

Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie

## **Machbarkeit eines Hybridoberleitungsbus- betriebs – „Berlin-Spandau“**

### **Fraunhofer-Institut für System- und Innovations- forschung (ISI)**

Breslauer Str. 48  
76139 Karlsruhe, Germany  
<http://www.isi.fraunhofer.de>

Dr. Michael Krail  
Phone: +49 721 6809 429  
Fax: +49 721 77 6809 135  
[michael.krail@isi.fraunhofer.de](mailto:michael.krail@isi.fraunhofer.de)

### **IFB Institut für Bahntechnik GmbH**

Wiener Str. 114-116  
01219 Dresden, Germany  
<http://www.bahntechnik.de>

Dr.-Ing. Sven Körner  
Phone: +49 351 877 59 52  
Fax: +49 351 877 59 90  
[sk@bahntechnik.de](mailto:sk@bahntechnik.de)

### **PTV Transport Consult GmbH**

Stumpfstr. 1  
76131 Karlsruhe, Germany  
<http://www.consult.ptvgroup.com>

Dipl.-Kauffrau Petra Strauß  
Phone: +49 721 9651 221  
Fax: +49 721 9651 692  
[petra.strauss@ptvgroup.com](mailto:petra.strauss@ptvgroup.com)

### **Technische Universität Dresden Professur für Elektrische Bahnen**

01062 Dresden, Germany  
<http://www.e-vs.de>

Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan  
Phone: +49 351 463 36 730  
Fax: +49 351 463 36 829  
[arnd.stephan@tu-dresden.de](mailto:arnd.stephan@tu-dresden.de)



---

## **Autorinnen und Autoren**

### **Fraunhofer ISI**

Dr.-Ing. Michael Krail

Dr. Till Gnann

Dr.-Ing. Simon Funke

### **IFB Institut für Bahntechnik GmbH**

Dr.-Ing. Sven Körner

Dipl.-Ing. Eckert Fritz

Dipl.-Ing. André Müller

Dipl.-Ing. Holger Neumann

Dipl.-Ing. Felix Bartels

Dipl.-Ing. Martin Steude

Dipl.-Ing. Maximilian Franke

B.-Eng. Jens Elger

Dipl.-Phys. Manja Balsler

Dr.-Ing. Jochen Hietzge

### **PTV Transport Consult GmbH**

Dipl.-Kauffrau Petra Strauß

Dipl.-Ing. Heike Schäuble

M.Sc. Carola Hocke

### **TU Dresden – Professur für Elektrische Bahnen**

Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan

Richard Kayser MSc

---

## Versionsübersicht

Revision	Autor	Datum	Änderungen
-	IFB	27.04.2019	Entwurf
-	PTV	06.05.2019	Integration Kapitel 5.1.2, 7.4 – 7.4.5, Kapitel 8
-	IFB+PTV	08.05.2019	Vorentwurf
-	IFB+PTV	22.05.2019	Entwurf
0	IFB+PTV	02.07.2019	Release

Zu diesem Bericht gehören szenariospezifische Anlagen wie in Kapitel 10.3 erläutert.

Die Simulationswerkzeuge wurden in folgenden Versionen verwendet:

- OpenPowerNet: 1.8.0
- OpenTrack: 1.9.1 (2018-05-10)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>1 Zusammenfassung.....</b>	<b>11</b>
<b>2 Aufgabenstellung, Zielsetzung und Vorgehen .....</b>	<b>15</b>
<b>3 Grundlagen .....</b>	<b>17</b>
3.1 <i>Allgemeine Einführung.....</i>	17
3.2 <i>Fahrzeuge.....</i>	18
3.2.1 Betrieb mit dem Dieselbus .....	19
3.2.2 Technischer Hintergrund von Elektro-Bus-Systemen .....	22
3.2.3 Oberleitungsbus .....	26
3.2.4 Hybridoberleitungsbus (Streckenlader) .....	28
3.2.5 Elektrobusse mit punktueller, automatisierter Nachladung .....	30
3.2.6 Gefäßgrößen .....	34
3.3 <i>Elektrische Energiespeicher.....</i>	35
3.3.1 Kenngrößen von Akkumulatoren.....	35
3.3.2 Speichertechnologie für Traktionsanwendungen .....	38
3.4 <i>Elektrische Infrastruktur .....</i>	51
3.4.1 Grundaufbau.....	51
3.4.2 Wahl des Spannungssystems .....	51
3.4.3 Unterwerke .....	52
3.4.4 Konfiguration des Fahrleitungsnetzes .....	53
3.4.5 Isolationsfehler und Erdung.....	55
3.4.6 Fahrleitung und Stromabnehmer.....	57
3.4.7 Infrastruktur im Betriebshof .....	72
3.5 <i>Grundlagen der Betriebssimulation und der elektrischen     Netzberechnung .....</i>	76
3.5.1 Prinzip.....	76
3.5.2 Simulationssystem OpenTrack und OpenPowerNet.....	76
3.5.3 Grundlagen der Fahrdynamik.....	81
3.6 <i>Vorgehensweise technische Machbarkeit .....</i>	83
3.7 <i>Technische Bewertungskriterien der elektrischen Infrastruktur.....</i>	85
3.7.1 Spannungshaltung.....	85
3.7.2 Kurzschlusserkennbarkeit und Unterscheidung von Kurzschluss- und Betriebsströmen .....	86
3.7.3 Belastung der stationären elektrotechnischen Anlagen .....	87
3.7.4 Elektromagnetische Verträglichkeit.....	88

3.7.5	Energiebedarfsermittlung .....	90
3.8	<i>Übersicht über den Stand von Obus und HObus</i> .....	91
3.8.1	Ausgewählte Beispiele für Obusnetze.....	91
3.8.2	Übersicht der Hersteller.....	101
<b>4</b>	<b>Technische Machbarkeit.....</b>	<b>104</b>
4.1	<i>Eingangsdaten der Simulation</i> .....	104
4.1.1	Infrastruktur .....	104
4.1.2	Betriebskonzept.....	106
4.1.3	Fahrplanmodell.....	114
4.1.4	Eingangsdaten Fahrzeugkonfiguration.....	117
4.1.5	Speicherkonfiguration.....	120
4.2	<i>Elektrische Netzinfrastuktur</i> .....	126
4.2.1	Unterwerke und Anschluss an die Strecke .....	126
4.2.2	Oberleitung, Kupplungsleitungen und Verstärkungsleitungen .....	128
4.3	<i>Entwickelte Szenarien</i> .....	129
4.3.1	Vorgehen .....	129
4.3.2	Szenario A - Gesamtnetz und hoher Elektrifizierungsgrad .....	130
4.3.3	Szenario B - Gesamtnetz mit reduzierter Elektrifizierung .....	133
4.3.4	Szenario C - Betrieblich reduziertes Netz mit reduzierter Elektrifizierung .....	136
4.4	<i>Szenariospezifische Ergebnisse</i> .....	139
4.4.1	Resultierende Netzkonfiguration .....	139
4.4.2	Spannungshaltung.....	139
4.4.3	Dimensionierung der Gleichrichtereinheiten .....	141
4.4.4	Belastung der elektrischen Leiter .....	142
4.4.5	Kurzschlusserkennbarkeit .....	146
4.4.6	Batteriebezogene Ergebnisse .....	148
4.4.7	Energiebedarf .....	149
4.5	<i>Betriebshof</i> .....	152
4.5.1	Allgemeines .....	152
4.5.2	Nachladekonzept für den Betriebshof Spandau.....	152
4.5.3	Flächenbedarf.....	153
4.5.4	E-Umstellung der Werkstatt .....	159
4.5.5	Qualifizierung des Personals.....	160
4.5.6	Abschleppkonzept .....	162
<b>5</b>	<b>Einführung des Systems .....</b>	<b>163</b>
<b>6</b>	<b>Wirtschaftlichkeit .....</b>	<b>168</b>
6.1	<i>Technische Mengengerüste</i> .....	168
6.1.1	Flottengröße .....	168
6.1.2	Anlagen- und Mengengerüste Infrastruktur.....	169
6.2	<i>Einzelkostenwerte und Betriebskosten</i> .....	173
6.2.1	Investitionen für Fahrzeuge.....	173

6.2.2	Investitionen der Infrastruktur .....	173
6.2.3	Betriebskostenschätzung .....	176
6.3	<i>Szenariospezifische Investitionen</i> .....	179
6.3.1	Zusammenfassung der Szenarien .....	179
6.3.2	Szenario A .....	179
6.3.3	Szenario B .....	180
6.3.4	Szenario C .....	181
6.3.5	Hochlaufszenario .....	181
6.4	<i>Wirtschaftlichkeitsuntersuchung</i> .....	183
6.4.1	Untersuchungsfälle .....	183
6.4.2	Ergänzende Kennziffern Hybridoberleitungsbus .....	184
6.4.3	Vergleichsfall Diesel- und Elektrofahrzeuge .....	186
6.4.4	Life Cycle Cost Analyse .....	192
<b>7</b>	<b>Nachhaltigkeit</b> .....	<b>204</b>
7.1	<i>Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>eq)</i> .....	205
7.2	<i>NO<sub>x</sub> Bilanz</i> .....	209
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>211</b>
<b>9</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>221</b>
9.1	<i>Glossar</i> .....	221
9.2	<i>Gesetze, Verordnungen und Normen</i> .....	224
<b>10</b>	<b>Anlage A –Technische Machbarkeit</b> .....	<b>227</b>
10.1	<i>Darstellung der modellierten Abschnitte und Haltestellenpositionen</i> .....	227
10.2	<i>Darstellung der Oberleitungsbereiche, Positionen der Gleichrichterunterwerke und Nennparameter der Gleichrichtereinheiten</i> .....	257
10.2.1	Szenario A .....	257
10.2.2	Szenario B .....	274
10.2.3	Szenario C .....	290
10.3	<i>Bezeichnung der Ergebnisse der elektrischen Netzberechnung in den Anlagen</i> .....	302

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: spezifische Annuität in Cent / Platz-km.....	13
Abbildung 3-1: Prinzip des Traktionskreises von Obussen .....	23
Abbildung 3-2: Prinzip des Traktionskreises von HObussen (Obus mit Energiespeicher) .....	24
Abbildung 3-3: Prinzip des Ladestellers für den Energiespeicher.....	24
Abbildung 3-4: Prinzip der Energieübertragung beim Obus ohne fahrleitungsfreie Abschnitte, eigene Darstellung, nach [76].....	27
Abbildung 3-5: Prinzip der Energieübertragung beim HOBus mit abschnittsweise Fahrleitungsfreien Abschnitten, eigene Darstellung, nach [76] .....	29
Abbildung 3-6: Prinzip der Energieübertragung Elektrobus mit punktueller automatisierter Nachladung, eigene Darstellung, nach [76] .....	31
Abbildung 3-7: Ragone Diagramm für Traktionsspeicher .....	39
Abbildung 3-8: Ruhespannungsverläufe verschiedener Speichertechnologien, nach [82] [84].....	41
Abbildung 3-9: Kapazitätserhalt in Abhängigkeit der Entladungsrate verschiedener Speichertechnologien, nach [82] [84] [83].....	42
Abbildung 3-10: Vergleich der Aufladekurven von LTO und LFP, nach [82] .....	43
Abbildung 3-11: Vergleich der Lade- und Entladewiderstandsverläufe von LFP und LTO, nach [82].....	45
Abbildung 3-12: Verlauf der maximalen Entladeleistungen mit Hilfe eines Hybrid Pulse Power Test, nach [82] .....	46
Abbildung 3-13: Vergleich der maximalen Aufladeleistungen, nach [82] .....	47
Abbildung 3-14: Vergleich der maximalen Aufladeleistungen der Li-Speicher, nach [82] .....	47
Abbildung 3-15: Vergleich der spezifischen Entladeleistungen bei 50% SoC, nach [82] .....	48
Abbildung 3-16: Vergleich der spezifischen Aufladeleistungen bei 50% SoC, nach [82] .....	48
Abbildung 3-17: Vergleich der spezifischen Energien, nach [82] [82].....	49
Abbildung 3-18: vergleichende Gegenüberstellung verschiedener Traktionsspeicher, nach [81] [83] .....	50
Abbildung 3-19: Prinzipielle Struktur eines Gleichrichter-Unterwerks.....	52
Abbildung 3-20: Gegenüberstellung von einseitiger Speisung und zweiseitiger Speisung, oben prinzipielle Anordnung, unten Spannung über Weg bei Konstantstrom über der Strecke.....	54
Abbildung 3-21: Üblicherweise gewählte Konfiguration der Fahrleitung mit Streckentrennung vor dem Unterwerk, zweiseitiger Speisung und Querkupplung. Optional ist die Parallelführung der Verstärkungsleitung(en). Alle Linien sind zweipolig (Plus/Minus) zu verstehen. ....	55
Abbildung 3-22: Prinzipieller Aufbau der Pendelaufhängung bei einer Obus-Fahrleitung, [65].....	60
Abbildung 3-23: Einfachfahrleitung mit Beiseil, [65] .....	61
Abbildung 3-24: Stromabnehmerkopf.....	62
Abbildung 3-25: Vergleich der Höhenverhältnisse der Fahrleitung.....	65
Abbildung 3-26: Demonstrator der Westsächsischen Hochschule Zwickau.....	69
Abbildung 3-27: Anwendungsbeispiel Siemens Trolley Truck .....	70

Abbildung 3-28: Siemens-Teststrecke auf einem ehemaligen Flugplatz in Brandenburg. ....	71
Abbildung 3-29: Gekoppelte Simulation mit OpenTrack und OpenPowerNet.....	78
Abbildung 3-30: Auslegung elektrischer Anlagen mit zeitgewichteten Belastungsdauerkurven: – links: überdimensioniert (bzw. Dimensionierung mit Reserve), – Mitte: exakte Bemessung auf den Anwendungsfall (keine Reserve), – rechts: unterdimensioniert. ....	80
Abbildung 3-31: Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm und Fahrwiderstände .....	81
Abbildung 3-32: Hybridoberleitungsbus der BBG [52].....	94
Abbildung 3-33: Fahrzeug Esslingen, Solaris/Kiepe Trollino 18,75 Metrostyle [31] .....	96
Abbildung 3-34: Fahrzeug BOB in Solingen [34].....	98
Abbildung 3-35: Yangtse Hybridoberleitungsbus Marrakesh im Batteriemodus [35].....	100
Abbildung 3-36: Darstellung des SwissTrolley plus im Einsatz in Zürich [49].....	101
Abbildung 4-1: Übersicht Gesamtnetz HObus Berlin Spandau in blau, perspektivische Straßenbahntrasse in orange, Bildquelle: Google Earth.....	104
Abbildung 4-2: Ausschnitt Geschwindigkeitsverlauf Linie M37 .....	105
Abbildung 4-3: Linienwege der planungsrelevanten BVG-Linien.....	108
Abbildung 4-4: Tagesbelastung je Streckenabschnitt 2025 .....	110
Abbildung 4-5: Ergebnisse der Dimensionierung .....	111
Abbildung 4-6: Beispiel Umlaufplanung .....	112
Abbildung 4-7: Umlaufplanung für die Linie N34.....	114
Abbildung 4-8: Übersicht mit der maximalen Busanzahl je Tag und der Anzahl der Busse in der betrieblichen Spitzenstunde .....	116
Abbildung 4-9: Prinzipdarstellung Leistungsfluss im Fahrzeugmodell Simulation .....	117
Abbildung 4-10: Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm beider simulierter Bustypen sowie deren Fahrwiderstände für Ebene und 20 ‰ Steigung.....	119
Abbildung 4-11: Ermittlung der notwendigen Laderate und des benötigten Fahrleitungsüberspannten Folgeabschnitts, nach [85] – Verlauf für 1 C.....	124
Abbildung 4-12 Ermittlung der notwendigen Laderate und des benötigten Fahrleitungs- überspannten Folgeabschnitts, nach [85] – Verlauf für 2 C.....	125
Abbildung 4-13: Prinzipdarstellung der Unterwerks- und Fahrleitungsmodellierung in der Simulation.....	127
Abbildung 4-14: Übersichtsplan Szenario A.....	131
Abbildung 4-15: Übersicht Bereiche verschiedener Mastkonfigurationen, Szenario A.....	132
Abbildung 4-16: Übersichtsplan Szenario B.....	134
Abbildung 4-17: Übersicht Bereiche verschiedener Mastkonfigurationen, Szenario B.....	135
Abbildung 4-18: Übersichtsplan Szenario C.....	137
Abbildung 4-19: Übersicht Bereiche verschiedener Mastkonfigurationen, Szenario C.....	138
Abbildung 4-20: Übersichtsschaltplan Szenario A, AB 03 (Teil 1) und AB 04 (Teil 1) .....	139
Abbildung 4-21: Beispieldarstellung der minimalen Spannung am Stromabnehmer, Szenario B, Spitzenlast, Ausfall UW 55 Zeppelinstr. (Seegefelder Str.), AB 04 (Teil 3).....	140
Abbildung 4-22: Maximaler Strom, 300s und 900s Effektivwert im Fahrdraht, Szenario B, Spitzenlast, Ausfall UW 55 Zeppelinstr. (Seegefelder Str.), AB 04 (Teil 6) .....	143

Abbildung 4-23:Maximaler Strom, 300s und 900s Effektivwert im Verstärkungsleiter, Szenario B, Spitzenlast, Ausfall UW 55 Zeppelinstr. (Seegefelder Str.), AB 04 (Teil 6) .....	144
Abbildung 4-24:Fahrdrahtbelastung ggü. Belastbarkeit .....	145
Abbildung 4-25:Beispiel zur Vorgehensweise bei der Überprüfung der Kurzschlusserkennbarkeit .....	147
Abbildung 4-26:Ermittlung der Abmessungen des Betriebshof Berlin Spandau .....	153
Abbildung 4-27:Betriebshof Spandau, vereinfachte Darstellung .....	154
Abbildung 4-28:Schleppkurve Doppelgelenkbus (Länge: 24,70m) im Maßstab 1:500, nach [101].....	155
Abbildung 4-29:Parallelabstellung des geplanten Fuhrparks für die Simulations-Szenarien A und B.....	158
Abbildung 4-30:Parallelabstellung des restlichen Fuhrparks der Szenarien A und B auf dem angrenzenden Supermarktgelände (Abriss Gebäude) .....	158
Abbildung 4-31:Parallelabstellung des geplanten Fuhrparks für die Simulations-Szenario C .....	159
Abbildung 4-32:Qualifizierung für Arbeiten mit HV-Bussen (eigene Darstellung nach [73]) .....	162
Abbildung 5-1: Linienverlauf der Linie M32 .....	163
Abbildung 5-2: Schematische Darstellung des Anhörungsablaufs .....	167
Abbildung 10-1:Belastung der Gleichrichter vs. Belastbarkeit nach DIN EN 50328, $I_{Bd} =$ 500 A (Belastbarkeitsklassen VI und VII).....	271
Abbildung 10-2:Belastung der Gleichrichter vs. Belastbarkeit nach DIN EN 50328, $I_{Bd} =$ 750 A (Belastbarkeitsklasse VI) und 500 A (VII) .....	271
Abbildung 10-3:Belastung der Gleichrichter vs. Belastbarkeit nach DIN EN 50328, $I_{Bd} =$ 750 A (Belastbarkeitsklassen VI und VII).....	272
Abbildung 10-4:Belastung der Gleichrichter vs. Belastbarkeit nach DIN EN 50328, $I_{Bd} =$ 1000 A (Belastbarkeitsklasse VI) und 750 A (VII) .....	272
Abbildung 10-5:Belastung der Gleichrichter vs. Belastbarkeit nach DIN EN 50328, $I_{Bd} =$ 1000 A (Belastbarkeitsklassen VI und VII).....	273
Abbildung 10-6:Belastung der Gleichrichter vs. Belastbarkeit nach DIN EN 50328, $I_{Bd} =$ 1500 A (Belastbarkeitsklassen VI und VII).....	273
Abbildung 10-7:Belastung der Gleichrichter vs. Belastbarkeit nach DIN EN 50328, $I_{Bd} =$ 500 A (Belastbarkeitsklassen VI und VII).....	287
Abbildung 10-8:Belastung der Gleichrichter vs. Belastbarkeit nach DIN EN 50328, $I_{Bd} =$ 750 A (Belastbarkeitsklasse VI) und 500 A (VII) .....	287
Abbildung 10-9 Belastung der Gleichrichter vs. Belastbarkeit nach DIN EN 50328, $I_{Bd} =$ 750 A (Belastbarkeitsklassen VI und VII).....	288
Abbildung 10-10: Belastung der Gleichrichter vs. Belastbarkeit nach DIN EN 50328, $I_{Bd} = 1000$ A (Belastbarkeitsklasse VI) und 750 A (VII) .....	288
Abbildung 10-11: Belastung der Gleichrichter vs. Belastbarkeit nach DIN EN 50328, $I_{Bd} = 1000$ A (Belastbarkeitsklassen VI und VII) .....	289
Abbildung 10-12: Belastung der Gleichrichter vs. Belastbarkeit nach DIN EN 50328, $I_{Bd} = 1500$ A (Belastbarkeitsklasse VI) und 1000 A (VII) .....	289
Abbildung 10-13: Belastung der Gleichrichter vs. Belastbarkeit nach DIN EN 50328, $I_{Bd} = 1000$ A (Belastbarkeitsklassen VI und VII) .....	290

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Vor- und Nachteile von Dieselbus- und Diesel-Hybridbus-Systemen, nach [76].....	21
Tabelle 3-2:	Vergleich von Asynchron- und permanentenerregter Synchronmaschine, nach [78].....	22
Tabelle 3-3:	Physikalischer Wirkungsgrad von Energieerzeugungssystemen, nach [76] .....	25
Tabelle 3-4:	Effizienz unterschiedlicher Freileitungsanlagen, nach [76] .....	25
Tabelle 3-5:	Vor- und Nachteile von Oberleitungsbussen mit ausschließlicher Versorgung aus der Fahrleitung, nach [76].....	28
Tabelle 3-6:	Vor- und Nachteile von Oberleitungsbussen mit abschnittsweiser Nachladung unter Fahrdraht, nach [75] .....	30
Tabelle 3-7:	Vor- und Nachteile von Elektrobussen mit punktueller, automatisierter Nachladung, nach [76] .....	32
Tabelle 3-8:	Platzkapazitäten für verschiedene Bussysteme (nach [14], [15], [17]) .....	34
Tabelle 3-9:	Nennspannungen häufig verwendeter Zelltypen .....	36
Tabelle 3-10:	Vergleich von Traktionsspeichertechnologien, nach [76], [83].....	39
Tabelle 3-11:	Eigenschaften unterschiedlicher Li-Ionen-Batterien, nach [83] .....	50
Tabelle 3-12:	Auszug aus EN 50163 (Tabelle 1) mit den für Obus-Systeme üblichen Nennspannungen und deren Toleranzgrenzen. An der unteren Toleranzgrenze wird bei diesen beiden Nennspannungen nicht zwischen Dauer- und Kurzzeitwerten unterschieden.....	52
Tabelle 3-13:	Maße von Fahrleitungs- und Drehpunkthöhen über Straßenoberfläche in mm.....	65
Tabelle 3-14:	Zulässiger Toleranzbereich der Fahrleitungsspannung nach EN 50163 für Nennspannung 750 V DC .....	85
Tabelle 3-15:	Überschlagswerte spezifischer Energieverbrauch .....	90
Tabelle 3-16:	Zahl der Oberleitungsbusse (Fahrzeuge) in der EU [29] .....	91
Tabelle 3-17:	Zahl der Hybridoberleitungsbusse (Fahrzeuge) in der EU [129] .....	92
Tabelle 3-18:	Übersicht Fahrzeuge Eberswalde [47] .....	93
Tabelle 3-19:	Kenndaten des elektrischen Systems für den Hybridoberleitungsbus [47].....	93
Tabelle 3-20:	Fahrzeugtechnische Kenndaten Solaris/Kiepe Trollino 18,75 Metrostyle [31], [28] .....	96
Tabelle 3-21:	Fahrzeugtechnische Kenndaten BOB Solingen [34], [50], [45] .....	98
Tabelle 3-22:	Ausgelieferte bzw. bestellte HO-Elektrobusse von Kiepe Electric mit IMC®-Technologie [32].....	102
Tabelle 4-1:	planungsrelevante BVG-Linien der Machbarkeitsuntersuchung des Batterieoberleitungsbusses .....	107
Tabelle 4-2:	Fahrzeugbedarf und betriebliche Kenngrößen für das ÖV-Angebot 2030 .....	113
Tabelle 4-3:	Technische Daten der in der Simulation verwendeten Busse (Speicherdaten siehe Kapitel 4.1.5) .....	118
Tabelle 4-4:	Konfigurationsmöglichkeiten von Batteriesystem, nach [83].....	120
Tabelle 4-5:	Eigenschaften von Lithium-Speichern eines Herstellers.....	122

Tabelle 4-6:	Daten der verwendeten elektrischen Leiter .....	128
Tabelle 4-7:	Kategorien der Gleichrichter und Transformatoren.....	141
Tabelle 4-8:	Belastbarkeit der Fahrdrähte und Verstärkungskabel.....	144
Tabelle 4-9:	SoC-Varianz der einzelnen Szenarien .....	148
Tabelle 4-10:	prognostizierte Lebensdauer der verwendeten Batterien pro Linie .....	148
Tabelle 4-11:	Hilfsbetriebeleistungen .....	150
Tabelle 4-12:	Energiebedarfe der Szenarien .....	150
Tabelle 5-1:	Fahrzeugbedarf und betriebliche Kenngrößen der Linie M32 .....	164
Tabelle 5-2:	Fahrleitungslängen, Anzahl Maste und Fundamente für das HochlaufszENARIO (Endzustand Szenario B oder Szenario C) .....	164
Tabelle 5-3:	Anzahl Unterwerke, Ladeeinrichtungen, Schalter und Kabellängen für das HochlaufszENARIO (Endzustand Szenario B oder Szenario C) .....	165
Tabelle 6-1:	Linien-spezifische Busflotte, Szenarien A, B und C .....	168
Tabelle 6-2:	Gesamtbusflotten der Szenarien A, B und C .....	169
Tabelle 6-3:	Fahrleitungslängen, Anzahl Maste und Fundamente .....	170
Tabelle 6-4:	Anzahl Unterwerke, Ladeeinrichtungen, Schalter und Kabellängen.....	172
Tabelle 6-5:	Einzelkostenschätzung für Busse und Batterien.....	173
Tabelle 6-6:	Investitionsschätzung für Fahrleitung, Energieversorgung, Grunderwerb und Zusatzkosten .....	175
Tabelle 6-7:	Basis der Betriebskostenschätzung der Hobusse .....	177
Tabelle 6-8:	Investitionen der untersuchten Szenarien.....	179
Tabelle 6-9:	Platzkapazität der Fahrzeugtypen der Hybridoberleitungsbusse .....	184
Tabelle 6-10:	Nutzungsdauer der Hybridoberleitungsbusse .....	185
Tabelle 6-11:	Fahrzeugbedarf Diesel- und Elektrobus.....	186
Tabelle 6-12:	Platzkapazität Diesel- und Elektrobus.....	187
Tabelle 6-13:	Nutzungsdauer Diesel- und Elektrobus.....	187
Tabelle 6-14:	Investitionen Dieselbus .....	188
Tabelle 6-15:	Investitionen Elektrobus .....	188
Tabelle 6-16:	Jährliche Kosten Betrieb - Dieselbus .....	189
Tabelle 6-17:	Jährliche Kosten Betrieb & Infrastruktur - Elektrobus .....	190
Tabelle 6-18:	Jährliche Kosten Betrieb & Infrastruktur – Hybridoberleitungsbus .....	191
Tabelle 6-19:	LCC-Analyse – Investitionskosten .....	192
Tabelle 6-20:	LCC-Analyse - Investitionskosten Szenario C .....	194
Tabelle 6-21:	LCC-Analyse - jährlich anfallende Kosten.....	195
Tabelle 6-22:	LCC-Analyse - jährlich anfallende Kosten Szenario C.....	196
Tabelle 6-23:	LCC-Analyse - Kapitalwert & Annuität .....	199
Tabelle 6-24:	LCC-Analyse - Kapitalwert & Annuität Szenario C .....	200
Tabelle 6-25:	LCC-Analyse - Sensitivitätsbetrachtungen .....	201
Tabelle 6-26:	Wesentliche Ergebnisse Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	203
Tabelle 7-1:	CO <sub>2</sub> -eq Emissionsraten .....	205

Tabelle 7-2:	Umweltwirkungen Treibhausgasemissionen (CO <sub>2</sub> eq) .....	207
Tabelle 7-3:	Umweltwirkungen Treibhausgasemissionen (CO <sub>2</sub> eq) - Szenario C .....	208
Tabelle 7-4:	NO <sub>x</sub> Bilanz Dieselbus .....	210
Tabelle 9-1:	Übersicht relevanter Normen .....	224
Tabelle 10-1:	Netzunterteilung in Abschnitte (AB) .....	227
Tabelle 10-2:	Kilometersprünge innerhalb der Abschnitte .....	231
Tabelle 10-3:	Verbindungen der Abschnitte (AB).....	232
Tabelle 10-4:	Lage der Haltestellen in den Abschnitten (AB) sowie Haltestellenkürzel .....	236
Tabelle 10-5:	Oberleitungsbereiche innerhalb der Abschnitte, Szenario A .....	257
Tabelle 10-6:	Bereiche mit Verstärkungsleitungen innerhalb der AB, Szenario A.....	260
Tabelle 10-7:	Bereiche mit doppelter Fahrdrachtführung innerhalb der AB .....	262
Tabelle 10-8:	Lage der Unterwerke, Positionierung der Speise- bzw. Rückleiterkabelanschlüsse und Kabellänge, Szenario A.....	262
Tabelle 10-9:	Maximaler Betriebsstrom, Effektiver Betriebsstrom, Verhältnis beider Ströme und Nennwerte der Gleichrichtereinheiten, Szenario A .....	266
Tabelle 10-10:	Oberleitungsbereiche innerhalb der Abschnitte, Szenario B .....	274
Tabelle 10-11:	Bereiche mit Verstärkungsleitungen innerhalb der AB, Szenario B.....	277
Tabelle 10-12:	Lage der Unterwerke, Positionierung der Speise- bzw. Rückleiterkabelanschlüsse und Kabellänge, Szenario B.....	279
Tabelle 10-13:	Maximaler Betriebsstrom, Effektiver Betriebsstrom, Verhältnis beider Ströme und Nennwerte der Gleichrichtereinheiten, Szenario B .....	283
Tabelle 10-14:	Oberleitungsbereiche innerhalb der Abschnitte, Szenario C .....	290
Tabelle 10-15:	Bereiche mit Verstärkungsleitungen innerhalb der AB, Szenario C .....	293
Tabelle 10-16:	Lage der Unterwerke, Positionierung der Speise- bzw. Rückleiterkabelanschlüsse und Kabellänge, Szenario C.....	294
Tabelle 10-17:	Maximaler Betriebsstrom, Effektiver Betriebsstrom, Verhältnis beider Ströme und Nennwerte der Gleichrichtereinheiten, Szenario C .....	298
Tabelle 10-18:	Kennzeichnung der Anlagen: Szenarien.....	303
Tabelle 10-19:	Kennzeichnung der Anlagen: Simulationsspezifische Ergebnisse .....	303
Tabelle 10-20:	Liste der Simulationen für Szenario A.....	304
Tabelle 10-21:	Liste der Simulationen für Szenario B.....	304
Tabelle 10-22:	Liste der Simulationen für Szenario C.....	305



# 1 Zusammenfassung

Der ÖPNV in Berlin soll entsprechend der Vorgaben des 2018 verabschiedeten Berliner Mobilitätsgesetzes **bis 2030 lokal emissionsfrei** verkehren. Um dieses Ziel zu erreichen werden verschiedene Lösungsansätze und Technologiealternativen in Betracht gezogen. Es geht darum festzustellen, welche Technologien angesichts der hohen Leistungsanforderungen im Berliner ÖPNV technisch machbar sind. Gleichzeitig müssen die Konzepte geeignet sein, den Transformationsprozess möglichst effizient und wirtschaftlich und bereits bis 2030 umzusetzen. Die für die BVG und den Senat Berlin durchgeführte Studie zur Prüfung und Beurteilung der **technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit eines Hybridoberleitungsbussystems für Berlin Spandau** ist dabei ein wichtiger Baustein in diesem laufenden Transformationsprozess. Die Studie wurde im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie des Bundes durch das BMVI gefördert.

Der Hybridoberleitungsbus (HObus, **Streckenlader**) vereint die betriebserprobte und zuverlässige Technik von konventionellen Oberleitungsbussen mit moderner Batteriespeichertechnologie. Er ermöglicht auf diese Weise einen **leistungsfähigen und verlässlichen Betrieb** ohne Einschränkungen, insbesondere für Linien mit hohem Passagieraufkommen und langen Umläufen. Durch den Einsatz eines Energiespeichers an Bord der Fahrzeuge können Abzweige, Kreuzungen oder Streckenabschnitte, wo eine Elektrifizierung aufwändig oder aus ästhetischen Gründen unerwünscht ist, fahrleitungsfrei ausgeführt werden. Dadurch werden Freiräume für eine stadtverträgliche und technisch flexible Gestaltung der elektrischen Netzinfrastruktur geschaffen. Zudem ergeben sich im Betrieb zusätzliche Freiheitsgrade, sodass beispielsweise Baustellen umfahren werden können.

Die Möglichkeiten eines HObusnetzes wurden am Beispiel von Berlin Spandau untersucht. Spandau hat ein großes Omnibusnetz mit stark gebündelten Linien und dichten Takten. Die Fahrgastnachfrage ist hoch, erfordert damit hohe Kapazitäten und wächst kontinuierlich. Der Omnibusbetriebshof liegt in zentraler Lage. Die Voraussetzungen zum Aufbau eines HObusnetzes sind deshalb günstig.

Für das untersuchte Netz mit einer Länge von ca. 235 km und 14 berücksichtigten Buslinien wurden für den Einsatz von bis zu **187 HObussen (Gelenk- und Doppelgelenkbusse)** verschiedene Szenarien für die Konfiguration der elektrischen Fahrzeuge mit Energiespeichern und die Ausgestaltung und Dimensionierung der elektrischen DC 750 V Netzinfrastruktur erarbeitet. Wesentliches Ergebnis der Studie ist, dass ein HObussystem für Spandau **technisch machbar und wirtschaftlich** ist.

Basierend auf einem Szenario A, das als Ausgangsszenario einen hohen Fahrleitungsanteil hat, wurde ein Szenario B mit einem minimierten Fahrleitungsanteil iterativ entwickelt. In einem dritten Szenario C wurde die gemäß Berliner Nahverkehrsplan 2019-2023 und

ÖPNV-Bedarfsplan des Landes vorgesehene Implementierung einer Straßenbahn in Berlin-Spandau in Form eines reduzierten Betriebsprogramms für den HOBus berücksichtigt. Einzelne Buslinien wurden dabei als durch die Straßenbahn substituiert angenommen.

Ein wesentliches Ergebnis der technischen Untersuchung ist, dass der notwendige **Fahrleitungsanteil für die zur Realisierung empfohlenen Varianten zwischen 63% (Szenario B) und 54% (Szenario C)** der jeweiligen betrieblichen Netzlänge liegt. Die Investitionen in die Infrastruktur belaufen sich auf rund 121 Mio. € im Szenario B und 95 Mio. € im Szenario C.

Auf Basis der Ergebnisse der technischen Machbarkeit wurde eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt. Hierzu wurden für die Szenarien des HOBusystems die Investitionen und die laufenden Betriebskosten über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren ermittelt. Diese wurden mit den Betriebskosten eines konventionellen Dieselbusbetriebs und anderer möglicher Elektrobus-Technologievarianten (Depotladung und Gelegenheitsladung an den Endstellen (Endstellenladung)) verglichen. Die dafür notwendigen wirtschaftlichen Kenngrößen für Dieselbusse sowie Depot- und Gelegenheitslader wurden von der BVG für diese Studie bereitgestellt.

Im Vergleich der **Erstinvestitionen** (Summe aus Infrastruktur und Fahrzeuge) liegt der HOBus (Gesamtnetz, Szenario B) mit rund 310 Mio. € etwa 50 % über denen des Depot- und Gelegenheitsladers (rund 200 Mio. €).

Im Ergebnis der **Gesamtkostenbetrachtung**, d. h. der projektspezifischen Lebenszykluskostenrechnung (Investitionen und Betriebskosten über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren) sind die auf den **Platzkilometer bezogenen Annuitäten** (siehe Abbildung 1-1) der verschiedenen HOBuszenarien in vergleichbarer Höhe und trotz höheren Erstinvestitionen niedriger als bei den Elektrobusen in der Ausführung als Depot- und Gelegenheitslader (zwischen 10 % bis zu 20 %). Wesentliche Gründe dafür liegen im geringeren Fahrzeugbedarf und einem geringeren Betriebsaufwand des HOBusses, da durch das Nachladen unter der Fahrleitung während der Fahrt keine zusätzlichen Ladezeiten an den Endstellen oder im Depot erforderlich sind. Zudem fallen bei den Depot- und Gelegenheitsladern wegen der größeren erforderlichen Batterien höhere Kosten beim Auswechseln an (Lebensdauer der Batterien: ca. 6 Jahre).

Darüber hinaus ermöglicht das HOBusssystem den **Einsatz von Doppelgelenkbussen**, wodurch eine Beförderungsleistung erreicht werden kann, die vergleichbar ist mit einem Straßenbahnsystem. In der Machbarkeitsstudie und in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde der Einsatz von Doppelgelenkbussen auf einzelnen Linien für den HOBus unterstellt.

Dadurch ergibt sich eine **niedrigere Annuität pro angebotenem Platz-km<sup>1</sup>** und eine **höhere Wirtschaftlichkeit**.

Aus wirtschaftlicher Sicht ist der HOBus damit für die untersuchte Verkehrsleistung im Betrachtungsgebiet gut geeignet und auch vor dem Hintergrund der höheren Erstinvestitionen langfristig eine Alternative zu anderen E-Bus-Technologien, mit dem zusätzlichen Vorteil der Implementierbarkeit von großen Gefäßen (z. B. Doppelgelenkbusse).

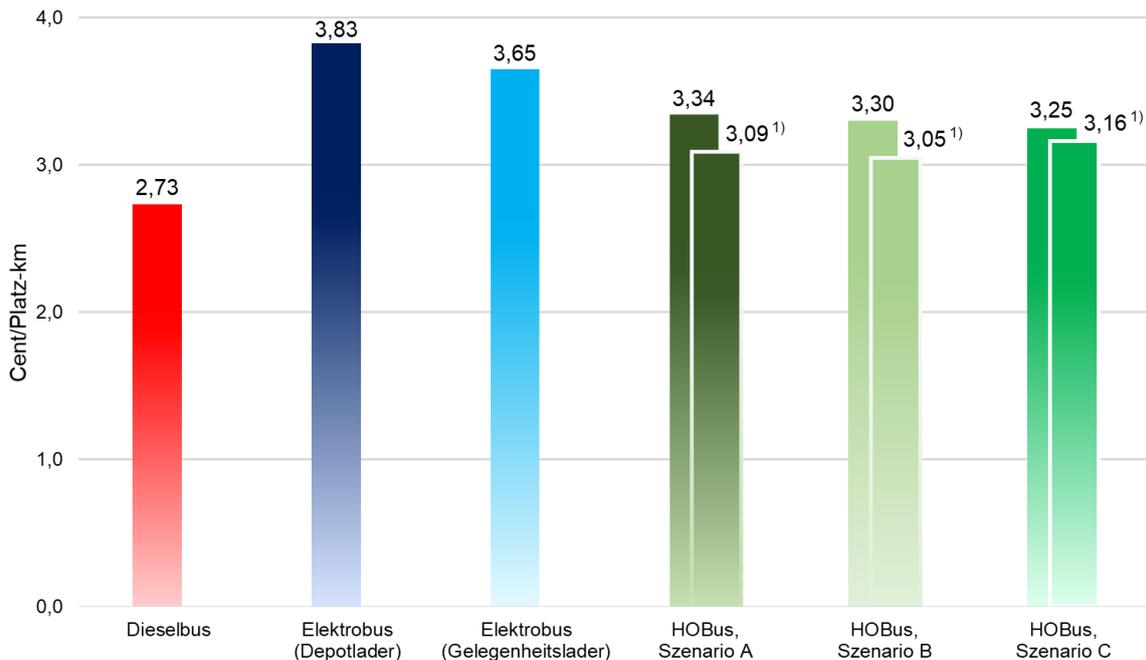


Abbildung 1-1: spezifische Annuität in Cent / Platz-km

In der **ökologischen Bilanz** hat der HOBus im Gegensatz zu den gemäß klimapolitischer Ziele zu substituierenden Dieselnissen deutliche Vorteile im Hinblick auf die Reduzierung der Treibhausgase, insbesondere bei einem steigenden Energieangebot aus regenerativen Energiequellen. Auch im Vergleich mit Depot- und Gelegenheitslader zeigt der HOBus eine günstigere Bilanz (durch kleinere Batteriegrößen). Stickoxide werden nur vom Dieselbus emittiert, elektrische Busse fahren lokal emissionsfrei. Bei einer Umstellung von Diesel- auf elektrischen Betrieb wird darüber hinaus die Lärmbelastung entlang des Busnetzes sinken.

Erste Erfahrungen bei der Projektrealisierung und für den Betrieb sollen im Konsens von BVG und Senatsverwaltung zunächst mit der Linie M32 (**HochlaufszENARIO**) gesammelt

<sup>1</sup> Die Berechnung der Platz-km für Doppelgelenkbusse erfolgte mit 130 Plätzen/Bus. Bei Annahme von 4 Personen/m<sup>2</sup> für die Stehplatzflächen des Fahrzeugs (analog zu den Gefäßgrößen der Vergleichsvarianten) ergibt sich eine Kapazität von 156 Personen für einen Doppelgelenkbus. Daraus resultieren spezifische Annuitäten für die HOBus-Szenarien A/B/C von: 3,09 / 3,05 / 3,16 ct / Platz-km.

werden. Der zeitliche Horizont für die Planung und Realisierung kann im Rahmen der Entwurfs- und Genehmigungsplanung konkret abgeschätzt werden. Die Dauer für die Realisierung des Projektes ist derzeit durch die notwendige Planfeststellung schwer abschätzbar, insbesondere durch die Unkalkulierbarkeit der Einsprüche im Rahmen eines Planfeststellungsverfahrens. Aufgrund der geringeren erforderlichen Eingriffe in den Straßenraum und ggf. bestehende Rechte Dritter ist jedoch von einem im Vergleich zu Schienenprojekten kürzeren Zeitraum auszugehen.

Die Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit eines **kleineren HObusnetzes (Szenario C), das ergänzend zu einem unterstellten Straßenbahnsystem in Spandau** verkehrt, zeigen vergleichbare wirtschaftliche Kenngrößen, sodass auch eine parallele Entwicklung beider Systeme wirtschaftlich und verkehrlich sinnvoll möglich ist. Es wird empfohlen, über die Einführung eines Straßenbahnsystems im Untersuchungsgebiet, wie im Nahverkehrsplan Berlin 2019-2023 vorgesehen, aufgrund der längeren Planungs- und Realisierungshorizonte im Vergleich zu einem HObussystem bedarfsorientiert zeitnah zu entscheiden und so die Grundlage zur Festlegung für eines der erarbeiteten Szenarien zu legen.

Die **Implementierung eines HObusses in Spandau steht nicht in Konkurrenz zu den Straßenbahnplanungen** im aktuellen Nahverkehrsplan des Landes Berlin. Vielmehr ist der HObus eine „schnellere“ Antwort auf die perspektivisch hohe Verkehrsnachfrage. Prinzipiell ist es möglich Unterwerksstandorte und die elektrische Unterwerksausrüstung des HObussystems für zukünftige Straßenbahnprojekte zu nutzen.

Die erzielten Resultate sind sowohl **politische als auch wirtschaftliche Entscheidungsgrundlage** und Basis für die folgenden Planungsschritte der Entwurfs- und Genehmigungsplanung.

Die Studie zeigt, dass der HObus einen wesentlichen Beitrag zum Klimaziel und zur Luftreinhaltung leisten kann. Für den Einsatz in Berlin Spandau wurden die technische Machbarkeit und die langfristig erreichbare Wirtschaftlichkeit nachgewiesen. Es wird davon ausgegangen, dass die erzielten Erkenntnisse auf **weitere mögliche Einsatzgebiete unter vergleichbaren Rahmenbedingungen in Berlin** übertragen werden können und der HObus auch dort eine sinnvolle Alternative auf dem Weg zu einem lokal emissionsfreien ÖPNV in Berlin sein kann.

## 2 Aufgabenstellung, Zielsetzung und Vorgehen

Die Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) stehen vor der Aufgabe, die Verwendung fossiler Energieträger im Öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) aus Gründen der Emissionsreduzierung (Kohlendioxid, Stickoxide, Feinstaub, Lärm u.Ä.) einzuschränken. Im Schienenverkehr ist dies durch elektrische Antriebe bereits gegeben. Der Busverkehr beruht zu einem hohen Anteil auf Dieselmotoren. Die BVG strebt daher in Ergänzung zu den bereits bestehenden elektrisch angetriebenen Verkehrsmitteln an, auch den Busverkehr emissionsfrei zu gestalten.

Der Obus-Verkehr mit rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen und zweipoliger Fahrleitung ist zwar seit rund 100 Jahren bewährt, geriet aber aufgrund der Spurbindung (eingeschränkte betriebliche Flexibilität) und durch höhere Fahrzeugbeschaffungskosten sowie preiswerte Dieselmotoren seit den 1960er Jahren gegenüber reinen Dieselnissen aus dem Fokus potenzieller Einsatzszenarien. Mit Einbeziehung der Umweltbilanz wird der Obus wieder zunehmend positiv bewertet, doch die betriebliche Flexibilität und Reichweite des fahrleitungsunabhängigen Fahrzeugs soll erhalten bleiben. Elektrobusse mit Depotladung sind jedoch in der Reichweite begrenzt und als Gelegenheitslader (z.B. an Endstellen) benötigen sie zusätzlich Zeit für die Nachladung an den Ladestellen.

Hybridoberleitungs-Busse (im weiteren HObusse oder Streckenlader) besitzen sowohl ein Stromabnehmersystem für Fahrleitungsanlagen als auch einen leistungsfähigen Elektroenergiespeicher an Bord. Sie können somit abschnittsweise unter Fahrleitung verkehren. Dabei kann auch der On-Board-Speicher geladen werden und es ergibt sich die Möglichkeit, auf weiteren Streckenabschnitten fahrleitungsunabhängig zu fahren. Das gewährleistet eine große Reichweite der Fahrzeuge und einen weitgehenden Verzicht auf Lade-Stillstandszeiten im Depot oder an Gelegenheits-Ladestellen.

In Berlin existiert heute kein Obus-Netz mehr, auf dem man aufbauen könnte. Die Obus-Infrastruktur ist neu zu schaffen. Ergänzend muss für HObusse wegen der Nachladefunktion im Fahrbetrieb die elektrische Energieversorgung zusätzliche Anforderungen gegenüber konventionellen Obus-Systemen erfüllen. Durch den elektrischen Energiespeicher ergeben sich neue Freiheiten bei der Gestaltung der Infrastruktur, wie etwa der Verzicht auf mechanisch komplizierte Fahrleitungsstrukturen an Streckenkreuzungen mit weiteren HObus- und/oder Straßenbahnlinien.

Vor dem Hintergrund nicht vorhandener Erfahrungen mit solchen Infrastrukturen und dem Betrieb sollen die Bedingungen und Effekte einer solchen Technologie in Form einer Machbarkeitsstudie dargestellt werden. Ziel der Machbarkeitsstudie ist es, die Voraussetzungen für die Implementierung von HObussen in Berlin zu ermitteln, um Entscheidungsprozesse vorzubereiten. Nach Vorüberlegungen der BVG und nach Abstimmung mit dem Aufgabenträger, der Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz, ist zuerst das Omnibus-Teilnetz Berlin-Spandau in einer Machbarkeitsstudie zu betrachten.

Das Projektkonsortium für die Bearbeitung dieser Teilstudie besteht aus den folgenden Mitgliedern:

- Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)
- PTV Transport Consult GmbH (PTV), Projektkoordination
- Institut für Bahntechnik GmbH (IFB) in Zusammenarbeit mit der TU Dresden, Professur für Elektrische Bahnen (TUD)

Das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung koordiniert die wissenschaftliche Beratung des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS) und stellt die fachliche Kontinuität zu den vorausgegangenen Untersuchungen mit Bezug auf die Einführung von Hybridoberleitungsbussen sicher.

Innerhalb der Aufgabenstellung entwickelt das IFB szenariospezifisch die systemtechnische Auslegung und Dimensionierung der elektrischen Infrastruktur sowie der Fahrzeuge und beurteilt die technische Machbarkeit des Systems.

Die Professur für Elektrische Bahnen der TU Dresden recherchiert die Einzelkostenwerte der Fahrzeuge, der Infrastruktur und die Betriebskosten und stellt diese szenariospezifisch einander gegenüber.

Die PTV entwickelt ein Betriebskonzept für einen geplanten Betrieb im Jahr 2030, beurteilt die wirtschaftliche Machbarkeit der verschiedenen Szenarien und bewertet die Nachhaltigkeit des einzuführenden Systems im Vergleich zu konventioneller Dieselmotortechnik.

Diese Machbarkeitsstudie ist die Grundlage für die nachfolgenden Planungsschritte der Entwurfs- und Genehmigungsplanung im Rahmen eines notwendigen Planfeststellungsverfahrens bei der möglichen Realisierung des Vorhabens. Damit leistet die Studie einen Beitrag im Rahmen des Berliner Energie- und Klimaschutzprogramms 2030, des Berliner Mobilitätsgesetzes, des Stadtentwicklungskonzeptes Berlin 2030, des Nahverkehrsplans 2019-2023 und des Luftreinhalteplans für Berlin.

## 3 Grundlagen

### 3.1 Allgemeine Einführung

Die BVG betreibt das größte Busnetz in Deutschland (1.400 Busse, 154 Linien, 6.581 Haltestellen). Damit ist das Busnetz Berlin eine wichtige Säule des öffentlichen Nahverkehrsangebots der Hauptstadt. Im Rahmen der #BerlinSteigtUm Strategie der BVG werden die Rahmenbedingungen auf Basis des Berliner Mobilitätsgesetzes und des Nahverkehrsplans für eine umweltfreundliche und lokal emissionsfreie Mobilität in Berlin dargestellt. Ein Pfad der Strategie ist die Umstellung der Motorisierung von Verbrennungsmotoren hin zu elektrischen Antrieben. Ziel ist es, bis 2030 eine 100% lokal emissionsfreie Busflotte zu betreiben.

Durch die betrieblichen Eigenschaften der elektrisch angetriebenen Busse und im Hinblick auf eine entsprechend dem NVP 2019-2023 beabsichtigte Ausweitung des Angebots wird derzeit davon ausgegangen, dass die Busflotte im Jahr 2030 ca. 1.700 bis 1.800 Fahrzeuge umfasst. Unabhängig von der Ausführung der elektrischen Busse ist deren Einführung in Kombination mit Energiespeichern immer auch eine elektrische Infrastrukturaufgabe. Dabei hängt die aufzubauende Infrastruktur immer von den betrieblichen Anforderungen, elektrischen Rahmenparametern und physikalischen Grenzen ab. Rein batteriebetriebene elektrische Busse benötigen elektrische Infrastruktur in Form von Ladestationen entlang der Strecke und/oder auf den Busbetriebshöfen. Bei Betreibern, die auf Busbetriebshöfen viel Energie in möglichst kurzer Zeit in die Batterien nachladen müssen, ist davon ausgehen, dass die zu installierende elektrische Leistung im Megawattbereich liegt. Dabei können die Mittelspannungsnetze der städtischen Energieversorger sehr schnell an die Grenze ihrer Leistungsfähigkeit gebracht werden, zumal perspektivisch auch verstärkt der motorisierte Individualverkehr vorwiegend elektrisch betrieben und der bereits bestehende elektrische Nahverkehr auch weiter ausgebaut werden soll. Die Betriebserfahrungen der Betreiber, die batterieelektrische Busse bereits im Linieneinsatz testen, zeigen verschiedene Verbesserungspotenziale auf. In den letzten Jahren ist eine Steigerung der Verfügbarkeit mit neuen elektrischen Busgenerationen erreicht worden, doch die notwendigen Reichweiten der Energiespeicher sind für täglichen Linienbetrieb noch oft zu gering (siehe [93]). Dies ist einer der Gründe, warum Betreiber von der Bestellung größerer Stückzahlen rein batterieelektrischer Busse bisher abgesehen haben. Eine Möglichkeit, dennoch lange unterbrechungsfreie Umläufe mit großen Gefäßgrößen (Gelenk- oder Doppelstockbusse) und dichten Fahrzeugfolgen auf lokal emissionsfreie elektrische Busse umzustellen, bietet sich in der Kombination von bewährter Oberleitungsbustechnik mit elektrischen Energiespeichern in Form von Batterien. Aus dieser Kombination heraus ergeben sich Freiräume für eine stadtverträgliche Gestaltung der elektrischen Infrastruktur.

In den folgenden Unterkapiteln werden die wesentlichen Grundlagen für die Beurteilung der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit gelegt. Dabei wird auf alle relevanten technischen Details überblicksartig eingegangen; dazu gehören:

- die Fahrzeuge und Fahrzeugkonfigurationen,
- die elektrischen Energiespeicher,
- die elektrische Infrastruktur und
- die Grundlagen der Betriebssimulation und elektrischen Netzberechnung.

Ebenfalls wird die Vorgehensweise bei der Untersuchung der technischen Machbarkeit erläutert und die technischen Bewertungskriterien der elektrischen Infrastruktur und einzelner elektrischer Komponenten dargestellt. Letztlich wird ein Überblick über einzelne Oberleitungsbusnetze in Deutschland und weltweit sowie eine Übersicht über Fahrzeughersteller gegeben.

Verwendete Begriffe dieser Studie werden im Kapitel 9.1 Glossar definiert. Für eine zukünftige Realisierung des Projektes relevante Gesetze, Verordnungen und Normen sind ohne Anspruch auf Vollständigkeit in Kapitel 9.2 zusammengestellt.

## 3.2 Fahrzeuge

Konzepte, den städtischen Busbetrieb elektrisch zu realisieren, gibt es zahlreiche und es stellt eine große Herausforderung dar zu entscheiden, welche Antriebstechnologie- und welcher Systemansatz langfristig die ökonomisch und ökologisch nachhaltigste Lösung ist. Von modernen Bussystemen wird gefordert, dass sie

1. flottentauglich sind und wirtschaftlich betrieben werden können,
2. leistungsfähig genug sind, um die großen geforderten Transportleistungen zu erbringen,
3. flexibel genug sind, um den Betrieb auch unter veränderten betrieblichen Randbedingungen abzusichern,
4. zur Reduktion von lokalen Umweltbelastungen und zur Verbesserung der Lebensqualität beitragen und
5. ökologisch nachhaltig umgewandelte Energie nutzen können.

Der Einsatz konventioneller Dieselsebusse kann hinsichtlich der Anforderungen 1 bis 3 als optimale Systemlösung betrachtet werden und liefert somit die Begründung für dessen Vormachtstellung beim Betrieb von ÖPNV auf der Straße. Da der Dieselsebus aber von Politik und Gesellschaft hinsichtlich der Anforderungen 4 und 5 als nicht befriedigende Systemlösung gesehen wird, stellen elektrische Bussysteme eine praktikable Alternative dar. Außerdem sind die Traktionsenergiekosten eines Dieselfahrzeugs gegenüber einem konventionellen Obus aufgrund des deutlich geringeren Wirkungsgrades des Antriebs und der nicht vorhandenen Möglichkeit, die Bremsenergie zu rekuperieren bedeutend höher.

Für die Realisierung elektrischen (Bus-)Verkehrs wurden verschiedene Antriebs- und Speicherkonzepte mit spezifischen Vor- und Nachteilen entwickelt. All diese Konzepte erfordern

die Errichtung von Infrastrukturanlagen zur Energieversorgung der Fahrzeuge. Der Umfang der Aufwendungen für die Auslegung der wichtigsten elektrischen Bussysteme, damit verbundene Systemwirkungsgrade und die spezifischen Systemvor- und -nachteile werden nachfolgend vergleichend gegenübergestellt und bewertet.

Zu erwarten ist, dass zurzeit angebotene Batteriebusse nur begrenzt für einen großflächigen Einsatz geeignet sind, da sie, trotz zahlreicher Fortschritte in der Batterietechnik, bezüglich ihrer Reichweite limitiert sind. Final realisierbare Reichweiten von Batteriefahrzeugen hängen erheblich vom notwendigen Heiz- und Klimatisierungsbedarf ab. Nach [79] erscheint es sinnvoll, Batteriefahrzeuge mittels einer Brennstoffheizung aufzuwärmen, da der Energiebedarf für rein elektrisches Heizen groß ist.

### 3.2.1 Betrieb mit dem Dieselbus

#### ***Eigenschaften des Diesel-(Hybrid)-Bussystems (18-m-Einfachgelenkbus):***

*Wirkungsgrad der Energieversorgung:*

- rund 0,85

*Fahrzeugwirkungsgrad (vom Dieselkraftstoff bis zum Rad):*

- 0,27 ... 0,30

*Energieverbrauch:*

- konventioneller Dieselbus: ~ 0,57 l/km
- Diesel-Hybrid-Bus: ~ 0,51 l/km

*Verfügbarkeit:*

- konventioneller Dieselbus: ~ 95%
- Diesel-Hybrid-Bus: ~ 70-83%

*Lebensdauer:*

- konventioneller Dieselbus: 10-14 Jahre
- Diesel-Hybrid-Bus: 10-14 Jahre (Energiespeicher 7-12 Jahre)
- Tankstelle: ~ 30 Jahre

Üblicherweise werden elektrisch betriebene Busse vergleichend dem konventionellen Dieselbus gegenübergestellt. Da aber die BVG plant den ÖPNV lokal emissionsfrei durchzuführen und somit auch die heute verfügbaren hybriden Antriebssysteme keine Lösungsalternative darstellen, müssen in der vorliegenden Arbeit elektrische Antriebssysteme sowohl dem konventionellem Dieselantrieb als auch verfügbaren hybriden Antriebsstrukturen gegenübergestellt werden.

Aufgrund der großen Nachfrage in den vergangenen Jahrzehnten fallen die Beschaffungskosten von konventionellen Dieselnissen vergleichsweise niedrig aus. Gleichzeitig erwirbt man ein sehr zuverlässiges Produkt, welches, aufgrund der vergleichbar großen Energie-

und Leistungsdichte von Dieseldieselkraftstoff, große Reichweiten realisieren kann. Die hohe Flexibilität bezüglich des Einsatzprofils der Fahrzeuge ermöglicht zudem zeitnahe betriebliche Anpassungen auch bei außergewöhnlichen Vorkommnissen.

