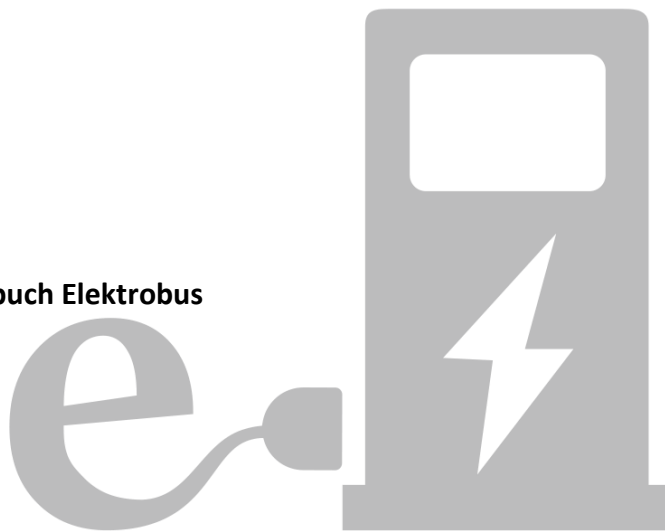


traffiQ

## Planung von Elektrobuslinien und ihrer Infrastruktur

Technisches Handbuch Elektrobus



Stand: 28. Juni 2019

**BPV Consult GmbH**  
Gesellschaft für Beratung  
und Projektmanagement  
im Verkehr

Löhrstraße 113  
56068 Koblenz

**Tel** +49 (0)261 - 20 16 50 - 0  
**Fax** +49 (0)261 - 20 16 50 - 99  
**Mail** [dialog@bpv-consult.de](mailto:dialog@bpv-consult.de)  
**Web** [www.bpv-consult.de](http://www.bpv-consult.de)

**Geschäftsführer**  
Dr. Christoph Zimmer

**Sitz der Gesellschaft**  
Amtsgericht Koblenz  
5 HRB 6685

**Steuernummer**  
22/650/1315/5

**Bankverbindung**  
Volksbank Koblenz Mittelrhein  
**BIC** GENODE51KOB  
**IBAN** DE87 5709 0000 1038  
5020 00

## Kontakt

**BPV** Consult GmbH

Gesellschaft für Beratung und Projektmanagement im Verkehr

Christian Schneider, Bereichsleiter E-Mobilität

Löhrstraße 113

56068 Koblenz

**Tel** +49 (0)40 · 38 67 79 72

**Fax** +49 (0)40 · 38 67 79 69

**Mail** christian.schneider@bpv-consult.de

**Datum:** 28.06.2019  
**Version:** 3.0



## Inhaltsverzeichnis

1.	Einführung .....	7
2.	Betriebskonzept: Batteriebus – Linie 52 & Linie 60.....	8
2.1.	Allgemeines zum Batteriebus .....	8
2.2.	Linie 52 .....	8
2.3.	Linie 60 .....	9
2.4.	Infrastruktur im Betriebshof .....	11
3.	Fahrzeuanforderungen hinsichtlich alternativer Antriebe .....	12
3.1.	Technische Anforderungen .....	12
3.1.1.	Antrieb .....	12
3.1.2.	Fahrwerk.....	12
3.1.3.	Fahrzeugaufbau .....	13
3.1.4.	Fahrerarbeitsplatz.....	14
3.1.5.	Heizung und Klimatisierung.....	15
3.1.6.	Geräuschemissionen.....	16
3.1.7.	Versorgungskomponenten .....	16
3.1.8.	Bordnetz .....	16
3.1.9.	Energiespeichersysteme .....	16
3.1.10.	Externe Energiezuführung .....	18
3.1.11.	Sicherheitsaspekte bezüglich der Hochvolttechnik.....	19
3.2.	Betriebliche Anforderungen .....	21
3.3.	Marktüberblick über Elektrobusse.....	22
4.	Schätzung des Fahrzeugbedarfs hinsichtlich alternativer Antriebe .....	24
5.	Grundanforderungen Ladeinfrastruktur .....	25
5.1.	Netzanschluss.....	25
5.2.	Ladetechnik und -kommunikation .....	27
5.2.1.	Kommunikation .....	28
5.2.2.	Abrechnungssystem .....	28
5.2.3.	Ladesteuerung .....	29
5.2.4.	Sicherheit.....	29
5.3.	Energieübertragungssystem .....	29
6.	Dimensionierung der Stromversorgung .....	31
7.	Anpassung des Betriebshofs für Elektrobusse .....	33
7.1.	Ladeinfrastruktur .....	33
7.2.	Abstell- und Flächenkonzept.....	34
7.3.	Fahrfertigmachen.....	35
7.4.	Werkstatt .....	35
7.4.1.	Werkstattinfrastruktur .....	35
7.4.2.	Arbeitsmittel.....	37
7.4.3.	Materialwirtschaft .....	39
7.5.	Personal.....	40
7.5.1.	Qualifizierung.....	40
7.5.2.	Ausbildung .....	41



## Abkürzungsverzeichnis

ABS	Anti-Blockier-System
AC	Wechselstrom (Alternative Current)
ASR	Antriebsschlupfregelung
BEV-Bus	Batteriebus (Battery Electric Vehicle)
BMS	Batteriemanagementsystem
BOStrab	Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen
CE	Europäische Gemeinschaft (Communauté Européenne)
Combo 2	Typ-2-Fahrzeugkupplung, die mit zwei zusätzlichen Gleichstrom-Steckerpolen erweitert worden ist
C-Rate	Bezeichnet die Geschwindigkeit, mit der eine Batterie sich aufladen bzw. entladen kann.
DC	Gleichstromladung
EBS	Elektronisch geregeltes Bremssystem
E-Bus	Elektrobus
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
GIS	Geografisches Informationssystem
HV-System	Hochvolt-System
ITCS	Intermodal Transport Control System; früher RBL Rechnergesteuertes Betriebsleitsystem
LCC	Life Cycle Costing ist der englische Begriff für Lebenszykluskostenrechnung von der Erstellung bis zur Aussonderung
LFP	Lithium-Eisenphosphat
LMS	Lademanagementsystem
NMC	Nickel-Mangan-Kobalt
PLC	Power Line Communication
Poly	Lithium-Polymer
PSA	Persönliche Schutzausrüstungen
SoC	State of Charge, bezeichnet den Ladestand der Batterie
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik e.V., Frankfurt a.M.
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V., Köln

## Verzeichnis für physikalische und andere Einheiten

km	Kilometer
kV	Kilovolt
kVA	Kilovoltampere
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunden
m	Meter
mA	Milliampere
min	Minuten
mJ	Millijoule
MVA	Megavoltampere
V	Volt

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Aktueller Marktüberblick über Solobusse (12 Meter).....	22
Tabelle 2: Werkzeuge und Werkstattausrüstungen .....	39



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Ladestrategie der Linie 52 .....	9
Abbildung 2:	Ladestrategie der Linie 60 .....	10
Abbildung 3:	Beispielhafter Fahrzeugaufbau eines Elektrobusses .....	13
Abbildung 4:	Beispiel eines Fahrerdisplays .....	14
Abbildung 5:	Heizung eines Elektrobusses .....	15
Abbildung 6:	Batteriepack auf dem Fahrzeugdach .....	17
Abbildung 7:	Buchsen im Fahrzeug (Beispiel) .....	19
Abbildung 8:	Batteriekapazität je Bushersteller .....	23
Abbildung 9:	Schematische Übersicht der Ladeinfrastruktur .....	25
Abbildung 10:	Beispiel für einen Anschluss am DC-Oberleitungsnetz .....	26
Abbildung 11:	Trafostation auf dem Betriebshof in Münster .....	27
Abbildung 12:	Combo 2: DC-Ladung bis zu 170 kW .....	30
Abbildung 13:	Ladelastkurve der Linien 52 & 60 in Frankfurt .....	31
Abbildung 14:	beispielhafte Optimierung einer Ladelastkurve .....	32
Abbildung 15:	Ladepunkte am Betriebshofrand bzw. an der Hallendecke .....	33
Abbildung 16:	Abstellkonzept im Betriebshof Waterloo (London) .....	34
Abbildung 17:	Hocharbeitsstände im Betriebshof .....	36
Abbildung 18:	Absturzsicherung .....	36
Abbildung 19:	Lastenkran .....	36
Abbildung 20:	Gefahrbehälter für Batterien .....	37
Abbildung 21:	Messgeräte .....	38
Abbildung 22:	Isoliertes Werkzeug nach DIN EN 61477 [23] und DIN EN 60900 [24] ..	38
Abbildung 23:	Schutzhandschuhe .....	39
Abbildung 24:	Augen- und Gesichtsschutz .....	39
Abbildung 25:	Qualifikationspyramide .....	40



## 1. Einführung

Die Basis für dieses Handbuch bildet ein abgestimmtes Betriebskonzept für die Linie 52 & 60: Batteriebus mit Overnight Charging bzw. Nachtladung. Bei der Linie 60 ist eine Zwischenladung in Heddernheim und der Stadtbahnzentralwerkstatt der VGF vorgesehen.

Informationen zu dem Anwendungsbeispiel, dem Betriebskonzept der Linien 52 & 60, sind im Text *kursiv* gekennzeichnet.

Das Ziel des Handbuchs ist einen Überblick über das gewählte Betriebskonzept und dessen Ergebnisse zu schaffen. Sowie Grundanforderungen für das damit definierte Elektromobilitätskonzept und dessen Technologien aufzuzeigen.

Hierzu wird im Kapitel 2 das oben aufgezeigte Betriebskonzept näher beschrieben. Der sich daraus ergebende Fahrzeugmehrbedarf wird im Kapitel 2 und ebenfalls im Kapitel 4 „Schätzung des Fahrzeugbedarfs hinsichtlich alternativer Antriebe“ näher begründet.

Im Kapitel 3 werden die technischen und betrieblichen Anforderungen an Elektrobusse näher beschrieben und vorgegeben. Die Basis hierfür ist die VDV-Schrift 230/1.

Das Kapitel 5 befasst sich mit der Ladeinfrastruktur für Batteriebusse und gibt einen Überblick über deren Anforderungen. Im Kapitel 6 wird die Frage der notwendigen Dimensionierung der Anschlussleistung beschrieben.

Die Anforderungen an einen zukünftigen Betriebshof, dessen Stellplatzsystem sowie Werkstattthemen werden im Kapitel 7 näher beleuchtet.

Das vorliegende Handbuch kann als Anforderungsbeispiel für weitere Elektromobilitätskonzepte bzw. Veränderungsprozesse in die Elektromobilität verwendet werden.



## 2. Betriebskonzept: Batteriebus – Linie 52 & Linie 60

### 2.1. Allgemeines zum Batteriebus

Ein Batteriebus, auch Elektrobus oder E-Bus und international BEV-Bus (Battery Electric Vehicle) genannt, ist ein Omnibus, der von einem Elektromotor angetrieben wird und seine Antriebsenergie während der Fahrt wie ein Elektroauto ausschließlich aus mitgeführten Traktionsbatterien bezieht. Da diese Batterien aufladbar sind, müssten diese Busse eigentlich Akkumulatorenbus oder Akkubus genannt werden, aber die Bezeichnung Batteriebus hat sich durchgesetzt. In diesem Handbuch wird im weiteren Text auch nur die Bezeichnung **Batteriebus** verwendet.

Teilweise sind Batteriebusse für den Ladevorgang mit Stromabnehmern ausgerüstet, die sowohl an Haltestellen als auch im Depot die Nachladung, sogenanntes Opportunity Charging, ermöglichen. Werden dabei Superkondensatoren (Supercaps) als Stromspeicher im Bus verwendet, können größere Energiemengen in kürzerer Zeit, sogar an Haltestellen während des Fahrgastwechsels, gespeichert werden. Systemtechnisch sind diese Busse in der Regel mit weniger Batterien und geringerer Batterieleistung ausgestattet.

*Für die Linien 52 & 60 ist eine Overnight Charging ggf. tagsüber mit Opportunity Charging mit Ladestecker vorgesehen. Eine Variante mit Stromabnehmer (Pantograph) ist nicht vorgesehen.*

Batteriebusse mit größerer Batterieleistung werden normalerweise über Ladesäulen mit Kabel und Steckerverbindung geladen. Im deutschen ÖPNV hat sich dabei das Overnight Charging etabliert. Die Batteriebusse werden dabei in ihrem Depot nach Betriebsschluss geladen, tagsüber im betrieblichen Einsatz erfolgt in der Regel keine Ladung.

Durch die Batterietechnik können auch im straßengebundenen ÖPNV die Vorteile der Elektromobilität genutzt werden. Vorteile des Batteriebusses gegenüber den Dieselnissen sind vor allem der abgasfreie und geräuscharme Betrieb, die bessere Beschleunigung sowie die Möglichkeit zur Rückgewinnung von Bremsenergie durch eine Nutzbremse (Rekuperation). Mit einem Verbrauch von etwa 1,2 kWh/km sind die Betriebskosten im Vergleich zu einem Dieselfahrzeug sehr gering. Von Nachteil sind beim Batteriebus die bisher begrenzte Reichweite (aktuell um die 200 bis 250 km), die an kalten Winter- und heißen Sommertagen noch sinkt (Energiebedarf für Heizung oder Klimatisierung). Nachteil sind auch die höheren Beschaffungskosten und die Investitionskosten für die notwendige Ladeinfrastruktur. Die Beschränkung der Reichweite führt dazu, dass ggf. kürzere Umläufe geplant werden müssen, woraus auch ein erhöhter Fahrzeugbedarf entstehen kann.

### 2.2. Linie 52

Basierend auf dem bestehenden und gefahrenen Dieselnissenbetriebskonzept sowie den Anforderungen der traffiQ und dem daraus resultierenden Umlaufenergiebedarf ergibt sich für die Linie 52 (Abbildung 1) die Ladestrategie Overnight Charging mit anschließender Umlaufanpassung.





