in verschiedenen Konfigurationen auf dem Betriebshof errichtet werden. Der Aufbau erfolgt hier je nach Raumverfügbarkeit entweder vertikal oder horizontal. Bei der vertikalen Konfiguration wird die Ladeinfrastruktur platzsparend oberhalb der Busse verbaut. Hierfür wird auf dem Betriebshof oder in der Halle eine zusätzliche Ebene eingezogen und die LIS darauf errichtet. Allerdings ist hierbei aufgrund des hohen baulichen Aufwands mit hohen Kosten zu rechnen. Günstiger hingegen ist die horizontale Konfiguration, bei der die LIS auf einer Ebene mit den E-Bussen errichtet wird. Dadurch ist diese Konfiguration modular und leicht erweiterbar.

Allerdings kann hier eine Anpassung der Abstellordnung wie in → Abbildung 14 notwendig sein, um den geforderten Abstandsrichtlinien zu entsprechen. Besonders zu beachten ist die Mindestbreite der Verkehrswege von 0,9 m nach ASR A1.8. [9] Abhängig von der Positionierung der Ladebuchse

Abbildung 14: Anpassungen der Abstellordnung durch den Platzbedarf der Ladeinfrastruktur. Nach [1]



im Fahrzeug muss hier eine Anpassung der Abstellplätze erfolgen, da die Steckverbindung in den eigentlichen Verkehrsweg ragen kann. Zur Sicherstellung der Flucht- und Rettungswege dürfen diese nicht durch die LIS und ihre Stecker blockiert werden. Darüber hinaus sollten die Wege freigehalten werden, um dem Personal einen Durchgang zu ermöglichen.

Es ist sinnvoll, pro E-Bus einen Ladepunkt am Betriebshof vorzusehen, da eine bedarfsgerechte Ladeplanung mitunter mit hohem Aufwand verbunden und darüber hinaus durch Störungen oder Verspätungen anfällig ist. Für diese Ladepunkte sind Ladesäulen mit Ladeleistungen von entweder 30, 50 oder 75 kW gängig. Zusätzlich ermöglicht diese Anzahl an Ladepunkten die schonende Nachladung der Batterie von Gelegenheitsladern über Nacht, die sonst nur tagsüber auf der Strecke nachgeladen werden.

Um das Nachladen zwischen den Umläufen oder in kürzeren Pausen zu ermöglichen ist es zudem sinnvoll, zusätzliche Ladepunkte mit einer erhöhten Ladeleistung von > 150 kW zur Schnellladung am Betriebshof einzuplanen. Zur Erhöhung der Betriebssicherheit kann es des Weiteren noch zielführend sein, eine weitere, mobile Ladestation einzuplanen, die flexibel bspw. für die Werkstatt eingesetzt werden kann.

Kontaktierungssysteme

Die Verbindung des E-Busses mit der Ladeinfrastruktur kann über verschiedene Kontaktierungssysteme erfolgen. Dabei kann die Energieübertragung entweder automatisiert mit einem Stromabnehmer (Pantograph) oder stationär konduktiv oder induktiv erfolgen, wobei sich die **induktive Ladetechnik** momentan noch in der Entwicklung befindet und die konduktive Variante mit Kabel und Stecker den Markt dominiert.

Das konduktive Kontaktierungssystem besteht aus einer Steckverbindung mit einer im Fahrzeug verbauten Buchse, auch Inlet genannt, und einem an die LIS angeschlossenen Stecker.⁸ Der in Europa marktübliche Standard für DC-Laden ist das in → Abbildung 15 dargestellte Combined Charging System (CCS). Mit diesem Ladesystem sind Leistungen bis zu 350 kW möglich. Bei hohen Leistungen ist eine Kühlung der Kabel z. B. durch die Ladesäule notwendig.

Die Zuführung des Steckers mitsamt Kabel kann je nach Aufbaukonfiguration manuell, ähnlich wie bei einer Zapfsäule, erfolgen oder über eine hängende Zuführung mit (mechanischen oder elektrischen) Abrollern zum Bus geführt werden. Durch die Abroller wird gleichzeitig das Überfahren der Kabel beim Parkvorgang verhindert.

Bei den Ladesäulen mit Kabel und Stecker sollte darauf geachtet werden, dass die Kabellänge von der Ladesäule zum Bus möglichst klein gehalten wird, um den Leitungsverlusten vorzubeugen. Darüber ist es sinnvoll, die Beleuchtung vor Ort ggf. an die Handlungsräume anzupassen, um eine schnellere Kontaktierung zu ermöglichen und das Handling des Steckers zu erleichtern. Um Zeitverluste beim Laden durch ein Umparken des Busses zu vermeiden, können Positionierungshilfen dem Fahrer eine Hilfe sein. Hierfür können entweder Einfahrmulden oder Markierungen verwendet werden.

Automatisierte Kontaktsysteme ermöglichen die Verbindung des Busses zur LIS entweder vollautomatisch oder durch Bestätigen über einen Taster. Die meisten automatisierten Kontaktsysteme stellen die Verbindung über einen auf dem Fahrzeugdach montierten Pantografen zu einem Masten her.



Abbildung 15: Aufbau des CCS-Steckers.
Nach [2]

Durch **induktives Laden** können Fahrzeuge entweder stationär oder während der Fahrt kabellos nachgeladen werden. Dazu werden Induktionsspulen unter dem Fahrzeug positioniert, die über ein Magnetfeld die Energie zu den Empfängerspulen im Unterboden des Busses transportieren. Vorteil dieser Ladevariante ist die einfache Handhabung, da die Übertragung über einen Sender im Bus gestartet wird und voll automatisierbar ist. Nachteil des induktiven Ladens sind die zusätzlichen Kosten für den Einbau der Spulen in das Fahrzeug und der im Vergleich zum konduktiven Laden niedrige Wirkungsgrad. Diese Technologie hat den Massenmarkt noch nicht erreicht und wird meist nur auf Teststrecken verbaut.

⁸ Fachlich gesehen handelt es sich bei dem Stecker eigentlich um eine elektrische Kupplung, da er sich an der spannungsführenden Seite des Kabels befindet und daher keine offenen Kontakte besitzt.

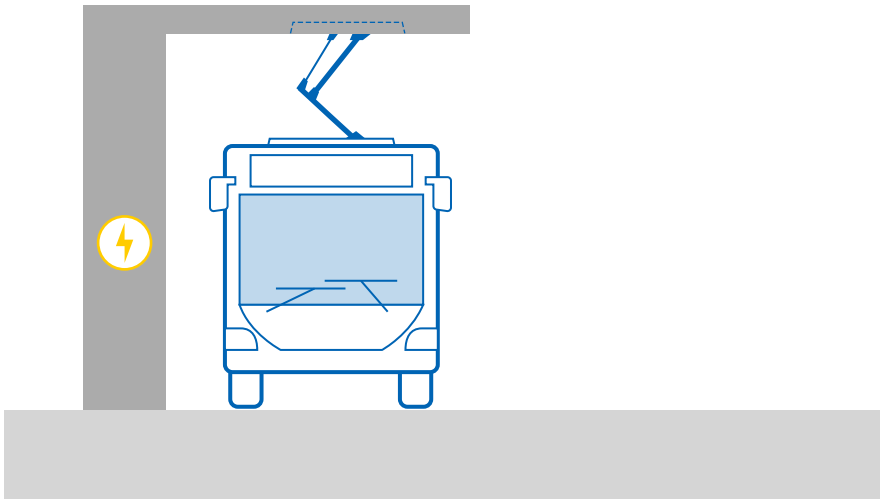


Abbildung 16: Schaubild Panthographenladung

Dieses System eignet sich wie bei einem O-Bus zur schnellen Übertragung hoher Ladeleistungen bis zu einem Megawatt, kann aber auch für kleinere Energiemengen genutzt werden. Bei diesem System sind allerdings höhere Kosten für den baulichen Aufwand des Kontaktierungssystems zu erwarten und die verfügbare Einbauhöhe sowie das zusätzliche Gewicht des Pantographen zu beachten. Der schematische Aufbau eines solchen Pantographensystems ist in → Abbildung 16 zu sehen.

Kommunikation

Durch die Auswahl von Produkten mit flexibel nutzbaren, offenen Schnittstellen kann die Einbindung in das Betriebshofmanagement erleichtert und die Investition auch langfristig zukunftsfähig sein. Dies ermöglicht die Einrichtung von bestimmten Nutzergruppen der LIS z. B. über eine RFID-Schnittstelle. Darüber hinaus ermöglicht die Verwendung herstellerunabhängiger Kommunikationsstandards wie Open Charge Point Protocol (OCPP) die Steuerung der Ladevorgänge durch ein Lastmanagementsystem und erleichtert sowohl das Systemmonitoring als auch die Fehlersuche. Die ISO 15118 beschreibt hierbei die Anforderungen an eine Kommunikationsschnittstelle zur Anwendung zwischen Fahrzeug und Ladestation. [10] Um auf die Daten zuzugreifen, muss jede Ladestation in die Netzwerkstruktur im Betriebshof angeschlossen sein. Mögliche Kommunikationsschnittstellen zeigt → Tabelle 1.

Kommunikationsschnittstellen	
Glasfaser (Fibre Optic)	Hohe Stabilität und Sicherheit
LAN (RJ45)	Gute Stabilität und Sicherheit
WiFi	Leichter Ausbau und Erweiterbarkeit
	Kurze Verbindungsunterbrechungen möglich
Mobile Provider	Störanfällige Verbindung
	Abhängig vom Provider

Tabelle 1: Kommunikationsschnittstellen für die Einbindung von Ladestationen

Bei der Auswahl der Kommunikationsschnittstelle gilt es, die örtlichen Gegebenheiten zu betrachten und daraus die Anforderungen an Verlegung, Schirmung und Datensicherheit abzuleiten.

1.3.2 Werkstatt

Abhängig von der geplanten Instandhaltungstiefe der Fahrzeuge sind aufgrund der elektrischen Antriebe verschiedene Anpassungen im Werkstattbetrieb notwendig. Dabei müssen alle Vorgaben der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) bezüglich der Fahrzeug-Instandhaltung (DGUV 109-009) unter Einhaltung der gesetzlich vorgeschriebenen Arbeitsstättenrichtlinie und den Unfallverhütungsvorschriften umgesetzt werden. [11] Für eine reibungslose Umstellung ist es sinnvoll, zunächst den Ist-Zustand festzustellen, um das Fachwissen und die Qualifikationen der Mitarbeiter einordnen zu können. Nach der Definition des künftigen Status und des Instandhaltungsumfangs der Werkstatt ist eine rechtssichere Pflichtenübertragung der entsprechenden Aufgaben, wie die Verantwortung für den HV-Bereich, notwendig. Beim Errichten und Betreiben elektrischer Prüfanlagen gilt es die DIN EN 50191 (VDE 0104) [12] und die DGUV-Information 203-034 [13] zu beachten.

