



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Verkehr BAV

Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050
im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)

LEITFADEN FLOTTENELEKTRIFIZIERUNG FÜR BUSBETRIEBE



Christine Schulz-Dübi

Regionalverkehr Bern-Solothurn (RBS) / Busbetrieb Solothurn und Umgebung (BSU)

Tiefenastrasse 2, 3048 Worblaufen, christine.schulz@rbs.ch

Roman Zürcher

Regionalverkehr Bern-Solothurn (RBS) / Busbetrieb Solothurn und Umgebung (BSU)

Tiefenastrasse 2, 3048 Worblaufen, roman.zuercher@rbs.ch

Mareike Otte

VCDB VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH

Könneritzstrasse 31, DE-01067 Dresden, m.otte@vcdb.de, www.vcdb.de

Jan Schwarzenberger

VCDB VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH

Könneritzstrasse 31, DE-01067 Dresden, j.schwarzenberger@vcdb.de, www.vcdb.de

Impressum

Herausgeberin:
Bundesamt für Verkehr BAV
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)
CH-3003 Bern

Programmleiter
Tristan Chevroulet, BAV

Projektnummer: P-144
Bezugsquelle
Kostenlos zu beziehen über das Internet
www.bav.admin.ch/energie2050

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor –in oder sind ausschliesslich die Autoren –innen dieses Berichts verantwortlich.

Bern, den 29.11.2019

Leitfaden Flottenelektrifizierung für Busbetriebe



Auftraggeber:

RBS
Regionalverkehr Bern-Solothurn

Tiefenaustrasse 2
CH-3048 Worblaufen

Web: www.rbs.ch

BSU
Busbetrieb Solothurn und Um-
gebung

Dornacherstrasse 48
CH-4501 Solothurn

Web: www.bsu.ch

Planer:

VCDB VerkehrsConsult
Dresden-Berlin GmbH

Könneritzstrasse 31
DE-01067 Dresden

Tel.: +49 351 4823 100

Fax: +49 351 4823 109

Mail: dresden@vcdb.de

Web: www.vcdb.de

Ansprechpartner:

Mareike Otte

m.otte@vcdb.de
+49 351 4823 113

Jan Schwarzenberger

j.schwarzenberger@vcdb.de
+49 351 4823 173

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	17
1.1	Ausgangslage und Zielsetzung	17
1.2	Begriffsbestimmung	17
1.3	Fokus des Leitfadens	19
2	Technologische Grundlagen	20
2.1	Ladekonzepte.....	20
2.1.1	Volllader.....	20
2.1.2	Gelegenheitslader	21
2.1.3	Oberleitungsbus.....	22
2.1.4	Brennstoffzellen-Bus	23
2.1.4.1	Reine Brennstoffzellenbusse (BZ).....	24
2.1.4.2	Batterieelektrische Busse mit Brennstoffzelle als Range-Extender (BZ-REX)	24
2.2	Energiezuführung	25
2.2.1	Fahrzeugseitiges Ladegerät (Plug-In-System, stationär-konduktiv)	26
2.2.2	Externes Ladegerät (Plug-In-System, stationär-konduktiv)	27
2.2.3	Docking-Station (stationär-konduktiv)	30
2.2.4	Ladepunkt Oberleitung (stationär-konduktiv)	33
2.2.5	Oberleitung (dynamisch-konduktiv)	34
2.2.6	Induktionsschleife (stationär-induktiv)	35
2.2.7	Wasserstofftankstelle (chemische Energiezuführung)	37
2.3	Elektrochemische Energiespeicher	40
2.3.1	Hochenergiebatterien	40
2.3.2	Hochleistungsbatterien	40
3	Bewertung des Liniennetzes für den Einsatz von Elektrobussen	42
3.1	Zielsetzung und Vorgehensweise	42

3.2	Datengrundlage	42
3.3	Festlegung des Ladekonzeptes	43
3.4	Fahrzeugkonfiguration	44
3.5	Umlaufanalyse und Energiebilanzierung	46
3.6	Ableitung eines Betriebs- und Umstellungskonzeptes	51
3.7	FAQ – Linienuntersuchung	52
4	Konzeption der Infrastruktur für Voll- und Gelegenheitsladung.....	54
4.1	Zielsetzung und Vorgehensweise	54
4.2	Ladeinfrastruktur Betriebshof.....	54
4.2.1	Netzanschluss.....	54
4.2.1.1	Ermittlung der Anschlussleistung.....	54
4.2.1.2	Abstimmung mit Netzbetreiber	56
4.2.2	Voraussetzungen für den Mittelspannungsanschluss	57
4.2.2.1	Übergabestation.....	57
4.2.2.2	Mittelspannungsring.....	57
4.2.2.3	Transformatorstation	58
4.2.3	Variantenuntersuchung Ladetechnik.....	59
4.2.3.1	Raster.....	60
4.2.3.2	Aufbau Transformator / Ladegeräte:.....	60
4.2.3.3	Kontaktsystem.....	63
4.2.3.4	Ladeleistung	67
4.2.4	Anforderungen an die Abstellung.....	70
4.2.4.1	Flächenkapazität	70
4.2.4.2	Bauhöhe Einstellhalle	71
4.2.4.3	Sicherheitsaspekte	72
4.2.4.4	Brandschutz	73
4.3	Ladeinfrastruktur Strecke	75
4.3.1	Anforderungsprofil	75
4.3.1.1	Flächenverfügbarkeit.....	75
4.3.1.2	Energiebereitstellung.....	76
4.3.1.3	Eigentumsverhältnisse	76
4.3.1.4	Integration in den öffentlichen Raum	77

4.3.1.5	Betriebsorganisation der Haltestelle	77
4.4	FAQ – Infrastrukturkonzeption	77
5	Werkstattausrüstung, Mitarbeiterqualifizierung und IT-Systeme	80
5.1	Zielsetzung und Vorgehensweise	80
5.2	Technische Ausrüstung einer Elektrobuswerkstatt	80
5.2.1	Arbeiten auf Dachniveau.....	80
5.2.2	Entfernen und Bewegen grösserer Lasten.....	82
5.2.3	Lagerung von Energiespeichersystemen.....	83
5.2.4	Lagermöglichkeiten für Spezialwerkzeug, separater Werkstattbereich	83
5.2.5	Lademöglichkeiten.....	84
5.2.6	Havarieplatz	84
5.2.7	Standardausrüstung nach VDV 825	84
5.3	Schulung der Mitarbeitenden.....	85
5.3.1	Hochvolt-Qualifikationsstufen	85
5.3.2	Vorzusehende Schulungsbedarfe	87
5.4	Anpassung der IT-Systemarchitektur	88
5.4.1	Zielsetzung und Vorgehensweise.....	88
5.4.2	Systemaufbau	89
5.4.3	Funktionsbeschreibung der Kernsysteme	90
5.4.3.1	Lademanagementsystem LMS	90
5.4.3.2	Energiebeschaffungssystem EBS.....	91
5.4.3.3	Betriebshofmanagementsystem BHMS	92
5.4.4	Anforderungen an Beschaffung und Betrieb.....	93
5.5	FAQ – Werkstattausrüstung, Mitarbeiterqualifizierung und IT- Systeme.....	95
6	Ökonomische Bewertung	98
6.1	Zielsetzung und Vorgehensweise	98
6.2	Datengrundlage	98
6.3	Investitionskosten.....	100
6.4	Gesamtkostenbetrachtung	101

6.5	FAQ – Ökonomische Bewertung	103
7	Ökologische Bewertung	105
7.1	Zielsetzung und Vorgehensweise	105
7.2	Treibhausgase.....	105
7.3	Luftschadstoffe.....	106
7.4	FAQ – Ökologische Bewertung	106
8	Submission	107
8.1	Zielsetzung und Vorgehensweise	107
8.2	Lastenheft Elektrobus	107
8.2.1	Motoren, Antrieb und Bremse.....	108
8.2.2	Energieverbrauch und Reichweite.....	108
8.2.3	Heizung und Klimatisierung.....	109
8.2.4	Hochvolttechnik	109
8.2.4.1	Sicherheit	109
8.2.4.2	Leistungselektronische Bauteile	109
8.2.4.3	Energiespeicher.....	110
8.2.4.4	Energiezuführung	110
8.2.5	Energiemanagement	111
8.3	Lastenheft Ladeinfrastruktur	111
8.3.1	Allgemeine Anforderungen	111
8.3.2	Leistungsparameter	112
8.3.3	Kommunikation	112
8.3.4	Betriebszustände und Ladeablauf.....	112
8.3.5	Mobile Ladegeräte	113
8.3.6	Bauliche Gestaltung.....	113
8.4	FAQ – Submission	114

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Konfigurationsmöglichkeiten Elektrobus.....	18
Abbildung 2.1:	Möglichkeiten der Energiezuführung	25
Abbildung 2.2:	Belegung Typ-2-Kupplung und -Stecker nach IEC 62196	27
Abbildung 2.3:	Belegung Combo-2-Kupplung und -Stecker nach IEC 62196	29
Abbildung 2.4:	Docking-Station-Systeme.....	31
Abbildung 2.5:	Stromabnehmer bei Oberleitungsbussen.....	34
Abbildung 2.6:	Abnehmerspule im Fahrzeugboden (Pick-Up)	36
Abbildung 3.1:	Simulation des Energieverbrauchs einer Beispieluntersuchung (Fahrplandaten / Echtzeitdaten).....	49
Abbildung 3.2:	Lupenbetrachtung des Energieverlaufes für einen Tagesabschnitt	50
Abbildung 3.3:	Energieverlaufsdarstellung im Betriebshof	51
Abbildung 4.1:	Varianten zum Aufbau von Transformator und Ladegeräten.....	61
Abbildung 4.2:	Varianten zum Aufbau des Kontaktsystems	65
Abbildung 4.3:	Varianten zur Dimensionierung der Ladeleistung	68
Abbildung 4.4:	Fahrzeugabstellung und Ladepunktzuordnung.....	71
Abbildung 4.5:	Minimale Bauhöhe der Einstellhalle für ein Docking-Station-System.....	72
Abbildung 5.1:	Dacharbeitsstand bei der FFG in Hamburg	81
Abbildung 5.2:	Erforderliche Innenraumhöhe E-Bus-Werkstatt.....	82
Abbildung 5.3:	Qualifikationspyramide	88
Abbildung 5.4:	Systemlandschaft Elektrobusbetrieb	89

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Typische Kennzahlen BZ- und BZ-REX-Bus.....	24
Tabelle 4.1:	Variantenbildung für die Ladinfrastruktur	59
Tabelle 4.2:	Zusammenfassung der Varianten zur Rasterung	60
Tabelle 4.3:	Zusammenfassung der Varianten zum Aufbau von Transformator und Ladegeräten	63
Tabelle 4.4:	Zusammenfassung der Varianten zum Aufbau des Kontaktsystems	66
Tabelle 4.5:	Zusammenfassung der Varianten zur Ladeleistung	69
Tabelle 4.6:	Flächenbedarfe für verschiedene Varianten und Komponenten einer Schnellladeinfrastruktur.....	76
Tabelle 5.1:	Mindestausstattung Werkzeuge und Werkstattausrüstung E-Bus.....	85

Abkürzungsverzeichnis

Kürzel	Bedeutung
AC	Alternating Current (Wechselstrom)
BAV	Bundesamt für Verkehr
BEB	Battery Electric Bus (Batteriebus)
BHMS	Betriebshofmanagementsystem
BMS	Batteriemanagementsystem
BSU	Busbetrieb Solothurn und Umgebung
BZ	Brennstoffzellenfahrzeug
BZ-REX	Batterieelektrisches Fahrzeug mit Brennstoffzelle als Range-Extender
CCS	Combined Charging System
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CP	Control Pilot
DC	Direct Current (Gleichstrom)
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
EBS	Energiebeschaffungssystem
EBT	Energieberechnungstool
FUS	Fahr- und Umlaufplanungssystem
H ₂	Wasserstoff
HC	Kohlenwasserstoffe
HEB	Hybrid Electric Bus (Hybridbus)
HV	Hochvolt
ITCS	Intermodal Transport Control System (Betriebsleitsystem)
KTU	Konzessionierte Transportunternehmen
Li-FePO	Lithium-Eisenphosphat
Li-NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid
LIS	Ladeinfrastruktur
LLM	Lokales Lastmanagement
LMS	Lademanagementsystem
LTO	Lithium-Titanat-Oxid
N	Neutralleiter
NO _x	Stickstoffoxide
NISTRA	Nachhaltigkeits-Indikatoren für Strasseninfrastrukturprojekte
OCP	Open Charge Point Protocol

Abkürzungsverzeichnis

ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PE	Protective Earth (Schutzleiter)
PHEB	Plug-In Hybrid Electric Bus (Plug-In Hybridbus)
PLC	Power Line Communication
PM	Particulate Matter (Partikel / Feinstaub)
PP	Proximity Pilot
RBS	Regionalverkehr Bern-Solothurn
SOC	State of Charge (Ladezustand)
SOH	State of Health (Gesundheitszustand)
SORT	Standardised On-Road Test Cycles (Standardisierte Strassen-Testzyklen)
TAB	Technische Anschlussbedingungen
TB	Trolleybus / Oberleitungsbus
TOPO	Topographie
VBG	Verwaltungs-Berufsgenossenschaft
VCDB	VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen
WMS	Werkstattmanagementsystem

Technisches Glossar

Batteriebalancing	Teil des Batteriemangements, das zum Ausgleich der elektrischen Ladungsverteilung dient. So werden die Zellen vor kritischen Ladezuständen geschützt.
Docking-Station-System	Kontaktierung zwischen Fahrzeug und Ladetechnik mittels Pantograph und Kontaktschiene (Fahrzeug) bzw. Ladehaube (Infrastruktur)
Einhausung	Gesamtheit der Baugruppen, die notwendig sind, um die Komponenten für die Ladung hinreichend von ihrer Umwelt abzuschirmen und um die Umwelt vor schädlichen Einflüssen der Komponenten zu schützen.
Ferndiagnose	Abrufen von Daten, Zustandsinformationen und Fehlermeldungen aus der Ferne.
Glasfaserkabel	Kommunikationsleitung auf Lichtwellenbasis für die gesamte Ladeinfrastruktur.
Heizung - Hybridheizung	Die Hybridheizung nutzt bis zu einer bestimmten Aussentemperatur (ca. 5 °C) elektrische Energie zum Heizen. Bei geringen Aussentemperaturen wird eine fossile Zusatzheizung genutzt. So kann der elektrische Energiebedarf vor allem bei niedrigen Temperaturen deutlich begrenzt werden.
Heizung - Vollelektrische Heizung	Die vollelektrische Heizung nutzt ausschliesslich elektrische Energie zum Heizen. Dies erfordert bei tiefen Aussentemperaturen einen relativ hohen Energiebedarf.
Heizung - Wärmepumpe	Eine Wärmepumpe nutzt die Energie der Umgebungsluft und erhöht diese zusätzlich mithilfe elektrischer Energie. So reduziert sich der Energiebedarf gegenüber der vollelektrischen Heizung.

Hochenergiebatterie	Batterien mit einer hohen Energiedichte, sie kommen vor allem bei Vollladern zum Einsatz. Zelltechnologie ist meist Li-FePO oder Li-NMC.
Hochleistungsbatterie	Batterien mit einer hohen Leistungsdichte, sie kommen vor allem bei Gelegenheitsladern zum Einsatz. Zelltechnologie ist meist LTO.
Klimatisierung	Gesamtheit der Baugruppen, die zur Regelung der Innentemperatur von technischen Installationen dienen, damit diese im Rahmen der vorgeschriebenen Grenzen und Umgebungsbedingungen arbeiten können.
Kontaktsystem	Teil der Einrichtung, die zur Herstellung einer Verbindung zwischen dem Batteriebus und dem Ladepunkt verwendet wird.
Ladegerät	Gesamtheit aus Gleichrichter sowie weiteren elektrotechnische Anlagen (Leistungselektronik, Schalttechnik, Controller) für die Gleichstromladung.
Ladeinfrastruktur	Für die elektrische Nachladung von Batteriebussen geeignete Gesamteinheit an technischen Komponenten, sowie Leitungen und Hilfsbetriebe. Diese kann sich auf dem Betriebshof oder auf der Strecke befinden.
Ladepunkt	Lademöglichkeit für ein (1) Fahrzeug. Ein Ladepunkt dient dem Anschluss eines Elektrobusses. Die elektrische Verbindung erfolgt konduktiv über das Plug-In-System oder das Docking-Station-System
Ladestation	Bauliche Zusammenfassung von einem oder mehreren Ladegeräten (Gleichrichter, Gleichstrom-Schalttechnik, Ansteuerung) und den notwendigen Nebenaggregaten (Klimatisierung, Einhausung).

Ladetechnik	Gesamtheit aller technischen Einrichtungen, welche speziell für das Laden von Elektrofahrzeugen auf dem Betriebshof verbaut sind, wie u. a. die Ladegeräte, die Steuertechnik, die Zuleitungen, die Aufstellsäulen, das Ladekabel und die Ladehaube zur Verbindung mit dem Fahrzeug.
Leistungselektronik	Teil der Einrichtung, die zur Herstellung einer Verbindung zwischen dem Batteriebus und dem Ladepunkt verwendet wird.
Netzanschluss	Stellt den Anschluss der elektrischen Betriebsmittel der Ladeinfrastruktur an das übergeordnete, elektrische Netz her. Dabei sind wichtige Daten, wie Anschlussleistung und installierte Leistung, an den Netzbetreiber zu übergeben.
Netzspannungsebenen	Höchstspannung: 220 kV oder 380 kV Hochspannung: 60 kV bis 150 kV Mittelspannung: 1 kV bis 35 kV Niederspannung: bis 1 kV
Netzübergabepunkt	Markiert den Übergang vom öffentlichen Stromnetz auf das interne Stromnetz des Betriebshofes.
Plug-In-System	Kontaktierung zwischen Fahrzeug und Ladetechnik mittels standardisiertem Ladekabel mit Kupplung und fahrzeugseitiger Aufnahme (Stecker).
Servicezeit	Dient den täglichen Aufgaben am Fahrzeug, wie Innen- und ggf. Aussenreinigung, Tanken (Dieselbus), kleineren Reparaturen und Rangieren zum Abstellplatz.
Transformatorstation	Transformator, der in die Mittelspannungsleitung eingebunden ist und das für die Ladegeräte erforderliche Spannungsniveau bereitstellt. Die Transformatorstation kann als Kompaktstation oder als begehbare Gebäude ausgeführt werden.

Umlauf	Aneinanderreihung von Fahrplanfahrten sowie Leerfahrten (bspw. Ein- und Ausrücken) auf einer oder mehreren Linien.
Umrichterstation	siehe Ladestation
Vorkonditionieren	Temperieren des Busses in der Einstellhalle vor dem Ausrücken. Der Energiebedarf wird über die Ladeinfrastruktur bereitgestellt, sodass die Batterien geschont werden können.
Wagenlauf	Verknüpfung von mehreren Umläufen, die ein Bus, ggf. mit Wartezeit, auf dem Betriebshof an einem Betriebstag fährt.
Wallbox	Dient der Aufnahme des Ladekabels am Ladepunkt. Wird auch als Ladesäule bezeichnet. Kann auch Komponenten für die Kommunikation beinhalten.
Wendezeit	Dient dem Verspätungsausgleich, dienstlichen Aufgaben, sowie persönlichen Bedürfnissen des Fahrpersonals.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Zielsetzung

Der Regionalverkehr Bern-Solothurn (RBS) und der Busbetrieb Solothurn und Umgebung (BSU) sind zwei Schwesterunternehmen, welche in den Räumen Bern und Solothurn zwei Dieselbusflotten betreiben. Die Nachhaltigkeitsstrategie von RBS und BSU sieht vor, die Treibhausgasemissionen massiv zu senken. Ein Grossteil der CO₂-Emissionen wird durch den Busbetrieb verursacht, weshalb die Systemumstellung der Busflotten auf Elektrobusbetrieb im Fokus steht. Vor dem Hintergrund dieser tiefgreifenden Technologieumstellung ergeben sich zahlreiche Fragestellungen technischer, betrieblicher und wirtschaftlicher Art, die vor dem Beginn des Übergangsprozesses beantwortet werden sollen. RBS und BSU haben deshalb das Beratungsunternehmen VCDB beauftragt, ein detailliertes Umsetzungskonzept zu erarbeiten.

Die allgemeingültigen Erkenntnisse aus dieser Analyse werden in diesem Leitfaden zusammengefasst, damit ein praxisnaher Wissenstransfer möglich ist. Der Leitfaden formuliert Handlungsempfehlungen für die Teilbereiche «Netzanalyse und Ladestrategie», «Infrastrukturkonzept», «Betriebskonzept», «Submission» und «Finanzierung». Dieser Leitfaden richtet sich an alle interessierten Transportunternehmen, welche vor der Herausforderung der Umstellung auf Elektrobusbetrieb stehen.

Für politische Entscheidungsträgerinnen und -träger sind neben den rein technischen Abhandlungen vor allem die dargestellten Kostenvergleiche und die externen Kosten in Bezug auf die Umweltauswirkungen von Elektrobusen und konventionellen Dieselnissen von Interesse.

1.2 Begriffsbestimmung

Um die Emissionen lokal und – bei Einsatz erneuerbarer Energien – auch über die gesamte Energiebereitstellungskette auf nahezu null zu senken, wird in aller Regel eine Elektrifizierung des Antriebsstrangs des Busses angestrebt.

Als Elektrobusse werden im Folgenden strassengebundene Fahrzeuge des ÖPNV bezeichnet, die über einen elektrischen Hauptantrieb verfügen. Es wird zwischen folgenden Elektrobustypen unterschieden:

- ▶ Batterieelektrobus / Battery Electric Bus (BEB)
- ▶ (Plug-In) Hybrid Electric Bus (PHEB / HEB)
- ▶ Oberleitungsbus / Trolley Bus (TB)

Die Elektrobustypen werden zudem nach der Antriebskonfektionierung und den Energiezuführungskonzepten weiter differenziert. Folgende Abbildung zeigt die verschiedenen Konfigurationsmöglichkeiten für den Elektrobus.

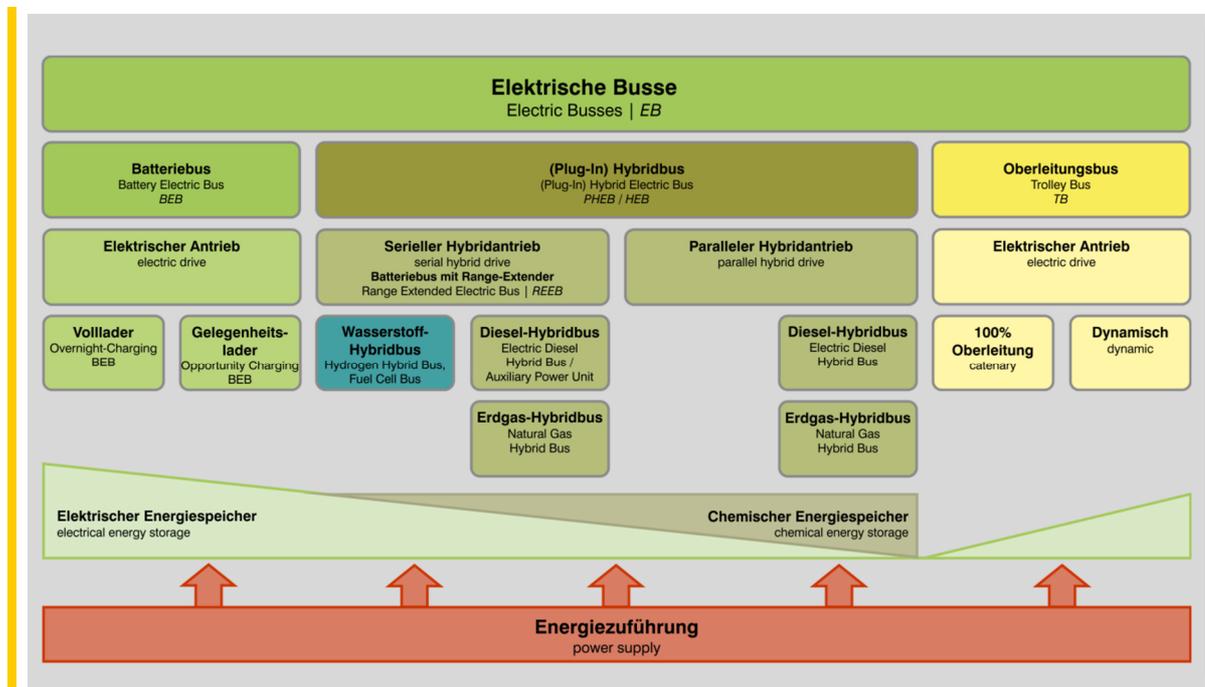


Abbildung 1.1: Konfigurationsmöglichkeiten Elektrobus

Allen Elektrobussen gemein ist die Möglichkeit der Rückgewinnung von Bremsenergie (Rekuperation). Die Rekuperation und die daraus resultierende dynamische Ladung des elektrischen Energiespeichers haben sich im praktischen Umfeld als günstig erwiesen. Diese Art der Leistungsverzweigung dient der Effizienzsteigerung und Reichweitenoptimierung. Rekuperationsraten von 75 % der abgerufenen kinetischen Energie sind unter Optimalbedingungen realisierbar, sodass die Rekuperation in praktisch allen elektrischen Bussen zum Einsatz kommt.

1.3 Fokus des Leitfadens

Bei der für RBS und BSU durchgeführten Untersuchung wurden aufgrund der Systementscheidung für Batterieelektrobuse die anderen Elektrobustypen nicht näher betrachtet. Ein Oberleitungssystem ist mit Blick auf die Systementscheidung für Batterieelektrobuse und dem Bedienungsgebiet von RBS und BSU nicht sinnvoll. Busse mit Brennstoffzelle kommen aufgrund der geringen Marktreife derzeit nicht in Frage.

Die Untersuchung beschränkte sich auf die stationären konduktiven Verfahren für die Ladung von Elektrobussen, da diese am weitesten verbreitet und technisch ausgereift sind. Zudem wurden wegen der höheren verfügbaren Leistungen ausschliesslich Systeme mit infrastrukturseitigem Ladegerät betrachtet.

Aus diesen Gründen gibt der Leitfaden zunächst in Kapitel 2 einen Überblick über die Gesamtheit der Technologien und fokussiert ab Kapitel 3 auf die Ladekonzepte Voll-lader und Gelegenheitslader sowie die Energiezuführung über Plug-In- und Docking-Station-System. Für einen schnellen Zugriff auf die wichtigsten Fragen und Antworten ist ab Kapitel 3 jeweils am Ende eines Kapitels ein FAQ zu finden.

2 Technologische Grundlagen

2.1 Ladekonzepte

Ein Batteriebus (engl. Battery Electric Bus, BEB) ist ein batteriebetriebenes Elektrofahrzeug, das ausschliesslich mit einem Elektromotor ausgestattet ist und seine Antriebsenergie aus einer Batterie (ein elektrochemischer Energiespeicher) im Fahrzeug bezieht. Das Aufladen dieses Energiespeichers erfolgt über das Energienetz.

Bei Batteriebussen wird die Reichweite grundsätzlich durch die zur Verfügung stehende elektrische Energiespeicherkapazität bestimmt. Entsprechend der Liniencharakteristik (Umlauflänge, Einsatzzeit, Topographie, Fahrcharakteristik etc.) werden das Betriebskonzept und die Ladestrategie definiert. Einen weiteren signifikanten Einfluss auf die Energiebilanz haben Nebenaggregate, wie beispielsweise elektrische Klimatisierung. Um die Busse hinsichtlich ihres Ladekonzepts vergleichen zu können, werden solche Systementscheidungen in der folgenden allgemeinen Bewertung nicht betrachtet.

Batteriebusse werden entsprechend der Ladestrategie und somit der Batteriekapazität in Voll- und Gelegenheitslader kategorisiert.

Ein Oberleitungsbus (engl. Trolley Bus, TB) ist ein Elektrofahrzeug, das seine Antriebsenergie aus einer über der Fahrbahn gespannten Oberleitung bezieht. Dieses Ladekonzept wird gesondert kategorisiert.

Ein Brennstoffzellenbus bezieht seine Antriebsenergie sowohl aus einer Batterie als auch aus einer Brennstoffzelle in Verbindung mit einem Wasserstofftank. Dabei wird unterschieden zwischen reinen Brennstoffzellenbussen (BZ) und batterieelektrischen Bussen mit Brennstoffzelle als Range-Extender (BZ-REX). Dieses Lade- bzw. Tankkonzept wird ebenfalls separat beschrieben.

2.1.1 Volllader

Ist die Kapazität des Energiespeichers im Fahrzeug für einen ganzen Tageseinsatz ausgelegt, so handelt es sich um einen Volllader (engl. Overnight Charger). Die Nachladung der im Vergleich zum Gelegenheitslader grösseren Energiespeicher erfolgt an zentralen Punkten während der Betriebspause, vorzugsweise im Betriebshof. Bei zeitgleicher Ladung von

2 Technologische Grundlagen

mehreren Bussen an einem Ort ist eine entsprechende Anzahl von Ladepunkten vorzusehen. Die Auslegung der Ladepunkte ist abhängig von der Batteriekapazität und der möglichen Nachladeleistung innerhalb eines Zeitintervalls. Diese Parameter bestimmen das Betriebskonzept.

Während der zeitlich ausgedehnten stationären Ladung mit moderater Leistung kann der Ladezyklus optimiert werden. Diese Ladestrategie schont die Speicherzellen und kann sich u. a. positiv auf die Lebensdauer von Akkumulatoren auswirken.

Um die Netzlast des Busbetriebshofs während der parallelen Nachladung einer Flotte von Vollladern zu minimieren, können über ein Lademanagement die Ladezyklen reguliert und über den kompletten verfügbaren Ladezeitraum verteilt werden. In Abhängigkeit von Akku-Kapazitäten und Fahrplan sollten die Akkumulatoren möglichst zeitversetzt geladen werden.

In Einzelfällen ist es möglich, auch beim Volllader eine Zwischenladung während des Einsatztages zu realisieren, um die Reichweite zu optimieren oder die Netzlast während der Nachtladung zu reduzieren. Im Gegensatz zum reinen Übernachtlader erfolgt die Ladung nicht ausschliesslich in den Nachtstunden und Zeiten der Betriebsruhe. Eine solche Zwischenladung mit geringer Ladeleistung kann beispielsweise bei längeren Betriebspausen im Betriebshof oder an den Wendepunkten erfolgen. Auch ein Fahrzeugtausch ist für ein solches Szenario denkbar.

Die beim Volllader erforderliche hohe Kapazität des Energiespeichers verursacht ein hohes Gewicht und erfordert einen grösseren Einbauraum im Fahrzeug. Die zur Verfügung stehende Platzkapazität reduziert sich entsprechend. Die Kosten für den Energiespeicher steigen linear mit der erforderlichen Speicherkapazität.

Bei entsprechender Dimensionierung der Fahrzeugbatterie kann ein Volllader viele der derzeit üblichen Betriebsszenarien von Dieselnissen gleichwertig abbilden.

2.1.2 Gelegenheitslader

Der Gelegenheitslader (engl. Opportunity Charger) verfügt über einen kleineren Energiespeicher, welcher nicht für einen kompletten Tageseinsatz ausgelegt ist. Der Energiespeicher muss während des Linieneinsatzes auf

2 Technologische Grundlagen

der Strecke nachgeladen werden. Im Gegensatz zum Vollader mit Zwischenladung kommen hohe Ladeleistungen und oft auch ein eigens hierfür vorgesehenes Ladesystem (z. B. Docking-Station) zur Anwendung.

Die Ladestrategie sieht entsprechend der Streckencharakteristik neben einer Nachladung auf dem Betriebshof weitere Ladepunkte an Wendepunkten vor. Zusätzlich können ausgewählte Haltestellen mit längerer Haltezeit als Ladepunkte mit hoher Nachladeleistung ausgelegt werden. Sobald das Fahrzeug am Ladesystem positioniert ist, wird – automatisch oder durch eine Aktion des Fahrpersonals – der Kontakt hergestellt und die Energieübertragung gestartet.

Der Einsatz kleinerer Energiespeicher wirkt sich in mehreren Aspekten positiv auf das Gesamtfahrzeug aus: Diese haben ein geringeres Gewicht, nehmen weniger Bauraum in Anspruch und sind kostengünstiger in der Anschaffung. Für 1 kWh Batteriekapazität sind etwa 10 kg Batteriegewicht einschliesslich Batteriemanagement anzusetzen. Im Ergebnis bieten die Gelegenheitslader ein höheres Platz- und Gewichtspotenzial für die Personenbeförderung sowie für den Verbau weiterer Aggregate.