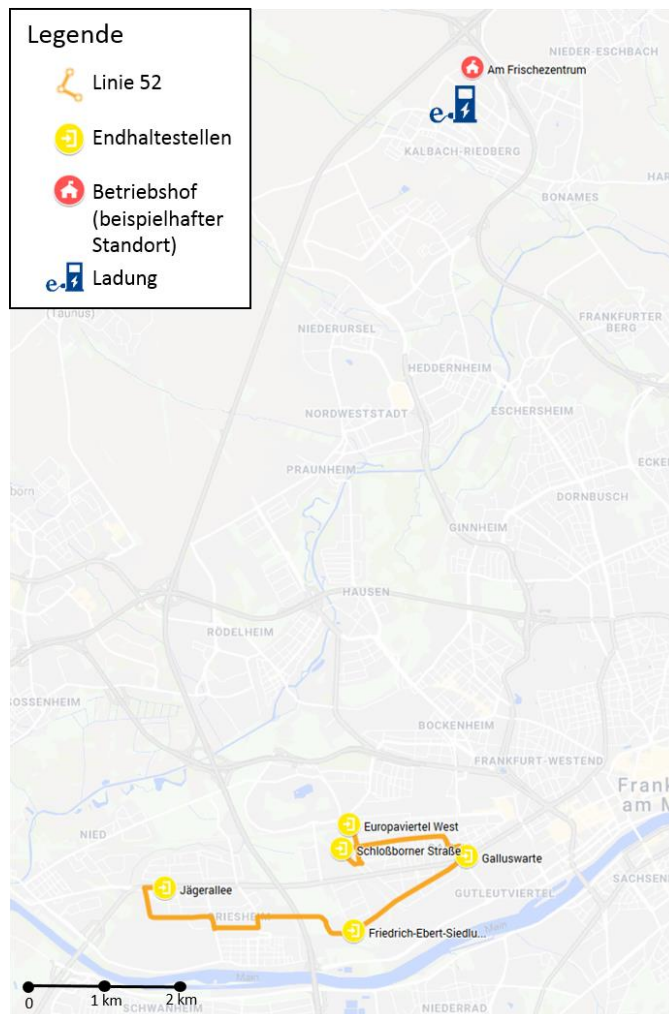


Abbildung 1: Ladestrategie der Linie 52  
 Grundlage: Google Maps

Nach Berechnung des Energiebedarfs der Umläufe ergibt sich eine erforderliche Batteriekapazität von 427 kWh pro Fahrzeug um die gleiche Flexibilität und Umlaufgestaltung wie beim Dieselsbusbetrieb zu erhalten. Hierbei ist allerdings die Bandbreite der Umlaufängen, zwischen 20 – 300 km, sehr hoch. Aus diesem Grund wurden Fahrten effektiver und ausgewogener bezgl. ihres Energiebedarfs bzw. ihrer Umlaufänge angepasst.

Dafür hat sich eine erforderliche Batteriekapazität von 241 kWh ergeben. Dieser Wert ist die nutzbare Batteriekapazität oder Netto-Batteriekapazität, die während der gesamten Lebensdauer der Batterie zur Verfügung stehen muss.

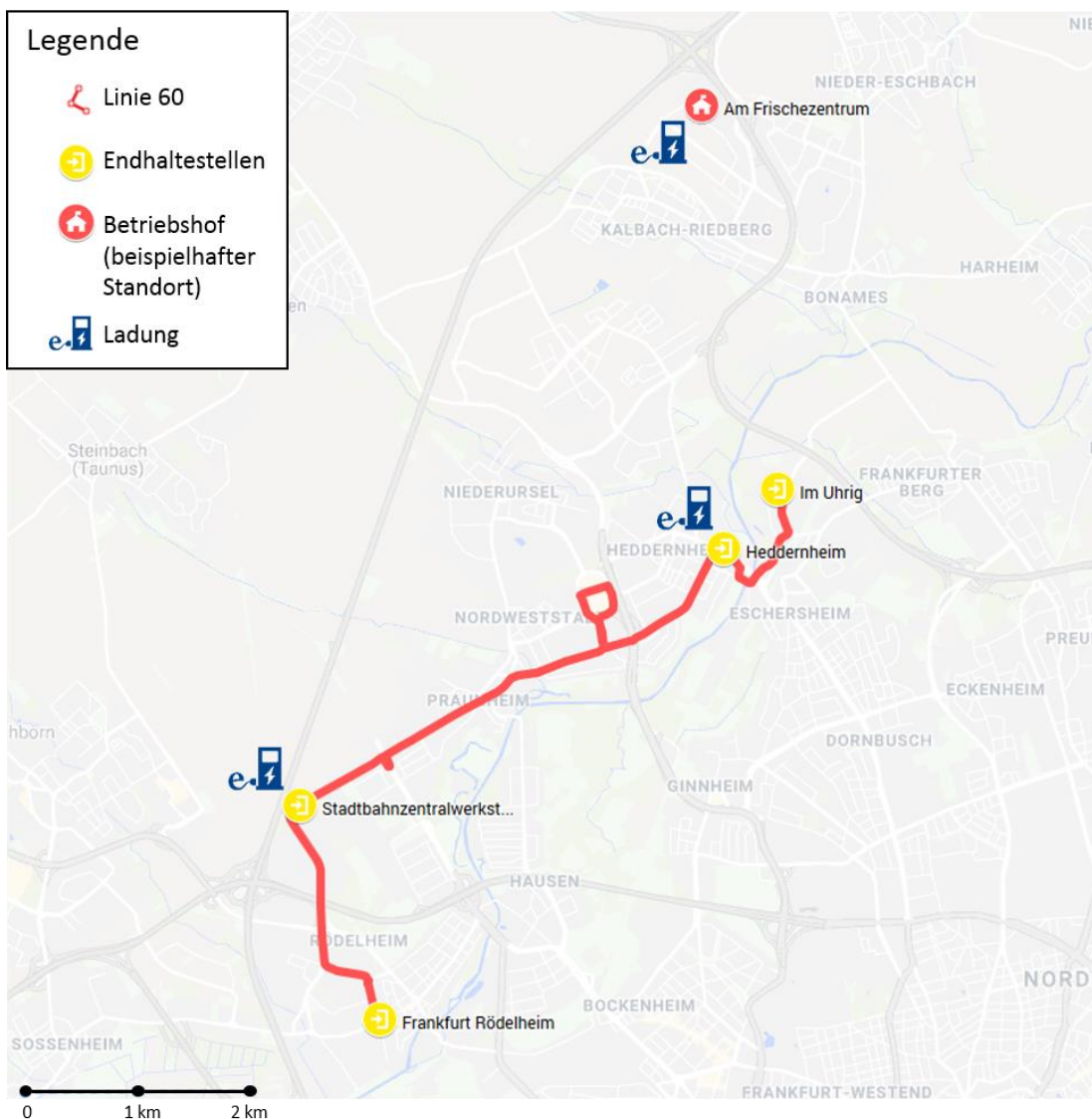
### 2.3. Linie 60

Die Linie 60 und dem verbundenen bestehenden Betriebskonzept erfordert aufgrund des erhöhten Energiebedarfs (452 kWh für den längsten Umlauf) eine angepasste Overnight Charging-Strategie. Die Anpassung erfolgt durch die Betrachtung eines möglichen Opportunity Charging in Heddernheim und an der Stadtbahnzentralwerkstatt sowie einer ausgewogenen Fahrtenverteilung auf kürzere Umläufe. Alternativ zum Opportunity Charging wäre hierbei ein Fahrzeugmehrbedarf erforderlich.

Datum: 28.06.2019  
 Version: 3.0



Opportunity Charging erfolgt in der Regel mit Schnellladung, wobei die erforderliche Batteriekapazität geringer als bei Overnight Charging ist. Bei dem hier betrachteten Konzept wird das Opportunity Charging allerdings nicht als Hauptladevorgang angesehen, bei dem die Busse häufig und getaktet aufgeladen werden, sondern nur als Unterstützung bzw. Ergänzung des Overnight Charging. Das Opportunity Charging kann als Langsamladung erfolgen. Somit wird die Batterie schonend aufgeladen, was wiederum positive Auswirkungen auf die Lebensdauer der Batterie hat. Voraussetzung für die aufgezeigte Strategie ist, dass ausreichend Ladezeit zwischen den Fahrzeugeinsätzen am Tag vorhanden ist. Der Hauptvorteil wäre somit, dass die generelle erforderliche nutzbare Batteriekapazität der Fahrzeuge über beide Linien (52 & 60) gleich wäre und somit ein Fahrzeugtausch und eine ausgewogene Umlaufbildung über beide Linien möglich ist. Des Weiteren sind die Ladesystemanforderungen für alle Ladepunkte gleich.



Datum: 28.06.2019  
Version: 3.0

Abbildung 2: Ladestrategie der Linie 60  
Grundlage: Google Maps



Durch die Umplanung der Umläufe können neue Zeitlücken erzeugt werden, in denen ein Opportunity Charging möglich ist. Der Weg von den Haltestellen bis zum Ladepunkt wurde berücksichtigt. Ein Puffer von 1/6 der vorherigen Fahrzeit wurde eingeplant, mit mindestens 3 Minuten Rüstzeit bevor das Fahrzeug effektiv nachladen darf.

Eine neue Berechnung der erforderlichen Batteriekapazität wurde für drei Leistungshöhen des Opportunity Charging nachgewiesen (40, 80 und 120 kW). Mit der höchstens Stufe von 120 kW wurde die erforderliche Batteriekapazität auf 243 kWh ermittelt. Die Umplanung der Umläufe hat die Effizienz des Umlaufplans verschlechtert: neue Umsetzfahrten wurden eingeplant und die Ladezeiten generieren neue Standzeiten. Im Betriebshof Heddernheim und in der Stadtbahnzentralwerkstatt werden maximal ein Bus gleichzeitig nachgeladen.

#### **2.4. Infrastruktur im Betriebshof**

Wie für das Overnight Charging üblich, werden alle Busse nach Umlaufende im Betriebshof abgestellt und können geladen werden. Allerdings müssen vor dem Laden die üblichen betrieblichen Abläufe durchgeführt werden, nämlich die Vor- und Nachbereitung des Fahrens, die Innenreinigung und das Waschen. Es wurde davon ausgegangen, dass eine Stunde für die Abrüstzeit, die Innenreinigung und das Waschen ausreichend ist. Für die Aufrüstzeit sind 20 Minuten zusätzlich eingeplant. Der ausgewählte Betriebshof für das Projekt ist „Am Frischezentrum“, welcher als Referenzbetriebshof herangezogen wurde. Der Betriebshof steht in Zukunft nicht gesichert zur Verfügung. Er dient hierbei als Standort zur Generierung eines beispielhaften Betriebskonzeptes.

Das Overnight Charging muss über ein intelligentes Lademanagementsystem (LMS) erfolgen, damit die Gesamtleistung optimal verteilt wird. Basierend auf dem Ladezeitfenster und dem am nächsten Tag benötigten Energiebedarf je Einzelumlauf wird vom LMS entschieden, mit welcher Leistung und zu welchem Zeitpunkt das Fahrzeug geladen wird.

Die Vorkonditionierung der Batterie wurde ebenso zeitlich berücksichtigt. Dafür wird eine halbe Stunde mit der niedrigsten Ladeleistung aufgeladen, bevor höhere Leistungsstufen angewendet werden können. Es betrifft bei diesem Konzept allerdings nur den Fall, in dem der Bus mehr als zwei Stunden nach der Ankunft aufgeladen wird. Basierend auf diese Optimierung wird eine Anschlussleistung von 550 kW benötigt. Da das Lademanagementsystem eine optimale Verteilung der Leistungen ermöglicht, sind diese Ergebnisse als Maximum akzeptabel. Im Realbetrieb kann die Lastspitze noch weiter reduziert werden.



### 3. Fahrzeuganforderungen hinsichtlich alternativer Antriebe

Die zusätzlichen Fahrzeuganforderungen für Elektrobusse gegenüber Dieselnissen resultieren aus technischen und betrieblichen Anforderungen. Die technischen Anforderungen entwickeln sich aufgrund der geänderten Antriebstechnologie und bestehen aus den unterschiedlichen, für den elektrischen Betrieb erforderlichen Komponenten im Fahrzeug. Die betrieblichen Anforderungen basieren auf die zu erbringen Fahrleistung im Betrieb. Wie schon erwähnt, ist der Betrieb von Batteriebussen derzeit durch die heute mögliche Batterieleistung in ihrer Reichweite begrenzt. Aus diesem Grund müssen neue betriebliche Randbedingungen festgelegt werden, um einen reibungslosen Betrieb zu garantieren.

#### 3.1. Technische Anforderungen

Die technischen Anforderungen alternativer Antriebe sind in der VDV-Schrift 230/1 [1] ausführlich erläutert. Im Folgenden werden relevante Punkte als Auszug der VDV-Schrift 230/1 dargestellt. Es wird empfohlen, bei weiteren Überlegungen und Planungen die vollständige VDV-Schrift 230/1 zu berücksichtigen.

##### 3.1.1. Antrieb

Der Antrieb von Batteriebussen muss durch effiziente und geräuscharme Elektromotoren erfolgen. Es gibt drei mögliche Elektromotortypen:

- ▶ Elektrischer Zentralmotor
- ▶ Radnaher Motor
- ▶ Radnabenmotor

Die Elektromotoren müssen wartungsfreundlich, gut zugänglich montiert und auf die Life Cycle Costing (LCC) optimiert sein. Sie sind so zu dimensionieren, dass die geforderten Beschleunigungswerte des Betreibers erreicht werden. Ein hoher Wirkungsgrad zwischen Energiespeicher und Rad wird erwartet.

„Die Kühlung der Motoren muss automatisch geregelt“ und sie muss wartungsarm sein. „Bei luftgekühlten Fahrmotoren ist die Luft möglichst am Dach oder oberhalb der Fenster anzuzugeln.“

„Auf Verlangen des Betreibers sind Informationen zum Wirkungsgrad und Kennlinien des Antriebsstranges, der Motoren sowie der dazugehörigen Leistungselektronik anzugeben“.

„Motorlager mit gleichzeitiger Isolationsfunktion müssen so ausgeführt werden, dass der Isolationsgrad bei üblicher gebrauchsbewingter Verschmutzung (u.a. Streusalzeinsatz) sichergestellt ist.“

„Der Antriebsstrang muss den topographischen und den betrieblich geforderten Verhältnissen des Betreibers angepasst sein und darf die Anforderungen der VDV-Schrift 230 (Dieselbusse) nicht unterschreiten.“

##### 3.1.2. Fahrwerk

Die Bremsanlage muss so angelegt sein, dass ein Generatorbetrieb des Traktionsmotors zur Rekuperation der Bremsenergie mit hoher Rekuperationsrate möglich ist.