Für die Instandhaltung der Energiespeicher sind verschiedene Bedingungen einzuhalten. Dabei müssen die Anforderungen des Batterieherstellers zu folgenden Punkten eingehalten und in die Betriebs- und Arbeitsanweisungen eingearbeitet werden:

- Einbau der Speicher
- Ausbau der Speicher
- Nutzung von Spezialwerkzeug
- Wartungsintervalle
- Lagerung und Transport
- Entsorgung
- Umgang im Havariefall

Ebenfalls muss die Ausstattung der Werkstatt für die Fahrzeuge mit elektrischen Antrieben angepasst werden. Dazu zählen unter anderem:

- Isolierte HV-Werkzeuge zum Arbeiten unter Spannung
- Zweipoliger Spannungsprüfer (nach DIN EN 61243-3)
- Prüf- und Diagnosewerkzeuge
- Laptop mit Software zur Fahrzeugdiagnose
- Messgerät zur Isolationsmessung
- Messgerät zur Potenzialausgleichsmessung
- Isoliermatten
- Transporthilfen für schwere Komponenten
- Absperrungen für Arbeits- und Gefahrenbereiche

Bei den Werkzeugen ist auf eine regelmäßige Wartung und Kalibrierung zu achten.

Durch die elektrisch angetriebenen Busse sind möglicherweise Anpassungen am Werkstattaufbau vorzunehmen. Da bei den meisten Batteriebussen die Batterie-Module auf dem Dach angebracht sind, ist die größere Höhe der Fahrzeuge zu beachten. Dadurch können höhere Tore nötig sein, um die Einfahrt in die Werkstatt zu ermöglichen. Auch die Hallenhöhe gilt es aufgrund der Schwenkbereiche von Klappen und Verkleidungen sowie ggf. Pantographen zu berücksichtigen. Um an die verbauten Batterien zu gelangen, können (feste oder mobile) Dacharbeitsstände mit entsprechenden Sicherungseinrichtungen nötig sein, um eine Zugänglichkeit zu den verschiedenen Arbeitsebenen zu ermöglichen.

Soll das Fahrzeug mit der bereits in der Werkstatt vorhandenen Hebebühne angehoben werden, ist die maximal zulässige Gesamtlast zu prüfen, da das Gewicht eines E-Busses höher ist als ein vergleichbarer Dieselbus. Um die schweren Baugruppen der Batteriemodule bewegen zu können, ist meistens eine Hebevorrichtung wie ein Kran oder Stapler mit entsprechenden Anschlagmitteln notwendig.

Für die Instandsetzung von HV-Komponenten ist ein separater, abgesperrter Bereich mit Prüfplätzen und Diagnosegeräten vorzusehen. Dieser Bereich sollte durch eine Zugangskontrolle nur für berechnigte Personen zugänglich sein. Da das Arbeiten unter Spannung laut DGUV-Regel 103-011 zu den gefährlichen Arbeiten zählt, sind hierbei besondere Vorkehrungen, wie die Qualifikationspflicht alle 3 Jahre, zu treffen. [14]

Neben der Ausstattung der Werkstatt und den baulichen Anpassungen sind für die Mitarbeiter in der Werkstatt folgende persönliche Schutzausrüstungen (PSA) vorzusehen:

- Schutzkleidung (DIN EN 1149)
- Schutzhandschuhe (DIN EN 60903)
- Gesichtsschutz (DIN EN 166)

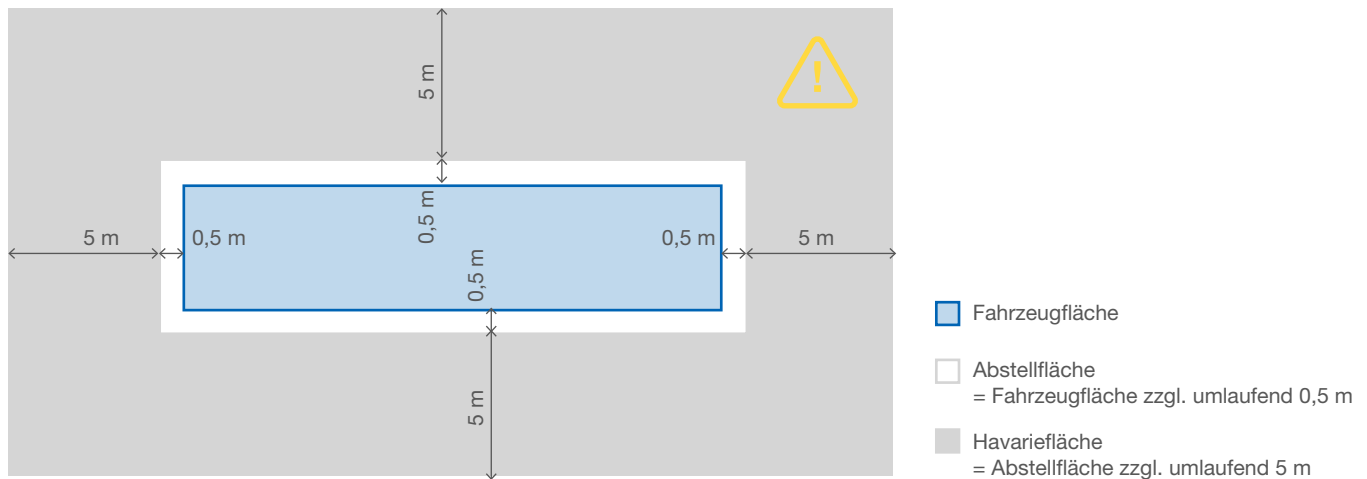
Wird der Aufwand der Instandhaltung durch die eigene Werkstatt, besonders zu Beginn der Umstellung, als zu groß eingeschätzt, ist eine Fremdvergabe bspw. an den Hersteller möglich. Durch die vertragliche Regelung der Anforderungen sind die Kosten planbarer, wenn auch ggf. höher.

1.3.3 Waschanlage

Vor der Nutzung der betriebseigenen Waschanlage ist die Eignung für Busse mit elektrischen Antrieben zu klären. Aufgrund der größeren Außenmaße sind nicht alle Waschanlagen baulich dazu geeignet, solche Busse zu reinigen. Darüber hinaus sollten die Hinweise des Fahrzeugherstellers befolgt werden, da manche Dachaufbauten nicht mit Bürsten waschbar sind und ggf. Sonderprogramme für diese Busse notwendig sind.

1.3.4 Gesicherte Ruhefläche

Eine gesicherte Ruhefläche, auch Quarantänefläche oder Havariefläche genannt, dient als Abstellfläche für (potenziell) beschädigte Fahrzeuge mit Lithium-Ionen-Batterien. Im Falle eines zeitlich verzögerten Ausbrechens eines Fahrzeugbrandes wird durch das dortige Abstellen der Fahrzeuge ein Übergreifen der Flammen auf benachbarte Fahrzeuge oder Gebäudeteile verhindert. Ruheflächen sind nicht dazu bestimmt, den Brand zu verhindern. Ihre Aufgabe ist es, die Ausbreitung zu unterbinden und damit den Schaden zu minimieren. Zur Auswahl der Fläche sollte eine Standortbewertung durchgeführt werden und ein Platz ausgewählt werden, in dem ein Brand keine Folgeschäden verursacht. Dieser Bereich sollte markiert werden, um bspw. das versehentliche Abstellen von anderen Fahrzeugen zu verhindern. Seitens der Berufsgenossenschaften gibt es momentan keine speziellen Anforderungen für die Errichtung von Ruheflächen für Busse. In der VDV-Schrift 825 werden Mindestmaße für eine solche Fläche in Abhängigkeit der Fahrzeugabmessungen empfohlen. [1] Eine grafische Darstellung einer solchen Fläche ist in → Abbildung 17 zu sehen.



Bei der Auswahl und Auslegung der Fläche sollten sowohl der Brand- und Umweltschutzbeauftragte als auch die Feuerwehr miteinbezogen werden. Diese können Hinweise zur nötigen Zufahrt oder zur Platzierung eines Hydranten in der Nähe geben, der im Brandfall das Löschen des Fahrzeugs erleichtern kann. Die Notwendigkeit einer Löschwasserrückhaltung ist von den örtlichen technischen Baubestimmungen abhängig.

Abbildung 17: Mindestmaße einer gesicherten Ruhefläche. Nach [1]

Zusammenfassend sollten für die Ruhefläche folgende Punkte beachtet werden:

- Dimensionierung abhängig von Fahrzeuggröße zuzüglich 0,5 Meter aufgrund der Positionierungsungenauigkeit
- Versiegelter Untergrund aus einer nicht brennbaren Oberfläche
- Kennzeichnung der Fläche mit Gefahrenhinweisen
- Abhängig von der Landesbauordnung werden mindestens 5 Meter als Sicherheitsabstand empfohlen
- Fläche kann im Normalbetrieb als Abstellfläche genutzt werden
- Zusätzliche Überwachungseinrichtungen zur Früherkennung möglich
- Maßnahmen wie Brandschutzwände können Ausbreitung eines Feuers vermeiden
- Hydrant in der Nähe sinnvoll

1.4 Betriebsabläufe

Um die Umstellung des Betriebshofes so reibungslos wie möglich zu gestalten, sollten die organisatorischen Abläufe evaluiert und ggf. angepasst werden. Dazu zählen die Planung der Fahrzeugumläufe, die Personalplanung und Aktualisierung der Betriebsanweisungen sowie die Erstellung eines angepassten Notfall- und Brandschutzkonzepts.

1.4.1 Umlaufplanung

Wie bereits einleitend erwähnt besitzen Batteriebusse eine geringere Reichweite als Dieselfahrzeuge. Jedoch lässt sich dieser Nachteil durch eine angepasste Umlaufplanung ausgleichen, indem für das Fahrzeug Ladezeiten eingeplant werden oder durch einen Fahrzeugwechsel die Strecke geteilt wird. Wichtig bei der Planung ist die Kalkulation verschiedener Faktoren wie verkürzte Nachladezeiten aufgrund von Verspätungen oder Umleitungen auf der Strecke. Für die Disposition der E-Busse ist die Nutzung eines IT-gestützten Systems sinnvoll. Gegenüber einem Dieselfahrzeug können folgende Dispositionsparameter einen Einfluss auf die Streckenauswahl haben:

- SoC bei Ankunft auf dem Betriebshof
- Benötigter SoC für geplanten Einsatz
- Restreichweite nach geplantem Einsatz
- Heizungs- und Klimatisierungsbedarf (falls elektrisch)

1.4.2 Personal

Das Personal sollte unbedingt von Anfang an in die Planung der Einführung von Bussen mit elektrischen Antrieben miteinbezogen werden. Grund hierfür sind das mögliche Fehlen von Erfahrungen mit elektrischen Fahrzeugen und damit einhergehende Skepsis. Für diesen Fall sind oftmals das persönliche Gespräch sowie eine ausführliche Einweisung zum Umgang mit dem Fahrzeug und der Ladestation hilfreich. Nutzen Sie hierbei den Dialog mit den Fahrern, um durch das Feedback Verbesserungspotenziale aufzudecken.

Um einen zuverlässigen und sicheren Betrieb zu gewährleisten ist es wichtig, dass die Mitarbeiter mit der neuen Antriebstechnologie vertraut sind. Aus diesem Grund sollte ein Schulungs- und Qualifizierungsumfang in Abhängigkeit der verschiedenen Mitarbeiterkategorien und Stufen erstellt werden. Alle Mitarbeiter müssen über die Gefahren, die von einer HV-Anlage ausgehen, regelmäßig und nachweislich unterwiesen werden. Dazu zählen neben dem Fahrer auch Büro- und Reinigungskräfte sowie externe Dienstleister und Besucher.