Durch die hohen Ladeleistungen werden herkömmliche Akkumulatoren stärker beansprucht, was sich u. a. negativ auf die Lebensdauer auswirken kann. Da nur vergleichbar geringe Speicherkapazitäten benötigt werden, kommen neben den elektrochemischen Batterien auch andere Speichertechnologien wie Kondensatoren zum Einsatz. Diese können ohne grosse Beanspruchung des Speichers deutlich höhere Spitzenströme liefern, weisen aber geringere Energiedichten auf.

Die Gelegenheitsladung erfordert gegebenenfalls Anpassungen der Betriebsabläufe bzw. der Umläufe, da zur Wahrung der Betriebssicherheit gewisse Ladezeiten sichergestellt werden müssen. Die Wendezeiten an Linienendpunkten dienen häufig dem Verspätungsausgleich und müssen dementsprechend verlängert werden, um eine ausreichende Ladung und somit Reichweite der Fahrzeuge zu ermöglichen.

2.1.3 Oberleitungsbus

Ein Oberleitungsbus bezieht seine Fahrenergie über Stromabnehmer aus einer über der Fahrbahn gespannten Oberleitung. Oberleitungsbusse sind aufgrund ihrer Abhängigkeit von der Fahrleitung spurgebundene, nicht aber spurgeführte Fahrzeuge wie etwa Strassenbahnen.

2 Technologische Grundlagen

Die zusätzliche Ausrüstung von Oberleitungsbussen mit einem Energiespeicher ermöglicht einen teilweise oberleitungsfreien Betrieb. Die Nachladung der Energiespeicher erfolgt zum Grossteil aus Rekuperationsenergie und bei Fahrten unter der Oberleitung. Die gespeicherte Energie wird für elektrisches Fahren ohne Oberleitung auf zu definierenden Streckenabschnitten genutzt. Demnach sind nur abschnittsweise Oberleitungen auf neu geplanten Oberleitungsbus-Strecken vorzusehen.

Dabei können unter Umständen komplexe und dadurch kostenintensive Infrastrukturelemente wie Weichen, Kreuzungen oder Kurvenkonstruktionen reduziert und städtebaulich sensible Bereiche vom Oberleitungsnetz ausgespart werden. Der Einsatzradius des oberleitungsfreien Fahrens ist abhängig von der Kapazität des Energiespeichers.

2.1.4 Brennstoffzellen-Bus

In Zukunft könnte der Einsatz einer Wasserstoff-Brennstoffzelle dazu dienen, besonders lange und somit für rein batterieelektrische Busse oder für Oberleitungen ungeeignete Strecken zu elektrifizieren.

In Brennstoffzellen erfolgt eine Energieumwandlung von chemischer in elektrische Energie. Dafür kommt Methanol oder häufiger Wasserstoff zum Einsatz. Dabei wird der Wasserstoff mittels Elektrolyse oxidiert, wodurch elektrische Energie entsteht. Als Reaktionsprodukt verbinden sich Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser, was die einzige Emission der Fahrzeuge ist. Somit ist ein Brennstoffzellenantrieb umweltfreundlich und der Tankvorgang ist weniger zeitintensiv als bei Elektrofahrzeugen. Da heutige Brennstoffzellenfahrzeuge hauptsächlich mit Wasserstoff betrieben werden, findet Methanol in den folgenden Ausführungen keine weitere Beachtung. Wasserstoff hat eine hohe gravimetrische aber niedrige volumetrische Energiedichte, sodass die Betankung und Speicherung unter stark erhöhtem Druck stattfinden.

Nachteilig sind der vergleichsweise geringe Wirkungsgrad in der galvanischen Zelle sowie weitere Verluste bei der Wasserstoffherstellung. Insgesamt hat ein Brennstoffzellenbus in der Betrachtung von Well-to-Wheel einen um den Faktor 2,75 höheren Energiebedarf als ein batterieelektrischer Bus. Hinzu kommen aufgrund der verwendeten Materialien die hohen Kosten für die Brennstoffzelle und der Preis des Brennstoffs Wasserstoff.

Bei Brennstoffzellenbussen erfolgt anhand der Hauptkomponenten:

2 Technologische Grundlagen

- ▶ Brennstoffzelle
- ▶ HV-Batterie
- ▶ Wasserstoffspeicher

eine wesentliche Unterscheidung in reine Brennstoffzellenfahrzeuge (BZ) und Batterieelektrische Fahrzeuge mit Brennstoffzelle als Range-Extender (BZ-REX).

2.1.4.1 Reine Brennstoffzellenbusse (BZ)

Reine Brennstoffzellenfahrzeuge beziehen den überwiegenden Teil der benötigten Energie mittels ihrer Brennstoffzelle aus dem Wasserstoffspeicher. Die mitgeführte Batterie weist eine geringe Kapazität (< 30 kWh) auf und wird zum Zwischenspeichern des Brennstoffzellenstroms, der Rekuperation und der Energieabgabe an die Fahrmotoren genutzt. Die Brennstoffzelle läuft weitestgehend durchgehend zum Erhalt der Ladung und die externe Energiezuführung erfolgt nur über eine Wasserstofftankstelle.

2.1.4.2 Batterieelektrische Busse mit Brennstoffzelle als Range-Extender (BZ-REX)

Batterieelektrische Fahrzeuge mit einer Brennstoffzelle als Range-Extender nutzen eine deutlich grössere Batteriekapazität (> 200 kWh). Im Fahrbetrieb wird zunächst nur die in der Batterie gespeicherte Energie genutzt. Die zusätzlich installierte Brennstoffzelle dient der Verlängerung der Reichweite durch eine kontinuierliche Nachladung der Batterie während des Betriebs und der Versorgung der Nebenaggregate. So können Reichweiten von derzeit bis zu 400 km erreicht werden. Es wird zusätzlich eine elektrische Ladeinfrastruktur benötigt. Die Verbräuche eines BZ-REX können je nach Umlauflänge und Fahrzeugkonfiguration aufgrund des Funktionsprinzips im Vergleich zum reinen Brennstoffzellenfahrzeug stark variieren.

Solobus 12 m	BZ	BZ-REX
Energieinhalt der HV-Batterie	30 kWh	250 kWh
Speicherinhalt des H ₂ -Tanks	40 kg H ₂	15 kg H ₂
Leistung der Brennstoffzelle	100 kW	30 kW

Tabelle 2.1: Typische Kennzahlen BZ- und BZ-REX-Bus

2 Technologische Grundlagen

2.2 Energiezuführung

Für die Zuführung der elektrischen Energie ist ein Kontaktsystem erforderlich. Im Bereich der Elektrobusse sind hierfür folgende Technologien verfügbar:

- ▶ Stationäre, konduktive Ladung
(z. B. Plug-In-System, Docking-System, Ladepunkt Oberleitung)
- ▶ Dynamische, konduktive Ladung
(z. B. Oberleitung)
- ▶ Stationäre, induktive Ladung
(z. B. Induktionsschleife / Pick-Up)
- ▶ Chemische Energiezuführung
(z. B. Tanken von Wasserstoff)

Die stationäre Ladung umfasst alle elektrischen Energiezuführungsarten, bei denen ein Bus im Stillstand geladen wird, wohingegen bei dynamischen Ladeverfahren die Lade- und Antriebsenergie während der Fahrt bereitgestellt wird. Die chemische Energiezuführung ist immer stationär und meint im Bereich der Elektrobusse typischerweise die Betankung von Wasserstoff für Brennstoffzellenbusse.

Die Möglichkeiten der elektrischen Energiezuführung zum Nachladen von Bussen werden in nachfolgender Abbildung dargestellt.

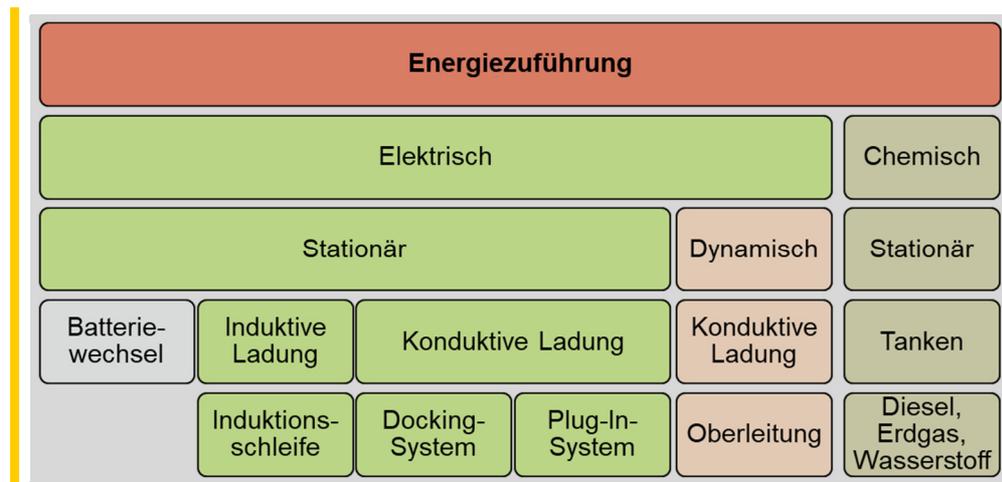


Abbildung 2.1: Möglichkeiten der Energiezuführung

2 Technologische Grundlagen

Die stationären Ladeverfahren lassen sich weiter in konduktive und induktive Verfahren unterteilen. Unter einer konduktiven elektrischen Energiezuführung wird ein leitungsverbundenen Laden über eine form- oder kraftschlüssige Verbindung verstanden. Der Begriff der induktiven elektrischen Energiezuführung bezeichnet das kontaktlose Laden unter Nutzung elektromagnetischer Felder, also ohne direkte Kontaktierung.

Unter der dynamischen konduktiven Ladung ist die leitungsgebundene Energieübertragung während der Fahrt zu verstehen. Das Energieübertragungssystem entspricht der Funktionsweise eines Oberleitungsbusses.

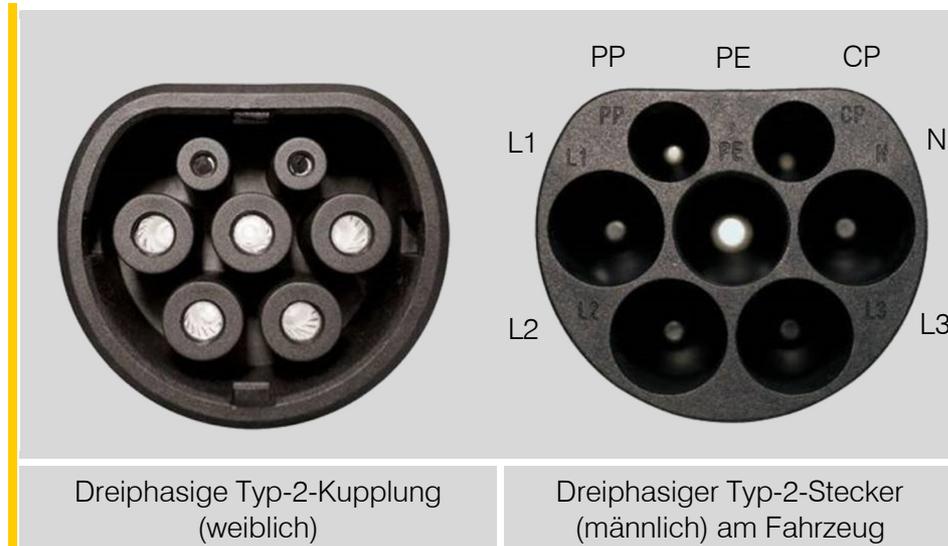
Grundsätzlich werden Energiespeicher mit Gleichspannung nachgeladen. Wird der Ladestrom aus einer Wechselstrom-Quelle (engl. Alternating Current; AC) bezogen, ist dieser für das Laden der Speicher in Gleichstrom (engl. Direct Current; DC) zu wandeln. Das hierfür notwendige Ladegerät (Gleichrichter mit variabler Ausgangsspannung und -strom) kann fahrzeug- oder infrastrukturseitig verbaut werden.

2.2.1 Fahrzeugseitiges Ladegerät (Plug-In-System, stationär-konduktiv)

Bei der Plug-In-Ladung befindet sich das Ladegerät als Kopplung zwischen Netzanschluss und fahrzeugseitigem Energiespeicher im Fahrzeug. Über das Ladekabel wird ein infrastrukturunabhängiger Netzzugang gewährleistet. Zum konduktiven Laden eines Elektrofahrzeuges wurden durch die International Electrotechnical Commission in der Norm IEC 62196 die Lademodi 1 bis 3 für AC/AC-Ladung (beschrieben in der IEC 61851-1) inklusive der zugehörigen Steckverbinder definiert.

Fahrzeugseitig ist in Europa der von der Firma Mennekes entwickelte und (neben anderen Steckertypen) in der IEC 62196-2 standardisierte Typ-2-Stecker verbreitet (siehe folgende Abbildung). Dieser ist für die ein- und mehrphasige Ladung mit Wechselstrom bis 44 kW konzipiert.

2 Technologische Grundlagen

Abbildung 2.2: Belegung Typ-2-Kupplung und -Stecker nach IEC 62196¹

Die an ein Kabel gebundene konduktive Lademöglichkeit im Mode 1 bis 3 stellt technisch eine einfache Lösung dar. Sie ist hauptsächlich im Pkw-Bereich verbreitet, da dieser in der Regel deutlich geringere Batteriekapazitäten und Ladeleistungen erfordert.

Durch die Integration des Ladegeräts in das Fahrzeug können die Infrastrukturkosten reduziert werden. Ein fahrzeugseitig vorgesehene Ladegerät führt jedoch zur Erhöhung des Fahrzeuggesamtgewichts. Zudem ist eine kompaktere Bauform notwendig und somit die Kühlung schwieriger als bei infrastrukturseitig verbauten Ladegeräten. Der Ladestrom ist durch das Ladegerät begrenzt zwischen 16 und 63 A (5,5 bis 44 kW) und führt zu langen Ladezeiten. Übliche Antriebsbatterien können wesentlich höhere Leistungen aufnehmen.

2.2.2 Externes Ladegerät (Plug-In-System, stationär-konduktiv)

Durch die International Electrotechnical Commission ist in der Norm IEC 62196 ebenfalls der Lademodus für AC/DC-Ladung inklusive der zugehörigen Steckverbinder definiert.

¹ Quelle | <https://www.cablesolutions.shop/en/type-2-type-2-charging-cable-32a-1-phase-copy.html>

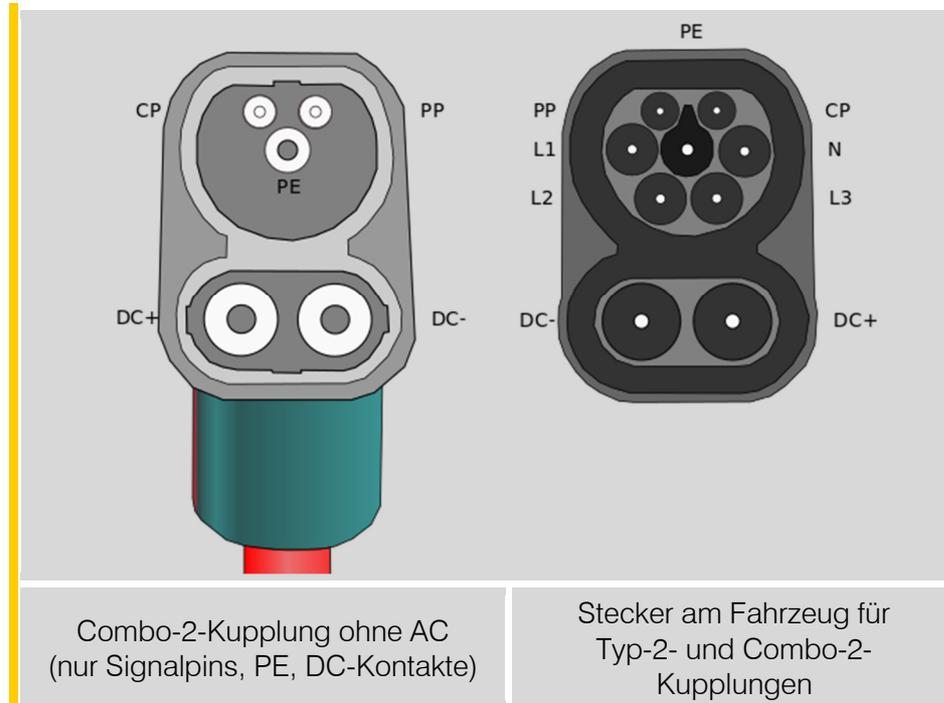
2 Technologische Grundlagen

Mode 4 definiert das Laden mit Gleichstrom. Dieser wird von stationär installierten Gleichrichtern in einer Ladestation bereitgestellt, ein Ladegerät im Fahrzeug ist nicht notwendig. Die genaue Ladespannung hängt von der zulässigen Spannung des zu ladenden Energiespeichers und den an die Ladestation übermittelten Zustandsdaten (z. B. SOC=State of Charge) ab und liegt damit üblicherweise im Bereich von etwa $400 V_{DC}$ bis $800 V_{DC}$. Die erforderliche Ladeschlussspannung liegt höher als die Nennspannung der eingesetzten Batterien, sodass derzeit $850 V_{DC}$ als obere Grenze anzunehmen sind.

Es wird zwischen drei Ladevarianten unterschieden, wobei nur die DC-high-Ladung nach IEC 62196 standardisiert wurde:

- ▶ Die DC-low-Ladung erfolgt fahrzeugseitig über zwei Wechselstromkontakte einer Typ-2-Kabelverbindung. Die maximale Ladeleistung beträgt $38 kW_{DC}$.
- ▶ Die DC-mid-Ladung erfolgt fahrzeugseitig über alle vier Wechselstromkontakte einer Typ-2-Kabelverbindung. Die maximale Ladeleistung beträgt etwa $120 kW_{DC}$ (in Europa von Tesla im Pkw-Bereich eingesetzt).
- ▶ Die DC-high-Ladung nutzt in Europa die Ladeschnittstelle Combo Typ 2 (auch kurz Combo 2), welche eine Erweiterung der üblichen Typ-2-Verbindung um zwei zusätzliche DC-Kontakte darstellt (siehe folgende Abbildung). Die maximale Ladespannung beträgt derzeit für den Combo-2-Stecker $850 V_{DC}$, der maximale Ladestrom $200 A$ und die Maximalladeleistung dementsprechend $170 kW_{DC}$ (IEC 62196-3).

2 Technologische Grundlagen

Abbildung 2.3: Belegung Combo-2-Kupplung und -Stecker nach IEC 62196²

Neben den standardisierten Systemen bieten Fahrzeughersteller auch eigene Ladesysteme an. Dies bedeutet in der Regel, dass Fahrzeuge eines Busherstellers auch nur an einem bestimmten Ladesystem geladen werden können. Um eine möglichst grosse Interoperabilität zu erreichen und die Systeme unabhängig voneinander beschaffen zu können, werden jedoch in jedem Fall herstellerunabhängige Standards empfohlen.

Das AC/DC-Plug-In-System wird grundsätzlich für das Laden in der Betriebsruhe verwendet, d. h. für das Übernachten (Overnight Charging). Die Ladezeit wird durch die Ladeleistung und die Ladekapazität der einzelnen Batterien bestimmt.

Der Vorteil des stationären Ladegerätes im Betriebshof ist die überschaubare Nachladeinfrastruktur sowie der flexible Linieneinsatz der Fahrzeuge im Bediengebiet.

² Quelle | <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CCSCCombo2.svg> Benutzer Ajzh2074

2 Technologische Grundlagen

Da sich beim Mode 4 (DC), im Gegensatz zum Mode 3 (AC), der notwendige Stromrichter nicht im Fahrzeug, sondern in der Ladestation befindet, ist das Fahrzeuggewicht entsprechend geringer.

Die hohen Investitionskosten für die AC/DC-Umrichter können unter Umständen anteilig auf mehrere Elektrobusse umgelegt werden, da ein Umrichter bei einer intelligenten Ladestrategie für das Nachladen mehrerer Fahrzeuge genutzt werden kann.

Der Einsatz von Plug-In-Systemen erfordert im Vergleich zu Docking-Station-Systemen einen höheren Zeitaufwand (manuelles Einstecken des Ladekabels durch das Fahrpersonal). Dies kann die Akzeptanz seitens des Fahrpersonals negativ beeinflussen und ist insbesondere bei Gelegenheitsladern wegen der knapp bemessenen Ladezeiten nicht zu empfehlen.

Das System ist jedoch flexibel einsetzbar und kann auch als Rückfallebene für Docking-Station-Systeme (vgl. Kapitel 2.2.3) dienen.

2.2.3 Docking-Station (stationär-konduktiv)

Bei stationärer, konduktiver Energiezuführung mittels Docking-Station wird der fahrzeugseitige Energiespeicher in der Regel an punktuell im Linienvverlauf installierten Ladestationen über einen Stromabnehmer nachgeladen. Das Nachladen erfolgt auf der Strecke während planmäßiger Fahrzeugstopps an Wendepunkten und / oder Haltestellen (Gelegenheitsladung).

Das Spannungs- und Leistungsniveau ist nicht vorgegeben und richtet sich nach dem jeweiligen Anwendungsfall. Im Allgemeinen liegen die Spannungsparameter im Bereich von 400 V_{DC} bis 850 V_{DC}, wobei auf Seiten der Ladetechnik teilweise Ausgangsspannungen von 150 V_{DC} bis 920 V_{DC} unterstützt werden, und Ladeleistungen von 150 kW_{DC} bis 600 kW_{DC}. Einschränkend ist hinzuzufügen, dass Ladeleistungen von mehr als 450 kW zwar technisch möglich sind, jedoch können diese nur kurzzeitig abgegeben werden und nicht als Dauerleistung. Zudem sind dafür hohe Laderaten von 4 C und mehr erforderlich, die eine vorzeitige Batteriealterung begünstigen.

Die Ladung erfolgt ebenfalls nach Mode 4 IEC 61851-1, Kommunikation und Ladegeräte sind also vergleichbar wie bei der Steckerladung mit Combo 2 (IEC 62196 basiert auf IEC 61851-1).

2 Technologische Grundlagen

Ein Stromabnehmer zur Kontaktherstellung erlaubt, den Ladevorgang mit hoher Ladeleistung vollautomatisch und in kürzester Zeit durchzuführen. Je nach Kopplungsrichtung wird zwischen folgenden Ausführungsvarianten unterschieden:

- ▶ Hub-Docking-Station: Stromabnehmer auf dem Fahrzeugdach (Engl. on-board bottom-up pantograph), Hub bis 2,2 m
- ▶ Seiten-Docking-Station: Stromabnehmer an der Ladestation, Kontaktherstellung auf der Fahrzeugseite
- ▶ Senk-Docking-Station: Stromabnehmer an der Ladestation (Engl. off-board top-down pantograph), Hub bis 2,5 m



Abbildung 2.4: Docking-Station-Systeme

Aufgrund der grossen möglichen Leistung von Docking-Systemen kann das übergeordnete Energienetz unzulässig hoch belastet werden, sodass in diesem Fall ein zusätzlicher Zwischenspeicher am Ladestandort denkbar wäre.

Docking-Systeme sind mit einer Sicherheitsfunktion ausgerüstet. Durch die Verwendung von mindestens vier Kontakten – Schutzleiter PE, Plus DC+, Minus DC–, Pilotkontakt CP – mit gesicherter Einhaltung der Kontaktreihenfolge sind Gefährdungen ausgeschlossen. Der Pilotkontakt CP erkennt die ordnungsgemässe Kontaktherstellung und fordert die Nachladung an. Über den Schutzleiter PE erfolgen im Fehlerfall die Schutzerdung der Anlage und die automatische Abschaltung der Energieversorgung.

Sofern eine Nachladung mittels Plug-In-Lösung (vgl. Kapitel 2.2.2) bevorzugt wird, kann dennoch in der weiteren Planung eine Docking-Station fahrzeugseitig als Nachrüstoption berücksichtigt werden.

2 Technologische Grundlagen

Folgende Vorteile bietet der Einsatz von Docking-Station-Systemen insbesondere im Zusammenhang mit dem Ladekonzept der Gelegenheitsladung:

- ▶ Durch planbare Zwischenladungen an den Nachladepunkten können die notwendige Batteriekapazität und damit die Fahrzeugkosten deutlich verringert werden.
- ▶ Die Autonomie der Fahrzeuge wird nur in geringem Umfang beschränkt.
- ▶ Ein sicherer Betrieb ist gewährleistet, Gefährdungen für Mensch und Material bei der Energieübertragung können ausgeschlossen werden. Es sind keine Einschränkungen bei der Fahrgastbeförderung zu erwarten.
- ▶ Zusätzliches Personal oder besondere Kenntnisse in der Bedienung sind nicht nötig.
- ▶ Mögliche Abweichungen in der Halteposition des Busses und Fahrzeugabsenkungen (engl. Kneeling) können teilweise durch die Docking-Station ausgeglichen werden.
- ▶ Das System ist gegenüber jahreszeitlich bedingten Witterungsbedingungen robust und daher ganzjährig, ohne weitere Vorkehrungsmassnahmen einsetzbar.
- ▶ Da eine Docking-Station in der Regel durch mehrere Busse auf einer Linie genutzt werden kann, verringert sich der Kostenanteil der Ladeinfrastruktur pro Bus zugunsten der Gesamtsystemkosten.

Jedoch sind folgende einschränkende Aspekte zu berücksichtigen:

- ▶ Die Ladung auf der Strecke führt zu einem Ladeinfrastrukturbedarf ausserhalb des Betriebshofes und somit zu erhöhten Investitionskosten für die dezentralen Ladestationen, insbesondere an Linienendpunkten ausserhalb der Stadt.
- ▶ Die Anzahl der vorzusehenden Ladestationen hängt im Wesentlichen von der jeweiligen Liniencharakteristik sowie den betrieblichen und verkehrsplanerischen Vorgaben des Verkehrsunternehmens ab.
- ▶ Die infrastrukturelle Bindung der Fahrzeuge an die Ladestandorte führt zu einer stärkeren Linienbindung und somit zu einer geringeren Flexibilität des Einsatzes der Elektrobusse im Liniennetz.

2 Technologische Grundlagen

- ▶ Verspätungen führen unter Umständen dazu, dass die minimal erforderliche Ladezeit unterschritten wird.

2.2.4 Ladepunkt Oberleitung (stationär-konduktiv)

Bei der DC-Ladung wird der Ladestrom direkt von einer Gleichstrom-Quelle in das Fahrzeug übertragen. Dies erfolgt über die Einbindung der Strassenbahnunterwerke bzw. über einen Abzweig von der Strassenbahnfahrleitung mittels Mast-Trennschalter. Physisch wird die Ladestation als Oberleitung mit zwei Fahrleitungen für Plus und Minus ausgeführt. Da bei der zweipoligen DC-Ladung kein Schutzkontakt vorhanden ist, muss das Fahrzeug, wie bei Oberleitungsbussen üblich, doppelt isoliert werden.

Um die thermische Belastung der mit hohen Strömen beanspruchten Komponenten gering zu halten (etwa Überhitzungen der Fahrleitung und des Kontaktsystems am Fahrzeug), wird der Ladestrom begrenzt. In einem Anwendungsfall in Wien wurde der Ladestrom für das Laden der Busse an der Haltestelle beispielsweise auf 90 A beschränkt. Aufgrund der vergleichsweise geringen Ladeleistung von bis zu 100 kW ist das System nur bedingt für die Gelegenheitsladung an Unterwegshaltestellen einsetzbar.

Die zusätzlich benötigten elektrischen Einbauten im Fahrzeug sowie gegebenenfalls ein grösserer Energiespeicher erhöhen die Fahrzeugkosten sowie das Leergewicht.

Die Energieübertragung zwischen Fahrleitung und Fahrzeug erfolgt über einen adaptierten Stromabnehmer, nach Strassenbahn-Baumuster. Zur Minimierung des Gefährdungspotentials wird der Stromabnehmer mit einer zusätzlichen Erdung ausgestattet. Bei diesem Stromabnehmer sind die Kontakte (Positiv, Negativ, Erdung) voneinander isoliert. Ein Control-Pilot, der die richtige Reihenfolge der Kontaktherstellung überwacht, ist hier nicht notwendig.

Durch den Einsatz von Fahrleitungsschienen ist es möglich, die Ladeleistung zu erhöhen, da diese höheren Belastungen standhalten.

2 Technologische Grundlagen

2.2.5 Oberleitung (dynamisch-konduktiv)

Unter der dynamischen, konduktiven Energiezuführung ist leitungsgebundenes Laden während der Fahrt zu verstehen. Das Energieübertragungssystem ist bei konventionellen Oberleitungsbussen (O-Bus) bewährt und wird analog auch für Hybrid-Oberleitungsbusse mit Batteriespeicher angewandt. Die Energie wird über die (abschnittsweise) installierte Fahrleitung als Energiequelle durch die fahrzeugseitigen Stangenstromabnehmer übertragen. Für die Stromabnahme werden zwei Fahrdrähte (Plus und Minus) benötigt. Während der Fahrt unter der Oberleitung wird die Energie zum Fahren, für die Hilfsbetriebe und zum Laden des Energiespeichers bezogen. Auf oberleitungsfreien Abschnitten wird dann die zuvor gespeicherte Energie genutzt. Das System ist über die Grösse der Batterien und die Streckenlänge der Oberleitungsanlage zu parametrisieren.

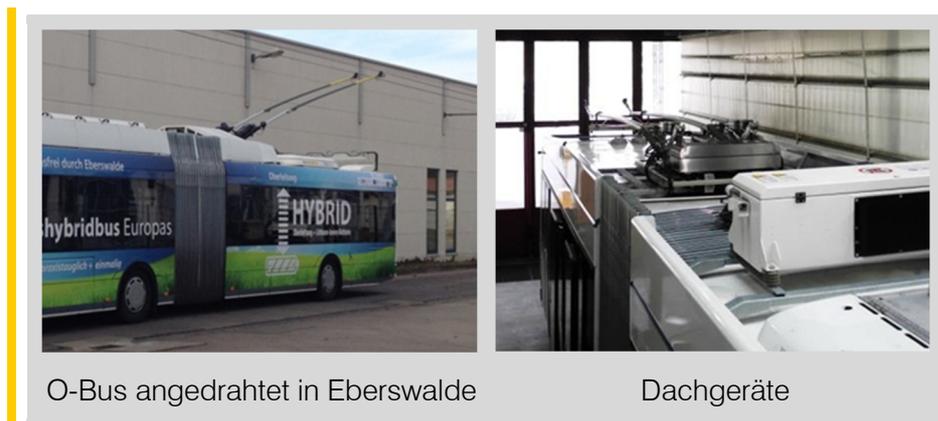


Abbildung 2.5: Stromabnehmer bei Oberleitungsbussen

Hohe Leistungsübertragungen von der Oberleitung auf das Fahrzeug haben eine starke Erhitzung des Fahrdrahtes zur Folge, die bis zur Zerstörung des Systems führen kann. Aufgrund einer drohenden Überhitzung des Fahrdrahtes ist ein Nachladen bei niedrigen Geschwindigkeiten nur mit geringer Leistung möglich. Die Leistungsaufnahme ist somit abhängig vom Geschwindigkeitsprofil des Fahrzeugs. Die durch die Oberleitung bereitgestellte Energie wird vorrangig für das Fahren genutzt. Die während des Fahrvorgangs abgeforderten Leistungsspitzen können durch Hochleistungskondensatoren (SuperCaps) ausgeglichen werden, die neben dem Batteriespeicher als zusätzliche Energiequelle dienen (Kombispeicher) – jedoch unter Erhöhung des Fahrzeugleergewichts. Der Batteriespeicher wird kontinuierlich während der Fahrt unter der Oberleitung nachgeladen. Der

2 Technologische Grundlagen

notwendige Ladestrom wird über das Energiemanagementsystem im Fahrzeug festgelegt.

Die begrenzten Stromstärken, die für das Nachladen des Energiespeichers zur Verfügung stehen, beeinflussen die Ladezeit und somit die erforderliche Dauer des Fahrens unter der Fahrleitung. Als pauschale Annäherung kann ein Verhältnis von 2:1 für das Fahren unter Oberleitung zum leitungsunabhängigen Fahren angesetzt werden, wobei die genaue Relation immer von den örtlichen Bedingungen abhängt.

Die abschnittsweise Nutzung einer Oberleitungsanlage sollte vorwiegend auf Stammstrecken des ÖPNV mit hoher Nutzungsfrequenz, kurzen Taktfolgen und grossen Fahrzeugeinheiten erfolgen. Der hohe Investitionsbedarf in die Oberleitungsanlage und deren langjährige Abschreibung erfordern langfristige Festlegungen zum Einsatz der Fahrzeuge.