Fernab all der genannten positiven Argumente für den Dieselbus-Betrieb bleiben die Abhängigkeit vom fossilen, nicht erneuerbaren Energieträger, die lokalen Schadstoffemission und der schlechte Wirkungsgrad des Dieselmotors.

Zusätzliche Infrastrukturkosten zur Sicherstellung der Energieversorgung der Busse müssen vom Betreiber kaum aufgebracht werden und der Herstellungsprozess kann als kostengünstig bezeichnet werden. Die Preisstabilität ist natürlich abhängig von der Erschließbarkeit weiterer Vorkommen.

Die meisten der genannten Vorteile gelten ebenfalls für diesel-hybride Fahrzeuge. Durch die Kombination aus Elektromotor und Dieselmotor im Zusammenspiel mit einem mitgeführten Energiespeicher können jedoch zielgerichtet die Nachteile des konventionellen Dieselsebusses reduziert werden. Genannt werden müssen hierbei die Verringerung des Gesamtenergieverbrauchs um ca. 10% in Folge der Möglichkeit, Teile der Bremsenergie zu reku-perieren und die Reduktion lokaler Emissionen. Hinzu kommen die Reduktion der Lärmemission und die Verbesserung des Fahrkomforts im niedrigen Drehzahlbereich. Diese Vorteile „kauft“ man durch eine in etwa Verdoppelung der Beschaffungskosten, einer schlechteren Verfügbarkeit, da der Antriebsstrang zusätzliche Elemente enthält und einen verminderten Fahrgastraum, da die Traktions-Batterie mitgeführt werden muss. Ein weiterer Nachteil ist, dass die zu erwartenden Batterielebensdauern momentan nicht den Fahrzeuglebensdauern entsprechen und deswegen im Fahrzeuglebenszyklus erneuert werden müssen.

In der an [76] angelehnten Tabelle 3-1 sind die Vor- und Nachteile des Dieselsebussystems abschließend zusammengefasst.

Tabelle 3-1: Vor- und Nachteile von Dieselbus- und Diesel-Hybridbus-Systemen, nach [76]

<b>Vorteile:</b>	<p><b>Technisch:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Höchste Reichweite aller punktuell nachladbaren Antriebssysteme</li> <li>– Kürzeste Betankungsdauer</li> <li>– Hybridbusse können in eigenen Speicher rekuperieren</li> </ul> <p><b>Ökonomisch:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Geringste Investitionskosten</li> <li>– Infrastruktur normalerweise vorhanden</li> <li>– Keine Zusatzkosten für Schulung, Instandhaltung etc.</li> </ul> <p><b>Ökologisch:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Konventioneller Diesel hat eine gute Prozessökobilanz</li> </ul>
<b>Nachteile:</b>	<p><b>Technisch:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Unstetige Anfahrzugkraft beim konventionellen Diesel</li> <li>– Geringerer Fahrkomfort aufgrund Motorvibration und -geräusch</li> <li>– Höherer Verschleiß des Antriebsstrangs gegenüber E-Motor</li> <li>– Schlechter Motorwirkungsgrad</li> <li>– Mäßiger Fahrzeugwirkungsgrad</li> <li>– Diesel-Hybrid: Lebensdauer des Energiespeichers</li> </ul> <p><b>Ökonomisch:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– geringere Fahrzeuglebensdauer gegenüber Elektrobussen</li> <li>– höhere Kosten für Primärenergie</li> <li>– Fahrzeuginvestitionskosten für Hybridfahrzeuge</li> <li>– Erhöhter Wartungsaufwand</li> <li>– Hybrid-Fahrzeug: Wiederbeschaffungskosten der Energiespeicher</li> </ul> <p><b>Ökologisch:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Hohe lokale Emissionswerte</li> <li>– Erhöhte globale Emission</li> <li>– Hohe Lärmemission</li> </ul>

## 3.2.2 Technischer Hintergrund von Elektro-Bus-Systemen

### 3.2.2.1 Elektrische Traktion

Für die Wandlung der elektrischen Energie in kinetische Energie werden in Elektrobussen meist Asynchronmaschinen oder permanenterregte Synchronmaschinen (beides Drehstrommotoren) verwendet. Diese haben ein sehr gutes Masse-Leistungs-Verhältnis und der Wartungsaufwand ist vernachlässigbar gering. Die Ausführung des Stators mit jeweils 120° phasenversetzt angeordneten Wicklungen beider Maschinen ist nahezu identisch. Hinsichtlich der Gestaltung des Läufers unterscheiden sich die Maschinen aber grundsätzlich. Asynchronmotoren induzieren in einen kurz geschlossenen Läufer ein Drehfeld, welches sich hinsichtlich der Drehzahl vom speisenden Ständerdrehfeld, Schlupf bedingt, unterscheidet (asynchrones Verhalten). Dagegen bilden permanenterregte Synchronmaschinen durch Nutzung starker Magnete ein permanentes, dem Ständerdrehfeld synchrones Läuferfeld aus. Die nötige Drehspannung wird auf den Fahrzeugen in IGBT-Wechselrichtern, üblicherweise mit konstanter Zwischenkreisspannung, erzeugt.

Aus den Unterschieden im Aufbau des Läufers ergeben sich spezifische Vor- und Nachteile im Betriebsverhalten. In Tabelle 3-2 sind diese übersichtlich zusammengefasst.

Tabelle 3-2: Vergleich von Asynchron- und permanenterregter Synchronmaschine, nach [78]

	<b>Kurzschlussläufer Asynchronmotoren</b>	<b>Permanenterregte Synchronmotoren</b>
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Einfacher / robuster Aufbau</li> <li>- Einfache Regelung</li> <li>- Einfaches Schutzkonzept</li> <li>- Günstigere Beschaffungskosten</li> <li>- Einfachere Fertigung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geringe Rotorverluste</li> <li>- Wirkungsgrad im Nennpunkt</li> <li>- besseres Masse-Leistungs-Verhältnis</li> <li>- geringere Masse</li> <li>- geräuscharm</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wirkungsgrad im Nennpunkt</li> <li>- Rotorverluste bei geringer Drehzahl → Erwärmung</li> <li>- Masse-Leistungs-Verhältnis nicht so kompakt</li> <li>- weniger kompakt als PSM</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Regelung erfordert Polradlagegeber</li> <li>- komplexere Schutztechnik</li> <li>- Hoher Blindstromanteil bei hoher Drehzahl</li> <li>- Zusatzverluste wegen erforderlicher Feldschwächung im Leerlauf</li> <li>- Material- / Produktionskosten</li> </ul>

Die von allen Elektrobussen benötigte Gleichspannung kann entweder aus der Oberleitung, einem Energiespeicher oder aus alternativen Energiequellen bezogen werden.

Abbildung 3-1 zeigt eine typische Konfiguration des Traktionskreises eines Obusses. Die Speisung des Fahrmotors erfolgt über einen IGBT-Sechspuls-Wechselrichter, welcher aus

dem kondensatorgestützten Gleichspannungs-Zwischenkreis die benötigte Wechselspannungsamplitude und Frequenz erstellt. Der Aufbau der Regelung ist sowohl für Fahrzeuge geeignet, die von Asynchronmotoren angetrieben werden als auch für permanenterregte Synchronantriebe.

Der Antrieb durch Elektromotoren hat gegenüber der Ausführung Dieselmotor mit mechanischer Kraftübertragung den Vorteil, dass sich Drehmoment und Drehzahl des Traktionsantriebes frei einstellen lassen. Zusätzlich können die Motoren im Bremsvorgang generatorisch betrieben und die entstehende Energie zurückgespeist oder in einer mitgeführten Batterie gespeichert werden.

Da Batterien zum Laden mit Gleichspannung versorgt werden müssen, wird das Batteriesystem, wie in Abbildung 3-2 dargestellt, üblicherweise an den Zwischenkreis angeschlossen. Für eine flexible, über viele Freiheitsgrade regelbare Speichersteuerung werden normalerweise bidirektionale DC/DC-Wandler (Abbildung 3-3) eingesetzt. So lässt sich die Speicherspannung unabhängig von der Zwischenkreisspannung einstellen. Weitere Erläuterungen zur Steuerung der leistungselektronischen Stellglieder und verfeinerter DC/DC-Wandler-Topologien finden sich in der Fachliteratur [86], [87] und [88].

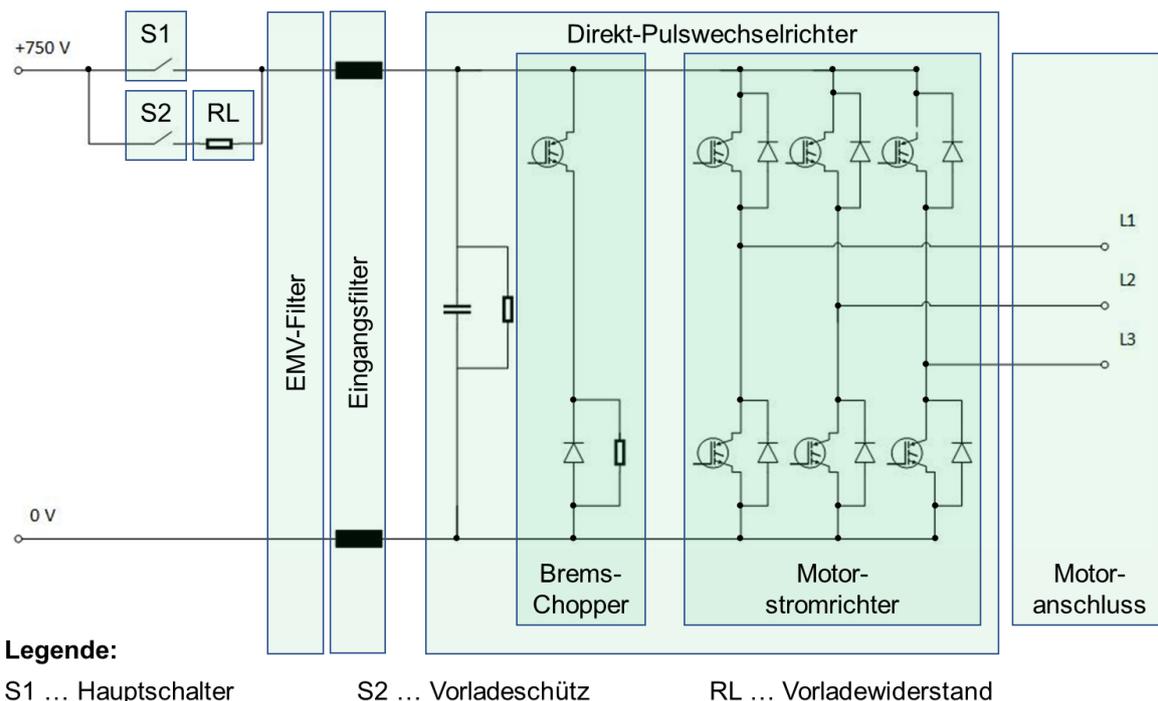


Abbildung 3-1: Prinzip des Traktionskreises von Obussen

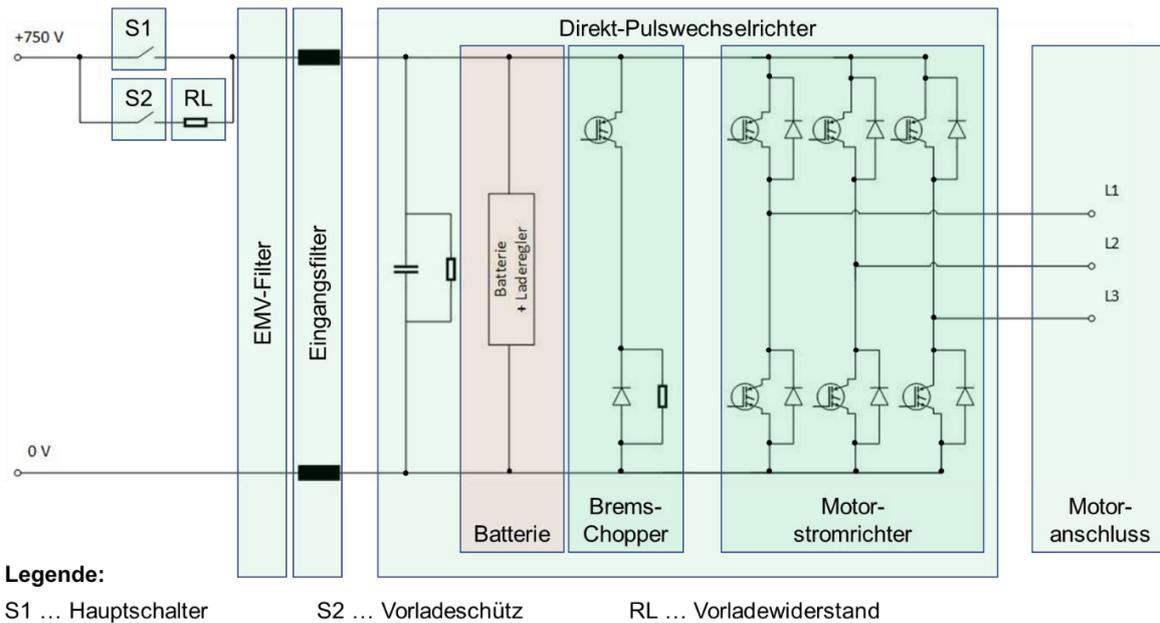


Abbildung 3-2: Prinzip des Traktionskreises von HObussen (Obus mit Energiespeicher)

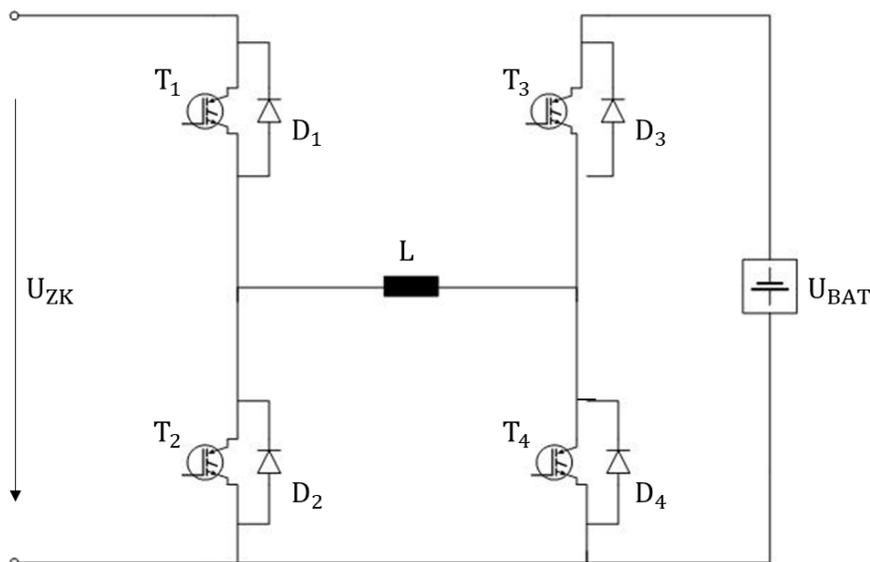


Abbildung 3-3: Prinzip des Ladestellers für den Energiespeicher

Da die maximale Traktionsleistung erst ab Erreichen der Übergangsgeschwindigkeit benötigt wird und dies im Stadtverkehr aufgrund kurzer Haltestellenabstände nur kurzzeitig der Fall ist, zeigt sich, dass Bordnetzverbraucher einen beträchtlichen Anteil am Gesamtenergieverbrauch haben. Speziell bei ungünstigen Witterungsbedingungen steigt der Energiebedarf erheblich an. Betriebserfahrungen verschiedener Betreiber zeigen, dass der Gesamtenergiebedarf an einem strengen Wintertag bis um mehr als 80 % ansteigen kann.

Außer bei Obussen mit kontinuierlicher Energieversorgung muss der beachtliche Einfluss der Bordnetzverbraucher im Auslegungsprozess der Fahrzeugenergiespeicher berücksichtigt werden. Beispielsweise in [79] wird daher für eine unbestimmte Übergangszeit die Nutzung einer Brennstoffheizung in Batteriebusen gefordert, da andererseits die erzielbaren Fahrzeugreichweiten für den ÖPNV unbefriedigend sind.

### 3.2.2.2 Elektrische Energieerzeugung und -bereitstellung

Der Primärenergiebedarf eines Elektrobusses hängt, bezüglich Effizienz und Schadstoffemission, direkt von der Art der Energieerzeugung ab. Um im Folgenden konventionelle dieselbasierte und verschiedene elektrische Antriebskonzepte energetisch miteinander vergleichen zu können, ist eingangs die Beschäftigung mit der Wirkungsgradkette elektrischer Energieversorgung erforderlich.

Die in Tabelle 3-3 aufgeführten mittleren Wirkungsgrade unterschiedlicher Kraftwerkstypen zeigen zunächst die Effizienz unterschiedlicher Energieerzeuger. Der Wirkungsgrad bezieht sich auf den eingesetzten „Rohstoff“, wobei kommerziell die unterschiedlichen Kosten des „Rohstoffs“ zu berücksichtigen sind. Der schlechte Wirkungsgrad von Solaranlagen wird durch die kostenlose Bereitstellung der Sonneneinstrahlung kompensiert.

Tabelle 3-3: Physikalischer Wirkungsgrad von Energieerzeugungssystemen, nach [76]

Bauart	Wirkungsgrad
Solkraftwerk	0,15
Photovoltaikanlage	0,15...0,2
Wasserkraftwerk	0,85
Thermisches Kraftwerk	0,50...0,42
Gas und Dampf-Kraftwerk	> 0,55
Kernkraftwerk	0,33...0,36
Windkraftanlagen	0,40...0,45

Übertragen und verteilt wird die Energie über Höchst-, Hoch- und Mittelspannungsnetze. Einschließlich der notwendigen Umspannvorgänge sind die Übertragungsverluste gering. In der ProBas-Datenbank des Umweltbundesamtes finden sich bspw. die nachstehenden Effizienzangaben (Tabelle 3-4).

Tabelle 3-4: Effizienz unterschiedlicher Freileitungsanlagen, nach [76]

Eigenschaften	Einheit	Spannungsebene		
		30 kV	150 kV	400 kV
Leistung	[MW]	15	60	900
Verluste	[%/100 km]	2,00	0,44	0,33

Eigenschaften	Einheit	Spannungsebene		
		30 kV	150 kV	400 kV
Länge	[km]	50	100	300
Gesamtverluste	[%]	1,00	0,44	0,99
Gesamtwirkungsgrad	[%]	99,00	99,56	99,01

Nicht betrachtet werden an dieser Stelle der Einfluss der Trassenlängen, die Netzvermischung und die Verluste in Folge der tatsächlich fließenden Ströme. Nach [76] kann der Gesamtwirkungsgrad der Kette 380 kV – 150 kV – 6 kV mit 96% und für die Kette 380 kV – 150 kV – 6 kV – 0,4 kV mit 94% angenommen werden.

### 3.2.3 Oberleitungsbus

*Wirkungsgrad der Energieversorgung:*

- 0,34 (Kraftwerk – Fahrzeug)
- 0,93 (Eingang Unterwerk – Fahrzeug)

*Fahrzeugwirkungsgrad:*

- 0,855 (bei direkter Speisung des Antriebs aus der Oberleitung)

*Energieverbrauch:*

- rund 2,4 kWh/km (mit Möglichkeit der Rekuperation)

*Verfügbarkeit:*

- vergleichbar einem konventionellem Dieselbus

*Lebensdauer:*

- Fahrzeuge: 15-20 Jahre
- Infrastrukturanlagen: mindestens 30 Jahre

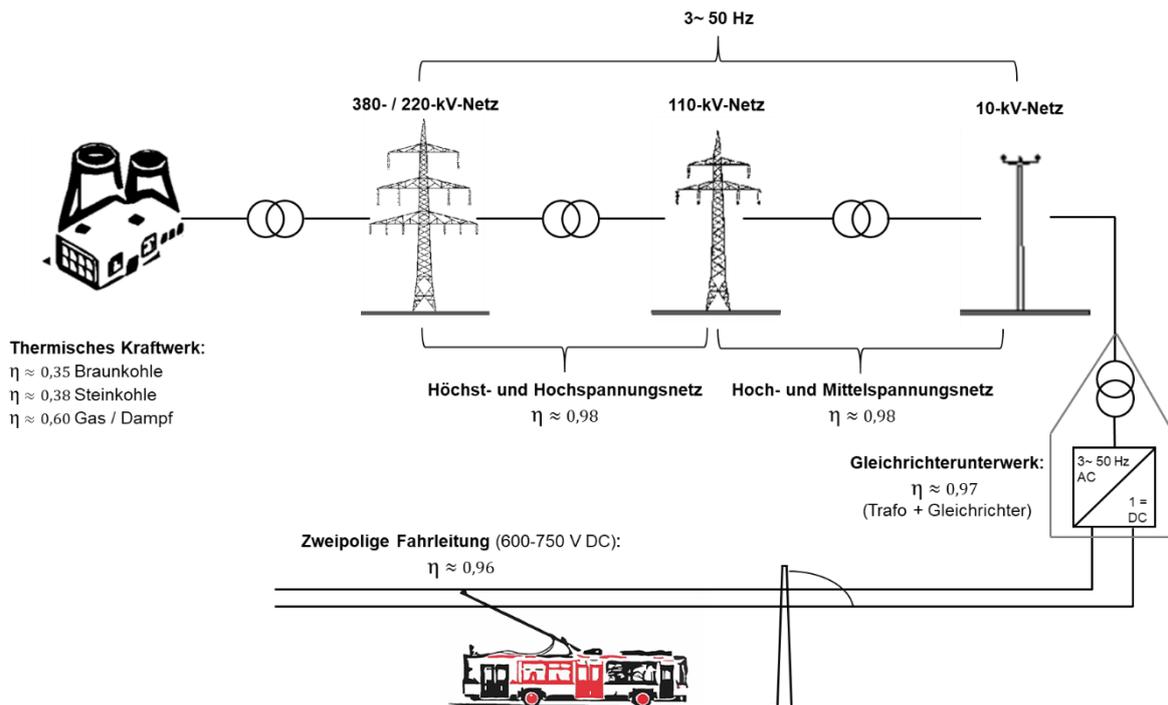


Abbildung 3-4: Prinzip der Energieübertragung beim Obus ohne fahrleitungsfreie Abschnitte, eigene Darstellung, nach [76]

Der Oberleitungsbus (Obus) ist nach heutigem Stand das einzige System, welches einen vergleichbaren technischen Reifegrad besitzt wie der Dieselbus. Die Energieübertragung beim klassischen Oberleitungsbus erfolgt konduktiv und kontinuierlich über die zweipolige Fahrleitung. Dies ist notwendig, da im Gegensatz zur Schienenbahn die Fahrbahn nicht die Funktion der Rückleitung übernehmen kann.

Die Gesamtsystemverluste der Übertragung ergeben sich aus den in Abbildung 3-4 angegebenen Verlusten der Teilsysteme.

Innerhalb des Systems gibt es keine Begrenzungen der Reichweite, jedoch sind die Fahrzeuge hinsichtlich der betrieblichen Freiheitsgrade an das Fahrleitungsnetz gebunden.

Der Zwang, die Fahrleitung zweipolig auszuführen und die U-förmig ausgeführten Schleifstücke der Stromabnehmer führen zu aufwendigen und optisch auffälligen Weichen und Kreuzungen in der Fahrleitung. Durch Einsatz eines Energiespeichers an Bord der Fahrzeuge können Abzweige, Kreuzungen oder Streckenabschnitte, wo eine Elektrifizierung aufwändig oder aus ästhetischen Gründen unerwünscht ist, fahrleitungsfrei ausgeführt werden. [15] [16]

Tabelle 3-5: Vor- und Nachteile von Oberleitungsbussen mit ausschließlicher Versorgung aus der Fahrleitung, nach [76]

<b>Vorteile</b>	<p><b>Technisch:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Hohe bereitstellbare Leistung (für Traktion und Nebenverbraucher)</li> <li>– Hoher Wirkungsgrad der Energieübertragung</li> <li>– Hohe Drehmomente über den gesamten Drehzahlbereich</li> <li>– Möglichkeit zur Rekuperation von Bremsenergie</li> </ul> <p><b>Ökonomisch:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Hohe Lebensdauer von Anlagen und Fahrzeugen</li> <li>– Geringer Energieverbrauch der Fahrzeuge (Rekuperation und keine Energiequelle an Bord)</li> </ul> <p><b>Ökologisch:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Reduzierte lokale Schadstoffemission</li> <li>– Reduzierte Lärmemission</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<p><b>Technisch:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Notwendigkeit der doppelten Isolation des Fahrzeuges → Kosten</li> <li>– Begrenzung der betrieblichen Freiheitsgrade durch Spurzwang</li> </ul> <p><b>Ökonomisch:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Hoher Investitionsaufwand für die Infrastrukturanlagen</li> <li>– Hoher Investitionsaufwand für die Fahrzeuge</li> </ul> <p><b>Ökologisch/Optisch:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Beeinflussung des Stadtbildes durch Oberleitungsanlagen</li> </ul>

### 3.2.4 Hybridoberleitungsbus (Streckenlader)

*Wirkungsgrad der Energieversorgung:*

- 0,34; vom Kraftwerk zum Fahrzeug
- 0,93; vom Eingang des Unterwerks zum Fahrzeug

*Fahrzeugwirkungsgrad:*

- 0,855; bei direkter Speisung des Antriebs aus der Oberleitung
- 0,75 – 0,70; bei Speisung des Antriebs aus der Batterie, unter Berücksichtigung des Lade- und Entladewirkungsgrads

*Energieverbrauch:*

- Für 18 m- Gelenkbusse rund 3,0 kWh/km

*Lebensdauer:*

- Fahrzeuge: 15-20 Jahre (vergleichbar mit dem Obus)
- Infrastrukturanlagen: mindestens 30 Jahre

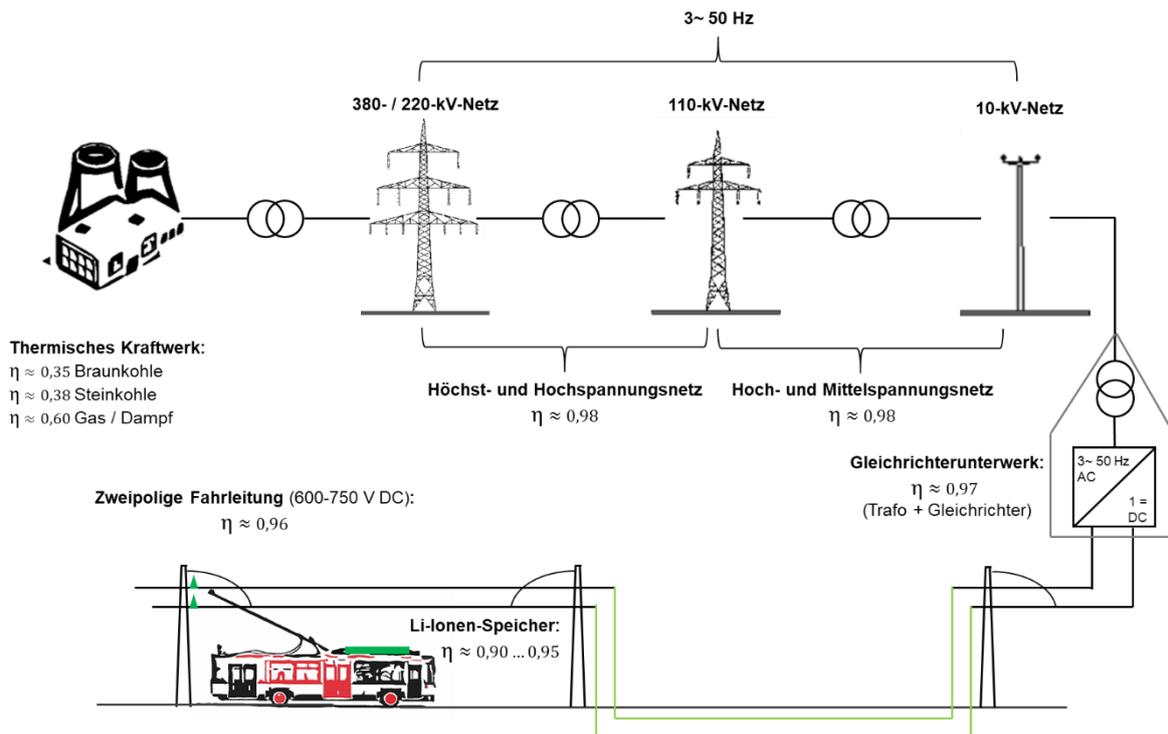


Abbildung 3-5: Prinzip der Energieübertragung beim HObus mit abschnittsweise Fahrleitungsfreien Abschnitten, eigene Darstellung, nach [76]

Wie schon oben angeführt ist es möglich, einen Oberleitungsbus mit einem leistungsfähigen Energiespeicher auszurüsten. Damit besteht die Möglichkeit, nicht elektrifizierte Abschnitte mit dem Obus zu erschließen beziehungsweise den Infrastrukturbedarf in zu elektrifizierenden Abschnitten zu reduzieren (Verzicht auf Weichen und Kreuzungen). Zudem ergeben sich für den Betrieb zusätzliche Freiheitsgrade, sodass beispielsweise Baustellen und Staus umfahren werden können. Begrenzt wird die gewonnene Flexibilität durch den An- und Abdriftvorgang. Dieser ist heute bereits im Stillstand mit Hilfe von Trichtern automatisch möglich, jedoch verliert man einige Sekunden Zeit und das Fahrzeug muss in einer bestimmten Position stehen. So sind beispielsweise Überholvorgänge schwierig zu realisieren, wenn nur punktuell angedrftet werden kann.

Tabelle 3-6: Vor- und Nachteile von Oberleitungsbussen mit abschnittsweiser Nachladung unter Fahrdrabt, nach [75]

<b>Vorteile</b>	<p><b>Technisch:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Hohe bereitstellbare Leistung (für Traktion und Nebenverbraucher)</li> <li>– Hoher Wirkungsgrad der Energieübertragung</li> <li>– Hohe Drehmomente über den gesamten Drehzahlbereich</li> <li>– Möglichkeit zur Rekuperation von Bremsenergie</li> <li>– Lebensdauerfreundliche Batterie-Ladekonzepte, ohne Schnellladung möglich - unter Oberleitung mit geringeren Leistungen nachladbar</li> </ul> <p><b>Ökonomisch:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Reduzierte Infrastrukturkosten – speziell Kreuzungen und Weichen entfallen</li> <li>– Hohe Lebensdauer von Anlagen und Fahrzeugen</li> <li>– Geringer Energieverbrauch der Fahrzeuge (Rekuperation)</li> </ul> <p><b>Ökologisch:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Reduzierte lokale Schadstoffemission</li> <li>– Reduzierte Lärmemission</li> <li>– Reduzierte optische Beeinflussung des Stadtbildes</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<p><b>Technisch:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Notwendigkeit der doppelten Isolation des Fahrzeuges → Kosten</li> <li>– Zusätzlicher Bedarf an Regelungstechnik – auf Kosten der Zuverlässigkeit</li> </ul> <p><b>Ökonomisch:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Gegenüber Obus erhöhte Fahrzeugkosten und zusätzliche Kosten für die Batterie</li> <li>– Reduzierter aber immer noch hoher Investitionsaufwand für die Infrastrukturanlagen</li> <li>– Die Lebensdauer der Batterie entspricht nicht der Lebensdauer des Fahrzeuges – Wechsel notwendig</li> </ul> <p><b>Ökologisch/Optisch:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Verschlechterter „ökologischer Fußabdruck“ durch zusätzlich benötigte Komponenten</li> </ul>

### 3.2.5 Elektrobuse mit punktueller, automatisierter Nachladung

#### 3.2.5.1 Allgemeines

*Wirkungsgrad der Energieversorgung:*

- 0,35 vom Primärenergieträger (Kraftwerk) zur Nachladestation
- 0,90 ... 0,93 für das Übertragungssystem

*Fahrzeugwirkungsgrad:*

- 0,82; der Wirkungsgrad der E-Traktion wird durch den Batteriewirkungsgrad und durch den Wirkungsgrad des Ladegeräts reduziert
- 0,75 – 0,70; bei Speisung des Antriebs aus der Batterie, unter Berücksichtigung des Lade- und Entladewirkungsgrads

*Energieverbrauch:*

- Für 18 m- Gelenkbuse rund 3,0 kWh/km

- Drastische Reichweitenreduzierung bei Einsatz elektrischer Heizgeräte und Klimaanlage

*Lebensdauer:*

- Fahrzeuge: 15-20 Jahre
- Infrastrukturanlagen: mindestens 30 Jahre

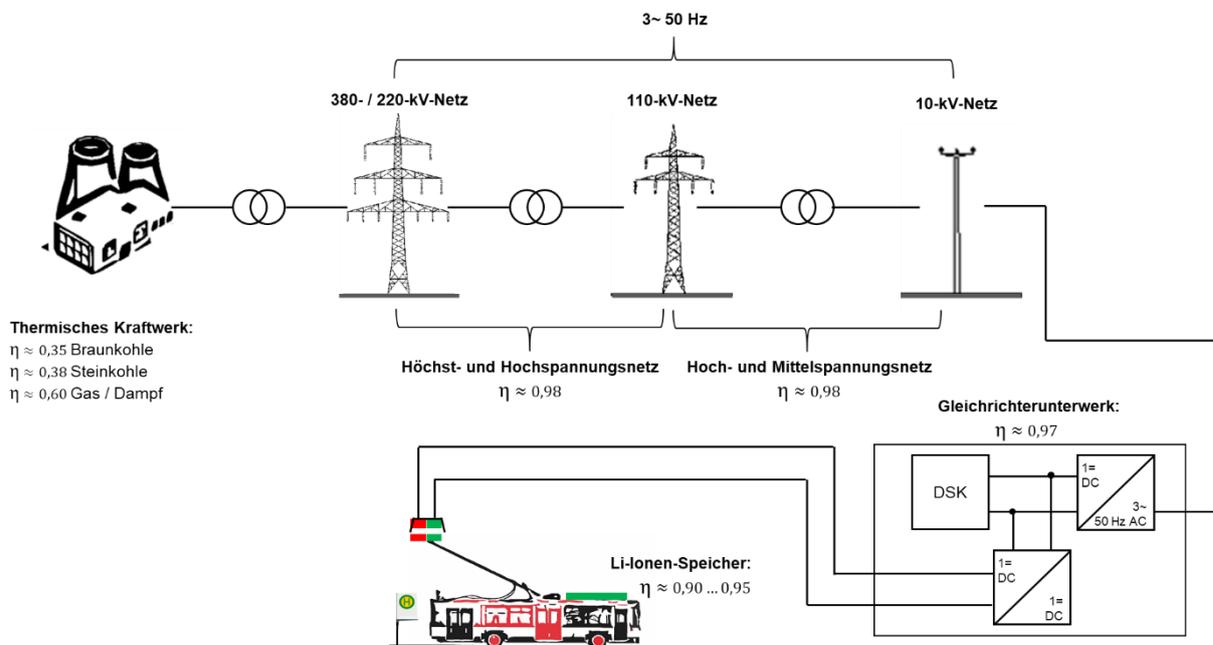


Abbildung 3-6: Prinzip der Energieübertragung Elektrobus mit punktueller automatisierter Nachladung, eigene Darstellung, nach [76]

Der Infrastrukturaufwand kann auf ein Minimum reduziert werden, wenn nur noch an explizit dafür vorgesehenen Streckenpunkten Nachlademöglichkeiten geschaffen werden (Fahrleitungsnetz entfällt). Üblicherweise werden dafür spezielle Stromabnehmer verwendet, die durch Vergrößerung der Kontaktfläche zwischen Stromabnehmer und Nachladestation im Stillstand die benötigten hohen Ströme übertragen können. Schleifschuhe für Obusfahrleitungen können aus thermischen Gründen nur einen geringen Strom im Stillstand des Fahrzeugs übertragen.

In der Praxis unterscheidet man zwischen „Übernachtladern“ (im Depot) und „Gelegenheitsladern“ (zum Beispiel an Endhaltestellen).

Für alle Elektrobuskonzepte, die nicht kontinuierlich oder zumindest über längere Abschnitte aus der Oberleitung nachgeladen werden, stellt die Versorgung der Hilfsbetriebe wie Heizung und Klimatisierung eine Herausforderung dar.

Tabelle 3-7: Vor- und Nachteile von Elektrobussen mit punktueller, automatisierter Nachladung, nach [76]

<b>Vorteile</b>	<p><b>Technisch:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Hoher betrieblicher Freiheitsgrad des Fahrzeugs</li> <li>– Hoher Wirkungsgrad der Energieübertragung</li> <li>– Verteilter Antrieb mit hohem Drehmoment möglich</li> <li>– Möglichkeit zur Rekuperation von Bremsenergie in den Speicher</li> <li>– Doppelte Isolation entfällt, da das Fahrzeug beim Laden über ein Kontaktsystem geerdet werden kann</li> </ul> <p><b>Ökonomisch:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Hohe Lebensdauer von Anlagen und Fahrzeugen</li> <li>– Signifikant reduzierte Infrastrukturkosten gegenüber Obussystemen</li> <li>– Geringer Energieverbrauch der Fahrzeuge (Rekuperation)</li> </ul> <p><b>Ökologisch:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Reduzierte lokale Schadstoffemission</li> <li>– Reduzierte Lärmemission</li> <li>– Stark reduzierte optische Beeinflussung des Stadtbildes</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<p><b>Technisch:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Erhöhte Ladeverluste durch erhöhte Ladeleistungen (Wärme)</li> <li>– Elektrisches Heizen des Fahrgastraums aus der Batterie reduziert die Reichweiten erheblich</li> <li>– Schnellladung erhöht Verluste im Speicher (Wärme – Kühlung notwendig)</li> <li>– Schnellladung erschwert bei hohen Umgebungstemperaturen</li> </ul> <p><b>Ökonomisch:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Hohe Infrastrukturkosten gegenüber Dieselsystem</li> <li>– Hohe Fahrzeugbeschaffungskosten</li> <li>– Lebensdauer der Batterie entspricht nicht der Lebensdauer der Fahrzeuge – Wechsel erforderlich</li> </ul> <p><b>Ökologisch/Optisch:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– „ökologischer Fußabdruck“ durch zusätzlich benötigte Komponenten und große Speicher schlechter als beim Dieselsystem</li> </ul>

### 3.2.5.2 Übernachtlader

Als „Übernachtlader“ (mitunter auch „Volllader“ oder Depotlader genannt) werden jene Batteriebusse bezeichnet, die zum Nachladen des Energiespeichers die nächtliche Betriebspause nutzen. Die Ladeinfrastruktur kann bei diesem Konzept auf Nachladeeinrichtungen in den Betriebshöfen beschränkt werden. Entlang der zu befahrenden Strecken werden keine zusätzlichen Ladeeinrichtungen benötigt.

Die Nachladung des Energiespeichers kann zum Beispiel erfolgen

- per Kabel (Bodenelektranten oder Überkopfaufhängung des Steckers),
- mit speziellen leistungsfähigen Pantographensystemen,
- bei HObussen über die konventionellen Stromabnehmer (Ladeleistung sehr begrenzt).

Bei ausreichender Standzeit kann die Nachladung „lebensdauerfreundlich“ mit geringer C-Rate erfolgen. Falls die Standzeit ausreicht, ist zur Reduktion der Anschlussleistung auch eine zeitlich versetzte Ladung von Fahrzeuggruppen möglich.

Mit der Installation eines intelligenten Flotten-Batteriemanagements ist es somit möglich, die speisenden Netze moderat und kontinuierlich (ohne Spitzen) zu belasten.

Jedoch werden für Übernachtlader große (schwere) Energiespeicher an Bord der Fahrzeuge benötigt, da die erneute Ladung erst in der nächsten Betriebspause erfolgen kann. In Beispielprojekten wurden Speicher bis zu 300 kWh auf den Fahrzeugen installiert [95].

Die Energiedichte heutiger Batterien begrenzt die an Bord speicherbare Energie. Dieses Konzept ist somit vor allem für den Einsatz auf Linien mit geringem Tagesenergiebedarf anwendbar. Mit der momentan verfügbaren Speichertechnologie sind damit, innerhalb der Grenzen der Tragfähigkeit der Fahrzeugrahmen, Reichweiten von etwa 200...300 km möglich. [17],[94], [95], [96]

Bei Unternehmen mit kurzen Betriebspausen wegen ausgedehntem Nachtverkehr und starker Frühspitze reduziert sich die verfügbare Ladezeit entsprechend. Dies führt zu höheren Ladeströmen und damit zu einem Bedarf an leistungsfähigerer Ladeinfrastruktur einschließlich leistungsfähigem Netzanschluss und letztlich auch zu geringerer Batterielebensdauer.

### **3.2.5.3 Gelegenheitslader**

Gelegenheitsladung (opportunity-charging) bedeutet, dass der Energiespeicher nicht nur in den Betriebspausen im Betriebshof nachgeladen wird, sondern auch an den Endhaltestellen bzw. an Haltestellen mit längeren Wartezeiten. Auch Systeme zur Schnellladung sind bereits in der Erprobung bzw. im Praxiseinsatz. Die Vorteile hierbei sind, dass bei richtiger Dimensionierung des Energiespeichers eine deutlich größere Reichweite möglich ist oder der Energiespeicher kleiner ausgelegt werden kann. In Beispielprojekten wurden Speicher zwischen 60 und 160 kWh auf den Fahrzeugen installiert [95]. Damit können pro Tag Reichweiten bis etwa 300 km erreicht werden. Die Ladeleistungen sind höher gegenüber der „Übernachtladung“ im Depot und kann induktiv (bis zu 200 kW) oder induktiv über Pantograph (bis zu 500 kW) erfolgen [94], [95]. Nachteilig bei diesem Konzept ist der Bedarf an zusätzlicher Ladeinfrastruktur im Liniennetz (Gleichrichterstation und Übertragungstechnik), der mit zusätzlichen Kosten verbunden ist. Betriebserfahrungen aus bereits realisierten Projekten zeigen, dass diese Technik für Netze mit mittleren Verkehrsaufkommen und ausreichend langen Wendezeiten an Endhaltestellen geeignet ist. [18] [19]

Der in Kapitel 3.2.4 erwähnte HObus kann auch als spezielle Form des Gelegenheitsladers aufgefasst werden, da er die nur abschnittsweise verfügbare Fahrleitung zur Nachladung des Speichers nutzt.

### 3.2.5.4 Elektrobusse mit punktueller nicht automatisierter Nachladung

Steckerbasiert nachzuladende Fahrzeuge können als Depotlader oder Gelegenheitslader betrieben werden. Jedoch sind sie für Schnellladekonzepte aufgrund der limitierten, übertragbaren Leistungen ungeeignet. Typische, heute verfügbare Ladestationen können Leistungen DC zwischen 90 kW und 170 kW (typischerweise 600V/150A, 400V/250A oder 400V/425A) übertragen [76]. Die Ladegeräte können bei diesem Konzept entweder fahrzeugseitig mitgeführt werden oder in den externen Ladegeräten untergebracht werden. Letztgenannte Ladegeräte werden normalerweise an 400 V Drehstrom angeschlossen.

In [79] wird darauf hingewiesen, dass das Nachladen mit Steckern grundsätzlich nicht manipulationssicher ist und bei fehlender Verriegelung durch Dritte unterbrochen werden kann (allerdings besteht keine Gefährdungsgefahr).

Steckerbasierte Lösungen lassen sich nicht automatisieren. Zudem unterliegen die Ladekabel einem erhöhten Verschleiß und sie sind, wenn die Stecker gekühlt werden müssen (wenn hohe Ladeleistungen vorgesehen sind), sehr schwer.

### 3.2.6 Gefäßgrößen

Nachfolgend werden für einen Single 12-m-Bus, einen Gelenkbus, einen Doppelgelenkbus und einen Doppelstockbus Angaben zu deren ungefähren Sitz- und Stehplatzkapazitäten (für 4 bis 6 Personen/m<sup>2</sup>) laut verschiedener Hersteller und der Gesamtplatzanzahl im Betrieb getroffen. Dabei variieren die Angaben je nach Hersteller und dienen daher nur als Orientierungsgröße.

Für die Berechnung spezifischer wirtschaftlicher Größen wird mit dem Wert der Gesamtplatzkapazität gerechnet (letzte Zeile der Tabelle 3-8). Für den Doppelgelenkbus wird ein zusätzlicher Wert von 156 Plätzen für die Berechnung der spezifischen Annuität zu Grunde gelegt.

Tabelle 3-8: Platzkapazitäten für verschiedene Bussysteme (nach [14], [15], [17])

	Single 12 m	Gelenkbus	Doppelgelenkbus	Doppelstockbus
Sitzplätze [Hersteller- angabe]	26 - 34	44 - 47	56 - 60	70 - 83
Stehplätze [Hersteller- angabe]	36 - 44	52 - 55	94 - 127	10 - 30
Gesamt [Betrei- beran- nahme]	70	99	130	80 - 113

Es ist zu erkennen, dass der Doppelgelenkbus eine erheblich größere Fahrgastkapazität gegenüber allen anderen Gefäßgrößen besitzt. Das Verhältnis des Aufwands Fahrer/Fahrgästen ist somit günstiger. Dies wird erkaufte durch einzelne Nachteile:

- großer Wendekreis bzw. eingeschränkte Manövrierfähigkeit im öffentlichen Straßenraum (damit Einschränkung der betrieblichen Einsatzfähigkeit bei Umleitungen, Festlegung auf bestimmte Strecken u.Ä.),
- Werkstätten müssen speziell zugeschnitten werden (längere Arbeitsstände, Anordnung von Arbeitsständen ist nur im Durchlaufverfahren möglich, Anpassung von Kurvenradien),
- für den Betrieb von Doppelgelenkbussen ist eine Ausnahmegenehmigung erforderlich (StVZO. B. III §34)

Der Doppelstockbus hat betriebliche Einschränkungen, die durch seine Höhe bestimmt sind, z.B. die Durchfahrt durch Brücken. Die Kompatibilität des Oberleitungs-Doppelstockbusses mit Fahrleitungen wird in Kapitel 3.4.6.2.3 betrachtet.

### **3.3 Elektrische Energiespeicher**

#### **3.3.1 Kenngrößen von Akkumulatoren**

Bevor im Folgenden Energiespeicher miteinander verglichen werden, sollen an dieser Stelle die wichtigsten Kenngrößen und Begriffe im Zusammenhang mit Sekundärbatterien erläutert werden.

##### **3.3.1.1 Spannungen**

Die Spannung von galvanischen Zellen ist abhängig von der Art der Elektroden, des Elektrolyts, sowie der Temperatur. Die aktuell nutzbare Spannung ergibt sich aus dem Ladezustand und der Zeit seit dem letzten Aufladen (aufgrund der Selbstentladung).

###### *Entladespannung*

Die Entladespannung beschreibt die minimale Spannung bis zu welcher ein Akkumulator betrieben werden darf. Die Nichteinhaltung dieser, vom Hersteller angegebenen Grenze, führt in der Regel zu irreparablen Schäden.

###### *Ladeschlussspannung*

Die Ladeschlussspannung beschreibt die maximale Spannung, die an einem Akkumulator angelegt werden darf. Das Überschreiten dieser, ebenfalls vom Hersteller angegebenen Grenze führt ebenfalls zu irreparablen Schäden bis hin zur Selbstentzündung des Akkus.

###### *Nennspannung*

Die Nennspannung ist ein spezifischer Wert, mit dem die mittlere Entladespannung im Betrieb einer Batteriezelle angegeben wird. Die Nennspannung eines Akkublocks ergibt sich aus der Summe der miteinander in Reihe geschalteten Batteriezellen.

Tabelle 3-9: Nennspannungen häufig verwendeter Zelltypen

Zellentyp	Nennspannung
Nickel-Metallhydrid	1,2 V
Blei-Bleioxid	2,0 V
Lithium-Titanat	2,3 V
Lithium-Eisenphosphat	3,2 V – 3,3 V
Lithium-Ionen	3,7 V
Lithium-Polymer	3,7 V

### *Ruhespannung*

Die Ruhespannung entspricht der messbaren Spannung über den Klemmen der unbelasteten Batterie. Der maximal messbare Wert wird nach einem vollständigen Aufladeprozess erreicht. Aufgrund der unvermeidlichen Selbstentladung von Batterien sinkt der Wert mit zunehmender Zeit ab. Bei Li-Ionen Batterien besteht beispielsweise ein proportionaler Zusammenhang zwischen messbarer Ruhespannung und aktuellem Ladezustand (State of Charge, SoC).

#### **3.3.1.2 Innenwiderstand**

Der Innenwiderstand ist eine wichtige Systemgröße zur Beschreibung der Belastbarkeit einer Batterie, da sie zur Bestimmung der (aktuell) maximal verfügbaren Leistung benötigt wird. Die vom Innenwiderstand verursachten Verluste steigen quadratisch mit dem fließenden Strom an und werden in Wärme umgewandelt. Die messbare Klemmspannung über der Batterie ergibt sich durch Subtraktion aus Ruhespannung und Spannungsfall über dem Innenwiderstand.

#### **3.3.1.3 Kapazität und C-Rate**

Die Kapazität beschreibt, wieviel Strom der Akku über einen bestimmten Zeitraum abgeben kann und wird in Amperestunden angegeben. Die Kapazität einer Batterie wird üblicherweise über einen Zeitraum von fünf Stunden ermittelt. Wird beispielsweise für einen Akku eine Kapazität von 1 Ah angegeben, bedeutet dies, dass diese für fünf Stunden einen Strom mit 0,2 A liefern kann. Die tatsächlich abrufbare Leistung ergibt sich dann durch Multiplikation mit der aktuellen Klemmspannung.

Batterieentwickler streben normalerweise eine Steigerung der Kapazität bei gleichbleibenden Batteriegrößen an. Dabei wird aber oft ein Anstieg des Innenwiderstands akzeptiert.

Zudem wird die verfügbare Kapazität durch den maximalen Entladestrom begrenzt. Einen schnellen Überblick über die tatsächliche Belastbarkeit und Schnellladefähigkeit erhält man durch die angegebenen C-Raten.

$$\text{C-Rate} = (\text{Ent-})\text{Ladestrom} / \text{Nennkapazität des Speichers}$$

Der Batteriehersteller definiert, mit welcher C-Rate eine Batterie maximal geladen bzw. entladen werden darf. Die C-Rate für das Entladen ist allgemein um ein Vielfaches größer als die C-Rate für das Laden.

#### **3.3.1.4 Energiedichte**

Die Energiedichte wird zwischen volumetrischer und gravimetrischer Energiedichte unterschieden.

Die gravimetrische Energiedichte beschreibt, wieviel Energie pro Masse der Batterie gespeichert werden kann. Sie wird in Wattstunden pro Kilogramm angegeben. Je höher die Energiedichte ist, desto leichter ist eine Batterie bei gleicher gespeicherter Energiemenge. Lithium-Ionen-Batterien haben im Vergleich zu Blei-Säure-Batterien etwa eine dreifach höhere gravimetrische Energiedichte. Das bedeutet, dass eine Lithium-Ionen-Batterie, welche die gleiche Energiemenge wie eine Bleisäure-Batterie speichert, nur ein Drittel von der Bleisäure-Batterie wiegt.

Die volumetrische Energiedichte beschreibt, wieviel Energie pro Volumen aus einer Batterie entnommen werden kann. Sie wird in Wattstunden pro Liter angegeben. Je höher die volumetrische Energiedichte, umso kleinere Maße hat eine Batterie bei gleicher gespeicherter Energiemenge.

#### **3.3.1.5 Zyklenzahl**

Wenn ein Akku einmal geladen und anschließend wieder entladen wird, spricht man von einem Zyklus. Wird dieser Vorgang bis zur maximalen Lade- bzw. Entladbarkeit durchgeführt, spricht man von einem Vollzyklus. Mit der sogenannten Zyklenzahl kann nun die Lebenserwartung eines Akkus beschrieben werden. Spricht man beispielsweise bei einem Akku von einer Zyklenzahl von 2.000, dann bedeutet dies, dass er 2.000 Mal entladen und erneut geladen werden kann, ohne dass ein Kapazitätsverlust größer als 20 % eintritt. Die Zyklenzahl ist jedoch nur ein grober Richtwert, da sie die Verwendung des Akkus unter Idealbedingungen voraussetzt, was nur in seltensten Fällen zutrifft. Wird mit einem Akku nicht betriebsgerecht umgegangen, so kann sich seine Zyklenzahl drastisch reduzieren.

### 3.3.2 Speichertechnologie für Traktionsanwendungen

Ein geeigneter Energiespeicher für die Versorgung des Traktionskreises und der Bordnetzverbraucher von Fahrzeugen im Allgemeinen und Bussen im Speziellen, muss den folgenden Anforderungen genügen [76]:

- geringe Beschaffungs- und Betriebskosten,
- hoher Wirkungsgrad beim Laden und Entladen,
- hohe Energiedichten, so dass die Speicher klein und leicht gehalten werden können,
- hohe Leistungsdichten, für die fahrdynamische Performance und die effektive Aufnahme von Rekuperationsenergie,
- kurze Nachladezeiten, für eine hohe Verfügbarkeit,
- sicherer Betrieb muss gewährleistet sein, um zusätzliche Gefährdung auszuschließen,
- hohe kalendarische und zyklische Lebensdauer,
- günstiger ökologischer Fußabdruck.

Moderne Elektrobusse verwenden bzw. planen den Einsatz von Akkumulatoren (wiederaufladbare Sekundärzellen) und Kondensatoren als Energiespeichersysteme. Einen ersten vergleichenden Überblick verschiedener Energiespeichersysteme vermitteln Ragone-Diagramme, in denen die Energie- und Leistungsdichtebereiche unterschiedlicher Speichertechnologien gegenübergestellt werden. Das Ragone Diagramm in Abbildung 3-7 zeigt u.a., dass Doppelschichtkondensatoren (Super-Caps) sehr hohe spezifische Leistungen generieren können, die spezifischen Energien gegenüber Batterien aber gering sind. Umgekehrt lassen sich mit Akkumulatoren gegenüber Kondensatoren nur verhältnismäßig geringe Leistungen generieren. Gegenüber dem orange dargestellten, konventionellen Dieselmotorsatz zeigt sich, dass die spezifische Energie aller alternativen Speichertechnologien um Zehnerpotenzen niedriger ist. Daraus folgt, dass batteriegestützte Antriebe prinzipiell schwerer als Dieselfahrzeuge mit vergleichbarer Reichweite sind.

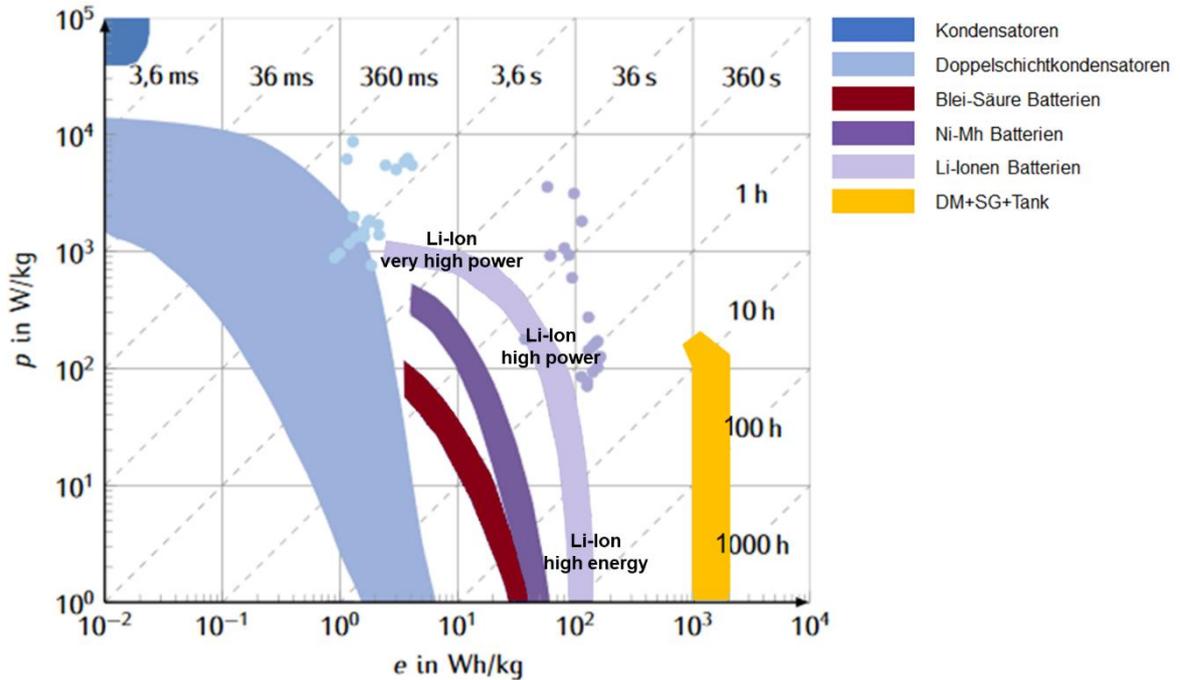


Abbildung 3-7: Ragone Diagramm für Traktionsspeicher

Neben Energie- und Leistungsdichte haben Energiespeicher individuelle Vor- und Nachteile. Für heute gängige, moderne Technologien sind in Tabelle 3-10 vergleichend gegenübergestellt. Dabei wird deutlich, dass keine ideale Energiespeicher-Technologie existiert.

Tabelle 3-10: Vergleich von Traktionsspeichertechnologien, nach [76], [83]

	Li-Ionen-Akkus	NiMH-Akkus	Super-Caps
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Höchste Energiedichte</li> <li>- Geringes spezifisches Gewicht</li> <li>- Hohe Zell-Nennspannung → erhöhte spez. Leistung</li> <li>- Gute Zyklenfestigkeit und Lebensdauer</li> <li>- Kein „Memory Effekt“</li> <li>- Geringe Selbstentladung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zuverlässig und robust</li> <li>- (kurzzeitig) Tiefentladefähig</li> <li>- Gut geeignet für hohe Ströme, da geringer Innenwiderstand</li> <li>- Höhere Standzeiten möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zuverlässig und robust</li> <li>- Wartungsarm</li> <li>- Hohe kalendarische Lebensdauer</li> <li>- Hohe Zyklenzahl</li> <li>- Sehr große Leistungsdichte</li> <li>- Hoher Wirkungsgrad</li> </ul>

	Li-Ionen-Akkus	NiMH-Akkus	Super-Caps
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hohe Kosten</li> <li>- Reaktiv mit Luft und Feuchtigkeit</li> <li>- Anfällig für Überladung</li> <li>- Aufwendiges Batteriemangement notwendig (elektrisch und thermisch)</li> <li>- Temperaturanfällig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hohe Selbstentladung</li> <li>- Schlechte Zykleneffizienz</li> <li>- Nur begrenzt schnellladefähig</li> <li>- Geringere Energiedichte</li> <li>- Aufwendige Batteriepflege zur Reduktion des „memory Effekts“</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hohe Selbstentladung</li> <li>- Großer Spannungshub</li> <li>- Sehr geringe Energiedichte</li> <li>- Hoher Überwachungsaufwand</li> <li>- Große Gefahr bei falscher Bedienung</li> <li>- Hohe Kosten</li> </ul>

Super-Caps sind als reine Traktionsenergiespeicher aufgrund der viel zu geringen Energiedichten ungeeignet. Jedoch bieten sie Potenziale, in Kombination mit Batterien, deren begrenzte Leistungsdichten zu kompensieren.