Abhängig von der Instandhaltungstiefe müssen die Mitarbeiter, die elektrotechnische Arbeiten am HV-System durchführen sollen, für diese Arbeiten qualifiziert werden. Als Hilfsmittel zur Feststellung des nötigen Qualifikationsumfangs kann die DGUV-Information 209-093 genutzt werden. [15] Für das Arbeiten in der Nähe spannungsführender Teile sind die DGUV-Vorschrift 3 und bei Arbeiten unter Spannung die DGUV-Regel 103-011 zu beachten. [14], [16]

Dazu zählt auch die Übertragung der elektrotechnischen Verantwortung für Werkstatt und Ladeinfrastruktur an nachgewiesenes fachkundiges Personal. Diese Person muss vom Unternehmer durch eine rechtssichere Pflichtenübertragung bestellt werden. Weitere Hinweise können in der VDV-Mitteilung 5701 „Verantwortliche Elektrofachkraft (vEFK) im Aufgabenbereich des ÖPNV“ nachgeschlagen werden. [17]

1.4.3 Betriebsanweisungen

Da durch den Einsatz von Bussen mit elektrischen Antrieben eine Vielzahl von Unternehmensbereiche betroffen sind, ist es notwendig, die bestehenden Betriebsanweisungen zu aktualisieren und an das Betriebskonzept anzupassen. Dazu zählen unter anderem Betriebsanweisungen:

- zum Handling und zur Lagerung der Batterien
- zum Umgang mit beschädigten Energiespeichern
- zur Verpackung und zum Versand von Energiespeichern nach Gefahrgutvorschriften (ADR)
- zum Arbeiten unter Spannung
- zum Umgang mit HV-Werkzeugen
- zum Arbeiten an HV-Kraftfahrzeugen
- zu Prüfplätzen für HV-Komponenten
- zum Umgang mit Diagnose- und Messgeräten
- zu Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten der LIS
- zur Verbindung der Fahrzeuge mit der LIS
- zur Prüfung der Komponenten nach DGUV V3
- zur Handhabung des Fahrzeugs im Pannenfall
- zum Abstellen des Fahrzeugs auf der gesicherten Ruhefläche
- zur Arbeitssicherheit
- zur Gefährdungsbeurteilungen

Zur Erleichterung der Erstellung dieser Dokumente sind Mustervorlagen verschiedener Herausgeber ebenfalls im → Anhang dieses Dokumentes hinterlegt.

1.4.4 Notfallkonzepte

Grundsätzlich gilt, dass der Betreiber nach Arbeitsschutzgesetz und Betriebssicherheitsverordnung zur Erstellung einer Gefährdungsbeurteilung verpflichtet ist und die daraus entstehenden Schutzmaßnahmen umsetzen muss. Dies kann bspw. durch ein Notfallkonzept erfolgen. Der Entwurf eines Notfallkonzepts ist sinnvoll, um im Betrieb auf mögliche auftretende Gefahren im Zusammenhang insbesondere mit den Batterien vorbereitet zu sein.

Werden die Batterien im bestimmungsgemäßen Betrieb verwendet, sind sie sicher. Durch Fehler bei der Herstellung, Betrieb außerhalb ihrer Spezifikation, mechanische Beschädigung oder thermische Belastung eines externen Brandereignisses können allerdings gefährliche Stoffe (ätzend / giftig / karzinogen) sowie brennbare Gase austreten. Dazu zählen neben den Elektrolyten im Inneren der Batterie auch das Kältemittel der Klimaanlage. Aus diesem Grund sollten Maßnahmen unter Berufung auf die Sicherheitsdatenblätter der Komponenten vorbereitet werden, um mögliche Gefahren und Umweltverschmutzungen zu vermeiden. Um geeignete Schutzkonzepte zu erstellen, sollten die nötigen Unterlagen bereits bei der Bestellung der Fahrzeuge und LIS durch die verschiedenen Hersteller bereitgestellt werden.

Für den Fall einer Panne sollte der umfassende Rettungsleitfaden des Herstellers auf einer Rettungskarte⁹ zusammengefasst sein. Diese kann ebenfalls über den Hersteller bezogen und im gekennzeichneten Bordnetzbatteriefach aufbewahrt werden. Alternativ kann auch der zugehörige QR-Code außen am Fahrzeug angebracht werden.

Zur Erstellung des Notfallkonzepts können unter anderem folgende Informationen genutzt werden:

- Sicherheitsdatenblätter und Herstellervorgaben zum Umgang mit Energiespeichern
- Hebe- und Bergekonzept nach Herstellervorgaben
- Vorgehen bei Unfällen mit Deformationen im Bereich der HV-Komponenten
- Sicherungskonzept bei schweren Unfällen
- Notabschaltung durch Bediener
- Sicherstellen und Prüfen der Spannungsfreiheit des Fahrzeugs
- Bergeplan für Abschleppunternehmen und Absicherung im öffentlichen Verkehrsraum
- Anforderungen an die gesicherte Ruhefläche¹⁰
- Rettungsleitfaden

Darüber hinaus ist es sinnvoll, bei der Anschaffung der Batteriebusse die örtlichen Rettungskräfte (Feuerwehr, Polizei, Technisches Hilfswerk und Abschleppunternehmen) zu informieren, um proaktiv auf mögliche Fragen eingehen zu können. Dafür sollte ein Ansprechpartner im Unternehmen für alle Fragen rund um die Sicherheit und mögliche Fehlerfälle benannt werden. Zusätzliche Informationen zur Vorbereitung auf Notfallsituationen sind im VBG-Leitfaden „Umgang mit Bedrohungen und Notfällen“ nachzulesen. [18]

1.4.5 Brandschutz

Zum Brandschutz von Busdepots lässt sich unabhängig von der Antriebsart sagen, dass ein Brand mit einem erheblichen Löschaufwand verbunden ist. Die hohe Brandlast der Busse ist auf die Materialien im Innenraum zurückzuführen. Die geringe Effektivität vorhandener Löschanlagen und die schwierige Erreichbarkeit des Brandherdes durch die engen Zwischenräume der abgestellten Fahrzeuge führen zusammen mit der hohen Wertdichte meist zu einem großen Schaden. Eine Verschärfung der Risikosituation durch den Einsatz elektrischer Busse ist in der aktuellen Datenlage nicht erkennbar. Der Unterschied zwischen dem Brand eines konventionellen Busses und eines E-Busses mit Lithium-Ionen-Batterien liegt in der höheren Energiefreisetzungsrate mit starker Rauchentwicklung. Da durch die Batterie mit einer Freisetzung toxischer und leicht brennbarer Inhaltsstoffe zu rechnen ist, erschwert dies meist die Löscharbeiten der Feuerwehr.

Abhängig von den Anforderungen zur Zeit der Gebäudeerrichtung können unterschiedliche bautechnische Bestimmungen bezüglich des Brandschutzes gelten. Abhängig davon, ob es sich bei dem Aufbau der LIS um eine Nutzungsänderung oder bautechnische Veränderung handelt, müssen verschiedene Verordnungen und Richtlinien wie bspw. die Verordnung über den Bau von Betriebsräumen für elektrische Anlagen (EltBauV) beachtet werden.

⁹ Siehe hierzu ISO 17840-2: Rettungsdatenblätter für Busse, Reisebusse und Nutzfahrzeuge [50]

¹⁰ Siehe hierzu Kapitel 1.3.4 Gesicherte Ruhefläche

Durch einen Brandschutzbeauftragten sollte auf Basis der örtlichen Gegebenheiten eine Brandrisikoanalyse durchgeführt werden. Aus den daraus ermittelten Risiken lassen sich Maßnahmen für ein wirksames Brandschutzkonzept ableiten. Das Konzept kann dabei neben dem organisatorischen Brandschutz verschiedene Maßnahmen aufweisen, die im Brandfall zu einer Schadensbegrenzung beitragen. Dazu zählen bspw. Anpassungen im baulichen Brandschutz wie die Einteilung der Brandabschnitte durch Brandtrennwände sowie die Installation von automatischen Brandmelde- oder Brandbekämpfungsanlagen. Bei der Konzeptentwicklung ist es sicherlich sinnvoll, neben der örtlichen Feuerwehr auch den Sachversicherer und das zuständige Bauamt miteinzubeziehen. Abhängig von den örtlichen Regularien sind möglicherweise Feuerwehrezufahrten nach DIN 14090 und Feuerwehrläne der baulichen Anlagen nach DIN 14095 notwendig. [19], [20] Hilfe bei der Planung des Brandschutzkonzepts kann darüber hinaus die VdS Schrift 2000 „Brandschutz in Betrieben“ geben. [21]

Aktuell gibt es keine verbindlichen Vorschriften zu Brandschutzbestimmungen von Fahrzeugdepots. Allerdings befinden sich auch hier verschiedene Publikationen und Vorschriften in Entwicklung, um mit dem aktuellen Stand der Technik Schritt zu halten. In Bezug auf den Brandschutz von Betriebshöfen ist hier auf die Publikation des Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) VdS 0825 zu verweisen. [22]

Notizen zu Kapitel 1.4 Betriebsabläufe	Erledigt

2. Brennstoffzellenfahrzeuge

Auch Busse, die mit **Wasserstoff** (H_2) betrieben werden, besitzen einen ähnlich aufgebauten Antriebsstrang wie der Batteriebus. Diese **Brennstoffzellenfahrzeuge** (Fuel Cell Electric Vehicles, FCEV) nutzen H_2 als Energieträger, um einen Elektromotor mit elektrischer Energie zu versorgen. H_2 wird hierfür in Drucktanks mit ca. 350 bar im Fahrzeug gespeichert. Daneben besitzen auch FCEV eine zusätzliche Batterie, um die Energie für Leistungsspitzen bereit zu stellen. Außerdem dient sie zur Speicherung der elektrischen Energie, die durch Rekuperation erzeugt wird. Anders als bei reinen Batteriebussen kann die spezifische Energiedichte, die in einem Wasserstofftank gespeichert wird, nicht durch technische Weiterentwicklungen vergrößert werden. Hier ist der verfügbare Bauraum für die Reichweite ausschlaggebend.

Die Wasserstoffzufuhr erfolgt, ähnlich wie bei Gasfahrzeugen, an einer Tankstelle, die entweder auf dem Betriebshof liegen kann oder von Dritten bereitgestellt wird. Die Betankung erfolgt über einen Tankstutzen und dauert etwa 10 Minuten. Die Tankdauer ist abhängig von dem Druck im Speichertank. Durch die Entnahme von Wasserstoff aus der Tankstelle sinkt der Druck. Durch das Sinken der Druckdifferenz nimmt auch die Betankungsgeschwindigkeit ab. Für eine ausreichend hohe Betankungsgeschwindigkeit ist die Auslegung der Tankstelle und das Zusammenspiel zwischen den verschiedenen Speichern und Verdichtern der Tankstelle wichtig. Dadurch unterscheidet sich der Betriebsablauf, also die Umlaufplanung und Fahrzeugbereitstellung, nur gering im Vergleich zu dieselbetriebenen Bussen.