Bei Ausfall der elektrischen Bremse müssen die „gesetzlichen Verzögerungswerte der mechanischen Bremsanlage jederzeit gewährleistet werden“.

Die elektrische Bremse muss sowohl automatisch (für den Notfall) als auch manuell (z.B. für Werkstattaufenthalte) abschaltbar sein.

Anti-Blockier-Systeme (ABS), Antriebsschlupfregelung (ASR), elektronisch geregeltes Bremsystem (EBS) und elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP) müssen an die Besonderheiten einer elektrischen Traktion angepasst werden.

Aufgrund von höheren Dachlasten durch die oben eingebauten Batterien und dadurch einen höheren Schwerpunkt des Fahrzeuges müssen einige Vorkehrungen getroffen und dargestellt werden. Es sind beispielweise angepasste Stoßdämpfer und Federungssysteme einzusetzen.

### 3.1.3. Fahrzeugaufbau

Bei Batteriebussen und Brennstoffzellenbussen sind zusätzliche Komponenten zu integrieren bzw. anzupassen:

- ▶ Elektromotoren (Antrieb)
- ▶ Energiespeicher (Batterie bzw. Wasserstofftank)
- ▶ Schnittstelle zur Energiezuführung (Ladesäule bzw. Pantograph)

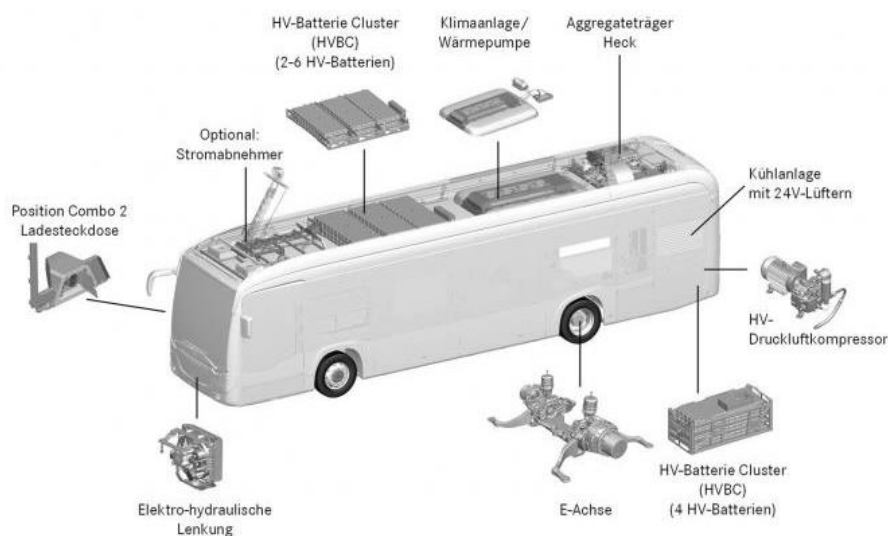


Abbildung 3: Beispielhafter Fahrzeugaufbau eines Elektrobusses  
Quelle: AKASOL AG

Es werden in der VDV-Schrift 230/1 keine Verpflichtungen dargestellt, an welchem Einbauort die Energiespeicher und die Fahrmotoren im Fahrzeug eingebaut werden sollen. Stattdessen wird das Einhalten folgender Randbedingungen gefordert:

- ▶ „Der Einbauort der Fahrmotoren muss so gewählt sein, dass der Wärme- und Lärmeintrag in den Fahrgastraum gering ist. Antriebsvibrationen müssen zuverlässig vom Fahrgastraum entkoppelt sein, die gesetzlichen Achslasten müssen eingehalten werden.“
- ▶ Beim Aufbau des Fahrzeugsystems ist eine ausgewogene Massenverteilung zu achten, insbesondere bei Achs- und Radlasten.

Datum: 28.06.2019  
Version: 3.0



Bei der Energiezuführung über Ladestecker sind die Plug-in-Anschlüsse an der rechten Fahrzeugseite im Bereich zwischen Achse 1 und Tür 2 anzuordnen.

„Abdeckungen und Hauben auf dem Fahrzeugdach“ [...] „müssen einmannfähig von einer der Längsseiten geöffnet und geschlossen werden können, damit kein Übertreten auf das Busdach notwendig ist.“ [...] „Dabei ist eine Anhebehilfe z. B. über Gasdruckfedern vorzusehen. Die Gesamthöhe des Fahrzeugs darf bei geöffneten Abdeckungen und Hauben 4,5 m nicht überschreiten, und dabei dürfen letztere im geöffneten Zustand nicht mehr als 1,8 m über das Fahrzeugdach hinausragen“.

Je nach Fahrzeug- und Sicherheitskonzept kann eine zweite Isolationsebene notwendig sein.

### 3.1.4. Fahrerarbeitsplatz

Es sind am Fahrerarbeitsplatz neue Anzeige- und Fahrerassistenzsysteme erforderlich.

Neue Informationen müssen im Zentraldisplay visualisiert werden können:

- ▶ Der Energieinhalt des Speichersystems (in physikalischer Größe und in Prozent vom nutzbaren Energieinhalt) sowie die Restfahrrreichweite
- ▶ Die voraussichtliche notwendige Ladezeit „zum Erreichen der Soll-Energieinhaltkurve der Batterie zum jeweiligen Einsatzzeitpunkt unter Berücksichtigung der aktuellen Ladeleistung“
- ▶ Der zu jedem Zeitpunkt benötigte Energieverbrauch und die rekuperierte Energie
- ▶ Neuer Status wie „Externe Ladung“, Onboard Charger (An/Aus), Betriebsmodi des Antriebes, Betriebsbereitschaft des HV-Systems
- ▶ Störungs- und Betriebsmeldungen des HV-Systems (einschließlich Energiespeicher-managementsystem), des dazugehörigen Kühlungssystems und der Traktionsaus-rüstung.



Abbildung 4: Beispiel eines Fahrerdisplays  
Quelle: SOLARIS Bus & Coach S.A.

Datum: 28.06.2019  
Version: 3.0

„Aktive Fahrerassistenz- und Steuerungselemente wie z.B. performanceorientierte Fahrpedalsteuerung (z.B. Forced Feedback Pedal) sollten in das Fahrzeug integriert werden.“





Zusätzliche Steuerungselemente sind notwendig und müssen ergonomisch am Fahrerarbeitsplatz angeordnet werden:

- ▶ Notschalter für die HV-Anlage mit Sicherheitseinrichtung gegen Wiedereinschalten
- ▶ Ein – und Ausschalter für die zusätzlichen Komponenten des Fahrzeuges: externes Energiezuführungssystem absenken/anlegen (Stromabnehmer), zuschaltbare Beleuchtung für externes Energiezuführungssystem (bei Überdachladesystemen) und das Onboard Charger (zur Überblendung der Zuschaltautomatik)
- ▶ Sonstige Komponente: mehrstufiger E-Bremshebel für Rekuperation

### 3.1.5. Heizung und Klimatisierung

Die Heizung und Klimatisierung kann unterschiedlich technologisch ausgelegt werden. Es wird in der Regel zwischen reiner elektrischer Heizung, Wärmepumpe und Brennstoffzusatzheizung unterschieden. Da die Anwendung von elektrisch-basierten Heizungen sehr energieintensiv ist, wird empfohlen eine Brennstoffzusatzheizung anzuwenden. Bei zukünftigen Fahrzeuggenerationen und den damit besseren Batterie- und Heizungssystemen sollte die Anwendung von elektrischen Heizungen sinnvoll nutzbar werden.

„Die Vorkonditionierung des Fahrzeugs umfasst das Klimatisieren und die Herstellung der Druckluftversorgung des Busses“ aus dem externen Ladesystem vor dem Einsatz bzw. in den Einsatzpausen. Vorgeheizte Fahrzeuge verbrauchen außerdem während des Betriebes für das Heizen weniger Energie.

Bei Vorkonditionierung darf während der externen Energiezuführung die Nachladung der Speicher nicht unterbrochen oder erheblich reduziert werden.

Die Vorkonditionierung kann durch ein Betriebshofmanagementsystem, durch Zeitschaltuhren oder von dem Intermodal Transport Control System (ITCS) angefordert werden. Das Verkehrsunternehmen legt die Vorgaben hierzu fest, z. B. Startzeit, Dauer der Vorkonditionierung, ggf. abhängig von Außentemperatur oder Energiepreis/-verfügbarkeit, Kommunikationsweg.

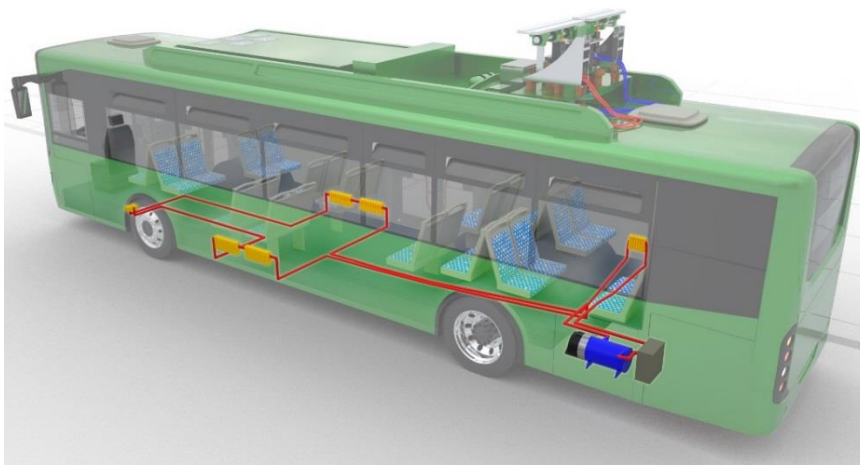


Abbildung 5: Heizung eines Elektrobusses  
Quelle: Chariot Motors AD

Datum: 28.06.2019  
Version: 3.0



### 3.1.6. Geräuschemissionen

Da Batteriebusse leiser sind als Dieselbusse, sind die Geräuschemissionen entsprechend der Vorgaben der VDV-Schrift 230 [2] zulässig. Hierbei sind folgende Punkte zu beachten:

- ▶ Die Lärmabstrahlung von auf dem Dach verbauten Komponenten ist weiterhin zu beachten.
- ▶ Die für den Fahrgast unangenehme Frequenzspektren (hochfrequente Schallwellen, die aus Hochvoltkomponenten, Kompressor oder Lenkhilfpumpe emittiert werden könnten) müssen über den gesamten Geschwindigkeitsbereich vermieden werden.

Ergebnisse von Frequenz-/Lärmmessungen sind durch den Hersteller nachzuweisen und die allgemeinen Grenzwerte einzuhalten.

### 3.1.7. Versorgungskomponenten

Der Kompressor „sollte mit einem Elektromotor angetrieben werden.“ [...] „Bei Fahrzeugen mit externer Energiezuführung ist die Druckluftherzeugung in die Vorkonditionierung zu integrieren. Der Kompressor ist so auszuführen, dass alle wartungs- und instandhaltungsrelevanten Kriterien optisch kontrolliert“ oder sensorisch erfasst werden können (z.B. Ölstand).

„Die Lenkhilfpumpe ist elektrisch angetrieben, sie kann optional über einen Hilfsantrieb mit der Antriebsachse oder einem Fahrmotor verbunden sein. Die Lenkhilfe muss bereits im Stand und im Rangierbetrieb voll funktionstüchtig sein.“

„Ist die Lenkhilfpumpe im HV-Kreis integriert, ist optional für Abschleppvorgänge ein Notantriebssystem im Bordnetzkreis anzubieten.“

### 3.1.8. Bordnetz

„Das Bordnetz (heute 24 V, perspektivisch Spannungsanhebung auf > 40V) wird mit einem Bordnetzwanandler aus dem HV-Kreis versorgt. Der Wandler ist für den maximal erforderlichen Strombedarf des Bordnetzes (einschl. Ladung Bordnetz Batterien) auszulegen.“

„Das System ist optional redundant auszuführen (z.B. Auslegung von zwei Bordnetzwandlern, zusätzliche Bordnetzversorgung).“

### 3.1.9. Energiespeichersysteme

Es ist in dem Fahrzeugkonzept ein geeignetes Energiespeichersystem (Batterie) vorzusehen. „Der Anbieter hat auf Basis der vom Betreiber vorgegebenen Kriterien für Ladeinfrastruktur, Traktionsanforderung, Linieneinsatzcharakteristik, Einsatzbedingungen etc. die Eignung seines angebotenen Energiespeichers nachzuweisen.“

„Das elektrische Speichersystem muss Strombedarfsspitzen im elektrischen HV-Zwischenkreis (zentraler Energieversorgungskreis) aussteuern können.“

„Im Einsatz muss sichergestellt werden, dass Fehlerzustände und Störungen, die einen gefährlichen Zustand erzeugen können, erkannt werden und das Fahrzeug in einen sicheren Zustand (Abschalten der Energiespeicher) überführt wird. Unregelmäßigkeiten müssen im zentralen Störmelddisplay mit Klartextfehlermeldung/Fehlernummer angezeigt werden.“

„Zustandsdaten des Energiespeichers müssen für Wartung und Instandhaltung über das Diagnosesystem auslesbar sein.“



Es „ist vom Anbieter die optimale Auswahl der Batteriezellen im Hinblick auf die Fahrzeugsicherheit, Spannungsebene, Ladestrom und Spitzenstromabgabe, Batteriekapazität, Gewicht des Batteriesystems und LCC vorzunehmen. Die Anforderungen an die Funktionsfähigkeit des Batteriesystems müssen sowohl im Betrieb wie auch in der Lagerung (Aufbewahrung beim Betreiber) den klimatischen Bedingungen des Betreibers entsprechen.“

„Der Anbieter hat die kleinste zu tauschende Einheit der Batterie (Zell- oder Modulebene) anzugeben und zu bepreisen.“

Für die Überwachung der Zellspannungen, -ströme und -temperaturen zur Bestimmung des SoC und zur Diagnose (Fehlererkennung) muss ein Batteriemanagementsystem (BMS) vorhanden sein.