2.2.6 Induktionsschleife (stationär-induktiv)

Als induktives Laden wird das kontaktlose Laden, also das Laden ohne direkte Verbindung zum Energienetz unter Nutzung elektromagnetischer Felder bezeichnet.

Die Energiezuführung erfolgt über einen 400 V_{3AC}-Netzzugang. Die Ladestationen können auf der Linie an ausgewählten Haltestellen, an den Endhaltestellen sowie im Depot vorgesehen werden. Die Energieübertragung erfolgt während der betrieblichen Halte- sowie Wartezeiten an den Ladestationen. Somit ist keine Änderung im Betriebsablauf notwendig, sofern diese Zeiten ausreichend bemessen sind. Die Ladestationen werden erst für den Ladevorgang frei geschaltet, wenn der Elektrobus zweifelsfrei über der Ladespule steht und diese nicht mit anderen metallischen Gegenständen belegt ist.

Bei dem induktiven Energieübertragungssystem wird der Ladestrom von einer Primärspule in der Fahrbahndecke der Haltestelle auf eine absenkbare Sekundärspule, die als Abnehmerspule (Pick-Up) im Fahrzeugboden des Elektrobusses montiert ist, übertragen. Dabei können Leistungen von bis zu 200 kW übertragen werden. Die Leistung ist abhängig von der Lage des Fahrzeugs zur Primärspule und der Grösse des Luftspalts zwischen der Sekundär- und Primärspule.

2 Technologische Grundlagen

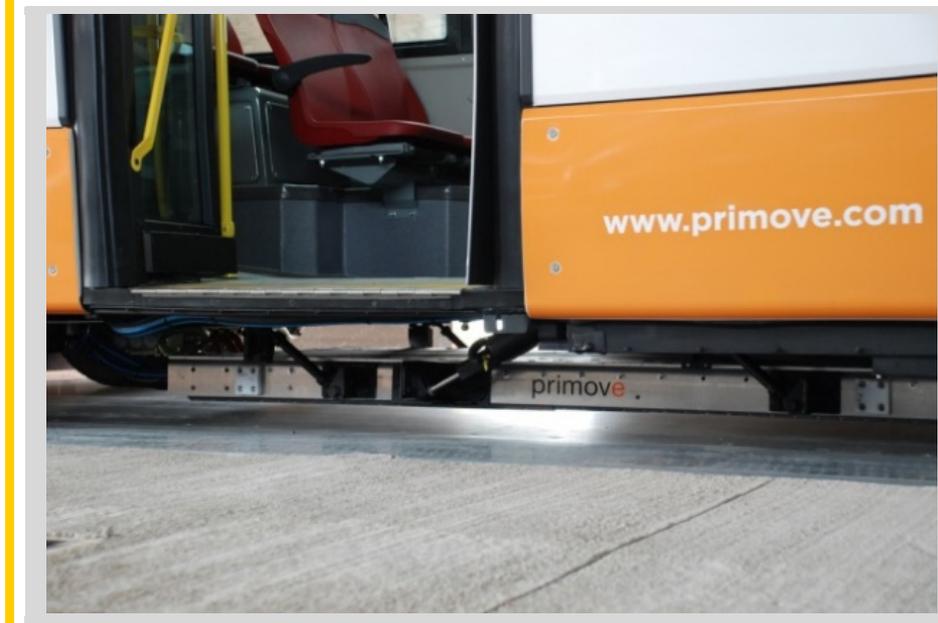


Abbildung 2.6: Abnehmerspule im Fahrzeugboden (Pick-Up)³

Die Vorteile der induktiven Energiezuführungstechnik liegen im Komfort der völlig barrierefreien Netzkopplung.

Der Investitionsbedarf in Infrastruktur und Fahrzeug ist vergleichsweise hoch. Trotz geringerer Batteriekosten sind höhere Fahrzeugkosten für den zusätzlichen Aufwand in der Fahrzeugkonstruktion anzusetzen, beispielsweise für die Integration der Abnehmerspule (Pick-Up) in den Fahrzeugboden.

Die induktive Ladetechnik ist gegenüber der Kabellösung zwar technisch aufwendiger, bietet aber Vorteile im Hinblick auf Komfort, Sicherheit und die stadtbildverträgliche Gestaltung der Ladestellen. Durch die in der Fahrbahn verborgene und damit nicht sichtbare Installation der Energieversorgung wird das optische Erscheinungsbild verbessert und Verschleißfreiheit gewährleistet.

Die Ladetechnologie funktioniert grundsätzlich unter allen Witterungsbedingungen, auch bei Nässe, Eis und Schnee. Jedoch müssen beide

³ Quelle | <https://www.bsvg.net/unternehmen/elektrobusse-emil/technik.html>

2 Technologische Grundlagen

Übertragungsflächen (Fahrbahn und Fahrzeug) regelmässig von Schmutz befreit werden, um die Energieübertragung zu gewährleisten.

Es ist erforderlich, den Pick-Up während des Ladevorgangs auf den notwendigen Abstand zur Primärspule abzusenken. Freiräume zwischen den Spulen von über 14 cm sind für den Ladevorgang technisch nicht zu bewerkstelligen. Durch Unebenheiten in der Fahrbahn ist ein lineares Nachladen während der Fahrt nicht möglich, somit ist entsprechend dem aktuellen Entwicklungsstand lediglich ein Nachladen im Stillstand möglich.

Die Integration der Primärspule in die Fahrbahnoberfläche erfordert umfangreiche vorbereitende planerische und bautechnische Massnahmen, die durch den Strassenbaulastträger erfolgen müssen. Die Einbindung ist nur in Bereichen realisierbar, in denen keine Erschliessungsmedien wie Wasser-, Gas- oder Elektroleitungen verlaufen. Zudem ist in unmittelbarer Nähe der Primärspule die Energiezuführung aus einer Verteilstation erforderlich.

Planungs- und Bauaufwand beeinflussen die Gesamtprojektkosten sowie den Projektumsetzungszeitraum erheblich. Aufgrund der kurzen Leistungsübertragung müssen mehrere Ladepunkte auf der Linie eingerichtet oder die Ladezeiten verlängert werden, was zu einem erhöhten Fahrzeugeinsatz und Personalbedarf führen kann.

Bei diesem stationären, induktiven Energiezuführungssystem sind höhere Fahrzeugkosten durch die Integration der Abnehmerspule (Pick-Up) in den Fahrzeugboden anzusetzen. Die Integration der Primärspule in die Fahrbahnoberfläche erfordert umfangreiche planerische und bautechnische Massnahmen.

Grundsätzlich hat sich dieses System in nicht frei zugänglichen Verkehrsräumen bewährt. Eine Marktdurchdringung ist aber für den Anwendungsfall Elektrobus derzeit nicht zu erkennen.

2.2.7 Wasserstofftankstelle (chemische Energiezuführung)

Mobile Wasserstoffsysteme werden je nach Nutzungsart und Betriebsanforderungen üblicherweise mit 350 bar oder 700 bar betrieben. Die Systemdruckebene 700 bar findet nur bei Fahrzeugen mit geringem Wasserstoffbedarf oder geringem verfügbarem Fahrzeugeinbauraum (z. B. Pkw) Einsatz. Busse mit Wasserstofftanks, die anforderungsbedingt und durch die Installation der Wasserstofftanks auf dem Fahrzeugdach mehr als 10 kg Wasserstoff speichern können, werden mit 350 bar Systemdruck ausgelegt.

2 Technologische Grundlagen

Dies birgt sowohl sicherheitstechnische als auch ökonomische Vorteile in der technischen Realisierung bei einer akzeptablen Betankungsgeschwindigkeit.

Wasserstofftankstellen sind in der Regel entweder nur für betriebliche oder öffentliche Nutzung ausgelegt. Um eine öffentliche Tankstelle mit 700 bar Systemdruck für den Busbetrieb zu nutzen ist eine Vorrichtung für eine zusätzliche 350-bar-Zapfsäule für Busbetankungen notwendig.

Die Betankung von Fahrzeugen mit einem Druckgas erfolgt über das Druckausgleichsprinzip. Dafür wird das Gas tankstellenseitig verdichtet und strömt in den Tank mit einem niedrigeren Gasdruck, bis ein Ausgleich der Drücke stattgefunden hat. Je grösser die Druckdifferenz ist, desto grösser ist der theoretisch mögliche Volumenstrom. Daraus folgt ein stetig abnehmender Gasfluss mit zunehmender Tankfüllung.

Durch die SAE International sind in den Normen SAE J2600 und SAE J2601-2 die Tankkupplung und das Protokoll für den Wasserstoffbetankungsprozess definiert. Dieser Standard findet international Anwendung.

Führende Hersteller von Wasserstofftankkupplungen bieten für die 350-bar-Technologie für den Einsatz im Bus- und Lkw-Betrieb zwei verschiedene Kupplungsarten bezüglich des maximalen Volumenstroms an:

- ▶ Normale Tankkupplung mit bis zu 60 g/s
- ▶ High-Flow Kupplung mit Flussraten von bis zu 120 g/s
(zur Schnellbetankung von Bussen und Lkw, abwärtskompatibel)

Um das Gefahrenpotenzial während der Nutzung zu minimieren und eine systemunabhängige Betankung zu gewährleisten, ist eine sichere einheitliche Tankkupplung notwendig. Hier ist neben der standardisierten Kupplungsgeometrie auch ein zuverlässiger Schutz vor versehentlichen Nutzungsfehlern und Beschädigungen, wie beispielsweise das Abreißen des Gasschlauchs, erforderlich. Um den mechanischen Betankungsprozess zusätzlich elektrisch abzusichern, wird bei Betankungssystemen mit einem Systemdruck von mehr als 350 bar eine Infrarotkommunikation an der Tankkupplung vorgesehen.

Neben der beschriebenen Ladetechnologie sind auch eine entsprechende Infrastruktur sowie Tankstellen notwendig, die den Anforderungen eines Busbetriebs mit Wasserstoff gerecht werden. Hier sind in der Vorplanung insbesondere die Themen Logistik, erhöhter Platzbedarf der Betriebsstätten

2 Technologische Grundlagen

(Gasspeicher, Kompressoren, ...), Lärmemission (Kompressoren, Kälteaggregate, ...), Verfügbarkeit / Redundanz und Genehmigungsverfahren individuell zu betrachten.

Die Speichergrösse auf dem Betriebshofgelände ist abhängig von der Busflottengrösse und der Versorgungssicherheit. Eine Zwei-Tages-Bevorratung ist ein guter Kompromiss zwischen Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit. Dafür ist mindestens eine einfache Redundanz vorzusehen.

Die bei der Versorgung grosser Busdepots notwendigen Wasserstoffmengen bedeuten grosse notwendige Sicherheitsabstände zu Wohnbebauung und anderen schützenswerten Einrichtungen, sodass die möglichen Standorte auf dem Betriebshof stark eingeschränkt werden. Laut einer Studie im Auftrag der Hamburger Hochbahn sind bei der Anlieferung flüssigen Wasserstoffs 160 m, bei gasförmigem Wasserstoff 60–90 m und bei der Busbetankung aus einem Lkw-Trailer 45 m Sicherheitsabstand zu «schutzbedürftigen, unbeteiligten Dritten» einzuhalten. Rechtliche Grundlage in Deutschland sind die Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV), die Störfall-Verordnung (12. BImSchV) und andere Normen des Arbeits- und Brandschutzes. Die Speicherung kann in verschiedenen Druckstufen stattfinden. Niederdruckspeicher haben ein Speichervermögen von bis 200 kg. Flüssigwasserstoff kann in Mengen von 1 und 5 t gespeichert werden.

Nach derzeitigem Stand der Technik scheint sich sowohl aufgrund der geringeren technischen Komplexität gegenüber der 700-bar-Technologie, als auch aus ökonomischen Gesichtspunkten die 350-bar-Technologie durchzusetzen, die für den Busbetrieb keine signifikanten Nachteile darstellt.

Um eventuelle Hürden bezüglich der hohen absoluten Investitionskosten für die Errichtung neuer Wasserstoffinfrastruktur (insbesondere Tankstellen) und Logistik zu relativieren, sollte neben betriebseigenen Tankstellen auch die externe Betankung in Betracht gezogen werden.

2 Technologische Grundlagen

2.3 Elektrochemische Energiespeicher

Entsprechend dem gegenwärtigen Diskurs zur Elektromobilität werden im Folgenden die Begriffe «Batterie» und «Akkumulator» synonym verwendet. Die Bezeichnung von wieder aufladbaren elektrochemischen Energiespeichern (Sekundärzellen) als «Batterie» oder von Hochleistungskondensatoren als «SuperCap» hat sich trotz der gewissen begrifflichen Unschärfe als Konsens auch im wissenschaftlichen Umfeld etabliert. Energiespeichersysteme, die aus einer Kombination von Batterie und SuperCap bestehen, werden in diesem Kontext als «Kombispeicher» bezeichnet.

Die zum Einsatz kommenden chemischen Zusammensetzungen von Energiespeichern unterliegen fortwährenden Verbesserungen durch einen stetigen Forschungs- und Entwicklungsprozess.

Für den Einsatz von Elektrobussen werden derzeit vorwiegend Energiespeicher dreier unterschiedlicher chemischer Zusammensetzungen verwendet. Dies sind Lithium-Titanat-Akkumulatoren (LTO), Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid-Akkumulatoren (Li-NMC) und Lithium-Eisenphosphat-Akkumulatoren (Li-FePO).

Prinzipiell werden elektrische Energiespeicher abhängig von der Zellchemie in Hochleistungs- und Hochenergiebatterien unterschieden.

2.3.1 Hochenergiebatterien

Hochenergiebatterien eignen sich besonders für den Einsatz von Elektrobussen, welche als Vollader ausgelegt sind. Sie werden mit einer moderaten Ladeleistung geladen, um eine überproportionale Alterung zu vermeiden. Daher ist dieser Typ des Energiespeichers spezifisch gesehen kostengünstiger als eine Hochleistungsbatterie.

Dabei eignen sich zum einen Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid-Akkumulatoren (Li-NMC) und zum anderen Lithium-Eisenphosphat-Akkumulatoren (Li-FePO). Beide Batterietypen können mit bis zu 1 C geladen und bis zu 3 C entladen werden.

2.3.2 Hochleistungsbatterien

Hochleistungsbatterien sind dadurch gekennzeichnet, dass sie bei der Nachladung innerhalb einer kurzen Zeitspanne eine hohe Energiemenge

2 Technologische Grundlagen

aufnehmen können, ohne dass der Energiespeicher dabei überproportional altert. Dieser Typ des Energiespeichers ist daher besonders für den Einsatz in Hybrid- und Brennstoffzellenbussen bzw. Elektrobussen mit Gelegenheitsladung geeignet. Aufgrund höherer technischer Anforderungen ist der spezifische Durchschnittspreis je Kilowattstunde bis zu 50 % teurer als der einer Hochenergiebatterie, sodass nur geringere Speicherkapazitäten als beim Voll-lader wirtschaftlich sind. Dabei kommen vor allem Batterien der Technologie Lithium-Titanat-Oxid (LTO) zum Einsatz. Sie können mit bis zu 5 C ge- und entladen werden.

Neben den herkömmlichen Akkumulatoren werden auch Ultrakondensatoren (SuperCaps) stetig weiterentwickelt. Sie sind vor allem für hohe Lastzyklen geeignet und eignen sich ergänzend zum Einsatz für temporär hohe Leistungsabgaben oder -aufnahmen. Auf Grund des hohen Platzbedarfs sind SuperCaps nur bedingt für den Einsatz in Elektrobussen geeignet.

3 Bewertung des Liniennetzes für den Einsatz von Elektrobussen

3 Bewertung des Liniennetzes für den Einsatz von Elektrobussen

3.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die Linienuntersuchung ist der wichtigste Schritt, um Empfehlungen für die sukzessive Elektrifizierung der Busflotte abzuleiten, denn auf ihrer Basis werden die Vorgaben für alle weiteren Schritte der Untersuchung definiert.

Dazu müssen die Umlaufdaten des zu untersuchenden Liniennetzes bzw. der zu untersuchenden Linien detailliert analysiert werden. In der Regel zeichnet sich ab, dass sich die Umläufe nach bestimmten Kriterien zuordnen und kategorisieren lassen. So ist in vielen Fällen die Betrachtung ausgewählter, repräsentativer Umläufe möglich, um ein schlüssiges Gesamtbild über die Gesamtheit aller Umläufe zu ermitteln. Schliesslich erfolgt auch nicht für jeden Umlauf die Definition eines optimalen Systems, sondern es muss ein Konsens über – im Idealfall – eine einheitliche Systemkonfiguration gefunden werden, die sämtliche im Regelbetrieb (sowie in einem gewissen Umfang auch bei Havarie- / Sonderfällen) vorkommenden Situationen abbilden kann.

Neben den theoretischen Umlaufdaten sollten auch reale Fahrdaten, die vor allem Verspätungen erfassen, betrachtet werden, um den realen Betrieb mit Elektrobussen simulieren zu können.

Darüber hinaus ist das Ladekonzept festzulegen, falls in dieser Hinsicht Einschränkungen gemacht werden sollen. Auch die grundsätzliche Fahrzeugkonfiguration ist vorab in ihren Grundzügen festzulegen. Die exakte Systemauslegung bezogen auf Ladekonzept und Fahrzeug ist Teil der Untersuchung und erfolgt anschliessend in einem iterativen Prozess im Rahmen der Energiebilanzierung.

Im Ergebnis der Untersuchung kann das untersuchte Liniennetz bzw. die untersuchten Linien hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten mit Elektrobussen bewertet werden.

3.2 Datengrundlage

Für die Ermittlung von Linien- und Umlaufparametern werden voraussichtlich folgende Daten benötigt:

3 Bewertung des Liniennetzes für den Einsatz von Elektrobussen

- ▶ Liniennetzplan
- ▶ Umlaufpläne
- ▶ Linienbezogene Parameter
 - ▶▶ Durchschnitts- und Höchstgeschwindigkeit
 - ▶▶ Durchschnittlicher Haltestellenabstand
 - ▶▶ Fahrgastaufkommen (Zählraten)
 - ▶▶ Beschleunigungselemente im Verlauf (Busspuren, LSA-Bevorrechtigung etc.)
 - ▶▶ Linienverlauf und Lage Haltestellen (Geokoordinaten bzw. GPS-Daten)
 - ▶▶ Angaben über den Fahrzeugeinsatz (Fahrzeugtyp, Platzangebot, Motorisierung)
 - ▶▶ Verkehrsnachfrage, benötigte Beförderungskapazität
 - ▶▶ Integration in den Strassenraum
 - ▶▶ Externe Störanfälligkeit und Behinderungsschwerpunkte
 - ▶▶ Verspätungsdaten
 - ▶▶ Anpassung an die Stadt- und Verkehrsentwicklung
 - ▶▶ Informationen zum Ein- / Ausrücken
- ▶ Gesamtaufenthaltsdauer an Haltestellen bzw. anderen Betriebspunkten, umlaufübergreifend

Aus diesen Angaben lassen sich wesentliche Parameter ablesen bzw. berechnen, die in erster Näherung Rückschlüsse auf die Eignung einer Linie als Elektrobuslinie erlauben. Hierzu zählen zum einen messbare Größen wie das Höhenprofil (absolute Höhendifferenzen, Höhendifferenzen pro Strecke, Steigungen und Gefälle), Haltestellenabstände oder das Geschwindigkeitsprofil (hier genügt für die erste Bewertung die Berechnung der fahrplanmässigen Geschwindigkeit zwischen den Endhaltestellen), zum anderen sind qualitative Liniencharakteristika einzubeziehen, beispielsweise kreuzende Linien, Umsteigehaltestellen, Lage und Entfernung des Betriebshofes und Wahrnehmbarkeit im Stadtraum.

3.3 Festlegung des Ladekonzeptes

Grundsätzlich ist das Ladekonzept des Gelegenheitsladers dem des Vollladlers gegenüberzustellen und für den zu untersuchenden Anwendungsfall zu bewerten. Auch wenn sich in der Regel bereits unmittelbar anhand der Streckenlänge abschätzen lässt, welches Ladekonzept in Betracht kommt,

3 Bewertung des Liniennetzes für den Einsatz von Elektrobussen

sollten beide Szenarien vergleichend ausgewertet werden. Dabei gilt jedoch nicht automatisch, dass Strecken, die für Voll-lader zu lang sind, immer für Gelegenheitslader geeignet sind. Aufenthaltszeiten an potentiellen für die Nachladung geeigneten Haltestellen sowie die Abstände zwischen zwei Ladungen sind hierbei entscheidend. In Zukunft könnte zudem der Einsatz einer Wasserstoff-Brennstoffzelle als Range Extender dazu dienen, besonders lange und somit für rein batterieelektrische Busse ungeeignete Strecken zu elektrifizieren.

Das verfolgte Ladekonzept bestimmt auch die Auslegung der erforderlichen Ladeinfrastruktur. Für das Konzept des Voll-laders wird Ladeinfrastruktur ausschliesslich im Depot benötigt. Dabei sind vergleichsweise niedrige Ladeleistungen ausreichend. Empfiehlt sich bei einer Linie aufgrund der langen Umlauflänge in Verbindung mit ausreichenden Wendezeiten das Konzept des Gelegenheitsladers, ist zusätzlich Streckenladeinfrastruktur mit höherer Ladeleistung zu errichten.

In beiden Fällen sollte die Ladeinfrastruktur den Anforderungen entsprechend weder über- noch unterdimensioniert werden, um ein möglichst kostengünstiges und gleichzeitig flexibles System zu erhalten. Die exakte Dimensionierung ist abhängig von den Umlaufängen in Verbindung mit den verfügbaren Ladezeiten.

3.4 Fahrzeugkonfiguration

Für die im untersuchten Anwendungsfall eingesetzten Fahrzeugtypen ist jeweils eine Fahrzeugkonfiguration festzulegen. Dabei werden folgende fahrzeugrelevante Systemelemente bestimmt:

- ▶ Fahrgastkapazität
 - ▶▶ Absolute Fahrgastkapazität
 - ▶▶ Durchschnittlicher Besetzungsgrad
- ▶ Antriebssystem
 - ▶▶ Zentralmotor
 - ▶▶ Radnaher Antrieb
 - ▶▶ Radnabenantrieb
- ▶ Heizungs- und Klimatisierungskonzept
 - ▶▶ Voll- / Teil- / Fahrerklimateisierung
 - ▶▶ Vollelektrische Heizung
 - ▶▶ Standheizung Heizöl
 - ▶▶ Hybridheizung (Heizöl / Elektrisch)

3 Bewertung des Liniennetzes für den Einsatz von Elektrobussen

- ▶ Energiespeichersystem
 - ▶▶ Speichertechnologie
 - ▶▶ Nutzbare Kapazität
 - ▶▶ Lade- / Entladeleistung

Die Informationen zur Fahrgastkapazität sind notwendig, da sie die Kapazität der konfigurierten Batterie beschränken. Eine grössere Batterie besitzt auch ein höheres Gewicht, das zulässige Maximalgewicht der Busse darf jedoch nicht überschritten werden. Der Energiespeicher muss dann gegebenenfalls kleiner konfiguriert werden, da andernfalls eventuell nicht mehr genügend Gewichtsreserven für den Transport der geforderten Anzahl an Fahrgästen vorhanden sind.

Die Verwendung des Antriebssystems wirkt sich auf den Wirkungsgrad des Antriebsstrangs und somit auf den Energieverbrauch aus. Eine Möglichkeit stellen Zentralmotoren dar, welche jedoch vergleichsweise viel Bauraum benötigen und einen schlechteren Wirkungsgrad haben. Beim radnahen Antrieb besitzt der Bus eine Achse mit zwei individuell steuerbaren Elektromotoren, jeweils unmittelbar vor einem Rad. Diese Antriebstechnologie bietet den Vorteil einer Einzelrad-Rekuperation (Radbremse) sowie eines höheren Wirkungsgrades gegenüber einem Zentralmotor. Besonders der Wirkungsgrad wirkt sich wieder auf den prognostizierten Energieverbrauch aus. Die Verwendung eines Radnabenmotors, bei dem die Motoren direkt in den Radnaben sitzen, weist hingegen den Nachteil auf, dass hierbei eine erhöhte ungefederte Masse vorhanden ist. Dies hat negative Auswirkungen auf den Verschleiss. Des Weiteren kommen bei einem Radnabenmotor andere Räder und Felgen zum Einsatz, was zum Vorhalten weiterer Ersatzteile führt. Mittlerweile sind jedoch Systeme für Einzelradantriebe am Markt verfügbar, welche dank leichteren Elektromotoren und neuen Verzahnungsgeometrien die Nachteile von herkömmlichen Radnabenmotorsystemen aufwiegen.

Die Heizung und Klimatisierung stellt den grössten Nebenverbraucher dar, weshalb dessen Auslegung grossen Einfluss auf den Energieverbrauch bei entsprechenden Witterungsbedingungen hat. Die Klimatisierung wird in der Regel vollelektrisch ausgelegt. Bei der Heizung gibt es verschiedene Möglichkeiten. Zum einen kann sie ebenfalls vollelektrisch ausgelegt werden – als einfache elektrische Heizung oder mit einer Wärmepumpe. Je nach Einsatzbedingungen kann zum anderen eine sogenannte Hybridheizung als Kombination aus elektrischer und fossiler Heizung zur Sicherstellung der

3 Bewertung des Liniennetzes für den Einsatz von Elektrobussen

notwendigen Reichweite zum Einsatz kommen. Die fossile Heizung unterstützt die elektrische Heizung in der Regel bei Aussentemperaturen unter 5 °C. Besteht das Ziel darin, ein vollständig emissionsfreies System einzuführen, kommt eine fossile Zusatzheizung jedoch nicht in Frage.

Soll der Einsatz unter Vermeidung des Nachladens im Linieneinsatz ermöglicht werden, sollte bei der Konfiguration des Traktionsenergiespeichers zunächst das Prinzip der Maximierung bis zur maximalen Nutzlast unter Berücksichtigung der erforderlichen Fahrgastkapazität verfolgt werden. Sollten sich unnötige Kapazitätsreserven abzeichnen, ist die Batteriegrösse im Bewertungsprozess zu reduzieren. Im entgegengesetzten Fall ist zudem eine Ladung im laufenden Betrieb zu prüfen. Die Speichertechnologie sowie die Lade- / Entladeleistung stehen in direktem Zusammenhang zum gewählten Ladekonzept und lassen sich nach Hochenergie- und Hochleistungs-Batterien unterscheiden.

3.5 Umlaufanalyse und Energiebilanzierung

Die Auslegungsgrösse des Energiespeichers eines Elektrobusses und das dem System zugrunde liegende Ladekonzept sind untrennbar miteinander verbunden. Ein Elektrobussystem, welches ausschliesslich auf einer Nachladung während der nächtlichen Betriebspause im Betriebshof (Volllader / Overnight Charging) basiert, benötigt einen grösseren Energiespeicher als ein System mit betriebsbegleitender Nachladung beispielsweise am Liniendepot (Gelegenheitslader / Opportunity Charging).

Daher müssen die finale Festlegung des Ladekonzeptes, die detaillierte Konfiguration des Fahrzeugs sowie die Umlaufanalyse und Energiebilanzierung in einem iterativen Prozess erfolgen, der sich in mehreren Schritten einem Optimum annähert.

Grundvoraussetzung für die finale Konfiguration von Ladekonzept und Energiespeicher ist der Energiebedarf auf der zu untersuchenden Linie. Hierbei sind sowohl die Traktionsenergie für den Fahrzeugantrieb als auch die Energie für die Nebenverbraucher (Heizung und Klimatisierung, Kompressoren, Fahrscheindrucker und -entwerter etc.) einzubeziehen. Zudem muss zwischen dem Energiebedarf während der Fahrt und im Stillstand unterschieden werden.

3 Bewertung des Liniennetzes für den Einsatz von Elektrobussen

Aufbauend auf der Analyse der topographischen Streckenparameter und der verkehrlichen Einflüsse im Fahrtverlauf erfolgt die rechnerische Ermittlung des weg- und zeitabhängigen Energiebedarfs auf Basis der erfassten Geschwindigkeit-Weg- und Höhenprofile. Hierfür sollten standardisierte Werte von Vergleichszyklen herangezogen werden.

Für die Bewertung der verkehrlichen Einflussfaktoren auf die Fahrten bietet sich die Nutzung der SORT-Zyklen (Standardised On-Road Testcycles) an. Diese sind der international anerkannte Standard für den Vergleich von Energieverbräuchen bei Stadtbussen. Um Transparenz und Vergleichbarkeit unterschiedlicher Verbrauchswerte unter nicht einheitlichen Bedingungen zu gewährleisten, wurden drei Zyklen definiert:

- ▶ SORT 1 – Schwerer Stadtverkehr
- ▶ SORT 2 – Leichter Stadtverkehr
- ▶ SORT 3 – Vorstadtverkehr

Anhand der verkehrlichen Parameter «Halte je Kilometer», «Haltezeitanteil» und «Durchschnittsgeschwindigkeit» lässt sich die untersuchte Linie einem SORT-Zyklus (SORT-Klasse) zuordnen. Die Bestimmung eines mittleren Energieverbrauchs unter Berücksichtigung der verkehrlichen Parameter ist somit gewährleistet.

Zur Berücksichtigung der Streckentopographie können analog folgende topographische Klassen (TOPO-Klassen) definiert und mit entsprechenden Grenzwerten hinterlegt werden:

- ▶ TOPO 1 – Schwere Topographie / Bergland
- ▶ TOPO 2 – Leichte Topographie, hügeliges Terrain
- ▶ TOPO 3 – Flachland

Für die Einstufung des Linienprofils in eine TOPO-Klasse müssen die Höhendifferenz der Strecke und die maximale Steigung bzw. das Gefälle der einzelnen Streckenabschnitte berücksichtigt werden.

Aus der Linienklassifizierung in SORT- und TOPO-Klasse ergibt sich ein definierter zusätzlicher Energiebedarf pro Kilometer. Darüber hinaus müssen die Nebenverbraucher, die durchschnittliche Fahrzeugbelegung und weitere Indikatoren als Zuschlagsfaktoren berücksichtigt werden. Abschläge in Abhängigkeit des voraussichtlich erzielbaren Rekuperationspotentials sollten ebenfalls einbezogen werden.

3 Bewertung des Liniennetzes für den Einsatz von Elektrobussen

Ist die Linie bzw. der Umlauf nicht als Vollader abbildbar, ist als letzter Schritt der Streckenanalyse die Ausweisung potentiell geeigneter Haltestellen für die Errichtung einer Nachladestation auf Basis von Mindestaufenthaltsdauern je Halt sowie von Gesamthaltezeiten pro Tag vorzunehmen. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass sowohl eine ausreichend lange Ladezeit pro Ladevorgang zur Verfügung steht als auch insgesamt eine für den Tagesumlauf ausreichende Energiemenge übertragen werden kann. Zudem wird vermieden, dass teure Ladeinfrastruktur an wenig frequentierten Haltestellen errichtet und dann kaum genutzt wird.

All diese Faktoren spiegeln sich in einem so berechneten spezifischen Energiebedarf wider. In Verbindung mit dem gewählten Ladekonzept und der gewählten Fahrzeugkonfiguration lässt sich somit der Energieverbrauch für einen kompletten Betriebstag simulieren. Die grafische Ausgabe ist ein äußerst wertvolles Hilfsmittel bei der Sensitivitätsanalyse für die Auslegung der Speichergröße und der Festlegung des Ladekonzepts.

Abbildung 3.1 zeigt den Ladezustandsverlauf einer Beispieluntersuchung. Man erkennt die Abgrenzung des technisch nutzbaren Energieinhaltes, markiert durch die SOC_{max} - und die SOC_{min} -Linien bei 90 bzw. 10 % SOC. Die blaue Linie markiert zusätzlich eine betriebliche Mindestreserve zum sicheren Erreichen des Betriebshofes aus dem Einsatzgebiet.

Das Beispiel zeigt ein Ladekonzept mit Gelegenheitsnachladung am Linienendpunkt. Nach Betriebsschluss erfolgt die Nachladung im Betriebshof mit geringerer Ladeleistung, um den Energiespeicher zu schonen. Trotzdem ist auch bei Betrachtung des kritischen Umlaufs bereits gegen 23.00 Uhr wieder der SOC_{max} -Wert erreicht, so dass das Fahrzeug um 6.00 Uhr mit vollem Energiespeicher ausrücken kann.