Ein Brennstoffzellenbus hat aufgrund der Energiedichte von H_2 eine typische Reichweite von 300–400 km. Dadurch ist ein FCEV flexibler einsetzbar als ein batterieelektrisches Fahrzeug. Die Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch sind ähnlich zu denen eines batterieelektrischen Fahrzeugs. Jedoch hat bei FCEVs das Beheizungskonzept einen geringeren Einfluss, da die Reichweite der Fahrzeuge größer ist und die in der Brennstoffzelle entstehende Abwärme ebenfalls zum Beheizen des Fahrzeugs genutzt werden kann.

Der Vorteil der Brennstoffzellenbusse liegt in den nur geringen Anpassungen im Betriebsablauf des Unternehmens. Allerdings sind für diese Antriebsart noch wenige Fahrzeuge am Markt verfügbar und es sind sehr hohe Anfangsinvestitionen nötig, um die Versorgung der Busse mit H_2 zu ermöglichen. Nach einer Sphera-Studie aus dem Jahre 2021 ist allein für eine Tankstelle, die 10 Busse versorgen kann, mit Kosten in der Größenordnung von 2 Mio. Euro zu rechnen. [24] Aufgrund dieser hohen Kosten und der großen Anforderungen an Planung, Genehmigung und Errichtung eignen sich FCEV-Busse meist erst ab sehr großen Flotten oder an Standorten, wo der Wasserstoff von Dritten bezogen werden kann.

Weitere Infos zu Wasserstoffverbrennungsmotoren sind in der Metastudie der NOW zu finden. Dort ist die Brennstoffzelle einem herkömmlichen Dieselmotor gegenübergestellt und ein Kostenvergleich zu finden. [25]

Bei **Wasserstoff** handelt es sich um ein farbloses Gas. Jedoch wird oftmals von grünem oder grauem Wasserstoff gesprochen. Diese **Farben** beziehen sich auf die **Herstellung des Gases** und geben Aufschluss über die **Umweltfreundlichkeit des Produktionsprozesses**. Bei grünem Wasserstoff handelt es sich um CO_2 -neutral gewonnenen H_2 , bei dem Wasser mittels Elektrolyse durch regenerativ erzeugten Strom gewonnen wird. Für grauen Wasserstoff werden Verfahren wie Dampfreformation fossiler Brennstoffe genutzt oder Elektrolyseure, die nicht mit grünem Strom betrieben werden. Dieser Herstellungsprozess ist im Gegensatz zu grünem H_2 nicht klimaneutral. Weiterführende Informationen zum Thema Wasserstoff in der Mobilität sind im VDE-Faktencheck nachzulesen. [23]

In einer **Brennstoffzelle** wird durch die chemische Synthese von Sauerstoff und Wasserstoff zu Wasser bei Temperaturen $< 70^\circ C$ elektrische Energie erzeugt. Bei dieser Reaktion entstehen weder CO_2 noch andere Stickoxide oder Feinstaubemissionen.

2.1 Fahrzeugauswahl

Brennstoffzellenbusse werden in zwei Klassen unterteilt. Zum einen in die reinen Brennstoffzellenfahrzeugen (BZ-Hybrid) und zum anderen in die batterieelektrischen Fahrzeuge, bei denen zur Vergrößerung der Reichweite eine Brennstoffzelle als Range-Extender (BZ-REX) verbaut ist. Beide Fahrzeugvarianten besitzen eine Brennstoffzelle, eine Hochvoltbatterie und einen Drucktank zur Speicherung des Wasserstoffs. Allerdings unterscheiden sie sich je nach Anwendungsgebiet in ihrer jeweiligen Dimensionierung.

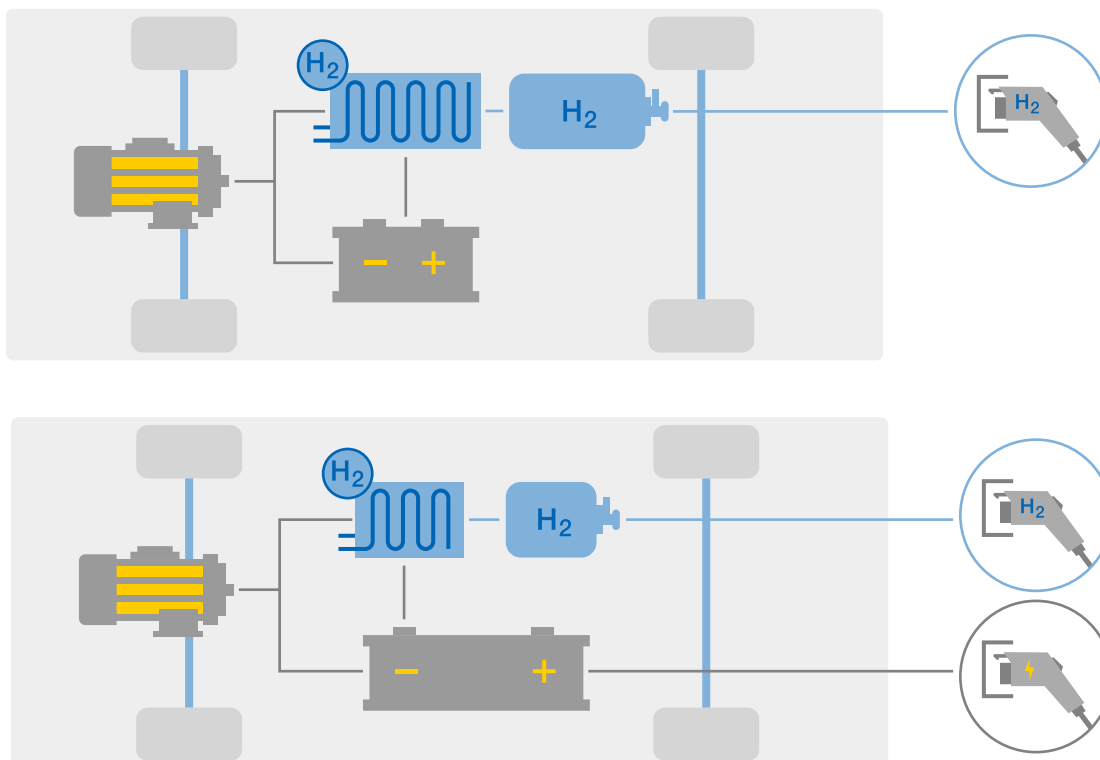
Die Batterie des Hybrid-Brennstoffzellenbus ist relativ klein (i. d. R. < 30 kWh) und dient zur Speicherung der Rekuperationsenergie und zur Abdeckung der Lastspitzen, wodurch eine Optimierung des Brennstoffzellensystems möglich ist. Die Hauptenergiequelle ist eine leistungsfähige Brennstoffzelle. Diese liegt für einen 12-Meter-Bus im Bereich zwischen 60 und 85 kW. Der schematische Aufbau eines solchen Busses ist in → Abbildung 18 dargestellt.

BZ-REX-Fahrzeuge besitzen, wie in → Abbildung 19 zu sehen, ähnlich wie die Batteriebusse eine große Batterie (> 200 kWh) und eine kleiner dimensionierte Brennstoffzelle (ca. 30 kW). Primär dient die Batterie zum Antrieb des Fahrzeugs, kann aber durch die Brennstoffzelle im Betrieb kontinuierlich nachgeladen werden, wodurch die Gesamtreichweite des Fahrzeugs erhöht wird. Da hierdurch die Brennstoffzelle immer im Betriebsoptimum betrieben werden kann, ist eine sehr effiziente Nutzung des Fahrzeugs mit hohem Wirkungsgrad möglich.

Aufgrund dieser unterschiedlichen Funktionsweisen sind bei der Verwendung von BZ-Bussen unterschiedliche Infrastrukturen nötig. Die BZ-Hybrid-Fahrzeuge werden ausschließlich mit Wasserstoff betankt. Für die BZ-REX-Fahrzeuge muss zusätzlich zu der Wasserstoffinfrastruktur eine Ladeinfrastruktur, wie bei den Batteriebussen, errichtet werden. Allerdings kann hierbei die Kapazität der Wasserstoffinfrastruktur geringer ausgelegt sein. Es gilt jedoch zu beachten, dass aufgrund der Kombination der Betankung und dem, üblicherweise täglichen, Ladevorgang ein höherer Aufwand im Betriebsablauf einzukalkulieren ist.

Abbildung 18: (oben) Schaubild eines Brennstoffzellen-Hybridbusses. Nach [26]

Abbildung 19: (unten) Schaubild eines Brennstoffzellenbusses mit Range-Extender. Nach [26]



2.2 Energiebedarf

Wie auch beim Batteriebus ist für die Auslegung der Tank- und Ladeinfrastruktur der tägliche Energiebedarf die entscheidende Größe. Hierfür gilt es besonders folgende Aspekte zu betrachten:

- Fahrzeugtyp (BZ-Hybrid oder BZ-REX)
- Fahrzeuggröße
- Energiebedarf des Heiz- und Klimasystems
- Fahrprofil

2.2.1 Tankinfrastruktur

Bei der Planung der Tankinfrastruktur sollte auf eine ausreichende Dimensionierung und eine Ausfallsicherheit der Tankanlage geachtet werden, um einen sicheren Betriebsablauf zu gewährleisten. Dabei sollten auch mögliche zukünftige Energiebedarfe beachtet werden. Eine Ladeinfrastruktur zum Laden der Batterien von BZ-REX muss ebenfalls einkalkuliert werden.

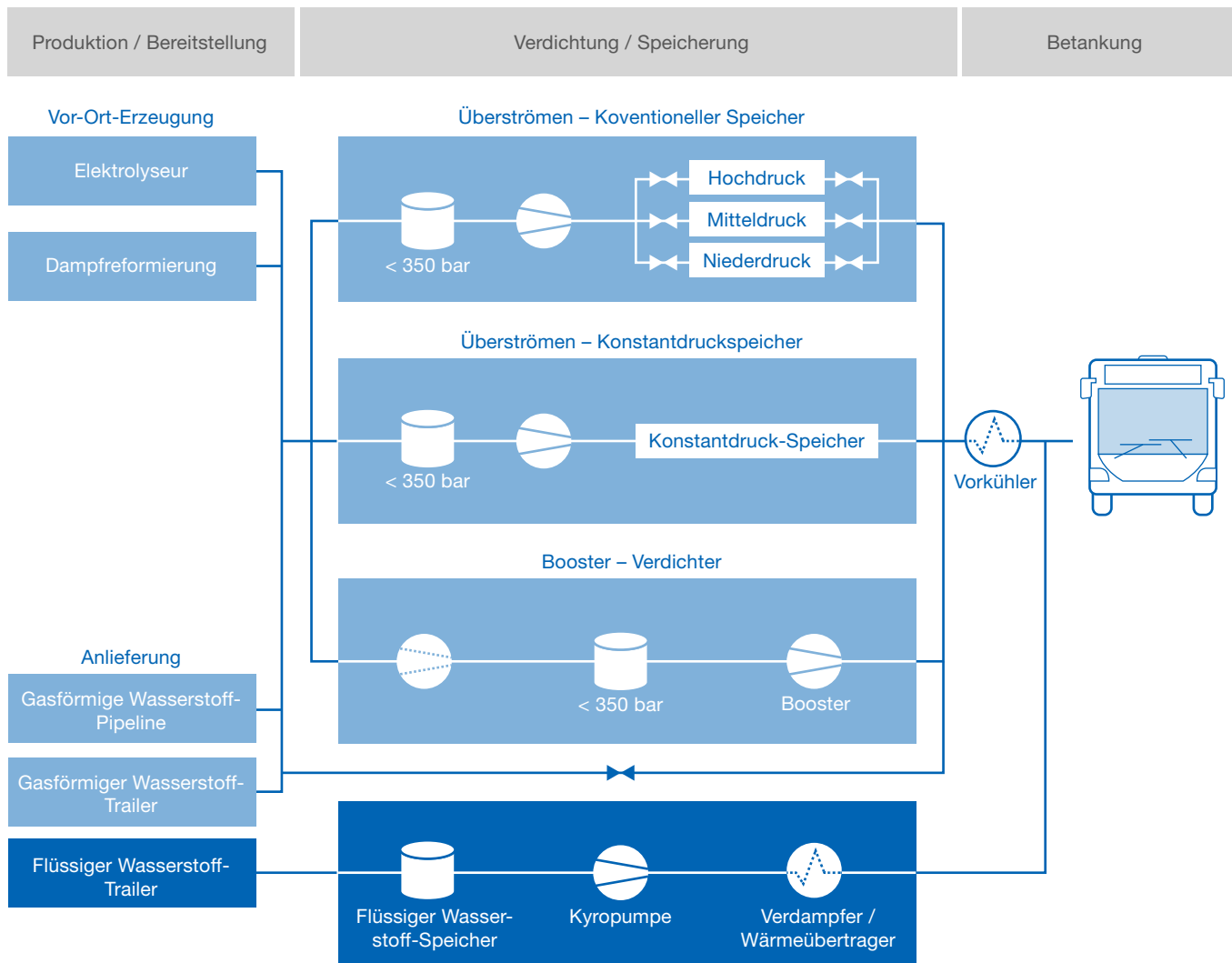
Da für diese Fahrzeuge keine Schnellladesäulen notwendig sind, bieten sich hier Ladepunkte im Bereich von 30–50 kW Ladeleistung an.