Die Batterie muss so konstruiert „werden, dass im Falle eines Kurzschlusses der Versorgungsleitungen, unabhängig vom Widerstand des Kurzschlusses, die Batteriezellen keinen Schaden erleiden.“

„Im Fall einer potenziellen Überladung oder Tiefenentladung muss sich die Batterie selbst vom angeschlossenen Verbraucher trennen (EN DIN 13849 [3]). Dies soll über ein integriertes Leistungsschutz geschehen. Das Schütz liegt im positiven Leistungsweig (Mindestanforderung) bzw. schaltet allpolig (optimal) und wird vom BMS kontrolliert.“

Die Batterie „kann mit einem redundanten Isolationswächter ausgelegt sein. Dabei ist sicherzustellen, dass sich die Isolationswächter des Fahrzeugs und der Batterie und ggf. des Ladesystems nicht gegenseitig beeinträchtigen. Weiterhin muss neben dem Leistungsschutz ein allpoliges Schütz (möglichst mit Schützüberwachung mit zwangsgeführten Hilfskontakten) integriert sein, das im Fehlerfall die Batterie sicher vom HV-Netz trennt. Die Lebensdauer des Schützes sollte 100.000 lastfreie Schaltzyklen übersteigen. Ein integriertes Indikationssystem sollte Aufschluss darüber geben, wann die zugelassene Anzahl an Schaltzyklen erreicht ist.“

„Das Balancing der Batterie ist automatisch während des Ladens über die externe Energiezuführung sicherzustellen. Das BMS muss bei einem zusätzlich notwendigen Balancing-Bedarf einen Servicehinweis auf das Fahrerdisplay geben.“

„Die Batteriezellen sind entsprechend ihrem Einsatz und Ladebedingungen optimal zu klimatisieren, sodass eine thermische Überbelastung vermieden wird, jederzeit die maximale mögliche Ladung erfolgen kann und die Batterielebensdauer nicht beeinträchtigt wird.

Es ist bei Ladungen mit hohen C-Raten vorzugsweise eine Flüssigkeitskühlung vorzusehen“



Abbildung 6: Batteriepack auf dem Fahrzeugdach  
Quelle: AKASOL AG

### 3.1.10. Externe Energiezuführung

„Die externe Energiezuführung bedingt in Abhängigkeit von der speisenden Stromquelle technische Sicherheitsstandards (z. B. doppelte Isolation auf Fahrzeugen, bei Fahrzeugen ohne doppelte Isolation bis zu 5-poligen Übertragungssystemen und/oder isoliertes Netz) und bestimmte Zulassungs- und Genehmigungsverfahren.“

Befindet sich das Ladegerät im Batteriebus (Onboard Charger), muss das Fahrzeug Schwankungen des speisenden Stromnetzes gemäß EN 50163 [4] ausgleichen. „Der Anbieter hat die Spannungsregelgrenzen zu benennen.“

„Eine Rückspeisung von Energie aus dem Batteriebus in das speisende Stromnetz ist nicht vorzusehen und auszuschließen.“

Generell muss sichergestellt werden, dass „die Ladung des Energiespeichers auch bei abgezogenem Zündschlüssel (Sicherung gegen unberechtigte Benutzung) und ohne personelle Überwachung erfolgen kann.“

„Das Fahrzeug muss über eine Anfahrsperrung während des Anschlusses externer Energiezuführungssysteme verfügen. Ferner muss beim Ladevorgang das Fahrzeug gegen unbefugte Benutzung gemäß Straßenverkehrsordnung gesichert werden können“.

„Fahrpersonal und Fahrgäste müssen während der Ladung des Energiespeichers und bei der Vorkonditionierung und bei allen Witterungseinflüssen in das Fahrzeug zu- oder von diesem aussteigen können.“

Es ist auf dem Fahrzeug ein „robustes und eindeutiges, funktionelles Modul zur Fahrzeugidentifikation und zur Ladesteuerung zu installieren. Damit wird sichergestellt, dass nur technisch sichere und rechtmäßig angemeldete Fahrzeuge von einer Ladestation versorgt werden. Über die Kommunikationsverbindung wird das LMS des Fahrzeugs mit dem Steuerungssystem des Ladesystems verbunden.“

„Aus Betreibersicht ist es angebracht, bei der Beschaffung des ersten elektrischen Gesamtsystems (Ladestation und Elektrobus) einen Generalunternehmer zu beauftragen und ggf. ist für die Überprüfung der Dokumente und Abnahme eine externe technische Überwachungsorganisation einzubinden.“

#### Plug-in-Systeme

„Die Steckverbindung zum Fahrzeug ist als Combo-2-DC-Stecker auszuführen. Je nach Art der konzeptionellen Auslegung kann das Ladesystem im Fahrzeug oder in einem separaten Ladegerät neben dem Abstellplatz des Fahrzeuges angeordnet werden.“

*Im Rahmen einer einheitlichen Ausstattung, standardisierter Technologien und einfachen Austauschbarkeit wurde sich innerhalb Frankfurts auf die zu nutzenden Combo-2 Stecker-Technologie geeinigt.*





Abbildung 7: Buchsen im Fahrzeug (Beispiel)  
Quelle: SOLARIS Bus & Coach S.A.

### 3.1.11. Sicherheitsaspekte bezüglich der Hochvolttechnik

Es sind folgende Sicherheitsaspekte zu achten:

- ▶ „Sämtliche HV-Kabel (Spannung > 60V) sind in der Kabelfarbe „Orange“ auszuführen und müssen an ihren Enden zur Unterscheidung voneinander eindeutig gekennzeichnet sein. Die Verlegung von HV-Kabel in unfallgefährdeten Bereichen ist zu vermeiden (z.B. Fahrzeugecken). Bei der Verlegung der HV-Kabel ist auf hinreichende Verlegeradien und auf Schutz vor Scheuerstellen zu achten“.
- ▶ „Kontakte und Kabel des externen Ladesystems dürfen bei stationärer Ladung nur beim gesicherten Ladevorgang unter Spannung stehen. Ansonsten müssen diese Anlagen zwingend spannungsfrei sein.“
- ▶ „Das HV-Energiespeichersystem muss mittels gesicherter optischer und mechanischer Trennstelle (Stecker/Buchse) mit dem Fahrzeug verbunden sein. Im Falle unabsichtlicher Trennung des Steckers der Energiespeicher (z.B. Hochvoltbatterie) muss eine Sicherheitsabschaltung des Hochvoltsystems vorgesehen sein.“
- ▶ „Alle Stecker und Buchsen der Fahrzeug-Hochvoltanlage müssen jeweils in berührungssicherer Ausführung gemäß ECE-R 100 [5] geliefert werden. Diese Anforderung besteht ausdrücklich, wenn der Stecker von der Buchse getrennt ist.“
- ▶ „Auf der rechten Fahrzeugseite, vorzugsweise im Batteriefach der Bordnetzatterie oder einer anderen gut zugänglichen Klappe, muss ein zweiter Not-Aus-Schalter für das HV-System für Rettungskräfte vorhanden sein. Der externe Notschalter ist auf der Klappe zu kennzeichnen.“
- ▶ „Beide Not-Aus-Schalter sind zu überwachen und müssen unabhängig voneinander das sichere Abschalten der HV-Anlage bewirken (zwangsoffnend trennende Kontakte). Die Betätigung eines Not-Aus-Schalters ist bei angeschalteter Zündung im Fahrerdisplay anzuzeigen. Bei der Ausführung der Not-Aus-Schalter sind die Maschinenrichtlinie 2006/42/EG [6] sowie die Norm DIN EN ISO 13850 [7] in aktuellster Fassung zu beachten. Weiterhin sind Maßnahmen zur Vermeidung einer unbeabsichtigten Auslösung anzubringen.“
- ▶ „An zentraler Stelle müssen Messbuchsen zur Feststellung der Spannungsfreiheit des HV-Systems angeordnet sein. Diese müssen mittels Deckel vor Zugänglichkeit geschützt sein, jedoch ohne weitere Demontagearbeiten von darunterliegenden

Datum: 28.06.2019  
Version: 3.0



Seite: 19 von 43

Schutzabdeckungen zugänglich sein. Die Messbuchsen sind berührungssicher auszuführen und für Standard-Messspitzen auszulegen, farblich zu kennzeichnen und zu bezeichnen.“

- ▶ „HV-Komponenten, die hinter dem Trennschütz des Energiespeichers liegen, müssen nach dem Abschalten selbständig Spannungen > 60 V abbauen. Der Anbieter hat die Zeit für den Spannungsabbau anzugeben.“
- ▶ Es ist bei Bedarf ein Schutzwiderstand zu verwenden. „Dieser soll als Anlagenschutz das System gegen Überspannungen sichern und Stromüberschuss im Gesamtsystem (z.B. bei Rekuperation bei längeren Bergabfahrten) und keine weitere Energieaufnahme im Speicher oder Energieverwendung im Gesamtsystem abbauen“.
- ▶ „Im Batteriefach der Bordnetzatterie muss in schmutz- und witterungsbeständiger Form ein Notfallplan für Rettungskräfte mit mindestens folgenden Informationen auf einem Blatt vorhanden sein:
  - ▶ Hinweis auf Spannungsanlagen
  - ▶ Übersicht über Anordnung der HV-Komponenten
  - ▶ Gefahrenanalyse des Energiespeicherssystems
  - ▶ Kurzanleitung zum Spannungsfreisalten
  - ▶ Position und Art der Sicherheitseinrichtungen
  - ▶ Angabe der Netzform (Sicherheitsstandard und Erdungspunkte)
  - ▶ Informationen über die Dauer des Spannungsabbaus“

### 3.2. Betriebliche Anforderungen

Es sind vom Betreiber Randbedingungen festzulegen, die den Betrieb der Batteriebusse auf ihre Linien beschreiben und präzisieren und somit ermöglichen.

Die minimale nutzbare Batteriekapazität muss vom Betreiber definiert und ermittelt werden. Sie muss während der gesamten Lebensdauer der Batterie gewährleistet werden. „Der Fahrzeuganbieter muss das angebotene Steckersystem, die Ladespannung, den maximalen Ladestrom und die Ladezeit benennen sowie die Tauglichkeit für den Anwendungsfall über Simulationen nachweisen.“

Für die Simulation wird es empfohlen, „im Vorfeld eine Energiebedarfsanalyse (messtechnisch und/oder physikalisch ermittelt) der einzelnen Streckenverläufe durchzuführen“. Siehe hierzu insbesondere VDV-Schrift 230/1 [1], Seite 44. „Aus der Energiebedarfsanalyse sind unter Berücksichtigung der möglichen Ladezeit die Leistung der Ladegeräte und des Stromanschlusses abzuleiten.“

Die minimale erforderliche Ladeleistung und die entsprechende Ladestrategie sowie die gewünschte Art der Heizung müssen vom Betreiber benannt sein. Die Parameter müssen mindestens den Anforderungen des Betriebskonzepts des Betreibers für die zukünftige Flotte entsprechen.



### 3.3. Marktüberblick über Elektrobusse

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die aktuell auf dem Markt befindlichen batterieelektrisch angetriebenen 12m-Solobusse:

Modell	Länge (mm)	Breite (mm)	Höhe (mm)	Antrieb	Batterie	Kapazität (kWh)	Davon nutzbar (kWh)	Ladung	Bemerkung
Alstom Aptis	12.000	2.550	3.100	1Z	NMC	350	280	Overnight	
Autosan Sancity 12 LF E	12.000	2.550	k.A.	2R	NMC	318	254,4	Overnight	
Bolloré Bluebus 12m	12.000	2.550	3.100	1Z	Poly	370	296	Overnight	
BYD Ebus 12	12.000	2.550	3.360	2A	LFP	380	304	Overnight	
EVOBUS/Daimler-Benz eCitaro	12.135	2.550	3.400	2A	NMC	292	233,6	Overnight	ab 2020 - 400 kWh
Ebusco 2.2	12.000	2.550	3.400	1Z	LFP	362	289,6	Overnight	
Ekova Electron 12	11.980	2.550	3.270	2R	NMC	310	248	Overnight	
Irizar ie Bus 12	11.980	2.550	3.209	1Z	NMC	450	360	Overnight	
Iveco-Heuliez GX337 Elec	12.060	2.550	k.A	1Z	NMC	385	308	Overnight	
MAN Lion's City 12 E	12.185	2.550	k.A	1Z	NMC	480	384	Overnight	lieferbar Ende 2020
Sileo S 12	12.220	2.550	3.350	2A	LFP	300	240	Overnight	
Solaris Urbino 12 Electric	12.000	2.550	3.250	1Z	NMC	300	240	Overnight, Opportunity	
Solaris Urbino 12 Electric	12.000	2.550	3.250	2A	NMC	300	240	Overnight, Opportunity	
SOR NS12 Electric	12.000	2.550	3.200	1Z	NMC	360	288	Overnight	
VDL Citea SLE-120 Electric	12.000	2.550	3.290	1Z	k.A.	288	230,4	Overnight, Opportunity	
VDL Citea SLE-129 Electric	12.900	2.550	3.430	1Z	k.A.	288	230,4	Overnight, Opportunity	
Volvo 7900 Electric	12.000	2.550	3.280	1Z	NMC	250	200	Overnight, Opportunity	

Tabelle 1: Aktueller Marktüberblick über Solobusse (12 Meter)

Quelle: Omnibus-Spiegel Feb. 2019, Auswahl.

In der Tabelle sind die drei Motortypen, radnaher Motor in Achse (A), Radnabenmotor (R) und Zentralmotor (Z) mit der vorangestellten Anzahl der Motoren dargestellt. Mit einem nutzbaren Anteil von 80% der Batterie liegt die nutzbare Batteriekapazität der meisten Modelle zwischen 200 und 300 kWh (siehe Abbildung 8). Zwei Modelle – Irizar und MAN – weisen eine erhöhte nutzbare Batteriekapazität von über 350 kWh auf, wobei das Modell von MAN derzeit noch nicht am Markt verfügbar ist.