3 Bewertung des Liniennetzes für den Einsatz von Elektrobusen

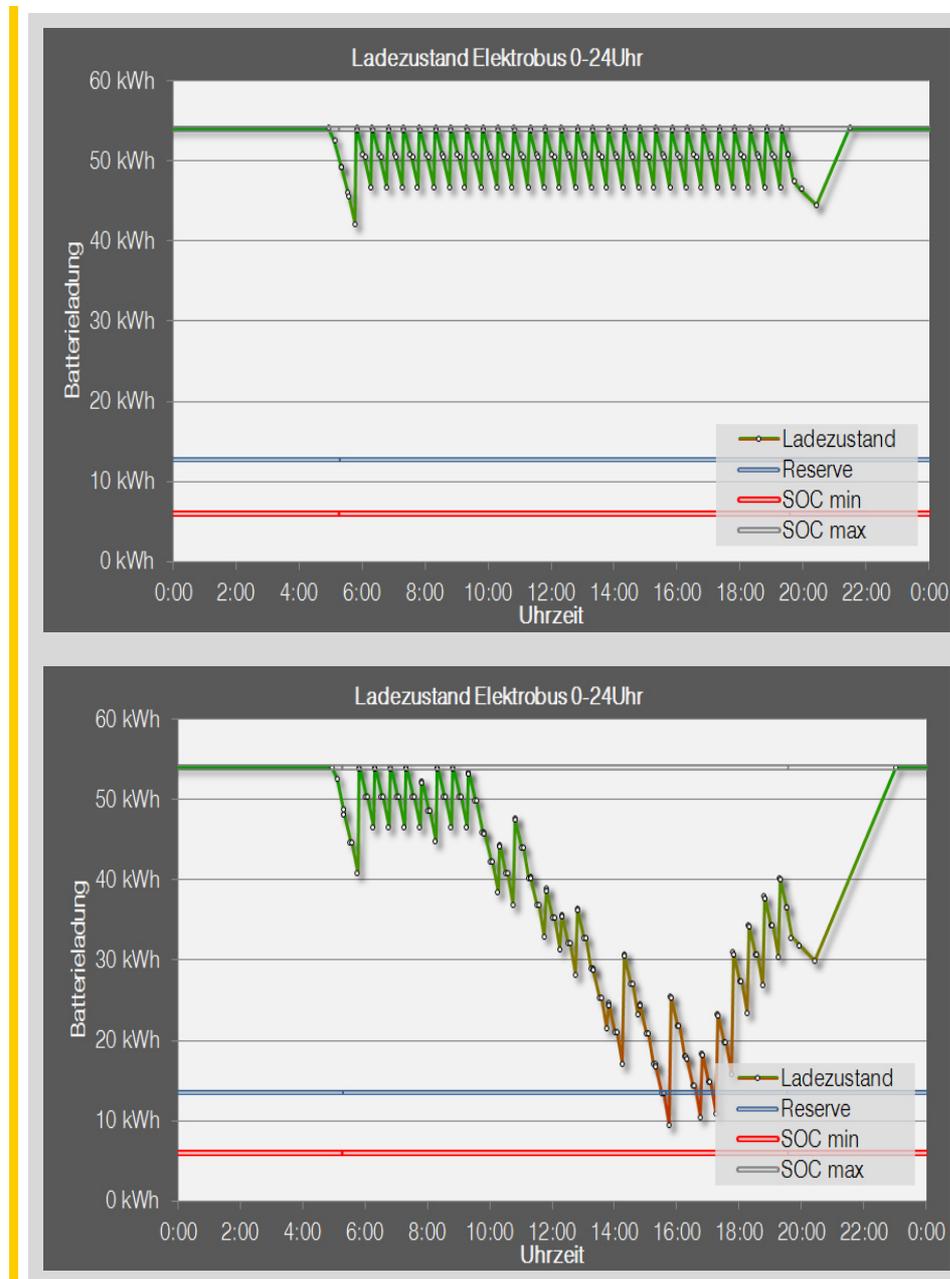


Abbildung 3.1: Simulation des Energieverbrauchs einer Beispieluntersuchung (Fahrplandaten / Echtzeitdaten)

Weiterhin verdeutlicht die Darstellung im gezeigten Beispiel, wie sich eine Abweichung der real gemessenen Umlaufdaten (unteres Diagramm) im Vergleich zu den theoretischen Umlaufdaten aus dem Fahrplan (oberes Diagramm) auswirken kann. Aus der Verspätungslage am Linienendpunkt

3 Bewertung des Liniennetzes für den Einsatz von Elektrobusen

und zu geringen Verspätungspuffern in den SOLL-Daten resultieren geringere Ladezeiten am Endpunkt bis hin zu Komplettausfällen einzelner Ladeprozesse – mit der Folge, dass der Energiespeicher in der Realität schneller entladen wird als im theoretisch prognostizierten Fahrtverlauf. Daher ist die Verwendung realer Betriebsdaten erfolgsentscheidend für das Prognosemodell.

Im hier gezeigten Beispiel wäre es nun möglich, in einem Iterationsschritt bestimmte Parameter so zu ändern (z. B. Kapazität des Traktionsenergiespeichers, mögliche Ladeleistung, Fahrplandaten sofern zulässig), dass der Ladezustand innerhalb der definierten Grenzen bleibt.

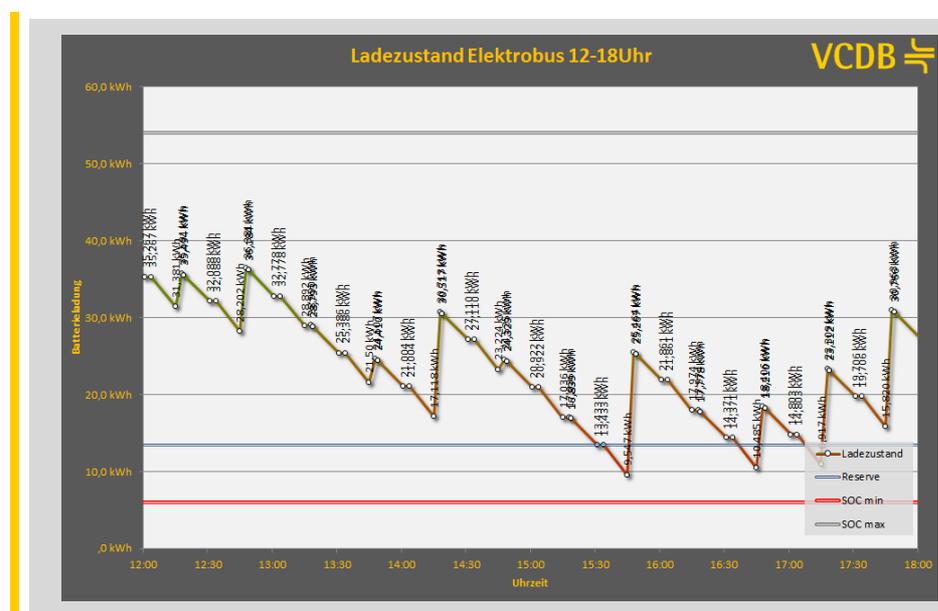


Abbildung 3.2: Lupenbetrachtung des Energieverlaufes für einen Tagesabschnitt

Neben der Ganztagesbetrachtung ist auch eine Lupenbetrachtung, z. B. aufgeteilt in Tagesabschnitte, denkbar, um eine differenziertere Betrachtung zu ermöglichen (siehe Abbildung 3.2). Dort sind auch die einzelnen Ladezustandswerte ausgewiesen. Gerade die kritischen Bereiche, in denen der Elektrobus seine Reservekapazitäten des Energiespeichers nutzen muss, können so detailliert analysiert werden.

Bei Betrachtung der Ladung der Busse über Nacht im Betriebshof werden alle Servicezeiten, die Vorkonditionierung der Fahrzeuge und die verfügbare Anschlussleistung exakt berücksichtigt, wie Abbildung 3.3 beispielhaft verdeutlicht. Man erkennt, dass vom Einfahren in den Betriebshof bis zum

3 Bewertung des Liniennetzes für den Einsatz von Elektrobussen

Erreichen der Ladestation im Abstellbereich nochmals 3 kWh verbraucht werden. Solche «Energiesenken» sollten in der Betrachtung nicht unberücksichtigt bleiben.

SOC Betriebshof			
Auswahl Ladegerät AC/DC:	16 A		
Auswahl Ladeleistung:	9,8 kW		
Ladezustand beim Einfahren in Betriebshof:	33 kWh	19.40 Uhr	(Einrücken in Betriebshof)
Ladezustand Fahrzeugservice Ende:	32 kWh	19.55 Uhr	(Fahrzeugservice)
Ladezustand Abstellung Fahrzeug Anfang:	30 kWh	20.25 Uhr	(Ladebeginn)
Ladezustand Ende der Ladung:	54 kWh	23.01 Uhr	(vollständige Ladung)
Ladezustand Abstellung Fahrzeug Ende:	54 kWh	04.56 Uhr	(Ladeende)
Ladezustand beim Ausfahren aus Betriebshof:	53 kWh	05.06 Uhr	(Ausrücken aus Betriebshof)
Lademanagement Betriebshof geeignet:	ja		
Der Elektrobus kann mit einem Ladegerät AC/DC 16 A zwischen 20:25 Uhr und 04:56 Uhr vollständig geladen werden. Er erreicht seine volle Ladung bereits 23:01 Uhr.			

Abbildung 3.3: Energieverlaufsdarstellung im Betriebshof

3.6 Ableitung eines Betriebs- und Umstellungskonzeptes

Auf Basis der Ergebnisse aus der Umlaufanalyse und Energiebilanzierung lässt sich für die untersuchten Linien ein geeignetes Betriebskonzept erarbeiten.

In der Regel kann für die mit Vollladern elektrifizierbaren Umläufe das bisherige Betriebskonzept der jeweiligen Linie zugrunde gelegt werden. Dieses ist für den elektrischen Betrieb zu konkretisieren – beispielsweise durch das Ausweisen von Mindestaufenthaltsdauern im Betriebshof für die Übernachtladung.

Für alle anderen Umläufe sind Massnahmen aufzuzeigen, um den rein elektrischen Busbetrieb der jeweiligen Linie zu ermöglichen. Dies beinhaltet eine Bewertung der notwendigen infrastrukturellen und / oder betrieblichen Massnahmen hinsichtlich ihrer Eingriffstiefe und ihres Umsetzungsaufwands.

Infrastrukturelle Massnahmen umfassen den Aufbau von Ladeinfrastruktur im Streckengebiet. Betriebliche Massnahmen können beispielsweise in dem Einsatz eines zusätzlichen Fahrzeuges oder dem Anpassen von Umläufen bestehen. Die Umsetzbarkeit dieser Massnahmen ist auf Basis betrieblicher Erfordernisse sowie weiterer Massgaben des Verkehrsbetriebes zu bewerten.

3 Bewertung des Liniennetzes für den Einsatz von Elektrobussen

Zusammenfassend sollte das Betriebskonzept für jede Linie bzw. jeden Umlauf folgende Parameter beinhalten:

- ▶ Ladekonzept (Voll- / Gelegenheitslader)
- ▶ Fahrzeugbedarf (insbesondere Mehrbedarf ggü. Referenzfahrzeug)
- ▶ Infrastrukturbedarf (insbesondere erforderliche Ladeleistung)
- ▶ Massnahmen zur Umlaufanpassung (z. B. Umlaufaufteilung, Verlängerung der Wendezeiten etc.)

Im Ergebnis liegt ein Vorschlag für ein Betriebskonzept einer künftigen Elektrobussenflotte vor. Dieses Konzept mit seinen jeweiligen technischen Konfigurationen stellt die Grundlage für alle weiterführenden ökonomischen, ökologischen, technischen und betrieblichen Betrachtungen dar.

Daran anknüpfend ist eine Umsetzungsstrategie für die schrittweise Umstellung des Betriebes auf den Einsatz von Elektrobussen zu erstellen. Dies beinhaltet die Ableitung von Umstellungsphasen und -umfängen für die Beschaffung von Fahrzeugen, Energieversorgungs-Infrastruktur und Planungssystemen sowie für die Vorbereitung des Betriebes durch die Erüchtigung der Werkstätten und Qualifizierung der Mitarbeitenden.

3.7 FAQ – Linienuntersuchung

Welche betrieblichen Parameter haben wesentlichen Einfluss auf die Eignung für Voll- oder Gelegenheitsladung?

Entscheidend für die Beurteilung sind die Anzahl der potentiell geeigneten Ladepunkte, die dortigen planmässigen Aufenthaltszeiten und unplanmässigen Verspätungen sowie die Abstände zwischen zwei Ladevorgängen.

Welche Fahrzeugparameter haben wesentlichen Einfluss auf den Energiebedarf?

Neben der Fahrgastkapazität und dem tatsächlichen Besetzungsgrad spielen aus technischer Sicht das Antriebssystem und das Heizungs- und Klimatisierungskonzept eine erhebliche Rolle. Zudem ist auch das Energiespeichersystem als eigentliche zu bestimmende Zielgrösse aufgrund ihrer Energiedichte in Verbindung mit ihrem realen Gewicht ein wesentlicher den Energiebedarf mitbestimmender Faktor.

3 Bewertung des Liniennetzes für den Einsatz von Elektrobussen

Welche Streckenparameter haben wesentlichen Einfluss auf den Energiebedarf und können daher entscheidend sein für die Bewertung des elektrischen Betriebs?

Zum einen bestimmen verkehrliche Parameter wie Halte je Kilometer, Haltezeitanteil und Durchschnittsgeschwindigkeit, zum anderen topographische Parameter wie die Höhendifferenzen, die durchschnittliche und maximale Steigung bzw. das Gefälle den Energiebedarf auf einer Strecke.

Was beinhaltet ein Betriebs- und Umstellungskonzept zur Linien- bzw. Flottenelektrifizierung?

Das Betriebskonzept sollte das Ladekonzept (Voll- / Gelegenheitslader), den Fahrzeugbedarf (insbesondere Mehrbedarf ggü. Referenzfahrzeug), den Infrastrukturbedarf (insbesondere erforderliche Ladeleistung) und Massnahmen zur Umlaufanpassung (z. B. Umlaufaufteilung, Verlängerung der Wendezeiten etc.) beinhalten. In einer Umsetzungsstrategie sind daraus Zeithorizonte für die Umstellung der untersuchten Linien bzw. Umläufe und für die Beschaffung der neuen Systemkomponenten (Fahrzeuge, Infrastruktur) abzuleiten.

4 Konzeption der Infrastruktur für Voll- und Gelegenheitsladung

4 Konzeption der Infrastruktur für Voll- und Gelegenheitsladung

4.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Das Infrastrukturkonzept stellt die ortskonkrete Integration der Ladeinfrastruktur in die bestehenden Betriebshöfe dar und soll der anschliessenden vertieften Umsetzungsplanung als Grundlage und Anforderungsprofil dienen. Basierend auf den Ergebnissen aus der Bewertung des Liniennetzes sollten hier die Ergebnisse hinsichtlich der Empfehlungen zu Voll- und Gelegenheitsladern einfließen.

Die Konzeption umfasst zunächst die Ermittlung der Anschlussleistung zur Anbindung an das Stromnetz. Ab dem Netzanschluss ist die elektrische Grundversorgung der Ladeinfrastruktur sowie die Ladeinfrastruktur selbst mit Umrichter- und Trafostationen zu konzipieren. Auch die Fahrzeugabstellung mit Ladepunkten wird als Teil der Konzeption betrachtet. In der gesamten Betrachtung sollte die voraussichtliche Flottenentwicklung des Verkehrsbetriebs durch Angebotserweiterungen und die Umstellung auf Elektromobilität berücksichtigt werden, um eine zukunftssichere Systemauslegung zu gewährleisten.

4.2 Ladeinfrastruktur Betriebshof

4.2.1 Netzanschluss

4.2.1.1 Ermittlung der Anschlussleistung

Der Netzübergabepunkt markiert den Übergang vom öffentlichen Stromnetz auf das interne Stromnetz des Betriebshofes. Für eine angemessene Dimensionierung des Netzanschlusses ist die erforderliche Anschlussleistung zu ermitteln. Dies sollte auf Grundlage der Umlaufdaten des Verkehrsbetriebs erfolgen, anhand derer die Aufenthaltszeiten und somit auch die verfügbaren Ladezeiten im Betriebshof ermittelt werden können.

Dabei sollte das beschlossene Ladekonzept (Voll- oder Gelegenheitslader) für die Flotte bzw. die jeweiligen Linien berücksichtigt werden. Dies ist insofern relevant, als dass Volllader ausschliesslich ausserhalb der

4 Konzeption der Infrastruktur für Voll- und Gelegenheitsladung

Einsatzzeiten im Betriebshof geladen werden und somit ihren gesamten Bedarf über die Betriebshofladung decken müssen, wohingegen Gelegenheitslader einen Grossteil der benötigten Energiemenge während der Einsatzzeit im Streckengebiet nachladen.

Besteht die Möglichkeit zu einer sukzessiven Erweiterung des Netzanschlusses, lassen sich aus dem geplanten Fahrzeughochlauf in Verbindung mit den Zeithorizonten für die Umstellung der Flotte auf Elektrobusbetrieb verschiedene Ausbaustufen ableiten. Dabei sind auch eventuelle Angebots-erweiterungen und die insofern vorgesehene Flottenerweiterung zu berücksichtigen.

Anhand der Umlauflängen lassen sich unter Annahme der Batteriegrößen und der spezifischen Energiebedarfe für verschiedene Fahrzeugtypen die jeweiligen Gesamtenergiebedarfe, die über Nacht im Betriebshof nachzuladen sind, ableiten. Anhand der Ein- und Ausrückzeiten lassen sich die Depot-Aufenthaltszeiten ableiten. Unter Berücksichtigung von Zeiten für den Service, d. h. die Fahrzeugreinigung nach Einrücken, und der Zeit für die Vorkonditionierung und das Batteriebalancing vor dem Ausrücken ergibt sich das verfügbare Ladezeitfenster.

Für die Simulation der Ladevorgänge können verschiedene Szenarien festgelegt werden. Diese können beispielweise wie folgt definiert werden:

- ▶ Gestaffelte Ladung mit fester Leistung: Die Ladung je Bus beginnt unmittelbar nach Einrücken in den Betriebshof zzgl. der Servicezeit mit einer festgelegten Leistung und endet mit Erreichen der vollen Batteriekapazität. Die Leistung kann frei gewählt werden. Für die Simulation können die Berechnungen beispielsweise jeweils mit 50 kW, 100 kW und 150 kW Ladeleistung je Bus durchgeführt werden.
- ▶ Gleichmässige Ladung über die Standzeit: Die Ladung je Bus verläuft über die gesamte verfügbare Ladezeit mit einer gleichmässigen Leistung, die im Durchschnitt über die Zeit benötigt wird. Die Durchschnittsleistung je Bus ist das Ergebnis der Simulation.

Für die gestaffelte Ladung ergibt sich mit steigender individueller Ladeleistung je Ladepunkt (50 kW, 100 kW, 150 kW) auch eine höhere erforderliche Gesamt-Leistung. Je niedriger die individuelle Leistung gewählt wird, desto mehr Umläufe mit nicht ausreichender Ladezeit werden sich ergeben. Ein ausreichendes Ladezeitfenster für nahezu alle Umläufe ergibt sich in der Regel erst bei einer Ladeleistung von 150 kW und mehr, da ein Grossteil der

4 Konzeption der Infrastruktur für Voll- und Gelegenheitsladung

heutige Dieselbus-Umläufe hohe Fahrleistungen bei gleichzeitig kurzen Standzeiten aufweist.

Um dennoch die erforderliche Anschlussleistung zu senken, sollte der Versuch unternommen werden, die Ladung gleichmässig über die Standzeit zu verteilen. Hierbei ergibt sich dann für jeden Umlauf eine individuelle durchschnittliche Ladeleistung, die in der Regel deutlich unter 150 kW liegt. Auf diese Weise kann eine erste Optimierung der Anschlussleistung erfolgen.

Unter der Voraussetzung, dass ein intelligentes Lademanagementsystem zum Einsatz kommt (vgl. Kapitel 5.4), lassen sich die Ladevorgänge zur Senkung der Lastspitze gegenüber der gleichmässigen Ladung noch weiter optimieren, sodass die erforderliche Anschlussleistung auch unter Berücksichtigung ausreichender Sicherheiten – wie beispielsweise zur Ladung der Fahrzeugreserve – die errechnete Schätzung im Regelfall nicht übersteigt.

4.2.1.2 Abstimmung mit Netzbetreiber

Nachdem die notwendige Anschlussleistung feststeht, ist vom Netzbetreiber zu prüfen, ob das vorgelagerte öffentliche Stromnetz ausreichend Kapazitäten zur Verfügung stellen kann. Für einen sicheren Betrieb ist mindestens eine Anschlussleistung in Höhe der auftretenden Spitzenlast unter Berücksichtigung von Verlusten notwendig.

Gemeinsam mit dem Netzbetreiber sollte das Zusammenspiel der Ladeinfrastruktur mit dem speisenden Stromnetz untersucht und die Anforderungen an die Ladeinfrastruktur für die Sicherstellung der Netzstabilität bestimmt werden.

Dabei spielen zu erwartende NetZRückspeisungen, die EMV-Schutzanforderungen, das notwendige Erdungskonzept, der Bedarf an Fernwirktechnik sowie der Umgang des Netzes mit Kurzzeitspitzen und Lastabwürfen eine Rolle. Grundlage dafür bilden die einschlägigen Richtlinien und Normen sowie die Technischen Anschlussbedingungen (TAB) des Netzbetreibers. Diese sind gegen die technischen und betrieblichen Notwendigkeiten des Betriebshofes zu spiegeln, und somit sind die netzseitigen Anforderungen an die Ladeinfrastruktur zu bestimmen.

4 Konzeption der Infrastruktur für Voll- und Gelegenheitsladung

4.2.2 Voraussetzungen für den Mittelspannungsanschluss

4.2.2.1 Übergabestation

Eine Übergabestation dient zunächst als Anschlussstelle an das Versorgungsnetz. Der Anschluss erfolgt über das Mittelspannungsnetz, sodass eine Mittelspannungsanlage den Hauptbestandteil der Übergabestation bildet. Die Schaltanlage sollte als zugelassene, standardisierte, fabrikfertige Anlage ausgeführt werden. Durch den Entwurf der Schaltanlage sind Parameter wie Redundanz und Wirtschaftlichkeit auszugestalten. Die Anlage sollte in der Lage sein, für eine zuverlässige Ladung der Batteriebusse zu sorgen. Je nach gewünschter Konfiguration hat die Übergabestation einen Flächenbedarf von ca. 14 m² bis 86 m². Die Übergabestation sollte möglichst in der Nähe der Strasse platziert werden, um den Anschluss an das Mittelspannungsnetz und einen möglichen Zugang vom Netzbetreiber zu vereinfachen.

Falls die Übergabestation und die Transformatorstationen räumlich getrennt sein sollten, so ist die Leistung auf dem Betriebshof über ein Mittelspannungsnetz zu verteilen. Die höchste Spannungsebene sollte so nah wie möglich an den Ladepunkt gebracht werden. So lässt sich die Verlustleistung in Grenzen halten. Dieses Netz kann über einen oder mehrere Stiche oder über einen oder mehrere Ringe aufgebaut werden. Dabei bietet eine Ringstruktur hinsichtlich der Redundanz gegenüber Stichen deutliche Vorteile.

4.2.2.2 Mittelspannungsring

Ein Mittelspannungsring belegt zwei Felder in der Schaltanlage der Übergabestation, sodass der Ring von zwei Seiten gespeist werden kann. Die notwendigen Transformatoren zur Versorgung der nachgeschalteten Ladegeräte werden über Unterstationen angeschlossen. Diese enthält eine Schaltanlage zum Einschleifen des Rings sowie einen Abgang für den Transformator. Der Transformator und die entsprechende Schaltanlage bilden eine Transformatorstation. In einen Ring können mehrere Transformatorstationen eingebunden werden. Der Ring kann als «offener Ring» oder «geschlossener Ring» betrieben werden.

Bei der Betriebsweise «offener Ring» ist der Ring an einer Stelle an einer Transformatorstation geöffnet, sodass die Transformatorstationen von jeweils einem Abgangsfeld der Übergabestation gespeist werden. Der Schutz

4 Konzeption der Infrastruktur für Voll- und Gelegenheitsladung

erfolgt über die Schaltfelder in der Übergabestation und kann so als relativ einfach bezeichnet werden. Tritt ein Fehler auf, so löst das entsprechende Schutzgerät in der Übergabestation aus und schaltet den fehlerhaften Abschnitt, aber auch den fehlerfreien Abschnitt, bis zu der Stelle aus, an der der Ring geöffnet ist. Durch Kurzschlussanzeiger kann der fehlerhafte Abschnitt geortet und daraufhin herausgeschaltet werden. Der Ring wird dann an der vorher geöffneten Stelle geschlossen, sodass alle fehlerfreien Transformatoren weiter betrieben werden können. Durch die Schaltvorgänge verringert sich die Verfügbarkeit der Anlage.

Um die Verfügbarkeit zu verbessern kann der Ring als «geschlossener Ring» betrieben werden. Dafür sind an jeder Transformatorstation Schutzgeräte zu installieren, die auf die anderen Schutzgeräte ausgerichtet sind. Dadurch wird eine Selektivität erreicht, die einen Weiterbetrieb der fehlerfreien Transformatorstationen ermöglicht. Für diese Option sind Leistungsschalter in den Schaltanlagen zu verwenden, diese können aus der Ferne ein- und ausgeschaltet werden.

4.2.2.3 Transformatorstation

Die Transformatorstation besteht aus einem festen Gebäude, das einen Mittelspannungstransformator, eine Mittelspannungsschaltanlage, sowie eine Niederspannungsverteilung beinhaltet. Der Transformator wandelt die Mittelspannung ($U_N = 16 \text{ kV}$) auf Niederspannung ($U_N = 400 \text{ V}$, bzw. eine auf die Ladegeräte angepasste Spannung). Die Mittelspannungsschaltanlage dient zur Einschleifung des Transformators in den Mittelspannungsring. Die Niederspannungsverteilung verteilt die Leistung zu den Ladegeräten.

Eine Transformatorstation, die als Kompaktstation ausgeführt wird, nimmt eine Fläche von ca. 5 m^2 bis 8 m^2 zuzüglich der Zuwegung in Anspruch.

Für möglichst hohe Wirkungsgrade, niedrigen Kühlaufwand und lange Lebensdauer auch bei voller Auslastung der Ladetechnik sollten die Transformatoren nicht in Volllast, sondern bei maximal etwa 80 % der Nennleistung betrieben werden.

Eine wichtige Grösse für die Auslegung der Stromversorgung ist die Wahl der Leistungsgrösse der Transformatoren. Grosse Transformatoren haben geringere spezifische Kosten und einen geringeren spezifischen Platzbedarf als Trafostationen mit geringerer Leistung. Jedoch sind bei Ausfall eines Transformators unter Umständen mehr Ladegeräte betroffen, wobei

4 Konzeption der Infrastruktur für Voll- und Gelegenheitsladung

solche Ausfälle äusserst selten sind. Bei Verwendung der Standardspannung 400 V_{3AC} sollte auf Ortsnetztransformatoren zurückgegriffen werden, welche in definierten Leistungsgrössen von 630 bis 1600 kVA, teilweise auch bis 2.500 kVA, verfügbar sind.

4.2.3 Variantenuntersuchung Ladetechnik

Es ist davon auszugehen, dass jeder Elektrobus an seinem Abstellort eine Vorrichtung zum konventionellen Nachladen während der nächtlichen Betriebspause benötigt, unabhängig vom verfolgten Ladekonzept (Voll- oder Gelegenheitslader). Ohne Lademöglichkeit an jedem Stellplatz eines Elektrobusses würde sich der Rangieraufwand erhöhen und alle Ladeplätze müssten unabhängig voneinander befahrbar sein. Übliche Ladeleistungen bei der Depotladung liegen im Bereich von 50 bis 150 kW; niedrigere bedingen zu lange Standzeiten für den Anwendungsfall, höhere eine zu hohe Belastung der Batterie und der Kontaktstellen.

Neben der Ladeleistung ist die technische Konfiguration der Ladepunkte ein wichtiger Faktor für die Kosten. Es sind verschiedene Möglichkeiten denkbar, die sich in Komplexität, Kosten und Flexibilität unterscheiden. Die Möglichkeiten zum Aufbau der Ladeinfrastruktur können nach verschiedenen Gesichtspunkten unterschieden und variiert werden. Tabelle 4.1 zeigt einschlägige Optionen für die Variantenbildung.

Raster	Aufbau Trafo / Ladegeräte	Kontaktsystem	Ladeleistung
10 Ladepunkte je Trafostation	Trafostation und Umrichterstation separat	Plug-In-System mit CCS-Stecker, Befestigung an Säule	50 kW je Ladegerät und Ladepunkt
12 Ladepunkte je Trafostation	Trafostation und Umrichterstation kombiniert	Plug-In-System mit CCS-Stecker, Befestigung an Decke	75 kW je Ladegerät und Ladepunkt
16 Ladepunkte je Trafostation	Trafostation und mehrere Umrichterstationen separat	Docking-Station für Hub-Pantograph	Ladegeräte zu je 50 kW in verschaltbaren 4er-Gruppen zu je 200 kW, bis 100 kW je Ladepunkt
20 Ladepunkte je Trafostation	Trafostation einzeln, Ladegeräte am Ladepunkt	Docking-Station mit Senk-Pantograph	Ladegeräte zu je 75 kW in verschaltbaren 4er-Gruppen zu je 300 kW, bis 150 kW je Ladepunkt

Tabelle 4.1: Variantenbildung für die Ladinfrastruktur

4 Konzeption der Infrastruktur für Voll- und Gelegenheitsladung

Die Parameter können grösstenteils unabhängig voneinander festgelegt werden. Zur weiteren Erläuterung und Illustrierung sind nachfolgend die verschiedenen Varianten bildlich dargestellt sowie deren Merkmale und Vor- und Nachteile im Einzelnen aufgezeigt.

4.2.3.1 Raster

Unter dem Begriff des Rasters ist die Anzahl der zu bedienenden Ladepunkte, die jeweils von einer Trafostation gespeist werden, zu verstehen. Die verschiedenen Raster sind in Tabelle 4.2 mit ihren Vor- und Nachteilen erläutert:

Raster	Merkmale	Vorteile	Nachteile
10 Ladepunkte je Trafostation	Mit zunehmender Anzahl der Ladepunkte je Trafostation erhöht sich die benötigte Leistung je Trafostation.	Je höher die Leistung einer Trafostation, desto geringer die spezifischen Kosten und der spezifische Platzbedarf.	Je höher die Leistung einer Trafostation, desto weniger flexibel ist deren räumliche und kostenmässige Verteilung und ggf. Anpassung auf den Fahrzeughochlauf.
12 Ladepunkte je Trafostation			
16 Ladepunkte je Trafostation			
20 Ladepunkte je Trafostation			

Tabelle 4.2: Zusammenfassung der Varianten zur Rasterung

4.2.3.2 Aufbau Transformator / Ladegeräte:

Transformator und Ladegeräte sind baulich auf verschiedenste Weise integrierbar. Sie können baulich zusammengefasst oder getrennt aufgestellt werden, wie in folgender Abbildung 4.1 dargestellt. In allen Varianten (1) bis (4) symbolisiert das rote Kabel den Anschluss an das Betriebshof-Mittelspannungsnetz. Die blauen Linien zeigen die Niederspannungskabel auf der Wechselspannungsseite (AC). Diese Niederspannungskabel können ggf. auch durch platzsparende Stromschienen ersetzt werden. Die orangenen Linien zeigen die Niederspannungskabel auf der Gleichspannungsseite (DC). Es wird jeweils das 16er-Raster dargestellt. Für die anderen Raster sind analog zu den Abbildungen jeweils die entsprechende Anzahl an Ladegeräten hinzuzufügen oder zu entfernen.