Unabhängig von der Entscheidung, den H_2 vor Ort herzustellen oder durch Lieferanten zu beziehen, ist es nötig, eine Tankstelle zu errichten. Aufgrund des gasförmig vorliegenden H_2 kann der Energieträger nicht wie bspw. Diesel in den Tank gepumpt werden. Für die Übertragung ist ein Druckunterschied zwischen dem Speicher der Tankstelle und dem Tank im Bus notwendig.

2.2.2 Logistik

Die Bereitstellung des H_2 kann über verschiedene Varianten ermöglicht werden. Eine Möglichkeit ist die Anbindung an eine H_2 -Pipeline. Allerdings ist dieses System sehr teuer und wird nur in den seltensten Fällen, wie bspw. bei der Nähe zu wasserstoffproduzierenden Unternehmen oder sehr hohen Abnahmemengen, wirtschaftlich tragbar sein. Alternativ dazu kann der H_2 direkt auf dem Betriebshof durch Elektrolyse hergestellt werden. Eine dritte Möglichkeit ist die Lieferung durch einen Tankwagen, ähnlich zu dem bisher verwendeten System.

Die Anlieferung des H_2 kann entweder in flüssiger oder in gasförmiger Form erfolgen. Der flüssige H_2 kann aufgrund der volumetrisch hohen Energiedichte sehr platzsparend gespeichert werden. Allerdings wird ein hoher Anteil der



enthaltenen Energie zur Verflüssigung benötigt, wodurch sich die Kosten erhöhen und das System erst ab sehr großen Wasserstoffmengen wirtschaftlich sinnvoll machen.

Abbildung 20: Wasserstoffinfrastruktur. Nach [3]

Die Anlieferung von gasförmigem H_2 ist daher die weiter verbreitete Logistiklösung. Hierzu werden i. d. R. Drucktanks auf Trailern angeliefert, die zwischen 400 und 600 kg H_2 bei einem Druck im Bereich von 200–350 bar speichern. Der Trailer wird nach Anlieferung an die Tankstelle angeschlossen und abhängig von der Verdichtungsart, wie in → Abbildung 20 dargestellt, gespeichert.

2.2.3 Bauliche Anforderungen

Abhängig von Flottengröße und Wasserstoffbedarf werden verschiedene Komponenten benötigt. Kleine Flotten benötigen bei der gasförmigen Wasserstoffanlieferung einen Stellplatz für den Trailer sowie Raum für die eigentlichen Tankstellenkomponenten Verdichter, Speicher und Zapfsäule. Je nach Komponenten sind gewisse Sicherheitsabstände notwendig. Diese können allerdings durch geeignete Maßnahmen wie Poller oder Schutzwände reduziert werden. Wird eine Vor-Ort Erzeugung des H_2 erwogen, muss ebenfalls der Platzbedarf der Erzeugungsanlage, z. B. des Elektrolyseurs, einkalkuliert werden.

Beim Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur ist ebenfalls der Netzanschluss zu beachten, unabhängig davon, ob eine LIS für die BZ-REX aufgebaut werden muss. Grund hierfür ist die hohe Leistungsaufnahme der Komponenten der Wasserstofftankstelle. Größter Verbraucher ist dabei der Verdichter, der den Wasserstoff auf den nötig hohen Druck komprimiert.

Aufgrund der Sicherheitsanforderungen und der baulichen Besonderheiten einer Wasserstofftankstelle sind verschiedene Vorkehrungen beim Bau zu beachten. Dazu zählt vor allem der Schutz aller wasserstoffführenden Komponenten vor mechanischer Beschädigung und Erwärmung. Wird geplant, die Tankstelle im Inneren einer Halle zu errichten, kann eine Einhausung der Tankstelle und Belüftung der Halle notwendig sein, um den Anforderungen der Explosionsschutz-Einrichtungen (ATEX) gerecht zu werden. Die genauen Anforderungen sind immer vom konkreten Einzelfall und der Gefährdungsbeurteilung nach der Betriebssicherheitsverordnung abhängig. Diese ist darüber hinaus Teil des Genehmigungsverfahrens für eine H₂-Tankstelle. Ein Leitfaden zur Errichtung einer eigenen Wasserstofftankstelle kann der NOW-Broschüre „Genehmigungsleitfaden für Wasserstoff-Stationen“ entnommen werden. [27]

2.2.4 Anforderungen an den Betrieb mit Wasserstoffbussen

Generell können Wasserstoffbusse in der Betriebshalle abgestellt werden, sofern keine Störung an der Gasanlage vorliegt und eine gültige Betriebsgenehmigung vorliegt. Um Defekte an der H₂-Anlage zu erkennen, sollten gebäudetechnische Maßnahmen zur Detektion von Gasgemischen installiert werden. Im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung ist festzulegen, wie mit solchen Gefahrensituationen umzugehen ist und welche Anforderungen an den Explosionsschutz gelten. Die notwendigen Maßnahmen in der Werkstatt sind abhängig von der Instandhaltungstiefe. Weitere Informationen hierzu sind in der DGUV 209-072 „Wasserstoffsicherheit in Werkstätten“ zu finden. [28]

Notizen zu Kapitel 2.2 Energiebedarf	Erledigt

3. Antriebsunabhängige Bewertungen

Neben den antriebsspezifischen Planungen ist eine fundierte Betriebsanalyse sinnvoll, um Chancen bezüglich der Betriebsplanung zu erkennen und in den Umstellungsprozess einfließen zu lassen. Zu diesen Punkten zählen eine fundierte Analyse der betrieblichen Ausgangslage, die Definition des Umstellungsrahmens, die bisherigen Serviceprozesse sowie die Betrachtung der Kosten und der Umweltauswirkungen.

3.1 Analyse der Ausgangslage

3.1.1 Grundlagen

Um eine zuverlässige Elektrifizierung des Fuhrparks zu gewährleisten, ist eine Analyse der Ausgangssituation notwendig. Hierfür sollten zur Unternehmens-einstufung Daten zu folgenden Themen erhoben werden:

- Unternehmensgröße
- Fuhrparkgröße
- Fuhrparkzusammensetzung
- Bediengebiet
- Linienanzahl
- Ergebnisse bisher durchgeführter Untersuchungen und Studien

Für die Projektplanung sollte darüber hinaus eine genaue Zielsetzung bezüglich folgender Punkte erhoben werden:

- Motivation
- Erwartung
- Umsetzungszeitraum
- Technische Ziele
- Betriebliche Ziele
- Wirtschaftliche Ziele
- Ökologische Ziele

Nach Analyse der gegebenen Ausgangssituation und der Definition der Ziele gilt es, ein für den Anwendungsfall spezifisches Betriebskonzept zu entwickeln. Dieses Konzept ist für jeden Betriebshof individuell zu bewerten und abhängig von den verschiedenen Faktoren, die sich aus dem vorhandenen Betriebskonzept, dem Zielkonzept und der dabei verwendeten Antriebstechnologie ergeben.

3.1.2 Festlegung umzustellender Linien

Es ist sinnvoll, diejenigen Linien priorisiert umzustellen, die auch durch die Reichweite der elektrischen Busse ohne Probleme betrieben werden können. Dadurch kann der Betreiber Erfahrungen mit der Elektromobilität sammeln und gleichzeitig einen sicheren Fahrbetrieb gewährleisten. Somit wird ebenfalls die Komplexität eines Parallelbetriebs verringert, wenn als Übergangslösung die Flotte sowohl aus Bussen mit elektrischen Antrieben als auch aus klassischen Dieseln Bussen besteht. Als Kriterien für die Auswahl der passenden Linien können neben der Umlauflänge auch die verfügbaren Pausenzeiten oder die Möglichkeit eines Fahrzeugtauschs am Betriebshof dienen.

3.1.3 Wartung und Service

Für einen sicheren und zuverlässigen Betrieb ist es notwendig, Wartung und Service sowohl der Fahrzeuge als auch der entsprechenden Infrastruktur zu planen. Dadurch lassen sich Betriebsausfälle aufgrund von Störungen am System verhindern. Sollte es dennoch zu Störungen kommen, kann die Nutzung eines Monitoringsystems bei der Fehlersuche und -behebung nützlich sein. Auch die regelmäßige Inspektion der zusätzlichen elektrischen Geräte sollte gemäß der DGUV Vorschrift 3 in den betrieblichen Abläufen eingeplant werden. [16] Details zu diesen Prüfungen sind unter anderem in dem Leitfaden des Zentralverband der Deutschen Elektro- und Informationstechnischen Handwerke (ZVEH) mit dem Titel „E-Check E-Mobilität“ zu finden. [29]

Diese Aufgaben können Inhouse von einem dafür ausgebildeten Techniker übernommen werden. Alternativ kann dies auch an einen spezialisierten Dienstleister mit einem Fernwartungsservice vergeben werden.

Ähnliches gilt für den Service der Busse mit elektrischen Antrieben. Soll der Aufwand der Umrüstung der Werkstatt (zunächst) vermieden werden, kann ein Full-Service-Vertrag mit dem Hersteller über die gewünschte Instandhaltungstiefe vereinbart werden. Hierbei können verschiedene Umfänge definiert werden wie Wartung, Unfall, Vandalismus oder auch die Versorgung mit Betriebsstoffen. Vorteil dieser Variante sind die gut planbare Kostenstruktur, die kurze Reaktionszeit und mögliche Vertragsstrafen bei Ausfallzeiten. Bei der Auswahl eines Komplettservice durch den Hersteller sollte die regionale Verfügbarkeit von Vertragswerkstätten geprüft werden oder ob der Service in der eigenen Werkstatt durch einen mobilen Techniker durchgeführt werden kann.