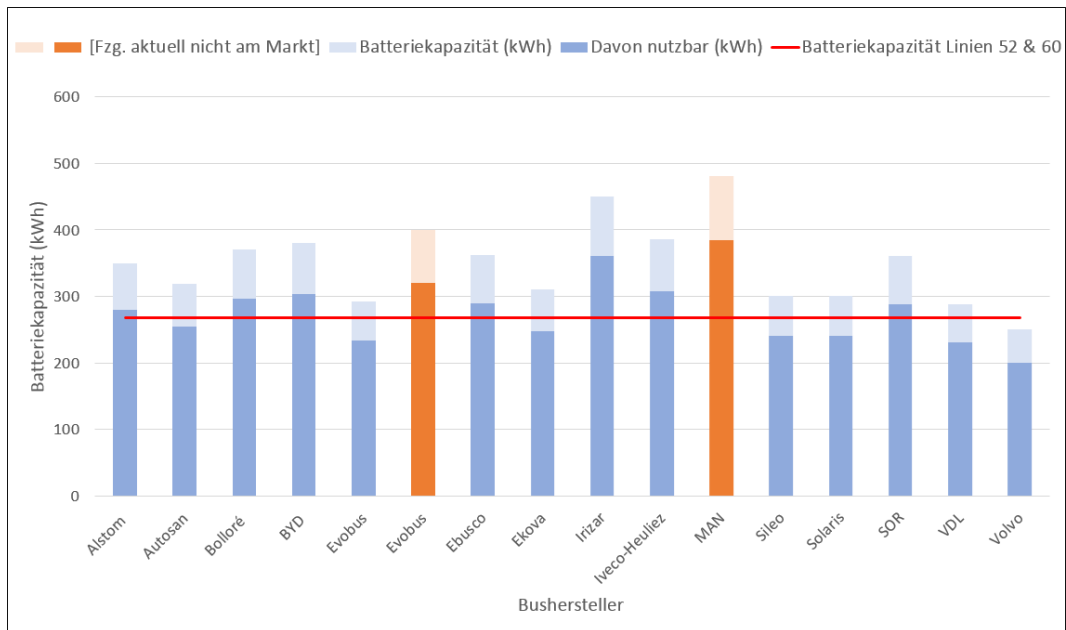


Abbildung 8: Batteriekapazität je Bushersteller  
 Quelle: Daten aus Tabelle 1



#### 4. Schätzung des Fahrzeugbedarfs hinsichtlich alternativer Antriebe

Da Batteriebusse derzeit noch eine begrenzte Reichweite haben, müssen ggf. die Umläufe im Betrieb angepasst werden. Aus diesem Grund wurden in verschiedenen ÖPNV-Verkehrsunternehmen unterschiedliche Ladestrategien untersucht und ausprobiert. Je nach Ladetechnologie und Speicherkonzept sind die Auswirkungen auf die Reichweite und/oder auf den Fahrzeugbedarf unterschiedlich.

Batteriebusse werden bei Overnight Charging während der nächtlichen Betriebspause geladen und ggf. tagsüber während möglicher Betriebspausen am Betriebshof nachgeladen. Die Anpassung von Umläufen kann zu einer Vermehrung von Umläufen und zu Fahrzeugmehrbedarf führen. Zum Beispiel wurde für die Verkehrsbetriebe Hamburg Holstein (VHH) im Jahre 2016 insgesamt ein Fahrzeugmehrbedarf von ca. 11% ermittelt. Dabei wurde von einer Batteriebusflotte von weit über 500 Bussen, ausgerüstet mit Brennstoffzusatzheizung, ausgegangen.

*Bei der Linie 52 mit 9 Umläufen ist kein Fahrzeugmehrbedarf erforderlich, da die Länge der Umläufe mit durchschnittlich 170 km relativ niedrig ist.*

Bei der Strategie des Overnight Charging kann die Reduzierung des Fahrzeugmehrbedarfs durch Ladeprozesse während des Tagesbetriebs unterstützt werden. Die übliche Variante ist eine Schnellademöglichkeit an Endhaltestellen. Die Batteriekapazität des Fahrzeugs kann dann deutlich reduziert dimensioniert werden. Allerdings verliert der Betrieb dadurch auch an Flexibilität. Der Fahrzeugmehrbedarf hängt von dem Bestands-Umlaufplan ab. Je nachdem, ob die Wendezeit für eine Gelegenheitsladung ausreichend ist oder nicht, werden die Umläufe ggf. angepasst werden müssen.

*Bei der Linie 60 wurde eine Strategie zwischen Overnight Charging und Opportunity Charging untersucht. Mehrmals am Tag wird zur Ergänzung der Overnight Charging an der Haltestelle „Heddernheim“ bzw. an der Haltestelle „Stadtbahnzentralwerkstatt“ nachgeladen. Diese Nachladung erfolgt mit Langsamladung und erfolgt nicht nach jeder Fahrt. Dafür wurden die Umläufe angepasst, um neue Ladezeiten an den entsprechenden Haltestellen frei zu machen. Die eingeführten Ladeprozesse vermeiden einen Fahrzeugmehrbedarf.*





## 5. Grundanforderungen Ladeinfrastruktur

Technische Informationen über die Ladeinfrastruktur sind in den VDV-Schriften 230/1 [1] und 260 [8] zu finden. Die Grundanforderungen der Ladeinfrastruktur werden nachfolgend erläutert.

Die Ladeinfrastruktur besteht mindestens aus den folgenden Komponenten:

- ▶ Netzanschluss inkl. Kabelführung
- ▶ Ladetechnik und -kommunikation
- ▶ Energieübertragungssystem (Kontaktierung zwischen Fahrzeug und Ladetechnik)

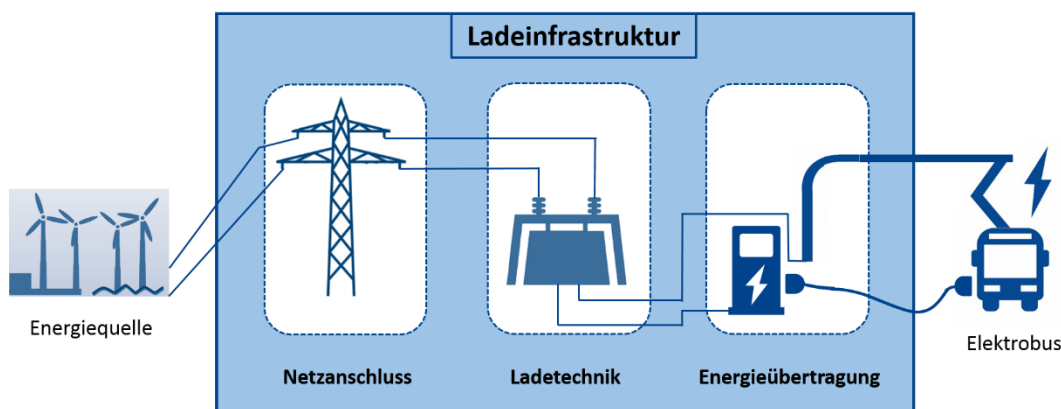


Abbildung 9: Schematische Übersicht der Ladeinfrastruktur  
Quelle: BMVI und VDV-Schrift 260

Die Aufstellung der Ladeinfrastruktur im öffentlichen Raum erfordert entsprechende Baugenehmigungen und den „vorherigen Abschluss individueller Gestattungsverträge, sowie eine genaue Dokumentation der Verlegungen meist in einem digitalen grafischen Informationssystem (GIS).“ Die Komponenten müssen bei ihrer Bemessung die örtlichen geltenden Bauvorschriften entsprechen. Vorgaben im Hinblick auf Windlastzonen gemäß DIN 1055-4 [9], Schnee- und Eislast sind zu beachten.

### 5.1. Netzanschluss

Der Netzanschluss kann aus dem Mittelspannungsnetz AC, Niederspannungsnetz AC oder Niederspannungsnetz DC erfolgen.

In der Regel können die Leistungsbedarfe oberhalb von 80-100 kVA noch aus dem Mittelspannungsnetz (i.A. 10 kV oder 20 kV) gedeckt werden. Ist der Leistungsbedarf größer als 2 MVA, kann der Anschluss an das Hochspannungsnetz erfolgen.

Der örtliche Netzbetreiber muss frühzeitig in die Planung einbezogen werden, um die technischen Lösungen der Ladeinfrastruktur besser planen zu können. Je nach Anforderungen des Betriebs hinsichtlich des Leistungsbedarfs, erfolgt die Umsetzung unterschiedlich aufwändig. Ist ein neuer Netzanschluss erforderlich, so muss eine Planungszeit von ca. 1 Jahr bei 10/20 kV und 3-5 Jahre bei 110 kV berücksichtigt werden.

Wenn das Verkehrsunternehmen über ein eigenes Verteilnetz verfügt, kann der Anschluss direkt an dieses Netz erfolgen. Es muss allerdings überprüft werden, ob die Ladereserven für

die vorgesehene Anschlussleitung ausreichend sind. Die notwendigen Schutzeinrichtungen, wie zum Beispiel gegen Rückspeisung und Netzurückwirkungen sind für einen sicheren Betrieb vorzusehen.

Erfolgt der Anschluss im DC-Bahnstromnetz, ist die Entnahme direkt an der Fahrleitung oder dem Kabelnetz möglich. „Der Anschluss an die Rückleitung erfolgt mit nicht lösbaren Anschlüssen an der Fahrschiene oder an Rückleitern zum Gleichrichter.“

„Zur Gewährleistung eines selektiven Schutzes und der separaten Freischaltmöglichkeit ist es zweckmäßig, einen entsprechend ausgerüsteten Schaltschrank zur Einspeisung in die Ladestation zwischenzuschalten.“

„Am Einspeiseschrank wird die Ladestation angeschlossen.“

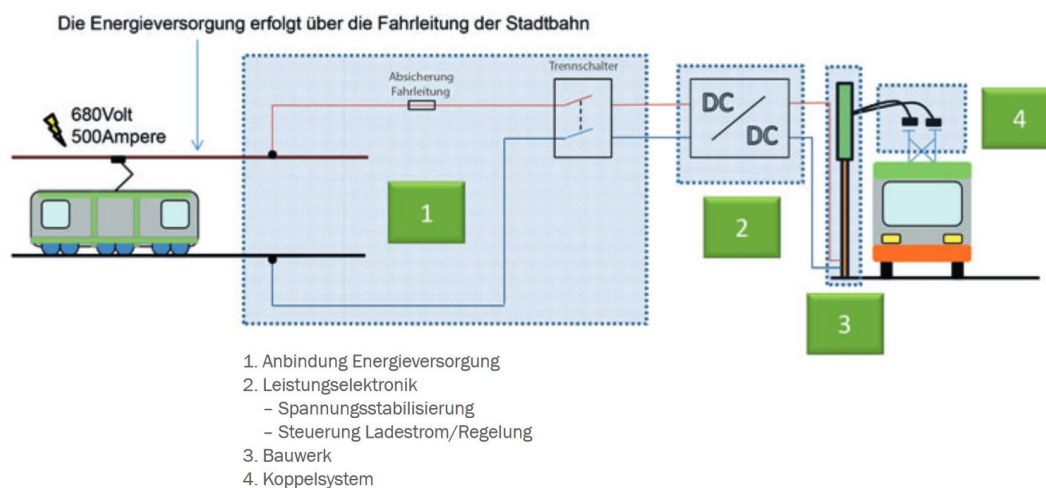


Abbildung 10: Beispiel für einen Anschluss am DC-Oberleitungsnetz  
Quelle: ÜSTRA Hannoversche Verkehrsbetriebe AG

Bei dem Anschluss an einem DC-Bahnstromsystem müssen die Übergabepunkte aus dem einspeisenden System eindeutig definiert werden. Es wird empfohlen, einen separaten oberirdischen Kabelverteiler als Übergabepunkt zu verwenden. „Bis zum Übergabepunkt sind die Bestimmungen der BOStrab zu beachten. Hier sind der Betriebsleiter BOStrab und die Technische Aufsichtsbehörde im Vorfeld einzubeziehen.“

„Die elektrische Versorgung der Ladestellen, insbesondere aus DC-Bahnstromsystem, bedarf einer dringenden Prüfung und Regelung hinsichtlich der bestehenden Rechtslage im Energiewirtschaftsrecht. Das gilt besonders dann, wenn Strom an Dritte gegen Entgelt weitergegeben wird.“

Die Zulässigkeit und die richtige Abgrenzung der Liefermengen für den Busbetrieb müssen durch unterschiedliche gesetzliche Regelungen überprüft werden. Dabei sind mindestens das Energiesteuergesetz (EnergieStG), das Gesetz für den Ausbau erneuerbaren Energien (EEG), die Strom-Netzentgeltverordnung (StromNEV) zu beachten. „Insbesondere Schienenbahn-Unternehmen dürfen Umlage- und Steuerentlastungen in Anspruch nehmen, die durch Nichtbeachtung einer genauen Abgrenzung wirtschaftlich erhebliche Mehrbelastungen hervorrufen können.“

## 5.2. Ladetechnik und -kommunikation

Um die Energie vom Netzanschluss bis zum Fahrzeugenergiespeicher zu leiten, sind technische Komponente vorzusehen wie Transformatoren (Abbildung 11) und Umrichterstationen. Diese sorgen dafür, dass die Spannung an den Bedarf angepasst wird und die Strommenge zu den verschiedenen Ladepunkten verteilt wird.



Abbildung 11: Trafostation auf dem Betriebshof in Münster  
Quelle: Stadtwerke Münster

Je nach Stromanschluss und Energieübertragungssysteme sind unterschiedliche Ladekonzepte möglich:

- ▶ AC-AC-Laden
- ▶ AC-DC-Laden
- ▶ DC-DC-Laden

Beim AC-AC-Laden erfolgt keine Umwandlung der Spannung zwischen Stromanschluss und Fahrzeug. Es ist nur möglich, wenn der Anschluss aus einem Niederspannungs- bzw. Mittelspannungsnetz AC ausgelegt wird.

Für das AC-DC-Laden wird der Strom aus einem Niederspannungs- bzw. Mittelspannungsnetz AC entnommen. Allerdings liefert die Ladestationen Gleichstrom an das Fahrzeug. Deshalb muss eine Umwandlung der Spannung zwischen dem Stromanschluss und dem Fahrzeug erfolgen.

Beim DC-DC-Laden erfolgt der Anschluss aus einem Gleichstromnetz. Dies kann sinnvoll sein, wenn ein solches Netz für die Stadt- bzw. die Straßenbahn schon vorhanden ist und die Ladepunkte in unmittelbarer Nähe zu diesem Netz geplant sind. Wenn Leistungsreserven im Netz vorhanden sind, kann der Strom für die Ladung von Elektrobussen auch abgegriffen werden und nach Transformation in einen DC-DC-Wandler dem Ladepunkt zur Verfügung gestellt werden (siehe Abbildung 10).

Derzeit sind für eine standardisierte Ladeinfrastruktur folgende Normen gültig: IEC 62196 [10], DIN EN 61851 [11] und ISO/IEC 15118 [12].