Die NiMH-Batterien werden besonders in Mild- und Full-Hybrid Fahrzeugen eingesetzt. Aufgrund deutlich größerer Energiedichten, der spezifischen Leistung, der Möglichkeit zur Schnellladung und deutlich verringerter Selbstentladungsraten werden heute aber im Hybrid- und Elektrofahrzeugsektor Li-Ionen Akkus verwendet.

Li-Ionen-Batterien werden als Hochenergiebatterien und Hochleistungsbatterien hergestellt (siehe Abbildung 3-7). Während für rein elektrische Fahrzeuge eine hohe Energiedichte zur Erzielung großer Reichweiten wesentlich ist, sind für Hybridfahrzeuge hohe Leistungsdichten zur Erzielung hoher Beschleunigungsvorgänge und zur schnellen Speicherung von großen Anteilen der Bremsenergie bedeutend.

Der im Folgenden dargestellte Vergleich von drei in Hybridfahrzeugen üblicherweise eingesetzten Hochleistungs-Li-Ionen-Akkus aus unterschiedlichen Elektrodenmaterialien – Lithium-Eisenphosphat (LTO), Nickel-Mangan-Kobalt (NMC) und Lithiumtitanat (LTO) - und einem kommerziellen Doppelschichtkondensator wurde in [81] veröffentlicht. Es werden im Speziellen die Leistungsmerkmale, das Lade- und Entladeverhalten und das thermische Verhalten der Zellen beim Betrieb mit unterschiedlichen C-Raten und unterschiedlichen Umgebungstemperaturen vergleichend gegenübergestellt.

### 3.3.2.1 Ruhespannungsverläufe

Die in Abbildung 3-8 dargestellten Ruhespannungen (bei einer Temperatur von 25 °C) ergeben sich für die Li-Akkumulatoren aus der verwendeten Materialkombination für die Kathoden- bzw. Anodenelektrode. Beim Doppelschichtkondensator hängt sie von den Polplattenflächen und deren Abstand ab. Auffällig ist, dass der Spannungsverlauf der LFP-Kurve im Bereich zwischen 20% und 80% des SoC einen sehr flachen Spannungsverlauf hat. Dies

erleichtert einerseits die Regelung der Ladespannung, erschwert aber gleichzeitig die Bestimmung des momentanen Ladezustandes.

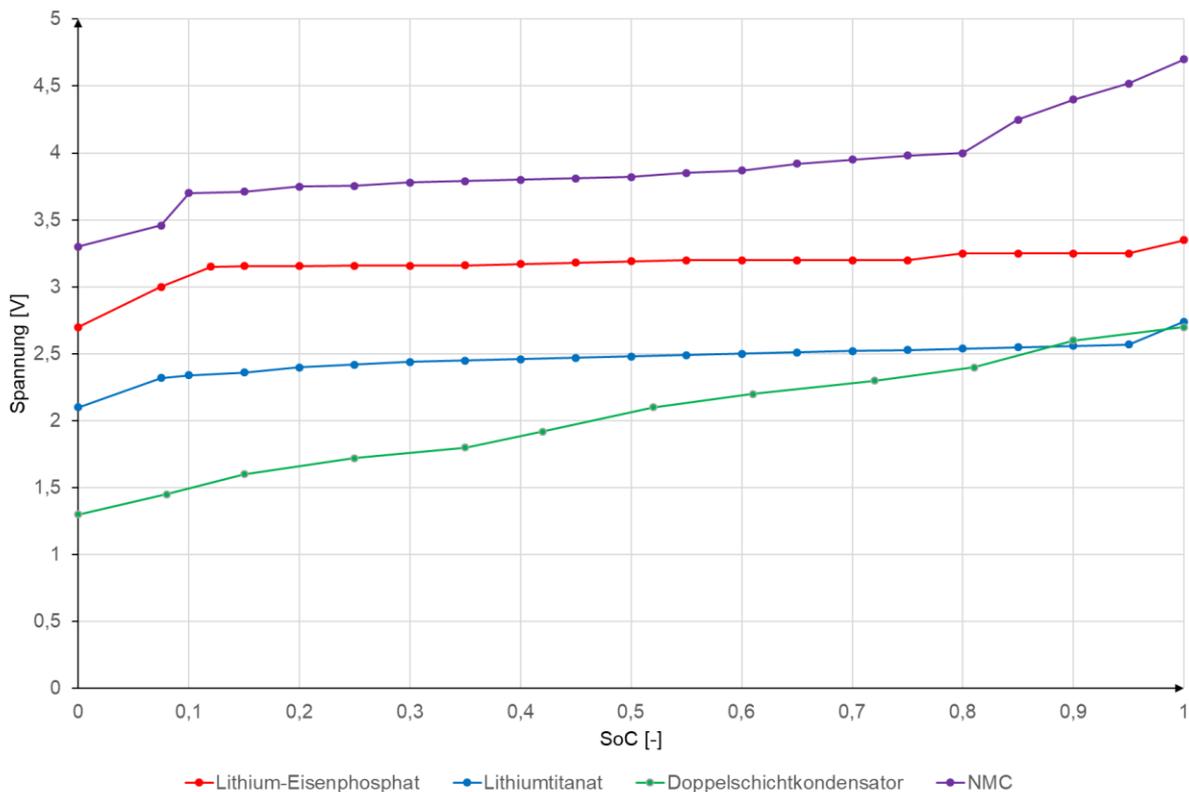


Abbildung 3-8: Ruhespannungsverläufe verschiedener Speichertechnologien, nach [82] [84]

### 3.3.2.2 Ladeverläufe

#### Entladen

Die Ladeverläufe von Energiespeichern spielen eine wichtige Rolle für den Betrieb von Hybrid- und Elektrofahrzeugen, da das Energiespeichersystem einerseits in der Lage sein muss große Ströme/Leistungen für Beschleunigungsvorgänge zu liefern und ebenso in der Lage sein sollte, die sich beim Bremsen ergebenden hohen Ströme und Leistungen mit steilem Gradienten aufzunehmen.

In Abbildung 3-9 sind die Verläufe der Kapazität in Abhängigkeit der Entladungsrate (C-Rate) bei einer Arbeitstemperatur von 25 °C dargestellt. Für alle Speichertechnologien ist zu erkennen, dass die verfügbare Kapazität mit zunehmender Entladungsrate abnimmt. Jedoch ergeben sich für identische Entladungsraten erhebliche Differenzen zwischen den Kapazitäten der Batterien und des Doppelschichtkondensators. Der Doppelschichtkondensator (SC) ist den Li-Batterien im Hinblick auf den Kapazitätserhalt überlegen. Er kann mit recht hohen Raten, bis zu 60 C, entladen werden, wobei die Ursprungskapazität um weniger als 5% abnimmt.

Im Gegensatz zum Kondensator, der die Ladungsträger elektrostatisch an der Elektrodenoberfläche speichert, wird die Energie in Batterien elektrochemisch durch Oxidations- und Redoxreaktionsvorgänge gespeichert. Daraus ergeben sich einerseits hohe Energiedichten, aber gleichzeitig auch verhältnismäßig langsame Reaktionsgeschwindigkeiten.

Es ist zu erkennen, dass die LTO-Batterie im Vergleich mit der LFP-Batterie und der NMC-Batterie überragende Entladeraten aufweist und demnach besser geeignet ist, Leistungen mit extrem variierenden und steilen Gradienten abzugeben.

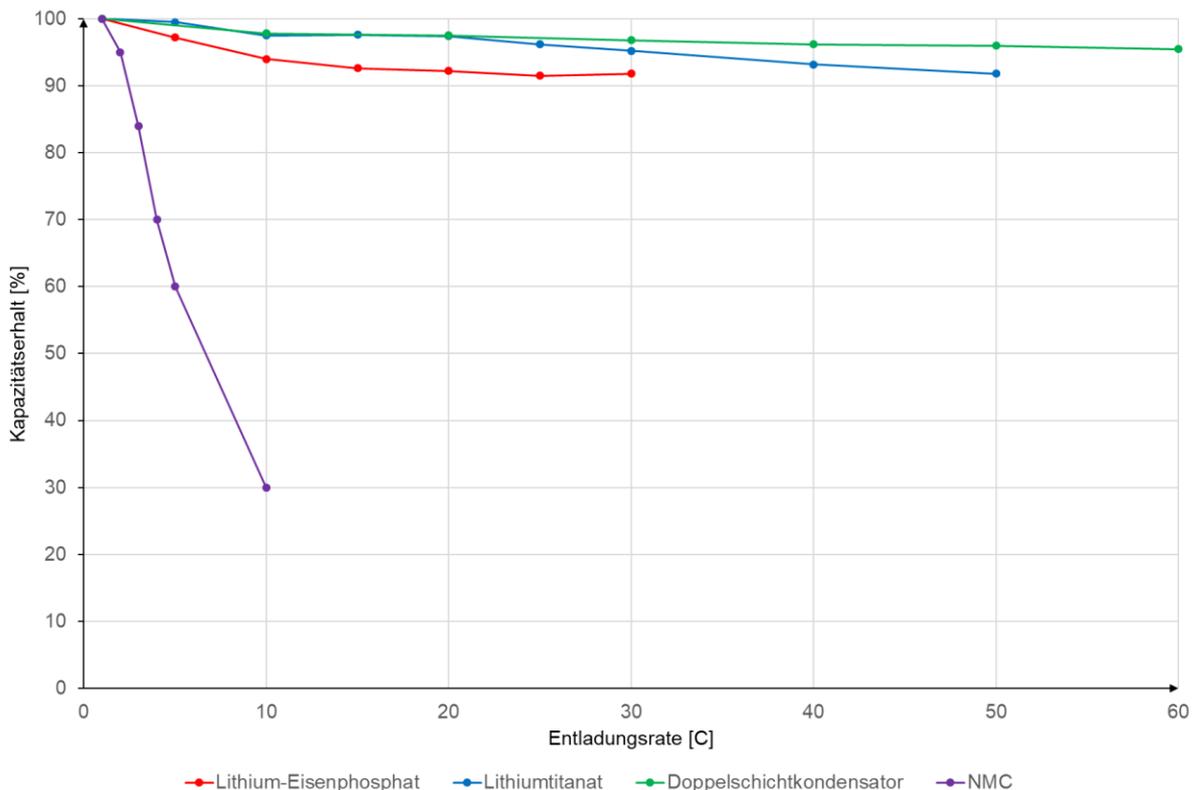


Abbildung 3-9: Kapazitätserhalt in Abhängigkeit der Entladungsrate verschiedener Speichertechnologien, nach [82] [84] [83]

Zudem ist die Kapazität von Li-Batterien stark abhängig von der Umgebungstemperatur. Bei niedrigen Temperaturen verringert sich die Leitfähigkeit des Elektrolyts, wodurch sich die elektrochemischen Prozesse verlangsamen. In Folge erhöht sich der Innenwiderstand der Batterien und nutzbare Energie geht verloren. Unterhalb von  $-10\text{ °C}$  sollten die hier betrachteten Li-Speicher nicht betrieben werden. Dagegen funktioniert der Doppelschichtkondensator auch bei extremer Kälte und auch bei hohen Entladeraten wird die Kapazität nur minimal reduziert.

### Aufladen

Je höher der (Diesel-)Hybridisierungsgrad eines Elektrobusses ist, desto mehr Aufmerksamkeit sollte der Ladefähigkeit des Energiespeichers gewidmet werden, da die Rückgewinnung von Rekuperationsenergie für den Kraftstoffverbrauch von besonderer Bedeutung ist. Für Batterie-Trolleybusse steigt die Bedeutung der Ladefähigkeit mit zunehmender Länge der oberleitungsfreien Abschnitte an.

In Abbildung 3-10 sind die sich für verschiedene Ladestromraten ergebenden Zellspannungsverläufe über der relativen Kapazität für verschieden große Laderaten bei einer Arbeitstemperatur von 25 °C dargestellt. Demnach erreicht die Lithium-Eisenphosphat Batterie ihre Ladeschlussspannung bereits bei relativ kleinen Laderaten und kann nur bei relativ kleinen Laderaten die komplette zur Verfügung stehende Kapazität nutzen. Soll die Batterie komplett geladen werden, muss langsamer und mit geringerer Leistung nachgeladen werden. Zur Darstellung des NMC-Ladeverlaufs lagen keine Daten vor. Festzuhalten ist, dass die NMC-Batterie prinzipiell mit maximal 10 C aufgeladen werden können und bei Laderaten größer als drei die Ladeschlussspannung umgehend erreicht wird.

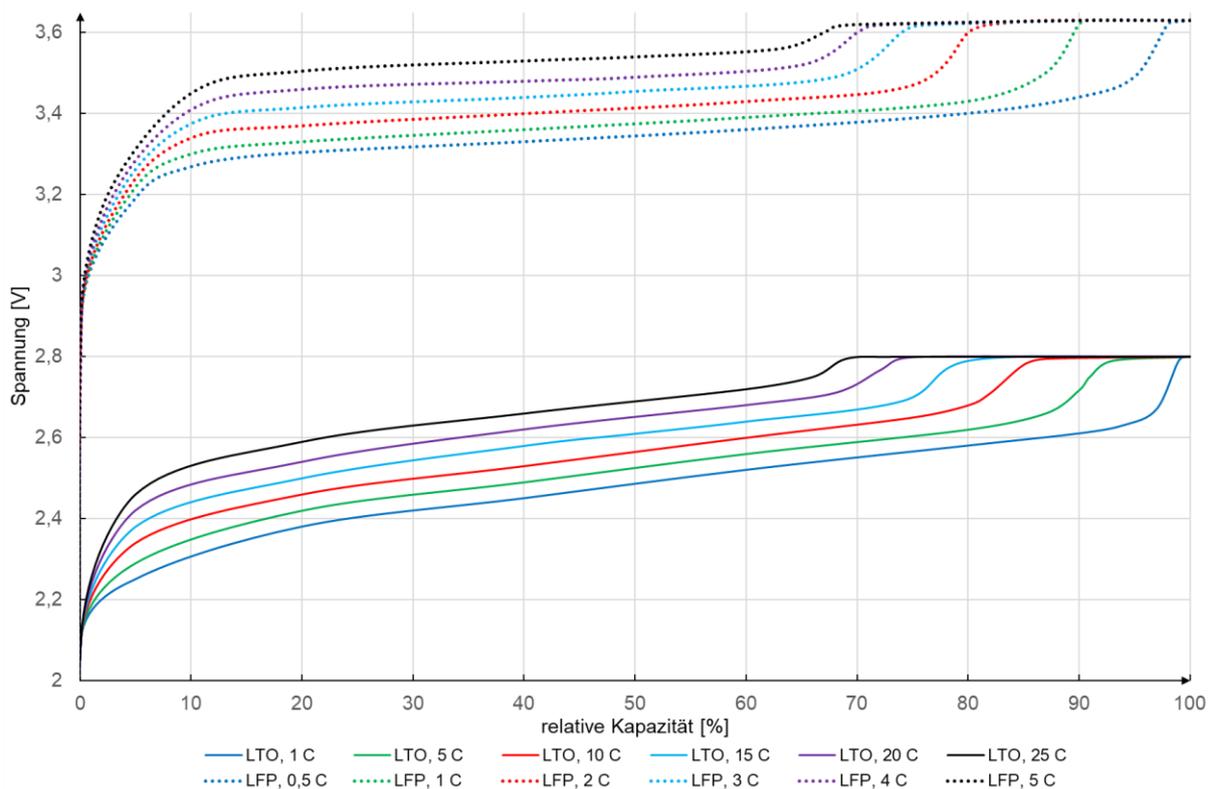


Abbildung 3-10: Vergleich der Aufladekurven von LTO und LFP, nach [82]

Üblicherweise werden Li-Batterien in einem Betriebsfenster zwischen 30% und 70% des SoC betrieben, um so ein Überladen bzw. zu tiefes Entladen zu vermeiden, welches signifikanten Einfluss auf die Länge der Lebensdauer hat.

Im Fahrbetrieb müssen Batterien von Elektrofahrzeugen teilweise Laderaten von 15 C bis 20 C aushalten können. Die LFP-Batterie kann bei einer Aufladerate von 10 C nur ca. bis zu 60% der Gesamtkapazität mit der CC-Stufe (Konstantstrom) aufgeladen werden. Die restlichen 40% müssen mittels CV-Ladeverfahren (Konstantspannung) aufgeladen werden. Bei der NMC-Batterie tritt dieser Effekt bereits bei Laderaten von 3 C ein. Dies zeigt, dass die LFP Batterie gegenüber der LTO-Batterie eine deutlich verminderte Schnellladefähigkeit besitzt und die NMC-Batterie für Schnellladungen prinzipiell ungeeignet ist.

Nicht dargestellt ist der sehr einfache, da lineare und von der Laderate unabhängige Aufladeverlauf des Doppelschichtkondensators. Unabhängig von den Ladestromraten ist die Ladeleistung des Superkondensators elektrochemischen Energiespeichern deutlich überlegen.

### **3.3.2.3 Widerstands- und Leistungsverhalten**

Der Innenwiderstand der Batterie beeinflusst direkt die Ausgangsleistung, den Wirkungsgrad und die Wärmeerzeugung der Batterie und wird zudem verwendet, um den Gesundheitszustand der Batterie zu ermitteln (State of Health, SoH). Abbildung 3-11 vergleicht die Lade- und Entladewiderstandsverläufe von LTO- und LFP-Batterien. Es fällt auf, dass der Innenwiderstand der LTO-Batterie über den gesamten Betriebsbereich bedeutend geringer ist als von der LFP-Batterie – Folge des veränderten Elektrodenmaterials. Zudem unterscheiden sich die Verläufe von Lade- und Entladewiderstand bei der LFP-Batterie stärker als bei der LTO-Batterie. Laut [82] geht dies zu Lasten der maximal erzielbaren Reichweite.

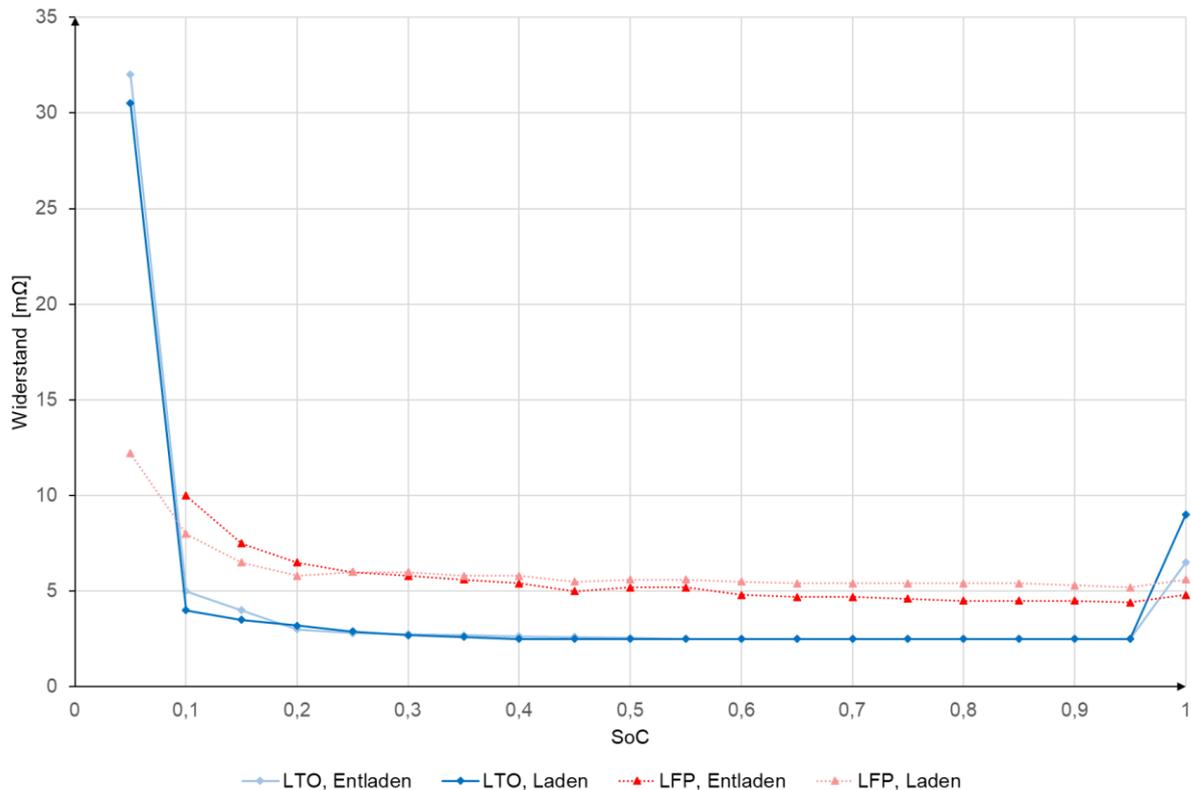


Abbildung 3-11: Vergleich der Lade- und Entladewiderstandsverläufe von LFP und LTO, nach [82]

Ein bedeutender Indikator für den Einsatz von Traktionsenergiespeichern sind die zugehörigen Leistungsmerkmale. So hängt beispielsweise der Grad der möglichen Hybridisierung vom Leistungsniveau des Energiespeichersystems ab. Abbildung 3-12 zeigt den sich ergebenden Verlauf der maximal nutzbaren spezifischen Leistung beim Entladen der Batterie (25 °C Arbeitstemperatur). Die spezifische nutzbare Leistung des Doppelschichtkondensators ist gegenüber den Batterien extrem erhöht. Dies zeigt eindrucksvoll, dass Kondensatoren besonders geeignet sind, wenn, wie beim Anfahren, in kurzen Zeiträumen hohe Leistungen benötigt werden. Der sich ergebende Leistungsverlauf zeigt die charakteristischen Vorteile der Lithiumtitanat-Speichertechnologie gegenüber der Eisenphosphat- bzw. Nickel-Mangan-Cobalt-Technologie.

Noch deutlicher werden die Vorteile bei Betrachtung der Aufladeverläufe in Abbildung 3-13 bzw. vergrößert dargestellt in Abbildung 3-14. Dabei zeigt sich, dass der Ladeleistungswert der LFP-Batterie signifikant schlechter ist gegenüber der LTO-Batterie. Die LTO-Batterie erscheint somit besser geeignet für Schnellladekonzepte und für Fahrzeugkonzepte bei denen die Rückgewinnung von möglichst viel Bremsenergie besondere Bedeutung beigemessen wird. Auf die Darstellung der NMC-Batterie wurde an der Stelle verzichtet, da sie, wie bereits erwähnt, nicht für Schnellladungen geeignet ist.

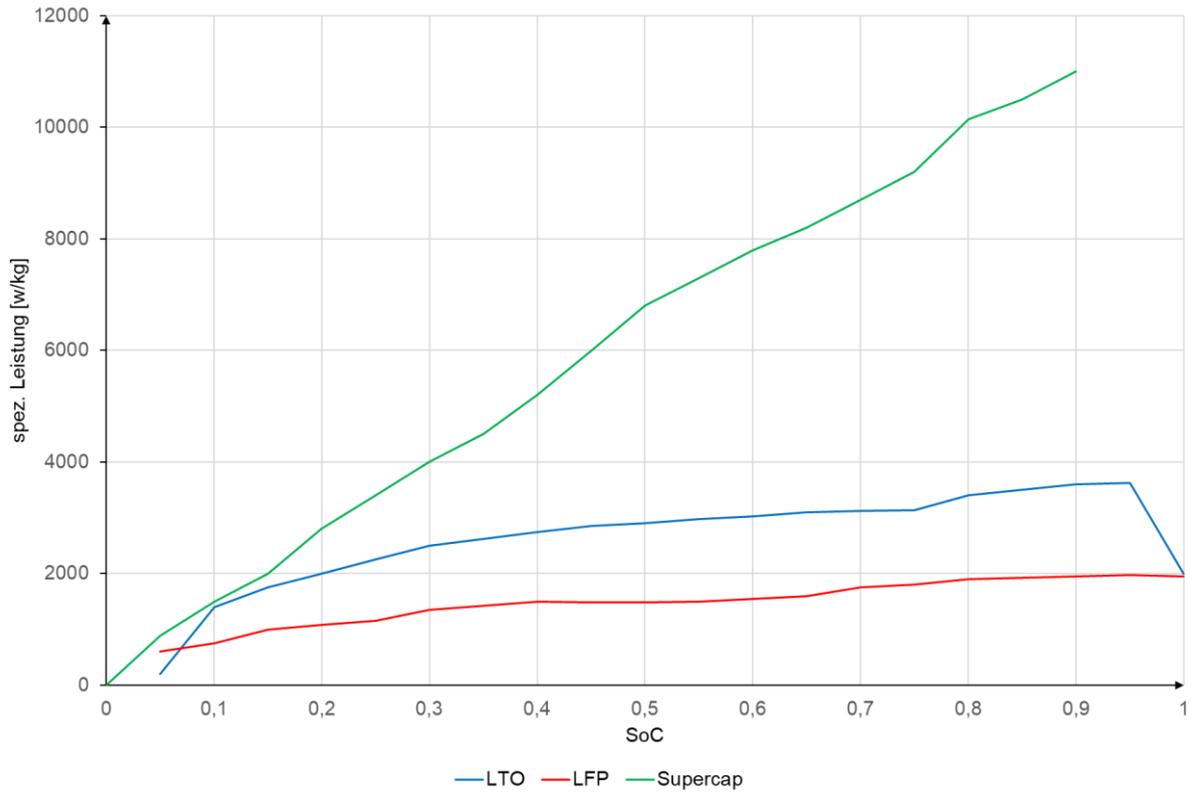


Abbildung 3-12: Verlauf der maximalen Entladeleistungen mit Hilfe eines Hybrid Pulse Power Test, nach [82]

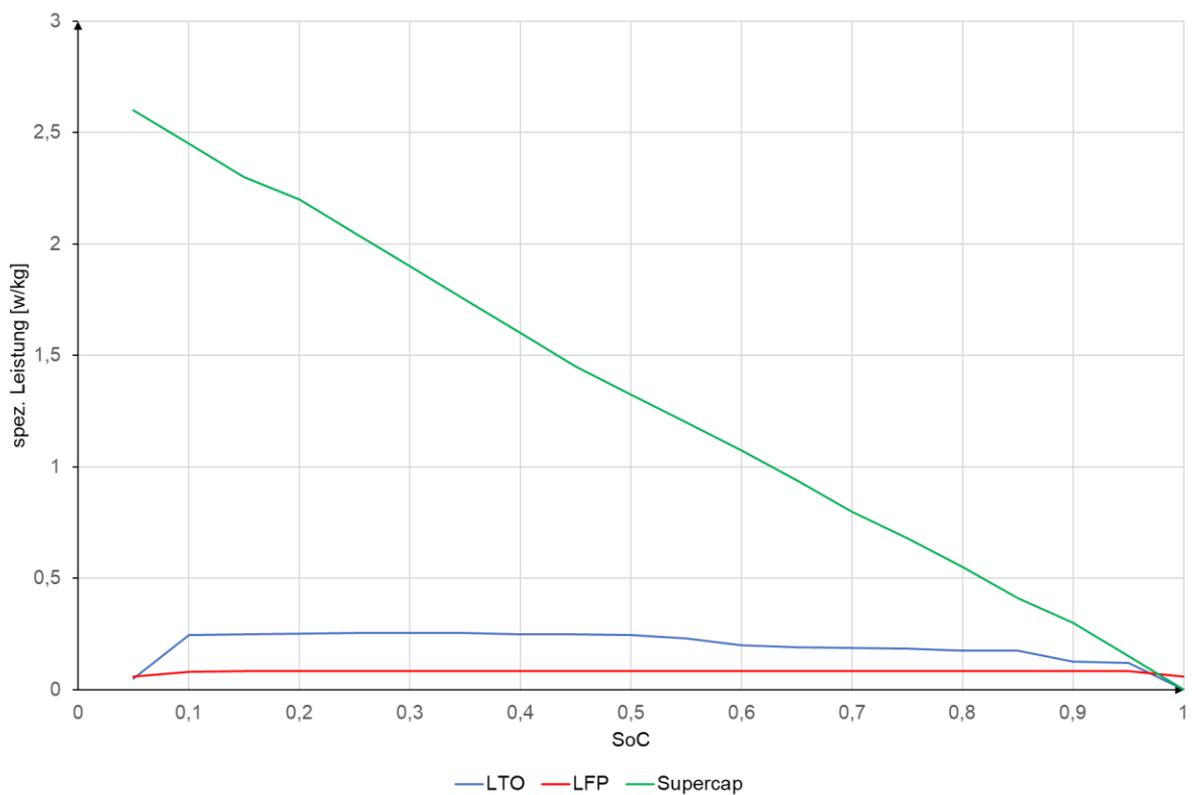


Abbildung 3-13: Vergleich der maximalen Aufladeleistungen, nach [82]

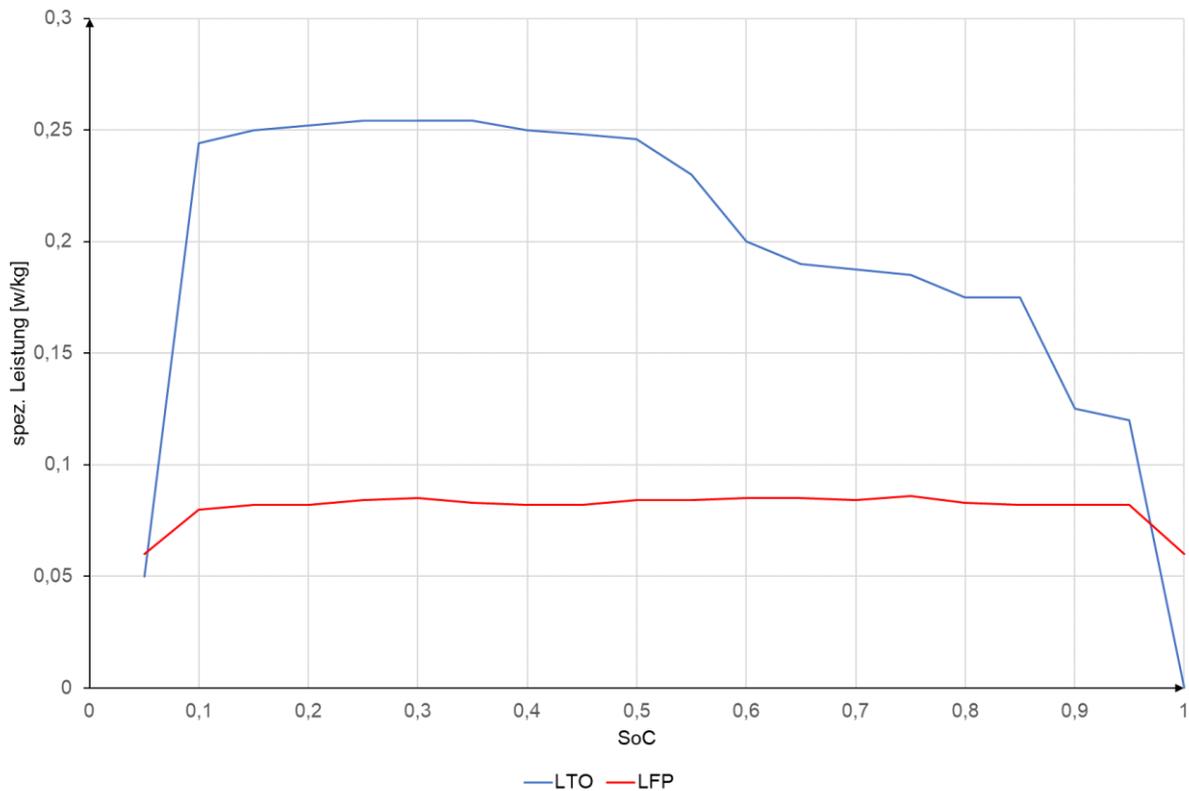


Abbildung 3-14: Vergleich der maximalen Aufladeleistungen der Li-Speicher, nach [82]

Da der nominale Arbeitsbereich von Li-Batterien zwischen 30% und 80% SoC liegt, erscheint das temperaturabhängige Lade- und Entladeverhalten der Speicher bei einem SoC von 50% besonders repräsentativ. Die sich ergebenden Verläufe sind in Abbildung 3-15 und Abbildung 3-16 dargestellt. Einerseits sinkt, mit abnehmender Temperatur, die Ladung und somit auch die Entladungsleistungsrates. Andererseits ist zu erkennen, dass LFP-Batterien bei sehr tiefen Temperaturen gar nicht betrieben werden sollten.

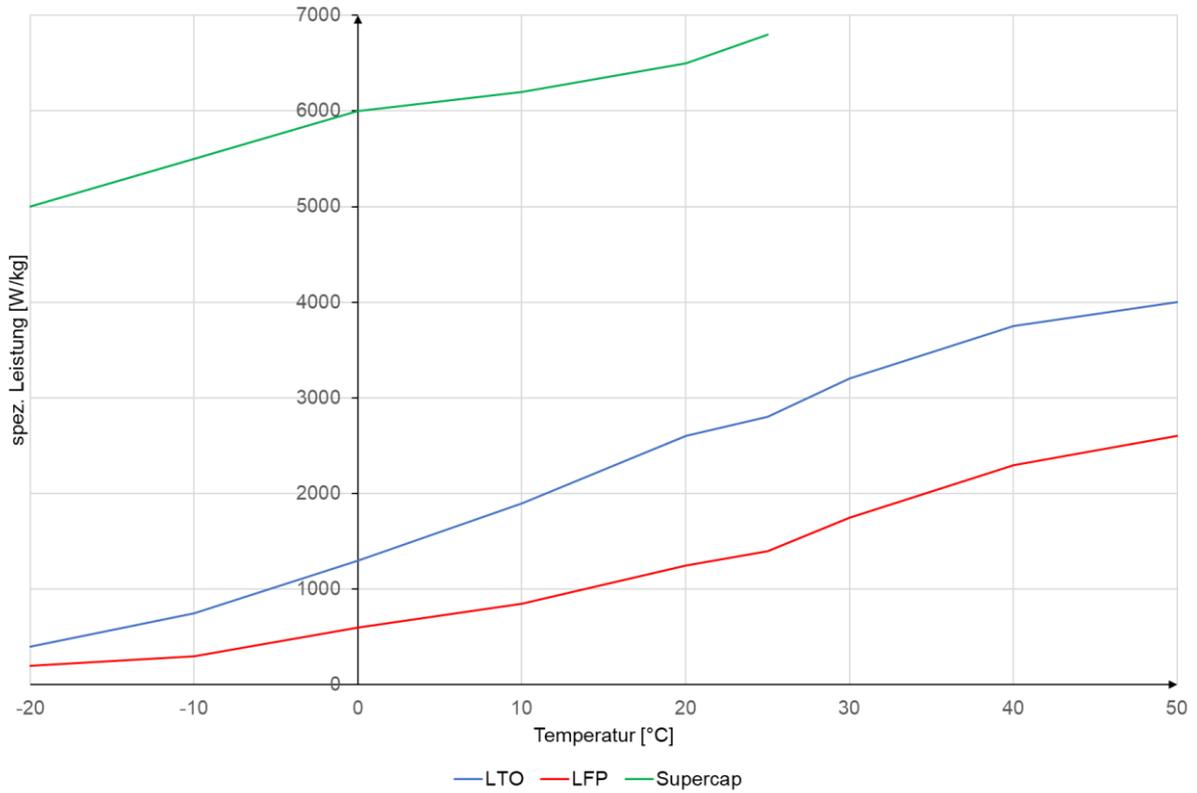


Abbildung 3-15: Vergleich der spezifischen Entladeleistungen bei 50% SoC, nach [82]

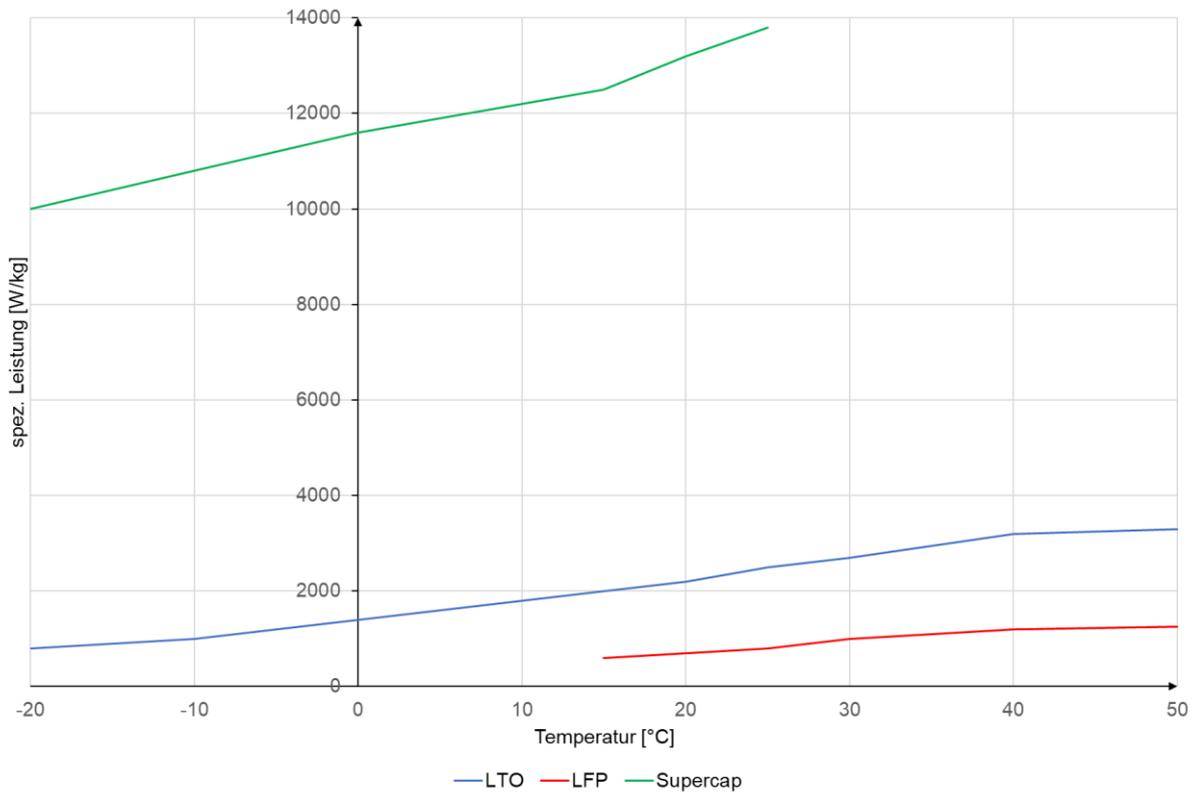


Abbildung 3-16: Vergleich der spezifischen Aufladeleistungen bei 50% SoC, nach [82]

### 3.3.2.4 Vergleich der spezifischen Energien

Li-Ionen-Akkus sind für die Elektrotraktion aufgrund ihrer hohen spezifischen Energien besonders attraktiv. Abbildung 3-17 vergleicht die spezifischen Energien von LFP, LTO, NMC und Supercap bei einer Entladerate von 1 C bei 25 °C Arbeitstemperatur. Es wird deutlich, dass Doppelschichtkondensatoren als alleinige Energiespeicher ungeeignet sind. Es zeigt sich, dass die NMC-Batterie und die LFP-Batterie gegenüber der LTO-Batterie größere Energiemengen bei gleicher Masse aufnehmen können. Nicht dargestellt ist, dass auch die volumetrische Energiedichte der LTO-Batterie schlechter ausfällt als bei NMC- und LFP-Batterien. Das heißt, LTO-Batterien sind bei gleichen Kapazitäten größer und schwerer und somit weniger geeignet, wenn mit Hilfe des Energiespeichers große Distanzen ohne zwischenzeitliches Nachladen zurückgelegt werden sollen.

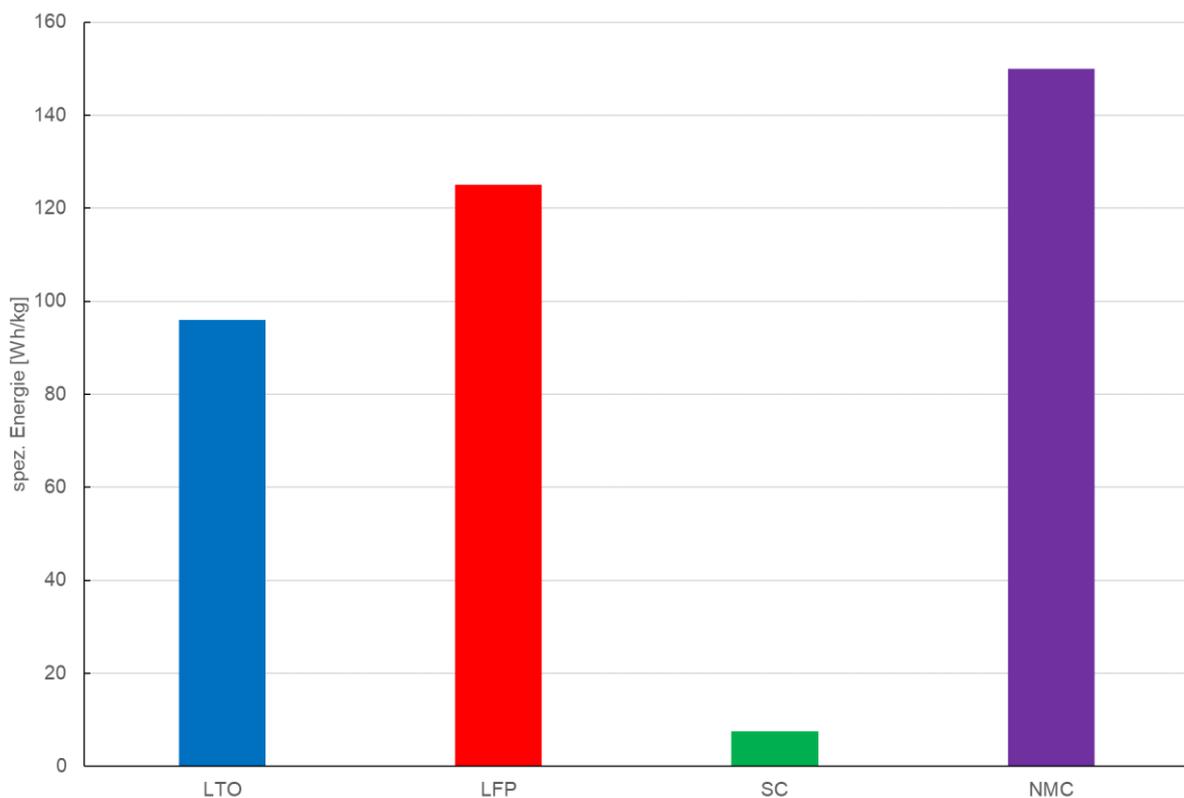


Abbildung 3-17: Vergleich der spezifischen Energien, nach [82] [82]

### 3.3.2.5 Zusammenfassung

Aus obigen Ausführungen geht hervor, dass keiner der vorgestellten Energiespeicher in allen Aspekten den anderen Speichertechnologien überlegen ist. Alle Energiespeicher weisen charakteristische Mängel auf, die ihren positiven Eigenschaften entgegenstehen. Letztendlich muss für jede Anwendung ein Kompromiss aus den verschiedenen Aspekten der Performance gefunden werden. In Abbildung 3-18 und Tabelle 3-11 sind die wichtigsten Eigenschaften der Energiespeicher übersichtlich gegenübergestellt.

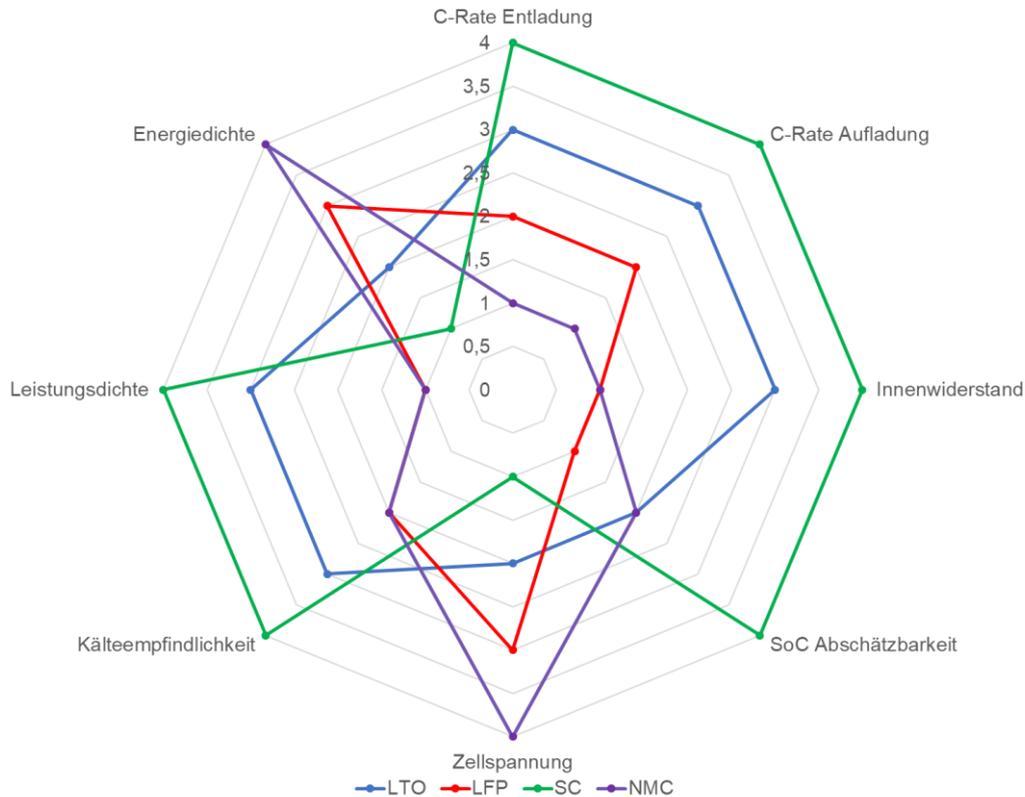


Abbildung 3-18: vergleichende Gegenüberstellung verschiedener Traktionsspeicher, nach [81] [83]

Tabelle 3-11: Eigenschaften unterschiedlicher Li-Ionen-Batterien, nach [83]

LFP-Batterien	LTO-Batterien	NMC-Batterien
- Sehr hohe thermische Stabilität	- Hohe Materialkosten	- Durchschnittliches Spannungspotenzial (3,8 V)
- Moderates Spannungspotenzial: 3,2 V	- Moderate Energiedichte: ca. 90 Wh/kg	- Hohe Energiedichte bis zu 230 Wh/kg
- Gute Energiedichte: ca. 130 Wh/kg	- Hochstromfähig	- Moderate Lebensdauer
- Hohe Lebensdauer	- Hohe Zyklenzahl	- Gute Zyklenfestigkeit
- Gute Zyklenfestigkeit	- Niedriges Spannungsniveau	- Günstige Herstellungskosten
- Günstige Materialkosten	- Sehr hohe Eigensicherheit	- Hohe Eigensicherheit
	- Hohe Materialkosten	- Geringe Entladestromstärke: 1 bis 10 C

## 3.4 Elektrische Infrastruktur

### 3.4.1 Grundaufbau

Die elektrische Infrastruktur eines Obus-Betriebs besteht aus folgenden Hauptkomponenten:

Unterwerk	Entnimmt Elektroenergie aus dem öffentlichen Versorgungsnetz und passt deren Form an die Bedingungen des Verkehrsmittels an.
Speiseleitung	Elektrische Verbindung zwischen Unterwerk und Fahrleitung (in der Regel Kabel).
Fahrleitung (auch Oberleitung)	Versorgt die Fahrzeuge mit Energie. Da sich die Fahrzeuge bewegen, ist ein ortsveränderlicher Kontakt erforderlich (in der Regel offener beschliffener Leiter).

Da die Speiseweite (die Länge von Speise- und Fahrleitungen ab Unterwerk) begrenzt ist, wird ein Fahrleitungsnetz von mehreren Unterwerken gespeist.

Für Fahrzeuge mit Batteriespeicher können zusätzlich stationäre Ladeeinrichtungen vorhanden sein, die Fahrzeuge im Stillstand mit Energie versorgen (z.B. im Depot oder an Endhaltestellen).

### 3.4.2 Wahl des Spannungssystems

Fahrleitungen im öffentlichen Straßenraum können nur mit einer begrenzten Spannungshöhe betrieben werden, um das Überschlagsrisiko zu vermindern. Relativ niedrige Spannungen bedingen höhere Ströme. Um den induktiven Spannungsabfall zu vermeiden, werden Straßenbahnen und Obus-Systeme mit Gleichspannung und nicht mit Wechselspannung betrieben. Dies bedingt wiederum Gleichrichteranlagen (sog. Gleichrichter-Unterwerke) zur Speisung der Fahrleitung.

Genormte Spannungsebenen nach EN 50163 und EN 50502 sind Nennspannungen von 600 V und 750 V Gleichspannung (siehe Tabelle 3-12). Die Normen erlauben gegenüber sonstigen Energieversorgungsnetzen relativ hohe Toleranzen in der Spannungshöhe, das heißt, die Fahrzeuge müssen für einen weiten Schwankungsbereich der Spannung ausgelegt werden. Die Toleranz nach unten ist erforderlich, weil sich Fahrzeuge bewegen und über den Weg vom Unterwerk zum Fahrzeug ein Spannungsabfall zu verzeichnen ist. Dieser steigt, je weiter man sich von der Einspeisung des Gleichrichters in die Fahrleitung entfernt. Eine größere Toleranz erlaubt längere Speiseweiten und damit eine Begrenzung der Investitionen in Unterwerke. Die Toleranz nach oben ist erforderlich, damit bremsende Fahrzeuge die verfügbare Leistung mit einer brauchbaren Reichweite in das Fahrleitungsnetz zurückspeisen können.

Straßenbahn- und Obus-Netze wurden über viele Jahrzehnte fast ausschließlich mit einer Nennspannung von 600 V DC betrieben. In den letzten Jahren stellen immer mehr Betriebe auf 750 V DC um, weil dies Vorteile hinsichtlich Speiseweiten, Kurzschlusserkennbarkeit und Verringerung thermischer Verluste bringt. Es wird daher empfohlen, in Spandau von vornherein eine Nennspannung von 750 V DC zu verwenden. Eine noch höhere Nennspannung zu verwenden hätte den Nachteil, dass dann keine normierten Komponenten am Markt verfügbar wären.

Tabelle 3-12: Auszug aus EN 50163 (Tabelle 1) mit den für Obus-Systeme üblichen Nennspannungen und deren Toleranzgrenzen. An der unteren Toleranzgrenze wird bei diesen beiden Nennspannungen nicht zwischen Dauer- und Kurzzeitwerten unterschieden.

Niedrigste nichtpermanente Spannung $U_{\min 2}$	Niedrigste Dauerspannung $U_{\min 1}$	Nennspannung $U_N$	Höchste Dauerspannung $U_{\max 1}$	Höchste nichtpermanente Spannung $U_{\max 2}$
400 V	400 V	<b>600 V</b>	720 V	800 V
500 V	500 V	<b>750 V</b>	900 V	1 000 V

### 3.4.3 Unterwerke

Unterwerke entnehmen Elektroenergie aus dem öffentlichen Versorgungsnetz der Mittelspannungsebene, also Dreiphasenwechselspannung 10...30 kV mit Netzfrequenz 50 Hz. Sie wandeln die Spannungshöhe und wandeln Wechselspannung in Gleichspannung. Sie speisen die Energie dann über Speiseleitungen in das Fahrleitungsnetz ein (Nennspannungen in der Regel 600 V oder 750 V Gleichspannung). Auf beiden Seiten, zum Versorgungsnetz und zum Fahrleitungsnetz, gibt es Schaltanlagen zur Trennung des Unterwerks von den Netzen.

Abbildung 3-19 zeigt prinzipielle Struktur eines Gleichrichter-Unterwerks.

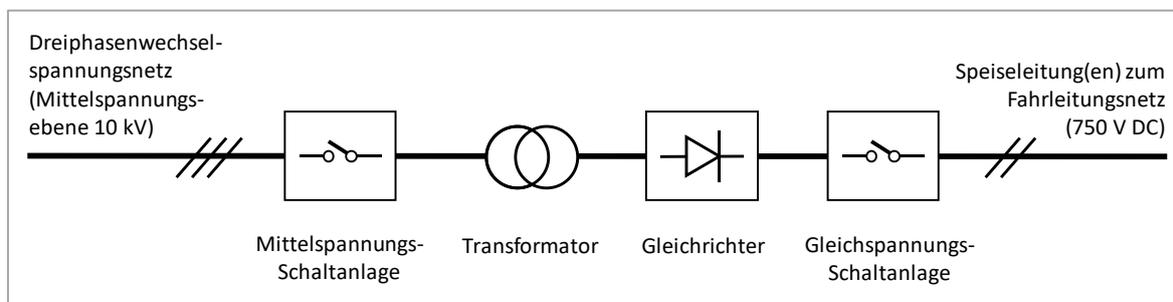


Abbildung 3-19: Prinzipielle Struktur eines Gleichrichter-Unterwerks

Unterwerke können zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit und/oder der Redundanz mehrere Transformator-Gleichrichter-Einheiten besitzen. 12-pulsige Gleichrichter sind heute Stand der Technik, weil sie die Oberschwingungsbelastung des Fahrleitungsnetzes deutlich verringern. Generell können bei kleineren Nennleistungen der Gleichrichter auch 6-pulsige Gleichrichter eingesetzt werden. Diese Entscheidung ist im Rahmen der Entwurfsplanung und weiteren Planungsstufen mit dem lokalen Energieversorger abzustimmen. Mittels Simulation des Mittelspannungsnetzes können die Auswirkungen der unterschiedlichen Gleichrichterbrückenschaltungen dargestellt und eine Entscheidungsgrundlage gelegt werden.

Die Einspeisung in das Fahrleitungsnetz erfolgt mit einer Spannung von 10...20 % oberhalb der Nennspannung. Man nutzt hierbei die zulässige Toleranz (siehe Tabelle 3-12) aus, um durch die höhere Spannung die Ströme und damit die Verluste zu verringern.

Die umgekehrte Energierichtung, also die Übertragung von rückgespeicherter Bremsenergie der Fahrzeuge durch das Unterwerk in das öffentliche Versorgungsnetz, wird nur extrem selten angewandt. Ein bidirektionaler Gleich- bzw. Wechselrichter ist sehr viel teurer als ein einfacher monodirektionaler Gleichrichter und die zurückübertragene Energie wäre nur sehr gering, weil es im Fahrleitungsnetz oft genug Energie abnehmende Fahrzeuge gibt. Durch einen hohen Netzvermaschungsgrad und zusätzliche Energiespeicher im Gleichspannungsnetz lässt sich ein hoher Ausnutzungsgrad rekuperierter Energie erreichen.

Das Unterwerk enthält Steuer- und Schutzfunktionen, um bei Fehlerzuständen (z.B. Kurzschluss), Überlastung oder bei Arbeiten eine Abschaltung vorzunehmen. Diese Funktionen müssen im Rahmen weiterer Planungsphasen konkret definiert und im Betrieb koordiniert werden.

#### **3.4.4 Konfiguration des Fahrleitungsnetzes**

Ein Obus-Fahrleitungsnetz besteht in seiner Grundform aus zwei parallelen Fahrdrähten, die gegeneinander und gegen Erde isoliert sind. Eine Erweiterung aus Gründen der mechanischen Tragfähigkeit (Kettenwerk) oder elektrischen Belastbarkeit (parallele Verstärkungsleitungen) ist möglich.

Die Konfiguration des Netzes soll neben der Hauptaufgabe, den Energietransfer zu und zwischen den Fahrzeugen zu gewährleisten, zwei Aufgaben erfüllen:

- Selektivität im Fehlerfall,
- geringe Übertragungsverluste.

Selektivität bedeutet, dass im Fall eines Fehlers wie Kurzschluss oder Beschädigung ein möglichst kleiner Teil des Netzes betroffen ist. Am einfachsten wäre dies mit einer möglichst kleinteiligen Zerlegung des Netzes in voneinander isolierte Abschnitte zu erreichen. Die Senkung von Übertragungsverlusten ist dagegen zu erreichen, wenn möglichst viele Leiter

parallelgeschaltet werden, also beispielsweise die Leiter gleicher Polarität beider Fahrtrichtungen („Querkupplung“). Das bedeutet dann aber, dass im Fehlerfall beide Fahrtrichtungen abgeschaltet werden.

Ausgeführte Anlagen werden in der Mehrzahl mit Querkupplung und zweiseitiger Speisung gebaut. Die Trennung der Fahrleitungsabschnitte findet in Unterwerksnähe statt. Das Prinzip zeigt Abbildung 3-21.

Man unterscheidet bei der Speisung eines Fahrleitungsabschnitts zwischen

- einseitiger Speisung (Unterwerk speist an einem Ende ein, das andere Abschnitts-ende ist isoliert) und
- zweiseitiger Speisung. Dabei wird der Fahrleitungsabschnitt von zwei Seiten gespeist, es befinden sich Unterwerke an seinen beiden Enden. Dies hat deutliche Vorteile für die Spannungshaltung und die Senkung der Übertragungsverluste, weil sich die Ströme auf zwei Wege aufteilen. Jedoch muss Sorge getragen werden, dass im Bedarfsfall beide Unterwerke abschalten.

Siehe auch Abbildung 3-20.