Ebenfalls abhängig von der geplanten Instandhaltungstiefe sind Auswirkungen auf die Materialwirtschaft. Eine hohe Ersatzteilverfügbarkeit vor Ort in der eigenen Werkstatt kann zwar einen möglichen Werkstattaufenthalt und somit die Ausfallzeiten verringern, ist aber auch mit einer Kapitalbindung verbunden. Aus diesem Grund sollte besonders für die HV-Komponenten ein ausgewogenes Verhältnis zwischen den hohen Kosten der Bauteile und der Lagerhaltung aufgrund der zum Teil sehr langen Lieferzeiten gesucht werden.

3.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Bei der Umstellung der Busflotte auf elektrische Antriebe ist es aufgrund der weitreichenden Auswirkungen im Betrieb notwendig, eine umfassende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchzuführen. Dabei sollten die verschiedenen möglichen Antriebsvarianten der Batteriebusse (Depot- und Gelegenheitslader) mit denen der Brennstoffzellenbusse (Hybrid und BZ-REX) verglichen und dem bestehenden System gegenübergestellt werden. Im Allgemeinen sind für Busse mit elektrischen Antrieben die Anfangsinvestitionen (CapEx) aufgrund der benötigten Infrastruktur höher als bei einem Dieselbus. Allerdings sind die Betriebskosten (OpEx) dieser Busse, auch aufgrund der steigenden CO₂-Preise für fossilen Diesel, geringer. Es gilt also, über die Lebensdauer der Busse eine Vergleichbarkeit der Gesamtkosten in € pro km zu ermöglichen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die Wirtschaftlichkeitsanalyse mit Hilfe der Kapitalwertmethode zu unterstützen. Mögliche Faktoren, die in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einfließen können, sind in → Tabelle 2 aufgelistet:

Faktoren für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	
Fahrzeugkosten	Grundfahrzeug
	Fahrzeugausrüstung
	Batterie (Kauf oder Miete)
	Batterietausch
	Restwert nach Lebensdauer
	Tank- und / oder Ladeinfrastruktur
Netzanschluss (inkl. Trafo-Station)	Errichtung auf dem Betriebshof
	Errichtung auf der Strecke
Instandhaltung	Energiekosten
	Betriebseinsatz
	Heizkosten
Werkstattausrüstung	Software
	PSA
	Werkzeug
Personal	Schulungskosten
	Fahrpersonal
	Werkstattpersonal
	Reinigungspersonal
	Kosten Personalstunde
Projektsteuerung und Dokumentation	
Förderung	Mit Förderung
	Ohne Förderung
	THG-Handel

Der **THG-Handel** ermöglicht es dem Halter eines vollelektrischen Fahrzeugs, die eingesparten Treibhausgase an ein quotenpflichtiges Unternehmen zu verkaufen. In der Regel wird dieser Verkauf über Vermittler durchgeführt, die die Zertifikate gebündelt beim Umweltbundesamt anmelden und gegen eine Provision die Prämie an ihre Kunden weitergeben.

Tabelle 2: Faktoren für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Antriebsart	TCO in €/km	Mehrkosten gegenüber Diesel	Kostenvorteil gegenüber Diesel im Jahr 2030
Diesel	3,5	–	–
Batterie	4,6	33 %	22 %
Brennstoffzelle	4,8	37 %	21 % ¹¹

Tabelle 3: Kostenvergleich der möglichen Alternativen zueinander auf Basis der TCO-Berechnung. Nach [24]

Da besonders die Betriebskosten über die Lebensdauer der Busse (für E-Busse i. d. R. 16 Jahre) schwierig abzuschätzen sind, ist eine szenarienbasierte Kostenentwicklung (best case, middle case, worst case) sinnvoll. Eine Betrachtung vieler verschiedener Wirtschaftlichkeitsfaktoren ist in der von Sphera durchgeführten Studie des Verbands Baden-Württembergischer Omnibusunternehmen e. V. aus dem Jahr 2021 zu finden. [24] Für einen 12-Meter-Solobus geht die Studie von den in → Tabelle 3 aufgeführten Kosten aus.

Die Studie geht davon aus, dass zwar momentan die Kosten für einen elektrisch angetriebenen Bus höher sind als bei einem Dieselsbus, allerdings im Jahr 2030 aufgrund der Marktdurchdringung und des Technologiefortschritts die neuen Technologien einen Kostenvorteil bringen werden.

Die Studie kommt zu dem Schluss, dass Batteriebus- und Brennstoffzellenbussysteme derzeit nur durch Förderungen und unter bestimmten Bedingungen annähernd wirtschaftlich eingesetzt werden können. Grund hierfür sind unter anderem die spezifischen Einsatzrandbedingungen wie betrieblicher Fahrzeugmehrbedarf, regulatorisch nötige Anpassungen und wirtschaftliche Faktoren wie Skaleneffekte bei der Dimensionierung der LIS. [24]

Als Hilfsmittel zur Erstellung der technischen Analyse und der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung soll an dieser Stelle das eBusTool der NOW und des Fraunhofer IVI hervorgehoben werden. Dieses Tool kann als Entscheidungshilfe dienen und Unternehmen bei der Kalkulation des Fahrzeugmehrbedarfs auf Basis des aktuellen Umlaufplans helfen. Darauf basierend ist eine Erstellung eines Kostenvergleichs und der Klimaauswirkungen möglich. [5]

Notizen zu Kapitel 3.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	Erledigt

¹¹ Bitte beachten sie, dass die Daten der Sphera-Studie aus dem Jahr 2021 stammen und somit die Kostenentwicklungen für Fahrzeuge und Energie seitdem nicht mit in die Kalkulation einfließen.

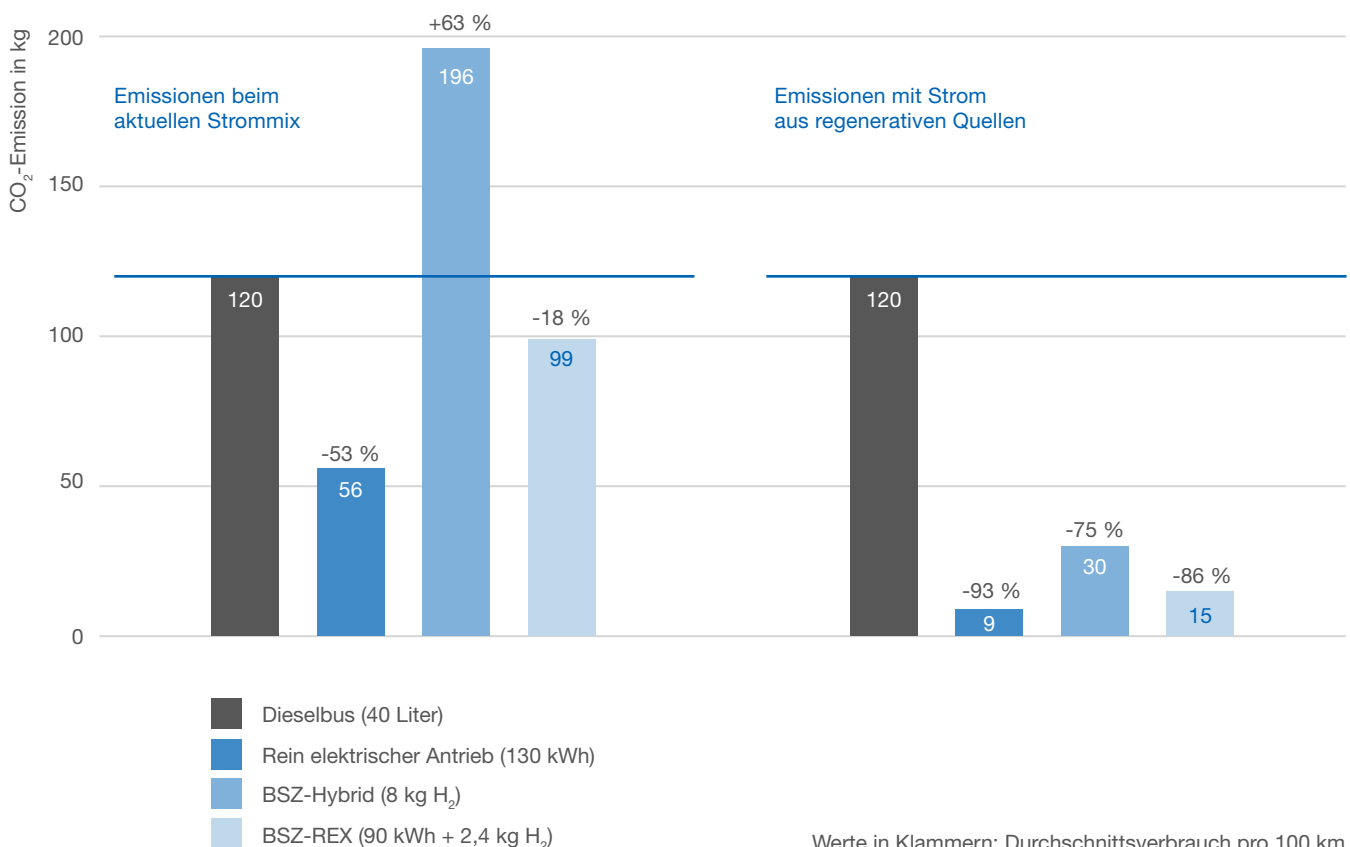
3.3 Umweltbewertung

Neben der Kalkulation der Umweltkosten für den Betrieb von Fahrzeugen mit elektrischen Antrieben kann es nötig sein, für die Beantragung von Fördermitteln eine Umweltbewertung des Busbetriebs durchzuführen. Durch den emissionsarmen Betrieb des Fahrzeugs ist es erforderlich, bei der Umweltbetrachtung den gesamten Lebenszyklus des Busses sowie die Energiebereitstellung zu betrachten. Das Einsparpotenzial von CO₂ durch den Einsatz dieser Technologien ist in → Abbildung 21 dargestellt.

Die Umweltbewertung zeigt, welche Emissionseinsparungspotenziale durch die Umstellung der Busse realisiert werden können. Die Ermittlung der Umweltkosten kann sich dabei auf die Einsparpotenziale oder die Vermeidungskosten beziehen. Die größtmögliche Reduktion der Emissionen ist durch ein rein elektrisches Heizkonzept zu erreichen. Wird aufgrund der Reichweite ein brennstoffbasiertes Heizkonzept gewählt, bieten sich hier Brennstoffe aus erneuerbaren Energieträgern an, welche die Anforderungen der europäischen Erneuerbare-Energien-Direktive II (RED II) erfüllen.

Durch den Einsatz von **Strom aus erneuerbaren Quellen** wie Wind und Photovoltaik (PV) lassen sich Einsparungen von 75–85 % bei den Treibhausgasen (THG) und 50–75 % bei den Stickoxidemissionen (NO_x) erzielen. Der deutsche Strommix bestand im Jahr 2020 zu 54 % aus erneuerbaren Energien. Dies zeigt, dass für eine effektive Emissionsminderung der Einsatz erneuerbarer Energieträger notwendig ist. Zukünftig wird mit einem starken Zuwachs des Anteils der erneuerbaren Energien am Strommix gerechnet.