„Je nach Art der konzeptionellen Auslegung kann das Ladesystem im Fahrzeug oder in einem separaten Ladegerät neben oder über dem Abstellplatz des Fahrzeuges angeordnet werden.“

### 5.2.1. Kommunikation

Um das Gesamtsystem zu überwachen ist eine Kommunikation zwischen der Ladetechnik und den damit verbundenen Systemen notwendig. Es sind zwei Kommunikationswege auszulegen:

- ▶ Kommunikation zwischen Ladetechnik und Fahrzeug
- ▶ Kommunikation zwischen Ladetechnik und Leitstelle

Für die Kommunikation zwischen dem Fahrzeug und der straßenseitigen Ladeinfrastruktur muss ein Modul zur Fahrzeugidentifikation und zur Ladesteuerung installiert werden. „Damit wird sichergestellt, dass nur technisch sichere und rechtmäßig angemeldete Fahrzeuge von einer Ladestation versorgt werden. Über die Kommunikationsverbindung wird das Lademanagementsystem des Fahrzeugs mit dem Steuerungssystem des Ladesystems verbunden.“

Es gibt derzeit keine Norm für ein derartiges Kommunikationsprotokoll zwischen Batteriebusse und Ladeinfrastruktur. Deswegen sind „die Normen DIN EN 61851-23 [11] und ISO EC 15118 [12] in aktuell geltenden und verabschiedeten Fassungen anzuwenden.“ Diese beziehen sich auf alle Elektrofahrzeuge.

„Die Kommunikation zwischen Bus und Ladeinfrastruktur erfolgt auf Basis einer gesicherten WLAN-Verbindung. Alternativ darf die Kommunikation über Power Line Communication (PLC) gemäß ISO/IEC 15118-3“ [12] erfolgen.

„Der Anbieter des Ladesystems hat das Kommunikations- und Steuerungsprotokoll zwischen Ladegerät und Fahrzeug in geeigneter Weise für das Verkehrsunternehmen offenzulegen, um bei nachfolgenden Fahrzeugbestellungen herstellerunabhängig die Ladung am Ladesystem zu ermöglichen.“

Zusätzlich wird zur Überwachung der Ladestationen und dem automatischen Absenden von Meldungen bei Fehlfunktionen bzw. im Störfall eine Anbindung an eine Leitstelle empfohlen. Technische Fehler der Ladeinfrastruktur werden damit sehr schnell erkannt und können mit geeigneten Gegenmaßnahmen gelöst werden.

Das Lademanagementsystem muss auch „über eine Kommunikationsschnittstelle verfügen, damit Informationen aus Vorsystemen, z. B. Betriebshofmanagementsystemen, ITCS des Verkehrs- bzw. aus Systemen des Energieversorgungsunternehmens, entsprechend berücksichtigt werden.“

### 5.2.2. Abrechnungssystem

Damit die geladene Energiemenge abgerechnet werden kann, „werden geeichte Messvorrichtungen für den Energieverbrauch an jeder Ladestation benötigt.“ Dabei ist eine Fahrzeugidentifikation für die Zuordnung der Daten notwendig.

„Im infrastrukturseitigen Ladegerät ist sowohl auf der Eingangs- als auch auf der Abgangseite eine Energiezähleinrichtung einzubauen.“

„Der Energieverbrauch ist im LMS mit dem Zeitstempel der Kontaktierung und der Dekontaktierung sowie die Fahrzeugnummer verlustsicher zu speichern.“

Datum: 28.06.2019  
Version: 3.0



„Optional kann vom Betreiber eine Fernsteuerung des Ladegerätes gefordert werden. In diesem Fall ist die betriebsübliche Kommunikationsanwendung als Anforderung auszusprechen. Neben der Übertragung des Systemstatus und Fehlercodes des Ladesystems kann die Übermittlung der Energieabrechnung und die Fernsteuerung (Zu- und Abschaltung) gefordert werden. Der Anbieter hat die Fehlercodes und die Systemstatus sowie die Übertragungssignale tabellarisch darzustellen. Mindestanforderungen sind dabei: Schaltzustand des Ladegeräts, Spannungs- und Strommessgeräte am Eingang und Ausgang, Türkontaktstatus (Türen geöffnet oder geschlossen) sowie Fehler am Ladegerät.“

### 5.2.3. Ladesteuerung

Ist die Konzentration mehrerer Ladegeräte an einem Ort vorgesehen, kann die Stromversorgung netztechnisch nur wirtschaftlich sinnvoll sein, wenn ein intelligentes LMS eingesetzt wird.

„Dieses LMS teilt die am Netz vorhandene maximal nutzbare Leistung nach vorgegebenen Prioritäten und Ladekurven in ständiger Kommunikation mit den ladenden Fahrzeugen zeitgesteuert entsprechend auf und gewährleistet nach Rückrechnung der Ladezeiten eine optimale Ladung aller Ladeteilnehmer.“

### 5.2.4. Sicherheit

„Ladestation und Fahrzeuge müssen eigensichere Systeme sein, die bei Detektion eines Fehlerzustandes oder einer anderweitigen Unterbrechung des Ladevorgangs in einen sicheren Zustand zurückfallen bzw. überführt werden.“

Es ist auf der Infrastrukturseite ähnlich wie im Fahrzeug ein Not-Ausschalter einzubauen. Bei der Betätigung dieses Not-Ausschalters oder bei Vorliegen einer Isolationsstörung muss der Ladevorgang beendet und das Ladegerät abgeschaltet werden.

„Es muss sichergestellt sein, dass bei der Kontaktierung des Batteriebusses keine unzulässigen Potenziale auftreten, sowohl im Leerlauf als auch beim Laden oder bei einem Kurzschluss. Stand der Technik sind derzeit Systeme, die eine elektrische Entkopplung von Bahnstromnetz und Energieversorgung des Batteriebusses gewährleisten (IT-Netz).“

Das speisende Netz darf beim Zu- und Abschalten des Ladegeräts nicht beeinflusst werden. Grenzwerte der Schaltüberspannung sind durch EN 50163 [4] vorgegeben.

Ein Kühlsystem muss für das Ladegerät vorhanden sein. Dabei muss beachtet werden, dass die zulässigen Werte des Lärmpegels für reine Wohnbebauung gemäß TA Lärm [13] nicht überschritten werden.

„Mindestabstände zu berührbaren aktiven Teilen an der Außenseite des Fahrzeugs sowie zu aktiven Teilen der konduktiven Energiezuführung von Standflächen aus, die von Personen betreten werden dürfen, werden gemäß DIN EN 50122-1 [14], Punkt 5.2 unter „Schutz durch Abstand“ im öffentlichen Bereich geregelt. Diese Abstände werden herangezogen, da für Elektrobusse noch keine eigene Festlegung existiert.“

## 5.3. Energieübertragungssystem

Die Energieübertragung zwischen Ladeinfrastruktur und Fahrzeug kann über unterschiedliche Technologien erfolgen. *Für Frankfurt z.B. ist die Energieübertragungstechnologie mit Kabel und Steckverbindung vorgesehen. Hierbei wurde sich auf den Stecker Combo-2 geeinigt. Weitere Informationen zu anderen Energieübertragungssystemen sind in der VDV Schrift 230/1 und 260 beschrieben.*

Datum: 28.06.2019  
Version: 3.0



„Konduktive Systeme zur Energieübertragung bei Fahrzeugstillstand bestehen aus einem ortsfesten und einem fahrzeugseitigen Kontakt.“ Durch die physikalische Kontaktierung der beiden Komponenten (das heißt der Stecker wird in die Buchse des Busses gesteckt) wird die Energieübertragung durchgeführt.

„Das Ladesystem muss Ladeströme von 500 A dauerhaft und bis 750 A kurzzeitig übertragen können, damit parallel zum Ladevorgang eine Konditionierung aller Bordsysteme (insbesondere Fahrgastraumtemperatur) erfolgen kann, ohne dass der Ladevorgang abgebrochen oder signifikant verringert wird.“

Für die Steckverbindung liegt bis heute keine verbindliche Normung vor. Auf freiwillige Basis haben sich jedoch schon Anfang 2016 europäische Bushersteller und Hersteller von Ladeinfrastruktur auf eine offene Ladeschnittstelle für Elektrobussysteme geeinigt. Dies geschah mit dem Ziel, den Umstieg auf Elektromobilität zu erleichtern.

Der Batteriebus wird mit der Ladestation über ein Kabel inklusive Stecker verbunden. Die Kontaktierung erfolgt manuell über ein standardisiertes Steckersystem Combo-2. Dieser Steckertyp ist für eine Gleichstromladung vorgesehen. Unter Umständen ist auch eine AC-Ladung möglich.



Abbildung 12: Combo 2: DC-Ladung bis zu 170 kW  
Quelle: Nationale Plattform Elektromobilität

Ist die Vorkonditionierung des Fahrzeuges (Bordspannungsnetz, Druckluftversorgung und Fahrgastraumtemperatur) über den Stromanschluss gewünscht, wird diese über eine Steckverbindung erfolgen. „Hierfür ist eine enge Abstimmung zwischen dem Fahrzeughersteller, dem Lieferanten der Ladeinfrastruktur und dem Hersteller der betrieblichen Systeme notwendig wie z. B. des übergeordneten Lademanagement- bzw. Betriebshofmanagementsystems.“

## 6. Dimensionierung der Stromversorgung

Bei der Ladung von Batteriebusen wird eine bestimmte Energiemenge von der Ladeinfrastruktur an das Fahrzeug zugeführt. Die Dimensionierung des benötigten Stromanschlusses für einen Standort, dessen Leistung und Ausstattung ist abhängig von

- ▶ den zur Verfügung stehenden Zeiten zur Ladung der Fahrzeuge (betriebliche Einschränkung) und
- ▶ der maximalen Stromaufnahme der Einzelfahrzeuge.

Es wird für jedes Fahrzeug eine Ladeleistung in einem bestimmten Zeitfenster eingeplant. Die Summe der Ladeleistungen über die Zeit ergibt eine Ladelastkurve, deren Maximum als Randbedingung für den Stromanschluss gilt.

Die Abbildung 13 zeigt die Ladelastkurve im Betriebshof „Am Frischezentrum“ für die Linien 52 & 60. Eine Anschlussleistung von Minimum 550 kW ist hier notwendig.

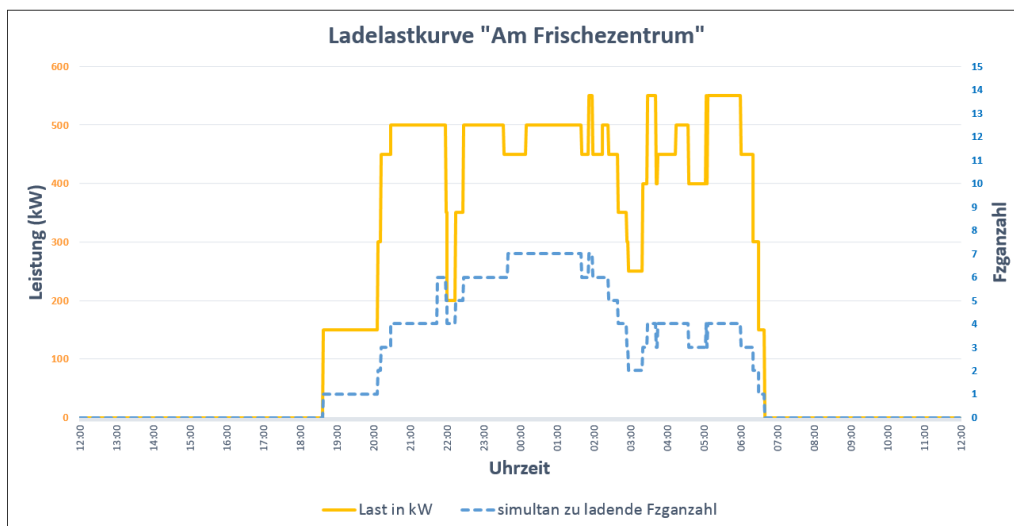


Abbildung 13: Ladelastkurve der Linien 52 & 60 in Frankfurt

Um den Stromanschluss wirtschaftlich gestalten zu können, muss darauf geachtet werden, dass die geforderte Anschlussleistung nicht überdimensioniert ist. Dafür spielen das Ladezeitfenster und die Ladeleistung jedes Busses eine wichtige Rolle. Ist das Ladezeitfenster eines Fahrzeuges relativ lang, kann die Leistung reduziert und/oder verteilt werden. Diese Flexibilität ist bei großen Fahrzeugflotten wichtig, da das gleichzeitige Laden aller Fahrzeuge zu einer unnötig hohen Anschlussleistung führen kann. Die optimierte Verteilung der Ladeleistung über die Zeit erzielt eine wirtschaftlich-optimierte Anschlussleistung. Diese Optimierung sollte durch das LMS erfolgen.