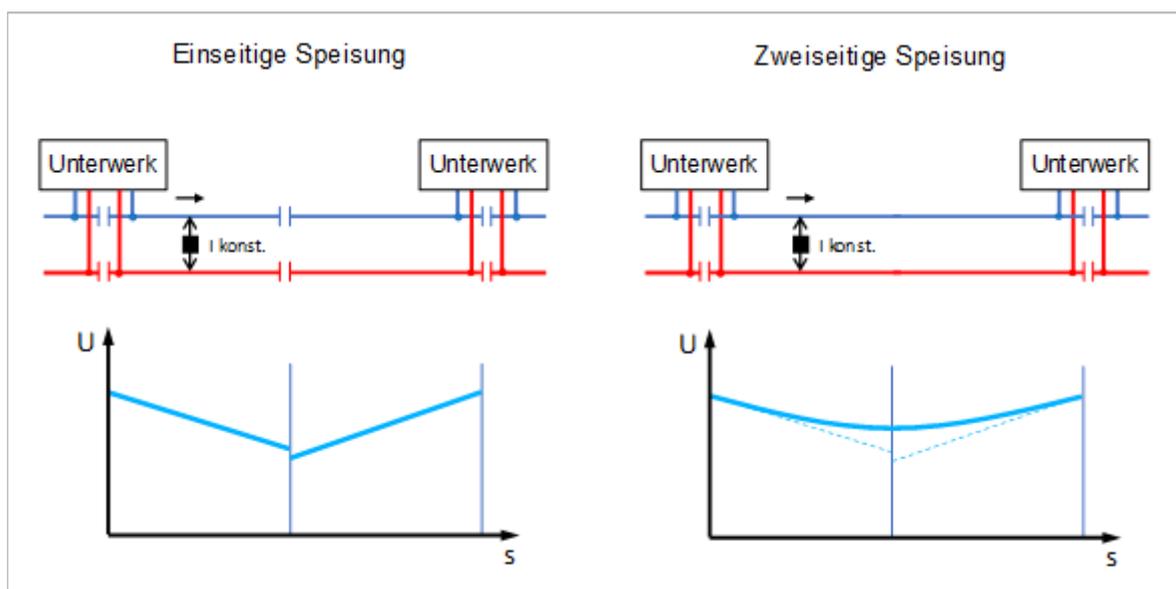


Abbildung 3-20: Gegenüberstellung von einseitiger Speisung und zweiseitiger Speisung, oben prinzipielle Anordnung, unten Spannung über Weg bei Konstantstrom über der Strecke

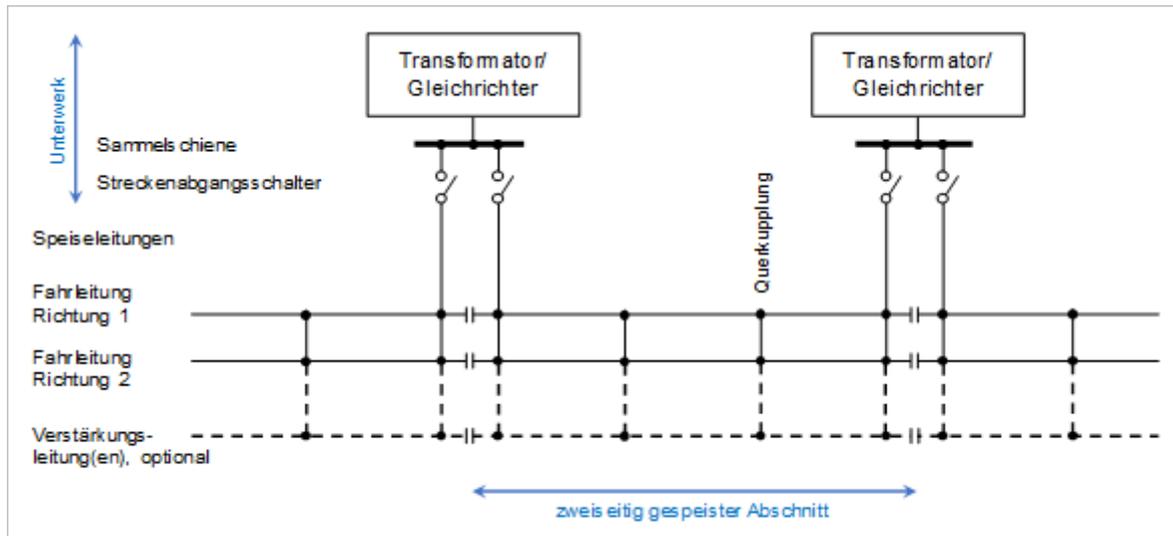


Abbildung 3-21: Üblicherweise gewählte Konfiguration der Fahrleitung mit Streckentrennung vor dem Unterwerk, zweiseitiger Speisung und Querkupplung. Optional ist die Parallelführung der Verstärkungsleitung(en). Alle Linien sind zweipolig (Plus/Minus) zu verstehen.

Bei zweiseitiger Speisung sind die Aufwendungen für die Kurzschlusserkennung höher, denn es muss sichergestellt werden, dass ein Abschnitt mit Kurzschluss an beiden Enden abgeschaltet wird. Die Hochstromauslösung des Streckenabgangsschalters eines Unterwerks vermag jedoch einen Kurzschluss am anderen Ende des Abschnitts oft nicht zu erkennen. Deshalb werden sogenannte Mitnahmeschaltungen eingerichtet. Wenn ein Schalter auslöst, wird über Fernwirktechnik auch der andere Schalter ausgeschaltet.

### 3.4.5 Isolationsfehler und Erdung

Gleichspannungsbahnen werden zur Vermeidung der Gefahr von Streustromkorrosion mit isoliertem Gleis ausgeführt. Da das Gleis somit ein anderes Potenzial als der Boden annehmen kann, sind Maßnahmen zur Vermeidung einer elektrischen Gefährdung von Personen zu ergreifen, in der Regel durch Wahl einer Dimensionierung mit geringem Gleis-Erde-Potenzial.

Bei Obus-Fahrleitungssystemen sind beide Fahrdrähte isoliert in der Luft geführt. Damit sind sowohl Streuströme, als auch der Abgriff eines gefährdenden Potenzials, nur im Fehlerfall möglich (unter der Voraussetzung, dass sich Personen nicht der Fahrleitung nähern).

Eine absichtliche häufige starre Erdung eines der beiden Fahrleitungspole entlang des Weges ist zur Vermeidung von Streuströmen nicht möglich, dennoch treten Erdverbindungen, gewollt und ungewollt, praktisch auf. Die Gefährdungsfälle hängen von der Art der Erdverbindung ab:

- Ungewollte punktuelle Verbindung Fahrleitung – Erde oder Fahrleitung – Fahrzeuggehäuse, z.B. durch Funktionsverlust eines Isolators

Solange es bei einer einzigen punktuellen Verbindung bleibt, besteht keine Gefahr. Allerdings bleibt die Verbindung oft lange unbemerkt. Dann besteht das Risiko, dass früher oder später eine zweite Fehlerstelle entsteht. Es entsteht in jedem Falle ein Streustrom, der zu gefährlichen Korrosionswirkungen führen kann. Des Weiteren ist es möglich, dass bei räumlicher Nähe der Fehlerstellen eine Potenzialdifferenz abgegriffen werden kann.

Deshalb ist es nötig, dass Isolationsmessungen durchgeführt werden, um bereits den ersten Fehler zu beseitigen. Hinsichtlich der Infrastruktur kann dies in festzulegenden Intervallen erfolgen. Auf dem Fahrzeug muss die Isolationsmessung permanent aktiv sein, da sich im Fahrzeug viele Menschen befinden und das Risiko zu hoch ist, dass Fehler unmittelbar zur Gefährdung von Personen führen. Am gefährlichsten ist hier eine Potenzialdifferenz zwischen Erde und Fahrzeugkasten. Deshalb ist bei Ansprechen der Isolationsüberwachung das Fahrzeug von der Fahrleitung zu trennen und ggf. zu räumen.

Um bereits die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Isolationsfehlers auf dem Fahrzeug zu mindern, ist eine doppelte Isolation gefordert (siehe EN 50502).

- Absichtliche dauerhafte Erdung eines Fahrdrahtpols im Unterwerk in einem Punkt

Dies vereinfacht den Schutz des Personals im Unterwerk gegen gefährliche Potenzialdifferenzen und erlaubt die einfache Messung eines ungewollten Ableitstroms bzw. Isolationsfehlers. Andererseits erleichtert diese Erdung das Fließen von Ableit- und Fehlerströmen. Es genügt nun ein Isolationsfehler zu einer Gefährdung oder zum Streustrom, während ohne Erdung ein Doppelfehler nötig wäre.

Der Schutz des Instandhaltungspersonals bzw. die Durchführbarkeit einer Messung kann auch erreicht werden, wenn die Erdung nur kurzzeitig hergestellt wird, also z.B., wenn eine Schutzeinrichtung eine zu hohe Potenzialdifferenz zwischen Rückleitersammelschiene und Erdpotential detektiert. Es kann dann sofort Instandhaltungspersonal zur Fehlersuche aktiviert werden.

Wenn im Unterwerk ein Fahrdrahtpol geerdet ist, dann ist keine zweiseitige Speisung mehr möglich (siehe EN 50122-1, Kapitel 5.6.3.3), weil dann eine Erdverbindung von zwei Punkten verschiedenen Potentials hergestellt wird. Da eine zweiseitige Speisung vorteilhaft für Spannungshaltung und Verlustvermeidung ist (siehe Kapitel 3.4.4), kann eine Erdung eines Fahrdrahtpols im Unterwerk nicht empfohlen werden.

- Ungewollte Verbindung durch gemeinsame Speisung von Straßenbahn und Obus aus einem Unterwerk bei gleichzeitiger niedriger Isolation des Straßenbahngleises

Letzteres ist trotz isoliertem Aufbau des Straßenbahngleises nicht grundsätzlich vermeidbar, zum Beispiel bei Regen. Es treten dann die bereits oben beschriebenen Probleme bzw. Risiken auf. Nach Möglichkeit sollten daher Obus- und Straßenbahnfahrleitung aus galvanisch getrennten Gleichrichtern gespeist werden.

Empfohlen wird daher ein vollständig isolierter Aufbau des Gleichspannungsnetzes ohne Erdung in Verbindung mit Maßnahmen der Isolationsmessung und zur Erkennung/Vermeidung von abgreifbaren Potenzialdifferenzen.

Im Gegensatz zu Schienenbahnen führen Isolationsfehler und Fahrleitungsrisse selten zu Kurzschlüssen. Trotzdem müssen die Schutzrichtungen des Unterwerks einen Kurzschluss erkennen können, um eine Überlastung der Betriebsmittel zu verhindern (siehe Kapitel 3.7.2).

Für alle Bahnen mit Fahrleitung, so auch bei Obus/HObus, definiert EN 50122-1 Räume, in denen Maßnahmen zur Verhinderung von Potenzialdifferenzen durchzuführen sind (z.B. Potenzialausgleich). Dies hat in definierten Bereichen zu geschehen:

- Oberleitungsbereich (der Bereich, den eine herabfallende Fahrleitung treffen könnte, z.B. Geländer) und
- Stromabnehmerbereich (der Bereich, in den ein gebrochener oder entgleister Stromabnehmer hineinragen kann, z.B. Stromabnehmer trifft einen Brückenträger über der Fahrleitung).

Dies bedeutet, dass bauliche Maßnahmen auch an Objekten durchzuführen sind, die nicht zur Infrastruktur des HObus-Netzes gehören und gegebenenfalls Eigentum Dritter sein können.

### **3.4.6 Fahrleitung und Stromabnehmer**

#### **3.4.6.1 Grundlagen**

Im Gegensatz zur Schienenbahn wird vom Obus eine gewisse seitliche Flexibilität erwartet, z.B. um andere Fahrzeuge überholen zu können. Daher ist der Stromabnehmer entweder seitlich schwenkbar (konventionelle Systeme, Abschnitt 3.4.6.2) oder er hat eine Schleifleiste mit einer gewissen Breite (Sonderbauarten, Abschnitt 3.4.6.3).

Die Straßenbahn besitzt üblicherweise eine einpolige Fahrleitung; die Rückleitung erfolgt über die Schienen. Der Obus fährt dagegen auf einer nicht-leitfähigen Fahrbahn. Daher muss Hin- und Rückleitung des Stroms durch eine zweipolige Fahrleitung realisiert werden. Versuchsweise gebaute Systeme mit in die Fahrbahn eingelassener Rückleitungsschiene haben sich praktisch nicht bewährt (hier wäre das Fahrzeug auch wieder streng spurgebunden).

Die zweipolige Fahrleitung des Obusses wird mit zwei parallel aufgehängenen Fahrdrähten ausgeführt. Auf Straßen, die Obus-Verkehr in beide Richtungen aufweisen, hängen also zwei Fahrdrahtpaare parallel. Die Aufhängung kann geschehen durch Maste mit Ausleger oder durch Quertragseile. Die Quertragseile werden ihrerseits an Masten oder Hauswänden befestigt.

Die mögliche Befahrgeschwindigkeit einer Fahrleitung hängt ab von der Qualität des Stromabnehmerlaufs. Der Durchhang der Fahrleitung zwischen den Aufhängepunkten beeinflusst den Stromabnehmerlauf negativ.

Bei der nicht nachgespannten Einfachfahrleitung sind Abstände der Aufhängung von ca. 30 m und kleiner erforderlich, damit der Durchhang nicht zu groß wird (bis zu 40 cm). Eine Befahrgeschwindigkeit von 40 km/h ist theoretisch möglich. Praktisch sollte man eine solche Bauart nur bis 25...30 km/h einsetzen, damit Materialbeanspruchung und Entgleisungsrisiko vermindert werden. Diese Fahrleitungsbauart kann daher nur da empfohlen werden, wo die Geschwindigkeit ohnehin niedrig liegt (z.B. kurvenreiche Abschnitte).

Um die Zahl der Aufhängepunkte zu reduzieren und die Qualität des Stromabnehmerlaufes zu verbessern, sind zwei Maßnahmen sinnvoll:

- Nachspannen des Fahrdrahtes (durch Gewicht mit Umlenkrolle oder durch Federelemente)  
Der maximale Abstand der Aufhängepunkte kann auf etwa 40 m erhöht werden. Befahrgeschwindigkeiten von 40...50 km/h sind möglich, wobei beim oberen Wert wiederum Materialbeanspruchung und Entgleisungsrisiko steigen.  
Diese Bauart ist als Standard im Stadtbereich zu empfehlen.
- Anordnen eines Tragseils über dem Fahrdraht (sog. Kettenwerksfahrleitung, „Hochkette“)  
Der Fahrdraht kann in kurzen Abständen am Tragseil aufgehängt werden, wodurch der Fahrdrahtdurchhang signifikant reduziert wird. Die Mastabstände können dadurch vergrößert werden.  
Kettenwerke konnten sich beim Obus nur selten und nur außerhalb des Stadtgebietes durchsetzen, weil eine optische Beeinträchtigung des Stadtbildes befürchtet wurde.

Da Berlin bereits ein Straßenbahnnetz besitzt, ist zu empfehlen, sich bei der konkreten Ausführung an den bei der Straßenbahn der BVG bereits etablierten Fahrleitungstypen zu orientieren (unter zusätzlicher Beachtung der Profilverformung des Stromabnehmer-schleifschuhs bei Anwendung eines konventionellen Obus-Stromabnehmers). Dies schränkt die individuellen Gestaltungsmöglichkeiten nur wenig ein und bringt Vorteile bei der Instandhaltung.

Zur Verringerung des resultierenden Widerstands werden oft jeweils die Plusfahrdrähte bzw. die Minusfahrdrähte beider Fahrtrichtungen in Abständen miteinander verbunden (z.B. alle 250 m). Dies ist im Sinne der Verlustsenkung eine günstige Maßnahme, doch im Kurzschlussfall sind dann beide Fahrtrichtungen durch gemeinsame Abschaltung betroffen.

Oft reicht auch die Parallelschaltung von Hin- und Rückrichtung nicht aus, um akzeptable Widerstandsverhältnisse zu erreichen. Dann müssen Verstärkungsleitungen parallel geführt werden. Weil sichtbare zusätzliche Leiter in der Regel nicht erwünscht sind, werden

diese Leitungen dann als Kabel unterirdisch geführt und in Abständen von etwa 200...300 m mit der Fahrleitung verbunden.

Die Polarität der Fahrleitung ist nicht normativ vorgeschrieben. Nach EN 50119 soll im Falle eines geerdeten oder mit der Rückleitung einer Straßenbahn verbundenen Pols sich dieser außen an der Fahrbahn befinden, bei dem in Deutschland üblichen Rechtsverkehr also in Fahrtrichtung rechts. Zwar wird das geplante HObus-Netz in Spandau noch nicht vom Straßenbahnnetz berührt, doch sollte darauf geachtet werden, dass bei einer späteren Verflechtung der Netze keine Kompatibilitätsprobleme entstehen.

### **3.4.6.2 Konventionelle Obusfahrleitung**

#### **3.4.6.2.1 Fahrleitungsanlage und -bauart**

Nach [5] ist eine Fahrleitungsanlage der Oberbegriff von Stromschienenanlage, Oberleitungsanlage und Stromschienenoberleitungsanlage. Sie stellt die erforderliche Anlage zur Versorgung von Fahrzeugen mit elektrischer Energie über Stromabnehmer dar. Im Anwendungsbereich der HObusse findet man Oberleitungsanlagen vor. Eine Oberleitungsanlage ist nach [5] das Netzwerk zur Versorgung elektrisch angetriebener Fahrzeuge mit elektrischer Energie. Sie umfasst:

- alle Drähte und Seile wie Längs- und Quertragseile, Fahrdrähte sowie Bahnenergieleitungen wie Rückleistungsseile, Erdseile, Blitzschutzseile, Speiseleitungen, Verstärkungsleitungen und Negativfeeder, wenn sie auf den Tragkonstruktionen befestigt sind,
- Gründungen, Tragkonstruktionen und alle anderen Komponenten, die der Halterung, Seitenführung oder Isolierung der Leiter dienen sowie
- Schaltgeräte, Überwachungs- und Schutzeinrichtungen, die auf oder in unmittelbarer Nähe von Tragkonstruktionen installiert sind.

Eine Oberleitung ist eine Fahrleitung, die entweder über den Fahrzeugen oder seitlich davon angeordnet ist, zur Versorgung mit elektrischer Energie über Dach- oder Seitenstromabnehmer [5].

Für Straßenbahnen und Obusse werden aus ökonomischen Erwägungen Einfachoberleitungen gewählt, insbesondere bei niedrigen Befahrgeschwindigkeiten oder wenn das Umfeld der Strecke, beispielsweise in engen Straßenzügen, den Bau einer Kettenwerks oberleitung erschwert. Bei Obus-Fahrleitungen mit Befahrgeschwindigkeiten bis 80 km/h sind Einfachoberleitungen üblich. Die Ausführung der Fahrdrahtaufhängung ist dabei ein wesentlicher Aspekt.

Einfachoberleitungen weisen einige gemeinsame Merkmale auf:

- Häufig werden Einfachoberleitungen fest abgespannt; auf selbsttätig die Zugkraft regulierende Nachspanneinrichtungen wird verzichtet.
- Die Fahrdrahtlage und damit die Befahrgüte fest abgespannter Fahrdrähte hängen von der Umgebungstemperatur ab. Temperaturbedingte Längenänderungen des Fahrdrahtes führen zu einer Änderung der Zugkraft im Fahrdraht. Beim Anstieg der Temperatur sinkt die Fahrdrahtzugkraft ab und der Fahrdrahtdurchhang nimmt zu.
- Die bei großen Durchhängen vorhandenen Änderungen der Fahrdrahthöhe und damit der Stromabnehmerarbeitshöhe führen zu einem erhöhten Verschleiß des Fahrdrahtes. Dieser ist an den Fahrdrahtaufhängepunkten besonders hoch, da hier der Stromabnehmer seine Bewegungsrichtung abrupt umkehren muss.

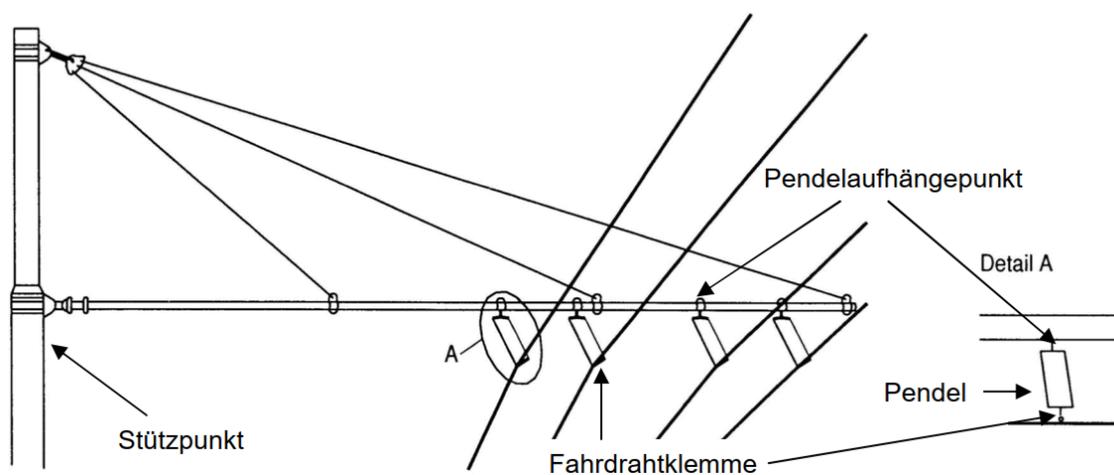


Abbildung 3-22: Prinzipieller Aufbau der Pendelaufhängung bei einer Obus-Fahrleitung, [65]

Bei Einfachoberleitungen kann sowohl die Befahrgüte verbessert als auch der Verschleiß verringert werden, wenn der Fahrdraht an pendelnden Aufhängungen befestigt wird.

Abbildung 3-22 nach [65] zeigt eine solche Aufhängung. Eine pendelnde Aufhängung gleicht, verglichen mit einer festen Aufhängung, die Längenänderungen bei wechselnden Umgebungstemperaturen aus und verringert damit die Zugkraftänderungen. Der Durchhang einer pendelnd aufgehängten Einfachoberleitung ist bei hohen Fahrdrahttemperaturen geringer als bei einer fest aufgehängten. Der realisierbare Mastabstand bei Pendelaufhängungen liegt bei bis zu 35 m.

Eine weitere Möglichkeit, den Fahrdraht eines Obussystems aufzuhängen, ist die Einfachfahrleitung mit Beiseil (siehe Abbildung 3-23). An den Stützpunkten werden zusätzlich Beiseile in Dreiecksform angebracht. Die Beiseile überspannen  $2/5$  der Fahrleitung eines Feldes. Die Art der Aufhängung hat ein sehr gutes elastisches Verhalten.

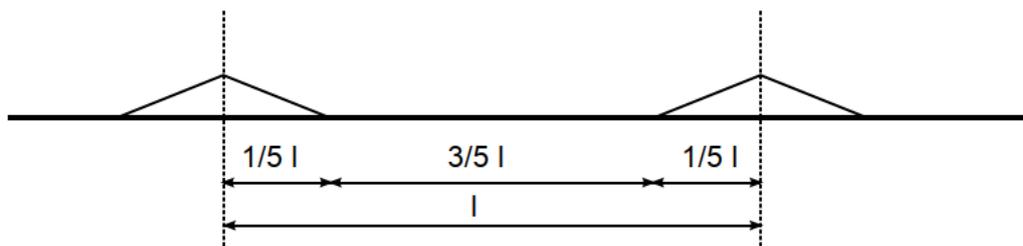


Abbildung 3-23: Einfachfahrleitung mit Beiseil, [65]

Einfachoberleitungen mit Beiseil können ähnlich wie Schrägpendelaufhängungen mit einem leichten Versatz in Längsrichtung ausgeführt und selbsttätig nachgespannt ausgeführt werden. Hierdurch ergibt sich eine optimale Kompensation der temperaturbedingten Längenänderung des Fahrdrahtes. Durch die Beiseile verringern sich die Elastizitätsunterschiede längs des Fahrdrahtes auf ein Minimum. Dies hat zur Folge, dass sich auf Grund des besseren dynamischen Verhaltens zwischen Fahrdraht und Stromabnehmer die Qualität der Stromentnahme erhöht. Durch das bessere dynamische Verhalten verringert sich der Verschleiß und somit der Wartungsaufwand.

Die vom Stromabnehmer beschliffenen Drähte der Oberleitung werden Fahrdrähte genannt. Die wichtigste Aufgabe der Fahrdrähte ist es, einen ununterbrochenen Stromfluss beim Übertragen der elektrischen Leistung zu den Schleifleisten des Stromabnehmers als Schleifkontakt zu sichern. Nach EN 50119 soll der Abstand der beiden Fahrdrähte entweder 600 mm oder 700 mm betragen (horizontal), Lagetoleranz  $\pm 15$  mm. Fahrdrähte für Stangenstromabnehmer werden zur Vermeidung von unzulässigen Seitenbeschleunigungen ohne oder nur mit geringer Seitenverschiebung verlegt.

Die Nennhöhe über Fahrbahn ist ebenfalls in EN 50502 festgelegt mit 5.500...5.600 mm. Die Toleranz der Extremfälle über Fahrbahn ist nicht standardisiert, doch wird in der Norm ein bevorzugter Bereich von 4.700...6.500 mm angegeben (der untere Wert korrespondiert mit BOStrab §25). Ein niedriger Extremwert kann nützlich sein, um bestehende Brücken unterfahren zu können. Ein hoher Extremwert kann nützlich sein, um auf diesen Straßen noch bestimmte Schwerverkehre durchführen zu können (z.B. Werksausfahrten an einer Straße mit Fahrleitung). Jedoch wird es zweckmäßig sein, sich an Nennhöhe und bevorzugten Arbeitsbereich der Norm zu halten, um am Markt auf Standardlösungen zurückgreifen zu können. Für Strecken, die potenziell mit Doppelstockoberleitungsbussen befahren werden sollen, ist eine höhere Fahrdrahtlage notwendig (siehe 3.4.6.2.3)

Bei der konventionellen Bauart führt der Fahrdraht die Stromabnehmer. Dazu umfasst der Schleifschuh des Stromabnehmers den Fahrdraht von drei Seiten. Demzufolge werden an Abzweigen Weichen im Fahrdraht benötigt, um den Schleifschuh in die gewünschte Richtung zu lenken. Diese Weichen müssen vom Fahrzeug aus fernsteuerbar sein. Ebenso bedingt die Umfassung des Fahrdrahts durch den Schleifschuh, dass an Kreuzungen von Fahrdrähten beide Fahrdrähte unterbrochen werden müssen, damit die Führungskanten

des Schleifschuhs am jeweils anderen Fahrdrabt durchlaufen können ohne anzustoßen. Kreuzungen von Fahrdrähten treten nicht nur bei Kreuzungen von Strecken auf, sondern aufgrund des Doppelfahrdrabts bei jeder Weiche. Fahrdrabtkreuzungen müssen isoliert ausgeführt werden, weil die Mehrzahl der Kreuzungen Fahrdrähte verschiedener Polarität betrifft.

Übliche Fahrdrabtquerschnitte liegen bei 80...120 mm<sup>2</sup> Kupfer. Wegen der Umfassung durch den Schleifschuh müssen Fahrdrabtklemmen und -aufhängung so ausgebildet sein, dass sie den Lauf des Schleifschuhs nicht behindern.

Wegen der Führung des Schleifschuhs muss das Anlegen des Stromabnehmers am Fahrdrabt („andrahten“ oder auch „eindrahten“) zielgenau erfolgen. Siehe dazu Kapitel 3.4.6.2.4.

### 3.4.6.2.2 Stromabnehmer

Die Stromabnahme erfolgt über zwei unabhängig bewegliche Stangen, eine je Fahrdrabt/Pol. Sie sind in einer Konsole auf dem Fahrzeugdach vertikal und horizontal drehbar gelagert. Federn an der Stromabnehmerkonsole bewirken eine permanente aufwärts gerichtete Kraft, die zum Heben und zum Andrücken des Schleifschuhs an den Fahrdrabt dient.

Am anderen Ende jeder Stange befindet sich ein Schleifschuh. Er stellt den Kontakt zum Fahrdrabt her. Er ist in Form eines oben offenen U ausgebildet, um durch den Fahrdrabt geführt zu werden. Der untere Bereich des U ist innen mit einem auswechselbaren Kohle-schleifstück versehen, auf dem der Fahrdrabt gleitet. Der Schleifschuh ist gegen die Stange drehbar gelagert, um unabhängig von der Auslenkung der Stange eine Stellung parallel zum Fahrdrabt einnehmen zu können.



Abbildung 3-24: Stromabnehmerkopf

In der Öffnung links vorn steckt die Stromabnehmerstange. Der metallisch glänzende Teil ist der sogenannte Schleifschuh. Die seitlichen Flügel gewährleisten die Führung am Fahrdrabt. Am Grund des Schuhs, zwischen den Flügeln, befindet sich ein auswechselbares Kontaktstück. Der Schleifschuh ist gegen den schwarzen Teil drehbar gelagert, so dass er dem Fahrdrabt folgen kann.

Quelle: Produktkatalog KIEPE [13]

Um den Schleifschuhen eine Anpresskraft am Fahrdrabt zu geben und um die Stromabnehmer nach einer Auslenkung wieder in die Fahrzeugachse zu holen, ist die Stromabnehmerstange neben dem Gelenk über Federn mit der Konsole verbunden. Nach EN 50119 soll die statische Kontaktkraft zwischen 70 N und 120 N liegen. Nach EN 50502 soll die Andruckfeder einstellbar sein, um Werte von mindestens 80 N bis 150 N zu erreichen. Der beiden Normen gemeinsame Bereich beträgt also 80 N bis 120 N.

Nach EN 50502 soll sich das Gelenk der Stromabnehmerkonsole in einer Höhe von 3100...3500 mm befinden. Ziel dieser Vorgabe ist es, der Stromabnehmerstange für alle Fahrdrabtlagen genug Bewegungsspielraum zu bieten und zudem die Rückstellkräfte nicht in einem konstruktiv schwer zu beherrschenden spitzen Winkel einzuleiten. Die Normposition des Stromabnehmer-Drehpunkts kann bei Doppelstockbussen nicht sinnvoll realisiert werden; siehe dazu Abschnitt 3.4.6.2.3.

Für das Heben und Senken des Stromabnehmers gibt es folgende Varianten:

1) Manuell

Dies ist der Standardfall für fast alle Obusse weltweit.

Die Spitze der Stromabnehmerstange ist durch ein isoliertes Seil mit einer Aufwickleinrichtung (auch Seilaufwickler, Fangtrommel oder Retriever genannt) verbunden, die am Heck des Fahrzeugs angeordnet ist. Diese Aufwickleinrichtung arbeitet ähnlich einem Sicherheitsgurt im Auto: Sie erlaubt langsame Bewegungen des Seils; bei schnellen Bewegungen wird das Seil festgehalten. Der Stromabnehmer kann somit Höhenänderungen des Fahrdrabts folgen. Bei einer „Entgleisung“ des Stromabnehmers (Schleifschuh springt von Fahrdrabt) wird dagegen das Hochspringen der Stromabnehmerstange auf einen kurzen Weg begrenzt.

Die Seile werden auch zum manuellen An- und Abdrahten verwendet.

2) Schnellabsenkung

An der Stromabnehmerkonsole befindet sich ein Element (z.B. Pneumatikzylinder oder Magnet), das den Stromabnehmer auf Anforderung gegen die Federkraft in die untere Lage drückt. Auslöser kann die Detektierung einer Stromabnehmerentgleisung sein.

Auf die Fangwirkung der Seiltrommeln kann dann verzichtet werden. Die Seile werden aber noch zum An- und Abdrahten benötigt.

3) Halbautomatisches An- und Abdrahten

An der Stromabnehmerkonsole befinden sich Elemente zum Heben, Senken, Zentrieren und Verriegeln von Stromabnehmern. Auf die Seile kann verzichtet werden, wenn mit den Hebe- und Senkvorrichtungen auch die Bewegungsbegrenzung bei Stromabnehmerentgleisung realisiert wird.

In der Literatur und in Produktkatalogen werden solcherart bestückte Stromabnehmer als Stromabnehmer für automatisches An- und Abdrahten bezeichnet. Der Begriff trifft die Realität nur für das Abdrahten. Die Stromabnehmer werden maschinell eingezogen, zentriert und in der unteren Lage verriegelt. Das Andrahten geschieht jedoch nicht vollautomatisch, denn die Schleifschuhe finden den Fahrdraht nicht selbst und bedürfen der Hilfe eines Trichters (siehe Abschnitt 3.4.6.2.4 c). Damit ist das Andrahten nur an festgelegten Punkten möglich.

### 3.4.6.2.3 Besonderheiten bei Doppelstockbussen

Da Doppelstockbusse eine Dachhöhe von etwa 4 m über Fahrbahn besitzen, ist die übliche Anordnung des Stromabnehmers auf dem Dach nach EN 50502 nicht möglich. Gleichwohl gibt es praktizierte Auswege:

- 1) Ein Teil des Fahrzeugs hat eine niedrigere Höhe, damit der Stromabnehmer standardgemäß dort untergebracht werden kann (praktiziert in Berlin Ost in den 1950er Jahren). Letztlich verschenkt man bei einer solchen Bauweise kostbaren Raum und damit Gefäß- und Beförderungskapazität.
- 2) Durch Höherlegung der Fahrleitung kann auch die Stromabnehmerkonsole höher gelegt werden. Das hat folgende Nachteile:
  - Nach Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) §32 dürfen Straßenfahrzeuge nur 4 m hoch sein. Das gleiche Maß gilt nach BOStrab §34 auch für Straßenbahnen, und zwar einschließlich eingezogenem Stromabnehmer. Da bei Doppelstockbussen dieses Maß mit der Dachhöhe bereits ausgeschöpft ist und die Stromabnehmer dann auch in abgesenkter Lage darüber hinausreichen, könnten solche Fahrzeuge nur noch mit Sondergenehmigung auf ausgewählten Strecken verkehren.
  - Brückendurchfahrten könnten zu klein sein, denn eine lokale Absenkung der Fahrleitung ist nicht möglich. Auf eine Fahrleitung müsste an diesen Stellen verzichtet werden und der HObus müsste hier im Speichermodus verkehren. Dies führt je nach Trassenwahl möglicherweise zu zusätzlichen An- und Abdrahtstellen.

Eine Anordnung der Stromabnehmer in Standardhöhe am Heck, also weit nach hinten auskragend, ist nicht möglich, weil dann nachfolgende Fahrzeuge, insbesondere Doppelstockbusse gefährdet würden.

Da bei der Anwendung des HObusses in Berlin-Spandau besonderer Wert auf die gleichzeitige Verwendung von einstöckigen und doppelstöckigen Bussen gelegt wird, soll hier aufgezeigt werden, wie eine kompromissfähige Ausführung gestaltet sein müsste und welche Folgen dies hat.

Die Variante 1 (teilweise Höhenreduzierung des Busses zur Gewährleistung einer Drehpunkthöhe der Stromabnehmerstange von max. 3500 mm über Straßenoberfläche) kann ausgeschlossen werden. Die Verringerung der Transportkapazität stellt den Vorteil der Doppelstöckigkeit infrage.

Die Variante 2 (Höherlegung von Stromabnehmerdrehpunkt und Fahrleitung) ist demgegenüber sinnvoller. Um eine gemeinsame Nutzung der Fahrleitung durch einstöckige und doppelstöckige Busse zu gewährleisten, muss allerdings deren Höhentoleranz eingeschränkt werden.

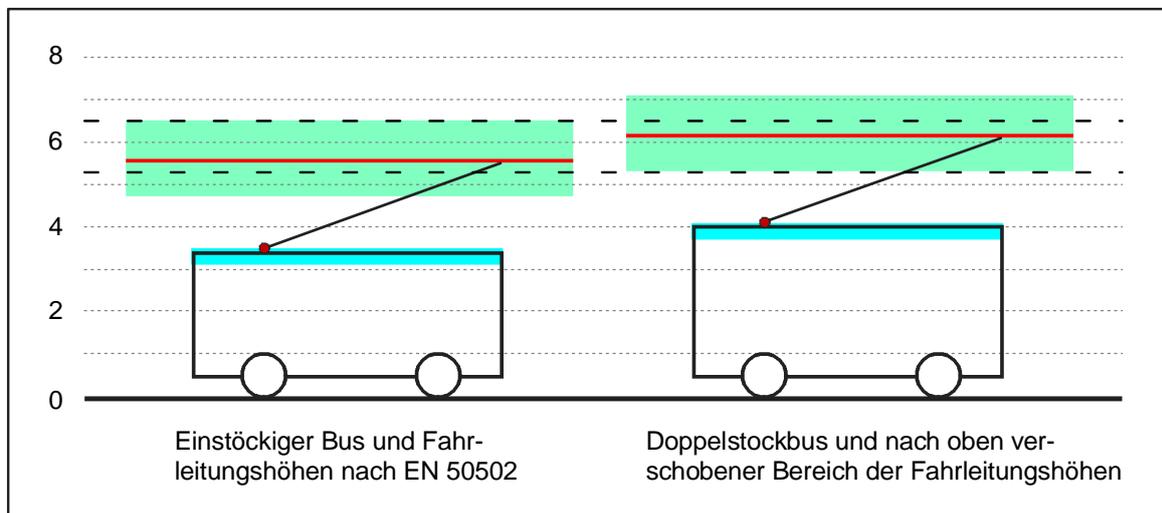


Abbildung 3-25: Vergleich der Höhenverhältnisse der Fahrleitung

links nach EN 50502, rechts mit einer um 700 mm nach oben verschobenen Anordnung  
(rot: Nennlage der Fahrleitung, grün: bevorzugter Toleranzbereich)

Abbildung 3-25 zeigt links die Höhenlagen über Straßenoberfläche nach EN 50502, Bild B.2. Hellblau ist das Toleranzband für den Drehpunkt des Stromabnehmers eingetragen, rot die Nennhöhe der Fahrleitung und grün das Toleranzband der Fahrleitung. Für letzteres gibt es keine normative Festlegung, EN 50502 verwendet den Begriff „bevorzugt“. Allerdings sollte man dieses Toleranzband insofern als gegeben annehmen, weil sich die Hersteller danach richten und Serienlösungen bevorzugt werden sollten. Rechts sind alle Höhenmaße um 700 mm nach oben verschoben, um für Doppelstockbusse die gleichen Relationen zu visualisieren, wie sie nach EN 50502 bei einstöckigen Bussen gelten. Man erkennt, dass sich die Toleranzbereiche überlappen. Dies eröffnet die technische Möglichkeit, bei reduzierten Lagetoleranzen der Fahrleitung einstöckige und doppelstöckige Busse im selben Netz verkehren zu lassen. Tabelle 3-13 fasst die Zahlenwerte zusammen:

Tabelle 3-13: Maße von Fahrleitungs- und Drehpunkthöhen über Straßenoberfläche in mm

	EN 50502 (geeignet für einstöckige Busse)	um 700 mm verschobener Bereich als 1:1-Anpassung an Doppelstockbusse	Kompromissvorschlag für gemeinsamen Einsatz von einstöckigen und doppelstöckigen Bussen
niedrigste Lage Drehpunkt Stange	3100	-----	<b>3100</b>

	EN 50502 (geeignet für einstöckige Busse)	um 700 mm verschobener Bereich als 1:1-Anpassung an Doppelstockbusse	Kompromissvorschlag für gemeinsamen Einsatz von einstöckigen und doppelstöckigen Bussen
höchste Lage Drehpunkt Stange	3500	4200	<b>4200</b>
niedrigste Fahrleitungshöhe	4700 1)	5400	<b>5400</b>
Nennhöhe Fahrleitung	5500...5600	6200...6300	<b>5850...5950</b>
höchste Fahrleitungshöhe	6500 1)	7200	<b>6500</b>

1) kein normativer Wert, nach EN 50502 „bevorzugt“

Die Nachteile wurden bereits angedeutet:

- a) Doppelstockbusse mit Stromabnehmer auf dem Dach überschreiten die 4-m-Grenze nach StVZO §32 auch, wenn die Stromabnehmerstangen eingezogen sind (um ca. 50 cm). Eine Zulassung vorausgesetzt, könnten solche Fahrzeuge nur mit Sondergenehmigung auf ausgewählten Strecken verkehren. Dies schließt auch Umleitungsstrecken (z.B. Baustellen, Unfall-Ausweichstrecken) und Überführungsstrecken (z.B. zum Depot, zur Werkstatt) mit ein.  
Die 4-m-Forderung ist begründet mit der minimalen lichten Höhe von Brücken, Tunneln usw. von 4,50 m minus 0,25 m Bewegungsspielraum (z.B. Schwingungen des Fahrzeuges durch Fahrbahnunebenheiten) und minus weitere 0,25 m als Sicherheitsraum [6]. Durch den Stromabnehmer werden die Spielräume bereits vollständig negiert.
- b) Hindernisse mit geringen Durchfahrtshöhen können nicht mehr durch Fahrdrabtabenkungen überwunden werden. Es muss ein fahrleitungsloser Abschnitt eingefügt werden, was gegebenenfalls zu zusätzlichen An- und Abdrahtungen führt.
- c) Wenn zu einer späteren Zeit das Berliner Straßenbahnnetz Richtung Spandau expandieren sollte, dann muss dessen Fahrleitungshöhe im Bereich der Trassen des HOBus (einschließlich Umleitungs- und Überführungsstrecken) auf die Höhe der Fahrleitung des HObusses und auch auf die Höhe der HObusse selbst Rücksicht nehmen. Absenkungen der Straßenbahnfahrleitung unter Bauwerken nach BOStrab §25 auf 4,2 m sind dann nicht mehr möglich, weil damit den HO-Doppelstockbussen der Weg versperrt würde.

#### 3.4.6.2.4 An- und Abdrahten

Das Anlegen der Stromabnehmer an der Fahrleitung wird auch als „Andrahten“ bezeichnet, das Abziehen als „Abdrahten“. Während das Abdrahten einfach durch Niederholen des Stromabnehmers erfolgt, muss beim Andrahten der Schleifschuh den Fahrdraht genau treffen.

- a) manuelles Andrahten

Dies ist heute noch weltweit die am häufigsten praktizierte Methode. Dabei greift der Mitarbeiter das Seil vom Schleifschuh zur Fangtrommel, deblockiert die Fangtrommel und positioniert den Schleifschuh nach Augenmaß am Fahrdraht. Geübte Mitarbeiter können dies mit beiden Schleifschuhen gleichzeitig. Der Vorgang kann an beliebigen Stellen passieren und nimmt nur wenige Sekunden in Anspruch. Man verliert jedoch deutlich mehr Zeit, weil dazu der Fahrer aussteigen und zum Heck gehen muss, und auch wieder zurück. Manuelles Andrahten benötigt somit insgesamt, je nach Länge des Fahrzeugs und Gestaltung des Fahrerplatzes, etwa 40...70 s.

Beim Abdrahten zieht der Mitarbeiter die Stromabnehmer per Seil vom Fahrdraht ab und blockiert die Fangtrommel.

Die manuelle Methode ist nur brauchbar, wenn die Zahl der Andrahtvorgänge überschaubar bleibt, z.B. morgens im Depot einmal je Fahrzeug.

#### b) Andrahten mit Trichter

Etwa in den 1970/80er Jahren kamen immer mehr Fahrzeuge mit Hilfsdieselmotor auf den Markt. Motivation war dabei nicht nur die erweiterte Ausweichmöglichkeit bei Hindernissen im Fahrweg, sondern auch das Passieren fahrleitungstechnisch schwierig beherrschbarer Punkte (z.B. Kreuzungen mit elektrifizierten Eisenbahnen). An letzteren Stellen war bei jeder Fahrt an- und abzudrahten, was auf manuellem Weg zu viel Zeit kostete und auch den Fahrer zwang, bei ungünstigen Witterungsverhältnissen wiederholt das Fahrzeug zu verlassen.

Es musste also eine Lösung gefunden werden, die die Durchführung des An- und Abdrahtens wenigstens im Stillstand vom Fahrerplatz aus erlaubte. Zu diesem Zweck wurden die Stromabnehmer mit einer steuerbaren Hebe- und Senkeinrichtung versehen. Das Abdrahten war damit problemlos möglich. Beim Andrahten muss der Schleifschuh jedoch zielgenau den Fahrdraht erreichen. Dazu sind jeweils seitlich des Fahrdrachts schräge Platten aus Kunststoff angeordnet, die den Schleifschuh wie ein Trichter zum Fahrdraht führen. Der praktische Zeitbedarf zum Andrahten liegt bei 5...10 s, wobei nach Beobachtungen der untere Wert in China die Regel ist, während in Europa noch immer der obere Wert gebräuchlich ist. Man kann aber davon ausgehen, dass mit entsprechender Übung auch in Europa kurze Andrahtzeiten erreichbar sind. Der Zeitbedarf beim Abdrahten beträgt bis zu etwa 5 s. Die Trichter sind auch durch bereits zuvor angedrahtete Stromabnehmer befahrbar, wodurch die Einbindung von Seitenlinien ohne Fahrdraht in durchgehende Strecken mit Fahrdraht möglich wird.

Diese Lösung ist einfach zu realisieren. Wenn das An- und Abdrahten an einer Haltestelle erfolgt, gibt es kaum Fahrzeitverlängerungen. Allerdings gibt es auch Nachteile:

- Das An- und Abdrahten erfolgt immer exakt an denselben Stellen. Damit entsteht beim Andrahten eine mechanische Beanspruchung und beim Abdrahten möglicherweise ein Abrissfunke in räumlicher Konzentration. Auch wenn es keine belastbaren Verschleißdaten gibt, so sind diese Stellen doch in regelmäßiger Beobachtung zu halten, um rechtzeitig vor Schadenseintritt eine zustandsabhängige Instandhaltung zu veranlassen.

- Wegen der begrenzten räumlichen Wirksamkeit des Trichters muss das Fahrzeug beim Andrahten mit geringer Toleranz (in Längs- und Querrichtung) positioniert werden. Praktikabel sind Fahrbahnmarkierungen. Diese müssen stets sichtbar sein (z.B. permanente Schneefreihaltung). Die An- und Abdrahtstellen müssen sich in der Geraden befinden mit zentrierter Lage der Fahrleitung über der Fahrzeugachse, um die Abweichung von der idealen Position gering zu halten und die Seitenkräfte auf die Stromabnehmer zu verringern.
- Weil die Zahl möglicher Fahrbahnmarkierungen begrenzt ist, ist man in der Fahrzeuggeometrie nicht mehr völlig frei. Man wird sich praktisch für zwei Anordnungen der Stromabnehmer in Bezug auf die Fahrzeugfront entscheiden müssen (z.B. Kurzfahrzeug und Gelenkfahrzeug) und diese Entscheidung dann auch bei späteren Fahrzeugbeschaffungen standardisiert beibehalten, will man mit Fahrzeugen verschiedener Typen auf derselben Strecke fahren.

In Publikationen wird das Andrahten mittels Trichter oft als „automatisches Andrahten“ bezeichnet, obwohl die Funktion auf bestimmte Orte und den Stillstand des Fahrzeugs eingeschränkt ist. Der Begriff des „automatisches Andrahtens“ hat sich in dieser Form allerdings eingebürgert.

Das Andrahten mit Trichter hat sich trotz der beschriebenen Beschränkungen praktisch bewährt und es gibt entsprechende Standardprodukte am Markt.

Zwei **Alternativvarianten** des Andrahtens mit Trichter erlauben auch ein Andrahten mit geringen Geschwindigkeiten. Dabei werden entweder große Trichter auch unterhalb der Fahrdrähte platziert oder die Trichterfunktion in den Stromabnehmer verlagert. In letzterem Fall sind die beiden Schleifschuhe an den Spitzen eines „V“ angeordnet und ein stationärer Führungsdraht läuft in den inneren Winkel des „V“ ein und zentriert dieses, so dass bei ansteigendem Führungsdraht die Schleifschuhe passgenau von unten an die beiden Fahrdrähte geführt werden (Verfahren der Deutzer Technische Kohle GmbH). Nachteile dieser beiden Verfahren sind: Sonderbauformen der Fahrleitung und Unbefahrbarkeit der Andrahthilfen durch bereits angedrahtete Stromabnehmer, sowie beim Deutzer-Verfahren der Zwang zur gleichhohen Lage der Fahrdrähte, was Mischverkehr mit Straßenbahn unter derselben Fahrleitung ausschließt. Die Möglichkeit des Andrahtens bei mäßiger Geschwindigkeit wiegt die Nachteile nicht auf. Daher gibt es für diese Alternativvarianten bisher nur Versuchsträger.

#### c) Vollautomatisches Andrahten

Mit der heutigen Sensor- und Regeltechnik ist es prinzipiell möglich, Stromabnehmer zu konstruieren, bei denen der Schleifschuh an beliebigen Stellen automatisch und ohne mechanische Führungshilfen während der Fahrt andrahtet.

Erste Patente dazu gab es bereits in den 1970er Jahren und seitdem beschäftigen sich Ingenieure immer wieder mit diesem Thema.

Ein Forschungsprojekt der Westsächsischen Hochschule Zwickau in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme und den Leipziger Verkehrsbetrieben im Rahmen der Projekte „AOSA plus – Automatisches Oberleitungsstromabnehmersystem für Busse“ und „eBus Skorpion“ 2013 bis 2016 zeigte die

Realisierbarkeit. Eine praktische Umsetzung über den Demonstrator hinaus erfolgte bisher nicht.



Abbildung 3-26:  
Demonstrator der  
Westfälischen  
Hochschule  
Zwickau.

### 3.4.6.3 Systeme mit nicht durch den Fahrdrat geführten Stromabnehmern

Der Vorteil des spurgeführten Stromabnehmers ist, dass (in gewissen Toleranzgrenzen) das Fahrzeug nicht streng spurgebunden ist und sich der Fahrer trotzdem nicht um die Spurtreue der Stromabnehmer kümmern muss. Der Nachteil des aufwendigen Andrahtens wird in der Regel in Kauf genommen.

Es hat nicht an Versuchen gefehlt, die Schleifleisten-Technologie der Straßenbahn auf eine zweipolige Fahrleitung zu übertragen, um an jedem Punkt der Strecke auch ohne Sonder-technologie andrahten zu können – einfach durch Heben des Stromabnehmers wie bei konventionellen Straßenbahnen. Dies bedeutet aber wegen der endlichen Breite der Schleifstücke, dass eine Stromabnahme nur bei mehr oder weniger spurtreuem Fahren des Fahrzeugs gegeben ist.

Praktische Bedeutung haben nur zwei Methoden erlangt, beide bisher nur für LKW:

#### a) Tagebauanwendungen

Selbst in großen Tagebauen wird mitunter der LKW-Verkehr gegenüber der Schiene bevorzugt, um eine örtliche Flexibilität bei wechselnden Abbauverhältnissen zu erreichen. In einigen Fällen wollte man nicht auf elektrische Traktion verzichten und errichtete auf oft befahrenen Routen Fahrleitungsanlagen. Manche sind wie die klassischen Fahrleitungsanlagen des Obus aufgebaut; in einigen Fällen wurde jedoch eine Beschleifung durch Schleifleisten wie bei Stromabnehmern von Schienenbahnen verwendet. Die Spurhaltung obliegt

dann dem Fahrer, d.h. sie ist rein manuell. Eine Überschreitung der seitlichen Toleranz durch unsaubere Spurhaltung führt zum Entgleisen des Stromabnehmers und in vielen Fällen zudem zu einer Beschädigung der Fahrleitung. Deshalb ist diese Methode sinnvoll nur in abgesperrten Betriebsgeländen anwendbar, wo der Fahrer sich nicht auf das allgemeine Verkehrsgeschehen konzentrieren muss, sondern dem spurtreuen Fahren mehr Aufmerksamkeit widmen kann.

Motivation ist neben der emissionsfreien Fahrt die höhere Leistung unter Fahrdraht (Verkürzung Umlaufzeit) und der geringere Wartungsaufwand für den Dieselmotor.



Abbildung 3-27: Anwendungsbeispiel Siemens Trolley Truck

An der Abbaustelle wird das Fahrzeug von einem Dieselmotor angetrieben, doch die Fahrt aus dem Tagebau heraus erfolgt elektrisch. Die Fahrdrähte der zweipoligen Fahrleitung liegen mehrere Meter auseinander und werden von zwei unabhängigen Stromabnehmern bestrichen. Nennspannung ist 1,5 kV DC.

Bildquelle: Siemens AG [9]

## b) Projekt eHighway

Es handelt sich um ein von der Siemens AG (unter Mitarbeit von Forschungspartnern) entwickeltes System, mit dem Ziel, den Straßengüterverkehr zu elektrifizieren. Für diesen kommt nur eine flexible Teilstrecken-Nutzung einer elektrischen Infrastruktur infrage. Das Verfahren wäre auch für den HOBus anwendbar.

Auch bei dieser Methode fährt das Fahrzeug mehr oder weniger spurtreu vom Fahrer gesteuert unter einer zweipoligen Fahrleitung. Verwendet werden jedoch hoch dynamisch gesteuerte Stromabnehmer („aktive Stromabnehmer“) mit zwei zusätzlichen Funktionen:

- Die Stromabnehmer werden automatisch seitlich nachgeführt, um das Toleranzband für die seitliche Bewegung des Fahrzeugs zu erweitern.
- Die Stromabnehmer werden automatisch gesenkt, wenn das Fahrzeug seitlich zu weit von der Fahrleitung abweicht. Umgekehrt werden sie selbsttätig gehoben, wenn die Steuerung erkennt, dass eine Fahrleitung erreichbar ist. Wenn der Stromabnehmer sich nicht am Fahrdraht befindet, dann liefert ein Speicher und/oder Verbrennungsmotor die Energie.

Der Vorteil dieser Methode ist, dass aus Sicht des Fahrers das Fahrzeug wie ein konventionelles fahrleitungsunabhängiges Fahrzeug benutzt werden kann. Der Fahrer kümmert sich weder um die Spurhaltung der Stromabnehmer unter der Fahrleitung, noch um das An- und Abdrahten. Das Steuersystem erkennt und entscheidet selbst während der Fahrt, wann die Stromabnahme aus der Fahrleitung erfolgen kann. Die Stromabnehmer und die Zuschaltung der On-Board-Energiequellen sind dynamisch genug geregelt, so dass auch spontanes Verlassen des mit Fahrleitung versehenen Fahrwegs etwa für Überholvorgänge oder Abbiegen technisch möglich ist. Es entfällt der Zeitbedarf für das An- und Abdrahten im Stillstand.

Die Funktionsfähigkeit der Methode wurde von der Siemens AG seit 2010 auf einer Teststrecke auf einem ehemaligen Militärflughafen bei Groß Döln in Brandenburg nachgewiesen (Projekt ENUBA, [7], [8]). Dort wurde eine Fahrleitungsspannung von 670 V gewählt und die Fahrleitung als Kettenwerk ausgebildet, um größere Mastabstände zu erreichen (ca. 65 m). Verwendet wurde ein Fahrdraht Cu 150 mm<sup>2</sup> und ein Tragseil BzII 120 mm<sup>2</sup> mit Nachspannung.



Abbildung 3-28: Siemens-Teststrecke auf einem ehemaligen Flugplatz in Brandenburg.

Der LKW besitzt vorn zwei aktive Stromabnehmer.

Bildquelle: [www.siemens.com/presse](http://www.siemens.com/presse)

Es befinden sich international mehrere Pilot-Anwendungsprojekte in der Vorbereitung.

Die Methode wäre auch beim HObus anwendbar und hätte den Vorteil des problemlosen An- und Abdrahtens während der Fahrt ohne Eingreifen des Fahrers und ohne Fahrzeitverlust. Allerdings sind die aktiven Stromabnehmer im Vergleich zu passiven deutlich teuer, was die breite und schnelle Einführung der Methode kommerziell erschwert.

### 3.4.7 Infrastruktur im Betriebshof

#### 3.4.7.1 Fahrleitung

Der Aufbau eines Fahrleitungsnetzes im Betriebshof mit hohem Abdeckungsgrad wäre wegen zahlreicher Weichen und Kreuzungen sehr aufwendig. Die Bewegung der Fahrzeuge im Betriebshof im Batteriemodus ist daher anzuraten. Für die Bewegung entladener Fahrzeuge sind entsprechende Schlepper vorzuhalten.

Für Testzwecke sollte ein Fahrleitungsring im Betriebshof vorgesehen werden. Damit ist es möglich, Fahrzeuge nach Reparaturen funktional auch im Fahrbetrieb zu testen, ohne öffentliche Straßen zu benutzen.

Des Weiteren kann man auch Fahrleitungen zur Nachladung verwenden, siehe Kapitel 3.4.7.2 a).

#### 3.4.7.2 Ladeinfrastruktur

Bei Übernachtladern und bei Gelegenheitsladern findet die primäre Ladung im Betriebshof statt, weil hier die längste Standzeit verfügbar ist. Aber auch bei Streckenladern mit am Betriebshof vorbeiführender Fahrleitung ist die Installation von Ladeinfrastruktur im Betriebshof sinnvoll. Es muss gesichert werden, dass bei Betriebsaufnahme ein genügend hoher Ladestand der Batterie vorhanden ist. Anderenfalls ist das Fahrzeug nicht für den Betrieb tauglich.

- Auch während der Abstellzeit wird Energie benötigt, mindestens zum Frostschutz und zum Wiederaufrüsten (Hochheizen) vor Betriebsaufnahme. Ohne externe Energieversorgung würde diese Energie der Batterie entnommen werden, was den Energieinhalt bei Betriebsbeginn verringert.
- Für Arbeiten am Fahrzeug kann es aus Arbeitsschutzgründen nötig sein, den Speicher zu entladen. Vor Betriebsaufnahme ist ein Wiederaufladen nötig.
- Bei Arbeiten an der Energieversorgung der nächstgelegenen Strecken-Fahrleitungsabschnitte oder Umleitungen ist es möglich, dass die Fahrzeuge den Betriebshof mit einem niedrigen Ladeinhalt erreichen; ggf. zu niedrig für Hilfsbetriebebedarf und Mindestinhalt bei Betriebsaufnahme.

Es gibt folgende etablierte Lademethoden:

##### a) Über konventionelle Fahrleitung

Auf der Abstellfläche wird eine konventionelle Fahrleitung errichtet. Die abgestellten Fahrzeuge werden über die Standard-Stromabnehmer geladen.

Der Vorteile dieser Variante sind

- Es sind keine von der Streckenausrüstung abweichenden Bauformen notwendig. Die technische Infrastruktur entspricht derjenigen der Strecke und am Bus sind keine zusätzlichen Einrichtungen notwendig.
- Im Unterschied zur punktförmigen Ladung können Fahrzeuge verschiedener Länge abgestellt werden, weil die Fahrleitung auf der gesamten Länge Leistung bereitstellen kann.

- Kein Platzbedarf für Ladesäulen, kein Verschleiß von Kabeln. Wenn die Fahrleitungen über Querfelder aufgehängt werden, befinden sich keine oder nur wenige Maste auf der Abstellfläche.

Der Nachteil ist, dass der Stillstandsstrom der Stromabnehmer eingeschränkt ist (Vorgabe BVG: 80 A), weil bei stehendem Fahrzeug der Wärmeeintrag in die Fahrleitung punktförmig ist. Damit verbleibt nach Abzug der Hilfsbetriebeleistung nur eine geringe Differenz zum Laden der Batterie. Dieser Nachteil lässt sich folgendermaßen mindern (nicht aber vermeiden):

- Wahl der maximal erlaubten Spannung als Einspeisespannung in die Fahrleitung (für DC 750 V Nennspannung: DC 900 V),
- Deutliche Reduzierung der Hilfsbetriebeleistung durch Zurückfahren der Komforteinrichtungen (z.B. Heizung nur auf Frostschutzniveau),
- Verwendung einer thermisch verstärkten Fahrleitungsbauart, zum Beispiel durch Hochkantprofile. Dies verteuert wegen der Sonderbauform die Anlage deutlich.

#### b) Punktförmige Pantographenlösungen

Hierbei werden einzelne Abstellplätze mit einem Lademast versehen. Die Stromübertragung erfolgt mit einem speziellen Stromabnehmer (Pantograph), der für einen größeren Übergangstrom geeignet ist, aber nur im Stillstand des Fahrzeugs verwendet werden kann. Praktische Ausführungen ordnen wahlweise den Pantographen auf dem Fahrzeug oder am Lademast an. Auf der jeweils anderen Seite befinden sich spezielle Kontaktstücke.