Abbildung 21: Mögliche Einsparungen von CO₂ durch den Einsatz verschiedener Technologien. Nach [2]



Mögliche Parameter, die zu einer Umweltbewertung herangezogen werden können, sind nachfolgend gelistet:

- Umweltkosten
 - Schadenskosten
 - Vermeidungskosten
- Umwelteffekte
 - Treibhausgasemissionen (als CO₂-Äquivalent)
 - Schadstoffemissionen (CO, NOx, Feinstaub)
- Berechnung der Energiemenge
 - Well-to-Tank (Energieverbrauch der Kraftstoffbereitstellung)
 - Tank-to-Wheel (Energieverbrauch des Fahrzeugbetriebes)
 - Well-to-Wheel (Summe aus Well-to-Tank und Tank-to-Wheel)
- CO₂-Reduktionspotenzial
- Lärmemissionen

Notizen zu Kapitel 3.3 Umweltbewertung	Erledigt

IV Anhang

Literaturverzeichnis

- [1] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V., Anforderungen an Betriebshöfe und Werkstätten beim Einsatz von Linienbussen mit sauberen und/oder emissionsfreien Antrieben, Köln: Beka.de, 2023.
- [2] NOW GmbH, Leitfaden für Busse mit alternativen Antrieben, Berlin, 2021.
- [3] L. Dormann, K. Sann-Ferro, P. Heininger und J. Mähliß, Kompendium: Li-Ionen-Batterien: Grundlagen, Merkmale, Gesetze und Normen, Frankfurt: VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., 2021.
- [4] Fraunhofer IVI, eBusTool – Hilfe bei der Auswahl der richtigen Technologie, Berlin, 2021.
- [5] Fraunhofer IVI, eBus TOOL 2023. <https://www.ebustool.de> (Abruf am 14.04.2023).
- [6] NOW GmbH, Programmbegleitforschung Innovative Antriebe und Fahrzeuge, Berlin, 2022.
- [7] Verein Deutscher Ingenieure e. V., VDI-Richtlinie 2166: Planung elektrischer Anlagen in Gebäuden – Hinweise für die Elektromobilität, Düsseldorf: Beuth Verlag, 2020.
- [8] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V., Ist-Daten-Schnittstelle Lademanagement – Betriebshofmanagement & ITCS, Köln, 2021.
- [9] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. <https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/ASR/ASR-A1-8.html> (Abruf am 14.04.2023).
- [10] ISO 15118, Road vehicles — Vehicle to grid communication interface, Genf, 2022.
- [11] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. (DGUV), DGUV Regel 109-009: Fahrzeug-Instandhaltung, Berlin, 2000.
- [12] Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik, DIN EN 50191 VDE 0104: 2011-10, Frankfurt am Main: Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik, Errichten und Betreiben elektrischer Prüfanlagen.
- [13] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. (DGUV), DGUV-Information 203-034: Errichten und Betreiben von elektrischen Prüfanlagen, Berlin, 2006.
- [14] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. (DGUV), DGUV-Regel 103-011: Arbeiten unter Spannung an elektrischen Anlagen und Betriebsmitteln, Berlin, 2006.

- [15] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. (DGUV), DGUV-Information: 209-093: Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvolt-systemen, Berlin, 2021.
- [16] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. (DGUV), DGUV Vorschrift 3: Elektrische Anlagen und Betriebsmittel, Berlin, 1997.
- [17] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V., VDV-Mitteilung 5701: Verantwortliche Elektrofachkraft (vEFK) im Aufgabengebiet des ÖPNV, Berlin: Beka-Verlag, 2021.
- [18] Verwaltungs-Berufsgenossenschaft (VBG), VBG-Fachwissen: Umgang mit Bedrohungen und Notfällen, Hamburg, 2022.
- [19] DIN 14090, Flächen für die Feuerwehr auf Grundstücken, Berlin: Beuth-Verlag, 2023.
- [20] DIN 14095, Feuerwehrpläne für bauliche Anlagen, Berlin: Beuth-Verlag, 2007.
- [21] VdS Schadensverhütung GmbH, Brandschutz im Betrieb, Köln, 2013.
- [22] VdS Schadensverhütung GmbH, VdS 0825, Gesamtverband der deutschen Versicherungswirtschaft e. V. – GDV, 2022.
- [23] D. Heusser, A. Appel, W. Klebsch, J. Koch, R. Petri, N. Lahdo, A. Schmidt, D. Urmann und H. Pontzen, Wasserstoff in der Mobilität, Frankfurt am Main: VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., 2021.
- [24] Sphera, Transformationsprozess zu emissionsfreien Bussen im Kontext der Clean Vehicles Directive (CVD-Studie), Stuttgart: WBO – Verband Baden-Württembergischer Omnibusunternehmen e. V., 2021.
- [25] NOW GmbH, Wasserstoffverbrennungsmotor als alternativer Antrieb, Berlin, 2021.
- [26] NOW GmbH, Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV, Berlin, 2022.
- [27] NOW GmbH, Genehmigungsleitfaden für Wasserstoff-Stationen, Berlin, 2022.
- [28] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V. (DGUV), DGUV Information 209-072: Wasserstoffsicherheit in Werkstätten, Berlin, 2021.
- [29] Zentralverband der Deutschen Elektro- und Informationstechnischen Handwerke (ZVEH), E-Check E-Mobilität, Frankfurt am Main, 2017.
- [30] Acea – Driving Mobility for Europe, The Automobile Industry. Pocket Guide 2021/2022, 2021.
- [31] NOW GmbH, Zweiter Förderaufruf für alternative Antriebe von Bussen im Personenverkehr, Berlin, 2022.
- [32] Sustainable Bus Magazine, Optimizing E-Bus Fleets. Increasing Usable Lifetime & Safety. Decreasing TCO, 2022.
- [33] Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Forschung zur Ladeinfrastruktur für Elektrobusse, Hamburg, 2020.

- [34] The Mobility House, Firmenflotten intelligent laden, München, 2021.
- [35] M. Nallinger, Brennstoffzellen für Langstrecken, Batterien für Städte, HZwei, 2022 04.
- [36] The Mobility House, Checkliste für die Umsetzung von Ladeinfrastruktur, München, 2022.
- [37] Fraunhofer IAO, Abschlussbericht Elektrischer Schwerlastverkehr im urbanen Raum, Stuttgart, 2021.
- [38] L. Ronker, Fahrzeugdepots – Gefahren identifizieren und Risiken managen, Köln: GenRe, 2022.
- [39] NOW GmbH, Projektübersicht 2019/2020, Zero Emission Busse in Deutschland, Berlin, 2021.
- [40] BG-Fachwissen, Elektromobilität – Arbeiten an Omnibussen mit Hochvolt-Systemen, Bochum, 2016.
- [41] NOW GmbH, Datenpitch Elektrobusse, Berlin, 2022.
- [42] PEM RWTH Aachen, Strategien zur Erreichung der Emissionsziele im Nutzfahrzeugsektor, Aachen: RWTH Aachen, 2022.
- [43] NOW GmbH, Kommunale Elektromobilitätskonzepte Motivation und Hemmnisse bei der Einführung von Elektrobussen, Berlin, 2021.
- [44] Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Fortschrittsbericht zum Gesamtkonzept klimafreundlicher Nutzfahrzeuge, Berlin, 2022.
- [45] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Marktübersicht Elektro- und Wasserstoffbusse, Wien, 2021.
- [46] Verband der deutschen Automobilindustrie e. V., Technische Quarantäneflächen für beschädigte Fahrzeuge mit Lithium-Ionen-Batterien, Berlin, 2022.
- [47] Nationale Plattform Elektromobilität, Ladeinfrastruktur Elektromobilität Version 4, Frankfurt: DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik, 2021.
- [48] NOW GmbH, Zweiter Förderaufruf von Machbarkeitsstudien zur Einsatzmöglichkeit von Bussen mit emissionsfreien Antrieben, Berlin, 2023.
- [49] NOW GmbH, Gesetzeskarte Elektromobilität im ÖPNV, Berlin, 2022.
- [50] ISO 17840-2:2019-04 , Straßenfahrzeuge – Informationen für Ersthelfer und Rettungskräfte – Teil 2: Rettungsdatenblätter für Busse, Reisebusse und Nutzfahrzeuge, Berlin: Beuth Verlag, 2019.
- [51] Verwaltungs-Berufsgenossenschaft (VBG), VBG.de, 2022. https://www.vbg.de/DE/3_Praevention_und_Arbeitshilfen/1_Branchen/09_OePNV_und_Bahnen/7_Omnibusbetriebe/Elektromobilitaet/6_Elektromobilitaet_node.html (Abruf am 14.04.2023).
- [52] NOW GmbH, „Förderfinder“. <https://www.now-gmbh.de/foerderung/foerderfinder> (Abruf am 14.04.2023).

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematischer Aufbau der zu adressierenden Themen am Beispiel eines Betriebs mit batterieelektrischen Bussen	5
Abbildung 2:	Übersicht Elektrische Busse. Teil 1 – Antriebskonzepte	6
Abbildung 3:	Übersicht Elektrische Busse. Teil 2 – Versorgungsinfrastruktur	7
Abbildung 4:	Projektphasen bei der Umstellung auf emissionsfreie Antriebe	10
Abbildung 5:	Schaubild Elektrobus	11
Abbildung 6:	Funktionsprinzip eines Depotladers	13
Abbildung 7:	Funktionsprinzip eines Gelegenheitsladers	14
Abbildung 8:	Funktionsprinzip eines Pulsaders	15
Abbildung 9:	Schaubild eines Oberleitungsbusses	16
Abbildung 10:	Einfluss der Umlaufrichtung auf den Energiebedarf der Busse	17
Abbildung 11:	Auswirkungen des Wirkungsgrades auf den Gesamtenergiebedarf am Beispiel einer DC-Ladesäule	19
Abbildung 12:	Grundsätzlicher Aufbau eines Lastmanagementsystem	22
Abbildung 13:	Aufbau der Ladeinfrastruktur am Betriebshof	24
Abbildung 14:	Anpassungen der Abstellordnung durch den Platzbedarf der Ladeinfrastruktur	25
Abbildung 15:	Aufbau des CCS-Steckers	26
Abbildung 16:	Schaubild Panthographenladung	27
Abbildung 17:	Mindestmaße einer gesicherten Ruhefläche	30
Abbildung 18:	Schaubild eines Brennstoffzellen-Hybridbusses	36
Abbildung 19:	Schaubild eines Brennstoffzellenbusses mit Range-Extender	36
Abbildung 20:	Wasserstoffinfrastruktur	38
Abbildung 21:	Mögliche Einsparungen von CO ₂ durch den Einsatz verschiedener Technologien	44

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Kommunikationsschnittstellen für die Einbindung von Ladestationen	27
Tabelle 2:	Faktoren für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	42
Tabelle 3:	Kostenvergleich der möglichen Alternativen zueinander auf Basis der TCO-Berechnung	43