Abbildung 14 zeigt den Unterschied zwischen einer Ladelastkurve ohne und mit optimierter Verteilung der Ladeleistung:



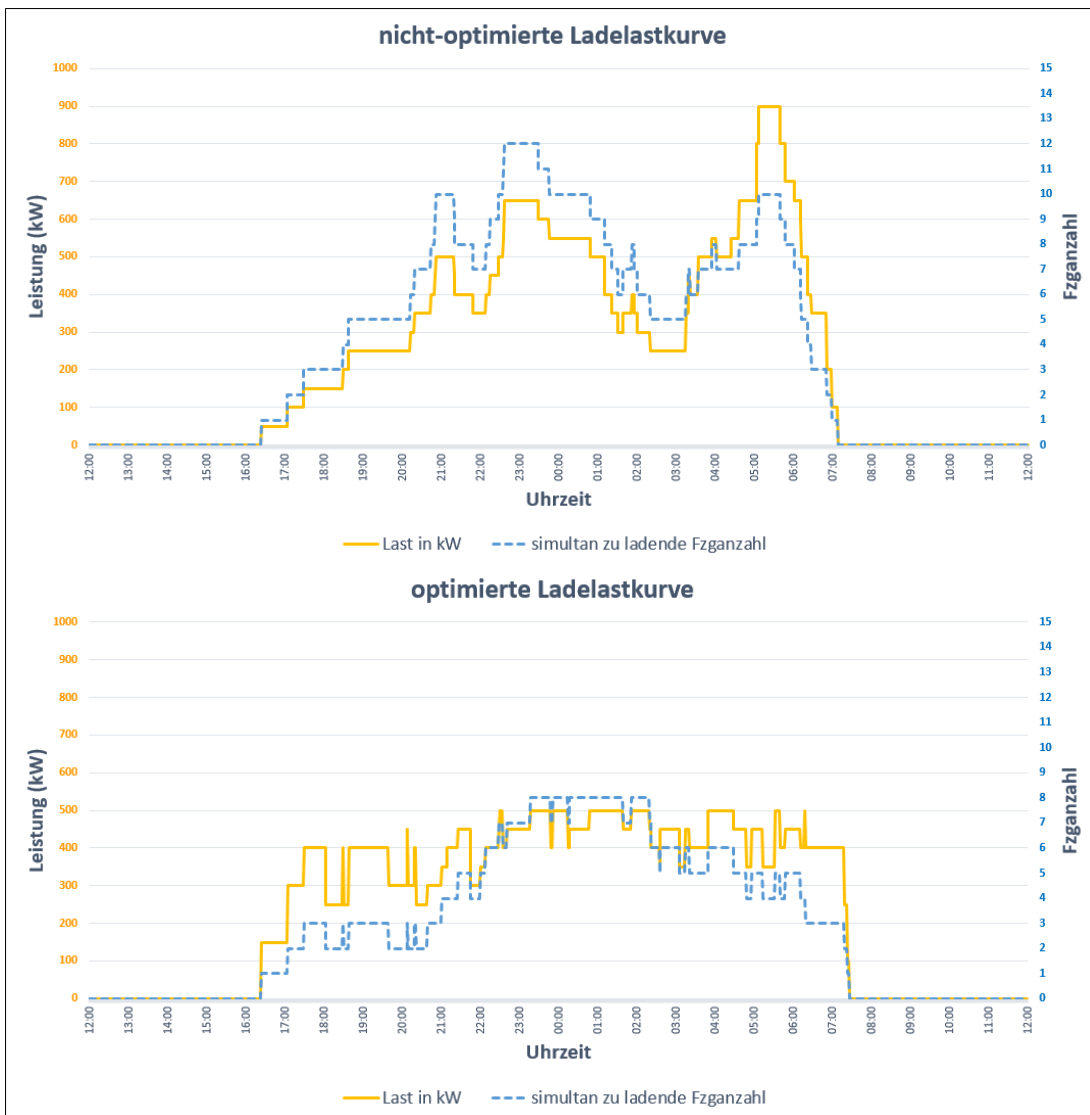


Abbildung 14: beispielhafte Optimierung einer Ladelastkurve

Im nicht optimierten Fall werden 25 Busse geladen, davon 12 Busse gleichzeitig (ca. 23 Uhr). Hierbei findet außerdem keine gleichmäßige Verteilung der Leistung statt.

Die Optimierung zeigt bei gleichen Parametern eine deutliche Reduzierung der Anschlussleistung auf. Hierbei wurde die Ladeleistung gleichmäßig nach dem Bedarf verteilt. Somit muss für jeden Ladestandort die notwendige Ladeleistung individuell ermittelt werden.

Bei allen Standorten sollte eine Reserve von ca. 20 - 30 % zur Absicherung von betrieblichen Sonderfällen eingeplant werden.



## 7. Anpassung des Betriebshofs für Elektrobusse

Die Anforderungen an Betriebshöfe für alternative Antriebe sind hauptsächlich in der VDV-Schrift 825 [15] und für Batteriebusse im Leitfaden der VBG [16] zu finden.

### 7.1. Ladeinfrastruktur

Die Integration der Ladeinfrastruktur im Betriebshof kann über verschiedene Lösungskonzepte erfolgen. Diese Konzepte haben unterschiedliche Auswirkungen auf den Flächenbedarf, den Betrieb und auf die Wirtschaftlichkeit.

In der Regel erfolgt die Ladung der Batteriebusse über Plug-In-Anschlüsse im Betriebshof. Die dafür benötigten Ladesäulen können zu einem Flächenmehrbedarf im Betriebshof führen. Da der Flächenbedarf im Betriebshof bei vielen Verkehrsunternehmen eine starke Herausforderung darstellt, muss das Aufstellkonzept der Ladeinfrastruktur platzoptimiert gestaltet werden. Eine erste Möglichkeit besteht darin, kompakte Ladesäule bspw. am Betriebshof- bzw. am Hallenrand auszulagern (siehe Abbildung 15). Dadurch kann der Platzmehrbedarf, welcher durch die Ladesäulen benötigt werden würde, verringert werden.

Eine andere Möglichkeit ist der Aufbau eines Carports. Wobei die Ladegeräte auf dem Dach platziert werden und die Ladekabel an der Hallendecke befestigt sind.



Abbildung 15: Ladepunkte am Betriebshofrand bzw. an der Hallendecke  
Quelle: Alexander Dennis Limited und Faiveley Stemmann

Für die Kabelzuführung muss beachtet werden, dass zu lange Zuführungen bei dem erforderlichen Kabelquerschnitt nicht manuell bewegt werden dürfen. Zwischen den Ladesäulen und den Fahrzeugen müssen durch die Kabelführung entstehende „Stolperfallen“ vermieden werden.

### Lademanagementsystem

Mit wachsender Anzahl Fahrzeuge der Batteriebusflotte ist ein intelligentes LMS schnell notwendig. Das System hilft Ladespitzen zu vermeiden und die definierten Netzanschlussleistungen einzuhalten.

Es wurde im Kapitel 6 erläutert, dass das Laden der Fahrzeuge ohne optimierte Verteilung der Ladeleistung zu einem viel größeren Leistungsbedarf führen kann. Es muss vom LMS abgesichert werden, die Gesamtleistung effizient zu verteilen und die Fahrzeuge so langsam wie möglich zu laden. Mit einem intelligenten LMS wird zudem vermieden, dass die Busse in der Nacht vom Betriebshofpersonal umgestellt werden müssen. Jedes Fahrzeug ist fest an seinem definierten Ladepunkt angeschlossen und der Ladevorgang wird nur in dem vom Lademanagement vordefinierten Zeitraum durchgeführt.

Datum: 28.06.2019  
Version: 3.0



Zusätzlich ist für das wirtschaftliche Nachladen der Fahrzeuge die Preispolitik des Energieversorgers zu beachten. Auch dies ist in einem intelligenten LMS vorzusehen.

## 7.2. Abstell- und Flächenkonzept

Die Fahrzeugabmessungen von Batteriebussen unterscheiden sich hinsichtlich Länge und Breite nicht von Dieselnissen und benötigen daher keinen Mehrbedarf an Abstellflächen. Der Mehrbedarf an Fläche basiert auf dem erhöhten Flächenbedarf für Ladeinfrastruktur.

Die Batteriebusse können in Fahrzeughallen abgestellt werden, sofern von defekten Batterien keine Gefahr ausgehen kann. „Nach derzeitigem Kenntnisstand sollten Fahrzeuge mit defekten Batterien mit ausreichendem Sicherheitsabstand zu anderen Fahrzeugen und Gebäuden abgestellt werden, da ein verzögerter Brand nicht ausgeschlossen werden kann (Batterien sind nicht komplett entladbar).“ [15]

Der Platzbedarf der Ladeinfrastruktur hängt von mehreren Parametern ab, z.B.:

- ▶ Anschlussleistung
- ▶ Anzahl der Ladepunkte
- ▶ Art der Ladepunkte
- ▶ Aufstellkonzept der Ladetechnik

Eine genaue Darstellung und Abschätzung des Flächenbedarfs kann daher nur erfolgen, wenn diese Parameter definiert sind.

Mit dem Aufstellkonzept der Ladetechnik kann der erforderliche Flächenbedarf limitiert werden. Es sind für die Aufstellung der Ladepunkte mehrere Möglichkeiten vorstellbar, einige davon wurden im Kapitel 7.1 vorgestellt.

Die Abbildung 16 zeigt den sehr engen Betriebshof Waterloo (London). Die Aufstellung erfolgt mit 46 Batteriebussen, wobei die Ladeinfrastruktur (Ladepunkte) am Grundstücksrand und auf einer Mittelinsel aufgestellt wurde. Die vorherige Abstellung war für 50 Dieselnisse ausgelegt. [17].

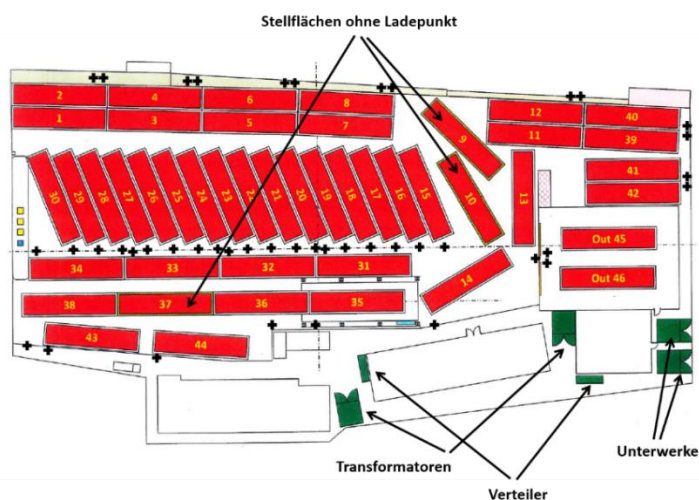


Abbildung 16: Abstellkonzept im Betriebshof Waterloo (London)  
Quelle: Alexander Dennis Limited

### 7.3. Fahrfertigmachen

„Es muss sichergestellt sein, dass die Innenreinigung auch während des Ladevorgangs zulässig ist. Das Reinigungspersonal ist fortlaufend zu unterweisen.“

„Bei der Außenreinigung muss darauf geachtet werden, dass die Waschanlage zum Waschen von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben geeignet ist. Die Hinweise und Vorgaben zur Außenreinigung der Fahrzeughersteller müssen hierzu beachtet werden.“

„Die Außenmaße dieser Fahrzeuge sind mit den zulässigen Maßen der Waschanlage abzugleichen.“ [15]

### 7.4. Werkstatt

Die Elektrobuswerkstatt ist, nach DIN VDE 1000:2009-01 Abs.1 [18] als elektrotechnischer Betriebsteil zu entwickeln. [15]

Dazu zählen u.a. folgende Sicherheitsaufgaben:

- ▶ Einsatz von Arbeitskräften
- ▶ Planen von Tätigkeiten
- ▶ Auswahl der Aufsicht
- ▶ Festlegung von Mess- und Prüfverfahren
- ▶ Erprobung und Inaugenscheinnahme von elektrotechnischen Anlagen
- ▶ Instandhalten, Instandsetzen, Ändern und Betreiben von elektrotechnischen Anlagen

„Diese Arbeiten dürfen nur von Elektrofachkräften oder unter deren Aufsicht/Anleitung ausgeführt werden“ (siehe Kapitel 7.5).

„Alternativ können diese Aufgaben auch extern vergeben“ werden. „Grundsätzlich empfiehlt es sich in diesen Fällen, notwendige vertragliche Regelungen (Aufgaben, Zuständigkeit, Verantwortung) festzulegen und zu dokumentieren.“

Folgende organisatorische Maßnahmen sind sicherzustellen:

- ▶ Erstellen von Betriebsanweisung zur Arbeitssicherheit bei Arbeiten an und in der Nähe der elektrischen/elektronischen Ausrüstung von Hochvolt-Kraftfahrzeugen
- ▶ Erstellen von Arbeitsanweisungen für Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten, für den Pannendienst sowie für den Havariefall (Rettungskarten), etc.
- ▶ Entwickeln von Schulungspläne zu Erst- bzw. Wiederholungsschulungen
- ▶ Dauerhafte Dokumentation der Durchführung der Arbeitssicherheitsunterweisung
- ▶ Regelmäßige Aktualisierung der Gefährdungsbeurteilung

#### 7.4.1. Werkstattinfrastruktur

Um die neuen Aufgaben bezüglich der HV-Technik durchführen zu können, sind neue Infrastrukturkomponenten einzuplanen.

Datum: 28.06.2019  
Version: 3.0



Da bei Batteriebussen die HV-Komponenten hauptsächlich auf dem Dach untergebracht werden, sind Arbeitsstände mit Dacharbeitsbühne vorzusehen. Es sind stationäre Dacharbeitsstände zu priorisieren. Mobile Dacharbeitsstände können für Übergangszeiträume zum Einsatz kommen. Um Abstürze der Beschäftigten zu vermeiden, muss der Spalt zwischen Fahrzeugdach und Dacharbeitsstand so gering wie möglich gehalten werden. Lösungen dazu sind: „verschiebbare Bühnen, absenkbare Formkörper oder auch aufblasbare Kissen.“ Eine Absturzsicherung (Geländer) muss am Umlaufende vorgesehen werden (siehe Abbildung 18).



Stationärer Hocharbeitsstand



Mobiler Hocharbeitsstand

Abbildung 17: Hocharbeitsstände im Betriebshof  
Quelle: Leitfaden VBG

Um die schweren Batterien bzw. Wasserstofftanks bewegen zu können, sind entsprechende Hebevorrichtungen wie ein Lastenkran (siehe Abbildung 19) anzuwenden.

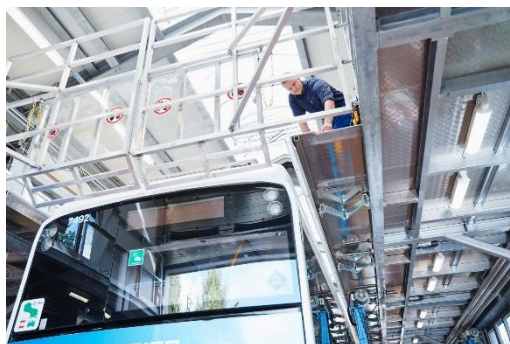


Abbildung 18: Absturzschutz  
Quelle: Fahrzeugwerkstätten Falkenried



Abbildung 19: Lastenkrane  
Quelle: Fahrzeugwerkstätten Falkenried

Für die Hallenhöhe müssen die Höhe des Fahrzeuges, inklusive offener Dachklappen sowie die Anwendung von Krananlagen berücksichtigt werden. Es sind dafür mindestens 4,5 m (Tank- bzw. Batteriewechsel, Kran und Anschlagmittel) bis 5 m (Heben mit Hebern) vorzusehen.