4 Konzeption der Infrastruktur für Voll- und Gelegenheitsladung

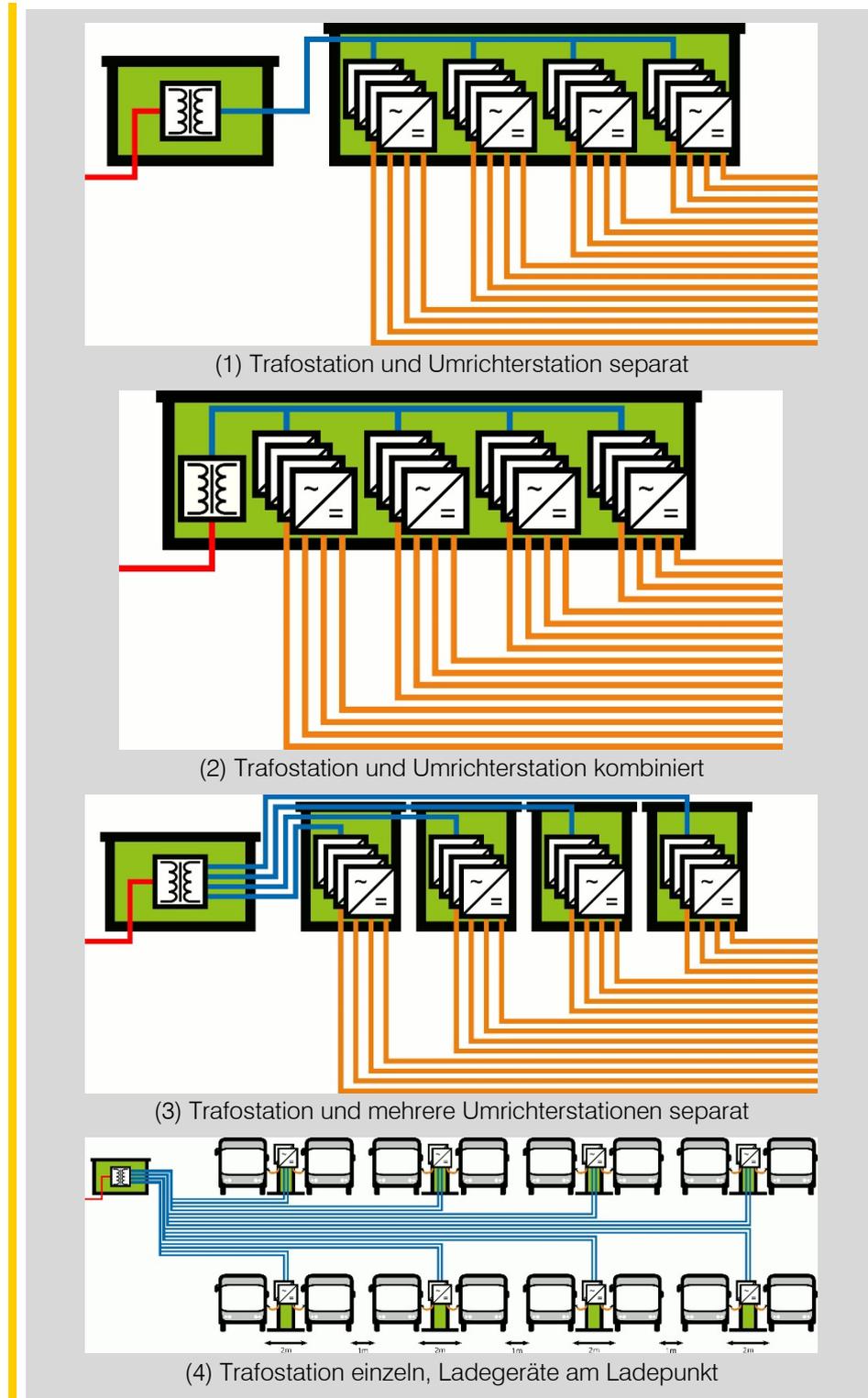


Abbildung 4.1: Varianten zum Aufbau von Transformator und Ladegeräten

4 Konzeption der Infrastruktur für Voll- und Gelegenheitsladung

In der Variante (1) sind Transformator und Ladegeräte räumlich getrennt. Die Ladegeräte sind in Gruppen von vier Geräten zusammengefasst und befinden sich alle in einem Gebäude.

Sind Transformator und Ladegeräte wie in Variante (2) gemeinsam in einem Gebäude untergebracht, so wird von einer Transformator- und Gleichrichterstation gesprochen. Transformator und Ladegeräte sind jedoch in verschiedenen Räumen des Gebäudes untergebracht.

In Variante (3) sind Transformator und Ladegeräte räumlich getrennt, wobei die Gruppen mit je vier Ladegeräten im Gegensatz zur Variante (1) in einzelnen Gebäuden untergebracht sind.

Variante (4) stellt die dezentrale Aufstellung der Ladegeräte an jedem Ladeplatz dar. Im Unterschied zu den vorherigen Varianten sind die Ladegeräte an den Abstellplätzen der Busse integriert, hier beispielhaft als Plug-In-System mit Steckerzuführung von unten ausgeführt. Eine Ausführung mit Steckerzuführung von oben ist ebenfalls möglich. Dezentrale Docking-Station-Systeme sind hingegen aufgrund des hohen Platzbedarfs für die Aufstellung im Betriebshof nicht geeignet. Der Transformator wird abgesetzt aufgestellt. Die Leistung zwischen Transformator und den Ladegeräten wird über dreiphasige Niederspannungskabel übertragen.

In Tabelle 4.3 sind die Möglichkeiten zum Aufbau von Transformator und Ladegeräten mit ihren Vor- und Nachteilen erläutert.

4 Konzeption der Infrastruktur für Voll- und Gelegenheitsladung

Aufbau Trafo / Ladegeräte	Merkmale	Vorteile	Nachteile
Trafostation und Umrichterstation separat	Je Trafostation wird eine Umrichterstation mit den Ladegeräten in einem separaten Gehäuse aufgestellt.	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Trafo und Ladegeräte können unabhängig voneinander, d. h. flexibler, aufgestellt werden ▶ Ladegeräte können zentrale Kühlung nutzen 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Verluste im Niederspannungsbereich je nach Kabellänge und Spannungsniveau ▶ Einsatz von Stromschienen gehemmt
Trafostation und Umrichterstation kombiniert	Je Trafostation wird eine Umrichterstation mit den Ladegeräten in einem kombinierten Gehäuse aufgestellt.	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Kurze Leitungswege im Niederspannungsbereich ▶ Einsatz von Stromschienen möglich ▶ Ladegeräte können zentrale Kühlung nutzen 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Evtl. lange DC-Kabel je nach Distanz zum Ladepunkt ▶ Zentral grosser Flächenbedarf
Trafostation und mehrere Umrichterstationen separat	Je Trafostation werden mehrere Umrichterstationen mit den Ladegeräten in separaten Gehäusen aufgestellt.	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Ladegeräte können bei Bedarf kleinteiliger, d. h. flexibler, verteilt werden 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Verluste im Niederspannungsbereich je nach Kabellänge und Spannungsniveau ▶ Einsatz von Stromschienen gehemmt ▶ Einsatz von zentraler Kühlung gehemmt
Trafostation einzeln, Ladegeräte am Ladepunkt	Es wird keine Umrichterstation aufgestellt, die Ladegeräte werden jeweils separat an den Ladepunkten installiert.	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Keine zusätzliche Wallbox notwendig 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Grosser Flächenbedarf auf der Abstellfläche ▶ Verluste im Niederspannungsbereich je nach Kabellänge und Spannungsniveau

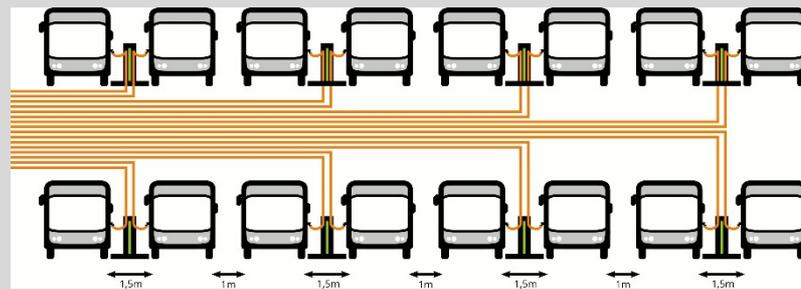
Tabelle 4.3: Zusammenfassung der Varianten zum Aufbau von Transformator und Ladegeräten

4.2.3.3 Kontaktsystem

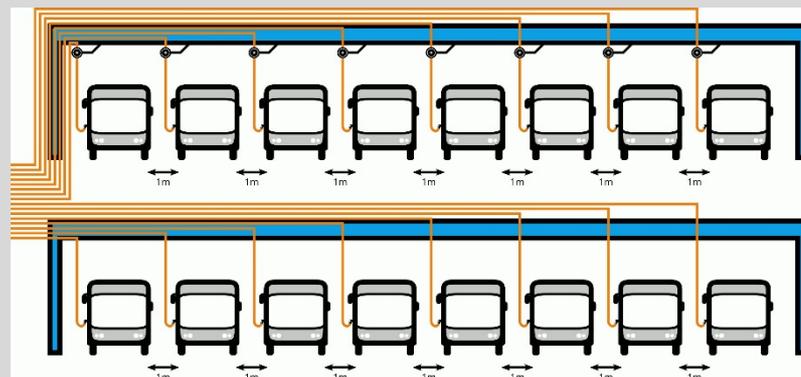
Beim Kontaktsystem wird grundsätzlich zwischen Plug-In-System und Docking-System unterschieden. Innerhalb der Systeme gibt es zudem verschiedene Möglichkeiten der technischen Konfiguration. Diese sind in der folgenden Abbildung 4.2 in den Varianten (1) bis (4) dargestellt. Die

4 Konzeption der Infrastruktur für Voll- und Gelegenheitsladung

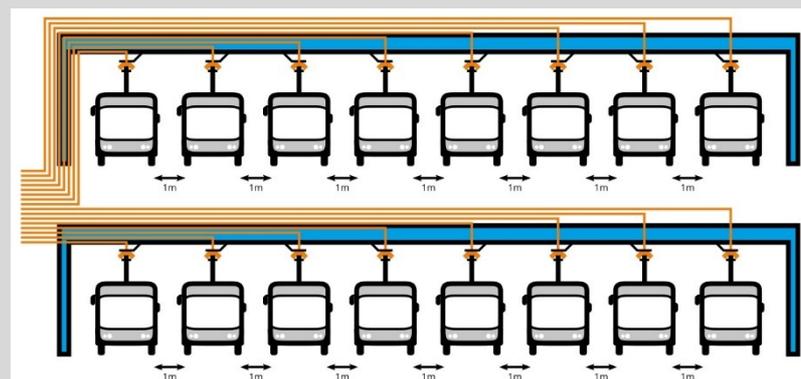
orangene Linie stellt jeweils das DC-Niederspannungskabel zwischen Ladegerät und Ladepunkt dar. Auch hier wird jeweils das 16er-Raster dargestellt. Für die anderen Raster sind analog zu den Abbildungen jeweils die entsprechende Anzahl an Ladepunkten hinzuzufügen oder zu entfernen.



(1) CCS-Stecker, Befestigung an Säule



(2) CCS-Stecker, Befestigung an Decke



(3) Docking-Station für Hub-Pantograph

4 Konzeption der Infrastruktur für Voll- und Gelegenheitsladung

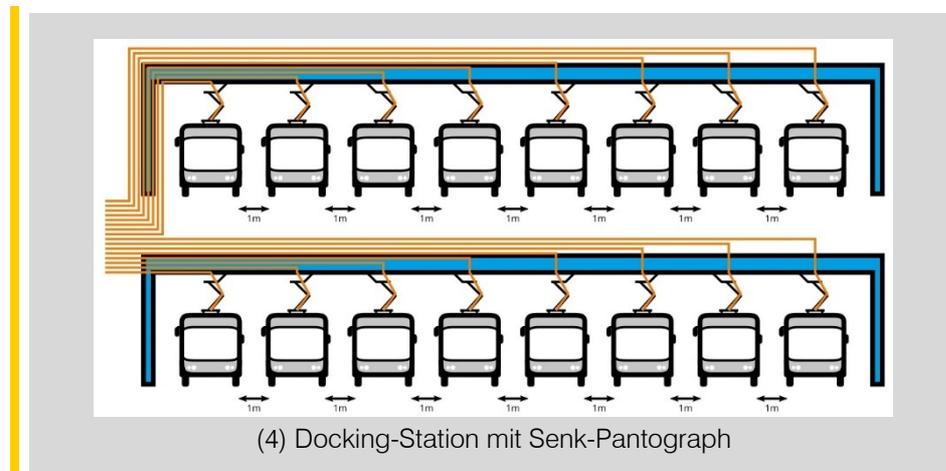


Abbildung 4.2: Varianten zum Aufbau des Kontaktsystems

Wie in der Variante (1) zu erkennen, wird bei Verwendung des Plug-In-Systems mit Zuführung des CCS-Steckers von unten in der Regel jeweils zwischen 2 Bussen eine Mittelinsel eingesetzt, auf der die Wallboxen / Ladesäulen zum Aufnehmen der Ladekabel platziert sind. Die aufgepflasterte Mittelinsel dient dem Anfahrschutz der Wallboxen / Ladesäulen. Von jeder Wallbox / Ladesäule werden zwei Batteriebusse versorgt. Voraussetzung dafür ist, dass die Busse jeweils auf der linken und rechten Fahrzeugseite eine Ladebuchse besitzen und somit flexibel abzustellen sind. Sollte dies nicht der Fall sein, so sind Mittelinseln zwischen jedem Fahrzeug einzusetzen. Es wird angenommen, dass zwischen zwei Bussen ohne Mittelinsel ein Abstand von 1 m und mit Mittelinsel ein Abstand von 1,5 m einzuhalten ist.

Werden die Ladekabel des Plug-In-Systems wie in Variante (2) von oben zum Bus geführt, so kann auf die Mittelinseln verzichtet werden. Als Optionen stehen Kabelabroller oder alternativ Kabeltrommeln zur Aufnahme der Ladekabel oder das Herabhängen des Ladekabels zur Wahl. Wenn die ungenutzten Ladekabel herabhängen, so können sich diese im Bereich der Fluchtwege befinden. Dies kann durch Aufwickeln auf Kabeltrommeln verhindert werden.

Beim Prinzip der Docking-Station wird auf Ladekabel verzichtet. Stattdessen erfolgt die Energiezuführung über einen Pantographen. In Variante (3) ist die Ausführung mit Hub-Pantographen dargestellt. Dabei befindet sich der Stromabnehmer zur Kontaktherstellung auf dem Fahrzeugdach. Es ist von einem Hub von etwa 1,2 m auszugehen.

4 Konzeption der Infrastruktur für Voll- und Gelegenheitsladung

Variante (4) zeigt die Ausführung mit Senk-Pantographen. Der Stromabnehmer zur Kontaktherstellung befindet sich an der Ladestation. Hierbei beträgt der Hub etwa 2,5 m.

In Tabelle 4.4 sind die Möglichkeiten zum Aufbau des Kontaktsystems mit ihren Vor- und Nachteilen erläutert.

Kontaktsystem	Merkmale	Vorteile	Nachteile
Plug-In-System mit CCS-Stecker, Befestigung an Säule	Energiezuführung über Kabel mit Combined-Charging-System, Kabelführung von der Seite	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Einfache Technik ▶ Kostengünstig ▶ Keine zusätzlichen Komponenten am Bus notwendig 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Platzbedarf auf Abstellfläche ▶ Ladeleistung ungekühlt begrenzt (200 A, ~150 kW)
Plug-In-System mit CCS-Stecker, Befestigung an Decke	Energiezuführung über Kabel mit Combined-Charging-System, Kabelführung von oben	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Einfache Technik (ohne Kabelabroller) ▶ Kostengünstig (ohne Kabelabroller) ▶ Keine zusätzlichen Komponenten am Bus notwendig 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Vorrichtung für Aufhängung notwendig ▶ Unfallpotential durch herabhängende Kabel bzw. zusätzliches Gewicht durch Kabelabroller ▶ Ladeleistung ungekühlt begrenzt (200 A, ~150 kW)
Docking-Station für Hub-Pantograph	Energiezuführung über fahrzeugseitigen Hub-Pantographen	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Ermöglicht automatisierte Ladung ▶ Keine störenden Kabel ▶ Gute Kompensation von Parktoleranzen ▶ Kostengünstiger als Senk-Docking-System 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Vorrichtung für Aufhängung notwendig ▶ Zusätzliches Gewicht des Pantographen auf dem Fahrzeug (ca. 80 kg)
Docking-Station mit Senk-Pantograph	Energiezuführung über infrastrukturseitigen Senk-Pantographen	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Ermöglicht automatisierte Ladung ▶ Keine störenden Kabel ▶ Kaum zusätzliches Gewicht auf dem Fahrzeug (ca. 15 kg) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Vorrichtung für Aufhängung notwendig ▶ Weniger flexibel in der Fahrzeugpositionierung ▶ Kostenintensiver als Hub-Docking-System

Tabelle 4.4: Zusammenfassung der Varianten zum Aufbau des Kontaktsystems

4 Konzeption der Infrastruktur für Voll- und Gelegenheitsladung

4.2.3.4 Ladeleistung

Die Ladeleistung ist im Rahmen der von den Herstellern angebotenen Ladegeräten frei wählbar. Zu unterscheiden ist jedoch insbesondere zwischen einzelnen isolierten und untereinander verschaltbaren Ladegeräten. Verdeutlicht sind diese Varianten in Abbildung 4.3.

4 Konzeption der Infrastruktur für Voll- und Gelegenheitsladung

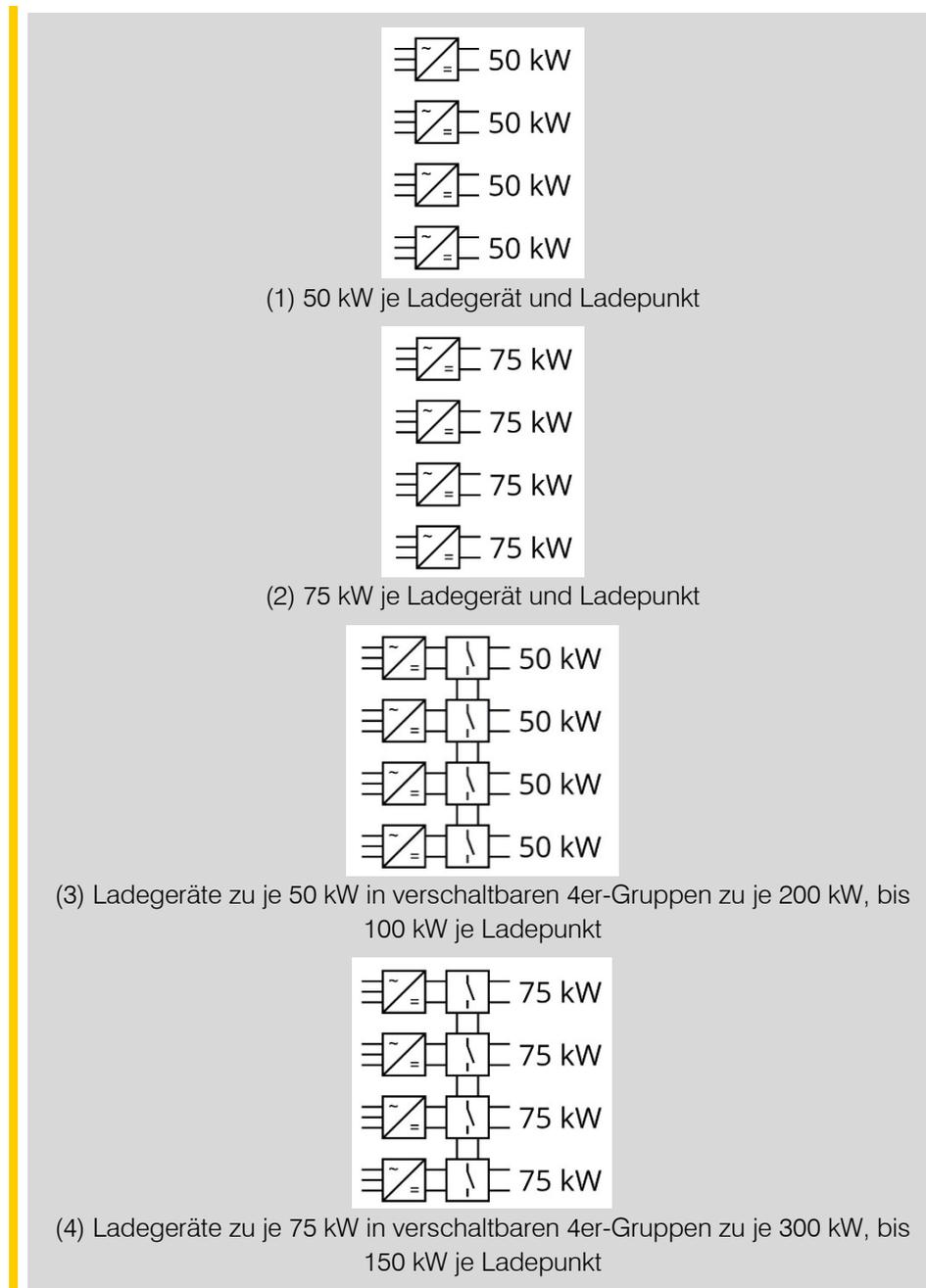


Abbildung 4.3: Varianten zur Dimensionierung der Ladeleistung

Die Varianten für die Ladeleistung je Ladepunkt werden am Beispiel von RBS und BSU aus der Simulation des Energie- und Leistungsbedarfs abgeleitet. Sowohl für den RBS, als auch für den BSU werden drei Ausbaustufen vorgeschlagen. In der 3. Ausbaustufe bei vollständiger Elektrifizierung und

4 Konzeption der Infrastruktur für Voll- und Gelegenheitsladung

gleichmässiger Verteilung der Ladeleistung über die Standzeit beträgt die Ladeleistung beim BSU im Median 21 kW, im Durchschnitt 53 kW. Daher werden als Näherung mit ausreichender Sicherheit typische Ladegerät-Leistungen von 50 kW in Variante (1) und 75 kW in Variante (2) definiert. In beiden Varianten ist jedes Ladegerät einem einzelnen Ladepunkt zugeordnet. Damit ist die maximal verfügbare Ladeleistung am Ladepunkt auf die Maximalleistung des Ladegerätes begrenzt.

In den Varianten (3) und (4) beträgt die Ladeleistung je Ladegerät ebenfalls 50 kW bzw. 75 kW, jedoch sind die Ladegeräte in Gruppen von 4 Stück untereinander verschaltbar zu 200 kW bzw. 300 kW. Somit ist die maximal verfügbare Ladeleistung für 4 Ladepunkte auf insgesamt 200 kW bzw. 300 kW begrenzt und können bedarfsgerecht verteilt werden. Die maximal verfügbare Ladeleistung am Ladepunkt beträgt jedoch höchstens 150 kW, um auf Ladekabel ohne Wasserkühlung zurückgreifen zu können. Der Maximalwert des Stroms liegt derzeit bei 200 A für Ladekabel ohne Wasserkühlung, entsprechend etwa 150 kW Ladeleistung bei 750 V Batteriespannung.

Tabelle 4.5 fasst die Dimensionierung der Ladeleistung zusammen.

Ladeleistung	Merkmale	Vorteile	Nachteile
50 kW je Ladegerät und Ladepunkt	Jeder Ladepunkt verfügt jeweils über ein isoliertes Ladegerät mit fester Leistung.	Technisch einfach umsetzbar	Gefahr der Über- oder Unterdimensionierung – bei Überdimensionierung hohe Kosten, bei Unterdimensionierung keine Flexibilität
75 kW je Ladegerät und Ladepunkt			
Ladegeräte zu je 50 kW in verschaltbaren 4er-Gruppen zu je 200 kW, bis 100 kW je Ladepunkt	Mehrere Leistungseinheiten sind mit mehreren Ladepunkten verbunden, sodass die Leistungseinheiten den Anforderungen entsprechend zusammenschaltet werden können.	Hohe Flexibilität bei gleichzeitig bedarfsgerechter und damit kostenminimierender Dimensionierung	Technisch komplexes System bezogen auf die Ansteuerung der Schaltungsmatrix
Ladegeräte zu je 75 kW in verschaltbaren 4er-Gruppen zu je 300 kW, bis 150 kW je Ladepunkt			

Tabelle 4.5: Zusammenfassung der Varianten zur Ladeleistung

4 Konzeption der Infrastruktur für Voll- und Gelegenheitsladung

4.2.4 Anforderungen an die Abstellung

4.2.4.1 Flächenkapazität

Entsprechend einer gewählten Vorzugsvariante, die aus der Variantenuntersuchung abzuleiten ist, sind auf dem Betriebshof Flächen für die Aufstellung der Ladetechnik vorzusehen. Hierfür ist die räumliche Anordnung des Endausbaus bereits im Vorhinein zu planen. Daraus lassen sich dann Abschnitte für eine schrittweise Elektrifizierung der Abstellung ableiten.

Im Zuge der Planungen muss die zusätzliche Belastung durch die eingebrachte Ladetechnik (hauptsächlich Trafos, Ladegeräte, Kabelwege und Kontaktsystem) beachtet werden. Um die Abstellkapazität nicht einzuschränken, sollte die Ladetechnik abgesetzt (örtlich getrennt) vom Anschlusspunkt des Busses installiert werden. Von den Ladegeräten werden Kabel zu den abgesetzten Ladepunkten verlegt, welche an das Kontaktsystem angeschlossen werden.

Haben Elektrobusse mit Plug-In-System an beiden Seiten eine Ladeschnittstelle für Combo-2-Kupplungen, sollten die Ladepunkte immer doppelt zwischen den Fahrzeugen installiert werden. Hierdurch verringert sich der Aufwand für die Montage sowie Verkabelung und es entstehen mehr freie, nicht von Kabeln eingeschränkte Wegebeziehungen für Fluchtwege. Die folgende Darstellung zeigt exemplarisch doppelte Ladepunkte zwischen zwei Busspuren für Plug-In-Systeme, bei denen von einem Punkt am Hallendach zwei Kabel herabgeführt werden. Bei Einsatz von Docking-Station-Systemen befänden sich die Anschlusspunkte hingegen direkt über dem Bus.

4 Konzeption der Infrastruktur für Voll- und Gelegenheitsladung

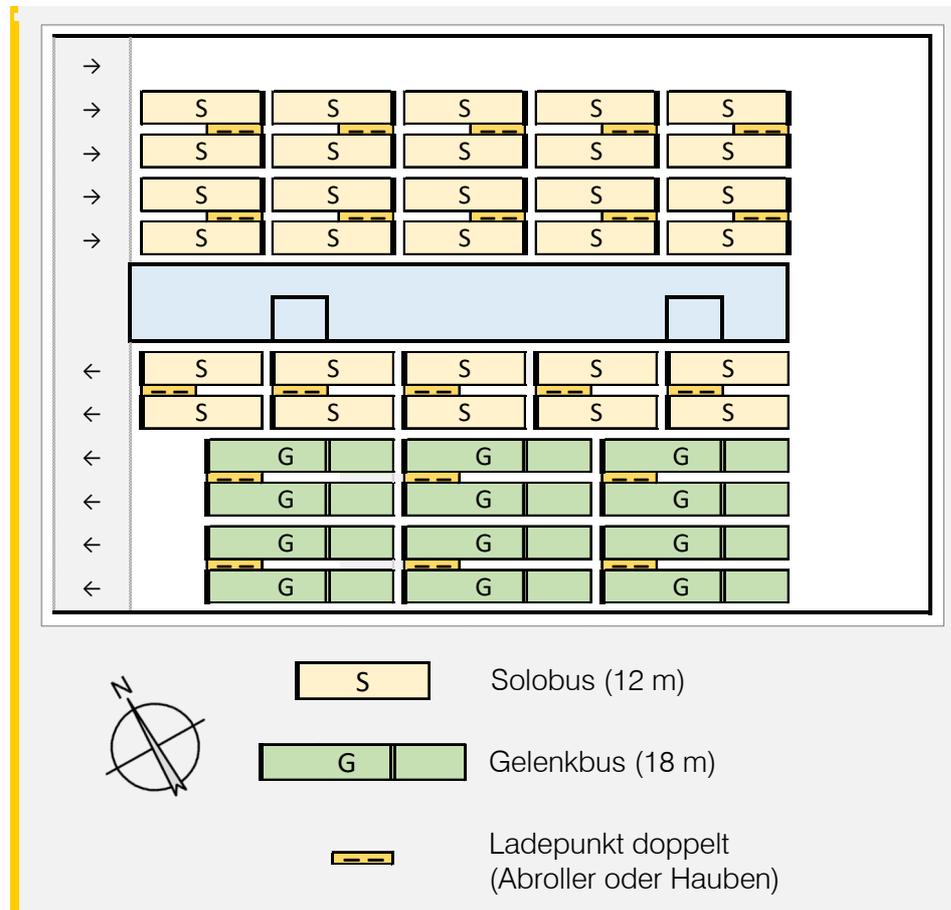


Abbildung 4.4: Fahrzeugabstellung und Ladepunktzuordnung

4.2.4.2 Bauhöhe Einstellhalle

Wird im Betriebshof ein System mit Hub- oder Absenk-Pantograph installiert, ist auf die minimalen Durchfahrts- und Raumhöhen zu achten. In der Abbildung 4.5 ist ein Hub-Pantograph dargestellt, wobei die Ergebnisse prinzipiell auch auf Absenkpantographen übertragbar sind. In diesem Fall ist lediglich die höhere baustatische Belastung der Abstellhallendecke zu berücksichtigen, da die Mechanik des Pantographen im Ladepunkt verbaut ist und an der Decke montiert werden muss.

4 Konzeption der Infrastruktur für Voll- und Gelegenheitsladung

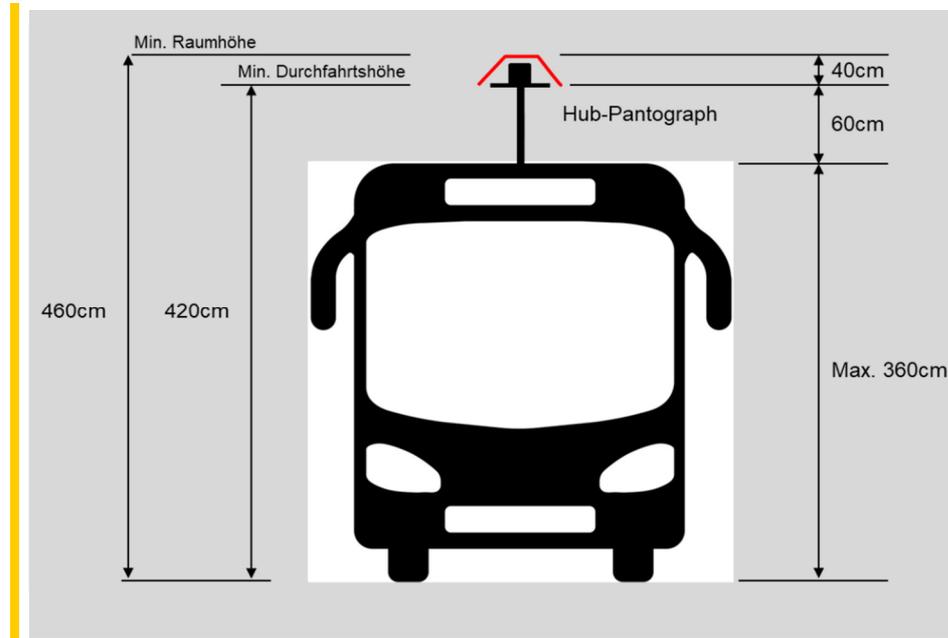


Abbildung 4.5: Minimale Bauhöhe der Einstellhalle für ein Docking-Station-System

4.2.4.3 Sicherheitsaspekte

Grundsätzlich sind bei der Wahl des Ladesystems im Abstellbereich zahlreiche Faktoren zu berücksichtigen. Zu den räumlichen Aspekten kommen praktische Erwägungen für die Ergonomie und Sicherheit des alltäglichen Betriebs.

Was zunächst neben der reinen Platzverfügbarkeit gegen eine Installation von Ladesäulen am Boden spricht, ist die Betriebssicherheit. Gerade in beengten Verhältnissen sind bodenmontierte Ladesysteme einem hohen Anfahrtsrisiko ausgesetzt. Neben den Schäden an Ladesäule und Fahrzeug kann eine eventuelle Sicherheitsabschaltung des gesamten Ladesystems nach Beschädigung einer Ladesäule auch empfindliche Auswirkungen auf die Aufrechterhaltung des gesamten Busbetriebs haben. Robuste Anfahrerschutz-Vorkehrungen schränken den Platz zusätzlich ein, auch vor diesem Hintergrund sind deckenseitige Ladesysteme also von Vorteil.

Der Elektrobus soll sich möglichst «unauffällig» in den Betrieb integrieren lassen und für das Fahr- und Servicepersonal nach Möglichkeit keine zusätzlichen Arbeiten erzeugen. Unter diesem Gesichtspunkt stellt die Docking-Station das Optimum dar, denn sie erfordert kein umständliches Hantieren mit Steckern und Kabeln. Hierbei ist anzumerken, dass je nach

4 Konzeption der Infrastruktur für Voll- und Gelegenheitsladung

erforderlicher Ladeleistung die Kabel Ausmasse (und Gewichte) annehmen können, bei denen eine rein manuelle Bewegbarkeit nicht mehr ohne weiteres gewährleistet wäre.