Begriffsverzeichnis

	Abkürzung	Erläuterung
	(v)EFK	(verantwortliche) Elektrofachkraft
A	AC	<i>Alternating Current</i> Wechselspannung
	ADR	<i>Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road</i> Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße
	ATEX- Direktive	Aspekte des Explosionsschutzes
B	BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i> batterieelektrisches Fahrzeug
	BG	Berufsgenossenschaft
	BHMS	Betriebshofmanagementsystem
	BMS	Batterie Management System
	BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
	BZ	Brennstoffzellenfahrzeug
	BZ-REX	Brennstoffzellenfahrzeug mit Range Extender
C	CapEx	<i>Capital Expenses</i> Investitionsausgaben
	CCS	<i>Combined Charging System</i> kombiniertes Ladesystem
	CO	Kohlenstoffmonoxid
	CO ₂	Kohlenstoffdioxid
	C-Rate	Laderate Stromstärke, mit der eine Batterie ge- und entladen werden kann
D	DC	<i>Direct Current</i> Gleichspannung
	DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
	DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
E	EitBauVO	Verordnung über den Bau von Betriebsräumen für elektrische Anlagen
	Energiedichte	Maß für den Energieinhalt pro Masse oder pro Volumen Wh/kg oder Wh/l
F	FCEV	<i>Fuel Cell Electric Vehicle</i> Brennstoffzellenfahrzeug
G	GDV	Gesamtverbands der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V.
H	H ₂	Wasserstoff
	HV	Hochvolt Wechselspannung: 30 – 1000 V Gleichspannung: 60 – 1500 V
K	KMU	kleines oder mittleres Unternehmen
	kW	Einheit der Leistung
L	LBO	Landesverband Bayerischer Omnibusunternehmen e. V.
	Leistungsdichte	Leistung pro Masse W/kg
	LFP	Lithium-Eisenphosphat-Oxid
	LIB	Lithium-Ionen-Batterie
	LIS	Ladeinfrastruktur
	LMS	Lade-Managementsystem

	Abkürzung	Erläuterung
N	NMC	Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid
	NOW GmbH	Nationale Organisation Wasserstoff-und Brennstoffzellentechnologie
	NOx	Stickoxide
O	OCPP	<i>Open Charge Point Protocol</i> universelles Anwendungsprotokoll, zur Kommunikation zwischen Ladestationen und Managementsystem
	OpEx	<i>Operational Expenses</i> Betriebsausgaben
	ÖPNV	Öffentliche Personennahverkehr
P	PSA	Persönliche Schutzausrüstung
	PV	Photovoltaik
R	RED II	<i>Renewable Energy Directive II</i> Erneuerbaren Energien Direktive II
	REX	<i>Range Extender</i> Reichweitenverlängerer
S	SoC	<i>State-of-Charge</i> Ladezustand der Antriebsbatterie
	SoH	<i>State-of-Health</i> z. B. alterungsbedingte Restkapazität bezogen auf ursprüngliche Nennkapazität
T	TCO	<i>Total Cost of Ownership</i> Gesamtbetriebskosten
	THG	Treibhausgas
	TIS	Tankinfrastruktur
U	UwV	Unfallverhütungsvorschrift
V	VBG	Verwaltungs-Berufsgenossenschaft
	VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
	VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
	VdS	VdS Schadenverhütung GmbH
Z	VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V.
	ZVEH	Zentralverband der Deutschen Elektro- und Informationstechnischen Handwerke

Zusatzinformationen

Herausgeber	Art	Dokument
Verwaltungs-Berufsgenossenschaft (VBG)	Leitfaden	Elektromobilität –Arbeiten an Omnibussen mit Hochvolt-Systemen
	Praxishilfen für Qualifizierung	Ermittlung der notwendigen Qualifikation von Beschäftigten für Arbeiten an Bussen mit HV-Systemen
		Ermittlung der Qualifizierungsmaßnahme für Arbeiten im spannungsfreien Zustand an Bussen mit HV-Systemen
		Ermittlung der Qualifizierungsmaßnahme für Fehlersuche und Prüfarbeiten unter Spannung an Bussen mit HV-Systemen
		Qualifikationsmatrix
		Inhalte der Lehreinheiten
		Muster-Bestellurkunde zur Beauftragung einer verantwortlichen Elektrofachkraft HV-Bus-vEfK
		Musterzertifikat für die Qualifizierung
		Qualifizierungsinhalte der Qualifizierungsmaßnahmen HV-Bus 1 bis HV-Bus 4
		Qualifizierungsmaßnahme HV-Bus 0a: Sensibilisierung für Reinigungstätigkeiten an HV-Bussen
		Qualifizierungsmaßnahme HV-Bus 0b: Sensibilisierung für das Fahren von HV-Bussen
		Qualifizierungsmaßnahme HV-Bus 1: Unterweisung für nichtelektrotechnische Tätigkeiten an HV-Bussen
	Muster-Checklisten	Checkliste zur Erteilung der Berechtigung für Fehlersuche und Prüfarbeiten unter Spannung
		Eigencheck für Fehlersuche und Prüfarbeiten unter Spannung
		Checklisten für die Außerbetriebnahme und Inbetriebnahme des HV-Systems
	Muster-Betriebsanweisungen	Betriebsanweisung: Arbeiten an HV-Bussen und HV-Komponenten
		Betriebsanweisung: Arbeiten an HV-Bussen, die das HV-System nicht betreffen
		Betriebsanweisung: Elektrotechnische Arbeiten im spannungsfreien Zustand an HV-Bussen
		Betriebsanweisung: Freischalten von HV-Systemen
		Gefahrstoffanweisung: Umgang mit Lithium-Ionen-Batterien
		Betriebsanweisung: Arbeiten auf dem Dacharbeitsstand
		Betriebsanweisung: Fehlersuche und Prüfarbeiten unter Spannung
	Gefährdungsbeurteilungen	Muster-Gefährdungsbeurteilung: Organisation des Werkstattbetriebes
		Muster-Gefährdungsbeurteilung: Arbeiten am HV-Energiespeicher auf dem Dach
		Muster-Gefährdungsbeurteilung: Arbeiten an HV-Leistungselektronik und HV-Leitungssatz
		Muster-Gefährdungsbeurteilung: Arbeiten am HV-Traktionsantrieb
		Muster-Gefährdungsbeurteilung: Arbeiten an der HV-Heizung
		Muster-Gefährdungsbeurteilung: Arbeiten an HV-Klimaanlage
		Muster-Gefährdungsbeurteilung: Arbeiten mit der mobilen HV-Ladestation
		Muster-Gefährdungsbeurteilung: Arbeiten auf dem Dacharbeitsstand (mobil/stationär)

Herausgeber	Art	Dokument
Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV)	VDV-Schriften	VDV 260: DC Ladeinfrastruktur von E-Bussen
		VDV 261: Empfehlung zur Anbindung eines dispositiven Backends an einen Elektrobuss
		VDV 463: Ist-Daten-Schnittstelle zum Lademanagementsystem – Betriebshofmanagement & ITCS
		VDV 800: Qualifikation und Weiterbildung von Werkstattpersonal in der Fahrzeuginstandhaltung
		VDV 820: Werkstatteinrichtung für die Instandhaltung von Niederflurfahrzeugen
		VDV 822: Richtlinie für den Bau von Omnibus-Betriebshöfen
		VDV 825: Auswirkungen der „Clean Vehicles Directive“ im Linienbus auf Betriebshöfe und Werkstätten
	VDV-Mitteilungen	VDV 2303: Empfehlung zur Verhinderung von Brandschäden bei Linienbussen
		VDV 2313: Linienbusantriebe - technischer Stand und alternative Antriebe
		VDV 2319: Bewertung von E-Buskonzepten aus der Sicht von Planung und Betrieb
		VDV 4020: itcs und der Betrieb von e-Bussen – Betriebliche Prozesse und Daten für das itcs und das Betriebshof- und Lademanagement
VdS Schadenverhütung GmbH (VdS)	VdS 0825	Brandschutz in Betriebshöfen für Linienbusse
	VdS 2234	Brand- und Komplextrennwände
Verband Baden-Württembergischer Omnibusunternehmen e. V. (WBO)	Leitfaden	Transformationsprozess zu emissionsfreien Bussen im Kontext der Clean Vehicles Directive (CVD-Studie)
NOW GmbH	Online-Entscheidungswerkzeug zur Umstellung des Busbetriebs	eBus Tool
	Gesetzeskarte	Elektromobilität im ÖPNV
	Programmbegleitforschung Innovative Antriebe und Fahrzeuge	Innovative Antriebe im straßengebundenen ÖPNV
	Leitfaden	Leitfaden für Busse mit alternativen Antrieben
	Projektübersicht 2019/2020	Zero Emission Busse in Deutschland
Standardisierung Plug-In Systeme	Ladegerät	Sicherheit: IEC 60364
		Ladesäule: IEC 61851
		Ladeleitung: IEC 62893
		Kontaktsystem 62196
	Steuerung	OCCP 1.6 / 2.0. Künftig: IEC 63110
	Kommunikation	ISO 15118
	Kommunikation im Verbundladesystem	DIN SPEC 70121 / DIN SPEC 70122
	Elektrofahrzeuge	Sicherheit: ISO 17409
		Bordladegerät: IEC 61851
		Ladeleitung: IEC 62893
		Anforderungen Netzanschluss: ISO 17409

Herausgeber	Art	Dokument
Standardisierung Docking-Systeme	Ladegerät	Sicherheit: IEC 60364
		IEC 61851
	Kommunikation	ISO 15118
	Steuerung	OCCP 1.6 / 2.0. Künftig: IEC 63110
	Kommunikation im Verbundladesystem	DIN SPEC 70121 / DIN SPEC 70122
	Elektrofahrzeug	Sicherheit: ISO 17409
		Bordladegerät: IEC 61851
		Anforderungen Netzanschluss: ISO 17409
		Bordladegerät: IEC 61851
		Ladeleitung: IEC 62893
Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV)	DGUV 203-034	Errichten und Betreiben von elektrischen Prüfanlagen
	DGUV-Information 209-093 (200-005)	Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltssystemen
Kommunikationsprotokolle	Ladeeinheit ↔ Cloud / Server	OCPP 1.6
	Ladeeinheit ↔ Service Backend	OCPP 1.6
	Ladeeinheit ↔ Nutzfahrzeug	PLC (CCS & Panto Up): ISO 15118
		ACD (OppCharge über WiFi): ISO 15118
Normensammlung	DIN VDE 0100-600	Errichten von Niederspannungsanlagen
	DIN VDE 0100-722:2019-06	Prüfungen von Niederspannungsanlagen
	DIN VDE 0104	Anforderungen für Betriebsstätten, Räume und Anlagen besonderer Art – Stromversorgung von Elektrofahrzeugen
	DIN VDE 0105-100	Errichten und Betreiben elektrischer Prüfanlagen
	DIN EN 60529 (VDE 0470-1 Berechtigung 2: 2019-06)	Betrieb von elektrischen Anlagen
	DIN EN 61851-1 (VDE 0122-1)	Schutzarten durch Gehäuse
	IEC 62660	Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge
	ISO 6469-10:2019-04	Anforderungen an das Leistungsverhalten und die Sicherheit von Li-Ion Batterien
	DIN VDE 0100-600	Testverfahren Li-Ion Batterien

VDE Renewables GmbH
Siemensstrasse 30
63755 Alzenau
Tel. +49 69 6308 5300
renewables@vde.com
www.vde.com/renewables

VDE RENEWABLES