Wegen der Bindung an einen Lademast sind die Anordnung der Abstellplätze und ihre Zuordnung zu bestimmten Fahrzeuglängen nach dem Bau der Maste fixiert. Änderungen im Typenbestand der Flotte, zumindest was Fahrzeuglängen und Position sowie Typ des Stromabnehmers betrifft, erfordern einen Umbau des Betriebshofes. Des Weiteren erfordert der Mast Platz, wodurch sich der Abstand der Abstellgassen erhöht bzw. die Kapazität des Betriebshofes sinkt.

#### c) Steckerlösungen

Der Aufwand für Steckerlösungen ist meist kleiner, als für Fahrleitungen und Pantographen-Ladesäulen. Aber auch sie haben Nachteile:

- Wegen der Bindung an einen Elektranen sind die Anordnung der Abstellplätze und ihre Zuordnung zu bestimmten Fahrzeuglängen nach dem Bau der Maste fixiert.
- Elektranen erfordern Platz, wodurch sich der Abstand der Abstellgassen erhöht bzw. die Kapazität des Betriebshofes sinkt.
- Erfahrungen zeigen, dass mit einem erhöhten Verschleiß zu rechnen ist. Bodennah entnehmbare Ladekabel nutzen sich schnell ab (Schleifen über Beton, Überfahren durch Fahrzeuge, Herunterfallen der Stecker). Über Federsysteme aufgehängene Stecker kollidieren gelegentlich mit Frontscheiben der Busse.

- Änderungen im Typenbestand der Flotte, zumindest was Fahrzeuglänge und Position des Steckers betrifft, erfordern einen Umbau des Betriebshofes.

#### d) Induktive Ladung

Hierbei wird jeder einzelne Abstellplatz mit einer Induktionsspule in der Fahrbahn versehen. Die Energieübertragung erfolgt berührungslos, wobei das Fahrzeug zur Verbesserung des elektromagnetischen Schlusses abgesenkt wird.

Induktive Ladung besitzt einen schlechteren Wirkungsgrad als die vorgenannten konduktiven Verfahren. Der bauliche Aufwand ist hoch und die Erfahrungen zu Wartungsbedarf und Zuverlässigkeit sind unbefriedigend. [72]

Wegen der Bindung an die fest in der Fahrbahn verlegte Ladespule ist die Anordnung der Abstellplätze und ihre Zuordnung zu bestimmten Fahrzeuglängen nach dem Bau fixiert. Änderungen im Typenbestand der Flotte, zumindest was Fahrzeuglänge und Position sowie Typ der Energieübertragung betrifft, erfordern einen Umbau des Betriebshofes. Von Vorteil ist, dass der Platz auf der Abstellfläche nicht durch Gerätschaften eingeschränkt wird.

Alle Lademethoden benötigen eine Energieversorgung, d.h. einen Anschluss an das Mittelspannungsnetz und je nach Typ eine Einrichtung zur Bereitstellung der gewünschten Energieform. Wegen der hohen Anzahl gleichzeitig zu ladender Busse (Nachtpause) kann die benötigte Leistung hoch sein.

### Lademanagement

Eine Reduzierung der Zahl der Ladeplätze ist möglich, wenn man eine Schnellladung durchführt und die abgestellten Fahrzeuge rotieren lässt (reine Abstellposition ohne Ladeeinrichtung > Ladestelle > reine Abstellposition ohne Ladeeinrichtung). Dies senkt die Investitionskosten in die Ladeinfrastruktur verringert aber gleichzeitig die Lebensdauer der (LFP-) Batterien durch die Schnellladung. In Städten mit ausgeprägtem Nachtverkehr und hoher Frühspitze im Fahrzeugbedarf ist zudem die Verweildauer der Fahrzeuge im Betriebshof zu gering für ein solches Rotationsverfahren. Zudem ist Personal zur Umsetzung der Fahrzeuge erforderlich.

Um Leistungs- und Stromspitzen zu reduzieren, empfiehlt sich ein intelligentes Lademanagement. Beispielsweise kann der Ladevorgang und das Hochheizen sequenziell erfolgen: die Ladung wird so berechnet, dass die Batterie eine halbe Stunde vor Dienstantritt des Fahrers beendet ist und danach die erforderliche Innenraumtemperatur im Bus hergestellt wird. Voraussetzung ist eine selbsttätige Kommunikation der Fahrzeuge mit dem Leitreechner und Regelmöglichkeiten für jeden einzelnen Ladeplatz.

Es empfiehlt sich somit, die ohnehin für die Organisation des Fahrzeugeinsatzes benötigte Dispositions-Software um ein Modul für Lademanagement zu erweitern.

#### 3.4.7.3 Werkstatt

Eine Werkstatt für HObusse muss folgende Einrichtungen besitzen, die für Standard-Dieselsbusse nicht oder nicht in diesem Umfang erforderlich sind:

- Werkstattbereich zur Aufarbeitung von Elektrokomponenten (einschließlich Energieversorgung für Tests in ausgebautem Zustand),
- Dacharbeitsstände (insbesondere wegen Stromabnehmer),
- Zusätzliche Lagerkapazität für Ersatzteile (Erhöhung der Zahl verschiedener Teile, in der Übergangszeit zudem parallel mit der Ersatzteilkhaltung der konventionellen Busse),
- Kran,
- Lager für Batterien,
- Prüf- und Testbereich der Antriebsanlagen in eingebautem Zustand und Testring für Fahrttests (einschließlich Energieversorgung),
- zusätzliche Werkzeuge.

Eine Ausbildung der Beschäftigten für Elektroarbeiten ist erforderlich. Insbesondere die Schulung gegen elektrische Gefährdungen ist zu beachten.

## 3.5 Grundlagen der Betriebssimulation und der elektrischen Netzberechnung

### 3.5.1 Prinzip

Fahrleitungsgebundene elektrische Verkehrssysteme sind gekennzeichnet durch zeitlich und örtlich veränderliche Lastzustände. Für den Ortsveränderungsprozess der Fahrzeuge müssen Widerstandskräfte überwunden werden. Dafür sind elektrische Fahrzeuge mit elektrischen Fahrmotoren ausgestattet. Die Motoren gehören zu einem elektrischen Antriebsstrang, der aus Fahrleitungsanlagen und/oder aus Energiespeichern mit elektrischer Leistung versorgt wird. In einem elektrischen Fahrleitungsnetz gibt es oft mehrere Verbraucher und auch Energieerzeuger, die miteinander interagieren. Um die Interaktion des Fahrbetriebs und der elektrischen Infrastruktur abzubilden, benötigt man eine Betriebssimulation mit elektrischer Netzberechnung.

Die wechselnden Betriebszustände der Fahrzeuge, verursacht durch die ungleichförmig beschleunigte Bewegung, werden mit einer Betriebssimulation, die alle notwendigen Eingangsdaten berücksichtigt abgebildet. In der Simulation werden in Zeitschritten (üblicherweise 1 s) die Fahrzustände der Fahrzeuge berechnet (Geschwindigkeit und Zugkraft unter Berücksichtigung der Fahrzeug- und Infrastruktureigenschaften, sowie der Betriebssituation). Der ermittelte mechanische Leistungsbedarf geht fahrzeugspezifisch in die Simulation des elektrischen Netzes ein. Im Rahmen der elektrischen Netzberechnung wird der Leistungsbedarf am Stromabnehmer der Fahrzeuge sowie darauf aufbauend der Lastfluss und die Spannungsverteilung im stationären Netz berechnet. Dabei kann es durch das lastflussabhängige Spannungsniveau der elektrischen Infrastruktur zu Rückwirkungen auf die Fahrdynamik, beispielsweise in Form von spannungsabhängigen Leistungsbegrenzungen, kommen. Die betrieblichen und elektrischen Ergebnisse der Simulation werden im Postprozess in Bezug auf verschiedene Kriterien ausgewertet und beurteilt.

Im Rahmen der Studie wird der Betriebssimulator *OpenTrack* und das vom IFB entwickelte Programm *OpenPowerNet* für die elektrische Netzberechnung verwendet.

### 3.5.2 Simulationssystem OpenTrack und OpenPowerNet

#### 3.5.2.1 Betriebssimulator OpenTrack

Der Betriebssimulator OpenTrack wurde beginnend in den 1990er Jahren an der ETH Zürich (IVT) entwickelt. Nach erfolgreicher Ausgründung im Jahr 2005 werden Support und Weiterentwicklung heute von der OpenTrack Railway Technology Ltd. Zürich durchgeführt. OpenTrack stellt einen international weit verbreiteten Betriebssimulator dar, der sowohl für die Betrachtung von Vollbahnen als auch für Nahverkehrsbahnen, Monorails und Busse eingesetzt werden kann.

Die Simulation des Betriebsablaufs im Simulator beruht auf

- der Modellierung der Netzinfrastruktur aller betreffenden Strecken (einschließlich Trassierung, Spurplan und ggf. Sicherungstechnik, aber ohne Betrachtung einer elektrischen Bahnenergieversorgung),
- der Modellierung fahrdynamisch relevanter Fahrzeugdaten und
- der Modellierung aller betrieblichen Daten (Fahrplan, Anschlussbeziehungen).

Während der Simulation wird die ungleichmäßig beschleunigte Bewegung der spezifizierten Fahrzeuge fahrplangesteuert auf der gegebenen Infrastruktur und unter definierbaren und reproduzierbaren Randbedingungen berechnet.

Für die wechselseitige Kommunikation mit dem Programm *OpenPowerNet* wurde eine spezielle Schnittstelle eingerichtet, mit der die Programme in jedem Simulationszeitschritt Daten austauschen.

### 3.5.2.2 Elektrische Netzberechnung mit OpenPowerNet

Das Programmsystem OpenPowerNet ist eine Entwicklung des IFB. Es ermöglicht zusammen mit dem Betriebssimulator OpenTrack mittels sogenannter gekoppelter Simulation die zeitgleiche Berechnung des elektrischen Lastflusses im Antriebsstrang der Fahrzeuge und im elektrischen Energieversorgungsnetz. Damit werden die physikalischen Größen wie Spannung, Strom und Leistung im Fahrleitungsnetz bestimmt. Die Co-Simulation bietet den Vorteil, dass insbesondere bei großen Bahnnetzen mit komplexer Betriebsführung zunächst eine Modellierung und Überprüfung des Fahrplanbetriebs ohne elektrisches Netz möglich ist. Erst wenn die Betriebssimulation stabil funktioniert, kann der elektrische Netzsimulator zugeschaltet werden.

Die elektrische Simulation beruht auf

- der Modellierung der elektrischen Netzinfrastruktur aller betreffenden Strecken,
- der Modellierung betrieblich bzw. fahrdynamisch bedingter Lasten bzw. Einspeisungen.

OpenPowerNet und OpenTrack kommunizieren bidirektional miteinander, so dass die Wechselwirkungen zwischen Fahrdynamik und Netzzustand berücksichtigt werden. Somit sind beispielsweise Fahrtzeitverlängerungen durch Leistungsbegrenzungen bei schwachen elektrischen Netzen berechenbar.

### 3.5.2.3 Simulationsablauf

Öffentliche Energieverteilnetze unterscheiden sich gegenüber Energieversorgungsnetzen elektrischer Verkehrssysteme hinsichtlich des zeitlich stark veränderlichen Leistungsbedarfs (Beschleunigungs- und Bremsvorgänge inklusive Rückspeisung kinetischer Energie) und der Positionsveränderung der Energieverbraucher (ortsveränderliche Fahrzeuge). Dies erzwingt eine Anpassung des Berechnungsalgorithmus, der kurz skizziert wird:

- Anfordern einer mechanischen Leistung aus OpenTrack (OT) an OpenPowerNet (OPN),

- Berechnung der notwendigen elektrischen Leistung des Fahrzeuges, um mechanische Leistungsanforderung zu erfüllen (Fahrzeugmodellierung des energetischen Stranges von Rad über Getriebe und Motor hin zum Stromabnehmer in OPN),
- Anschließend Berechnung der elektrischen Lastflüsse basierend auf den geforderten elektrischen Leistungen der einzelnen Fahrzeuge in OPN,
- Ggf. Reduzierung der verfügbaren mechanischen Leistung durch zu geringe verfügbare Spannungen (Vorgabe einer spannungsabhängigen bzw. absoluten Strombegrenzung auf den Fahrzeugen) in OPN,
- Fortführung der Iteration, bis sich elektrischer Netzzustand (Lastflusssituation) nicht mehr ändert,
- Übergabe der möglichen Traktionsleistung an OT,
- Fahrdynamische Berechnung in OT mit möglicher Traktionsleistung, am Ende des Simulationszeitschrittes stehen veränderte Werte für Fahrzeuggeschwindigkeit, -leistung und -position zur Verfügung,
- Wiederholung aller Berechnungsschritte für gesamten Simulationszeitraum.

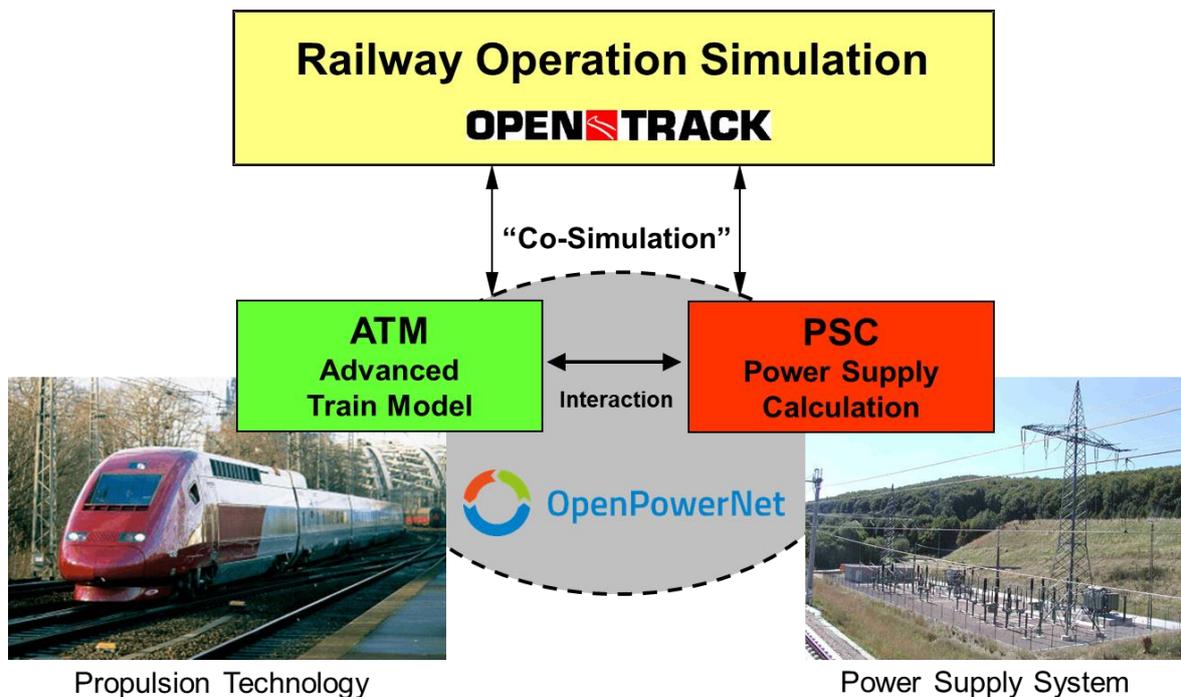


Abbildung 3-29: Gekoppelte Simulation mit OpenTrack und OpenPowerNet

Für elektrisch schwache Fahrleitungsnetze sind folgende Besonderheiten in der Simulation mit OPN und OT zu beachten:

Sind Strombegrenzungen auf dem Fahrzeug implementiert, so wird die maximale Stromaufnahme absolut oder in Abhängigkeit der Fahrleitungsspannung (bspw. nach EN 50388) reduziert. Das Abschalten eines Fahrzeuges bei Unterspannung erfolgt nicht. Bei sehr nied-

rigen Spannungen (in der Nähe von  $U_{\min 2}$  nach EN 50163) wird u. U. die Hilfsbetriebeleistung reduziert (damit Priorisierung der zur Verfügung stehenden Leistung für Traktion). Eine Priorisierung von gleichzeitig auftretender Leistungsanforderung (Stromaufnahme mehrerer Fahrzeuge im selben Speiseabschnitt) erfolgt nicht. Sollte die Leistungsanforderung eines Fahrzeuges nicht verfügbar sein (Überlastung des elektrischen Netzes), führt dies zur Geschwindigkeitsreduktion des Fahrzeuges und u. U. bis zum Stillstand.

#### 3.5.2.4 Dimensionierung mit zeitgewichteten Kurven

Die Verteilung des Stromes in elektrischen Anlagen der Bahnenergieversorgung ist ein stochastischer Prozess. Die Verwendung von zeitlichen Verläufen zur Dimensionierung ist ungeeignet. Gesucht ist eine Darstellung, welche die Dauer einer Belastung unabhängig vom konkreten Zeitverlauf dieser Belastung widerspiegelt. Anschließend soll es möglich sein, mit dieser Darstellung Belastung und Belastbarkeit miteinander zu vergleichen, um die thermische Anlagendimensionierung bewerten zu können. Als ein sehr praktisches Werkzeug hat sich für diesen Vergleich die sogenannte zeitgewichtete Belastungsdauerkurve (ZBDK) erwiesen. Auf eine gegebene zeitabhängige Stromkurve  $f=l(t)$  wird dazu folgender Algorithmus angewendet:

Ein Zeitfenster mit fester Breite  $t^*$  wird über die Zeitachse  $t$  geschoben. An jeder Position des Fensters  $t^*$  wird der Effektivwert (RMS) des Stromes der sich im Zeitfenster befindlichen Stromwerte berechnet. Der maximale Effektivwert je Fensterbreite  $t^*$  wird zusammen mit der Zeitfensterbreite  $t^*$  abgespeichert. Dieser Vorgang wird für alle Zeitfensterbreiten (beginnend mit Einzelzeitschritt, hier 1 s, bis zur gesamten Simulationsdauer, hier 1 h) wiederholt. Das sich daraus ergebende Diagramm wird über einer logarithmischen Zeitachse aufgetragen. Man kann den maximal auftretenden RMS-Wert für jede Zeitdauer ablesen. Der Wert für eine 1 s entspricht der maximalen Kurzzeitbelastung, der Wert ganz rechts steht für den RMS-Wert bei Dauerbetrieb.

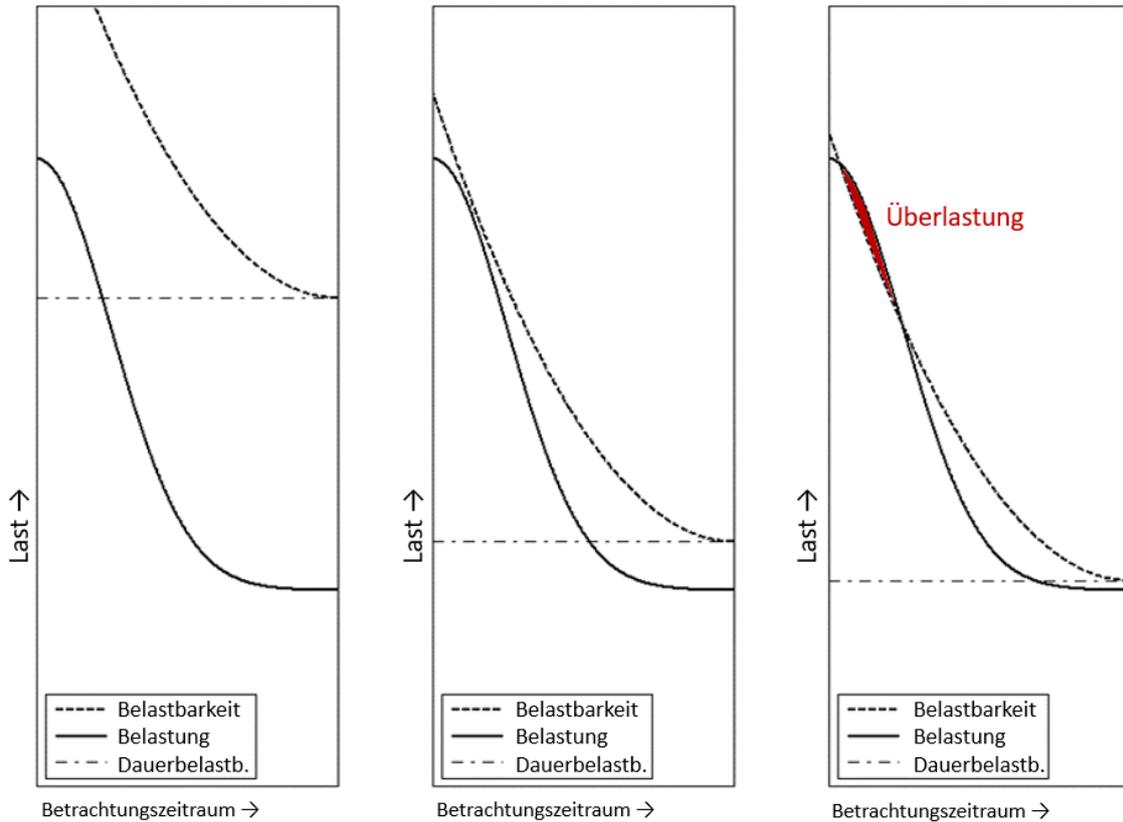


Abbildung 3-30: Auslegung elektrischer Anlagen mit zeitgewichteten Belastungsdauerkurven:  
 – links: überdimensioniert (bzw. Dimensionierung mit Reserve),  
 – Mitte: exakte Bemessung auf den Anwendungsfall (keine Reserve),  
 – rechts: unterdimensioniert.

Die Berechnungsformel für die zeitgewichtete Belastungsdauerkurve einer physikalischen Größe (hier der Strom  $I_t$ ) und der diskreten Zeitschrittweite  $\Delta t$  ist:

$$I_{rms,t^*} = \sqrt{\frac{1}{t^*} \sum_t^{t+t^*} (I_t)^2 \Delta t} \quad t_{\min} \leq t \leq (T_S - t^*) \quad \text{und} \quad \Delta t \leq t^* \leq T_S$$

Eine Bewertung der Dimensionierung von elektrischen Anlagen erfolgt durch Vergleich von Belastung und Belastbarkeit (siehe Abbildung 3-30). Als Referenzkurve wird die Belastbarkeit entsprechend der Anforderungen einer Belastungsklasse für einen Nennwert und gegebene Überlastfähigkeit ermittelt. Dieser Vorgang wird hauptsächlich für Gleichrichter und Transformatoren angewendet, kann aber auch auf Oberleitungen und Kabel übertragen werden.

### 3.5.3 Grundlagen der Fahrdynamik

Dem Fahrzeug steht – bedingt durch die endliche Leistungsfähigkeit der Antriebsmotore und die Reibgrenze zwischen Rad und Fahrbahn – eine begrenzte Zugkraft in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit zur Verfügung. Demgegenüber steht der Fahrwiderstand – die Kraft, die aufzubringen ist, um das Fahrzeug gegen Reibung und Neigung zu bewegen. Die Differenzkraft zwischen der Zugkraftgrenze des Fahrzeugs und der Fahrwiderstandskraft steht für die Beschleunigung des Fahrzeugs zur Verfügung. Bei niedrigen Geschwindigkeiten ist die verfügbare Beschleunigungskraft relativ hoch und man wird sie oft nicht ausnutzen, weil aus Komfort- und Sicherheitsgründen die Beschleunigung nicht über  $1,1 \dots 1,3 \text{ m/s}^2$  hinausgehen sollte. Bei hohen Geschwindigkeiten begrenzt die verfügbare Antriebsleistung die verfügbare Zugkraft. Die Leistung ist konstant und die Zugkraft sinkt damit mit steigender Geschwindigkeit. Die nach Abzug des Fahrwiderstands verbleibende Beschleunigungskraft sinkt dadurch ebenfalls. Abbildung 3-31 zeigt diese Zusammenhänge optisch.

Die Reibungsgrenze liegt bei Straßenfahrzeugen deutlich höher als bei Schienenfahrzeugen aufgrund der besseren Haftung zwischen Gummi und Straßenbelag gegenüber Stahlrad auf Stahlschiene. Erkauft wird dies mit einem deutlich höherem Rollwiderstand aufgrund des Walkens des Gummireifens.

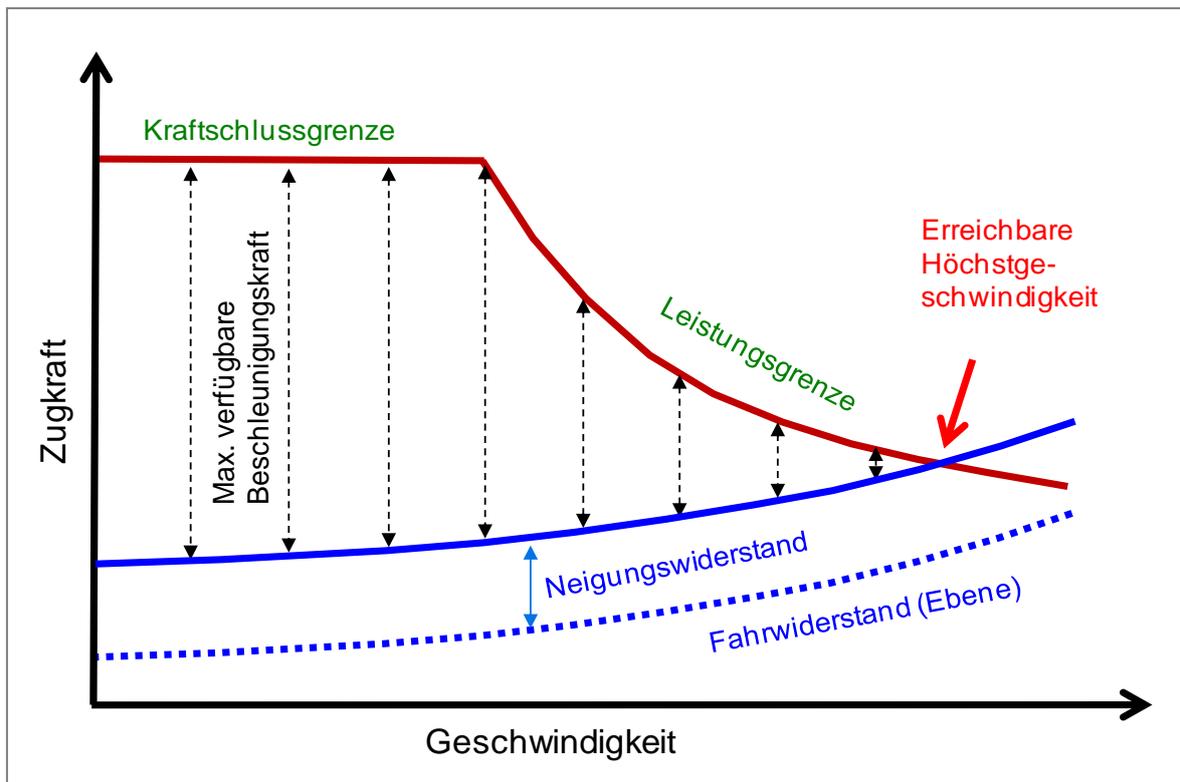


Abbildung 3-31: Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm und Fahrwiderstände

## Fahrwiderstand

Der Fahrwiderstand setzt sich zusammen aus:

- Rollwiderstand,
- Luftwiderstand,
- Kurvenwiderstand,
- Neigungswiderstand.

Der Rollwiderstand von gummibereiteten Straßenfahrzeugen ist deutlich höher als der von Schienenfahrzeugen. Die Werte streuen je nach Ausführung in einem weiten Bereich. Der Rollwiderstandsbeiwert (definiert als Verhältnis von Rollwiderstand zu Fahrzeuggewicht) wird in [6] angegeben mit 0,01...0,02 für Beton, Asphalt und Pflaster, was sich mit Erfahrungswerten in anderen Projekten deckt.

Für die Berechnung des kombinierten Roll- und Luftwiderstands hat sich die Davis-Formel als praktikabel erwiesen. Es handelt sich um eine quadratische Gleichung mit drei Koeffizienten und der Geschwindigkeit als Variable:  $F_w = A + b v + C v^2$ . Für die Koeffizienten liegen aktuelle Erfahrungswerte vor. Für den eingeschränkten Geschwindigkeitsbereich im Stadtverkehr und dem hier nur geringen Einfluss von Zuladungsmasse und Luftwiderstand genügt oft eine Vereinfachung mit den zwei Koeffizienten A und C.

Der Kurvenwiderstand, das heißt die Erhöhung der Widerstandskraft bei Kurvenfahrt, wird von vielen Autoren als vernachlässigbar eingeschätzt, was in Relation auf die Beschleunigungskraft auch nachvollziehbar ist. In Kurven wird wegen der Seitenkräfte ohnehin die Geschwindigkeit begrenzt sein und indirekt damit auch die Beschleunigung, weshalb der Kurvenwiderstand für die Auslegung des Antriebsstranges nicht wesentlich ist. Für den Leistungsbedarf jedoch kann er relevant sein. Daher wird in dieser Studie der Angabe aus [10] gefolgt, dass der Kurvenwiderstand etwa so groß ist wie Roll- und Luftwiderstand (Verdopplung des Fahrwiderstandes in der Ebene).

Der Neigungswiderstand berechnet sich wie bei allen anderen Fahrzeugen aus dem Produkt von Fahrzeuggewicht, Erdbeschleunigung und dem Sinus des Neigungswinkels.

### 3.6 Vorgehensweise technische Machbarkeit

Grundlage zur Beurteilung der technischen Machbarkeit ist die Entwicklung der elektrischen Netzinfrastruktur mit Simulation unter Berücksichtigung relevanter Eingangsparameter und verschiedener Rahmenbedingungen. Dafür wird der Fahrbetrieb modelliert und unter Annahme hoher elektrischer Leistungsanforderungen und ungünstiger elektrischer Rahmenparameter für den Normal- und Ausfallbetrieb der elektrischen Infrastruktur simuliert. Die notwendigen Eingangsdaten der Simulation hinsichtlich der Infrastruktur, des Betriebskonzepts und darauf aufbauend das Fahrplanmodell sowie die Eingangsdaten der Fahrzeugkonfiguration wurden auf Basis verfügbarer Daten erstellt bzw. im Rahmen der Auslegung bestimmt oder von vergleichbaren Projekten abgeleitet.

Die elektrische Infrastruktur sowie die Speicherkonfiguration im Fahrzeug wurden initial angenommen. Die Speicherkonfiguration des Fahrzeugs wird zunächst in Abhängigkeit der technischen Rahmenbedingungen geschätzt und nach Bewertung der Simulationsergebnisse bei Bedarf adaptiert.

Für die elektrische Netzinfrastruktur wurde zunächst der größtmögliche Teil der Streckenlänge elektrifiziert, wobei an Abzweigungen sowie Zusammenführungen von mehreren Linien sowie in Kreuzungsbereichen und städtebaulich sensiblen Bereichen (Schloss Charlottenburg) fahrleitungsfreie Abschnitte im Modell berücksichtigt sind. Ziel ist es, keine aufwändigen und auffälligen Fahrleitungselemente wie Weichen oder Kreuzungen in die Zielnetzstruktur zu integrieren, auch wenn diese Elemente technisch erprobt und problemlos realisierbar wären. Bereiche mit einer geringen Busdichte (3 Busse/Stunde und Richtung, Seekorso bis Gutsstr.) wurden auch der Gruppe der fahrleitungsfreien Abschnitte zugeordnet. Mit diesen Annahmen entstand die elektrische Netzkonfiguration mit hohem Elektrifizierungsgrad, welche als Ausgangsbasis genutzt und im Folgenden als „Szenario A“ bezeichnet wird.

Als ungünstigster Fall für die Auslegung und Dimensionierung wurden elektrische Rahmenbedingungen gewählt, wie beispielsweise eine Abnutzung der Fahrdrähte von 20 %, eine Leitertemperatur von 60 °C, die volle Besetzung der Fahrzeuge während der betrieblichen Spitzenstunde sowie die maximal zulässige Hilfsbetriebbelast. Unter diesen Annahmen wurde der Leistungsbedarf am Stromabnehmer berechnet und die Anzahl und Position der Unterwerke mit ihren Einspeisungen sowie die Dimensionierung und Konfiguration aller elektrischen Leiter unter Beurteilung der auslegungsrelevanten technischen Bewertungskriterien:

- Spannungshaltung,
- Belastung der stationären elektrotechnischen Anlagen und
- Kurzschlusserkennbarkeit

iterativ bis zu einer finalen Netzkonfiguration für das Ausgangsszenario bestimmt.

Im Szenario B wurden ausgehend von der Konfiguration im Szenario A mehrere Fahrleitungsabschnitte reduziert, vornehmlich Abschnitte mit Auslastungen von maximal 6 Bussen pro Stunde und Richtung. Weiterhin wurden, um die Anzahl der Unterwerksstandorte zu reduzieren, dicht beieinander liegende Unterwerke zusammengelegt, was im Gegenzug zu längeren Speisekabeln führt. Es ergaben sich geänderte Unterwerksstandorte und vereinzelt geänderte Fahrleitungskonfigurationen. Zudem wurde der Batteriezustand über mehrere Umläufe mit in die Auswertung einbezogen. Dabei wurden die Fahrleitungsabschnitte hinsichtlich ihrer Notwendigkeit bewertet. Es zeigte sich der Bedarf von Nachladepunkten an Endhaltestellen, um den Batteriestand während der Stand- und Wendezeiten nicht überdurchschnittlich stark (bei langen Standzeiten und hohem Hilfsbetriebsleistungsbedarf) absinken zu lassen, wobei sich die Batterie als bereits ausreichend dimensioniert erwies. Es ergaben sich auch hier mehrere Iterationsschritte (auch unter Einbeziehung von Ausfallszenarien) und eine finale Netzkonfiguration für das Szenario B.

Im Szenario C wurde der gemäß Nahverkehrsplan der Stadt Berlin mögliche Bau von Straßenbahnen in Berlin-Spandau berücksichtigt. Da einige Buslinien durch den Einsatz von Straßenbahnen substituiert werden, reduzierten sich die Fahrplan- und Netzkilometer des betrachteten Verkehrs und in der Folge die Fahrleitungskilometer. Basis für die Fahrleitungskonfiguration des Szenario C ist Szenario B. Die Anzahl der Unterwerke kann reduziert werden und einige Unterwerke benötigen geringere Leistungsparameter, auf Grund der geringeren Verkehrsleistung. Die für den Normalbetrieb entwickelte Netzkonfiguration wurde anschließend wieder im Ausfallbetrieb überprüft und als Ergebnis die finale Konfiguration für das Szenario C bestimmt.

Ausgehend von den ermittelten Netzkonfigurationen für die drei Szenarien wurden die Mengengerüste der elektrischen Infrastruktur als Grundlage zur Ermittlung des Investitionsbedarfs abgeleitet; die Flottengröße ergab sich bereits aus dem Betriebskonzept und der notwendigen Reserve.

Um Aussagen zu den Energiekosten zu erhalten, wurden zusätzlich für jedes Szenario mit der finalen elektrischen Netzkonfiguration im Normalbetrieb weitere Simulationen durchgeführt. Konkret wurde der Energiebedarf für einen Werktag unter Berücksichtigung verschiedener Hilfsbetriebsleistungsbedarfe sowie tagesgang- und ortsabhängiger Besetzungsgrade ermittelt.

## 3.7 Technische Bewertungskriterien der elektrischen Infrastruktur

### 3.7.1 Spannungshaltung

Die Spannung am Stromabnehmer der über Fahrleitungen versorgten Fahrzeuge schwankt in weiten Grenzen,

- weil längs der Strecke durch den Stromfluss in der Fahrleitung und deren Widerstand erhebliche Spannungsdifferenzen zwischen dem Einspeisepunkt in die Fahrleitung und der Position des Fahrzeugs auftreten.
- weil der Spannungsfall längs der Fahrleitung sich durch die stark fluktuierende Leistung der Fahrzeuge (Anfahren/Bremsen, Steigung/Gefälle) ständig ändert.
- weil durch rückspeisende Fahrzeuge die Spannung lokal deutlich anheben.

Da beim Obus auch die Rückleitung durch die Fahrleitung geschieht und der Fahrdraht einen höheren Längswiderstand hat als das Gleis, ist der Spannungsfall in der Obus-Fahrleitung deutlich größer als bei Schienenbahnen.

Der zulässige Toleranzbereich der Spannungen am Stromabnehmer ist in der Norm EN 50163 „Bahnanwendungen - Speisespannungen von Bahnnetzen“ festgelegt. Die Werte für eine Fahrleitungsnennspannung von 750 V Gleichspannung sind hier in Tabelle 3-14 wiedergegeben.

Tabelle 3-14: Zulässiger Toleranzbereich der Fahrleitungsspannung nach EN 50163 für Nennspannung 750 V DC

$U_{min2}$	$U_{min1}$	$U_N$	$U_{max1}$	$U_{max2}$
500 V	500 V	<b>750 V</b>	900 V	1000 V

Die Dauer der Spannung zwischen  $U_{max1}$  und  $U_{max2}$  darf nach EN 50163 5 min nicht überschreiten. Diese Vorschrift zielt auf Strecken, in denen sich dauerhaft rückspeisende Fahrzeuge befinden (z.B. dichter Takt auf Gefällestrecken). Bei einer Stadt wie Berlin ist damit nicht zu rechnen – die Rückspeisung eines Fahrzeugs ist in der Regel beendet, bevor ein weiteres Fahrzeug beginnt rückzuspeisen.

Für die hier betrachtete Nennspannung 750 V sind in der Norm die Werte für  $U_{min1}$  und  $U_{max2}$  gleich, d.h. es gibt nur einen unteren Grenzwert der minimalen Spannung am Stromabnehmer und keine zeitliche Abstufung der Zulässigkeit von niedrigen Spannungswerten.

Die Anlagen müssen so dimensioniert werden, dass die Spannung an den Stromabnehmern der Fahrzeuge nie den unteren Grenzwert unterschreitet. Würde dies geschehen, könnte kein Betrieb durchgeführt werden. Aber auch der erlaubte Bereich über dem unteren

Grenzwert, zwischen 500 V und 600 V, sollte möglichst nicht auftreten, denn in diesem Bereich verfügen die Fahrzeuge nur über eine eingeschränkte Traktionsleistung (Einstellung der spannungsabhängigen Strombegrenzung nach EN 50388 Kapitel 7.2 und Tabelle 2).

Es wird daher für jeden Ort des Netzes die minimale Spannung am Stromabnehmer berechnet. Werte zwischen 500 V und 600 V werden als genügend, Werte darunter als kritisch gekennzeichnet.

Die Berechnung der Spannungshaltung im Fahrleitungsnetz erfolgt zweckmäßigerweise durch eine gekoppelte Betriebs- und Netzwerksimulation unter Einschluss von Worst-Case-Szenarien, wie zum Beispiel:

- Stunde der höchsten Betriebsbelastung (dichtester planmäßiger Takt),
- betriebliche Sondersituationen (Umleitungsverkehre, Gruppenbildung durch Verspätung);
- maximaler Fahrdrabtverschleiß;
- hohe Leitertemperaturen.

Im Falle einer deutlichen Unterschreitung des unteren Grenzwertes – zeitlich und/oder räumlich – empfehlen sich als Abhilfemaßnahmen eine Erhöhung des wirksamen Leiterquerschnitts oder eine Verkürzung der Speiselängen. Bei kleineren, insbesondere bei begrenzten Unterschreitungen des unteren Grenzwertes können die Einführung einer spannungsabhängigen Strombegrenzung auf den Fahrzeugen oder auch betriebliche Maßnahmen (z.B. Begegnungsverbote, Geschwindigkeitsbeschränkungen) helfen.

### 3.7.2 Kurzschlusserkennbarkeit und Unterscheidung von Kurzschluss- und Betriebsströmen

Auf Strecken mit langen Speiseweiten und hohem Leistungsbedarf (kurze Takte, leistungsstarke Fahrzeuge) kann die Summe der Betriebsströme der einzelnen Fahrzeuge soweit ansteigen, dass sie in den Bereich kleiner Kurzschlussströme kommt (z.B. Kurzschluss am Ende eines Speisebereichs, der durch den ohmschen Widerstand langer Fahrleitungsstrecken klein bleibt).

Die Streckenabgangsschalter der Unterwerke besitzen einen Hochstromauslöser, um eine Überlastung der Betriebsmittel zu verhindern. Diese Auslösung soll auch bei einem entfernten Kurzschluss zwischen beiden Fahrdrabtpotenzialen erfolgen, aber nicht bei hohen Betriebsströmen. Deshalb muss zwischen dem maximalen Betriebsstrom ( $I_{Bmax}$ ) und dem minimalen Kurzschlussstrom ( $I_{kmin}$ ) ein Abstand bestehen, in den der Abschaltwert ( $I_A$ ) der Hochstromauslösung so eingepasst werden kann, dass er auch zu beiden Extremen einen Abstand besitzt. So können Kurzschlüsse erkannt werden, aber hohe Betriebsstromspitzen führen nicht zu ungewollten Abschaltungen.

Deshalb fordert VDV-Schrift 520:  $1,1 I_{Bmax} < I_A < 0,9 I_{kmin}$ .

Wenn die o.g. Bedingung aus VDV-Schrift 520 nicht eingehalten wird, sind Abhilfemaßnahmen erforderlich. Diese sind identisch mit denen zur Verbesserung der Spannungshaltung. Ein höherer Leiterquerschnitt oder Verkürzung der Abschnittslänge erhöht den Kurzschlussstrom. Eine spannungsabhängige Strombegrenzung oder betriebliche Maßnahmen können Betriebsstromspitzen reduzieren. Die jeweilige Maßnahme ist im Rahmen weiterer Planungsphasen mit konkreteren Rahmenparametern detaillierter zu spezifizieren.

Bei neu auszulegenden Anlagen wird der Abschaltwert erst nach deren Dimensionierung festgelegt. In diesem Fall ist sicherzustellen, dass maximaler Betriebsstrom und minimaler Kurzschlussstrom genug Abstand besitzen, um einen Abschaltwert dazwischen einstellen zu können. Aus der o.g. VDV-Ungleichung ergibt sich:

$$I_{kmin} / I_{Bmax} > 1,1 / 0,9 \quad \text{bzw.} \quad I_{kmin} / I_{Bmax} > 1,22$$

Wenn das Verhältnis genau 1,22 betragen würde, gäbe es genau einen Einstellwert für den Abschaltstrom. Deshalb ist bei der Dimensionierung ein größerer Wert anzustreben, um Spielraum für die Festlegung des Abschaltstroms zu gewinnen. Die exakte Festlegung des Abschaltstroms erfolgt in späteren Planungsphasen.

Ein Beispiel für die praktische Vorgehensweise ist in Kapitel 4.4.5 dargestellt.

### 3.7.3 Belastung der stationären elektrotechnischen Anlagen

Die Berechnung der Belastung der Betriebsmittel, Leiter und Unterwerke, erfolgt anhand der Umrechnung des zeitlichen Belastungsganges (jeweiliger Strom bzw. Leistung) in zeitgewichtete Belastungsdauerkurven, wie in Kapitel 3.5.2.4 beschrieben.

Dasselbe Verfahren kann auch angewendet werden auf die Referenzlastgänge der Belastbarkeit.

#### **Gleichrichter**

Für Gleichrichter sind Referenzlastgänge in EN 50328 in Form von Belastbarkeitsklassen gegeben, die in zeitgewichtete Belastungsdauerkurven umgerechnet werden. Für eine ausreichende Dimensionierung ist es erforderlich, einen Gleichrichtertyp zu wählen, dessen Nennstrom und Belastbarkeitsklasse zu einer zeitgewichteten Belastungsdauerkurve der Belastbarkeit führt, die für alle Lastfälle über den zeitgewichteten Belastungsdauerkurven der Belastung liegt.

#### **Gleichrichtertransformatoren**

Durch den von den Gleichrichtern verursachten Blindleistungsbedarf sind die Gleichrichtertransformatoren im Vergleich zur Nennleistung der Gleichrichter mit einer höheren Scheinleistung auszulegen.

Die Scheinleistung des Transformators beträgt für die infrage kommenden 6-Puls- und 12-Puls-Gleichrichter-Brücken:

$$S_N = \sqrt{3} \cdot \frac{I_V}{I_d} \cdot \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int I_d^2(t) dt} \cdot U_{V0} = \sqrt{3} \cdot \frac{I_V}{I_d} \cdot I_{Bd} \cdot U_{V0} = \sqrt{3} \cdot 0,82 \cdot \frac{U_{dio}}{1,35} \cdot I_{Bd}$$

wobei  $U_{V0}$  die Spannung an den drehstromseitigen Klemmen des Gleichrichters,  $U_{dio}$  die gewünschte ideale Leerlauf-Gleichspannung an der fahrleistungsseitigen Sammelschiene und  $I_{Bd}$  den Basisgleichstrom der Bemessung darstellt.

Da die gewünschte Spannung durch die Systemwahl feststeht und die in der Formel genannten Verhältniswerte durch die Gleichrichterbauart festgelegt sind, verbleibt der Basisgleichstrom als einzige Variable. Ihr Wert wird aus der Berechnung des Stromverlaufs bzw. dessen zeitgewichteter Belastungsdauerkurve gewonnen. Der höchste 1-h-Effektivwert der verschiedenen Szenarien wird auf einen Wert für am Markt verfügbare Gleichrichter aufgerundet. Dieser Wert geht als Basisgleichstrom in obige Formel ein.

### Elektrische Leiter

Die zeitgewichteten Belastungsdauerkurven der in den elektrischen Leitern (Fahrdraht, Verstärkungsleiter, Speise- und Rückleitungskabel) fließenden Ströme werden berechnet und mit den zeitgewichteten Belastbarkeitskurven eines thermischen Modells der elektrischen Leiter verglichen. Für den Fahrdraht werden insbesondere Modelle verwendet, in denen äußere thermische Rahmenbedingungen, wie z.B. Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung berücksichtigt werden.

Durch die Zeitkonstanten der elektrischen Leiter sind Effektivwerte ab 900 s oder länger für die Auslegung relevant. Die Belastbarkeit einer konkreten Kabelstrecke hängt neben dem Kabeltyp von der Verlegeart ab. Die daraus folgenden Reduktionsfaktoren und die Wahl konkreter Kabel können daher erst im Rahmen der folgenden Planungsschritte gezielt bestimmt werden.

### 3.7.4 Elektromagnetische Verträglichkeit

Die EMV erhält einen immer höheren Stellenwert durch steigende Technisierung und Vernetzung und somit steigenden technischen Anforderungen, durch eine wesentlich höhere Sensibilisierung, wachsende Erkenntnisse, zunehmende Anzahl von Implantatträgern (Anwendungen / Betroffenen) und auch durch mentale Ängste. Die normative Behandlung der EMV erfolgt im technischen Sinne durch die EMV-Grundnormen. Darauf aufbauend gibt es eine Vielzahl spezieller technischer Regeln u.a. für Bahnanwendungen (DIN EN 50121) bis hin zu Produktnormen für technische Geräte, die die allgemeinen Anforderungen an die Eigenstörbarkeit nicht erfüllen (können). Ein immer wieder offener Punkt sind hier die Herzschrittmacher als Beispiel der aktiven Implantate. Sie spiegeln zudem die Schnittstelle zum Menschen wider. Mit dem EMV-Gesetz und der Arbeitsschutzgesetzgebung sind EU-

weite Grenzwertregelungen geschaffen. Diese müssen z.T. noch in nationales Recht umgesetzt werden. In Deutschland gilt zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen die 26. BImSchV mit ihrer Verwaltungsvorschrift. In ihr sind derzeit die strengsten Grenzwerte zu elektrischen und elektromagnetischen Feldern festgelegt. Diese werden auch nach jetzigem Stand in der zukünftigen Regelung zu elektromagnetischen Feldern im Arbeitsschutz nicht unterschritten. Zur Beurteilung der Grenzwerte wird die Strahlenschutzkommission zur Untersuchung beauftragt.

In ihrer Empfehlung kommt die Strahlenschutzkommission zu dem Schluss: „dass auch nach Bewertung der neueren wissenschaftlichen Literatur keine wissenschaftlichen Erkenntnisse in Hinblick auf mögliche Beeinträchtigungen der Gesundheit durch niederfrequente elektrische und magnetische Felder vorliegen, die ausreichend belastungsfähig wären, um eine Veränderung der bestehenden Grenzwertregelung der 26. BImSchV zu rechtfertigen. Aus der Analyse der vorliegenden wissenschaftlichen Literatur ergeben sich auch keine ausreichenden Belege, um zusätzliche verringerte Vorsorgewerte zu empfehlen, von denen ein quantifizierbarer gesundheitlicher Nutzen zu erwarten wäre.“ Dennoch empfiehlt sie, angesichts der wachsenden Zahl von Personen mit aktiven Implantaten, Folgendes:

„Zur Vermeidung der Störbeeinflussung von elektronischen Implantaten (z.B. Herzschrittmachern oder Defibrillatoren) sind ortsfeste Anlagen zur Energieversorgung mit der Frequenz 50 Hz und der Bahnfrequenz 16 2/3 Hz so zu planen, zu errichten und zu betreiben, dass auch bei höchster betrieblicher Auslastung die von einer Anlage emittierten magnetischen Induktionen die empfohlenen Grenzen nicht überschreiten. Die Induktionen sollten in Bereichen, die Implantatträgern zugänglich sind, und bei denen Feldquellen, die nicht sichtbar bzw. bei denen ein Exposition-vermeidendes Verhalten nicht möglich oder nicht zumutbar ist, folgende Werte nicht überschreiten:

- 10  $\mu\text{T}$  (50 Hz) bzw. 30  $\mu\text{T}$  (16 2/3 Hz) in Bereichen, in denen mit zusätzlichen Feldquellen gerechnet werden muss (z.B. in Wohnanlagen, Seniorenheimen, Krankenhäusern)
- 15  $\mu\text{T}$  (50 Hz) bzw. 45  $\mu\text{T}$  (16 2/3 Hz) in Bereichen, in denen Einträge zusätzlicher Feldquellen nicht zu erwarten und Feldquellen (z.B. Erdkabel) nicht sichtbar bzw. nicht entsprechend gekennzeichnet sind.“

Für Gleichstromanwendungen wird die Einhaltung des Grenzwertes von 500  $\mu\text{T}$  bei der magnetischen Induktion in diesem Zusammenhang gefordert.

Nach geltender Gesetzesgrundlage sind die strengsten Grenzwerte in der 26. BImSchV festgeschrieben, die aber Ausnahmen im Geltungsbereich aufweist (Gleichstromanlagen erst ab 2.000 V DC). In den Empfehlungen der Strahlenschutzkommission wird gleichwohl die Einhaltung dieser Grenzwerte mit punktuellen Zusätzen empfohlen.

Es sollten, insbesondere im Hinblick auf zukünftige Entwicklungen die entstehenden elektromagnetischen Felder unter Berücksichtigung der Empfehlungen der Strahlenschutzkommission betrachtet werden.

### 3.7.5 Energiebedarfsermittlung

Die Ermittlung des Energiebedarfs trägt dazu bei, die Energiekosten des elektrischen Fahrbetriebs vorab besser einschätzen zu können. Des Weiteren ist dieser Wert nötig, um die Absprachen mit dem lokalen Energieversorgungsunternehmen bezüglich der vorzuhaltenden Kapazität treffen zu können. Außerdem ist es unter Berücksichtigung des Strommixes möglich, die Emissionen zu berechnen. Insgesamt können je nach Größe des Netzes, Takt und Transportaufgabe einige GWh (Gigawattstunden) Energie benötigt werden.

Mit der Simulation wird der Energiebedarf eines betrachteten Zeitraums bestimmt. Dies kann für repräsentative Zeiten (Hauptverkehrs-, Nebenverkehrs- und Schwachlastzeiten) oder einen kompletten Tagesfahrplan erfolgen. Im Anschluss erfolgt eine Hochrechnung auf 365 Tage, also ein Jahr.

Das Ergebnis beinhaltet den kompletten Energiebedarf des gesamten Systems und somit der Fahrzeuge sowie der Verluste im Fahrleitungsnetz und in den Unterwerken. Rückgespeiste Energie, die von anderen Fahrzeugen bezogen oder im Speicher genutzt wird, muss nicht durch das übergeordnete Netz zur Verfügung gestellt werden und senkt somit den Gesamtenergiebedarf. Identische Netze mit identischen Transportaufgaben aber unterschiedlichem Rekuperationsgrad weisen somit verschiedene Energiebedarfe auf. Bei höherem Rekuperationsgrad sinkt der Gesamtenergiebedarf, den die Energieversorgung aus dem übergeordneten Netz bereitstellen muss.

Für eine grobe Schätzung vorab werden Erfahrungswerte für den Energieverbrauch der Fahrzeuge eingesetzt. Da in diesen Erfahrungswerten bereits ein Busmodell eingerechnet ist, ändert sich die Einheit dieser Energieverbrauchswerte in kWh/km.

In der folgenden Tabelle (Tabelle 3-15) sind Erwartungswerte, die aus Erkenntnissen bei vergleichbaren Projekten ([89], [90], [91]) stammen, aufgelistet.

Tabelle 3-15: Überschlagswerte spezifischer Energieverbrauch

Modell	spezifischer Energieverbrauch
10 – 12 m Bus	1,5 kWh/km
18 m Bus	2,5 kWh/km
24 m Bus	3,5 kWh/km
Maximum für Systemauslegung (statische Berechnung)	4,5 kWh/km

Diese Werte dienen lediglich als Richtwert für eine Vorabschätzung und auch, um die späteren Simulationsergebnisse auf Plausibilität hin zu überprüfen. Die Ermittlung der exakten Energiebedarfswerte erfolgt durch die Simulation mit OpenPowerNet. Deren Ergebnisse sind in Kapitel 4.4.7 aufgeführt.

## 3.8 Übersicht über den Stand von Obus und HObus

### 3.8.1 Ausgewählte Beispiele für Obusnetze

#### 3.8.1.1 Übersicht

Bis in die Mitte der 1950er Jahre entstanden in Deutschland 68 Obusbetriebe. Ab Anfang der 1960er Jahre wurden, unter anderem auf Grund der fortschreitenden Motorentechnologie sowie dem Preisverfall für fossile Kraftstoffe, immer mehr Straßenbahn- und Obussysteme abgebaut bzw. ersetzt. Diese Entwicklungen gingen trotz der Ölkrise 1975 weiter, sodass heute lediglich drei deutsche Verkehrsbetriebe in Solingen, Esslingen und Eberswalde weiterhin Obussysteme betreiben [29].

Im Ausland, insbesondere im östlichen Ausland, konnten sich dagegen vergleichsweise mehr Obusbetriebe halten.

Tabelle 3-16 und Tabelle 3-17 geben einen Überblick über die Anzahl der in der EU vorhandenen Oberleitungs- bzw. HObusse.

Tabelle 3-16: Zahl der Oberleitungsbusse (Fahrzeuge) in der EU [29]

Land	Anzahl Oberleitungsbusse
Italien	719
Tschechien	745 (davon Brunn 140)
Rumänien	729 (davon Bukarest 396)
Schweiz	566
Bulgarien	516
Litauen	466 (davon Vilnius 321, Kaunas 145)
Griechenland	366 (Athen)
Slowakei	320
Ungarn	281
Lettland	264 (alle in Riga)
Polen	198
Frankreich	173
Österreich	142 (davon Salzburg 122)
Deutschland	71
Niederlande	40 (Arnhem)

Land	Anzahl Oberleitungsbusse
Portugal	20
Spanien	9
Norwegen	6 (Bergen)
Schweden	5 (Landskrona)
<b>Insgesamt</b>	<b>etwa 5.600</b>

Die größte Anzahl dieser Betriebe setzt entweder auf reine Solowagen oder führt ihren Betrieb in oberleitungsfreien Abschnitten mit Fahrzeugen mit Diesel-Hilfsantrieb (hauptsächlich in Italien) durch. Im Folgenden wird ein Überblick über die Entwicklung ausgewählter HObusnetze gegeben.

Tabelle 3-17: Zahl der Hybridoberleitungsbusse (Fahrzeuge) in der EU [129]

Land	Anzahl Hybridoberleitungsbusse
Italien	7 im Bestand, 8 bestellt, 16 geplant
Tschechien	58 im Bestand, 5 geplant
Schweiz	82 im Bestand, 7 Umbauten, 55 bestellt/geplant
Litauen	nicht bekannte Anzahl in Vilnius
Polen	10 im Bestand, 21 bestellt/geplant
Frankreich	2 im Bestand, 22 bestellt
Österreich	15 bestellt
Deutschland	9
- Eberswalde	1
- Esslingen	4
- Solingen	4+16 geplant
Arnhem (NL)	2 im Bestand
Spanien	6 im Bestand

### 3.8.1.2 Eberswalde (BBG – Barnimer Busgesellschaft)

Der Oberleitungsbusbetrieb in Eberswalde ist der älteste noch bestehende Obusbetrieb in Deutschland und wird von der Barnimer Busgesellschaft betrieben [24]. Das Netz besitzt heute eine Fahrdrahlänge von 29,1 km [47]. Der Obusbetrieb findet auf zwei Linien mit abschnittsweiser Überlagerung statt. Das Fahrgastaufkommen auf den beiden Obuslinien betrug im Jahr 2015 3.551.000 Passagiere [52].

Der Betrieb findet mit 12 Fahrzeugen statt, davon ist einer als Hybridoberleitungsbus ausgerüstet. Die Fahrzeuge sind im Jahr 2009 als Ersatz für veraltete Fahrzeuge des Typs NGE 152 von Gräf & Stift bestellt worden [37]. Neu beschafft wurden Fahrzeuge vom Typ Solaris/Cegelec Trollino 18. Die ersten elf Fahrzeuge sind hierbei mit Supercaps und einer

dieselmotorischen APU<sup>2</sup> ausgestattet [47]. Infolge einer Machbarkeitsstudie des Fraunhofer-Instituts für Verkehrs- und Infrastruktursysteme entschied sich die Barnimer Busgesellschaft mbH für die Ausrüstung eines Fahrzeugs mit einer Batterie anstelle des dieselmotorisch betriebenen Hilfsgenerators [47]. Im Jahr 2012 wurde das 12. Fahrzeug mit batteriebetriebenen Hilfsantrieb von Solaris/Cegelec an den Obusbetrieb in Eberswalde ausgeliefert. In Tabelle 3-18 sind die fahrzeugtypischen Kenndaten für die in Eberswalde eingesetzten Oberleitungsfahrzeuge gegeben.

In Abbildung 3-32 wird der gelieferte Hybridobus dargestellt. Es handelt sich bei dem Fahrzeug um den ersten in Europa eingesetzten Batterie-Hybridoberleitungsbus. Das Hybridfahrzeug hat eine elektrische Reichweite von 18 km. Die elektrischen Kenndaten sind in Tabelle 3-19 dargestellt.