Neben Faktoren der Ergonomie und Bedienfreundlichkeit, welche sich unmittelbar auf die Systemakzeptanz bei den Mitarbeitenden und die Prozesseffizienz der Arbeitsabläufe auswirken, sind auch die Aspekte des Arbeitsschutzes zu berücksichtigen. Dies betrifft weniger das Risiko eines Spannungseintrags in Personen, da Ladesysteme eigensicher konzipiert sind, sondern vielmehr den Umgang mit den Kabeln und die Gewährleistung von Fluchtwegen. So sind beispielsweise umherliegende Ladekabel mitunter leicht zu übersehende Stolperfallen. Beim Anschluss an das Ladesystem über eine auf dem Boden montierte Ladesäule, aber auch schon der reine Steckeranschluss bei einem von der Decke geführten Kabelsystem schränkt den verfügbaren seitlichen Zwischenraum zwischen den Fahrzeugen ein und verhindert die Durchgängigkeit. Dies ist bei der Konzeption von Fluchtwegen entsprechend zu berücksichtigen. Weitere bestehende bauliche Hindernisse wie Säulen oder Wände können dazu führen, dass die Flexibilität der Abstellung eingeschränkt ist.

Schliesslich ist es möglich, dass sowohl die Ladesäulen als auch die von ihnen ausgehenden Kabel betriebliche Prozesse im Abstellbereich beeinflussen, etwa weil die Befahrbarkeit der Fahrzeuglängszwischenräume mit Putzwagen durch Reinigungskräfte nicht mehr gewährleistet ist.

4.2.4.4 Brandschutz

Bei der Neuanschaffung von Elektrobussen und Ladetechnik sind besondere Vorgaben hinsichtlich des Brandschutzes zu beachten.

Aus der reinen Abstellung von Elektrobussen ergeben sich im Allgemeinen keine Nutzungsänderungen der Abstellfläche. Somit muss keine brandschutztechnische Neubewertung der Abstellfläche und auch keine höhere Einstufung des Gefahrenpotentials erfolgen. Dies stellt sich jedoch anders dar, wenn die Fahrzeuge nicht nur abgestellt, sondern auch geladen werden, d. h. beim Betrieb von Ladeinfrastruktur sind brandschutztechnische Belange zu berücksichtigen.

In diesem Kontext sind auch die entsprechenden Anforderungen an eine notwendige Versicherung zu betrachten. Entsprechend den Risikoeinschätzungen ist das Laden von Elektrofahrzeugen als eine Gefahrenerhöhung

4 Konzeption der Infrastruktur für Voll- und Gelegenheitsladung

gegenüber einer Abstellung konventionell angetriebenen Bussen einzustufen und folglich als Obliegenheit gegenüber dem Versicherer anzuzeigen. Dies bedarf in diesem Zusammenhang den Kontakt zur Baubehörde, da hier eine Nutzungsänderung vorliegt.

Eine genaue Gefahrenanalyse kann nur durch den Brandschutzbeauftragten bzw. Brandschutzplaner vorgenommen werden. Die hier aufgeführten Anmerkungen zur Brandschutzanalyse können dazu nur eine Hilfestellung leisten. Es empfiehlt sich, in jedem Fall die lokal für den Brandschutz zuständige Behörde frühzeitig in den Planungsprozess einzubinden. Zudem sollte bereits bei den technischen Gesprächen mit den Herstellern der Ladeinfrastruktur und der Fahrzeuge eine Gefährdungsbeurteilung abgefordert werden.

Die Mittelspannungsanlage (Schaltanlage, Transformatoren, Steuerungstechnik) ist brandtechnisch in getrennten Bereichen vom restlichen Betriebshof zu planen.

In der eigentlichen Abstellhalle wird zur Brandlöschung eine Sprinkleranlage mit Schaumbeimischung empfohlen. Dies ist mit Blick auf die Ladetechnik unproblematisch, da grundsätzlich ein Kurzschlusschutz für die ausgehende Ladeverbindung besteht (z. B. auch im Falle der Beschädigung des Fahrzeugs, der Ladekupplung oder des Ladekabels).

Grundsätzlich ist wegen ihres hohen Energiegehalts und ihrer chemischen Eigenschaften (Thermal Runaway) davon auszugehen, dass eine einmal brennende Traktionsbatterie nur schwer wieder gelöscht werden kann. Oberstes Ziel kann also nur die Verhinderung der Brandausbreitung auf weitere Fahrzeuge und die Abstellhalle sein. Im Brandfall sollten Fahrzeuge ausserhalb des unmittelbaren Gefahrenbereichs unverzüglich aus der Abstellung gefahren werden, um ein Übergreifen und somit eine nicht mehr zu beherrschende Ausbreitung des Feuers zu verhindern (vgl. Kapitel 5.2.6).

Eine Sprinkleranlage im Bereich der elektrischen Installationen zur Umspannung und Gleichrichtung würde bei Auslösung im laufenden Betrieb zur Beschädigung bis zur Zerstörung der Ladetechnik führen. Zudem bestände wegen der hohen elektrischen Ströme auch eine Gefährdung von Personen in diesen Räumen. Um diese Probleme zu vermeiden, sind im Bereich elektrotechnischer Installationen und Computertechnik Gaslöschanlagen üblich.

4 Konzeption der Infrastruktur für Voll- und Gelegenheitsladung

In der Regel werden solche Räume mit einem allgemeinen Löschesystem mit Sauerstoffverdrängung (meist CO₂ oder andere Inertgase) versehen. Nachteilig ist, dass hierdurch Menschen, welche sich in den Räumen aufhalten, durch den reduzierten Sauerstoffgehalt gefährdet werden können.

Nach Marktrecherche besteht für geschlossene Räume auch die Möglichkeit, in die Ladegeräte Aerosollöschsysteme zu integrieren. Diese könnten mit autark arbeitenden Brandmeldern versehen werden, um beim Auslösen über einen Hilfskontakt die Spannungsversorgung des betroffenen Ladegerätes aufzutrennen und gleichzeitig die Löschvorrichtung zu aktivieren.

4.3 Ladeinfrastruktur Strecke

4.3.1 Anforderungsprofil

4.3.1.1 Flächenverfügbarkeit

Für eine beispielhafte Schnellladestation mit einer Ausgangsleistung von 350 kW und einem Ladepunkt beläuft sich der Flächenbedarf für die Ladeinfrastruktur (Transformator und Ladegerät) auf ca. 14 m². Es wird ein Betonhaus eingesetzt mit den Abmessungen von ca. 4,4 m x 3,2 m. Dort sind ein Mittelspannungstransformator ohne Mittelspannungsschaltanlage, ein Schnellladegerät und Hilfsaggregate untergebracht. Für das Fundament für einen Lademast kann zusätzlich mit einer Fläche von 3 m² (1,5 m x 2,0 m) gerechnet werden. Diese ist abhängig von den statischen Gegebenheiten (Spannweite, Höhe, Profile, andere Lasten).

In einem anderen Beispiel werden zwei Ladepunkte mit jeweils 350 kW bedient. Die Abmessungen für das notwendige Gebäude, das zusätzlich einen Sanitärraum und eine Mittelspannungsschaltanlage beinhaltet, belaufen sich auf 8,5 m x 3,2 m. Dies entspricht einer Fläche von ca. 27,2 m².

Zusätzlich zu der Fläche des Gebäudes sind noch Flächen für die Zuwegung und Flächen zum Aufstellen des Lademastes vonnöten. Tabelle 4.6 fasst die erforderlichen Flächenbedarfe zusammen.

4 Konzeption der Infrastruktur für Voll- und Gelegenheitsladung

Objekt	Abmessung (Bsp.)	Fläche Gebäude	Fläche Zuweisung (1,5 m) 2 Seiten
Transformator und Ladegerät (1 Ladepunkt)	4,4 m x 3,2 m	14,1 m ²	13,7 m ²
Transformator, MS-Schaltanlage, Ladegeräte (2 Ladepunkte)	6,8 m x 3,0 m	20,4 m ²	17,0 m ²
Zusätzliche Sanitäranlage	3,0 m x 1,5 m	4,5 m ²	2,3 m ²
Lademastanlage (Fundament)	1,5 m x 2,0 m	3,0 m ²	

Tabelle 4.6: Flächenbedarfe für verschiedene Varianten und Komponenten einer Schnellladeinfrastruktur

4.3.1.2 Energiebereitstellung

Aufgrund der Charakteristik der Gelegenheitsladung muss während der kurzen Wendezeit eine möglichst hohe Ladeleistung bereitgestellt werden, um ausreichend grosse Energiemengen zu übertragen. Technisch ist die Ladeleistung derzeit auf etwa 450 kW begrenzt. Bei einem Wirkungsgrad von 90 % ist also eine Anschlussleistung von bis zu 500 kW erforderlich. Für eine zuverlässige Nachladung ist diese Anschlussleistung am Endpunkt zu gewährleisten. Kann diese Anschlussleistung am betreffenden Ort nicht garantiert werden, so ist ein stationärer Energiespeicher zu installieren, der die zusätzliche Leistung im Bedarfsfall abgeben kann.

4.3.1.3 Eigentumsverhältnisse

Die Eigentumsverhältnisse bzw. der Flächenbesitz ist massgebend für den erforderlichen Abstimmungs- und Planungsaufwand. Befindet sich die vorgesehene Fläche im eigenen Besitz, reduziert sich der Aufwand. Dennoch sind ggf. für die Verlegung von Kabeln zur Anbindung an das Stromnetz öffentliche Flächen aufzugraben. Hier ist mit entsprechenden Abstimmungsprozessen zwischen den relevanten Planungsstellen zu rechnen.

4 Konzeption der Infrastruktur für Voll- und Gelegenheitsladung

4.3.1.4 Integration in den öffentlichen Raum

Die Errichtung von Ladeinfrastruktur im öffentlichen Raum ist grundsätzlich ein Eingriff in das bestehende Ortsbild. Hierbei gilt es, durch Beachtung gestalterischer Aspekte den Charakter der ursprünglichen Umgebung nicht negativ zu verändern und die Aufenthaltsqualität nicht zu beeinträchtigen. Die neue Infrastruktur darf nicht als störend empfunden werden. Im besten Falle sind sogar Synergieeffekte herzuleiten, beispielsweise durch die zusätzliche Installation von Pkw-Ladeinfrastruktur für die Allgemeinheit. Durch Berücksichtigung all dieser Aspekte soll die Akzeptanz der neuen Technologie durch die Öffentlichkeit gefördert werden.

Die elektrischen Anlagen führen unter Umständen zu unerwünschten Lärmemissionen. In Abhängigkeit der örtlichen Gegebenheiten und der zugeordneten Empfindlichkeitsstufe sind die entsprechenden gesetzlich vorgeschriebenen Lärmbelastungsgrenzwerte für den Betrieb der Ladestation einzuhalten. Unter Umständen sind zusätzliche Lärmschutzmaßnahmen notwendig.

Für die Erstellung der Ladeinfrastruktur müssen Baubewilligungen eingeholt werden. Für das Baubewilligungsverfahren ist genügend Vorlaufzeit einzurechnen.

4.3.1.5 Betriebsorganisation der Haltestelle

Im Zuge der Planungen ist der Betriebsablauf der vorgesehenen Ladevorgänge zu berücksichtigen. Darunter fallen Aspekte wie die Ladedauer, die Zeit zwischen den Ladevorgängen, die Nutzung und Frequentierung der Haltestelle durch andere Linien sowie der Fahrgastwechsel. In dieser Hinsicht darf es zu keinen Beeinträchtigungen kommen.

4.4 FAQ – Infrastrukturkonzeption

Mit welcher Anschlussleistung muss bei vollständiger Elektrifizierung der Busflotte in der Busgarage gerechnet werden?

Die notwendige Anschlussleistung ist vor allem von der benötigten Energiemenge und der verfügbaren Ladezeit abhängig. Die Energiemenge wird bestimmt von der Anzahl der nachzuladenden Busse, den Umlauflängen und dem Ladekonzept (Volllader / Gelegenheitslader). Bei den Vollladern

4 Konzeption der Infrastruktur für Voll- und Gelegenheitsladung

konzentriert sich die Nachladung vor allem auf die Nacht und die Busgarage, wohingegen Gelegenheitslader grösstenteils tagsüber und auf der Strecke nachgeladen werden. So wird bei einer ausschliesslich aus Vollladern bestehenden Busflotte generell eine höhere Anschlussleistung notwendig sein als bei einer Flotte mit Gelegenheitsladern bei ansonsten gleichen Bedingungen. Um die Leistungsspitze, die sich bei gleichzeitiger Ladung einer grossen Anzahl von Fahrzeugen ergeben würde, zu verringern bietet sich der Einsatz eines Lademanagementsystems an.

Wichtig ist, den Netzbetreiber bzw. den Energieversorger rechtzeitig einzubinden, sodass für einen entsprechenden Netzanschluss gesorgt werden kann.

Wie kann die Leistung in der Busgarage verteilt werden?

Je nach erforderlicher Anschlussleistung ist ein geeigneter Bezug aus dem übergeordneten Versorgungsnetz oder anderen Energiequellen vorzusehen. Meist ist ein Anschluss auf Mittelspannungsebene notwendig bzw. ausreichend. Es ist ein Übergabepunkt zwischen Versorgungsnetz und internem Netz zu definieren. Die Leistung sollte so verteilt werden, dass die höchste Spannungsebene so nah wie möglich zu den Ladegeräten gebracht wird. So bietet es sich an, ein Mittelspannungsnetz innerhalb der Busgarage aufzubauen. Als Herausforderung ist die Integration der Komponenten der Ladeinfrastruktur in den Bestand zu betrachten, da diese einen entsprechenden Platzbedarf haben.

Aus welchen Komponenten besteht die Ladeinfrastruktur?

Die Ladeinfrastruktur besteht mindestens aus folgenden Komponenten:

- ▶ Ladegeräte
- ▶ Kontaktsystem
- ▶ Transformator oder Anschluss an Bestand

Bei grösseren Flotten an Elektrobussen kommen meist noch folgende Komponenten hinzu:

- ▶ Transformatorstationen mit Verteilung
- ▶ Mittelspannungsverteilung in der Busgarage
- ▶ Übergabestation (zwischen Versorgungsnetz und internem Netz)

4 Konzeption der Infrastruktur für Voll- und Gelegenheitsladung

Welche Ladeleistung muss zum Laden eines Elektrobusses in der Busgarage angesetzt werden?

Die anzusetzende Ladeleistung ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Bei Gelegenheitsladern kann diese relativ gering ausfallen, da der Batteriespeicher und somit die nachzuladende Energiemenge relativ klein ist. Bei Vollladern kommt es vor allem auf die verfügbare Ladezeit an. Ist diese tendenziell eher gering, so muss eine entsprechend hohe Ladeleistung angesetzt werden. Auch bieten höhere Ladeleistungen bessere Optionen zum Optimieren der Ladevorgänge. Bei langen Ladezeiten sind geringe Ladeleistungen ausreichend.

Welche grundlegenden Anforderungen ergeben sich durch die Integration von Ladeinfrastruktur in der Busgarage?

Bei der Integration der Ladeinfrastruktur in die Busgarage sind mehrere Anforderungen zu formulieren. Zunächst muss die notwendige Fläche zur Verfügung gestellt werden. Dabei spielen auch brandschutztechnische Einflüsse eine Rolle, vor allem dann, wenn die Integration in Gebäude (Einstellhalle) stattfinden soll. Soll die Energiezuführung über die Hallendecke erfolgen, so ist eine ausreichende Hallenhöhe sicherzustellen, die Statik des Bestandes zu analysieren und zu prüfen, ob die zusätzlichen Lasten (Ladehaube, Pantograph oder Ladekabel) getragen werden können.

Welche Anforderungen sind an Ladeinfrastruktur im Streckengebiet zu stellen?

Bei der Errichtung von Ladeinfrastruktur für die Zwischenladung im Einsatzgebiet wird eine geeignete, d. h. ausreichend grosse, Fläche im Bereich der Haltestelle benötigt. An dieser ist zudem die Anbindung an das öffentliche Stromnetz zu ermöglichen. Bei Ladeinfrastruktur im öffentlichen Raum spielen zudem noch die Eigentumsverhältnisse und die Integration in den öffentlichen Raum eine besondere Rolle für den gesamten Prozess der Planung und Realisierung. Hier gilt es, die Belange der Öffentlichkeit einzubeziehen und die Akzeptanz durch Aspekte der Gestaltung, Nutzung und Wirkung der Ladeinfrastruktur zu fördern. Schliesslich sind Störungen des Betriebsablaufes durch die vorgesehenen Ladevorgänge zu vermeiden.

5 Werkstattausrüstung, Mitarbeiterqualifizierung und IT-Systeme

5 Werkstattausrüstung, Mitarbeiterqualifizierung und IT-Systeme

5.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die Einführung eines Elektrobussystems bedeutet mehr als nur die Inbetriebnahme eines neuen Fahrzeugtyps. Insbesondere im Bereich der Reparatur und Instandhaltung sowie auch in den betrieblichen Planungsprozessen sind Anpassungen notwendig.

Zum einen ist der Werkstattbereich des Verkehrsunternehmens entsprechend der angestrebten Wertschöpfungstiefe in der Wartung und Instandhaltung mit Einrichtungen auszustatten, mit denen die Arbeiten am Elektrobuss ausgeführt werden können. Des Weiteren sind die Mitarbeitenden entsprechend zu schulen, sodass sie die Berechtigung erlangen, Arbeiten an den Elektrobussen vornehmen zu können. Sowohl im Bereich der Ausrüstungsgegenstände als auch im Bereich des Personals ist eine Bestands- und Bedarfsanalyse durchzuführen.

Hinsichtlich der IT-Systeme zur Planung und Steuerung von Betriebsprozessen ist zudem zu prüfen, wie notwendige Elektrobusspezifische Systeme integriert werden können und welche Anforderungen an sie zu stellen sind.

5.2 Technische Ausrüstung einer Elektrobusswerkstatt

5.2.1 Arbeiten auf Dachniveau

Elektrisch betriebene Busse weisen ausnahmslos in größerem Umfang technische Komponenten auf dem Fahrzeugdach auf. Häufig ist das komplette Energiespeichersystem dachseitig verbaut. Aber auch, wenn dieses vollständig oder teilweise an anderer Stelle, z. B. im Fahrzeugheck, integriert ist, befinden sich auf dem Dach weitere Komponenten wie Umrichter, Bremswiderstand, fahrzeugseitige Ladeinfrastrukturelemente und natürlich – wie bei Dieselmotoren – Heizungs- und Klimatisierungsanlagen.

Bei entsprechender Wertschöpfungstiefe in der Werkstatt ist es daher unerlässlich, für absturz sichere Arbeitsmöglichkeiten auf Dachniveau zu sorgen. Das können mobile Arbeitsbühnen oder stationäre Dacharbeitsstände in

5 Werkstattausrüstung, Mitarbeiterqualifizierung und IT-Systeme

ein- oder zweiseitiger Ausführung sein. Die Sicherheitsanforderungen an die Dacharbeitsbühnen sind analog zu denen eines Strassenbahnbetriebs.

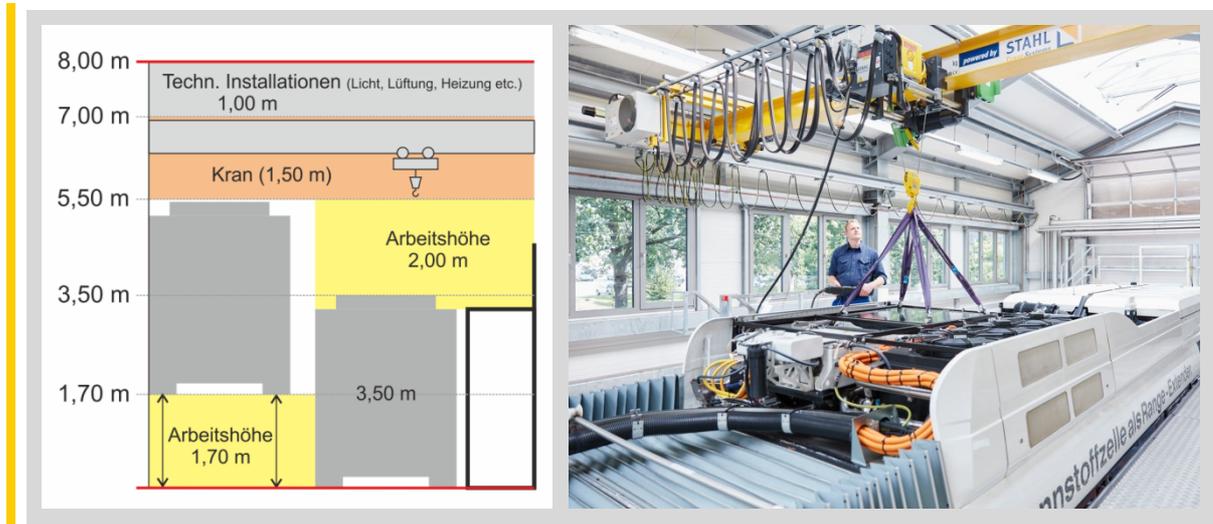


Abbildung 5.1: Dacharbeitsstand bei der FFG in Hamburg⁴

Für die Integration eines Dacharbeitsstands in den geplanten Werkstattbereich sind ausreichende zulässige Bodenlasten und insbesondere eine ausreichende Innenhöhe des Werkstattgebäudes zu berücksichtigen. Die nachfolgende Abbildung zeigt, dass für eine so ausgestattete Elektrobuswerkstatt eine Gebäudeinnenhöhe von mindestens 8,00 m vorgesehen werden sollte.

⁴ **Quelle** | FFG Fahrzeugwerkstätten Falkenried GmbH: Dacharbeitsplätze für Busse, <http://www.ffg-hamburg.de/dacharbeitsplaetze-busse-hamburg.html>, abgerufen am 24.04.2018

5 Werkstattausrüstung, Mitarbeiterqualifizierung und IT-Systeme

Abbildung 5.2: Erforderliche Innenraumhöhe E-Bus-Werkstatt⁵

5.2.2 Entfernen und Bewegen grösserer Lasten

Neben dem Arbeiten auf Dachniveau kann es auch erforderlich sein, die dachseitigen Komponenten zu deinstallieren und vom Dach zu entfernen. Aus Gründen der Zugänglichkeit (insbesondere bei vorhandenem stationärem Dacharbeitsstand) und zum Schutz vor Beschädigungen des Fahrzeugs durch Anfahren wird von mobilen Kranen oder Gabelstaplern für die Entfernung von Deckenlasten abgeraten. Vielmehr sollte hier ein verfahrbarer Deckenkran an einer Quertraverse vorgesehen werden. Die Montage eines Deckenkrans erhöht jedoch die Anforderungen an die Gebäudehöhe zusätzlich.

Für die Bewegung der Lasten im Werkstattbereich nach der Demontage sind Flurfördermittel (Gabelstapler oder Hubwagen) erforderlich, für die ausreichend dimensionierte Fahrwege sowie ein geeigneter Abstellort (ggf. mit Ladevorrichtung) zur Verfügung stehen müssen.

Schliesslich sind die für den Betrieb von Kränen und Flurfördermitteln erforderlichen Ladungssicherungs- und Anschlagmittel vorzuhalten.

⁵ Quelle | Abbildung links: Eigene Grafik VCDB GmbH, Abbildung rechts: FFG Fahrzeugwerkstätten Falkenried GmbH: Dacharbeitsplätze für Busse, <http://www.ffg-hamburg.de/dacharbeitsplaetze-busse-hamburg.html>

5 Werkstattausrüstung, Mitarbeiterqualifizierung und IT-Systeme

5.2.3 Lagerung von Energiespeichersystemen

Bislang ist weder von Herstellern noch von Betreibern von Elektrobussen der Bedarf geäußert worden, zusätzliche Energiespeichersysteme als Austauschkomponenten an Betriebshofstandorten vorzuhalten. Je nach Elektrobus-Flottengröße, aber auch abhängig vom Standort des Fahrzeugherstellers bzw. seines Ersatzteillieferanten kann nicht ausgeschlossen werden, dass ein Lagerplatz für Energiespeichersysteme vorgesehen werden muss.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass Energiespeicher, unter anderem aufgrund der potentiellen Brandlast, als Gefahrgut klassifiziert werden und entsprechende Vorkehrungen am Lagerort zu treffen sind. Dies ist vor allem abhängig von Herstellervorgaben und der Positionierung der örtlich zuständigen Brandschutzbehörde.

Weiterhin ist zu beachten, dass der Lagerort für Energiespeichersysteme auch eine Spannungsversorgung der Batterien gewährleisten muss, um eine schädliche Tiefenentladung während des Einlagerungszeitraums zu verhindern.

5.2.4 Lagermöglichkeiten für Spezialwerkzeug, separater Werkstattbereich

Für die Wartung und Instandhaltung von Elektrobussen sind zusätzliche Werkzeuge und Hilfsmittel erforderlich. Hierzu zählen besonders isolierte HV-Spezialwerkzeuge, Spannungsprüfer und weitere Messgeräte, fahrzeugspezifische Diagnosesysteme, Isolationsmatten, aber auch Absperr- und Kennzeichnungsmaterial, um eine Annäherung an das möglicherweise nicht spannungsfreie Fahrzeug durch Unbefugte zu verhindern. Für alle am Fahrzeug tätigen Mitarbeitenden ist geeignete persönliche Schutzausrüstung zur Verfügung zu stellen.

Alle exemplarisch genannten Ausrüstungsgegenstände fallen zusätzlich zur Standard-Werkstattausrüstung an und müssen bei der Planung und Dimensionierung von Aufbewahrungs- und Lagerkapazitäten berücksichtigt werden.

Für Arbeiten an den Hochvoltkomponenten kann – wiederum abhängig von der Wertschöpfungstiefe und der Häufigkeit der Arbeiten – die Einrichtung eines separaten HV-Werkstattbereichs mit entsprechenden Prüf- und Arbeitsplätzen erforderlich sein.

5 Werkstattausrüstung, Mitarbeiterqualifizierung und IT-Systeme

5.2.5 Lademöglichkeiten

Im Werkstattbereich ist eine Spannungsversorgung der Fahrzeuge sicherzustellen. Bei vorhandenem Plug-In-Anschluss (ist in der Regel Standard bei Elektrobussen, auch wenn andere Ladesysteme vorhanden sind) kann ein mobiles Ladegerät mit geringer Ladeleistung ausreichen.

Ob auch eine ggf. vorhandene Schnellladeoption über Pantograph oder ähnliches für Test- und Prüfzwecke im Werkstattbereich vorhanden sein muss, richtet sich nach den Vorgaben des Systemlieferanten und der angestrebten Wertschöpfungstiefe. Gegebenenfalls sind entsprechende Anforderungen an die Energiebereitstellung zu berücksichtigen.

5.2.6 Havarieplatz

Es wird empfohlen, für Elektrobusse mit unklarem Schadensbild und nicht auszuschliessender Brandgefahr einen Havarieplatz im Aussenbereich vorzusehen. Dieser sollte neben einer ausreichenden Grösse auch über eine gute Zugänglichkeit für Einsatzkräfte verfügen. Zudem ist er räumlich und Brandschutz-technisch vom restlichen Betriebshof sowie eventueller angrenzender Bebauung auf Nachbargrundstücken getrennt und erlaubt im schlimmsten Fall ein sicheres, kontrolliertes Abbrennen des Fahrzeuges, sollte die Traktionsbatterie mechanisch beschädigt worden sein.

5.2.7 Standardausrüstung nach VDV 825

Der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) empfiehlt in der VDV-Schrift 825 eine Mindestausstattung für Werkzeuge und Werkstattausrüstungen, die für die Arbeit an Elektrobussen in einer Werkstatt vorhanden sein sollte. Diese Empfehlung stellt das absolute Minimum bei Vorhandensein von Bussen mit Hochvoltantrieben dar und nimmt keinen Bezug zur gegebenen Flottengrösse. In der nachfolgenden Tabelle wird die Wiedergabe der VDV-Mindestausstattung daher um eine Empfehlung für eine angenommene Vollelektrifizierung einer Busflotte von bis zu 50 Fahrzeugen ergänzt.

5 Werkstattausrüstung, Mitarbeiterqualifizierung und IT-Systeme

Ausrüstung	VDV 825 ⁶	VCDB
Prüfbox für HV-System	1	2
HV-Spezialwerkzeugsatz	2	4
Spannungsprüfer	2	4
Messgeräte	1	2
Diagnoseeinheit (Laptop inklusive fahrzeug-spezifische Software)	1	2 ⁷
Schutz-ausrüstung Mitarbeitende (EN 1149)	2	N.N. ⁸
Transporthilfen (z. B. für Batterien)	1	1
Kran und / oder Stapler / Hubwagen (mind. 1,0 t Hublast)	1	je 1 ⁹
Anschlagmittel (Ketten, Haken)	1	1
Dacharbeitsstand, stationär, 2-seitig	1	1
Dacharbeitsbühne, mobil, Portalbauweise		1
Arbeitsgrube (oder Radgreifer)	1	1

Tabelle 5.1: Mindestausstattung Werkzeuge und Werkstattausrüstung E-Bus

5.3 Schulung der Mitarbeitenden

5.3.1 Hochvolt-Qualifikationsstufen

Im Zuge der Einführung von Elektrobussen ist sowohl das Werkstatt- und Service- als auch das Fahrpersonal umfassend auf den Umgang mit der

⁶ Quelle | Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (2015): VDV-Schrift 825 Auswirkungen alternativer Technologien im Linienbus auf Betriebshöfe und Werkstätten, S. 20

⁷ Jedoch mindestens ein System pro eingesetztem Fahrzeugtyp

⁸ Mindestens eine pro am Elektrobus tätigen Mitarbeitenden pro Schicht

⁹ Die Kranbahn sollte zumindest die beiden mit Dacharbeitsbühnen ausgestatteten Arbeitsstände überspannen.

5 Werkstattausrüstung, Mitarbeiterqualifizierung und IT-Systeme

neuen Technologie vorzubereiten. Dazu sind spezielle Hochvoltkenntnisse zu erlangen.

Für Arbeiten an elektrischen Anlagen sind die Anforderungen bezüglich Arbeitssicherheit hoch. In der Schweiz dürfen deshalb gemäss Starkstromverordnung für die Beaufsichtigung von Arbeiten an oder in Starkstromanlagen und zugehörigen betriebstechnischen Einrichtungen sowie für Massnahmen der Arbeitssicherheit nur sachverständige Personen eingesetzt werden. Für die Erlangung der Sachverständigkeit gibt es entsprechende Lehrgänge, welche jedoch Praxiserfahrungen mit elektrischen Netzen und Anlagen voraussetzen.

In Deutschland richtet sich der Schulungsbedarf in einem Verkehrsunternehmen im Zuge der Einführung von Elektrofahrzeugen mit Hochvoltkomponenten nach den Vorgaben der berufsgenossenschaftlichen Informationsschrift DGUV Information 200-005¹⁰. Speziell für Omnibusse hat die VBG zudem einen Leitfaden zur Elektromobilität herausgegeben, der ebenfalls Aufschluss über die verschiedenen Qualifikationsstufen gibt¹¹.

Folgende Qualifizierungen sind vorgesehen:

- ▶ Stufe 0: Sensibilisierung HV-Technik
 - ▶▶ Stufe HV-Bus-R: Elektrotechnisch unterwiesene Person für Reinigungstätigkeiten
 - ▶▶ Stufe HV-Bus-F: Elektrotechnisch unterwiesene Person für Fahrtätigkeiten
- ▶ Stufe 1: Nicht-elektrotechnische Arbeiten
 - ▶▶ Stufe HV-Bus-EuP: Elektrotechnisch unterwiesene Person für Arbeiten, die das HV-System nicht betreffen
- ▶ Stufe 2: Elektrotechnische Arbeiten im spannungsfreien Zustand
 - ▶▶ Stufe HV-Bus-Efk-AisZ: Elektrofachkraft für Arbeiten im spannungsfreien Zustand an Bussen mit HV-Systemen
- ▶ Stufe 3: Elektrotechnische Arbeiten im nicht spannungsfreien Zustand

¹⁰ [Quelle](#) | DGUV Information 200-005 «Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltssystemen» (bisher: BGI/GUV-I 8686), April 2012.