„Zur Instandsetzung von HV-Komponenten kann ein separater Werkstattbereich mit entsprechenden Prüfplätzen und Diagnosegeräten erforderlich sein. Derartige elektrische Betriebsräume und ihre Einrichtungen sind mit den nötigen Schutz- bzw. Sicherungsmaßnahmen auszustatten. Im notwendigen Umfang sind dazu Betriebsanweisungen zu erstellen.“

„Die VDE 0104 [19] legt die Anforderungen fest, die beim Einrichten und Betreiben stationärer und nicht stationärer Prüfanlagen zu beachten sind. Sie ist die relevante Norm, die sich an die Betreiber und Nutzer von Prüfanlagen/Prüfplätze richtet.“

Die Busse „bzw. die Anlagen müssen über eine CE-Kennzeichnung verfügen, für Ladesäulen auf dem Betriebshof ist eine zusätzliche Prüfung durch eine technische Überwachungsstelle erforderlich. Maßgebliche Normen sind die DIN VDE 0100-510 [20], IEC 60364-7-722 [21] sowie die DIN VDE 60529 (VDE0470-1) [22].“

Für die Lagerung der Batterien muss beachtet werden, dass sie getrennt von brennbaren Materialien sowie an einem kühlen, trockenen und gut gelüfteten Ort zu lagern sind. Ist der Bereich nicht brandschutztechnisch abgetrennt, so muss auf einen Sicherheitsabstand von 5 m zu anderen Gütern oder Einrichtungen geachtet werden. Des Weiteren sollte die zuständige Feuerwehr für das Lagerungskonzept von Batterien einbezogen werden.

„Beschädigte Li-Ionen Akkumulatoren sind als Gefahrgut zu behandeln und in speziell dafür freigegebenen Lager- und Transportbehältern zu lagern und zu transportieren“ (siehe Abbildung 20).



Abbildung 20: Gefahrbehälter für Batterien  
Quelle: REMONDIS GmbH

#### 7.4.2. Arbeitsmittel

Für die Instandhaltung von Elektrobussen sind unterschiedliche Messgeräte vorzusehen (siehe Abbildung 21). Sie müssen folgende Aufgaben ausfüllen:

- ▶ Feststellung der Spannungsfreiheit
- ▶ Fehlersuche und Prüfarbeiten
- ▶ Überprüfung des Isolationswiderstands
- ▶ Überprüfung des Potentialausgleichs

Datum: 28.06.2019  
Version: 3.0







Spannungsprüfer



Vielfachmessinstrument

Abbildung 21: Messgeräte  
Quelle: Leitfaden VBG

Aufgrund der HV-Technik müssen isolierte Werkzeuge für Spannungen bis 1.000V angewendet werden. Diese Werkzeuge unterscheiden sich von herkömmlichen Werkzeugen durch ihre rot-orange Farbgebung (siehe Abbildung 22) und sollte folgende Aufdrücke besitzen:

- ▶ VDE-Kennzeichen mit einem Doppeldreieck
- ▶ Angabe der maximal zulässigen Spannung
- ▶ Angabe der Prüfnorm



Abbildung 22: Isoliertes Werkzeug nach DIN EN 61477 [23] und DIN EN 60900 [24]  
Quelle: Leitfaden VBG und find-clever.de

Weitere persönliche Schutzausrüstungen (PSA) sind zum Zwecke des Arbeitsschutzes vorzusehen. Für das Arbeiten an HV-Komponenten werden folgende PSA am häufigsten angewendet (siehe Abbildung 23 und Abbildung 24):

- ▶ Schutzhandschuhe gegen Körperdurchströmung
- ▶ Augen- und Gesichtsschutz bei Gefährdungen durch Störlichtbögen

Datum: 28.06.2019  
Version: 3.0





Abbildung 23: Schutzhandschuhe  
Quelle: egamaster.com



Abbildung 24: Augen- und Gesichtsschutz  
Quelle: Leitfaden VBG

Die folgende Auflistung stellt Werkzeuge und Werkstattausrüstungen dar, die sich gemäß der VDV-Schrift 825 in der Praxis als hilfreich erwiesen haben. Es wurde eine Mindestausstattung vorgeschlagen:

Ausrüstung	Mindestausstattung
Prüfbox für HV-System	1
HV-Spezialwerkzeugsatz	2
Spannungsprüfer	2
Messgeräte	1
Diagnoseeinheit (Laptop inklusive fahrzeugspezifische Software)	1
Schutzausrüstung Mitarbeiter (EN 1149)	2
Transporthilfen (z. B. für Batterien)	1
Kran und/oder Gabelstapler (Hublast min. 1,0 t zur Demontage des Traktionsmotors)	1
Abschlagmittel (Ketten, Haken)	1
Dacharbeitstand (fest montiert oder mobiles Gerüst)	1
Arbeitsgrube	1

Tabelle 2: Werkzeuge und Werkstattausrüstungen

Quelle: VDV Schrift 825 (2015).

### 7.4.3. Materialwirtschaft

Es sind für spezielle Ersatzteile längere Lieferzeiten einzuplanen. Des Weiteren können über die Fahrzeuglebenszeit mögliche Obsoleszenzen von Bauteilen eintreten. Aus diesem Grund ist neben einem Budget für spezielle Ersatzteile ein erhöhter Bedarf für Lagerkapazitäten zu berücksichtigen.

## 7.5. Personal

Die Einführung von Elektrobussen führt durch ihre HV-Komponenten zu einer neuen Gefährdungssituation. Zusätzliche Gefährdungen entstehen durch HV-Komponenten bei Tätigkeit am Fahrzeug, die neue Werkstattinfrastruktur und eventuelle Mängel in der Werkstattorganisation. Eine detaillierte Gefährdungsbeurteilung kann dem Leitfaden der VBG [16] entnommen werden.

Eine elektrische Gefährdung liegt vor, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

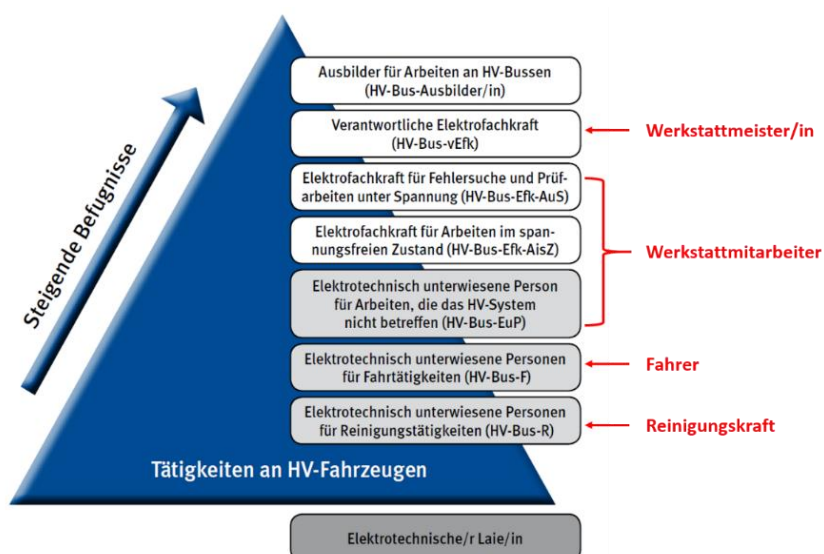
- ▶ Die Spannung ist größer als 25 V (AC) / 60 V (DC).
- ▶ Der Kurzschlussstrom an der Arbeitsstelle ist größer als 3 mA (AC) / 12 mA (DC).
- ▶ Die Energie beträgt mehr als 350 mJ.

Bei folgenden Tätigkeiten an Elektrobussen können Gefährdungen durch elektrischen Strom entstehen:

- ▶ „Arbeiten an Fahrzeugkomponenten, die nicht zum HV-System gehören, also alle nichtelektrotechnischen Arbeiten oder Arbeiten am Niederspannungssystem
- ▶ Elektrotechnische Arbeiten im spannungsfreien Zustand an HV-Bussen und deren Komponenten
- ▶ Fehlersuche und Prüfarbeiten unter Spannung an HV-Bussen und deren Komponenten“

### 7.5.1. Qualifizierung

Aufgrund der neuen Gefährdungen im HV-Bereich müssen Beschäftigte qualifiziert werden. Je nach Tätigkeit der Beschäftigten ist der geforderte Qualifikationsgrad unterschiedlich hoch. Qualifizierte Beschäftigte müssen in der Lage sein, mögliche Gefahren zu erkennen und ihre Arbeiten sicher ausführen. Abbildung 25 stellt alle Qualifikationsstufen bei Arbeiten an HV-Fahrzeugen dar.



Datum: 28.06.2019  
Version: 3.0



Abbildung 25: Qualifikationspyramide



Quelle: Leitfaden VBG

Anmerkung: Die in der Abbildung 25 dargestellten Abkürzungen finden sich im hier folgenden Text wieder.

In der Regel ist es vorgesehen, dass der Werkstattmeister bzw. die Werkstattmeisterin die verantwortliche fachliche Leitung, des elektronischen Betriebsteiles für die Arbeiten an Elektrobussen übernimmt. Hierfür ist eine Qualifizierung als verantwortlicher Elektrofachkraft erforderlich.

Unter der Leitung der Werkstatt sind die Werkstattbeschäftigten mindestens als elektronisch unterwiesene Person, nach HV-Bus-EuP zu qualifizieren. Je nach Tätigkeit der Beschäftigten können höhere Qualifikationsstufen erforderlich sein:

- ▶ HV Bus EfK AisZ gilt für Beschäftigte, die elektronische Arbeiten im spannungsfreien Zustand an HV-Systemen durchführen. Werden diese Arbeiten unter Leitung und Aufsicht einer Elektrofachkraft für HV-Bussen durchgeführt, ist diese Qualifikationsstufe nicht erforderlich.
- ▶ HV-Bus-Efk-AuS gilt für Beschäftigte, die
  - ▶ Fehlersuche und Prüfarbeiten unter Spannung an HV-Systemen durchführen und
  - ▶ Elektronische Arbeiten unter Spannung durchführen, wenn der Bus an der Ladestation angeschlossen ist. In dem Fall ist eine Qualifikation als Elektrofachkraft für Niederspannung zusätzlich erforderlich.

Für Beschäftigte, die keine Arbeiten in der Werkstatt durchführen, wird keine hohe Qualifikationsstufe erforderlich, sondern wird bei folgenden Tätigkeiten eine Unterweisung zur Sensibilisierung über die möglichen Gefahren bei unsachgemäßem Verhalten gefordert:

- ▶ Für Reinigungstätigkeiten ist die Qualifikationsstufe (HV-Bus-R) vorgesehen.
- ▶ Für Fahrtätigkeiten ist die Qualifikationsstufe (HV-Bus-F) vorgesehen.

### 7.5.2. Ausbildung

Die für die Ausbildung Qualifizierungsinhalte für Arbeiten an HV-Fahrzeugen sind in [16] zu finden. Es muss darauf geachtet werden, dass die Befähigung zum Arbeiten unter Spannung durch eine Wiederholungsausbildung alle vier Jahre aktualisiert wird. (DGUV Regel 103-011 [25], DIN VDE 0105-100 [26]).

Datum: 28.06.2019  
Version: 3.0



## Literaturverzeichnis

- [1] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), „VDV-Schrift 230/1: Rahmenempfehlung für elektrisch betriebene Stadt-Niederflurlinienbusse (E-Bus),“ 2018.
- [2] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), „VDV-Schrift 230: Rahmenempfehlung für Stadt-Niederflurlinienbusse,“ 2014.
- [3] DIN EN ISO 13849-1:2016-06, *Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen*, 2016.
- [4] EN 50163, *Bahnanwendungen - Speisespannungen von Bahnnetzen*, 2005.
- [5] ECE R 100, *Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der besonderen Anforderungen an den Elektroantrieb*, 2015.
- [6] Maschinenrichtlinie 2006/42/EG, *EU-Binnenmarktregeln für Maschinen und Anlagen*, 2006.
- [7] DIN EN ISO 13850, *Sicherheit von Maschinen - Not-Halt - Gestaltungsleitsätze*, 2014.
- [8] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), „VDV-Schrift 260: E-Bus - Infrastruktur/Ladestellen,“ 2016.
- [9] DIN 1055-4, *Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 4: Windlasten*.
- [10] IEC 62196, *Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles -*, 2016.
- [11] DIN EN 61851, *Elektrische Ausrüstung von Elektro-Straßenfahrzeugen – Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge*, 2012.
- [12] ISO 15118, *Road vehicles -- Vehicle to grid communication interface*, 2013.
- [13] TA Lärm, *Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm, Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz*, 1998.
- [14] DIN EN 50122, *Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen - Elektrische Sicherheit, Erdung und Rückleitung*, 2016.
- [15] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), „VDV-Schrift 825: Auswirkungen alternativer Technologien im Linienbus auf Betriebshöfe und Werkstätten,“ 2015.
- [16] Verwaltungs-Berufsgenossenschaft (VBG), „Elektromobilität - Arbeiten an Omnibussen mit Hochvolt-Systemen,“ 2016.

Datum: 28.06.2019  
Version: 3.0



- [17] W. Dalrymple, „London's low-carbon electric bus garage,“ Transport Engineer - IRTE, 08. Mai 2018. [Online]. Available: <http://www.transportengineer.org.uk/transport-engineer-features/londons-low-carbon-electric-bus-garage/173547>. [Zugriff am 11. März 2019].
- [18] DIN VDE 1000-10, *Anforderungen an die im Bereich der Elektrotechnik tätigen Personen*, 2009.
- [19] DIN EN 50191 VDE 0104:2011-10, *Errichten und Betreiben elektrischer Prüfanlagen*, 2011.
- [20] DIN VDE 0100-510, *Errichten von Niederspannungsanlagen*, 2014.
- [21] IEC 60364-7-722, *Low-voltage electrical installations*, 2018.
- [22] DIN EN 60529 VDE 0470-1:2014-09, *Schutzarten durch Gehäuse*, 2014.
- [23] DIN EN 61477, *Arbeiten unter Spannung*, 2010.
- [24] DIN EN IEC 60900, *Handwerkzeuge zum Gebrauch bis AC 1000 V und DC 1500 V*, 2019.
- [25] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) Regel 103-011, *Arbeiten unter Spannung an elektrischen Anlagen und Betriebsmitteln*, 2006.
- [26] DIN VDE 0105-100, *Betrieb von elektrischen Anlagen*, 2015.