Tabelle 3-18: Übersicht Fahrzeuge Eberswalde [47]

Fahrzeuganzahl	Hilfsantrieb	Fahrzeugtyp	Inbetriebnahme	Fahrzeugkosten [€]	Fahrzeuglänge [m]	Achslasten [t]	Höchstgeschwindigkeit [km/h]	Transportkapazität [Sitz+ Stehpl.]
1	Batterie	Solaris/Cegelec Trollino 18 AC	2012	985.000	18 (1 Gelenk)	7,1 / 11,5 / 10	60 - 65	49 + 175
11	Diesel	Solaris/Cegelec Trollino 18 AC	2010	885.000	18 (1 Gelenk)	7,1 / 11,5 / 10	60 - 65	49 + 175

Tabelle 3-19: Kenndaten des elektrischen Systems für den Hybridoberleitungsbus [47]

Systemkenndaten [Einheit]	Wert
Anzahl Zellen	2 x 108 in Serie
Kapazität [Ah]	200
Gewicht (Zellen) [kg]	756
Gewicht (Box) [kg]	1.020
Ladezeit (SOC <sup>3</sup> 25-85 %) [min]	75
Zeit für die erneute Ladung nach einer Fahrstrecke von 5 km [min]	Ca. 20
Anzahl der vorausgesetzten Zyklen (SOC 25 - 85 %)	3.000
Anzahl der vorausgesetzten Zyklen (nach 5 km)	12

<sup>2</sup> APU Auxiliary Power Unit (dt. Hilfstriebwerk)

<sup>3</sup> SOC = State Of Charge (dt. Ladezustand)

Systemkenndaten [Einheit]	Wert
Gesamtenergie [kWh]	70.4
Ausnutzbare Energie SOC 25-85 % [kWh]	42.2
Ausnutzbare Höchstleistung [kW]	12
Spannung [V]	2,8/3,2/3,43/3,65 V I (Minimum-/Nenn-/Ladespannung: 85 %/Ladespannung) 308/352/377/395 V
Höchststrom [A]	2 Sektionen parallel 0,5 C/2C = 100/400

Bei den Batteriezellen handelt es sich um Lithium-Eisen-Phosphat-Akkumulatoren (LiFePO<sub>4</sub>) vom chinesischen Hersteller Winston Battery. Die Speicherkapazität einer Zelle beträgt 100 Ah mit einer Arbeitsspannung von 2,8 - 4 V und einem Höchststrom von 0,5C/2C = 50/200 A. Eine Zelle hat ein Gewicht von 3,3 kg und die Abmaße 218 x 143 x 67 mm [27].



Abbildung 3-32: Hybridoberleitungsbus der BBG [52]

Alle zwölf Fahrzeuge werden auf den beiden Linien 861 und 862 eingesetzt. Die Linien befinden sich komplett unter Fahrdrabt. Ein Einsatz der Fahrzeuge ohne Oberleitung ist bisher nicht festgelegt. Jedoch gab die Barnimer Busgesellschaft mbH im Jahr 2015 eine Machbarkeitsstudie in Auftrag, welche den Einsatz von Hybridoberleitungsbusen auf der Dieselbuslinie 910 prüfen sollte [52]. Die Studie ergab, dass ein Einsatz von Hybridoberleitungsbusen auf der teilweise oberleitungsfreien Strecke technisch, ohne größere Investitionen in die Infrastruktur, umsetzbar ist. Die Studie ergab weiter, dass für den Einsatz Fahrzeuge benötigt werden, welche ihre Energiespeicher bis zum Verlassen des Oberleitungsabschnitts komplett wiederaufgeladen haben müssen [53].

### 3.8.1.3 Esslingen

Das Oberleitungsbusnetz in Esslingen wird vom Städtischen Verkehrsbetrieb Esslingen am Neckar (SVE) betrieben. Drei Linien verkehren unter 15,5 km Fahrleitungsnetz [28]. Der

Betrieb findet mit 10 Fahrzeugen, davon 4 Batterie-Hybridoberleitungsbussen statt. Hierbei ist die 8,2 km lange Linie 101 von Untertürkheim Bhf. bis Lerchenäcker Endstation zu 100% elektrifiziert. Die Zollbergsschleife der Linie 118 kann lediglich in einer Richtung im Fahrdrabtbetrieb bedient werden. Durch die Inbetriebnahme von vier Hybridoberleitungsfahrzeugen im Jahr 2016 konnten auf der Obuslinie 118 somit ein Zweirichtungsverkehr und die zusätzliche Linie 113 eingerichtet werden.

Ein Hybridobusbetrieb findet dementsprechend auf den Linien 118 und 113 statt. Die Linie 118 führt vom ZOB<sup>4</sup> am Bahnhof Esslingen auf den Zollberg und bedient einmal stündlich entgegen des Uhrzeigersinns das Zollbergplateau und führt daraufhin zurück zum Esslinger Bahnhof. Halbstündlich wird an der Haltestelle Zollberg ausgedrahtet und die Strecke auf dem Plateau im Batteriemodus befahren. Der Betrieb der Linie erfolgt mit einem Fahrzeug. Die Linienlänge beträgt ca. 8,8 km. Davon werden ca. 2,7 km ohne Fahrdrabt im Batteriemodus betrieben. Die Haltestellen werden von Betriebsbeginn bis Betriebsschluss in einem halbstündlichen Takt angefahren. In den Morgenstunden von 5.30 bis 6.30 Uhr werden die Haltestellen am Zollbergplateau ausschließlich im Oberleitungsbetrieb angefahren. Ab 7.00 Uhr findet, wie oben beschrieben, ein halbstündlicher Wechsel der Befahrungsrichtung statt [28].

Die Linie 113 fährt ebenfalls wie die Linie 118 vom ZOB am Esslinger Hauptbahnhof unter Fahrdrabt den Zollberg hinauf, drahtet an der Mutzenreisstraße aus und fährt im Batteriemodus durch Berkheim bis zur Endhaltestelle Kronenstraße. Auf der Rückfahrt fährt der Bus über die Adenauerbrücke Richtung ZOB. An der Haltestelle Schwimmbad drahtet das Fahrzeug auf der Strecke der Linie 101 wieder in das Oberleitungsnetz ein. Auf der Linie 113 werden teilweise weiterhin Dieselbusse eingesetzt [28].

Entlang der Linie 113 werden ca. 12 km zurückgelegt. Der Anteil an fahrdrahtlosem Betrieb liegt bei ca. 6 km. Insgesamt wird auf dem Streckenabschnitt eine Höhendifferenz von 219 m überwunden [28].

Insgesamt sind, von der ersten Überlegung der Anschaffung der Hybridfahrzeuge im Jahr 2011, 270.000 € Projektkosten und 170.000 € Investition in die Fahrleitung für 8,2 km zusätzliche Strecke pro Richtung im Jahr 2016 entstanden.

Bei den 2016 beschafften Hybridoberleitungsbussen handelt es sich um Fahrzeuge des Typs Solaris Trollino 18,75 Metrostyle (siehe Abbildung 3-33). Als Generalunternehmen agierte hierbei Kiepe Electric. Die Fahrzeuge verfügen über das bei Kiepe patentierte In-Motion-Charging (IMC®)-Verfahren, bei dem die Fahrzeuge unter Fahrdrabt die Batterie-speicher laden. Die Fahrzeuge entsprechen der verlängerten Version der Metrostyle-Obusse in Salzburg. In Tabelle 3-20 sind die fahrzeugtechnischen Kenndaten dargestellt.

---

<sup>4</sup> ZOB = Zentraler Omnibus-Bahnhof

Im Mai 2017 kündigte die SVE eine Erweiterung der Obus-Infrastruktur von 3,6 km und die Beschaffung weiterer Hybridoberleitungsbusse an [51].



Abbildung 3-33: Fahrzeug Esslingen, Solaris/Kiepe Trollino 18,75 Metrostyle [31]

Tabelle 3-20: Fahrzeugtechnische Kenndaten Solaris/Kiepe Trollino 18,75 Metrostyle [31], [28]

Systemkenndaten [Einheit]	Wert
Anzahl Hybridobus	4
Hybridisierungsart	Batterie
Fahrzeugbezeichnung	Solaris Trollino 18.75 Metrostyle
Inbetriebnahme	2016
Fahrzeugkosten [€]	1.000.000
Fahrzeuglänge [m]	18,75 (1 Gelenk)
Achslast [t]	7,1 / 11,5 / 10
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	60-65
Transportkapazität (Steh +Sitz.) [Pers]	110 + 44
Nennleistung [kW]	500
Reichweite elektrisch [km]	10-15
Batteriehersteller	Voltabox
Speichertechnologie	Lithium-Titanat-Oxid
Hersteller Elektriksystem	Knorr-Kiepe
Akku Gesamtenergie [kWh]	46
Ausnutzbare Energie Akkus [kWh]	37
Ausnutzbare Höchstleistung Akkus [kW]	240
Ladekonzept	IMC 150 kW
Energieaufnahme fahrend	150 kW

Bei dem verwendeten Energiespeicher handelt es sich um Lithium-Titanat-Oxid Batterien des Typs Voltabox Paragon [28]. Die Batterien werden je nach Bedarf auf 30 °C gekühlt bzw. geheizt. Es werden 2 x 14 Module mit einer Spannung von 500 V verwendet. Die

Akkupacks haben eine Kapazität von 46 kWh, wobei 37 kWh genutzt und 9 kWh als Notfallreserve zur Verfügung stehen [31].

### 3.8.1.4 Solingen

Das Oberleitungsbusnetz in Solingen ist mit einer Fahrdrahlänge von 102 km das größte Deutschlands [42]. Mit 50 Fahrzeugen werden 6 Linien im Netz der Solinger Stadtwerke (SWS) bedient, wobei die Linie 683 in das Gebiet der benachbarten Stadt Wuppertal führt [50].

Für eine Erweiterung der Netzlänge hat die SWS im Jahr 2016 vier mit Option auf weitere 16 Hybridoberleitungsbusse bei einem Konsortium aus Solaris und Kiepe bestellt. Im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) stehen für die Integration der Batterie-Oberleitungsbusse (BOB) in das bestehende Obusnetz 15 Mio. Euro zur Verfügung. Weitere 4 Mio. Euro werden aus Eigenmitteln des Verkehrsbetriebs für die Beschaffung der Fahrzeuge aufgewendet [22]. Die ersten Planungen für das Hybridobus-Projekt haben bereits in den Jahren 2013/2014 begonnen [34].

Die SWS plant ab Herbst 2018 die Umstellung der mit konventionellen Bussen betriebenen Linie 695 auf einen Hybridobus-Betrieb, da bereits auf einem Viertel der Strecke eine Oberleitungsinfrastruktur existiert. Die Linie führt hierbei vom Abteiweg über die Innenstadt nach Meigen. Von der Wendeschleife Abteiweg im Stadtteil Gräfrath führt die Linie rund 4,5 km im oberleitungsfreien Betrieb bis zur Haltestelle Unionstraße. Von der Haltestelle Unionsstraße bis Bahnhof Solingen-Mitte führt die Linie ca. 2,5 km unter Fahrdracht. Der HOBus bezieht in diesem Abschnitt seine Energie sowohl für den Antrieb als auch für die Ladung der Batteriespeicher aus der Oberleitung. Vom Bahnhof Solingen-Mitte fährt das Fahrzeug im Batteriebetrieb auf der 3,3 km langen Endabschnitt in Schleifenführung bis zur Endhaltestelle Meigen [50].

Bei den in Solingen beschafften Fahrzeugen handelt es sich um vier Solaris Trollino 18,75. Für die elektrische Ausrüstung ist Kiepe Electric verantwortlich. Für den Antrieb sind zwei 160 kW Traktionsmotoren im Einsatz [50]. Die wassergekühlten Lithium-Titan-Oxid-Batterien vom polnischen Hersteller Impact haben ein Gewicht von 1,2 t und eine Gesamtkapazität von 60 kWh. Das Batteriepack setzt sich hierbei aus vier Einzelpacks mit einer Nenngröße von 15 kWh zusammen. Im Batteriebetrieb stehen kurzzeitig die maximale Leistung von 320 kW sowie eine Dauerleistung von 200 kW zur Verfügung [34]. In Abbildung 3-34 ist der erste ausgelieferte BOB<sup>5</sup> dargestellt. Die wesentlichen fahrzeugtechnischen Kenndaten des BOB sind in Tabelle 3-21 abgebildet.

---

<sup>5</sup> BOB = Batterie-Obus



Abbildung 3-34: Fahrzeug BOB in Solingen [34]

Tabelle 3-21: Fahrzeugtechnische Kenndaten BOB Solingen [34], [50], [45]

Parameter	Wert
Anzahl Hybridobus	4
Hybridisierungsart	Batterie
Fahrzeugbezeichnung	Solaris Trollino 18.75 Metrostyle
Inbetriebnahme	2018
Fahrzeugkosten [€]	900.000
Fahrzeuglänge [m]	18,75 (1 Gelenk)
Achslast [t]	7,1 / 11,5 / 10
Höchstgeschwindigkeit [km/h]	60-65
Transportkapazität (Steh +Sitz.) [Pers]	69 + 46
Nennleistung [kW]	320
Reichweite elektrisch [km]	20
Batteriehersteller	Impact
Speichertechnologie	Lithium-Titanat-Oxid
Hersteller Elektriksystem	Knorr-Kiepe
Akku Gesamtenergie [kWh]	60
Ausnutzbare Höchstleistung Akkus [kW]	320
Ladekonzept	In-Motion-Charging

Ab 2020 soll mit der turnusmäßigen Ersatzbeschaffung für die 15 Berkhoff Premier AT Obusse begonnen werden. Hierfür sieht der im Jahr 2016 mit Solaris/Kiepe abgeschlossene Liefervertrag eine Option von 16 Fahrzeugen vor, die bis zum Jahr 2020 von den

Stadtwerken Solingen gezogen werden kann. Sollte die Option gezogen werden, bestünde die Möglichkeit die bestehende Linie 683, die bereits an beiden Enden jeweils ein Stück mit Dieselmotor zurückgelegt, auf Batterie-Oberleitungsbusse umzurüsten [34].

### **3.8.1.5 Arnheim**

In Arnheim besteht Interesse, die Oberleitungslinie 3 von Het Duifje nach Huissen ohne Fahrdrähte zu verlängern. Hierbei sollen in den zwei Hess/Kiepe SwissTrolley 4 Fahrzeugen der Dieselmotorhilfsantrieb durch eine wassergekühlte 160 kW / 30 kWh Batterie ersetzt werden. Die Batterie soll unter Fahrdraht mit 150 kW nachgeladen werden können [29].

### **3.8.1.6 Fribourg**

Nach der Durchführung von Vergleichsstudien haben der Verkehrsbetrieb Fribourg (TPF) und die Agglomeration Fribourg im März 2018 eine Beschaffung von Hybridbussen verkündet. Hierbei sollen ab Mitte 2020 bis 2021 die ersten zehn Fahrzeuge geliefert werden. Die Fahrzeuge sollen auf der Linie 1 zu Einsatz kommen. Hierbei befindet sich ein 3 km langer Streckenabschnitt im Zentrum unter Fahrdraht. Etwa 1,8 km in Richtung Norden zur Porte de Fribourg als auch in Richtung Süden in die Gemeinde Marly (3,7 km) befinden sich nicht unter Fahrdraht. Es kommen in der Hauptverkehrszeit im 7,5-Minutentakt neun Kurse zum Einsatz. Ansonsten verkehren im 10-Minutentakt sieben Kurse. Sofern sich die beschafften Neufahrzeuge im Betrieb bewähren, sollen im Jahr 2022 weitere 20 Fahrzeuge bestellt werden, um in den Jahren 2023-2025 die 12 SwissTrolley Fahrzeuge auf den Linien 2 und 3 zu ersetzen. Des Weiteren ist eine Verlängerung des elektrischen Betriebs auf der Linie 6, die rund 3,7 km gemeinsam mit der Linie 2 verkehrt, vorgesehen [35].

### **3.8.1.7 St. Petersburg**

In St. Petersburg wurde die 14 km lange Oberleitungslinie 23 mit 15 Trolza-Megapolis Fahrzeugen mit einer Länge von 12 m unter dem Einsatz von Toshiba-Batterien im östlichen Teil um 7 km ohne Fahrleitung erweitert [29].

### **3.8.1.8 Marrakesh**

In Marrakesh sind seit September 2017 zehn chinesische Dongfeng-Yangtse-Oberleitungsfahrzeuge auf einer 10 km langen Obuslinie entlang des Avenu Hassan III im Einsatz. Die Strecke verbindet hierbei die Ortsteile Guelz und Massira und ist lediglich auf einer Strecke von 3 km elektrifiziert. Auf diesem Abschnitt werden die Traktionsbatterien für die Fortsetzung der weiteren Abschnitte aufgeladen. In Abbildung 3-35 ist das in Marrakesh betriebene

Fahrzeug dargestellt. Der Obusbetrieb findet auf einer separat bereitgestellten Trasse statt. Weitere drei Linien sind Planung, wovon die nächste im Jahr 2019 eröffnet werden soll. Weitere 15 Hybridoberleitungsfahrzeuge in Gelenkausführung sind bereits bestellt [29].



Abbildung 3-35: Yangtse Hybridoberleitungsbus Marrakesh im Batteriemodus [35]

### 3.8.1.9 Zürich

Ab 2003 beschafften die Verkehrsbetriebe Zürich (VBZ) von der Hess AG 17 (+ 14 Option) 24,7 m lange SwissTrolley Doppelgelenkoberleitungsfahrzeuge. Die Fahrzeuge wurden anfänglich mit Diesel-Hilfsaggregaten ausgeliefert. Die VBZ beschlossen die Umrüstung von 18 Doppelgelenk- und 17 Gelenkfahrzeuge auf Hilfsbatteriebetrieb, um die Einhaltung der Euro V und VI Standards zu gewährleisten. Ab 2013 wurden die restlichen Doppelgelenkoberleitungsbusse ab Werk mit Hilfsbatterien ausgestattet. Die Umrüstung sah lediglich die Befahrung von kurzen oberleitungsfreien Abschnitten vor, sodass Investitionen in Fahrleitungen, Kreuzungen und Luftweichen beim Umbau des Albisriedplatzes eingespart werden konnten. Somit fahren die Linien 33 und 72 seit Sommer 2015 planmäßig zwischen Albisriedplatz und Hardplatz im Batteriemodus [29].

Die VBZ sehen im Trolleybus auf stark frequentierten Linien Vorteile gegenüber dem E-Bus und haben daher im Jahr 2016 bekannt gegeben, dass die Buslinien 69 (4,2 km) und 80 (11,8 km) im Zeitraum von 2019 bis 2022 auf HObusbetrieb umgestellt werden sollen. Für die Erschließung der Gebiete beteiligt sich der Verkehrsbetrieb aus Zürich an der Entwicklung des Batteriehybridbusses SwissTrolley plus, welcher größere Abschnitte im Batteriebetrieb befahren kann. An dem Projekt SwissTrolley plus sind neben der VBZ sowohl die Carrosserie Hess AG als auch die ETH Zürich und die Berner Fachhochschule beteiligt [48].

Seit Anfang 2017 wird das Fahrzeug auf dem Netz der Verkehrsbetriebe Zürich getestet. Das Fahrzeug verfügt über eine Lithium-Titanat-Oxid-Batterie mit einer Gesamtenergie von 60 kWh. Die Batterien werden während der Fahrt mit 11 bis 22 kW aus dem Netz als auch dem Bremsstrom geladen. Im Linienbetrieb wird hierdurch eine Reichweite von rund 10 km erreicht. Bei Leerfahrten können bis zu 30 km erreicht werden [29].



Abbildung 3-36: Darstellung des SwissTrolley plus im Einsatz in Zürich [49]

### 3.8.1.10 Shanghai

Im Februar 2017 gingen auf der Buslinie 71 40 Einheiten 18-m-HObusse (ZK5180A) und 28 Einheiten 12-m-HObusse (ZK5120C) mit Niederflurtechnik der Firma Yutong offiziell in Betrieb. Die Linie zwischen Shenkun Road und Yan'an East Road hat eine Gesamtlänge von 17,5 km mit 25 Haltestellen und ist eine der wichtigsten Buslinien der Stadt. Die Fahrzeuge verkehren auf einer eigens eingerichteten Busspur. Dadurch konnte die Betriebsgeschwindigkeit von 13 km/h auf 15 km/h gesteigert und somit die Umlaufzeit von 85 min auf 75 min gesenkt werden. Mit dem System werden momentan ca. 4.000 Passagiere in der Stunde befördert und es wird erwartet, dass diese Zahl auf 6.000 ansteigt. [97]

### 3.8.2 Übersicht der Hersteller

Beim Batterieoberleitungsbus ist zum einen zwischen Fahrzeugen mit geringer Batteriekapazität für den kurzzeitigen Einsatz im fahrleitungsfreien Betrieb ohne Ladung aus der Fahrleitung und zum anderen zwischen Fahrzeugen mit permanenter Ladung aus der Fahrleitung mit höherer Reichweite zu unterscheiden. In der ersten Variante wird der Batteriespeicher durch die Verwendung von Supercaps durch die Rekuperation der Bremsenergie wiederaufgeladen. Hybridoberleitungsbusse zeichnen sich mit ihrer Fähigkeit der Aufladung des Energiespeichers bei Fahrt unter Fahrdrabt aus. Hierfür wird ein speziell entwickeltes Elektrik-System benötigt. Weltweit führend ist hierbei das von Kiepe Electric entwickelte In-

Motion-Charging (IMC®)-System. Das IMC®-System ist hierbei unabhängig vom Karosseriebauer. In Tabelle 3-22 ist eine Übersicht der Hybridoberleitungsbusse mit der Kiepe IMC®-Technik dargestellt.

Im Januar 2018 hat Solaris Bus & Coach bekannt gegeben, dass noch im gleichen Jahr ein Doppelgelenkoberleitungsfahrzeug mit 24 m fertiggestellt und demonstriert werden soll. Das Fahrzeug soll mit zwei 160 kW starke Traktionsmotoren von Cegelec ausgestattet werden [29]. Auf Grund der bisherigen Zusammenarbeit von Kiepe und Solaris im deutschen Obusmarkt ist es vorstellbar, dass auch dieses Fahrzeug mit Hilfe der IMC®-Technologie zu einem Hybridoberleitungselektrobus weiterentwickelt wird.

Ein weiteres im Einsatz befindliche Elektrik-System zur Aufladung des Energiespeichers unter Fahrdracht ist das im Rahmen des SwissTrolley plus (siehe Abbildung 3-36) entstandene Dynamic Charging (DC) Verfahren, welches in Zusammenarbeit der Hess AG gemeinsam mit der ETH Zürich, Fachhochschule Bern und der VBZ entwickelt worden ist. Das mit zwei 154 kW PMS<sup>6</sup>-Motoren angetriebene Gelenkfahrzeug wird momentan in Zürich und Luzern getestet und hat eine Länge von 18,74 m [29], [49].

Außerhalb von Europa stellt der chinesische Hersteller Dongfeng-Yangtse „Dual-Source“ Hybridoberleitungsbusse her, die während des Betriebs unter Fahrdracht das Batteriepaket aufladen können. Die Oberleitungsbusse sind hierbei als zweiachsige Fahrzeuge mit 12 m Länge (siehe Abbildung 3-35) und als dreiachsige Gelenkfahrzeuge mit einer Länge von 16 m und 18 m erhältlich [25]. Weitere große chinesische Bushersteller wie Yutong und Zhongtong (Fahrzeug LCK6123GEV in Jinan) [98] haben in den letzten Jahren HOBusse ausgeliefert.

Tabelle 3-22: Ausgelieferte bzw. bestellte HO-Elektrobusse von Kiepe Electric mit IMC®-Technologie [32]

Anzahl	Betreiber	Inbetriebnahme	Karosseriehersteller	Modellbezeichnung	Länge [m]	Anzahl Gelenke	Leistung [kW]	Reichweite elektrisch [km]
20	Linz AG	2017-2018	Van Hool	ExquiCity 24 T	24	2	320	7
4	Verkehrsbetrieb Esslingen	2016	Solaris	Trollino 18.75 Metro-Style	18.75	1	500	10-15
4 (Option +16)	Stadtwerke Solingen	2018	Solaris	Trollino 18,75	18,75	1	320	10-15

<sup>6</sup> PMS-Motor = Permanent Magnet Synchronous Motor, dt.: Synchronmotor mit Erregung durch Permanentmagneten

Anzahl	Betreiber	Inbetriebnahme	Karosseriehersteller	Modellbezeichnung	Länge [m]	Anzahl Gelenke	Leistung [kW]	Reichweite elektrisch [km]
452	King County Metro Seattle/ SFMTA, San Francisco	2014-2019	Xcelsior	XT60	18.54	1	n/a	min. 5
		2014-2019	Xcelsior	XT40	12.5	0	n/a	min. 5
28	GDRTA, Dayton	2018-2019	Gillig Corp.	NextGen	12.5	0	n/a	n/a
33	TPG, Genf	2013-2014	Van Hool	ExquiCity	18	1	320	7

## 4 Technische Machbarkeit

### 4.1 Eingangsdaten der Simulation

#### 4.1.1 Infrastruktur

Das Busnetz Berlin-Spandau ist für diese Untersuchung gewählt worden, weil es nachfragestarke Buslinien, parallel zueinander verlaufende Buslinien, potentiell geeignete Straßeninfrastruktur sowie noch keine kurz- bis mittelfristigen Straßenbahnplanungen aufweist.

Das Gesamtnetz HObus Berlin Spandau erstreckt sich von Kladow im Süden über Dallgow-Döberitz im Osten, dem S+U Bahnhof Zoologischer Garten im Westen bis zum Wilhelmsruher Damm im Nordwesten. Kern des Netzes ist der S+U Bahnhof Rathaus Spandau. Im Norden endet das betrachtete Netz am Aalemannufer. Im Nordosten reicht das Netz bis zum Bahnhof Albrechtshof in Staaken sowie bis zur Stadtrandstr. im Falkenhagener Feld. Das Gesamtnetz HObus Berlin Spandau hat eine Länge von 235,5 km mit insgesamt 573 modellierten Richtungshaltestellen.

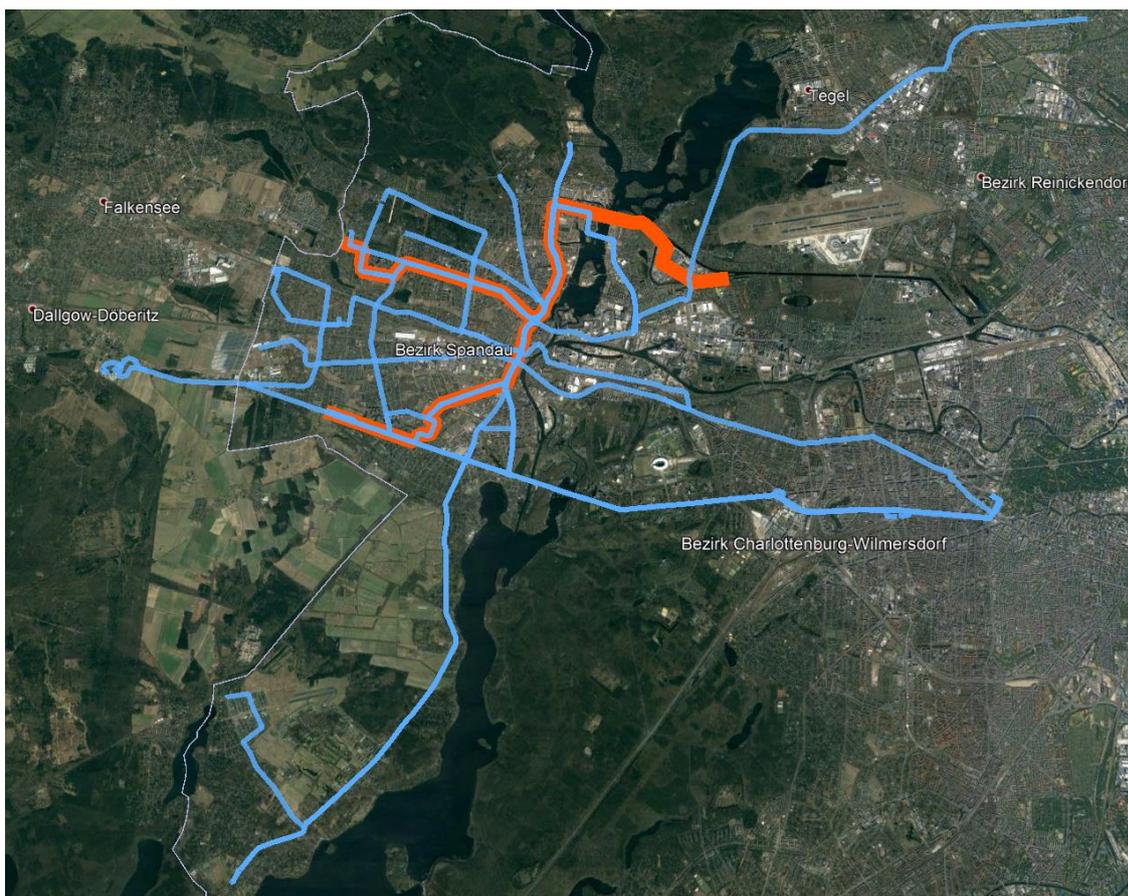


Abbildung 4-1: Übersicht Gesamtnetz HObus Berlin Spandau in blau, perspektivische Straßenbahntrasse in orange, Bildquelle: Google Earth

Die maximale Streckenhöchstgeschwindigkeit ist im Stadtbereich von Berlin 50 km/h. Tempo-30-Zonen und Bereiche sind modelliert, wo bekannt. Auf der B5 (Hamburger Chaussee) hinter der Stadtgrenze in Richtung Dallgow-Döberitz beträgt die maximale Streckenhöchstgeschwindigkeit 60 km/h.

Bei Abbiegungen ist eine maximale Streckenhöchstgeschwindigkeit von 10 km/h modelliert. An großen Kreuzungen findet ein Ampelhalt statt.

Ein beispielhafter Geschwindigkeitsverlauf für die Linie M37 vom Waldkrankenhaus nach Hahneberg ist in Abbildung 4-2 dargestellt.

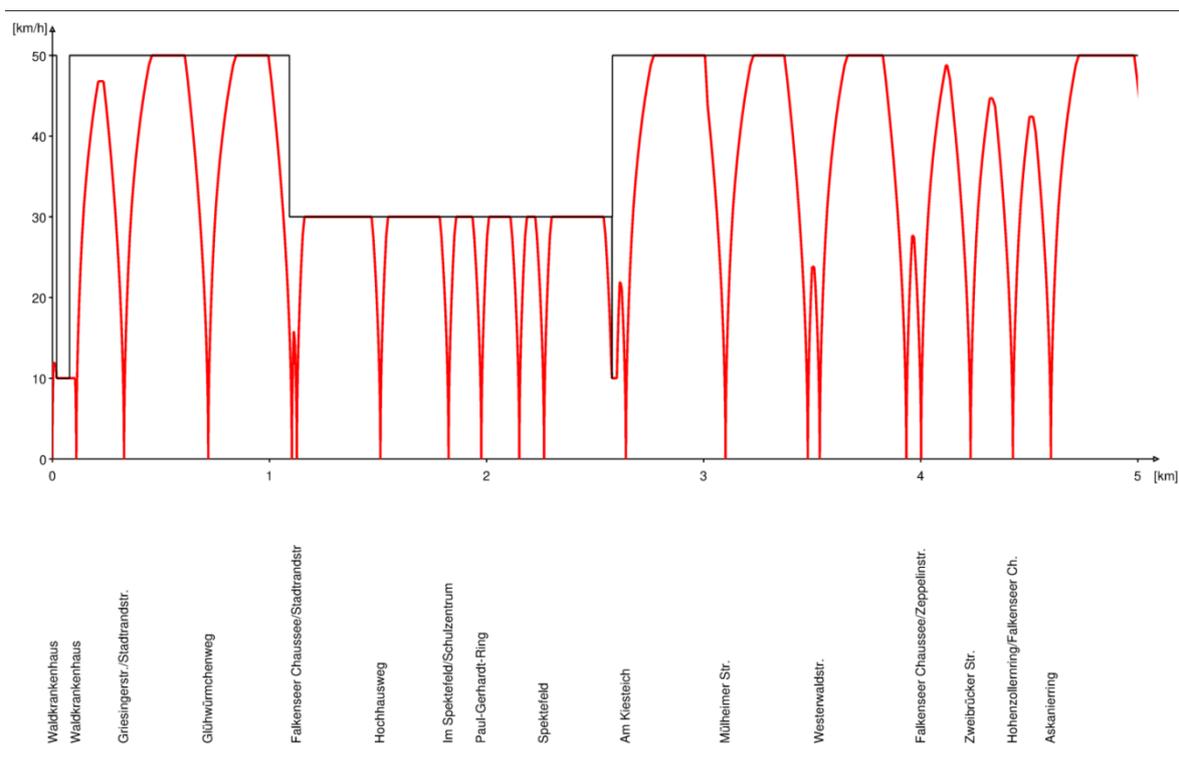


Abbildung 4-2: Ausschnitt Geschwindigkeitsverlauf Linie M37

Das betrachtete Netz wurde für die Modellierung in Abschnitte (AB) unterteilt, welche eine zweistellige Nummer besitzen. Die Abschnitte wurden jeweils in auf- und absteigende Richtung kilometriert, wobei die Richtungsspuren mit "h" für die aufsteigende Richtung und "r" für die absteigende Kilometrierung identifizierbar sind. In Einzelfällen wurden zusätzliche parallele Spuren eingefügt, um an Kreuzungen oder Wendeschleifen abhängig von der Relation das Fahren mit oder ohne Fahrdrabt abbilden zu können; diese wurden zusätzlich mit Ziffern, z. B. „h2“, versehen.

In Tabelle 10-1 sind alle Abschnitte und Spuren zusammengefasst. Unterschiedliche Distanzen für die auf- und absteigende Richtung, z. B. aufgrund von Wendeschleifen oder verschiedenen Fahrwegen, wurden mit sogenannten Kilometrierungssprüngen berücksichtigt

(siehe Tabelle 10-2), wobei die angegebene Distanz immer übersprungen wird. Die Verbindungen der einzelnen Abschnitte im Netz bezogen auf die definierte Kilometrierung sind in Tabelle 10-3 gezeigt. Die Lage der Haltestellen mit Halteposition der Fahrzeugspitze bezogen auf die definierten Abschnitte ist in Tabelle 10-4 zusammengefasst. Dort sind auch die drei- oder vierstelligen Haltestellenkürzel eingetragen, welche im Bericht und in den Ergebnissen sowie in den Anlagen zumeist anstelle der vollständigen Namen verwendet werden.

#### **4.1.2 Betriebskonzept**

In Berlin-Spandau verkehren derzeit 25 Linien der BVG. Ein Großteil der Linien verkehrt heute aufgrund der hohen gebündelten Verkehrsnachfrage als Gelenk- oder Doppeldeckerbus in dichter Taktfolge. Da davon auszugehen ist, dass die Verkehrsnachfrage in Spandau in den nächsten Jahren weiter ansteigen wird, sieht die BVG für das Jahr 2030 weitere Taktverdichtungen und auf einigen Linien den Einsatz größerer Fahrzeuge vor. Es sind also linienspezifisch sehr hohe Platzkapazitäten zur Verfügung zu stellen. Dies ist einer der wesentlichen Gründe, warum Spandau auch von der BVG als potenzielles Einsatzgebiet für den HO-Bus-Betrieb gesehen wird.

Aufgrund des vielfach achsenförmigen, gut gebündelten Verlaufs der Linien und der Höhe der Fahrgastzahlen, sind bestimmte Korridore in Spandau vom Systemansatz her grundsätzlich für den Einsatz eines schienengebundenen Systems (Straßenbahn) und genauso auch für Oberleitungsbus geeignet. Ein Straßenbahnbetrieb in Spandau ist auch im Nahverkehrsplan Berlin 2019-2023 als mögliche Option vorgesehen. Das gegebene Straßennetz bietet hierfür gute Voraussetzungen.

Mit dem Hybridoberleitungsbus und der dadurch möglichen flexiblen Kombination spurgeführter und nicht spurgeführter Abschnitte könnte ein HObusnetz größer ausgelegt werden und mehr heutige Buslinien ersetzen als ein neues Straßenbahnnetz. Für die vorliegende Machbarkeitsuntersuchung zum Hybridoberleitungsbus hat die BVG 15 Linien als grundsätzlich planungsrelevant ausgewählt (siehe Tabelle 4-1). In der vorliegenden Studie wird zunächst eine vollständige Umstellung dieser Dieselbuslinien auf HObus angenommen, d.h. die bestehenden Straßenbahnplanungen für Spandau bleiben unberücksichtigt. In einem ergänzenden Szenario wurden anschließend auch die Straßenbahnplanungen einbezogen.

Tabelle 4-1: planungsrelevante BVG-Linien der Machbarkeitsuntersuchung des Batterieoberleitungsbusses

Linie	Linienverlauf	Takt HVZ Ist	Fahrzeug Ist	Takt HVZ 2030	Fahrzeug 2030
M32	S+U Rathaus Spandau ◀▶ Staaken, Heidebergplan oder Staaken, Brunsbütteler Damm/Stadtgrenze oder Dallgow-Döberitz, Havelpark	5/10/20/20	Gelenkbus	3,3/10/10/10	Doppelgelenkbus
M37	Spandau, Waldkrankenhaus ◀▶ Staaken, Hahneberg	8/16	Doppeldecker	5/10	Doppelgelenkbus
M45	Spandau ◀▶ S+U Zoologischer Garten	6	Gelenkbus	5	Gelenkbus
M49	Heerstraße/Nennhauser Damm ◀▶ Staaken, Reimerweg <> S+U Zoologischer Garten	10/20	Gelenkbus	10	Gelenkbus
X33	S+U Rathaus Spandau ◀▶ Märkisches Viertel, Wilhelmsruher Damm	6,6	Doppeldecker	6,6	Gelenkbus
X34	Kladow, Kaserne Hottengrund oder Gutsstraße ◀▶ S+U Zoologischer Garten	10/20	Doppeldecker	10/20	Gelenkbus
X36	S+U Rathaus Spandau ◀▶ U Haselhorst	10	Gelenkbus	10	Doppelgelenkbus
X49	Staaken, Hahneberg oder Spandau, Im Spektefeld ◀▶ U Wilmersdorfer Straße	10/20	Standardbus	10	Gelenkbus
130	U Ruhleben ◀▶ Waldkrankenhaus oder Westerwaldstr	20/10/20	Gelenkbus	10	Gelenkbus
134	Wasserwerk Spandau ◀▶ Kladow, Hottengrund	10/20	Gelenkbus	10	Gelenkbus
136	Gatower Str./Heerstr. ◀▶ Hakenfelde, Aalemannufer	10/20	Gelenkbus	10/20	Doppelgelenkbus
137	Spandau, Freudstraße ◀▶ Staaken, Reimerweg	10/20	Doppeldecker	10	Doppelgelenkbus
236	Gatower Straße/Heerstraße ◀▶ U Haselhorst	10	Gelenkbus	10	Doppelgelenkbus
237	S+U Rathaus Spandau ◀▶ Staaken, Isenburger Weg	10	Gelenkbus	7	Gelenkbus
N34	Hakenfelde, Aalemannufer ◀▶ Kladow, Kaserne Hottengrund	30	Standardbus	30	Gelenkbus

Anhand der Linienbezeichnung ist eine Kategorisierung der Buslinien erkennbar. Die Linien mit einem M im Liniennamen sind MetroBusse. Diese verkehren im Bediengebiet 24 Stunden am Tag. ExpressBusse sind mit dem Buchstaben X gekennzeichnet. Diese Busse verkehren schneller, da sie nicht jede Haltestelle bedienen. Linien, die nur in der Nacht verkehren, sind mit den Buchstaben N markiert.

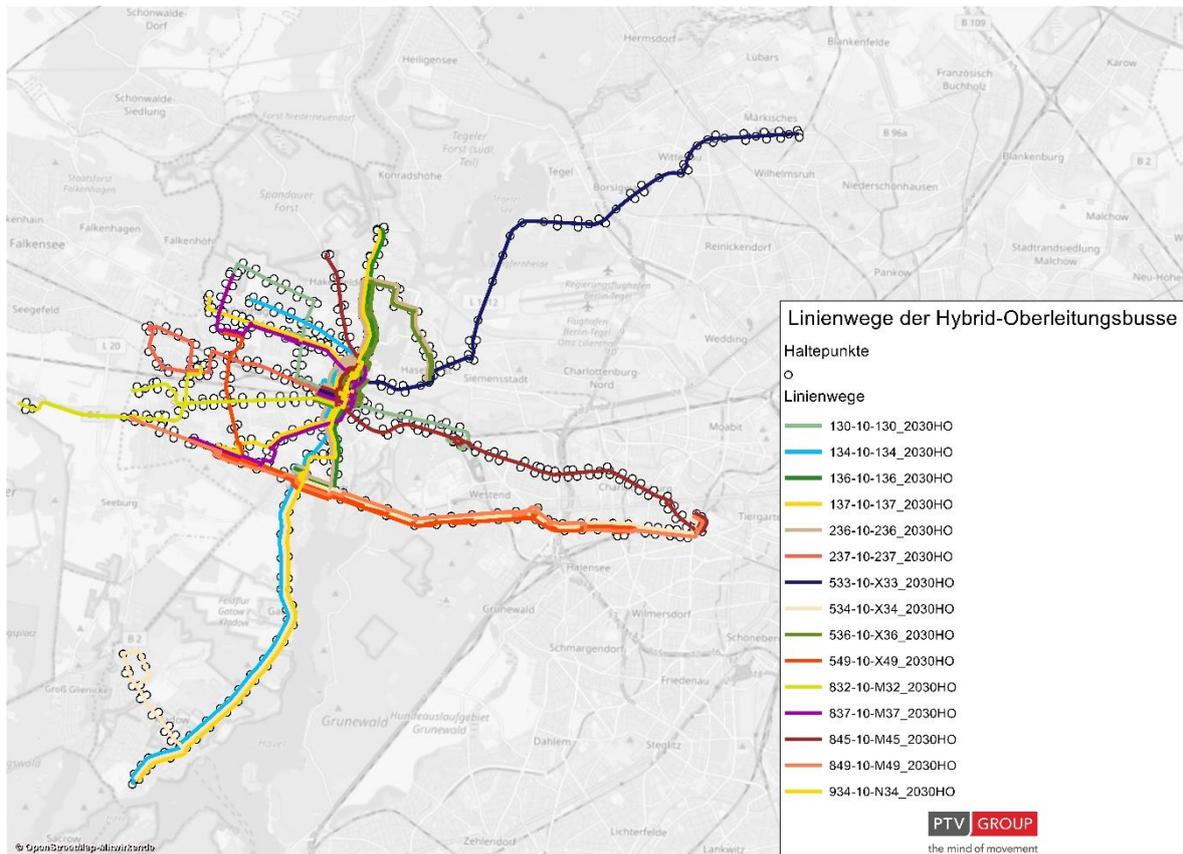


Abbildung 4-3: Linienwege der planungsrelevanten BVG-Linien

Der PTV liegt ein Visum Verkehrsmodell mit Datenstand 2018 der BVG vor. Das Verkehrsmodell beinhaltet ein georeferenziertes Streckennetz mit allen Haltestellen, das ÖPNV-Linien- und Fahrplanangebot, die Strukturdaten des Untersuchungsraumes sowie die kalibrierte ÖPNV-Verkehrsnachfrage. Die für dieses Projekt verwendete Arbeitsversion ist die Verkehrsprognose 2025 mit dem ÖPNV-Angebot aus 2018. Durch die BVG wurde der PTV eine Datenfreigabe zur Nutzung dieses Modells erteilt.

Das Verkehrsmodell beinhaltet die Gesamtverkehrsleistung des gesamten ÖPNV in Berlin Spandau eines mittleren Werktages. Als Basis für die Dimensionierungsprüfung der eingesetzten bzw. geplanten Fahrzeugkapazitäten in den einzelnen Szenarien und als Grundlage für die Wirtschaftlichkeitsbewertung wird damit ein mittlerer Werktag unterstellt.

Für das Prognosejahr 2030 wurde der PTV der geplante Rahmenfahrplan 2030 durch die BVG zur Verfügung gestellt. Das ÖPNV-Angebot für das Jahr 2030 wurde im Verkehrsmodell (Visum) dementsprechend modelliert. Eine Übergabe der Fahrplanfahrten 2030 an den Projektpartner IFB erfolgte über das Austauschformat railML.

Auf die Hochrechnung der vorliegenden Prognosenachfragedaten 2025 auf das Jahr 2030 wurde aufgrund fehlender abgestimmter Strukturdatenannahmen verzichtet. In der Arbeitsgruppe wurde vereinbart, mit den abgestimmten prognostizierten Nachfragezahlen 2025 zu arbeiten.

Das Verkehrsmodell enthält die Verkehrsnachfragedaten eines Werktages. Hinterlegt ist eine Tagesganglinie sowie Fahrgastzählwerte für zahlreiche Zählquerschnitte. Darüber hinaus hat die BVG linienbezogene Tagesganglinien zur Verfügung gestellt. Zu Beginn erfolgte die Umlegung der 2025er ÖV-Matrix auf das ÖPNV-Netz. Als Ergebnis ist die Tagesbelastung je Streckenabschnitt für das Jahr 2025 zu erkennen.

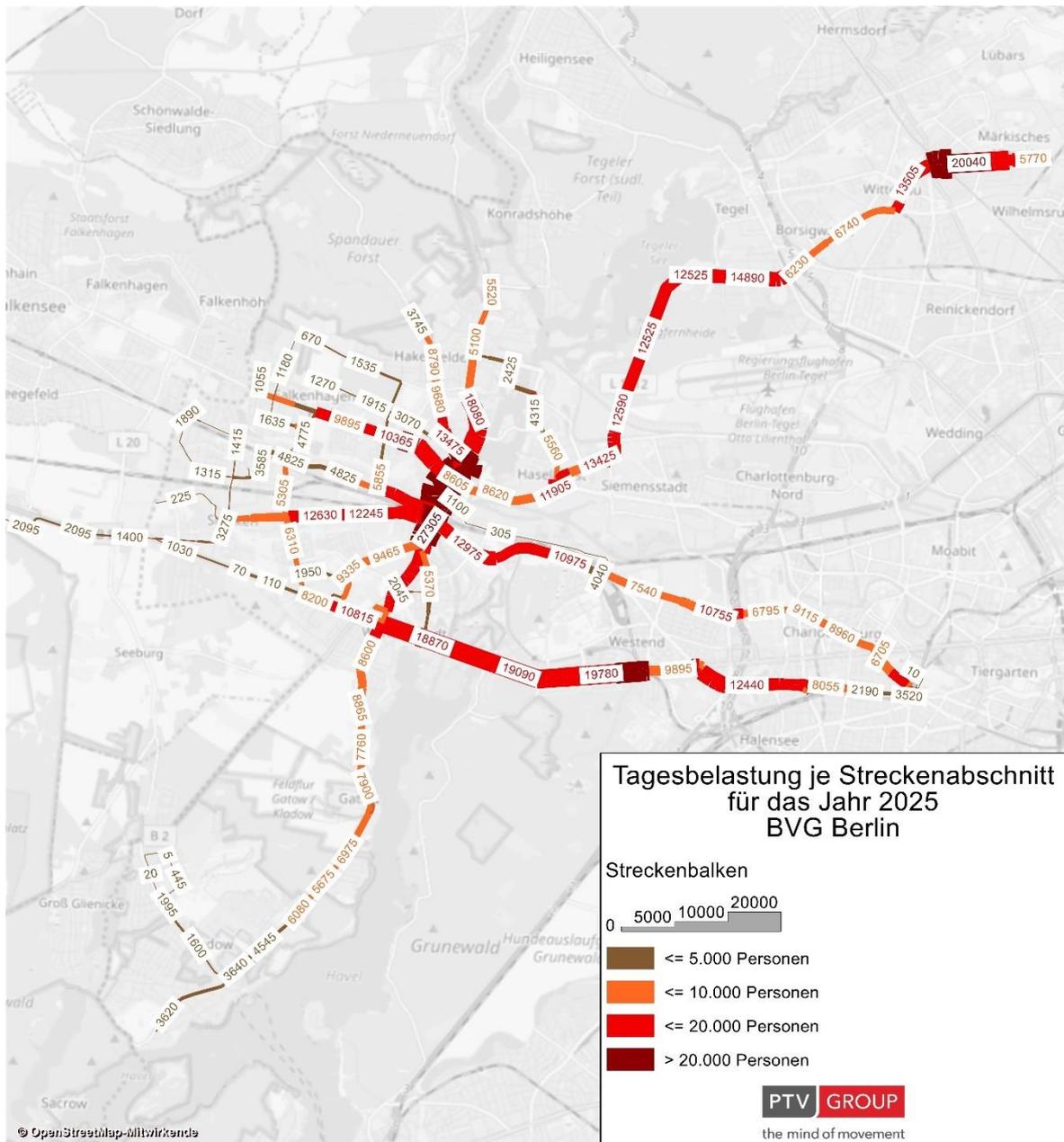


Abbildung 4-4: Tagesbelastung je Streckenabschnitt 2025

Danach folgte, anhand der Tagesganglinien der BVG, die Abschätzung der linien- und abschnittswisen Spitzenstundenbelastung. Die Spitzenstunde liegt am Vormittag zwischen 07:00 und 08:00 Uhr sowie am Nachmittag zwischen 16:00 und 17:00 Uhr. Zur Abschätzung der Nachfrage je Fahrt, gilt die Annahme einer Gleichverteilung der Nachfrage über eine Stunde.

Aus den berechneten Belastungen erfolgt die Dimensionierungsprüfung. Ziel ist es, dass das geplante Fahrplanangebot im Jahr 2030 mit den geplanten Fahrzeugeinsätzen angemessen dimensioniert ist. Zur Bewertung wird die Auslastung pro Stunde berechnet. Diese

darf die festgelegte Grenze von 65 % nicht überschreiten. [106] Die Ergebnisse der Dimensionierungsprüfung sind in der Abbildung 4-5 dargestellt.

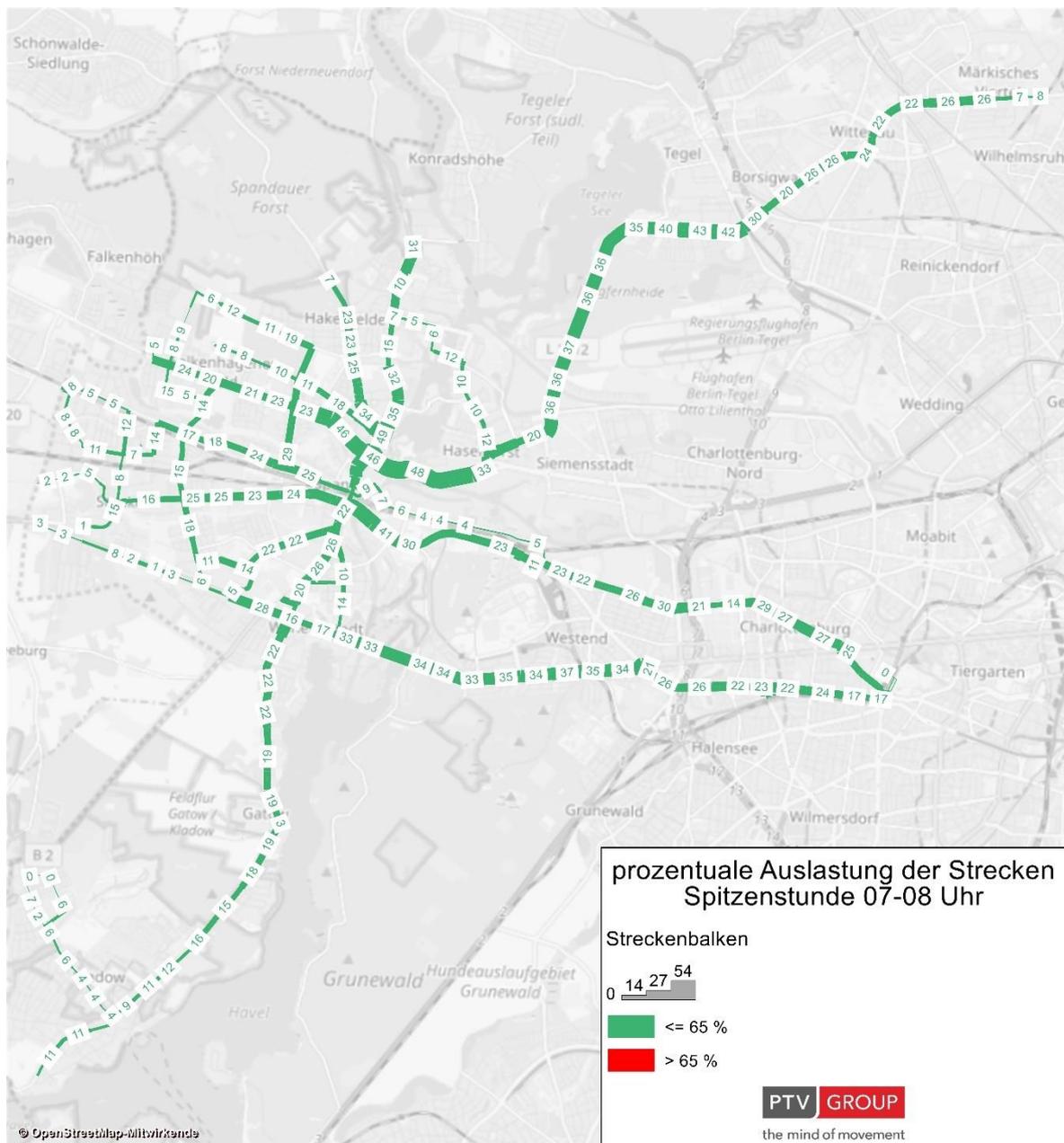


Abbildung 4-5: Ergebnisse der Dimensionierung

Auf keinem Streckenabschnitt wird das festgelegte Kriterium einer Auslastungsgrenze von 65 % (Mittel in der Spitzenstunde) überschritten. Die maximale prozentuale Auslastung liegt bei 46 % im Abschnitt zwischen den Haltestellen Wröhmannerpark und der Haltestelle Kirchhofstraße.

Im Ergebnis ist ersichtlich, dass die für das Jahr 2030 geplanten Fahrzeugkapazitäten gespiegelt an der für das Jahr 2025 prognostizierten Nachfrage ausreichen. Darüber hinaus

sind Kapazitätsreserven für eine weitere positive Entwicklung der Verkehrsnachfrage vorhanden.

Die ermittelten Fahrgastzahlen je Fahrt und Streckenabschnitt wurden an den Projektpartner IFB übergeben. Die Belastungszahlen fließen ein in die konkreten Energiebedarfs-ermittlungen der simulierten HObus-Szenarien.

Für das ÖPNV-Angebot 2030 wurde eine exemplarische Umlaufberechnung eines Betriebstages durchgeführt. Die Umlaufplanung erfolgte in Visum unter Nutzung der implementierten Umlafoptimierungsmethoden. Dazu wurden die folgenden umlauffrelevanten Annahmen festgelegt.

- Das Depot befindet sich auf dem BVG Betriebshof (Am Omnibushof 13) in Berlin Spandau. Für das Depot wird eine Mindest-Standzeit von 30 min festgelegt.
- Die Umläufe dürfen nur linienrein und abgeschlossen sein. Dies bedeutet, dass alle Fahrten im Depot beginnen und enden müssen.
- Das Umsetzen der Fahrzeuge, sogenannte Leerfahrten, ist erlaubt.
- Mindestwendezeiten zwischen den Fahrplanfahrten sind nicht eingeplant.

Unter Einhaltung dieser Annahmen erfolgte die Durchführung der Umlaufplanung in Visum.

Umlaufversion: 1 STD												Umlaufbildungszeitraum: -				
Umlauf: 165 STD-77 (GB_2030)-165												Status: OK				
Anzahl Umlaufe: 1 ↔																
Fahrzeugkombination: 77 GB_2030																
Depot: 101003124 AMOM03																
Länge: 120,835km																
		Heerstr./Nennh. Hertzallee			Heerstr./Nennh. Hertzallee			Heerstr./Nennh. Hertzallee			Am Omr. Hertzallee					
Sys2.1	1	BVB10	849-10-3449_2	849-10-3449_2	849-10-3449_203	849-10-3449_2	849-10-3449_203	BVB10M	10:55:45		BVB10M	849-10-3449_2				
		7.6534	89252	89187	89087	89213	89258	11.8860km	13:29:43		11.1485	89053				
		53	14	02	50	42	33	mnbushof			29	56				
		06:00			08:00			10:00			12:00			14:00		16:00

Abbildung 4-6: Beispiel Umlaufplanung

Die durchgeführten Umlaufbildungen nehmen keine konkrete Fahr- und Umlaufplanung der BVG für einen eventuellen HObusbetrieb vorweg. Sie dienen hier einer plausiblen Abschätzung des Fahrzeugbedarfs und der Einsatzzeiten und unterstellen stark vereinfachte Annahmen (z.B. vollständig linienreinen Fahrzeugeinsatz, keine Mindestwendezeiten). Das Vorgehen wurde am Istzustand überprüft und zeigt gute Übereinstimmung mit dem realen Bedarf und ist deshalb auch zur Abschätzung der Kennwerte für die Planungsszenarien geeignet.

Die Geschwindigkeiten und Fahrzeiten des HO-Bus werden genauso angesetzt wie die des heutigen Dieselbusses. Tendenziell kann der HO-Bus aufgrund der besseren Beschleunigungswerte etwas schneller sein, sodass sich ein kleiner Fahrzeitpuffer ergeben kann, der bei der vereinfachten Fahrplanerstellung und Umlaufberechnung jedoch hier nicht berücksichtigt ist. Die Fahrplanlagen können sich aufgrund der gleichen Fahrzeiten von HO- und Dieselbus aber weitgehend an den heutigen Fahrplanlagen und den heutigen Wendezeiten orientieren.

Anhand der vereinfachten Umlaufrechnung ergibt sich ein gesamter Fahrzeugbedarf von 172 Fahrzeugen (zzgl. Reserve). Diese sind notwendig, um die Durchführung aller Fahrplanfahrten der 15 ausgewählten Linien zu gewährleisten.

Der Fahrzeugbedarf pro Linie kann der Tabelle 4-2 entnommen werden. Die Fahrplankilometer pro Tag sowie Jahr setzen sich aus den Service- und Leerfahrkilometer zusammen. Das Gleiche gilt auch für die Einsatzzeit. Die berechneten betrieblichen Kenngrößen sind Grundlage der Wirtschaftlichkeitsrechnung.

Das Modell bildet wie beschrieben einen durchschnittlichen Werktag ab. Für die Hochrechnung der Leistungskenngrößen (Betriebskilometer, Einsatzzeiten) von einem durchschnittlichen Werktag auf ein Kalenderjahr wurde vereinfacht von einem Hochrechnungsfaktor von 365 Tagen/Jahr ausgegangen. Es ist also nicht berücksichtigt, dass an Wochenenden und Feiertagen die Fahrleistungen niedriger sind. Eine Abbildung eines Jahresfahrplans wäre deutlich aufwändiger und für diese Machbarkeitsstudie auch nicht angemessen. Da mit dieser vereinfachten Hochrechnung die Fahrleistungen tendenziell überschätzt werden, wird innerhalb der Wirtschaftlichkeitsrechnung eine Sensitivitätsbetrachtung ergänzt, die mögliche wirtschaftliche Auswirkungen dieser Überschätzung aufzeigt (vgl. Tabelle 6-25).