¹¹ [Quelle](#) | VBG Fachwissen «Elektromobilität – Arbeiten an Omnibussen mit Hochvolt-Systemen – Leitfaden für ein betriebliches Konzept», Version 2.0, Oktober 2016

5 Werkstattausrüstung, Mitarbeiterqualifizierung und IT-Systeme

- ▶▶ Stufe HV-Bus-Efk-AuS: Elektrofachkraft für Fehlersuche und Prüfarbeiten unter Spannung an Bussen mit HV-Systemen
- ▶ Stufe HV-Bus-vEfk: Verantwortliche Elektrofachkraft für Arbeiten an Bussen mit HV-Systemen.
- ▶ Stufe HV-Bus-Ausbilder/in: Ausbilder/in für Arbeiten an Bussen mit HV-Systemen.

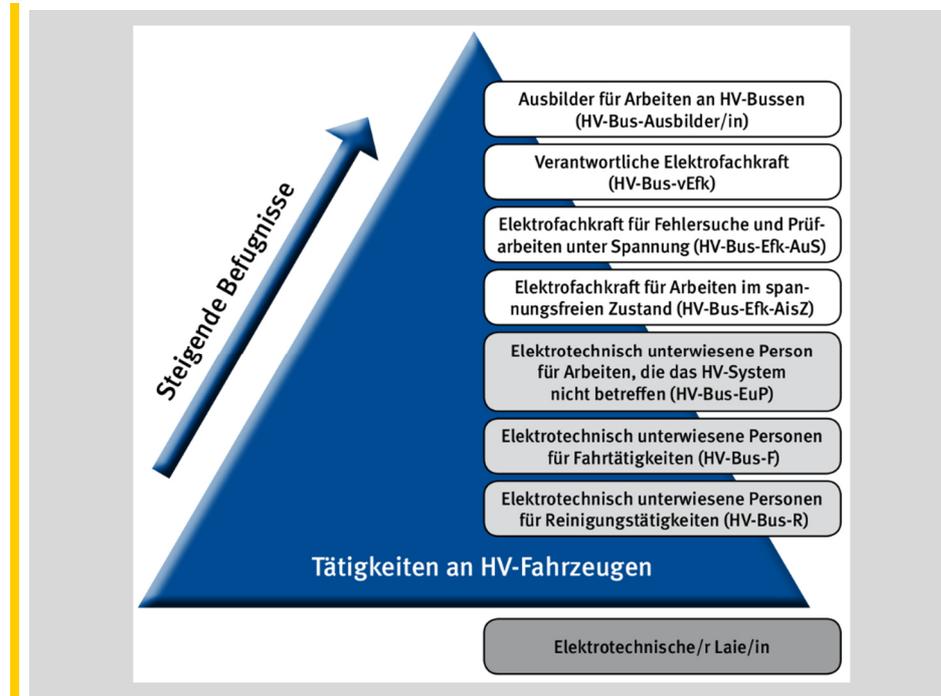
5.3.2 Vorzusehende Schulungsbedarfe

Für das Bedienen und nicht-elektrotechnische Arbeiten ist in der Regel eine Unterweisung ausreichend, in der allgemeine Grundlagen des Fahrzeugs, Kennzeichnungen und Sicherheitshinweise vermittelt werden.

Für sämtliche elektrotechnischen Arbeiten – auch im spannungsfreien Zustand – ist eine entsprechende Qualifizierung zur Elektrofachkraft für Hochvolt-Systeme in Kraftfahrzeugen erforderlich. Soll in der Werkstatt auch unter Spannung am Fahrzeug gearbeitet werden, müssen die Mitarbeitenden darüber hinaus speziell geschult werden. Weiterhin sollte sichergestellt werden, dass in jeder Schicht der Werkstatt ein Mitarbeitender mit der Qualifikation zur «verantwortlichen Elektrofachkraft» gemäss VDE 1000-10:2009-01 zur Verfügung steht, wenn Arbeiten am Hochvolt-System durchgeführt werden.

Abbildung 5.3 zeigt den Zusammenhang zwischen den für entsprechende Tätigkeiten an Hochvolt-Fahrzeugen erforderlichen Qualifikationen und den damit einhergehenden Befugnissen.

5 Werkstattausrüstung, Mitarbeiterqualifizierung und IT-Systeme

Abbildung 5.3: Qualifikationspyramide¹²

Nicht jede Stufe muss durch eine einzelne Person repräsentiert werden, da die Stufen der Qualifizierung «Elektrofachkraft» (Stufe 2 und 3) aufeinander aufbauen. Dementsprechend ist auch die Dauer der Qualifizierungsmaßnahmen von der Eingangsqualifikation der Beschäftigten abhängig.

Im Bereich des Fahrdienstes hat es sich bewährt, neben der Hochvolt-Unterweisung auch eine Schulung zum ökonomischen Fahren mit Elektrofahrzeugen durchzuführen. Es hat sich gezeigt, dass geschultes Fahrpersonal deutlich bessere Verbrauchsergebnisse erzielt als ungeschultes.

5.4 Anpassung der IT-Systemarchitektur

5.4.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die Anpassung der IT-Systemarchitektur umfasst die Integration Elektrobusspezifischer Prozesse in eine bestehende oder neu aufzubauende IT-

¹² Quelle | VBG Fachwissen «Elektromobilität – Arbeiten an Omnibussen mit Hochvolt-Systemen – Leitfaden für ein betriebliches Konzept», Version 2.0, Oktober 2016

5 Werkstattausrüstung, Mitarbeiterqualifizierung und IT-Systeme

Systemarchitektur zur intelligenten Steuerung und Kontrolle aller den Busbetrieb betreffenden Prozesse auf dem Betriebshof während der Betriebsruhe sowie ausserhalb des Betriebshofes während der Einsatzzeiten. Kern der elektrobus-spezifischen Funktionen der IT-Systeme soll ein Lademanagementsystem für die Ladung von Elektrobusen sein.

Dazu ist zunächst die aktuelle IT-Systemarchitektur zu erfassen und die grundlegenden Wünsche und Ziele zur Verbesserung der aktuellen Systeme aufzuarbeiten. Darauf aufbauend soll die Integration elektrobus-spezifischer Systeme erfolgen. Dazu sind deren gewünschte Funktionen und Schnittstellen zu definieren und ein Prozess für deren Entwicklung im Zusammenhang mit den weiteren IT-Systemen aufzuzeigen.

5.4.2 Systemaufbau

Abbildung 5.4 zeigt eine beispielhafte denkbare Ausgestaltung der gesamten IT-Systemlandschaft eines Verkehrsbetriebes, die neben der Ladung der Elektrobusse auch alle anderen Prozesse auf dem Betriebshof und im Einsatz der Fahrzeuge plant, steuert und kontrolliert.

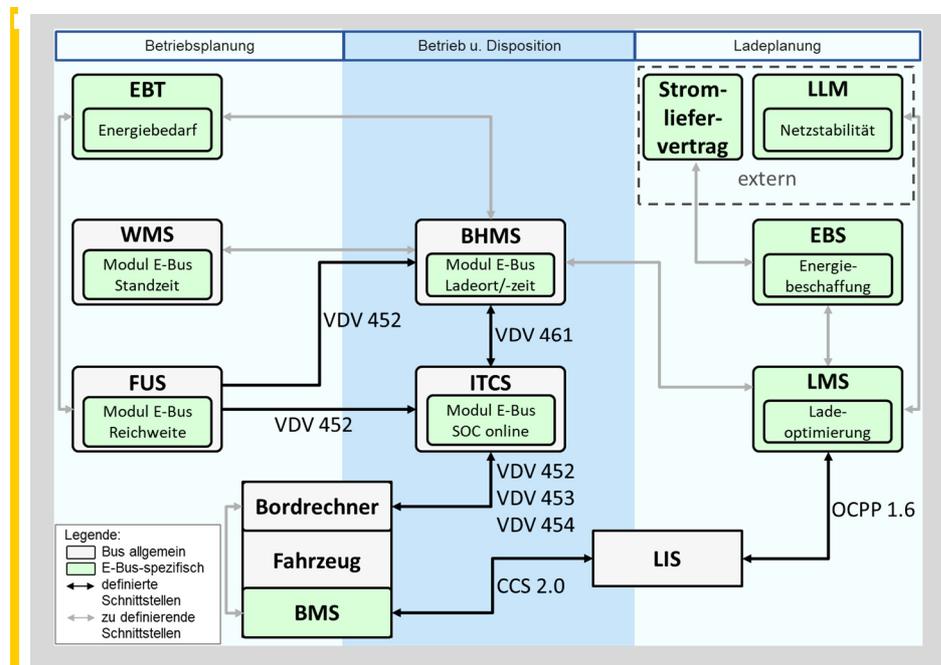


Abbildung 5.4: Systemlandschaft Elektrobusbetrieb

5 Werkstattausrüstung, Mitarbeiterqualifizierung und IT-Systeme

Dabei ist:

- ▶ EBT: Energieberechnungstool
- ▶ WMS: Werkstattmanagementsystem
- ▶ FUS: Fahr- und Umlaufplanungssystem
- ▶ BHMS: Betriebshofmanagementsystem
- ▶ ITCS: Betriebsleitsystem
- ▶ BMS: Batteriemanagementsystem
- ▶ LIS: Ladeinfrastruktur
- ▶ LMS: Lademanagementsystem
- ▶ EBS: Energiebeschaffungssystem
- ▶ LLM: Lokales Lastmanagement

Bezogen auf den Betrieb mit Elektrobussen werden das Lademanagementsystem, das Energiebeschaffungssystem und das Betriebshofmanagementsystem als Kernsysteme betrachtet und deren Funktionen im Folgenden detailliert beschrieben. Die weiteren in Abbildung 5.4 dargestellten IT-Systeme weisen Schnittstellen zu den Kernsystemen auf und sind ebenfalls Elektrobus-spezifisch zu erweitern.

5.4.3 Funktionsbeschreibung der Kernsysteme

5.4.3.1 Lademanagementsystem LMS

Mit wachsender Anzahl der Elektrobusse und damit zunehmender Auslastung der Ladetechnik ist ein Lademanagementsystem (LMS) erforderlich. Es ist davon auszugehen, dass ein Lademanagement zunächst ausschliesslich für betriebshofseitig installierte Ladeinfrastruktur eingesetzt werden muss. Grundsätzlich sollte aber auch eine Integration weiterer Ladepunkte entweder auf der Strecke oder an einem nahen Abstellort möglich sein.

Das LMS steuert und überwacht die Ladeinfrastruktur und optimiert die Nutzung mit Blick auf ihren Wirkungsgrad und ihre Verfügbarkeit, die Betriebsflexibilität und Fahrzeugverfügbarkeit sowie ggf. dem Zustand der Traktionsbatterie.

Kernaufgabe ist dabei die Erstellung eines Ladefahrplans für die Ladung der Elektrobusse. Dieser enthält folgende Informationen in Abhängigkeit

5 Werkstattausrüstung, Mitarbeiterqualifizierung und IT-Systeme

von der Zeit in einem ausreichend genauen Zeitraster für ein ausreichend grosses Zeitfenster:

- ▶ Ladepunktzuordnung der Busse
- ▶ Benötigtes Ladezeitfenster pro Ladepunkt / Bus
- ▶ Verfügbare Ladeleistung pro Ladepunkt / Bus
- ▶ Gesamtladeleistung

Das LMS steuert ausgehend von der Ladeoptimierung die folgenden Vorgänge in der Ladeinfrastruktur:

- ▶ Ladestart initiieren
- ▶ Ladeleistung pro Ladepunkt regeln
- ▶ Ladeunterbrechungen (Pausen) aktivieren
- ▶ Ladestopp auslösen
- ▶ Ladezeitfenster umsetzen

Über die OCPP-Anbindung der Ladegeräte müssen die jeweiligen Befehle ladepunktgenau von der Ladeinfrastruktur umgesetzt werden.

5.4.3.2 Energiebeschaffungssystem EBS

Mit zunehmendem Ausbau der Ladetechnik ist aufgrund der erheblichen Energiemengen neben dem Lademanagementsystem ggf. ein Energiebeschaffungssystem (EBS) einzusetzen. Ob dieses in die Systemlandschaft des Verkehrsbetriebs integriert werden kann und sollte, hängt davon ab, ob die Funktion des EBS bereits ausreichend von der je nach Ausgestaltung des Stromlieferungsvertrages durchzuführenden Energieversorgung des Stromlieferanten abgedeckt wird.

Stromlieferoptionen beinhalten u. a. die flexible Beschaffung auf Basis von Preisprognosen, die das EBS von der Strombörse empfängt. Eine andere Möglichkeit ist die Erstellung einer preisoptimierten Beschaffungskurve durch den Energieversorger auf Basis des Ladefahrplanes, der die gesonderte Preisprognose durch ein Verkehrsbetrieb-eigenes System möglicherweise weniger wirtschaftlich macht. Ein weiteres Modell könnte beispielsweise ein nach oben gedeckelter und nach unten variabler Preis sein, bei dem die Wirtschaftlichkeit der Installation eines eigenen EBS beim Verkehrsbetrieb von der möglichen Preisspanne abhängt. Denkbar ist auch, dass nur ein fester Preis angeboten wird, sodass ein EBS nicht sinnvoll wäre.

5 Werkstattausrüstung, Mitarbeiterqualifizierung und IT-Systeme

Wird zu Grunde gelegt, dass das EBS Teil der Systemlandschaft des Verkehrsbetriebes ist und Börsenstrompreise berücksichtigt, so ist das EBS für die preisoptimierte Strombeschaffung zuständig. Grundlegende Optimierungsgrößen sind hierbei der Leistungspreis, der Arbeitspreis und ggf. die Klimabilanz des genutzten Stroms.

Kernaufgabe ist dabei die Erstellung mehrerer preisoptimierter Ladekurven geordnet nach der Präferenz bzgl. des Kostenvorteils. Die Ladekurve gibt die optimalerweise aus dem Stromnetz zu beziehende Ladeleistung in Abhängigkeit von der Zeit in einem ausreichend genauen Zeitraster für ein ausreichend grosses Zeitfenster an.

5.4.3.3 Betriebshofmanagementsystem BHMS

Hinweis: Zur Abgrenzung von der gängigen Abkürzung für Batteriemanagementsystem *BMS* wird für das Betriebshofmanagementsystem die Abkürzung *BHMS* verwendet.

Im Zuge der Einführung eines Lademanagementsystems ist die Einführung eines zumindest grundlegenden Betriebshofmanagementsystems unabdingbar. Das BHMS übernimmt die Steuerung und Kontrolle der Betriebsabläufe im Betriebshof. Es regelt das Zuordnen von Fahrzeugen und Fahrpersonal auf Umläufe, die Zuweisung zu den Stellplätzen, die Planung der Vorkonditionierung und die Planung von Service- und Werkstattaufenthalten sowie die entsprechende Zuführung zu Service und Werkstatt. Zudem überwacht es über das ITCS dispositionsrelevante Parameter wie die tatsächliche Ein- und Ausfahrzeit der Fahrzeuge und den Ladezustand der Batterie sowohl im Fahrbetrieb als auch auf dem Betriebshof befindlicher Fahrzeuge inkl. der Betriebshofreserve.

Das BHMS verarbeitet in Echtzeit die eingehenden Informationen, gleicht den aktuellen Ist-Zustand mit dem Plan-Zustand ab und optimiert daraus folgend den operativen Einsatz.

Die Ziele eines BHMS umfassen unter anderem:

- ▶ Erhöhung und Sicherstellung der Fahrzeugverfügbarkeit
- ▶ Flexibilität im Störfall
- ▶ Reduktion der Fahrzeugreserve, Fahrtausfälle, Suchzeiten und Rangierfahrten
- ▶ Optimierung und Automatisierung der Prozessabläufe

5 Werkstattausrüstung, Mitarbeiterqualifizierung und IT-Systeme

Mit den Daten aus dem ITCS, dem WMS sowie aus dem FUS erstellt das BHMS die Umlaufzuordnung der Busse. Das zu integrierende E-Bus-Modul ermittelt daraufhin aus den Zustandsdaten der verfügbaren Busse die mögliche Ladepunktzuordnung und das mögliche Ladezeitfenster je Bus und leitet diese Informationen an das LMS weiter. Die mögliche Ladepunktzuordnung soll nicht 1:1 erfolgen, sondern ein Angebot mehrerer Optionen geordnet nach absteigender Flexibilität sein, deren Auswahl durch das LMS unter Berücksichtigung der anderen Einflussgrößen des LMS erfolgt. Das LMS wählt die flexibelste Ladepunktzuordnung als Ausgangspunkt für die iterative Berechnung des Ladefahrplans, final wird ggf. eine weniger flexible Ladepunktzuordnung bestimmt. Auf diese Weise können die in die Berechnung einflussenden Größen aus den anderen Systemen ebenfalls optimal berücksichtigt werden und müssen sich nicht vollständig einer festen Vorgabe aus dem BHMS unterordnen.

Die Ladepunktzuordnung und das Ladezeitfenster korrelieren miteinander, da der Abstellort bis zu einem gewissen Grad auch vorgibt, bis wann ein Fahrzeug dort maximal stehen kann, damit es dahinterstehende Fahrzeuge nicht am Ausfahren hindert, bzw. der Ladepunkt, an dem ein Fahrzeug abgestellt werden kann, abhängig ist vom verfügbaren Ladezeitfenster.

5.4.4 Anforderungen an Beschaffung und Betrieb

Bei der Integration von Elektrobus-spezifischen Systemen sollte möglichst auf standardisierte bzw. standardisierbare Software, Komponenten und Schnittstellen gesetzt werden und keine Insellösung geschaffen werden. Somit können die Kosten für Entwicklung und Wartung gering gehalten, besser von zukünftigen Entwicklungen profitiert und eine möglichst grosse Kompatibilität mit anderen heute und künftig am Markt verfügbaren Systemen gewahrt werden.

Es wird empfohlen, die IT-Systemlandschaft nicht als Gesamtsystem, sondern einzeln zu definieren und zu beschaffen bzw. zu konfigurieren. Hierfür sprechen mehrere Gründe:

- ▶ Die festzulegenden Anforderungen können in der Summe nicht von einem einzelnen Standard-System erfüllt werden bzw. es ist kein derart umfassendes System am Markt verfügbar. Im Gegenzug stehen für die Einzelsysteme erfahrene und spezialisierte Anbieter zur Verfügung. So kann jedes System seinen Teilbereich optimieren und diese Optimierung weitergeben.

5 Werkstattausrüstung, Mitarbeiterqualifizierung und IT-Systeme

- ▶ Durch die Modularität kann jedes System unabhängig auf Veränderungen reagieren bzw. dementsprechend angepasst werden. Die verarbeiteten Informationen behalten die gleiche Struktur und liefern den entsprechenden Output.
- ▶ Abhängig von der gewünschten bzw. erforderlichen Komplexität sind einzelne Systeme hinzuzufügen oder herauszulösen.
- ▶ Die Trennung der Systeme und das Vorsehen eines isolierten oder manuellen Betriebs erhöhen die Betriebssicherheit. Fällt ein Teilsystem durch einen Fehler aus, ist weiterhin ein eingeschränkter Betrieb möglich.
- ▶ Die Aufteilung ermöglicht verschiedene Zeiträume für die Beschaffung und den Ersatz der Teilsysteme. Die Einführung der Systeme kann schrittweise erfolgen, die Komplexität reduziert und aus den Erfahrungen für die weitere Implementierung des Lademanagements gelernt werden.

Gleichwohl bedeutet dies einen erhöhten Aufwand bei der Systemkonfiguration:

- ▶ Es besteht ein hoher Aufwand für die Einrichtung von Schnittstellen zum Datenaustausch. Dieser wird jedoch zwingend von den Systemen gefordert, um die reibungslose Kommunikation zwischen ihnen sicherzustellen. Der kundenspezifische Anpassungsaufwand für den Systemlieferanten beschränkt sich auf die Abstimmung der Systeme untereinander und die Integration der speziellen örtlichen Gegebenheiten (z. B. eingesetzte Ladetechnik und Busse).
- ▶ Es besteht ein hoher Aufwand für die Möglichkeit der Rückkopplung der Optimierung. Die Rückkopplung würde der iterativen Berechnung von Input- und Outputdaten zur Übergabe an den Systemschnittstellen dienen. Auf diese Anforderung sollte ggf. aufgrund der hohen Komplexität und des nicht einschätzbaren Verhältnisses von Nutzen zu Aufwand vorerst verzichtet werden.

Die hier beschriebene Aufteilung der verschiedenen Funktionsbausteine und somit die genaue Ausgestaltung der Software-Lösungen ist nicht als starre Festlegung zu betrachten. Die Priorität liegt darin, mit Blick auf den gesamten Busbetrieb eine abgestimmte Software-Lösung zu schaffen.

5 Werkstattausrüstung, Mitarbeiterqualifizierung und IT-Systeme

Grundsätzlich müssen alle Einzelsysteme unabhängig voneinander betrieben und gegebenenfalls manuell mit Daten versorgt werden können. Dies gilt in der Einführungsphase insbesondere für das Lademanagement, wenn bei dessen Installation die anderen IT-Systeme noch nicht für den Elektrobusbetrieb konfiguriert sind. Gleichfalls gilt dies im Falle von Fehlern oder Ausfällen einzelner oder mehrerer Systeme, die einen zuverlässigen automatisierten Betrieb anderer Systeme verhindern.

Zudem muss jedes System für die Übergangszeit zum vollständig elektrisch betriebenen Busverkehr einen Parallelbetrieb von Diesel- und Elektrobussen ermöglichen.

5.5 FAQ – Werkstattausrüstung, Mitarbeiterqualifizierung und IT-Systeme

Welche grundsätzlichen Anforderungen ergeben sich durch die Einführung von Elektrobussen an die Werkstatt?

Aufgrund der Tatsache, dass sich bei Elektrobussen in grossem Umfang technische Komponenten auf dem Dach befinden, sind mobile Arbeitsbühnen oder stationäre Dacharbeitsstände notwendig. Dazu sind ausreichende zulässige Bodenlasten und insbesondere eine ausreichende Innenhöhe des Werkstattgebäudes von mindestens 8,00 m zu berücksichtigen. Ein beweglicher Deckenkran sowie Gabelstapler und Hubwagen sollten für das bewegen grösserer Lasten auf Dach- und Bodenebene vorhanden sein.

Für die Wartung und Instandhaltung von Elektrobussen sind zudem zusätzliche Werkzeuge und Hilfsmittel sowie bei entsprechendem Ausstattungswunsch auch ein separater HV-Werkstattbereich mit entsprechenden Prüf- und Arbeitsplätzen erforderlich.

Für die bedarfsweise Ladung der Elektrobusse im Werkstattbereich ist der notwendige Stromanschluss sicherzustellen. Hierfür wird in der Regel ein mobiles Ladegerät ausreichen.

Welche Sicherheitsvorkehrungen sind hinsichtlich der Wartung und Instandhaltung zu treffen?

Sind Lagerplätze für Energiespeichersysteme vorgesehen, so sind aufgrund ihrer Klassifizierung als Gefahrgut – insbesondere hinsichtlich der Brandlast – besondere Vorkehrungen am Lagerort zu treffen.

5 Werkstattausrüstung, Mitarbeiterqualifizierung und IT-Systeme

Ausserdem ist für Elektrobusse mit unklarem Schadensbild und nicht auszuschliessender Brandgefahr ein ausreichend grosser und Brandschutztechnisch vom restlichen Betriebshof getrennter Havariestellplatz im Aussenbereich vorzusehen.

Wie ist das Werkstattpersonal auf den Umgang mit der neuen Technologie vorzubereiten?

Für nicht-elektrotechnische Arbeiten an Elektrobussen ist in der Regel eine elektrotechnische Unterweisung ausreichend. Für sämtliche elektrotechnischen Arbeiten im spannungsfreien Zustand und unter Spannung ist eine entsprechende Qualifizierung zur Elektrofachkraft für Hochvolt-Systeme in Kraftfahrzeugen erforderlich. Zudem ist eine ausreichende Anzahl an Mitarbeitenden zur «verantwortlichen Elektrofachkraft» auszubilden, sodass in jeder Schicht Arbeiten am Hochvolt-System unter entsprechender Verantwortung durchgeführt werden können.

Im Übrigen sind grundlegende Unterweisungen im Sinne von Sensibilisierungsschulungen auch für das Fahr- und Reinigungspersonal vorzusehen.

Wie kann die Planung und Steuerung des operativen Betriebs mit Elektrobussen gestaltet und optimiert werden?

Sofern ein Verkehrsbetrieb bereits über spezialisierte Software für den Betrieb mit Dieselmotoren verfügt, ist die IT-Systemlandschaft für den Elektrobusbetrieb anzupassen und zu erweitern. Sind keine derartigen Systeme vorhanden, wird im Zuge der Umstellung grösserer Flotten auf Elektromobilität die Einführung solcher Systeme empfohlen, um die Komplexität des Elektrobusbetriebs, insbesondere der Ladevorgänge und sämtlicher damit zusammenhängender betrieblicher Planungsvorgänge, automatisieren und optimieren zu können.

Welche Systeme sind für die Elektrobus-spezifische Planung und Steuerung einzusetzen?

Ein Lademanagementsystem, das die Planung der Ladevorgänge übernimmt, wird für grössere Elektrobus-Flotten als unabdingbar angesehen und sollte bei Erweiterung oder Aufbau einer IT-Systemarchitektur in diese integriert werden.

5 Werkstattausrüstung, Mitarbeiterqualifizierung und IT-Systeme

Ist der Strombezug auf Basis variabler Strompreise machbar, so kann dafür ein Energiebeschaffungssystem eingesetzt werden, das für die preisoptimierte Strombeschaffung zuständig ist und dem Lademanagementsystem Eingangsdaten für die Erstellung der Ladekurve liefert.

Auf der anderen Seite müssen dem Lademanagement Eingangsdaten aus einem Betriebshofmanagementsystem zur Verfügung gestellt werden. Dieses übernimmt die Prozessoptimierung auf dem Betriebshof und definiert im Wesentlichen die verfügbaren Ladezeitfenster.

Bei der Einführung solcher Systeme ist auf die Einrichtung geeigneter und – soweit verfügbar – standardisierter Schnittstellen zu achten.

6 Ökonomische Bewertung

6.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Eine umfassenden Wirtschaftlichkeitsanalyse dient dazu, die Mehrkosten der Systemumstellung aufzuzeigen und zu bewerten. Auf dieser Basis können die betriebswirtschaftliche Machbarkeit beurteilt und entsprechende Budget- und Finanzierungspläne erstellt werden.

Grundlage für die ökonomische Betrachtung sollte die verfolgte Strategie bzw. Vorzugsvariante sein, aus der sich die für eine Flottenumstellung erforderliche Anzahl und Konfiguration von Fahrzeugen und Ladeinfrastruktur ergibt.

Die Eingangsdaten für die Berechnung sind detailliert festzulegen. Diese umfassen im Wesentlichen Angaben zum Referenzfahrzeug, zum Elektrobus, zu den Betriebskosten, zur Infrastruktur, zur Werkstattausrüstung und zur Personalqualifizierung. Sie werden im folgenden Kapitel detailliert erläutert.

6.2 Datengrundlage

Als Referenzfahrzeug ist der bisherige im Betrieb eingesetzte Bus anzunehmen. Dessen technische Konfiguration bezieht die Antriebsform, die Platzkapazität, das maximal zulässige Gesamtgewicht, das Leergewicht, die Anzahl der Türen und die Form der Heizung und Klimatisierung ein. Die wirtschaftlichen Angaben umfassen den Kaufpreis, die Einsatzzeit, die Abschreibungsdauer und -methode sowie Annahmen zur Kostensteigerung und zum Verkaufserlös nach Ablauf der Einsatzzeit.

Die technischen und kaufmännischen Vorgaben des Verkehrsunternehmens sind, wo sinnvoll und angebracht, auf den Elektrobus zu übertragen. Bestimmte Angaben wie beispielsweise die Kostenentwicklung von Grundfahrzeug und Energiespeicher, zum Verkaufserlös nach Ablauf der Einsatzzeit sowie zur Einsatzzeit und Abschreibungsdauer sind ggf. anzupassen. Da es sich bei Batteriebussen um eine neue Technologie handelt, gibt das Bundesamt für Verkehr (BAV) derzeit eine Abschreibungsdauer von maximal 14 Jahren vor, weshalb auch die Annahme einer Einsatzdauer von 14 Jahren naheliegend ist. Der Fahrzeugspeicher ist in der Regel separat

6 Ökonomische Bewertung

mit einer Einsatz- und Abschreibungsdauer zu bewerten. Zum jetzigen Zeitpunkt wird davon ausgegangen, dass nach 8 Jahren ein Batterietausch erfolgen muss. In diesem Zuge ist zudem ein Retrofit des Grundfahrzeugs denkbar.

Analog zu den Fahrzeugen müssen Abschreibungsdauer und Einsatzzeit sowie der Instandhaltungsaufwand für die erforderliche Ladeinfrastruktur im Betriebshof und auf der Strecke festgelegt werden.

Als Betriebskosten gehen die aktuellen Preise für Betriebsstoffe in Zusammenhang mit den entsprechenden Verbrauchsangaben sowie die Kosten für Instandhaltung, Fahrzeugreserve und Fahrpersonal in die Berechnungen ein. Hinsichtlich des Strompreises sollte statt des aktuellen Preises der zu erwartende Preis bei der entsprechenden Strom-Abnahmemenge nach der Einführung von Elektrobussen verwendet werden. Hier sind aufgrund der hohen Abnahmemengen sowohl Arbeits- als auch Leistungspreis einzubeziehen. Zudem sind, sofern vorhanden, Nacht- und Tagtarife zu unterscheiden. Hinsichtlich des Dieselpreises ist nach heutigem Stand die Rückerstattung der Treibstoffsteuer zu berücksichtigen. Derzeit untersucht der Bundesrat Massnahmen zur Förderung der Umstellung von Dieselbussen auf klimaneutrale Alternativen. Darin wird auch die Treibstoffzollrückerstattung an die konzessionierten Transportunternehmen (KTU) untersucht und geprüft, ob diese ganz oder teilweise abgeschafft werden soll.

Für die Energiepreisentwicklungen sind entsprechende Kostenprognosen auf Basis geeigneter Daten und Studien zu erstellen. Auch eigene Annahmen können sich in einer prozentualen Preissteigerung widerspiegeln. Zur Abschätzung der Entwicklung der Instandhaltungskosten stellt die VDV-Mitteilung 8802 «Instandhaltungssysteme in Omnibus-Betrieben des ÖPNV» (Stand 2007) eine geeignete Grundlage dar, die sich auf den Elektrobuss übertragen lässt.

Die Fahrzeugreserve für den Elektrobuss ist zumindest anfänglich in der Regel höher anzunehmen als für den Dieselbus. Sie lässt sich entweder pauschal angeben oder aus der tatsächlich geplanten absoluten Fahrzeugreserve ableiten.

Hinsichtlich der Werkstattausrüstung und der Personalqualifikation sind der Bestand und die Personalkosten zu erfassen, um den Bedarf und den Aufwand für erforderliche Werkstattertüchtigung und Personalschulungen ermitteln zu können.

6.3 Investitionskosten

Als Investitionskosten sind folgende Kostengruppen mit ihren einzelnen Bestandteilen zu unterscheiden:

- ▶ Kosten Elektrobus
 - ▶▶ Grundfahrzeug
 - ▶▶ Traktionsausrüstung
 - ▶▶ Nebenaggregate
 - ▶▶ Fahrzeugseitige Ladeinfrastruktur
 - ▶▶ Energiespeicher
- ▶ Kosten Ladeinfrastruktur Betriebshof / Strecke
 - ▶▶ Netzkostenbeitrag
 - ▶▶ Übergabestation
 - ▶▶ Erschliessungs- / Anschlusskosten
 - ▶▶ Transformator
 - ▶▶ Kabelbau
 - ▶▶ Ladegeräte
 - ▶▶ Kontaktsystem
 - ▶▶ Baustelleneinrichtung
 - ▶▶ Leitungswegekosten
- ▶ Werkstattausrüstung
 - ▶▶ Dacharbeitsstand
 - ▶▶ Flurfördertechnik
 - ▶▶ HV-Spezialwerkzeug
 - ▶▶ Prüf- und Messgeräte
 - ▶▶ Persönliche Schutzausrüstung
- ▶ Mitarbeiterschulungen
 - ▶▶ Fahrpersonal
 - ▶▶ Werkstattpersonal – HV-Qualifizierung
 - ▶▶ Werkstattpersonal – Sonstige Qualifizierung
- ▶ Sonstige Projektkosten
 - ▶▶ Projektmanagement
 - ▶▶ Planungskosten

Dabei stellen die Kosten für die Fahrzeuge den weitaus grössten Anteil dar. Je nach Ausstattung können die Kosten je Fahrzeug bei bis zu 1 Mio. CHF liegen. Massgeblich sind dabei vor allem Art und Grösse des Energiespeichers. Die spezifischen Kosten für die Batterien reichen derzeit von etwa

6 Ökonomische Bewertung

850 CHF/kWh bis 1600 CHF/kWh. Dabei sind Hochenergiebatterien am unteren Preisniveau und Hochleistungsbatterien am oberen Preisniveau anzusiedeln. Vielfach erhoffte Preissenkungen für Traktionsbatterien sind derzeit noch nicht am Elektrobus-Markt ersichtlich.