Tabelle 4-2: Fahrzeugbedarf und betriebliche Kenngrößen für das ÖV-Angebot 2030

Linie	Anzahl der Fahrzeuge	Anzahl Fahrten pro Werktag	Fahrplankilometer pro Tag (km)	Einsatzzeit pro Tag (h)	Fahrplankilometer pro Jahr (km)	Einsatzzeit pro Jahr (h)
M32	14	494	3.461	175	1.263.173	63.875
M37	17	269	3.345	177	1.220.993	64.605
M45	24	415	6.513	365	2.377.289	133.225
M49	13	253	4.261	197	1.555.232	71.905
X33	14	229	4.231	180	1.544.400	65.700
X34	13	197	4.061	163	1.482.303	59.495
X36	6	152	1.175	58	429.021	21.170
X49	9	123	1.963	82	716.387	29.930
130	8	203	1.696	87	619.143	31.755
134	13	215	3.085	143	1.126.129	52.195
136	10	214	1.780	126	649.670	45.990
137	11	218	2.195	132	801.072	48.180
236	9	210	2.294	130	837.197	47.450
237	8	277	1.953	110	713.013	40.150
N34	3	19	305	12	111.237	4.380
<b>Summe</b>	<b>172</b>	<b>3.488</b>	<b>42.319</b>	<b>2.137</b>	<b>15.446.259</b>	<b>780.005</b>

Infolge der Annahme der linienreinen Umlaufplanung wird für die Nachtlinie N34 ein Bedarf von 3 Fahrzeugen berechnet. Im Einsatzzeitraum (00:00 Uhr bis 05:00 Uhr) dieser Linie befinden sich Fahrzeuge der anderen 14 Linien im Depot. Daher wurde die Annahme getroffen, dass der Fahrzeugbedarf der Linie N34 zu vernachlässigen ist. Damit reduziert sich der gesamte Fahrzeugbedarf auf 169 Fahrzeuge.

Umlaufversion: 1 STD Umlauf: 172 STD-77 (GB_2030)-172 Anzahl Umlaufe: 1 ↔ Fahrzeugkombination: 77 GB_2030 Depot: 101003124 AMOM03 Länge: 103.622km		Am S+U	Aalemannufer 31	Hottengrund 15	Aalemannufer 00	Hottengrund 45	Aalemannufer	Hottengrund
Sys2.1	1	BV1 934-10-N34_2030H	934-10-N34_2030H	934-10-N34_2030H	934-10-N34_2030H	934-10-N34_2030H	BVB10	
		2.3 6772 67727	67717	67726	67721	67721	11.1690km	
		27 36 49	38	19	08	49	30	

Umlaufversion: 1 STD Umlauf: 173 STD-77 (GB_2030)-173 Anzahl Umlaufe: 1 ↔ Fahrzeugkombination: 77 GB_2030 Depot: 101003124 AMOM03 Länge: 93.843km		Am S+U Rathau	Hottengrund 45	Aalemannufer 30	Hottengrund 15	Aalemannufer 00	Hottengrund
Sys2.1	1	BV1 934-10-N34	934-10-N34_2030H	934-10-N34_2030H	934-10-N34_2030H	934-10-N34_2030H	934-10-N34
		2.4 67729	67714	67725	67716	67722	67719
		26 35	08	49	38	19	08

Umlaufversion: 1 STD Umlauf: 174 STD-77 (GB_2030)-174 Anzahl Umlaufe: 1 ↔ Fahrzeugkombination: 77 GB_2030 Depot: 101003124 AMOM03 Länge: 106.830km		Am O Am Om	Hottengrund 17	Aalemannufer 00	Hottengrund 45	Aalemannufer 30	Hottengrund 15	Aalemannufer S+L
Sys2.1	1	BVB1 934-10-4.194	934-10-N34_2030H	934-10-N34_2030H	934-10-N34_2030H	934-10-N34_2030H	934-10-N34_2030H	934-10-N34
		67730	67718	67723	67715	67724	67713	67728
		01 14	38	19	08	49	38	19 32

Abbildung 4-7: Umlaufplanung für die Linie N34

Die berechneten Umläufe wurden als Grundlage der Simulationsrechnungen an den Projektpartner IFB übergeben.

### 4.1.3 Fahrplanmodell

Für einen strecken- bzw. linienbezogenen Fahrplan mit dem vorgegebenen Fahrzeugeinsatz wurden zuerst die von der PTV ermittelten Fahrplandaten mittels der railML-Schnittstelle in das Betriebssimulationsprogramm OpenTrack importiert. Diesen Fahrplanfahrten wurden dann die im Infrastrukturmodell definierten Fahrwege zugewiesen. Wenige betriebliche Anpassungen an die realen Begebenheiten wie z.B. die Nutzung des Kreisverkehrs am Waldkrankenhaus zur Wende der Linien 130 und M37 wurden vorgenommen.

Anschließend wurden die von der PTV ermittelten Umlaufbeziehungen der Busse in den Fahrplan in die Betriebssimulationssoftware OpenTrack eingearbeitet.

Die Linie 136 wurde nach Absprache mit der BVG gekürzt, sodass die nördliche Endhaltestelle am Aalemannufer anstelle des S Hennigsdorf ist. Die Umlaufbeziehungen wurden entsprechend angepasst.

Als Grundlage für die Betriebssimulation wurden zwei Fahrpläne modelliert.

Der erste Fahrplan dient als Basis für die Dimensionierung und Auslegung der elektrischen Anlagen für die maximale Last. Dazu wird der gesamte Betrieb im Netz für einen Zeitraum der höchsten betrieblichen Belastung nachgebildet.

Folgende Randbedingungen fließen in das Modell dieses ersten Fahrplans ein:

- Es werden 3 Stunden der höchsten betrieblichen Belastung simuliert (zwischen 14h und 17h),
- Die Busse werden mit maximaler Zuladung (10 t beim Einfachgelenkbus, 15 t beim Doppelgelenkbus) modelliert,
- Leerfahrten werden nicht modelliert.

Für die Ermittlung des Tagesenergiebedarfs wird ein zweiter Fahrplan für das Simulationsprogramm modelliert. Für den Tagesfahrplan werden die Leerfahrten aus der Liste mit den Umlaufbeziehungen in den OpenTrack-Fahrplan integriert. Ebenso werden die haltstellen-genauen Fahrgastdaten aus der Aufkommensprognose in das Simulationsmodell eingearbeitet. Da OpenTrack eine Masse als Zuladung benötigt, wird je Person eine Zuladung von 75 kg angenommen.

Folgende Randbedingungen fließen in das Modell dieses zweiten Fahrplans ein:

- Es werden insgesamt 29 Stunden Betrieb zwischen 0h und 5h des Folgetages simuliert. Der Nachtverkehr wird wegen der Umlaufbeziehungen auf zwei Nächte aufgeteilt.
- Jeder Bus hat zwischen jeder Haltestellenrelation eine spezifische Zuladung.
- Alle Leerfahrten sind modelliert, jeder Busumlauf startet und endet im Depot.

Als ein Ergebnis der Fahrplanerstellung können abschnittsweise die Anzahl der Busse pro Tag und die Anzahl der Busse in der Spitzenstunde ermittelt werden. Diese Übersicht ist in Abbildung 4-8 dargestellt. Es fällt auf, dass die Anzahl der Busse in der Spitzenstunde zwischen 6 auf verschiedenen Außenästen und über 60 im Bereich des Rathaus Spandaus variiert. Die von den Bussen aufzunehmende Traktions-, Hilfsbetriebe- und Energiespeicherleistung muss durch das elektrische Netz bereitgestellt werden.

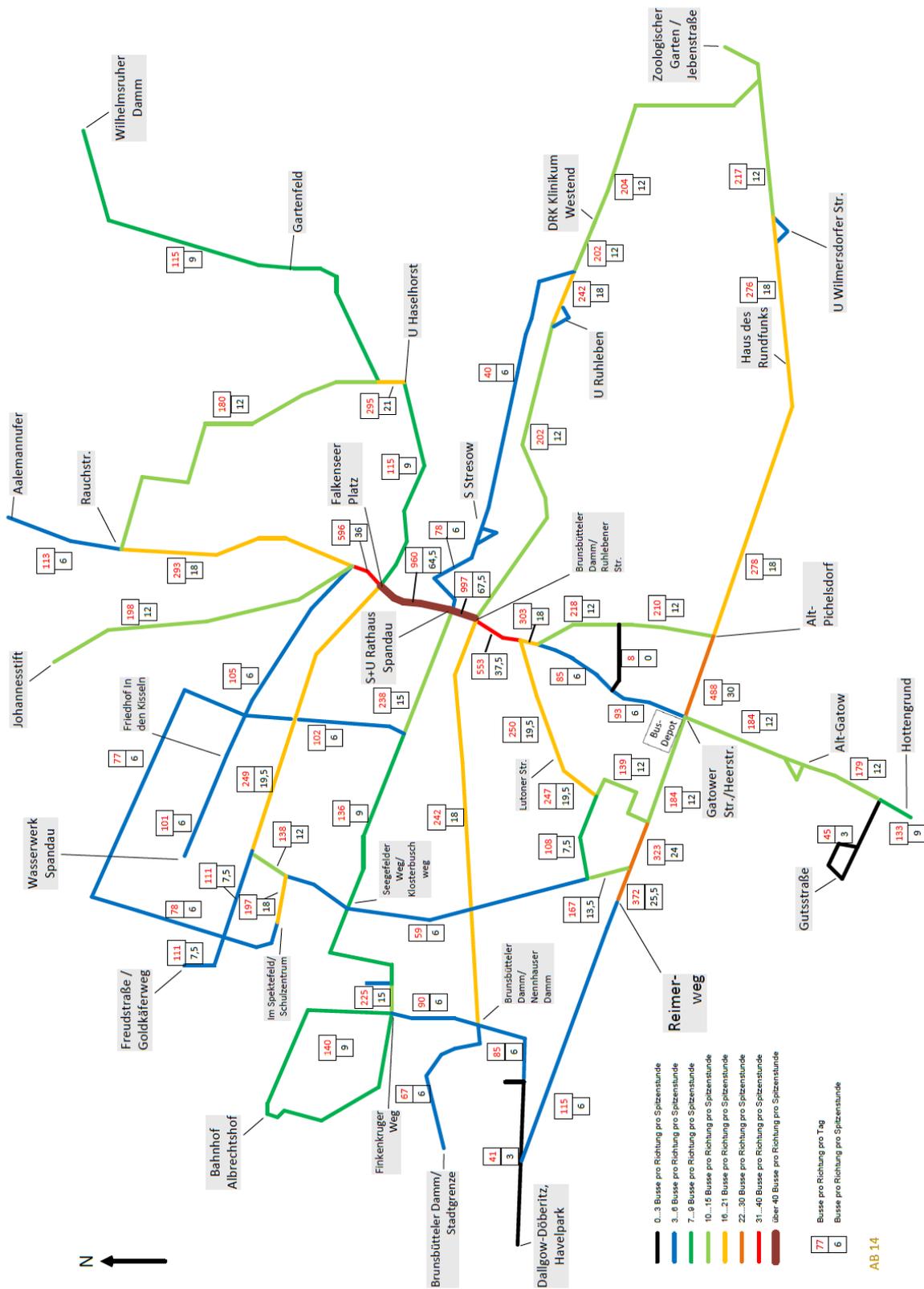


Abbildung 4-8: Übersicht mit der maximalen Busanzahl je Tag und der Anzahl der Busse in der betrieblichen Spitzenstunde

#### 4.1.4 Eingangsdaten Fahrzeugkonfiguration

Neben der Infrastruktur und dem Betrieb muss das Fahrzeug in der Simulation nachgebildet werden. Die Prinzipdarstellung des Leistungsflusses von Obussen mit Energiespeichern in der Simulation ist in Abbildung 4-9 visualisiert.

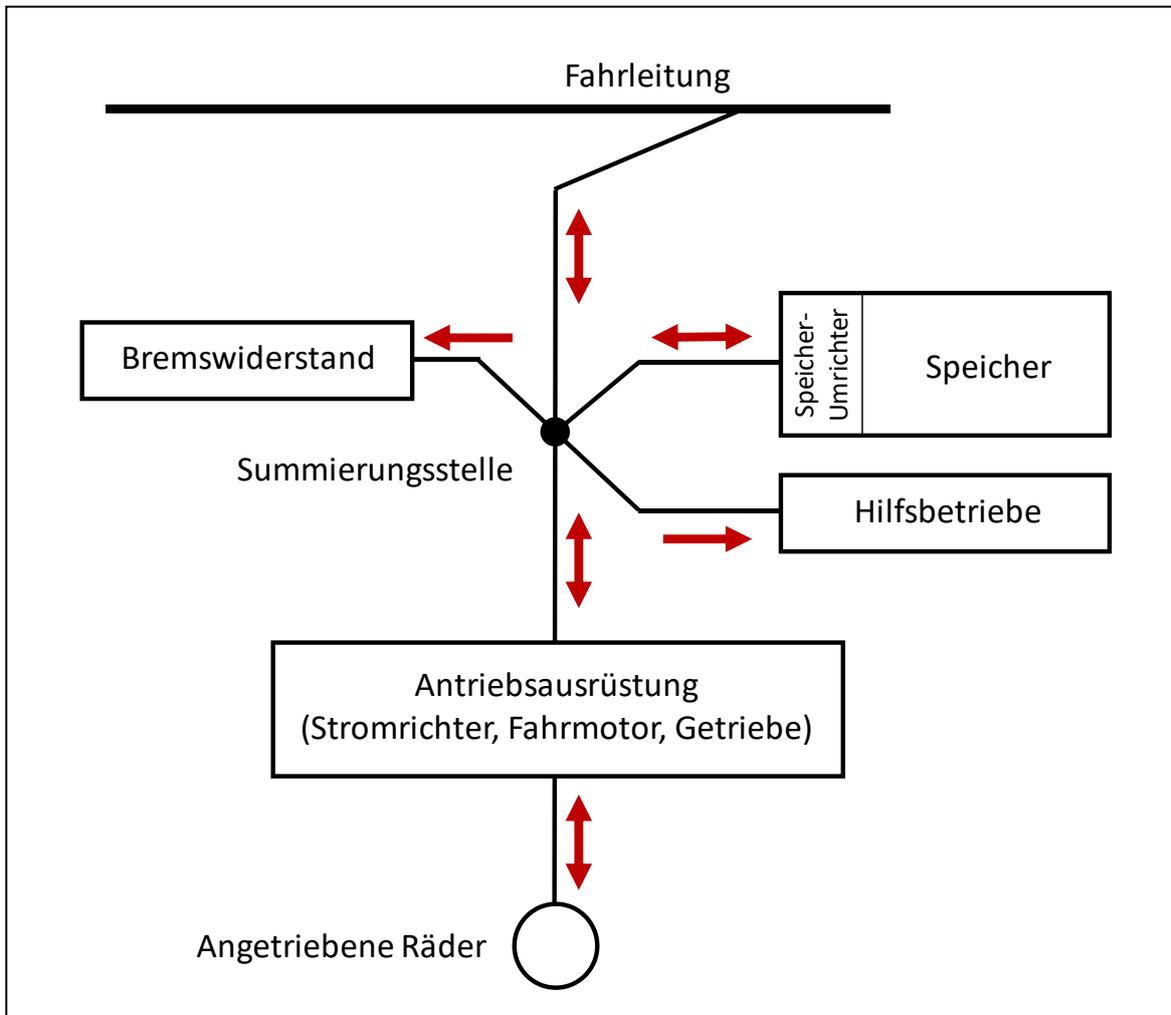


Abbildung 4-9: Prinzipdarstellung Leistungsfluss im Fahrzeugmodell Simulation

Der Fahrleitung wird die Leistung entnommen und an die Antriebsausrüstung, die Hilfsbetriebe und den Speicher transferiert. Falls die Strombegrenzung am Stromabnehmer erreicht werden sollte, wird zuerst die Zuteilung an den Speicher reduziert und falls dies nicht reichen sollte, auch der Antriebsausrüstung.

Im Falle generatorischer Bremsung wird die verfügbare Leistung zuerst an die Hilfsbetriebe gegeben, danach verbleibende Leistung an den Speicher (falls erforderlich) und die danach noch verbleibende Leistung geht in die Rückspeisung. Sollte die Bremsleistung in allen drei Abnehmern nicht absetzbar sein, geht sie auf den Bremswiderstand. Wenn die aus der generatorischen Bremsung verfügbare Leistung nicht zur Deckung des Leistungsbedarfs

von Hilfsbetrieben und Speicher ausreichen sollte, wird die Differenz aus der Fahrleitung zugeführt.

Leistungsdurchlauf durch die Antriebsausrüstung und Speicherladung/-entladung werden jeweils mit einem Wirkungsgrad beaufschlagt.

Es werden in der Simulation zwei Fahrzeugtypen verwendet:

- Einfachgelenkbus,
- Doppelgelenkbus.

Tabelle 4-3 gibt eine Übersicht über die berücksichtigten technischen Daten.

Tabelle 4-3: Technische Daten der in der Simulation verwendeten Busse (Speicherdaten siehe Kapitel 4.1.5)

Eigenschaft	Einheit	Einfachgelenkbus	Doppelgelenkbus
Länge	m	19	25
Leermasse	t	18	24
Besetztmasse	t	28	39
Faktor rotierende Massen		1,07	1,073
Höchstgeschwindigkeit	km/h	85	80
Beschleunigungsbegrenzung	m/s <sup>2</sup>	1,1	1,1
Verzögerungsbegrenzung	m/s <sup>2</sup>	0,9	0,9
Max. mech. Leistung (am Rad) Traktion generatorische Betriebsbremsung	kW	240 360	280 420
Durchschnittlicher Wirkungsgrad des Traktionsstranges		0,86	0,86
Hilfsbetriebeleistung (mit Klima.) installiertes Maximum für Energiebedarf 5 Monate für Energiebedarf 7 Monate	kW kW kW	45 33,75 15	63 47,25 21
Spannungsabhängige Strombegrenzung (angelehnt an EN 50388)		500...600 V: 90...767 A; >600 V: 767 A	500...600 V: 126...952 A; >600 V: 952 A
Max. Stillstandsstrom (Vorgabe BVG)	A	80	80
Max. Rückspeisespannung	V	950	950

Anmerkung: Die mechanischen Grunddaten des Einfachgelenkbusses sind ähnlich dem bei BVG vorhandenen Diesel-Doppelstockbus NEOMAN A39 (außer Länge/Höhe), so dass bei Ersatz von Einfachgelenkbussen durch Doppelstockbusse die Aussagen der Berechnung prinzipiell trotzdem gelten würden.

In der Praxis sind Doppelgelenkbusse oft mit 320 kW motorisiert. Diese Traktionsleistung ist für Städte mit höheren Steigungen beispielsweise im Alpenraum notwendig. In Berlin und insbesondere in Spandau gibt es nur wenige kurze Steigungsstrecken mit geringeren

Gradienten. Zur Reduzierung kurzzeitiger Leistungsspitzen, die maßgeblich den Investitionsaufwand beeinflussen, wird daher empfohlen, eine Traktionsleistung für den Doppelgelenkbus auch im Hinblick auf die betriebliche Höchstgeschwindigkeit von 280 kW (Fahren) zu bestellen. Die elektrische Bremsleistung sollte entsprechend nicht höher als 420 kW gewählt werden. Abbildung 4-10 zeigt das Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm und die Fahrwiderstände beider simulierter Bustypen. Die Differenzkraft zwischen Zugkraft und Fahrwiderstand steht als Beschleunigungskraft für die Realisierung der Beschleunigung zur Verfügung.

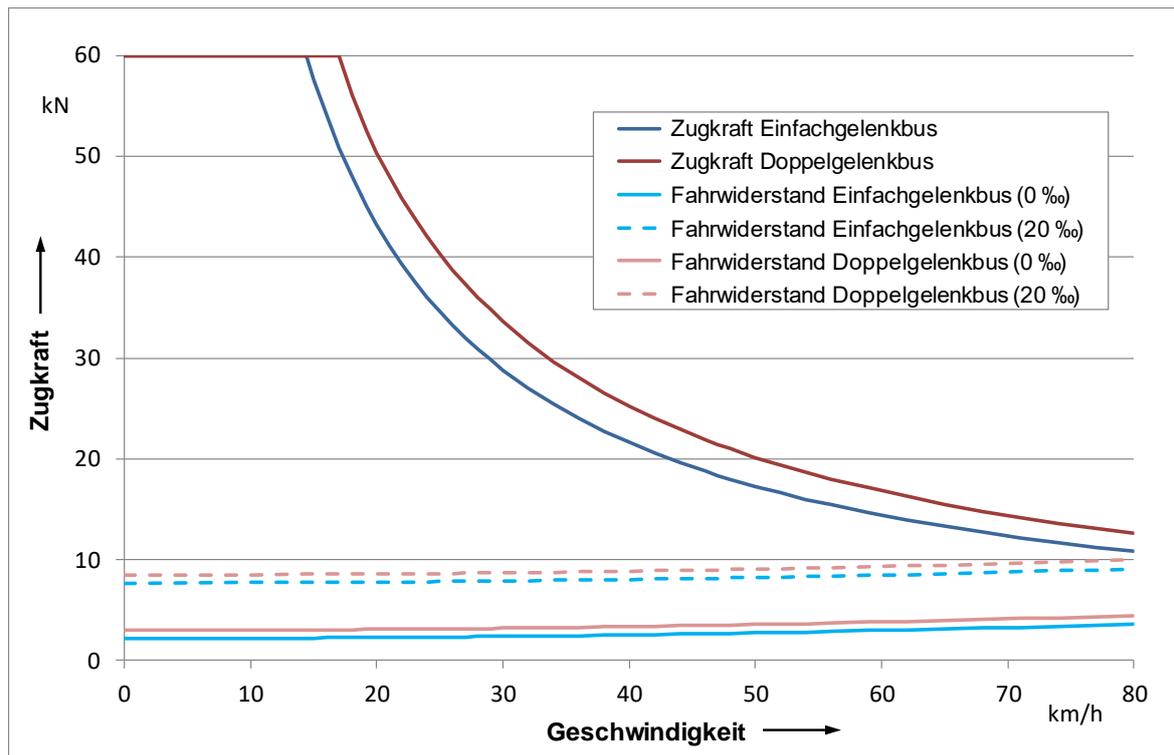


Abbildung 4-10: Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm beider simulierter Bustypen sowie deren Fahrwiderstände für Ebene und 20 ‰ Steigung

Um die elektrische Ausrüstung vor Überlastung zu schützen, sind in der Fahrzeugsteuerung zwei Begrenzungen des Stroms am Stromabnehmer implementiert:

- Spannungsabhängige Strombegrenzung

Die Fahrleitungsspannung sinkt mit steigender Last aufgrund des ohmschen Widerstands. Um im Extremfall eine Abschaltung des Fahrzeugs wegen Unterschreitung des Spannungs-Grenzwertes zu vermeiden, wird meist eine spannungsabhängige Strombegrenzung installiert. Der Maximalwert des Traktionsstroms wird in einer bestimmten Beziehung zur momentanen Fahrleitungsspannung (Spannung am Stromabnehmer) abgesenkt. Damit ist der Spannungsfall geringer und der Grenzwert der minimalen Fahrleitungsspannung wird dadurch meist eingehalten. Allerdings wird dadurch das Fahrzeug in seiner Leistung beschränkt, doch ein Betrieb mit eingeschränkter Leistung ist besser als eine Komplettabschaltung.

In EN 50388, Kapitel 7.2, ist eine solche Steuerung beschrieben. Die Norm gilt zwar für interoperable Eisenbahnfahrzeuge, doch einer sinngemäßen Anwendung auf Obusse/HObusse steht nichts entgegen.

- Maximaler Stillstandsstrom

Der Stromübertritt an der Kontaktstelle zwischen Schleifschuh und Fahrdrabt führt zu einer bedeutenden Erwärmung des Kontaktbereichs. Bei Bewegung des Fahrzeugs ist die Wärmezufuhr lokal zeitlich eng begrenzt. Im Stillstand dagegen wird über einen längeren Zeitraum Wärme an derselben Stelle eingetragen. Dies kann zur Beschädigung von Fahrdrabt und/oder Schleifstück führen. Deshalb muss der Gesamtstrom des Fahrzeugs im Stillstand beschränkt werden. Im Gegensatz zu Eisenbahnen existiert kein Grenzwert für den maximalen Stillstandsstrom, er ist jeweils im Einzelfall festzulegen (Festlegung BVG: 80 A). Praktisch ist beim Obus als Einzelfahrzeug der Hilfsbetriebestrom unkritisch im Stillstand. Beim HObus kommt jedoch noch der Ladestrom des Speichers hinzu. In der Simulation wird der nach Abzug des Hilfsbetriebebedarfs verbleibende Spielraum für die Speicherladung genutzt, falls erforderlich.

## 4.1.5 Speicherkonfiguration

### 4.1.5.1 Aufbau eines Batteriesystems

In einem Batteriesystem werden mehrere Akkumulatorzellen miteinander verbunden. Das Leistungsniveau klassischer Batteriezellen wird begrenzt durch Zelltyp, Art, Größe und Material. Zur Steigerung der Spannung bzw. der Stromstärke werden die elektrischen Teilsysteme, gleichen Zelltyps, seriell als auch parallel miteinander verschaltet. Entsprechend des Bedarfs werden Serien- und Parallelschaltung, wie in Tabelle 4-4 dargestellt, miteinander kombiniert.

Tabelle 4-4: Konfigurationsmöglichkeiten von Batteriesystem, nach [83]

Schaltprinzip	Hintergrund	Beispiel
Seriell	Erhöhung Betriebs- spannung	

Schaltprinzip	Hintergrund	Beispiel
Parallel	Erhöhung Stromstärke (Kapazität)	<p>The diagram shows four identical battery cells connected in parallel between a positive (+) and negative (-) terminal. Each cell is labeled with 3,2 V and 2,300 mA. Below the cells, a bar chart shows the cumulative current capacity: 2,300 mA for one cell, 4,600 mA for two cells, 6,900 mA for three cells, and 9,200 mA for four cells. The voltage remains constant at 3,2 V.</p>
Seriell + Parallel	Erhöhung Stromstärke Betriebs- spannung	<p>The diagram shows two parallel branches connected in series between a positive (+) and negative (-) terminal. Each branch contains two 3,2 V, 2,300 mA cells connected in series. Below the branches, a bar chart shows the cumulative current capacity: 4,600 mA for one parallel branch and 9,200 mA for two parallel branches. The voltage for one branch is 3,2 V and for two branches is 6,4 V.</p>

Überwacht und geregelt werden die Lade- und Entladevorgänge von Batterien durch das übergeordnete Batteriemanagementsystem. Dabei werden, u.a. die Zellspannung, die Temperatur und die Ströme überwacht. Hinzu kommt die Ermittlung der verfügbaren Batteriekapazität auf Basis des aktuellen Ladezustandes, die Restbetriebszeit und der Lebenszyklus.

Zusätzlich regulieren moderne Batteriemanagementsysteme (BMS) die nutzbaren Spannungsbereiche der einzelnen Zellen über die gesamte Lebensdauer hinweg, so dass diese möglichst konstant gehalten werden und die maximal entnehmbare Kapazität der Batterie stets verfügbar ist.

Zellbalancing ist notwendig, da es mit der Zeit aufgrund von

- Streuung der Zellkapazitäten
- Streuung der Innenwiderstände und
- ungleichmäßiger Temperaturverteilung

zu unterschiedlichen Spannungslagen in den Zellen kommen kann.

Beim passiven (kostengünstigen) Balancing wird durch einen Bypass in der Serienschaltung der Zellen ein Ladungsausgleich beim Aufladen der Batterien sichergestellt. Dabei wird ein Teil des Ladestroms an Zellen höherer Spannung vorbei geschleust. Stellt das BMS eine höhere Abweichung der Spannung fest, wird ein Widerstand parallel zur Zelle zugeschaltet, sodass die Zelle höherer Zellspannung weniger Ladestrom erhält. Durch das

Schalten von Widerständen verringert sich jedoch der Wirkungsgrad des Ladeprozesses und die Batterie produziert zusätzlich Wärme.

Beim aktiven Balancing erfolgt die Umverteilung der Ladungsträger sowohl beim Aufladen als auch beim Entladen. Die Energieströme werden nicht über Widerstände in Wärme gewandelt, sondern in andere Zellen umgelenkt. Somit können auch beim Entladen schwächere Zellen gestützt werden und der Betriebsbereich maximiert werden. Nachteil des aktiven Zellbalancings ist der hohe technische Aufwand, einhergehend mit deutlich höheren Kosten, Mehrbedarf an Bauraum und zusätzlich zu transportierenden Massen.

#### 4.1.5.2 Speicherauslegung

Die Speicher können optimal an die Erfordernisse des geplanten Einsatzes in einem HObus angepasst werden. Hierfür sind Kenntnisse über den spezifischen Traktionsenergiebedarf des Fahrzeugs bei gegebener Belastung, den Leistungsbedarf der Hilfsbetriebe und über die Längen der gespeisten und nicht gespeisten Abschnitte notwendig.

Die benötigte Speicherkapazität ergibt sich aus der in Abbildung 4-11 und Abbildung 4-12 dargestellten Verfahrensweise nach [85] wie folgt:

- Angenommener spezifischer Energieverbrauch unter klimatisch ungünstigen Bedingungen:  $E_{spez} = 3,75 \text{ kWh/km}$
- Maximal zurückzulegender fahrleitungsfreier Abschnitt:  $l = 8 \text{ km}$
- Alterungsbezogener Sicherheitszuschlag (end of life muss Batterie noch 80% der Kapazität aufweisen):  $k_{alt} = 1,2$
- Erhöhung der Zyklenfestigkeit durch Reduzierung des SoC Ausnutzungsfaktors auf 50% (Betriebsbereich zwischen 20% und 70% SoC):  $k_{betr} = 2$

Zur Bewältigung des Streckenabschnitts werden demnach 30 kWh Energie benötigt. Damit die Batterie auch am Ende ihrer Lebensdauer noch die benötigte Energie bereitstellen kann, werden Batteriesysteme ca. 20% größer dimensioniert. Das Batteriesystem muss also so konfiguriert werden, dass 36 kWh verfügbar sind. Um den Energiespeicher schonend betreiben zu können, werden nur 50% der Gesamtkapazität genutzt, sodass schlussendlich eine Batterie mit ca. 72 kWh Energieinhalt benötigt wird.

Hersteller von Batterien bieten in Katalogen normalerweise Batteriemodule an, welche durch geeignetes Verschalten die gewünschte Kapazität liefern. Im Folgenden wurde beispielhaft ein Batteriesystem aus Modulen, mit den in Tabelle 4-5 dargestellten Daten, eines namhaften Batterieherstellers für Anwendungen im Automobilbau zusammengestellt.

Tabelle 4-5: Eigenschaften von Lithium-Speichern eines Herstellers

Eigenschaft	Einheit	Modul 1	Modul 3	Modul 4
Energieinhalt	kWh	24,4	35,3	30,6
Max. 10s Laderate	kW	75 ... 150	270	406

Eigenschaft	Einheit	Modul 1	Modul 3	Modul 4
Effektivwert der Leistung	kW	37 ... 50	60	77
Nennspannung	V	661	666	666
Masse	kg	253	353	372

Wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, hängt die Lebensdauer des Energiespeichers entscheidend von der Zyklusfestigkeit und der realisierten Laderate (C-Rate) ab. Wenn vom Hersteller nicht anders garantiert, können C-Raten zwischen 1,0 und 2,0 für alle in 3.3.2 beschriebenen Speichertechnologien als batterieschonend betrachtet werden. Die zu erwartenden Laderaten ergeben sich direkt aus der Streckenlänge der oberleitungsfreien Abschnitte gegenüber den Abschnitten mit Fahrleitung. Bei einem sich ergebenden Streckenverhältnis größer als 0,5 übersteigen die durchschnittlichen Ladestromraten die durchschnittlichen Traktionsströme. Das heißt, es wären keine hochstromfähigen Batterien erforderlich und die Batterie wäre in Bezug auf ihren Energieinhalt zu groß bemessen.

Nach Ermittlung der benötigten Speicherkapazität muss eine geeignete Ladestrategie für die angedachte Streckenkonfiguration bestimmt werden. Es gilt also für unterschiedliche C-Raten die zugehörigen Nachladezeiten zu bestimmen. Daraus ergibt sich dann, in Abhängigkeit der durchschnittlichen Fahrzeuggeschwindigkeit, das notwendige Verhältnis zwischen fahrleitungsfreien und elektrifizierten Streckenabschnitten.

Jeweils gleiche Module der in Tabelle 4-5 dargestellten Batteriemodule lassen sich zu Batteriesystemen unterschiedlichem Energieinhalts zusammenfügen. Durch Parallelschaltung von drei Modulen des Typ 1 lässt sich bspw. die benötigte Speicherkapazität mit 73,2 kWh näherungsweise zusammenstellen. Im Folgenden wurden weitere mögliche Modulkombinationen untersucht. Die in den Abbildungen aufgeführten Nennenergien sind farblich unterschieden und entsprechen folgenden Konfigurationen

- 3 Module vom Typ 1 → Nennenergie 73,2 kWh (blau)
- 3 Module vom Typ 2 → Nennenergie 91,8 kWh (gelb)
- 3 Module vom Typ 3 → Nennenergie 105,9 kWh (grau)
- 6 Module vom Typ 1 → Nennenergie 146,4 kWh (orange)

Es ist zu erkennen, dass es nicht möglich ist, das Speichersystem mit 73,2 kWh Energieinhalt bei einer C-Rate von 1 im folgenden Fahrleitungsabschnitt wieder aufzuladen (siehe Abbildung 4-11). Lediglich die Speicherkombination aus 6 Modulen vom Typ 1 kann mit einer Laderate von 1 C schnell genug wieder aufgeladen werden. Allerdings sind dafür sehr hohe Ladeleistungen und ein sehr großer und schwerer Speicher erforderlich. Für den Regelbetrieb wäre das Batteriesystem deutlich zu groß dimensioniert.

Abbildung 4-12 zeigt aber, dass alle untersuchten Speicherkombinationen mit einer Nachladerate von 2 C (entspricht 72 kW Nachladeleistung) schnell genug wieder aufgeladen werden können. Die sich ergebenden benötigten elektrifizierten Abschnittslängen sind in allen zu untersuchenden Szenarien vorhanden. Da der Energieverbrauch eines Fahrzeugs

direkt proportional zur Fahrzeugmasse ist, stellt ein Speicher mit einer Kapazität von ca. 72 kWh für den Einsatz im Streckennetz Berlin Spandau die bestmögliche Auslegungsvariante dar.

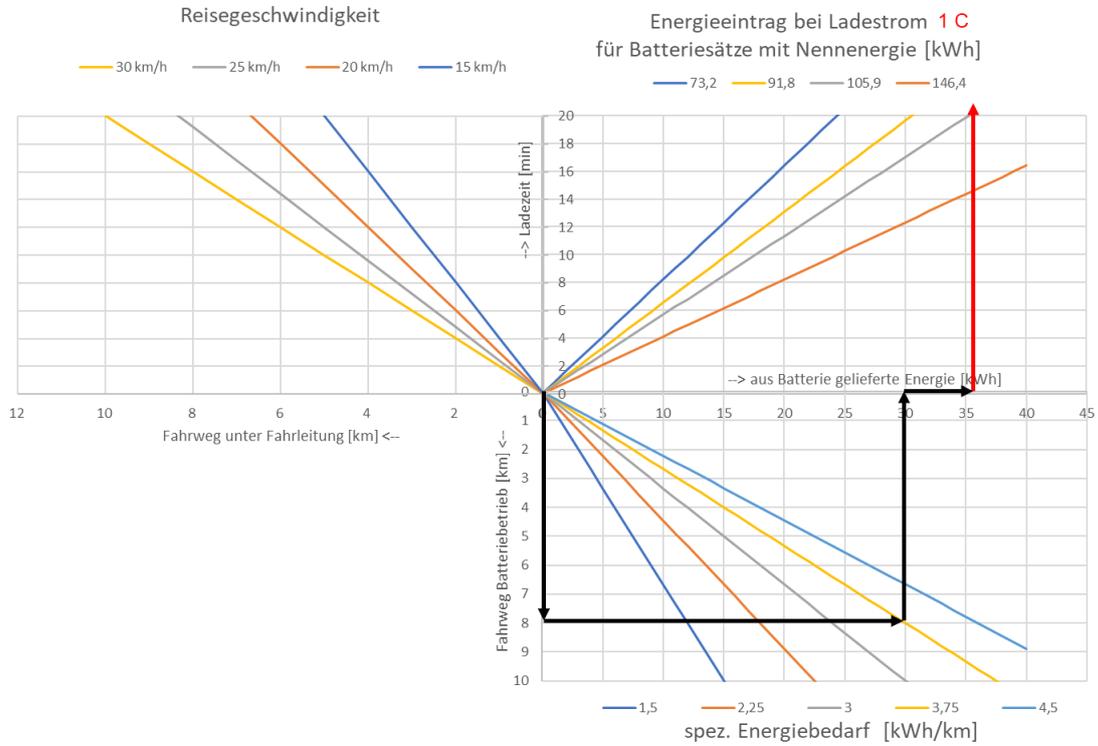


Abbildung 4-11: Ermittlung der notwendigen Laderate und des benötigten Fahrleitungsüberspannten Folgeabschnitts, nach [85] – Verlauf für 1 C

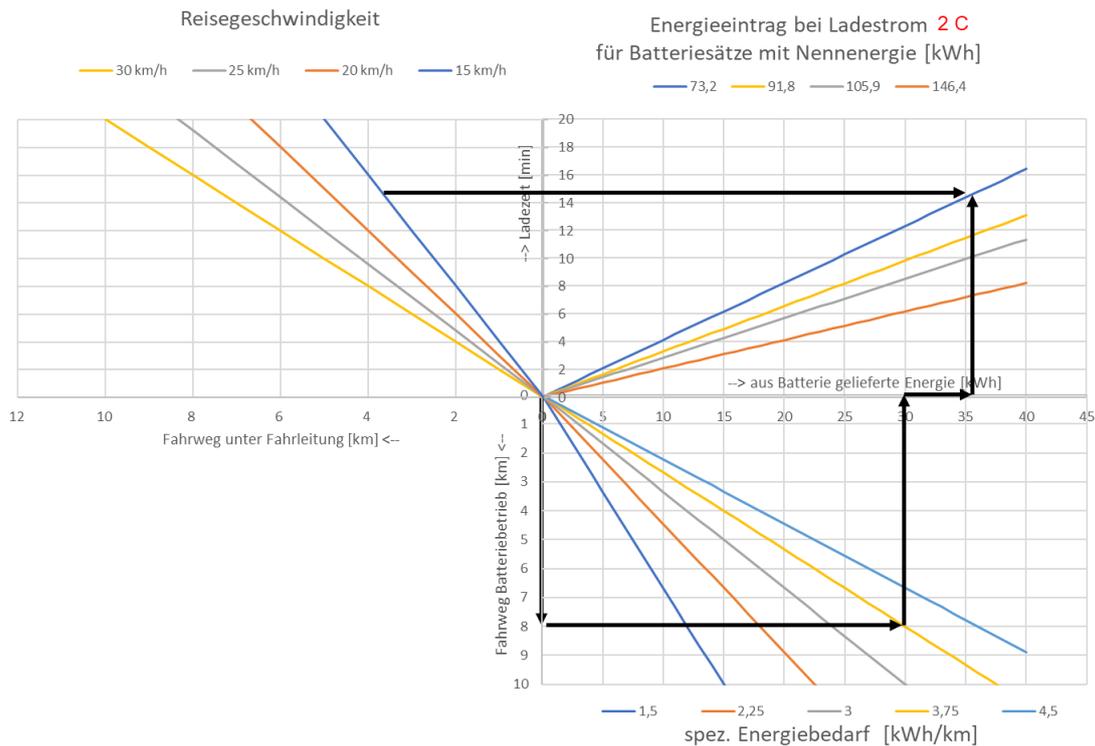


Abbildung 4-12 Ermittlung der notwendigen Laderate und des benötigten Fahrleitungsüberspannten Folgeabschnitts, nach [85] – Verlauf für 2 C

Grundsätzlich erscheinen unter den gegebenen Voraussetzungen alle in 3.3.2 für HOBusse verfügbaren Li-Speichertechnologien geeignet für den geplanten Einsatz in Berlin Spandau.

Jedoch zeigen die Abbildung 4-11 und Abbildung 4-12, dass Energiespeicher benötigt werden, welche Nachladeraten größer/gleich 2 C aushalten können und gleichzeitig, wegen der verhältnismäßig großen benötigten Kapazität von ca. 72 kWh, eine relativ große Energiedichte aufweisen.

In Abschnitt 3.3.2 wurde gezeigt, dass LTO-Batterien bei sehr hohen Nachladeraten von Vorteil sind und NMC-Batterien besonders geeignet sind, wenn große Energiedichten zur Bewältigung sehr langer Strecken gefordert sind. Die LFP-Batterie wird von vielen Batterieherstellern angeboten und ihre Vorzüge (thermische Stabilität, gute Energiedichte, gute Zyklenfestigkeit, moderate Hochstromfähigkeit und günstige Materialkosten) passen bestens zu den ermittelten Anforderungen.

In den zu untersuchenden Szenarien wurde daher der Einsatz von HOBusen mit ca. 72 kWh-LFP-Batteriesystemen unterstellt.

## 4.2 Elektrische Netzinfrastruktur

Um die elektrische Infrastruktur im Simulationsprogramm zu modellieren, werden spezifische elektrische Werte und die Struktur des Netzes benötigt. Die Struktur und die wesentlichen Parameter werden in den Abbildungen und Tabellen der folgenden Unterkapitel dargestellt.

Die resultierenden elektrischen Netzkonfigurationen wurden ingenieurtechnisch iterativ ermittelt. Dabei wurde ausgehend von einer initialen frei gewählten Netzkonfiguration die notwendige Anzahl und Position der Unterwerke, die Positionen der fahrleitungsbehafteten Abschnitte und die Anzahl und der Querschnitt der notwendigen elektrischen Leiter bestimmt. Die jeweiligen Simulationsergebnisse wurden im Hinblick auf die technischen Bewertungskriterien:

- Spannungshaltung
- Belastung der elektrischen Leiter und Betriebsmittel
- Kurzschlusserkennbarkeit und
- Ladezustand der Fahrzeugbatterien

mit dem Ziel beurteilt, eine für die betrieblichen Erfordernisse optimale elektrische Netzkonfiguration für jedes untersuchte Szenario zu finden.

### 4.2.1 Unterwerke und Anschluss an die Strecke

Die Positionen der Unterwerke wurden nach Absprache mit der BVG frei entlang der betrieblichen Buslinien ausgewählt, da zum einen Mittelspannungsnetzanschlüsse, die für die Energieversorgung der Unterwerke notwendig sind, flexibel beim lokalen Energieversorger beantragt und gelegt werden können und zum anderen auch keine direkt verfügbaren Grundstücksflächen zur Aufstellung der Unterwerke zur Verfügung stehen. Damit erfolgte die Positionierung der Unterwerke rein aus betriebselektrischen Gesichtspunkten und unter Berücksichtigung der technischen Bewertungskriterien mit dem Ziel, eine möglichst geringe Anzahl an Unterwerken zu erreichen. Im Rahmen der nächsten Planungsschritte sind die konkreten Unterwerksstandorte genauer zu spezifizieren und die Anzahl sowie die technischen Bewertungskriterien bei Bedarf zu überprüfen.

Unterwerke besitzen in der Simulation standardmäßig eine, an ausgewählten Standorten zwei Gleichrichtereinheiten, bestehend aus je einem Gleichrichtertransformator und einem Gleichrichter. Das Prinzip der Verschaltung ist in Abbildung 4-13 dargestellt.

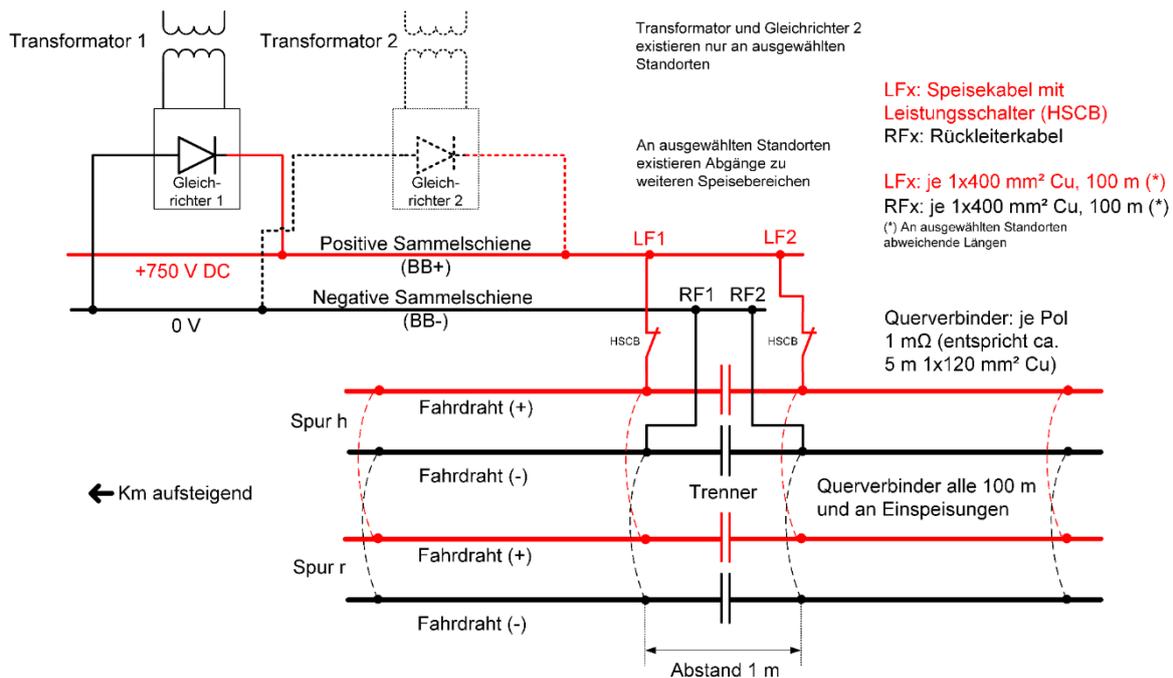


Abbildung 4-13: Prinzipdarstellung der Unterwerks- und Fahrleitungsmodellierung in der Simulation

Angeschlossen ist jeweils eine unterschiedliche Zahl von Speisebereichen, wobei die Spuren h und r eines Abschnitts (AB) standardmäßig querverbunden sind. Alle Speisekabel sind mit einer Sammelschiene (BB+) verbunden. Ebenso sind die Rückleiterkabel mit der Rückleitungssammelschiene (BB-) verbunden. Die Speisung erfolgt standardmäßig an die Leiter an der Spur h (Fahrleitungsspur mit aufsteigenden Richtungskilometern), eine Querkupplung zur Spur r (Fahrleitungsspur mit aufsteigenden Richtungskilometern) ist ebenfalls an der Anschlussstelle angeordnet.

In der Mitte einer mit Fahrleitungen versehenen Strecke sind direkt am Unterwerk die Fahrleitungen der auf- und absteigenden Streckenkilometer mit einem Streckentrenner elektrisch voneinander isoliert. Die Speisekabel befinden sich an den Enden der Streckentrenner, wobei dieser in mit einer Länge von einem Meter im Simulationsmodell berücksichtigt ist. Bei einer längeren Fahrdrahtlücke (z. B. wegen einer Kreuzung) sind die Einspeisungen auf je einer Seite der Lücke angeordnet und die Streckentrenner aufgrund der schon bestehenden Unterbrechung nicht vorhanden. Ist vom Standort des Unterwerks gesehen nur auf einer Seite der Strecke Fahrleitung installiert, sind dort nur eine Einspeisung und kein Streckentrenner vorhanden.

Die Unterwerke werden in der Simulation einheitlich durch eine Leerlaufspannung von DC 845 V und sich aus den Leistungsdaten ergebenden Innenwiderständen modelliert. Durch die Speise- und Rückleitungskabel werden die Gleichrichtereinheiten mit der elektrischen Netzinfrastruktur im Modell verbunden.

## 4.2.2 Oberleitung, Kupplungsleitungen und Verstärkungsleitungen

Für die Oberleitungen wurden pro Hin- und Rückleiter gängige Parameter angenommen. An oberleitungsfreien Kreuzungen wurden die angrenzenden Fahrleitungsbereiche mittels Kupplungsleitungen überbrückt für den Fall, dass dort kein Unterwerk steht, Während der Studie hat sich herausgestellt, dass für einige Oberleitungsbereiche Verstärkungsleitungen erforderlich sind. Diese Verstärkungsleitungen verlaufen parallel zu den Oberleitungen und sind mittels geringen Widerstands mit ihnen elektrisch verbunden. In Tabelle 4-6 sind die berücksichtigten Parameter der modellierten Leiter im Netzmodell aufgelistet. Für die Fahrdrähte wurde eine 20% Abnutzung unterstellt. Der Widerstand der elektrischen Leiter wurde für eine Temperatur von 60°C ermittelt und für die Dimensionierung zu Grunde gelegt.

Tabelle 4-6: Daten der verwendeten elektrischen Leiter

Leiter modell	Netzmo- dell	Beschreibung	Material und Querschnitt	resultieren- der Widerstand [Ω/km]
H		Fahrdraht (+)	BRi100 (Cu 100 mm <sup>2</sup> )	0,247
R		Fahrdraht (-)	BRi100 (Cu 100 mm <sup>2</sup> )	0,247
H2		2. Fahrdraht (+)	BRi100 (Cu 100 mm <sup>2</sup> )	0,247
R2		2. Fahrdraht (-)	BRi100 (Cu 100 mm <sup>2</sup> )	0,247
HV		Verstärkungsleiter (+)	Cu 120 mm <sup>2</sup>	0,171
RV		Verstärkungsleiter (-)	Cu 120 mm <sup>2</sup>	0,171
LF-kkkk-mmnn+		Speisekabel mit „kkkk“ = Kürzel des Unterwerks, „mm“ = AB-Nummer, nn = Spur u. ggf. Speisebereichsnummer	Cu 400 mm <sup>2</sup>	0,051
RF-kkkk-mmnn-		Rückleiterkabel mit „kkkk“ = Kürzel des Unterwerks, „mm“ = AB-Nummer, nn = Spur u. ggf. Speisebereichsnummer	Cu 400 mm <sup>2</sup>	0,051
(keine Bezeichnung)		Längsverbinder über Fahrdrähtlücken	Cu 120 mm <sup>2</sup>	0,171
(keine Bezeichnung)		Längsverbinder über Fahrdrähtlücken	Cu 240 mm <sup>2</sup>	0,086
(keine Bezeichnung)		Querverbinder zwischen verschiedenen Spuren eines AB (H bzw. R) sowie zwischen H/HV bzw. R/RV einer Spur	-	0,001 Ω je Verbinder, ein Verbinder alle 0,1 km

Das Eindrahten der Busse ist nur an den Haltestellen mittels Fangtrichtern möglich. Daher beginnt die Oberleitung immer an einer Haltestelle. Das Abdrahten ist dagegen überall möglich, z. B. vor einer Kreuzung ohne Oberleitung oder wenn der Bus an der Kreuzung in einen

fahrleitungsfreien Bereich abbiegt. Das Ende der Oberleitung im Modell wurde daher entweder vor einer Kreuzung oder ebenfalls an einer Haltestelle positioniert.

## 4.3 Entwickelte Szenarien

### 4.3.1 Vorgehen

Zunächst wurde eine Variante mit einem sehr hohen Fahrleitungsanteil für das Netz Spandau als Grundlage für die Analyse der elektrischen Ergebnisse und die sich daraus ergebene Iteration für die mögliche Reduktion der fahrleitungsgebundenen Abschnitte erstellt. Für diese Maximalvariante mit dem höchsten Elektrifizierungsgrad (Szenario A) wurde eine elektrische Netzkonfiguration ermittelt, die ohne Weichen- oder Kreuzungselemente in der Fahrleitung auskommt und auch für die Bereiche um das Schloss Charlottenburg und die Altstadt Spandau einen batterieelektrischen Betrieb vorsieht. Das Szenario A dient als Ausgangspunkt für die technische und wirtschaftliche Machbarkeit, stellt allerdings als solches kein für die Durchführung umzusetzendes Szenario dar und wird daher in der Ergebnisdarstellung nicht explizit detailliert dargestellt.

Ausgehend von Szenario A wurde eine elektrische Netzkonfiguration mit einem möglichst geringen Anteil an Fahrleitung abgeleitet (Szenario B). Die Anzahl der Unterwerke und die weitere elektrische Ausrüstung wurden entsprechend reduziert, außerdem wurden an einigen Orten geographisch naheliegende Unterwerke zu jeweils einem Standort zusammengefasst. Schließlich wurden einige Ladepunkte an Endhaltestellen hinzugefügt, um den Ladezustand der Batterie bei längerem Aufenthalt der Fahrzeuge beibehalten bzw. erhöhen zu können. Dabei besteht ein Ladepunkt aus einem kurzen Stück Oberleitung, welche aus dem nächsten Unterwerk mit einem eigenen Speise- und Rückleiterkabel angeschlossen wird und auch eigene Leistungs- und Trennschalter besitzt.

Das Szenario C ist von Szenario B abgeleitet und berücksichtigt, dass einzelne Buslinien perspektivisch gemäß dem Nahverkehrsplan 2019-2023 durch einen Straßenbahnbetrieb ersetzt werden sollen. Im Bereich Spandau betrifft es die Achsen Paulsternstraße-Gartenfeld-Wasserstadt-Rathaus Spandau-Heerstraße Nord und Rathaus Spandau-Falkenhagener Feld. Durch die im Vergleich zum Bus notwendige Schieneninfrastruktur wird von längeren Planungs- und Realisierungszeiträumen für das schienengebundene System ausgegangen. Der Betrieb der Linien 136, 236 und X36 sowie 137 und M37 wird für das Szenario C nicht mehr berücksichtigt. Daraus ergibt sich eine Reduktion der betrieblichen Streckenkilometer auf 200 km bzw. auf 85 % im Vergleich zu den Szenarien A und B. Analog dazu wurden Fahrleitungsbereiche und Unterwerke reduziert. Auf die technischen Möglichkeiten des Parallelbetriebs von Straßenbahn und HOBus wurde im Grundlagen Kapitel eingegangen. Es wird empfohlen die technische und wirtschaftliche Machbarkeit zu prüfen und die Planung von Straßenbahn und HOBus zu synchronisieren, da insbesondere Unterwerke / Unterwerksstandorte von beiden Systemen gemeinsam genutzt werden können.

### 4.3.2 Szenario A - Gesamtnetz und hoher Elektrifizierungsgrad

Die Länge des untersuchten Streckennetzes beträgt ca. 125 km (davon 110 km in Doppelrichtung und 15 km in Einzelrichtung), woraus sich ein betriebliches Netz von 235 km ergibt. Das Szenario sieht vor, 95 Streckenkilometer doppelspurig und 7 Streckenkilometer einspurig mit Fahrleitung zu versehen. Somit werden insgesamt 197 km des betrieblichen Netzes elektrifiziert, was einem Fahrleistungsanteil von 84 % entspricht.

Die Positionierung der Unterwerke wurde zunächst anhand der Lage der Endhaltestellen sowie der Kreuzungen vorgenommen, danach wurden weitere Unterwerke entlang der Abschnitte, jeweils etwa alle 1,5 km bis 2,0 km voneinander entfernt. Die sich ergebene Netzkonfigurationen wurde anschließend mittels elektrischer Netzsimulation simuliert und hinsichtlich der technischen Bewertungskriterien analysiert. Auf Basis dieser Analyse wurden die Netzkonfigurationen adaptiert, bis eine finale den Bewertungskriterien entsprechende Netzkonfiguration gefunden wurde.

Die tabellarische Darstellung einer finalen Netzkonfiguration mit den Oberleitungsbereichen, den Bereichen mit Verstärkungsleitungen und den Bereichen mit doppelter Fahrdrähtausführung erfolgt in Kapitel 10.2.1. Zur Übersicht sind die elektrifizierten Abschnitte mit Oberleitung für das Szenario A in Abbildung 4-14 dargestellt.