Auch die Kosten für die Ladeinfrastruktur können je nach Konzept sehr unterschiedlich ausfallen. Für die Ladung im Betriebshof ist in der Regel eine Ladeinfrastruktur mit geringerer Leistung je Ladepunkt vorzusehen. Als Faustregel können hier Kosten von etwa 100.000 CHF pro Ladepunkt angenommen werden. Wird das Konzept der Gelegenheitsladung verfolgt, entstehen zusätzlich Kosten für die Ladeinfrastruktur im Streckengebiet mit höherer Leistung. Letztere ist im Verhältnis nicht nur aufgrund der höheren Ladeleistung, sondern auch aufgrund der Tatsache, dass kaum Skaleneffekte zu verzeichnen sind, wesentlich teurer. Hier sind Kosten von etwa 500.000 CHF je Ladepunkt realistisch.

Die Kosten für die Werkstattausrüstung richten sich zum einen nach dem Bestand an Ausrüstungsgegenständen und Anlagen und zum anderen nach der angestrebten Wertschöpfungstiefe. Unter der Annahme, dass die benötigte Neuausrüstung vollständig neu beschafft werden muss, ist bei einer Flottengrösse von bis zu 50 Elektrobussen mit Kosten i. H. v. etwa 300.000 CHF zu rechnen. Ggf. sind zudem Kosten für Um- oder Neubauten von Werkstattgebäuden zu berücksichtigen.

Genau wie die Werkstattausrüstung orientieren sich auch die notwendigen Schulungen an Bestand und Bedarf von entsprechenden Fachkräften. Sind keine Kenntnisse im Hochvolt-Bereich vorhanden, ist bei gleicher Flottengrösse von bis zu 50 Bussen von Schulungskosten i. H. v. etwa 130.000 CHF auszugehen.

Die sonstigen Projektkosten für Planung und Projektmanagement sind mit etwa 25 % der Kosten für die Ladeinfrastruktur anzusetzen.

Alle hier angegebenen Investitionskosten sind gültig für den Stand des Jahres 2019.

6.4 Gesamtkostenbetrachtung

In die Gesamtkosten sollten sämtliche Investitionskosten, die erforderliche Erneuerung der Traktionsenergiespeicher in bestimmten Intervallen sowie sämtliche Betriebskosten unter Berücksichtigung der Kosten der Kapitalverzinsung einfließen. Zur Berücksichtigung von Unsicherheiten hinsichtlich

6 Ökonomische Bewertung

der Kostenentwicklungen können mehrere Szenarien gebildet werden. Diese können beispielsweise nach folgendem Schema definiert werden:

- ▶ Best-Case-Szenario: geringe Kostenentwicklung beim Elektrobus und hohe Kostenentwicklung beim Dieselbus
- ▶ Middle-Case-Szenarien a, b und c: abgestufte mittlere Kostenentwicklung beim Elektrobus und mittlere Kostenentwicklung beim Dieselbus
- ▶ Worst-Case-Szenario: hohe Kostenentwicklung beim Elektrobus und geringe Kostenentwicklung beim Dieselbus

Die unterschiedlichen Kostenentwicklungen machen sich im Wesentlichen in den Betriebskosten für Diesel bzw. Strom bemerkbar. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist zudem der Austausch des Energiespeichers nach 8 Jahren.

Es bietet sich eine laufleistungsbezogene Ausweisung der spezifischen Kosten bezogen auf die Einsatzdauer der Fahrzeuge an. Dies bedeutet in aller Regel, dass mit höheren Laufleistungen trotz höherer Betriebskosten eine höhere Kosteneffizienz erreicht wird. Mit den heute zugrunde zu liegenden Investitions- und Betriebskosten fallen bei der Umstellung der Flotte auf ein Elektrobussystem Mehrkosten an. Die Mehrkosten des Elektrobussystems je km können je nach verfolgtem Ladekonzept, Fahrzeugkonfiguration, Fahrzeugmehrbedarf, Infrastrukturkonfiguration und Laufleistung sehr unterschiedlich ausfallen und bei über 1 CHF/km liegen. Bei einer künftigen Treibstoffzollrückerstattung an die KTU würden sich die spezifischen Mehrkosten bedeutend reduzieren, im Falle von BSU und RBS um bis zu 36 %. Je höher die Laufleistung, desto stärker macht sich die Streichung der Rückerstattung in der Berechnung bemerkbar.

Die summierten Gesamtkosten des Elektrobus-Systems über die Einsatzdauer von 14 Jahren werden unter den heutigen zu treffenden Kostenannahmen jene des Dieselbus-Systems nicht unterschreiten. Selbst bei günstigen Voraussetzungen hinsichtlich der Laufleistung, günstiger Systemauslegung und entsprechendem Best Case Szenario kann nicht unterstellt werden, dass innerhalb der Einsatzdauer ein Break-Even-Point erreicht wird. Dies wird nur möglich sein, wenn die Investitionskosten insbesondere für die Traktionsspeicher in naher Zukunft spürbar sinken, die Betriebskosten für den Dieselbus durch steuerliche Anpassungen wie beschrieben deutlich steigen oder die Einsatzdauer der Elektrobusse

6 Ökonomische Bewertung

gegenüber Dieselnissen deutlich verlängert werden kann. Um die finanzielle Belastung für Verkehrsunternehmen zu mindern, können zudem speziell für die Einführung von alternativen Antrieben ausgerichtete Förderprogramme eine Unterstützung sein.

6.5 FAQ – Ökonomische Bewertung

Welche groben Annahmen für die Investitionskosten lassen sich treffen?

Die Fahrzeugkosten schlagen je nach Ausstattung und Fahrzeugtyp mit bis zu 1 Mio. CHF je Fahrzeug zu Buche. Der grösste Kostenfaktor ist dabei der Energiespeicher, dessen spezifische Kosten von etwa 850 CHF/kWh für Hochenergiebatterien bis 1600 CHF/kWh für Hochleistungsbatterien reichen. Hinsichtlich der Ladeinfrastruktur ist für jeden Ladepunkt im Betriebshof etwa 100.000 CHF anzusetzen. Ein Streckenladepunkt ist mit überschlägigen 500.000 CHF wesentlich kostenintensiver.

Wiegen die erwarteten geringeren Betriebskosten des Elektrobus-Systems die hohen Investitionskosten auf?

Unter den heutigen zu treffenden Kostenannahmen werden die über die Einsatzdauer summierten Gesamtkosten des Elektrobus-Systems jene des Dieselnissens nicht unterschreiten. Selbst bei günstigen Voraussetzungen hinsichtlich der Laufleistung, günstiger Systemauslegung und entsprechendem Best Case Szenario kann nicht unterstellt werden, dass innerhalb der Einsatzdauer ein Break-Even-Point erreicht wird.

Welche zukünftigen Entwicklungen sind hinsichtlich der Investitions- und Betriebskosten zu erwarten?

Es ist anzunehmen, dass aufgrund des derzeit sehr angespannten Marktumfelds mit hoher Kapazitätsauslastung auf Seiten der Systemhersteller kurzfristig keine Senkung der Investitionskosten auftreten wird. Mittelfristig sind aufgrund technischer Weiterentwicklungen der Batterietechnologie Kostensenkungen im überschaubaren Rahmen möglich. Aber auch langfristig wird nicht mit grossen Kostensprüngen zu rechnen sein, sofern keine erheblichen technologischen Neuerungen am Markt verfügbar werden.

Die Entwicklung der Betriebskosten hängt zum einen von der marktwirtschaftlichen Entwicklung der Energiepreise ab, zum anderen können

6 Ökonomische Bewertung

politische Entscheidungen, beispielsweise zur Treibstoffsteuer oder kosten-deckenden Einspeisevergütung, massgeblich sein.

Wie können Verkehrsunternehmen den finanziellen Mehraufwand stemmen?

Bedarfsgerecht ausgestaltete Förderprogramme durch Bund und / oder Kantone würden helfen, die finanzielle Belastung für Verkehrsunternehmen zu mindern. Beispielsweise lassen sich prozentuale Förderquoten auf die technologiebedingten Mehrkosten festlegen, sodass öffentliche Hand und Verkehrsunternehmen in angemessenem Verhältnis an den Mehrkosten beteiligt werden.

7 Ökologische Bewertung

7.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Mit der Umstellung von fossil betriebenen Bussystemen auf Elektrobussysteme sind positive ökologische Effekte zu erwarten. Zur Quantifizierung der Treibhausgasreduzierung bietet sich eine lauffleistungsbezogene CO₂-Bilanzierung als Vergleichsdarstellung zwischen der Referenzflotte mit Dieselmotoren auf der einen und der zukünftigen Elektrobus-Flotte auf der anderen Seite an. Dabei sind die Energieverbräuche in folgende Wirkungsketten zu differenzieren:

- ▶ Well-to-Wheel in Zusammenführung der Teilketten
 - ▶▶ Well-to-Tank und
 - ▶▶ Tank-to-Wheel

Bei allen Betrachtungen sind der Energieverbrauch und die Menge an CO₂-Äquivalent (CO₂-e) zu berechnen. Für den Referenzbus sollten zusätzlich die lokalen Schadstoffemissionen von CO, HC, NO_x und Feinstaub (PM) ermittelt und dargestellt werden. Zudem sollten die externen Kosten der Emissionen von CO₂-Äquivalenten und den Luftschadstoffen ausgewiesen werden. Für alle Angaben sind jeweils geeignete Quellen heranzuziehen. Als Grundlage hierfür bieten sich für CO₂, NO_x und PM die Nachhaltigkeitsindikatoren für Strasseninfrastrukturprojekte (NISTRA) an. Für das in NISTRA nicht betrachtete HC und CO sollte auf andere Quellen, ggf. auch aus anderen Ländern, zurückgegriffen werden.

7.2 Treibhausgase

An dieser Stelle ist hervorzuheben, dass die Einführung von Elektromobilität im Allgemeinen und Elektrobussystemen im Speziellen ihre volle Wirkkraft nur entfaltet, wenn der für den Antrieb benötigte Strom vollständig aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen wird. In diesem Falle ist eine fast 100-prozentige Einsparung der CO₂-e-Emissionen möglich – unter der Voraussetzung eines rein elektrischen Betriebs, d. h. ohne fossile Zusatzheizung. In diesem Falle ergeben sich geringfügige Treibhausgasemissionen lediglich durch Verluste in der Energiebereitstellungskette im Stromnetz. Beim Betrieb mit fossiler Zusatzheizung sinkt die Emissions-Einsparung in Abhängigkeit der Anzahl der Heizmonate sowie je nach Leistung und Nutzungsgrad der Heizung erheblich.

7 Ökologische Bewertung

Hier sind vorgegebene und selbstauferlegte Klimaziele gegen den Bedarf an mitzuführendem Energiespeicher oder zu errichtender Ladeinfrastruktur für den vollständig elektrischen Betrieb abzuwägen.

7.3 Lufts Schadstoffe

Auch die durch den Dieselbus entstehenden Lufts Schadstoffe CO, HC, NO_x und PM werden durch die Umstellung auf Elektrobus zu 100 % eingespart – ebenfalls unter der Prämisse, dass keine fossile Zusatzheizung eingesetzt wird.

Auch hier gilt es, das Gemeinwohl durch das Vermeiden von Lufts Schadstoffen ins Verhältnis zu setzen zum Aufwand für Fahrzeug und Ladeinfrastruktur.

7.4 FAQ – Ökologische Bewertung

Wie schneidet der Elektrobus gegenüber dem Dieselbus aus ökologischer Sicht ab?

Bei einem vollständig elektrischen Betrieb ohne fossile Zusatzheizung und einer Stromversorgung aus erneuerbaren Energien lassen sich nahezu 100 % der durch den Dieselbus verursachten Treibhausgas- und Lufts Schadstoffe einsparen.

Welche Faktoren spielen neben den Emissionen noch eine Rolle?

Die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus des Systems einschliesslich Herstellung und Entsorgung von Fahrzeugen und Ladeinfrastruktur vervollständigt die ökologische Bewertung. Eine solche Bewertung ist nach heutigem Stand jedoch mangels standardisierter Verfahrensweisen, einheitlicher Systemgrenzen und zuverlässiger Datengrundlage mit hohen Unsicherheiten behaftet und daher kaum aussagekräftig und belastbar darzustellen.

8 Submission

8.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

In Vorbereitung künftiger Ausschreibungen von Elektrobussen und Ladeinfrastruktur ist jeweils ein geeignetes Lastenheft zu erarbeiten.

Als Grundlage für das Lastenheft Elektrobus können die VDV-Schriften 230 «Rahmenempfehlung für Stadt-Niederflur-Linienbusse» und 230-1 «Rahmenempfehlung für elektrisch betriebene Stadt-Niederflur-Linienbusse» in den jeweils aktuell gültigen Fassungen dienen.

Zudem sollte auf die bisher bestehenden Lastenhefte und technischen Beschreibungen der Bestandsflotte Bezug genommen werden. Neben den spezifischen Anforderungen der Elektrobuskonfiguration sind die bisherigen Auslegungen des Grundfahrzeuges mit den kundenspezifischen Anforderungen zu übernehmen, sofern diese sich mit den elektrobusspezifischen Anforderungen vereinbaren lassen.

Ein wichtiger Bestandteil stellt die Beschreibung des Hochvoltsystems einschliesslich Sicherheitstechnik, Energiespeicher, Ladeschnittstelle, Ladespezifikation und Batteriemanagementsystem dar.

Das Lastenheft Ladeinfrastruktur sollte als funktionale Beschreibung eines herstellerunabhängigen Systems für die Übernachtladung im Betriebshof mit standardisiertem Kontaktsystem sowie standardisierter Ladekommunikation ausgestaltet werden.

In beiden Lastenheften ist auf die Einhaltung aller systemrelevanten Normen (Gesetze, Richtlinien, Verordnungen) zu achten, also insbesondere solcher, die den Betrieb und die Sicherheit von Elektrobussen beeinflussen.

8.2 Lastenheft Elektrobus

Um neuen Anforderungen zu begegnen, die sich bei der Beschaffung von Elektrobussen ergeben, soll im Folgenden beschrieben werden, auf welche Belange beim Elektrobus gesondert geachtet werden muss. Dies betrifft vor allem Komponenten, die vorher in einem Dieselbus nicht verbaut wurden, insbesondere die Antriebstechnik und weitere Hochvoltkomponenten.

8.2.1 Motoren, Antrieb und Bremse

Durch die Fahrmotoren wird der Vortrieb des Fahrzeuges gesichert. Hier sollte beschrieben werden, welche Antriebsleistung an den Treibrädern abgefordert wird, um erforderliche, parametrierbare Beschleunigungswerte bei allen verschiedenen Besetzungsgraden und Steigungen und eine definierte Endgeschwindigkeit zu erreichen. Die Vorteile, die sich durch den Einsatz von elektrischen Motoren ergeben, wie rückfreie und geräuschärmere Fahrt, sollen auch in dem zu beschaffenden Fahrzeug zutreffen. Dahingehend ist die Wirkungskette im Fahrzeug vom Batteriespeicher bis zum Treibrad anzufordern. Auch sollten die Anforderungen hinsichtlich des zu erwartenden Wartungsaufwands berücksichtigt werden. Hier sollten sich deutliche Vorteile gegenüber dem Dieselmotor ergeben.

Für den Einbauort der Fahrmotoren sind drei Optionen gegeben: Zentralmotor, radnaher Motor und integrierter Radnabenmotor. Diese Optionen sind hinsichtlich des Wirkungsgrades im Antriebsstrang, der Wartungsfreundlichkeit, der Einbindung in den Heizkreislauf des Fahrzeuges und den Lärm- und Vibrationseintrag in das Fahrzeug zu bewerten.

Da die Motoren Teil des Bremssystems sind, ist sicherzustellen, dass die hohen Sicherheitsanforderungen an das Bremssystem erfüllt werden. Zudem sollte das Bremskonzept so gestaltet werden, dass der Rekuperationsanteil beim Bremsen möglichst hoch ist. Dies kann u. a. dadurch erreicht werden, dass Hilfsbetriebe und Nebenaggregate darin integriert werden.

8.2.2 Energieverbrauch und Reichweite

Der Energieverbrauch für die Traktion ist nach dem standardisierten Verfahren nach SORT anzugeben. Der Energiebedarf für das Heizen und Klimatisieren ist in Abhängigkeit der Aussentemperatur und dem gewünschten Klimatisierungskonzept (Voll- / Teilklimatisierung) anzugeben. So kann eine Vergleichbarkeit unter den Angeboten hergestellt werden. Alternativ ist eine garantierte Reichweite im Worst Case unter zu nennenden Bedingungen anzugeben. Nach Wunsch des Verkehrsbetriebs können die angegebenen Werte bei der Inbetriebnahme mittels Fahrversuchen überprüft werden.

8.2.3 Heizung und Klimatisierung

Das Heizungs- und Klimatisierungskonzept hat einen hohen Einfluss auf den Gesamtenergieverbrauch des Busses. Daher ist darauf zu achten, dass die Heizung und Klimatisierung bedarfsgerecht gestaltet werden. Der Energiebedarf sollte möglichst gering sein. Es ist mitunter in Betracht zu ziehen, bei sehr tiefen Aussentemperaturen mit einer fossilen Heizung zu arbeiten.

Die Heizung sollte zudem so ausgelegt werden, dass eine Vorkonditionierung des Fahrzeuges ermöglicht wird. Dabei wird die erforderliche Energie über die externe Ladeinfrastruktur bezogen.

8.2.4 Hochvolttechnik

8.2.4.1 Sicherheit

Beim Betrieb und auch während der Wartung steht die Sicherheit von Mitarbeitenden und Fahrgästen im Vordergrund. Es sind alle erforderlichen Massnahmen umzusetzen, die zu einem entsprechenden Sicherheitsniveau führen. Dazu zählen insbesondere der Schutz vor Berühren von spannungsführenden Teilen, Überwachung der Komponenten und sichere Abschaltung der Batterie bei Fehlfunktionen. Eine Grundforderung ist, sämtliche Hochvoltkomponenten eindeutig zu kennzeichnen (orange). Zudem ist an einer zentralen Stelle ein Notfallplan zu hinterlegen, mit der Rettungskräfte befähigt werden, das Hochvoltsystem bei Havarien und Unfällen sicher auszuschalten.

Das Hochvoltsystem muss auch vom Fahrpersonal abgeschaltet werden können. Dazu sind normale Schalter und ein Not-Aus-Schalter anzubringen. Der Not-Aus-Schalter soll nur das Hochvoltsystem ausschalten und ist gegen unbeabsichtigtes Auslösen zu sichern.

8.2.4.2 Leistungselektronische Bauteile

Zu allen leistungselektronischen Bauteilen sind grundlegende Informationen hinsichtlich den Leistungsdaten des Herstellers, der Montage, der Wartung und weitere Daten anzufordern. Die Komponenten sollten möglichst wartungsarm sein und bei Bedarf einfach auszutauschen, ggf. auch durch andere Komponenten, die mindestens die gleiche Funktionalität und Sicherheit bieten. Bei der Unterbringung der Komponenten auf dem Fahrzeugdach ist darauf zu achten, dass diese gut zugänglich sind und auch

nur von einer Person zu warten sind. Auch darf kein Wasser beim Öffnen von Wartungsklappen eindringen.

Die Antriebsumrichter sind optimal auf die zu speisenden Fahrmotoren auszurichten. Sie sollten auch in der Lage sein, bei ausgefallener Kühlung ein Fahren mit geringer Geschwindigkeit zum Räumen von Kreuzungen oder Gefahrenstellen zu erlauben. Sollte die Lebensdauer der Fahrmotoren die Lebensdauer der Antriebsumrichter übersteigen, so ist ein einfacher Austausch der Antriebsumrichter vorzusehen, bei Bedarf auch mit anderen, ähnlichen Bauteilen.

8.2.4.3 Energiespeicher

Die Batterie ist so auszulegen, dass der geplante Betrieb des Elektrobusses optimal absolviert werden kann. Die betrifft vor allem die Anzahl der geplanten Ladezyklen, den nutzbaren Speicherinhalt insbesondere beim Erreichen des Endes der Lebensdauer, sowie das Gesamtgewicht der Batterie inkl. Gehäuse und Batteriemanagementsystem. Für das Speichersystem ist anzugeben, welche kleinste Einheit im Bedarfsfall auszutauschen ist (Zellen, Module). Das Batteriemanagementsystem sorgt dafür, dass der sichere Betrieb der Batterie zu jeder Zeit gewährleistet ist.

8.2.4.4 Energiezuführung

Es ist festzulegen, auf welche Art und Weise der Elektrobus über die Ladeinfrastruktur mit Energie versorgt werden soll. Standardmässig ist mindestens ein Anschluss für die Ladung mittels Ladekabel (CCS, Combo 2) vorzusehen. Bei Bedarf ist eine weitere Aufnahme (Stecker) auf der anderen Fahrzeugseite hilfreich, so kann die Ladeinfrastruktur flexibler gestaltet werden.

Optional kann die Energieversorgung auch über ein System mit Pantograph erfolgen. Dieser ist entweder auf dem Fahrzeug oder an der Ladeinfrastruktur vorzusehen. Es ist nach verschiedenen Gesichtspunkten abzuwägen, welches System zum Einsatz kommen soll. Das Fahrzeug betreffend sind vor allem Belange des Platzbedarfes auf dem Dach sowie die zusätzliche Masse zu berücksichtigen.

Die Position des Pantographen bzw. des entsprechenden Kontakts beim wegseitigen Pantographen sollte in der gesamten Fahrzeugflotte einheitlich sein, nur so kann eine einheitliche Abstimmung in der Einstellhalle erreicht werden.

Der Ladevorgang muss ohne Überwachung des Personals und auch bei abgezogenem Zündschlüssel möglich sein.

8.2.5 Energiemanagement

Ein Energiemanagement innerhalb des Elektrobusses soll dafür sorgen, dass die verfügbare Energie der Batterie so effizient wie möglich eingesetzt wird. Im Vordergrund steht immer der sichere Betrieb des Fahrzeugs. Durch eine intelligente Steuerung ist der Anteil der beim Bremsen gewonnenen Energie (Rekuperation) so hoch wie möglich zu gestalten. So sollten beim Rekuperieren möglichst die Versorgung der Hilfs- und Nebenaggregate, danach die Ladung der Batterie priorisiert werden. Ein Umwandeln der Energie im Bremswiderstand sollte dabei die Ausnahme bilden. Auch ist eine georeferenzierte Ansteuerung der Hilfs- und Nebenaggregate denkbar. Beispielsweise werden diese priorisiert betrieben, wenn längere Fahrten bergab anstehen, um die anfallende Bremsenergie zu nutzen.

8.3 Lastenheft Ladeinfrastruktur

Die Ladeinfrastruktur soll so beschaffen sein, dass die Elektrobusse bequem an ihrem Abstellort geladen werden können. Dazu sind u. a. die Anforderungen hinsichtlich Aufbau, Integration, Ladeleistung, Kontaktsystem, Kommunikation, Bedienung und Wartung zu beschreiben.

8.3.1 Allgemeine Anforderungen

Die Ladeinfrastruktur muss eine vom Bushersteller unabhängige Nachladung der Energiespeicher, sowie die Vorkonditionierung der Elektrobusse ermöglichen. Es müssen zahlreiche vor allem internationale Normen eingehalten werden. Trotz detaillierter Vorgaben können Schnittstellenprobleme auftreten. Um diesen entgegenzutreten, ist eine aktive Mitarbeit des Ladeinfrastrukturherstellers sowie des Busherstellers notwendig. In diesem Zusammenhang sollten auch die Modalitäten hinsichtlich Zulassung, Inbetriebnahme und Abnahme geklärt werden. So ist eine endgültige Abnahme der Ladeinfrastruktur nur im Zusammenspiel mit den zu beschaffenden Elektrobussen vorzusehen.

8.3.2 Leistungsparmeter

Um eine flexible und bedarfsgerechte Ladung der Elektrobusse zu garantieren, ist die Ladeleistung an den Ladepunkten anzugeben. Sie sollte so ausgelegt sein, dass die Batteriespeicher in einer angemessenen Zeit nachgeladen werden können. Die Ladeleistung sollte auch regelbar sein, um bei Bedarf und zur Schonung der Batterien mit einer geringen Ladeleistung zu operieren.

Über den gesamten Leistungsbereich sollte ein möglichst hoher Wirkungsgrad erreicht werden, dies gilt insbesondere im Teillastbereich. Zudem ist es wichtig, die gesamte Wirkungsgradkette vom Netzanschlusspunkt bis zur Kontaktierung zum Elektrobus zu betrachten.

8.3.3 Kommunikation

Einige Kommunikationsstrecken sind bereits in Standards beschrieben. So sollte die Kommunikation zwischen dem Elektrobus und dem Ladegerät der Norm SN EN ISO 15118 folgen. Je nach Kontaktsystem ist zusätzlich der Übertragungsweg zu beschreiben, dieser kann als Power Line Communication (PLC) oder als drahtlose Verbindung ausgeführt werden.

Die Kommunikation zwischen den Ladegeräten und dem übergeordneten Backendsystem erfolgt über den Standard OCPP (1.6 oder höher). Wichtig ist es zudem, die Schnittstellen zwischen verschiedenen Kommunikationsstandards und –wegen zu beschreiben, sodass dort auftretende Probleme minimiert werden können. Ein Ausfall des Backendsystems sollte nicht zum Ausfall der Ladetechnik führen. An jedem Ladepunkt sollte dann mindestens eine geminderte Ladeleistung zur Verfügung stehen.

Über die Kommunikationsleitungen sollte es möglich sein, die Komponenten über eine Ferndiagnose zu überwachen und ggf. zu steuern. Zu klären ist, welchen Personen Zugriff zu gewähren ist und ob diese einen zeitlich beschränkten oder dauerhaften Zugriff besitzen. Es ist abzustimmen, welche Betriebs- und Störmeldungen erfasst werden und in welcher Form sie aufbereitet, abgerufen und gespeichert werden können.

8.3.4 Betriebszustände und Ladeablauf

In den Betriebszuständen sollte beschrieben werden, welche Funktionen in welchen Zuständen auszuführen sind und wie der Übergang zwischen den

Zuständen gestaltet werden soll. Über ein geeignetes Anzeigemedium (Display, Leuchtmelder, o. ä.) ist der aktuelle Betriebszustand des Ladegeräts für den Ladepunkt eindeutig zu kennzeichnen. Folgende Betriebszustände sind denkbar:

- ▶ Ausgeschaltet (dunkel)
- ▶ Ruhezustand (grün)
- ▶ Ladebereitschaft (grün pulsierend)
- ▶ Ladevorgang (laufend: blau pulsierend, beendet: blau)
- ▶ Störung (rot)
- ▶ Not-Aus (rot)

Der Ladeablauf ist so zu gestalten, dass der Nutzer wenige Bedienhandlungen ausführen muss. So sollte der Ladevorgang nach erfolgreicher Kontaktierung automatisch starten bzw. die Ladebereitschaft hergestellt werden, falls der eigentliche Ladevorgang erst später starten soll. Für einen störungsfreien Ladeablauf werden nur die Betriebszustände Ruhezustand, Ladebereitschaft und Ladevorgang genutzt. Im Störfall sollte sich die Ladetechnik selbständig zurücksetzen, sodass ein manuelles Eingreifen unterbunden wird.

An geeigneten Stellen sind Not-Aus-Schalter anzubringen, die im Bedarfsfall Teile oder die gesamte Ladeinfrastruktur ausschalten (Betriebszustand Not-Aus).

8.3.5 Mobile Ladegeräte

Zum Laden der Elektrobusse in der Werkstatt und zu Test- und Prüfzwecken ist mindestens ein mobiles Ladegerät für die Werkstatt vorzusehen. Die Ladeleistung kann geringer als die der stationären Ladetechnik sein. Die Ladung erfolgt zweckmässig über das Plug-In-System. Das mobile Ladegerät kann an verschiedenen Plätzen in der Werkstatt eingesetzt werden, der Anschluss erfolgt in der Regel über eine CEE-Dose an das 400 V-Drehstromnetz.

8.3.6 Bauliche Gestaltung

Die baulichen Gegebenheiten der Busgarage bzw. der Einstellhalle sind zu beschreiben, damit die Ladeinfrastruktur in die bestehenden Strukturen optimal integriert werden kann. Dies kann zu grösseren Abstimmungsbedarfen führen, da das Platzangebot auf bestehenden Anlagen meist begrenzt ist.

Durch die Integration der Ladeinfrastruktur sollten möglichst keine (zusätzlichen) Einschränkungen in der freizügigen Befahrung des Geländes resultieren. Es ergibt sich daraus, dass die Ladeinfrastruktur einen möglichst geringen Platzbedarf besitzen sollte. Sind zur Kontaktierung Pantographen vorgesehen, so ist die Statik der Bestandshalle zu überprüfen, um die zusätzlichen Lasten abzutragen. Können keine gesicherten Aussagen getroffen werden, so ist im Zweifel eine Traverse einzuziehen.

Generell sollten alle Komponenten leicht zugänglich sein, um im Bedarfsfall schnelle Zugriffszeiten zu ermöglichen.

Es sind alle notwendigen Sicherheitseinrichtungen, wie eine Erdungsanlage, Isolationsüberwachung, Schutzgeräte, etc. zu berücksichtigen. Der Zugriff auf die Ladetechnik ist durch geeignete Massnahmen nur berechtigten Personen zu gestatten.

8.4 FAQ – Submission

Welche neuen Punkte sind in einem Lastenheft für Elektrobusse aufzunehmen?

Alle Hochvoltkomponenten sind als Neuerung gegenüber dem Dieselbus zu verstehen. Diese sollten somit auch in das Lastenheft eingearbeitet werden. Dies sind insbesondere die Fahrmotoren, der Energiespeicher, die Antriebsstromrichter und weitere Hilfsbetriebe.

Wie kann die Reichweite in das Lastenheft eingearbeitet werden?

Um einen vergleichbaren und praxistauglichen Wert für die Reichweite des zu beschaffenden Elektrobusses zu erhalten, sollten mehrere Daten abgefordert werden. Zunächst wird die Information hinsichtlich des Energieverbrauches benötigt. Dieser ist entsprechend der SORT-Zyklen anzugeben. Zusätzlich ist ein Verbrauchswert für Heizen und Kühlen des Busses in Abhängigkeit der Aussentemperatur notwendig. Mithilfe des anzugebenden Wertes für den am Ende der Lebensdauer nutzbaren Energiespeicherinhalt lässt sich die Reichweite bestimmen.

Alternativ kann eine Mindestreichweite unter genau zu definierenden Umständen gefordert werden.

Welche allgemeinen Anforderungen sind an die Ladeinfrastruktur zu stellen?

Alle Komponenten der Ladeinfrastruktur sind sicher und zuverlässig zu betreiben. Die Ladeinfrastruktur sollte in der Lage sein, herstellerunabhängig Elektrobusse zu laden. Die Ladeinfrastruktur sollte einfach zu handhaben sein.

Was ist unter Ladeablauf zu verstehen?

Im Ladeablauf wird definiert, welche Betriebszustände die Ladegeräte aufweisen sollen und wie zwischen diesen Zuständen gewechselt werden soll. Der Ladevorgang sollte nach erfolgreicher Kontaktierung möglichst automatisch starten, eventuell auftretende Fehler sind zu melden bzw. per Fernwartung zu beheben.

Wofür wird ein mobiles Ladegerät benötigt?

Ein mobiles Ladegerät wird zu Lade- und Testzwecken von Elektrobussen in der Werkstatt an verschiedenen Plätzen gebraucht. Dabei ist eine geringe Ladeleistung ausreichend, da das Vollladen der Batterie in der Abstellung erfolgen sollte.

Wie kann die Ladeinfrastruktur in die Busgarage integriert werden?

Dazu bedarf es detaillierter Planungen. Jedoch können in einem Submissionsverfahren grundlegende Werte wie Abmessungen und Masse abgefragt werden. Diese Werte helfen, einen Platzbedarf sowie ggf. statische Berechnungen in den Planungen zu berücksichtigen.