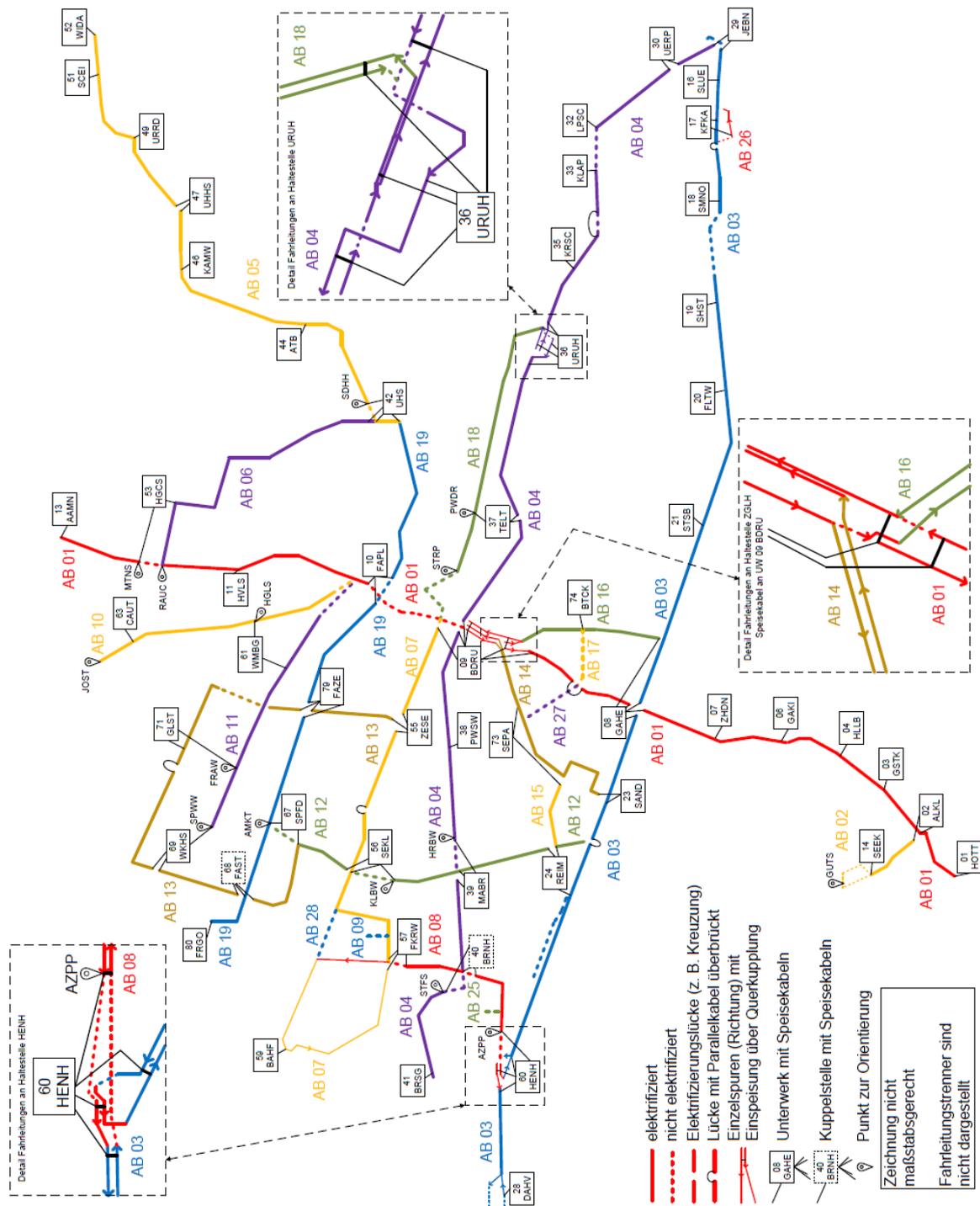


Abbildung 4-14: Übersichtsplan Szenario A

Für Szenario A werden abschnittsspezifisch verschiedene Mastkonfigurationen für die Fahrleitung vorgeschlagen (siehe Abbildung 4-15)

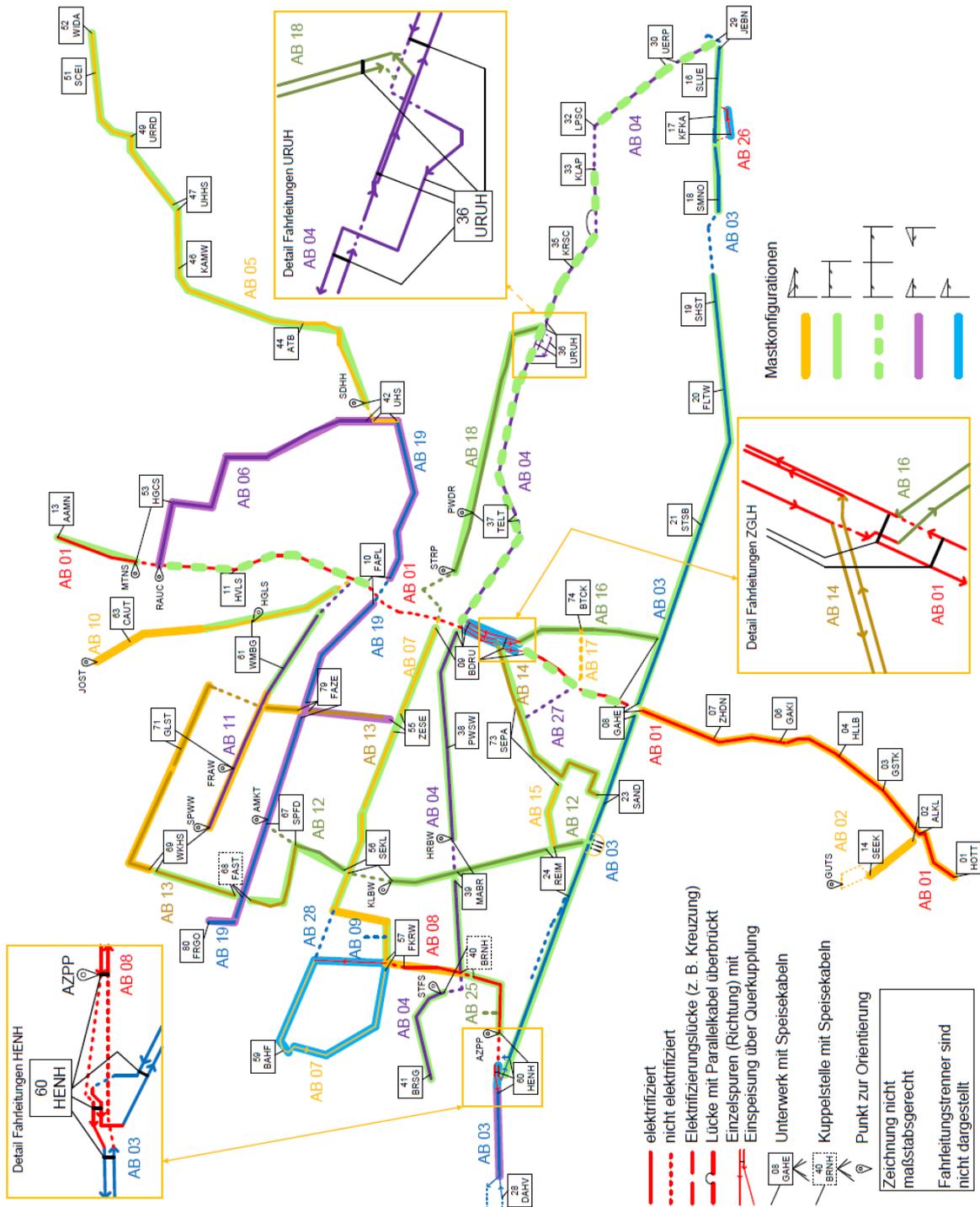


Abbildung 4-15: Übersicht Bereiche verschiedener Mastkonfigurationen, Szenario A

In Tabelle 10-8 in Kapitel 10.2.1 ist die mögliche Lage der Unterwerke, die Positionierung der Speise- bzw. Rückleiterkabelanschlüsse und die Länge der Kabel zusammengetragen. In Tabelle 10-9 die vorgesehene Anzahl und die Nennwerte der Gleichrichtereinheit unterwerksspezifisch dargestellt.

### **4.3.3 Szenario B - Gesamtnetz mit reduzierter Elektrifizierung**

Die Länge des untersuchten Streckennetzes beträgt ca. 125 km (davon 110 km in Doppelrichtung und 15 km in Einzelrichtung), woraus sich ein betriebliches Netz von 235 km ergibt. Das Szenario sieht vor, 72,05 Streckenkilometer doppelspurig und 3,5 Streckenkilometer einspurig mit Fahrleitung zu versehen. Somit werden insgesamt 147,6 km des betrieblichen Netzes elektrifiziert, was einem Fahrleistungsanteil von 63 % entspricht.

Die tabellarische Darstellung einer finalen Netzkonfiguration mit den Oberleitungsbereichen, der Bereiche mit Verstärkungsleitungen und den Bereichen mit doppelter Fahrdrahtausführung erfolgt in Kapitel 10.2.2. Zur Übersicht sind die elektrifizierten Abschnitte mit Oberleitung für das Szenario B in Abbildung 4-16 dargestellt.

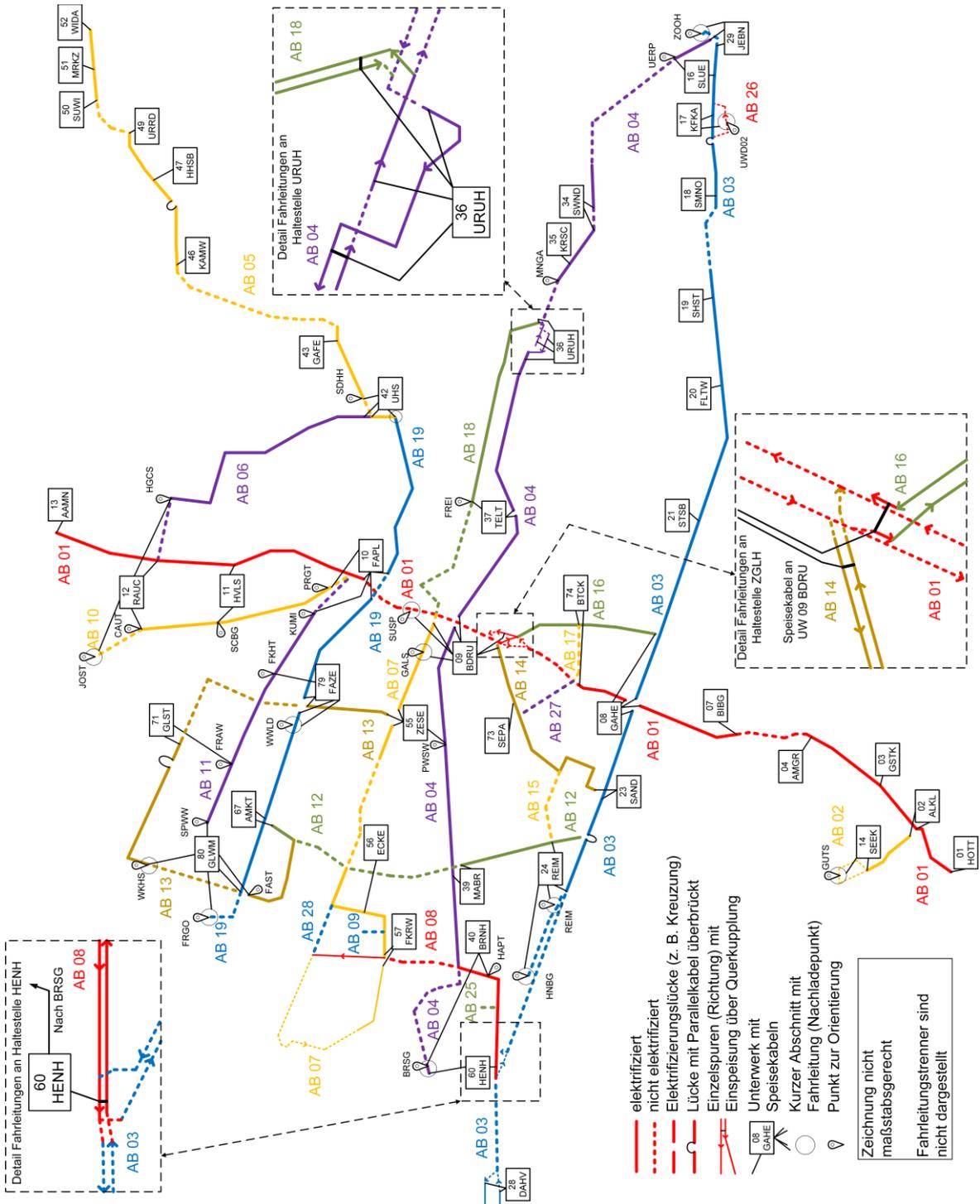


Abbildung 4-16: Übersichtplan Szenario B

Für Szenario B werden abschnittsspezifisch verschiedene Mastkonfigurationen für die Fahrleitung vorgeschlagen (siehe Abbildung 4-17).

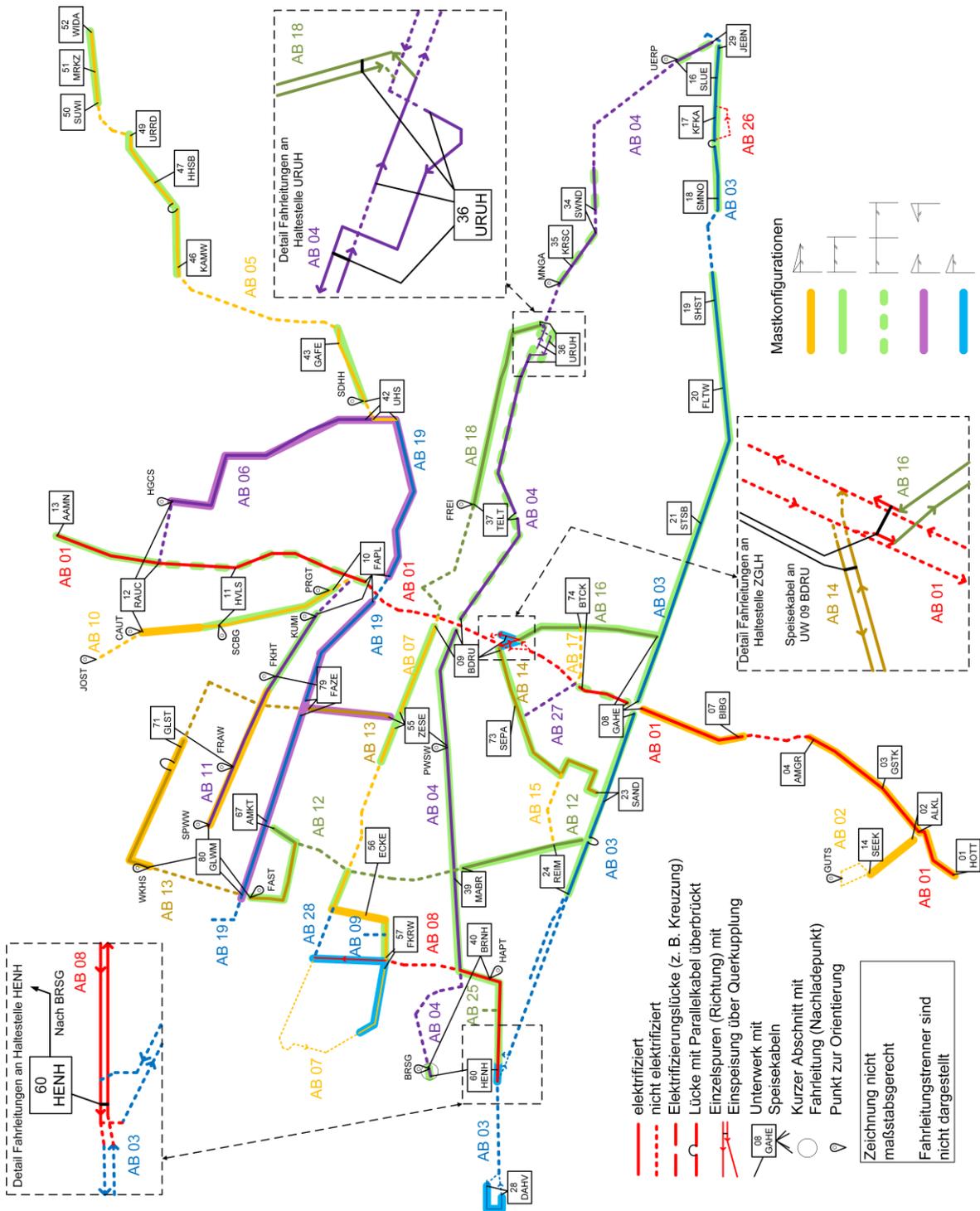


Abbildung 4-17: Übersicht Bereiche verschiedener Mastkonfigurationen, Szenario B

In Tabelle 10-12 in Kapitel 10.2.2 ist die mögliche Lage der Unterwerke, die Positionierung der Speise- bzw. Rückleiterkabelanschlüsse und die Länge der Kabel zusammengetragen. In Tabelle 10-13 sind die vorgesehene Anzahl und die Nennwerte der Gleichrichtereinheiten unterwerksspezifisch dargestellt.

#### **4.3.4 Szenario C - Betrieblich reduziertes Netz mit reduzierter Elektrifizierung**

Die Länge des untersuchten Streckennetzes beträgt ca. 103,5 km (davon 96,5 km in Doppelrichtung und 7 km in Einzelrichtung), woraus sich ein betriebliches Netz von 200 km ergibt. Das Szenario sieht vor, 52,7 Streckenkilometer doppelspurig und 3,5 Streckenkilometer einspurig mit Fahrleitung zu versehen. Somit werden insgesamt 108,9 km des betrieblichen Netzes elektrifiziert, was einem Fahrleistungsanteil von 54 % entspricht.

Die tabellarische Darstellung einer finalen Netzkonfiguration mit den Oberleitungsbereichen, der Bereiche mit Verstärkungsleitungen und den Bereichen mit doppelter Fahrdrahtausführung erfolgt in Kapitel 10.2.3. Zur Übersicht sind die elektrifizierten Abschnitte mit Oberleitung für das Szenario C in Abbildung 4-18 dargestellt.

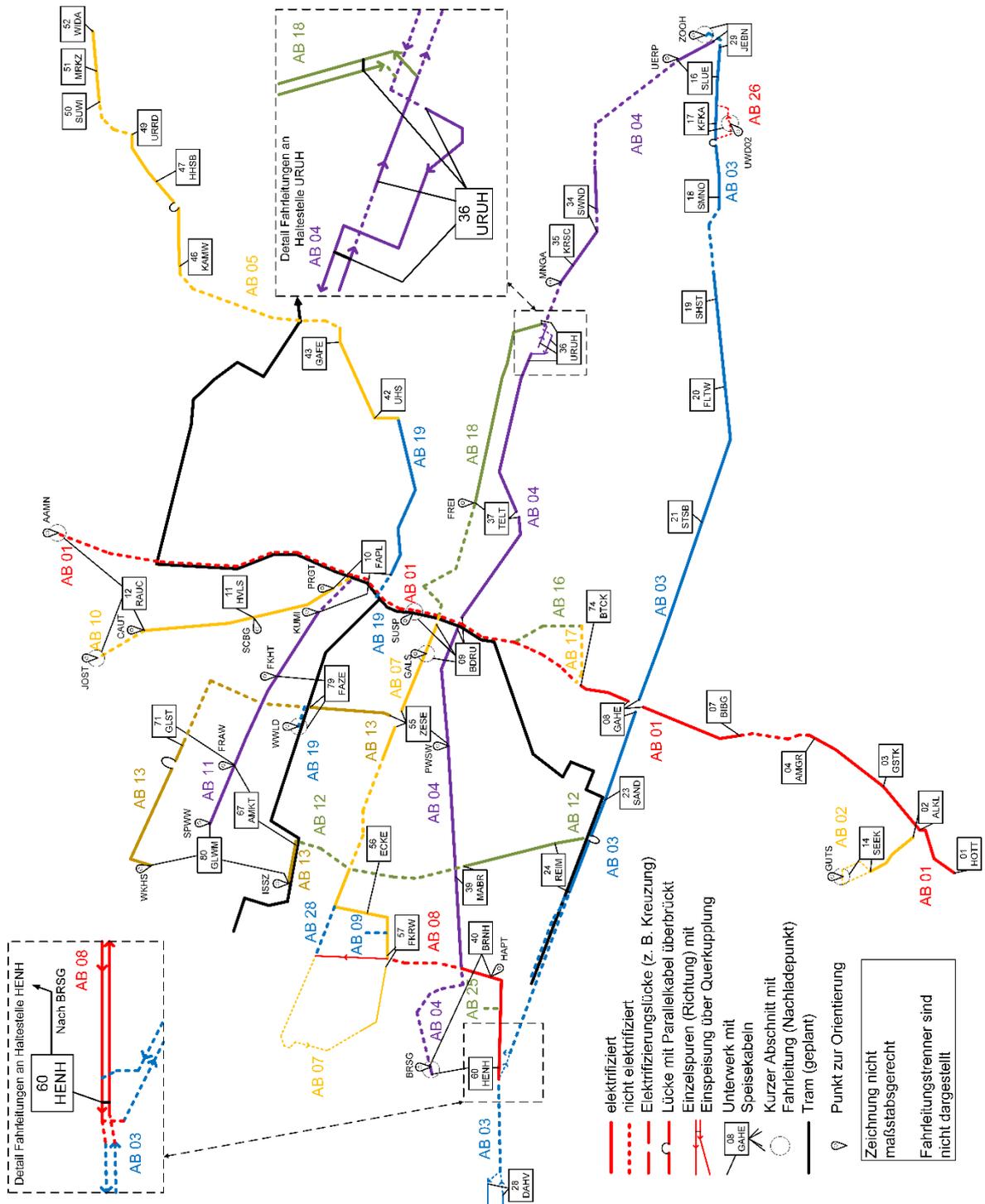


Abbildung 4-18: Übersichtsplan Szenario C

Für Szenario C werden abschnittsspezifisch verschiedene Mastkonfigurationen für die Fahrleitung vorgeschlagen (siehe Abbildung 4-19).

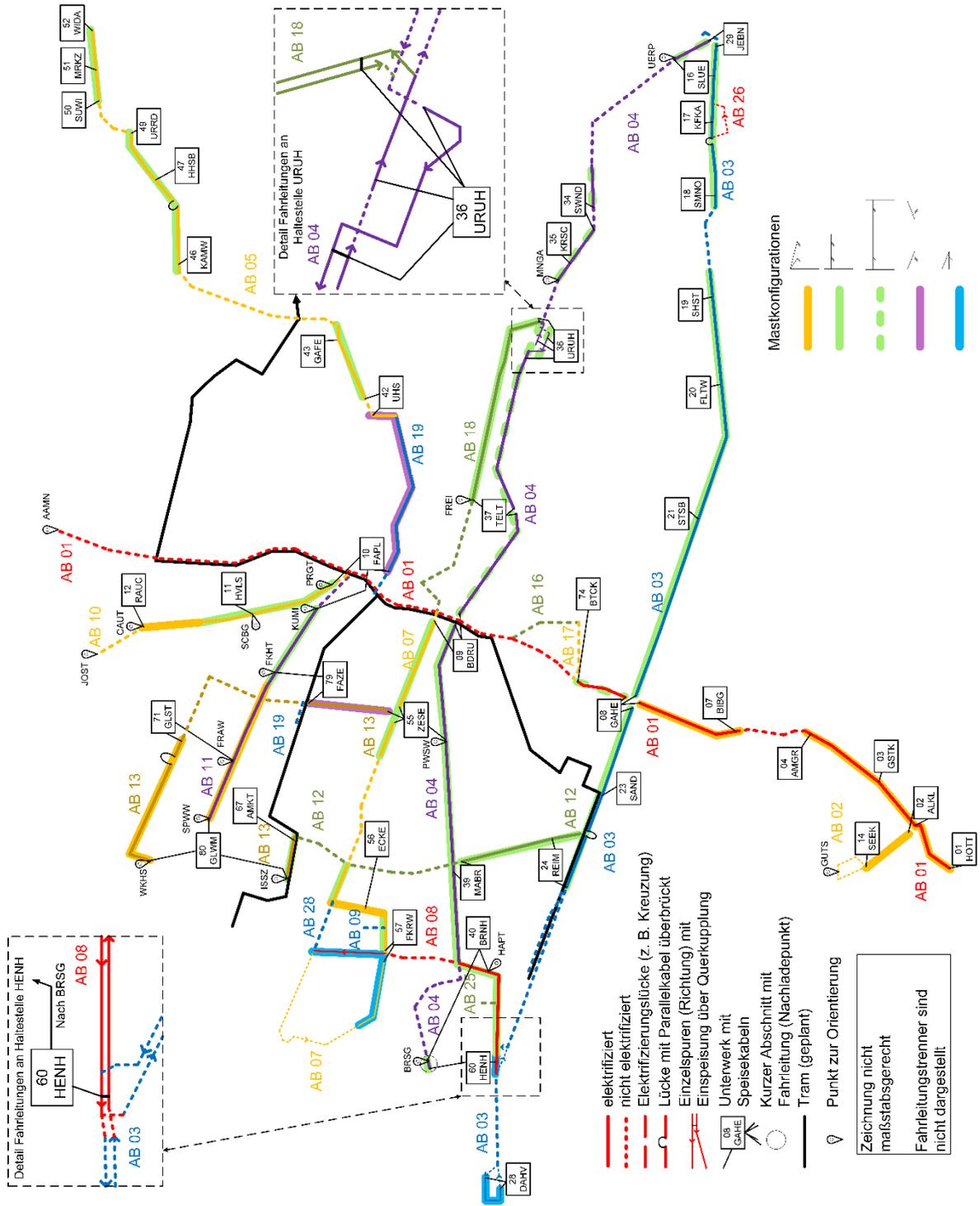


Abbildung 4-19: Übersicht Bereiche verschiedener Mastkonfigurationen, Szenario C

In Tabelle 10-16 in Kapitel 10.2.3 ist die mögliche Lage der Unterwerke, die Positionierung der Speise- bzw. Rückleiterkabelanschlüsse und die Länge der Kabel zusammengetragen. In Tabelle 10-17 sind die vorgesehene Anzahl und die Nennwerte der Gleichrichtereinheiten unterwerksspezifisch dargestellt.

## 4.4 Szenariospezifische Ergebnisse

In den folgenden Unterkapiteln werden die erzielten Ergebnisse beschrieben und exemplarisch dargestellt und zusammengefasst. Die einzelnen Ergebnisse sind den Anlagen zum Bericht dargestellt.

### 4.4.1 Resultierende Netzkonfiguration

Die szenariospezifisch ermittelten Netzkonfigurationen werden in Übersichtsschaltplänen dargestellt. Eine exemplarische Darstellung ist in Abbildung 4-20 visualisiert.

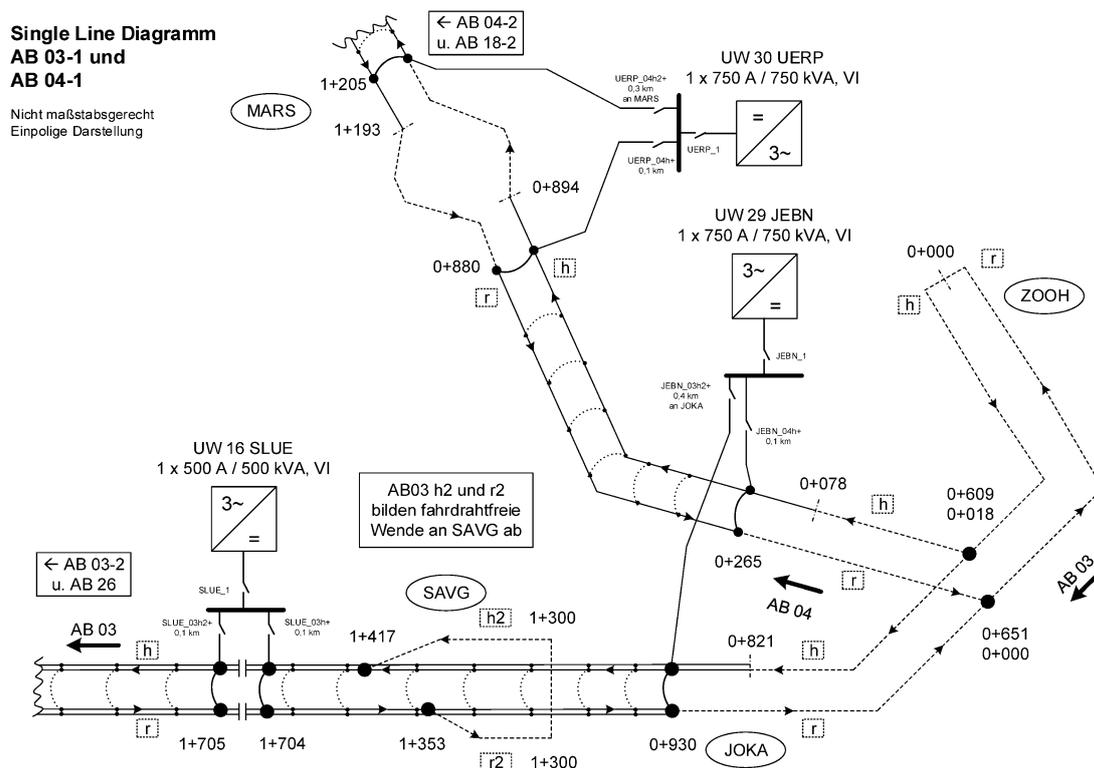


Abbildung 4-20: Übersichtsschaltplan Szenario A, AB 03 (Teil 1) und AB 04 (Teil 1)

Diese Diagramme zeigen grob die Anordnung und die Verschaltung der elektrischen Infrastruktur mit Unterwerken, Einspeisungen und elektrischen Verbindungen. Vereinzelt sind Kurznamen von Haltestellen zur besseren Orientierung zusätzlich in die Bilder aufgenommen.

Die Übersichtsschaltpläne sind in der Anlage A szenariospezifisch zusammengestellt.

### 4.4.2 Spannungshaltung

Durch die elektrische Netzsimulation wurden die Spannungen am Stromabnehmer der Fahrzeuge für die verschiedenen Szenarien berechnet. Im Rahmen der Auswertung wird

die minimale Spannung am Stromabnehmer für sämtliche Fahrleitungsabschnitte in Anhängigkeit der Position dargestellt. In den szenariospezifischen und abschnittswisen Diagrammen (siehe Beispiel in Abbildung 4-21) der Spannungshaltung sind in der horizontalen Achse die Kilometrierung der Strecke sowie die Positionen der Haltestellen für beide Richtungen dargestellt. Zusätzlich werden vertikal die Positionen der geplanten Unterwerksstandorte mit Unterwerksnummer und Namen visualisiert. Oberleitungsfreie Abschnitte werden aus der Batterie gefahren. In diesem Betriebsmodus werden keine Spannungen am Stromabnehmer visualisiert. Zur Beurteilung der minimalen Spannung am Stromabnehmer sind in der vertikalen Achse die Nennspannung DC 750 V sowie die Toleranzgrenzen der nach EN 50163 zulässigen Werte dargestellt.

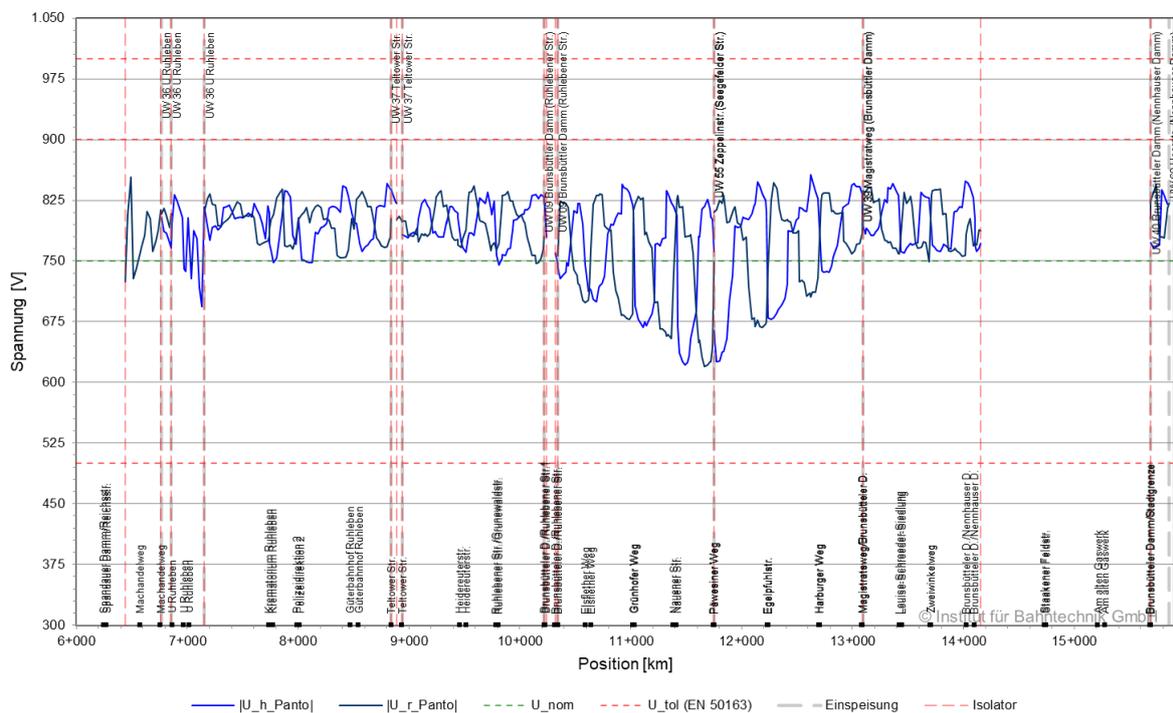


Abbildung 4-21: Beispieldarstellung der minimalen Spannung am Stromabnehmer, Szenario B, Spitzenlast, Ausfall UW 55 Zeppelinstr. (Seegefelder Str.), AB 04 (Teil 3)

Ein Ziel bei der Auslegung und Dimensionierung des elektrischen Netzes war es, die betriebliche Forderung der BVG zu erfüllen, dass auch bei Ausfall eines Unterwerkes der Fahrbetrieb ohne Einschränkungen fortgeführt werden kann.

Sollte die Spannung am Stromabnehmer unzureichende Werte annehmen (ggf. bei Ausfall mehrerer benachbarter Unterwerke) kann auf dem HObus auf die batterieelektrische Speisung umgestellt werden.

### 4.4.3 Dimensionierung der Gleichrichtereinheiten

Für jedes Unterwerk wurden in Abhängigkeit von der Zeit die Ausgangsströme der Gleichrichtereinheiten simuliert. Da die Stromverläufe selbst für die Überprüfung der Dimensionierung wenig aussagekräftig sind, wurden die jeweiligen zeitgewichteten Belastungsdauerkurven berechnet und hinsichtlich der notwendigen Belastbarkeitsklasse analysiert.

Ziel der Auslegung und Dimensionierung ist, dass die Strombelastbarkeit der Gleichrichteranlagen im Normal- und Ausfallbetrieb nicht überschritten wird und so die Gleichrichteranlagen ausreichend dimensioniert sind. Im Ergebnis der Auswertung werden die möglichen Gleichrichterkonfigurationen in vier verschiedenen Kategorien spezifiziert und auf Basis dessen ein Vorschlag zur technischen Ausgestaltung der Anlage getroffen.

Grundlage für die Kategorisierung ist jeweils ein Basisstrom  $I_{Bd}$  für die Belastbarkeitsklassen V, VI und VII (EN 50328). Die daraus resultierenden Spitzenströme müssen ebenfalls größer sein, als die maximal auftretenden Betriebsströme.

Ausgehend von  $I_{Bd}$  wurde nach der untenstehenden Formel die Scheinleistung  $S_N$  des zum Gleichrichter gehörenden Gleichrichtertransformators bestimmt.

$$S_N = \sqrt{3} \cdot \frac{I_V}{I_d} \cdot \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int I_d^2(t) dt} \cdot U_{V0} = \sqrt{3} \cdot \frac{I_V}{I_d} \cdot I_{Bd} \cdot U_{V0}$$

Die Kennwerte dieser vier Gleichrichterunterwerkskategorien sind in Tabelle 4-7 dargestellt.

Tabelle 4-7: Kategorien der Gleichrichter und Transformatoren

Kennwert	Guw Kategorie 1	Guw Kategorie 2	Guw Kategorie 3	Guw Kategorie 4
Basisstrom Gleichrichter [A]	500	750	1.000	1.500
Scheinleistung Transformator [kVA]	500	750	1.000	1.500
Spitzenstrom Gleichrichter [A], 300 % für 1 min (Belastbarkeitskl. VI)	1.500	2.250	3.000	4.500
Spitzenstrom Gleichrichter [A], 450 % für 15 s (Belastbarkeitskl. VII)	2.250	3.375	4.500	6.750

Für die verschiedenen Szenarien ergeben sich verschiedene Ergebnisse hinsichtlich des Betriebsstroms, weshalb je Szenario eine Aufteilung der Unterwerke in diese vier Kategorien erfolgt. Angegeben ist auch jeweils das Verhältnis des Spitzenwerts zum quadratischen

Mittelwert des Betriebsstroms, welche durchweg Werte größer als 2 bis hin zu Werten größer als 5 erreichen. Aus diesem Grund wurden die Transformator-Gleichrichter-Einheiten grundsätzlich mit der Belastbarkeitsklasse VI (3-fache kurzzeitige Überlastfähigkeit) angenommen. In Einzelfällen ist es möglich, eine Transformator-Gleichrichter-Einheit einer niedrigeren Kategorie, jedoch mit Belastbarkeitsklasse VII (4,5-fache kurzzeitige Überlastfähigkeit), zu wählen.

Die vorgeschlagene Konfiguration der Gleichrichter-Einheiten für die Szenarien A, B und C sind in der Anlage in den Tabelle 10-9, Tabelle 10-12 bzw. Tabelle 10-17 zusammengefasst.

#### **4.4.4 Belastung der elektrischen Leiter**

Während des Simulationsprozesses wurden die Belastungen der elektrischen Leiter mehrmals zwischen den Simulationsläufen ausgewertet und das Netzmodell schrittweise an die Anforderungen angepasst, sodass die Belastungen der finalen Konfiguration im Rahmen der zulässigen Belastbarkeiten liegen. Aufgrund der Größe des Netzes und der Vielzahl der Ausfallvarianten in den einzelnen Szenarien soll im Folgenden die Vorgehensweise erläutert werden. Die einzelnen Diagramme der Stromverläufe entlang der Strecke sind in den Anlagen dargestellt. Die Notation der betreffenden Anlagenteile ist in Tabelle 10-19 erläutert.

##### **4.4.4.1 Fahrleitung**

Die Fahrdrähte werden in der elektrischen Netzberechnung mit einem elektrischen Widerstand modelliert, der einen Verschleiß von 20 % bei einer Leitertemperatur in Höhe von 60°C berücksichtigt. Verstärkungsleitern wird kein Verschleiß unterstellt, jedoch auch eine erhöhte Leitertemperatur. Im Rahmen der Simulationen werden die Leiterströme berechnet und mit der Auswertung die streckenabschnittswisen Maximalwerte sowie die Effektivwerte für 300s und 900s. Exemplarisch sind diese Stromverläufe entlang der Strecke in den Abbildung 4-22 und Abbildung 4-23 dargestellt.

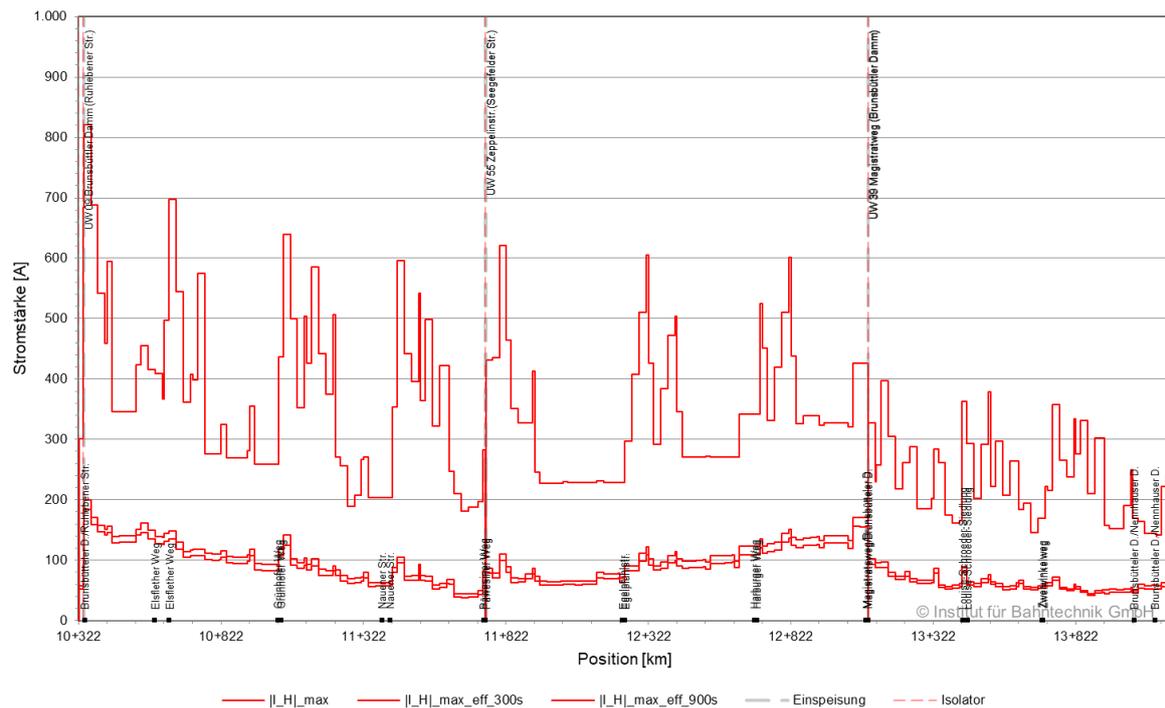


Abbildung 4-22: Maximaler Strom, 300s und 900s Effektivwert im Fahrdrabt, Szenario B, Spitzenlast, Ausfall UW 55 Zeppelinstr. (Seefeldler Str.), AB 04 (Teil 6)

Die Ergebnisse der Analyse wurden hinsichtlich der Positionen der maximal aufgetretenen Stromwerte analysiert und für diese Orte die zeitgewichtete Belastungsdauerkurve als Basis der Dimensionierung bestimmt.

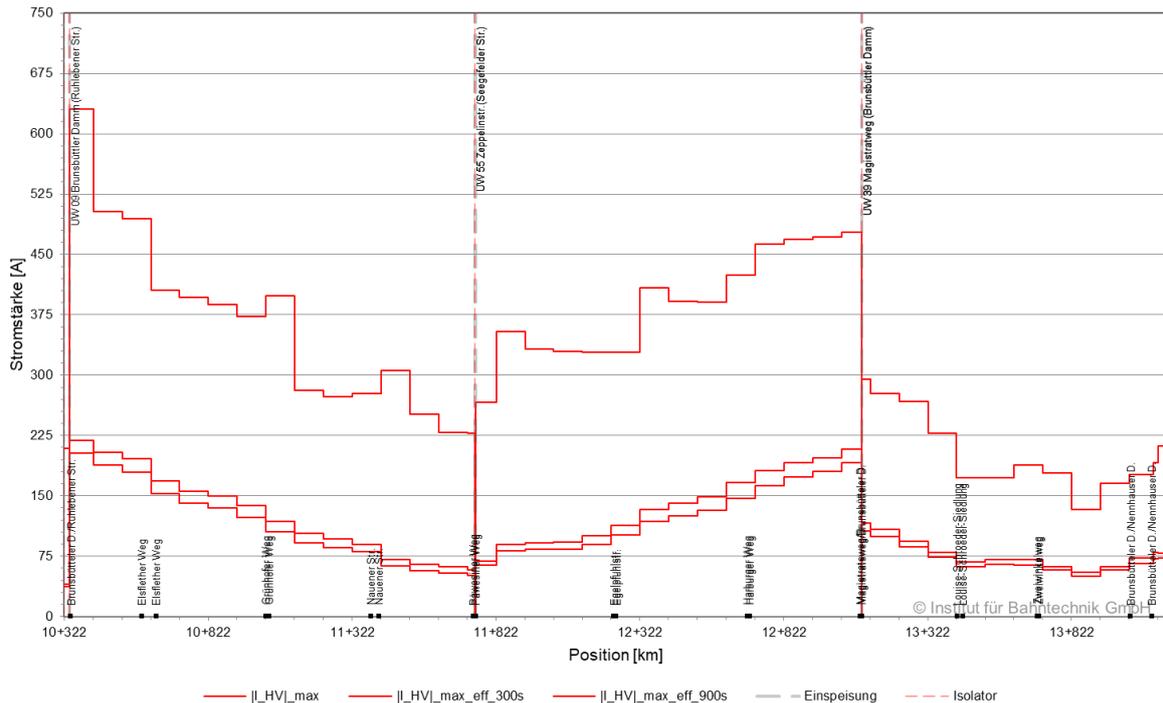


Abbildung 4-23: Maximaler Strom, 300s und 900s Effektivwert im Verstärkungsleiter, Szenario B, Spitzenlast, Ausfall UW 55 Zeppelinstr. (Seegefelder Str.), AB 04 (Teil 6)

Für die Ermittlung der Belastbarkeit wurden für beide Leiter eine Umgebungstemperatur von 40°C, eine Windgeschwindigkeit von 0,3 m/s und eine Globalstrahlung von 1000 W/m<sup>2</sup> angenommen. Für die Fahrdrähte berechnet sich daraus ein zulässiger Dauerwert für die Strombelastung von 324 A. Die Verstärkungsleiter können dauerhaft mit 400 A belastet werden.

Die Überprüfung der Belastbarkeit der beiden Leitertypen erfolgte für alle Simulationsszenarien. Die Resultate der Auswertung sind in Tabelle 4-8 aufgetragen.

Tabelle 4-8: Belastbarkeit der Fahrdrähte und Verstärkungskabel

Leiter	Dauerstrombelastbarkeit Leiter gem. o.g. Angaben
	$I_{rms}$
Fahrdraht (100 mm <sup>2</sup> Cu)	324 A
Verstärkungskabel (120 mm <sup>2</sup> Cu)	400 A

Exemplarisch erfolgt die Gegenüberstellung der Belastung des Fahrdrahtes mit seiner zulässigen Belastbarkeit in einem Diagramm (Abbildung 4-24). Zu sehen ist dort die berechnete, zeitgewichtete Belastungsdauerkurve des Fahrdrahtes aus den Simulationen heraus und gegenübergestellt dessen Belastbarkeit. Die Werte dieser Abbildung stammen aus

dem Szenario A, Spitzenlast, bei Ausfall der Unterwerke ALKL, FAPL, REIM, BAHF, CAUT und WKHS auf dem Abschnitt AB10 am Punkt km 0+711 im hinführenden Fahrdrabt.

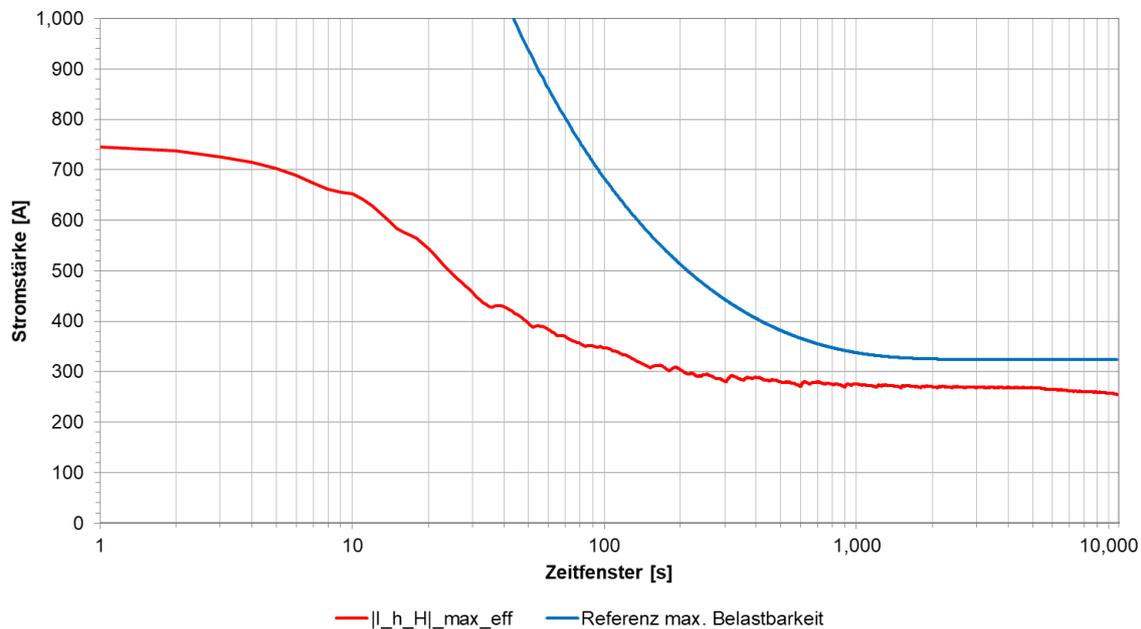


Abbildung 4-24: Fahrdrabtbelastung ggü. Belastbarkeit

#### 4.4.4.2 Speise-, Rückleitungs- und Verbindungskabel

Für die Speise- und Rückleitungskabel zwischen Unterwerk und Strecke wurde ein Kupferkabel mit einem Querschnitt von 400 mm<sup>2</sup> und einer VPE-Isolierung ausgewählt. Da zu erwarten ist, dass die Verlegung der Speise- und Rückleiterkabel sowohl in Luft als auch in Erde erfolgt, kann die maximale Dauerbelastbarkeit ( $I_{rms}$ ) für ein Kabel mit 1.060 A angegeben werden. Die Belastbarkeit einer konkreten Kabelstrecke hängt neben dem Kabeltyp von der Verlegeart ab. Die daraus folgenden Reduktionsfaktoren und die Wahl konkreter Kabel können daher erst im Rahmen der nächsten Planungsschritte gezielt bestimmt werden. Die in den berechneten Ergebnissen höchsten auslegungsrelevanten Kabelströme sind für:

- Szenario A: Uw 09 (Brunsbütteler Damm (Ruhlebener Straße): 880 A
- Szenario B: Uw 79 Falkenseer Chaussee (Zeppelinstr.), 815 A
- Szenario C: Uw 40 (Brunsbütteler Damm (Nennhauser Damm): 578 A

Für die Verbindungskabel zwischen benachbarten Fahrdrabtpolen oder der Verstärkungskabel und Fahrdrähte wurde ein Kupfer-Kabel mit einem Querschnitt von 120 mm<sup>2</sup> und einer VPE-Isolierung ausgewählt. Die Verlegung erfolgt vornehmlich in Luft, sodass die Dauerbelastbarkeit ( $I_{rms}$ ) mit 485 A angegeben werden kann. [92]

Aufgrund der Vielzahl der Speisepunkte und der Vielzahl der Ausfallvarianten in den einzelnen Szenarien soll für die einzelnen Details auf die Diagramme in den Anlagen verwiesen werden. Die Notation der betreffenden Anlagenteile ist in Tabelle 10-19 erläutert.

#### 4.4.5 Kurzschlusserkennbarkeit

Im betrachteten Fahrleitungsnetz wurden die minimalen stationären Kurzschlussströme berechnet. Der Kurzschluss wurde dabei widerstandsfrei zwischen den Polen der Fahrleitung simuliert. Er wandert dabei durch das Netz, um den Kurzschlussstrom für jede mögliche Eintrittsstelle zu bestimmen. Dabei sind auch Schaltzustände des Netzes zu berücksichtigen, die nicht der Standardfall sind.

Die Bewertungskriterien sind in Kapitel 3.7.2 beschrieben. Da der Abschaltstrom des Streckenabgangsschalters erst in späteren Planungsphasen festgelegt wird, wird bei der Auswertung der Berechnung geprüft, ob maximaler Betriebsstrom und minimaler Kurzschlussstrom genug Abstand besitzen, um Spielraum für die Einstellung des Abschaltstroms dazwischen zu erreichen. Anderenfalls müssten die Leiter anders bemessen, oder die Netzkonfiguration allgemein geändert werden.

Abbildung 4-25 zeigt die Vorgehensweise anhand eines Beispiels. Unterwerk 02 ist außer Betrieb. Die Strecke zwischen Unterwerk 01 und Unterwerk 03 wird von diesen beiden Unterwerken gespeist. Die Sammelschiene des Unterwerks 02 dient dabei als Kupplung der beiden Streckenabschnitte, das heißt, die Strecke wird zweiseitig gespeist. In der Berechnung durchläuft nun ein Kurzschluss die Strecke. Die Kurzschlussströme beider Unterwerke werden in Abhängigkeit ihrer Position aufgezeichnet. Der Wert, in dem sich beide Kurven schneiden, wird als minimaler Kurzschlussstrom für beide Streckenabgänge der Unterwerke angesetzt. Kurzschlüsse links davon müssen von Unterwerk 01 erkannt werden, Kurzschlüsse rechts davon von Unterwerk 03. Der jeweilige Streckenabgang des gegenüberliegenden Unterwerks wird durch die Mitnahmeschaltung abgeschaltet.

Der erhaltene minimale Kurzschlussstrom ( $I_{kmin}$ ) wird zum maximalen Betriebsstrom ( $I_{Bmax}$ ) ins Verhältnis gesetzt. Verwendet wird der höchste Wert des betreffenden Streckenabgangs aus den verschiedensten Betriebsszenarien. Ist der Quotient  $I_{kmin} / I_{Bmax}$  größer als 1,22, dann ist die Kurzschlusserkennbarkeit gegeben.

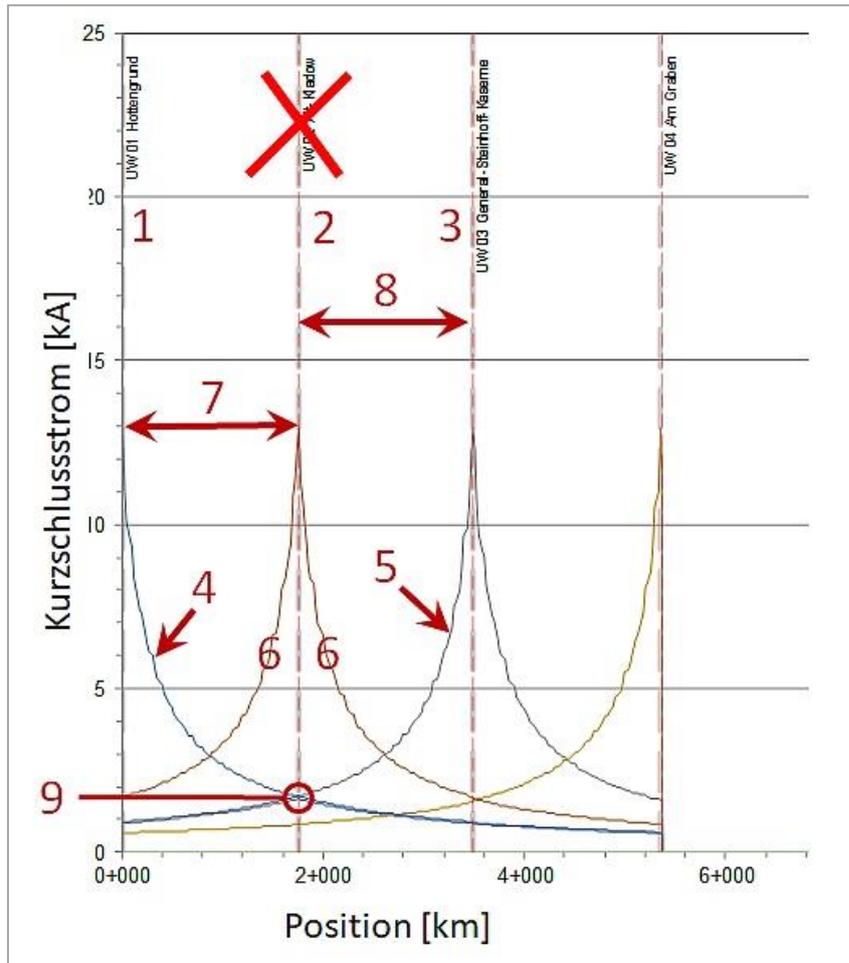


Abbildung 4-25: Beispiel zur Vorgehensweise bei der Überprüfung der Kurzschlusserkennbarkeit

- 1 Unterwerk 01, in Betrieb
- 2 Unterwerk 02, außer Betrieb
- 3 Unterwerk 03, in Betrieb
- 4 Kurzschlussstrom gespeist aus Unterwerk 01 in Abhängigkeit vom Kurzschlussort
- 5 Kurzschlussstrom gespeist aus Unterwerk 03 in Abhängigkeit vom Kurzschlussort
- 6 Kurzschlussstrom gespeist aus Unterwerk 02 in Abhängigkeit vom Kurzschlussort – wird hier ignoriert, da Unterwerk 02 außer Betrieb ist
- 7 Bereich, in dem Unterwerk 01 den Kurzschluss erkennen muss
- 8 Bereich, in dem Unterwerk 03 den Kurzschluss erkennen muss
- 9 Minimaler Kurzschlussstrom aus Sicht des jeweils nächstgelegenen Unterwerks 01 bzw. 02

#### 4.4.6 Batteriebezogene Ergebnisse

Für die Auslegung der Batteriespeicher wurden die Ladezustände der Fahrzeugbatterien ausgewertet und daraus die SoC-Varianz der repräsentativen Fahrzeuge ermittelt. Pro Szenario und Fahrzeugtyp wurde der schlechteste Wert, also die tiefste Entladung bzw. breiteste Varianz herangezogen (Worst Case-Auslegung).

Tabelle 4-9: SoC-Varianz der einzelnen Szenarien

SoC-Range	Szenario A hoher Elektrifizierungsgrad	Szenario B Teilelektrifizierung	Szenario C reduziertes Netz geringer Elektrifizierungsgrad + Tram
Gelenk-Hobus	90,0 % bis 78,0 % (Fzg. 76, Linie X34)	90,0 % bis 65,0 % (Fzg. 161, Linie M49)	90,0 % bis 65,0 % (Fzg. 161, Linie M49)
Doppelgelenk-Hobus	90,0 % bis 67,6 % (Fzg. 107, Linie M32)	90,0 % bis 36,7 % (Fzg. 107, Linie M32)  oder 90,0 % bis 59,2 % (Fzg. 89, Linie X36)	90,0 % bis 36,7 % (Fzg. 107, Linie M32)  oder 90,0 % bis 73,0 % (Fzg. 113, Linie M32)

Aus der Belastung der Batterien wurden die Lebensdauern linienspezifisch ermittelt. Da die Transportaufgaben der einzelnen Linien und die jeweilige Infrastruktur (Fahrdraht, Ladepunkte) unterschiedlich sind, werden die Batterien auf den Linien unterschiedlich belastet. Da nicht in allen Szenarien dieselben Buslinien fahren, ist eine Zuordnung zu den Szenarien in der Tabelle vermerkt.

Tabelle 4-10: prognostizierte Lebensdauer der verwendeten Batterien pro Linie

Linie	Variante	Temperatur (°C)	Lebensdauer (Tage)	Lebensdauer (Jahre)
L130	A, B, C	15	2708	7,41
L134	A, B, C	15	2617	7,16
L136	A, B	15	2257	6,18
L137	A, B	15	1536	4,21
L236	A, B	15	2819	7,72
L237	A, B, C	15	2841	7,78
M32_1	A, B, C	15	2149	5,88
M32_2	A, B, C	15	2024	5,54
M37	A, B	15	1985	5,43
M45	A, B, C	15	1603	4,39

Linie	Variante	Temperatur (°C)	Lebensdauer (Tage)	Lebensdauer (Jahre)
M49	A, B, C	15	2528	6,92
N34	A, B	15	5201	14,24
N34	C	15	3134	8,58
X33	A, B, C	15	2504	6,86
X34	A, B, C	15	3681	10,08
X36	A, B	15	2108	5,77
X49	A, B, C	15	3886	10,64

Da erwartet wird, dass die Busse tageweise auf verschiedenen Linien eingesetzt werden, wird die Lebensdauer der Batterie für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung im Schnitt mit ca. 6 Jahren angenommen. Das Lebensende der Batterie wird für die zugrunde gelegten Zyklen bei dem Kriterium der Erreichung von 80% der initialen Batteriekapazität erreicht.

#### 4.4.7 Energiebedarf

Für die Berechnung des Energiebedarfs ist zu berücksichtigen, dass in den vorliegenden Rechnungen der Fahrplan eines Werktages als Basis herangezogen wird. In der Praxis werden von diesem Fahrplan abweichende Wochenend- und Feiertagsfahrpläne auftreten, die weniger Fahrten pro Tag aufweisen und somit einen geringeren Energiebedarf verursachen. Die Energieberechnung basierend auf 365 Werktagen für das Jahr stellt somit eine Hochrechnung dar.

Der spezifische Energiebedarf wird in Wh/tkm (Wattstunden pro Tonnenkilometer) angegeben. Mit der Einheit Wh/tkm wird die verbrauchte Energie durch die umgesetzte Transportarbeit ins Verhältnis gesetzt. Je höher dieser Wert ist, desto mehr Energie war vonnöten, um eine bestimmte Transportarbeit zu erbringen. Bei vergleichbaren Transportaufgaben deutet ein höherer Energiewert auf eine ineffizientere Erbringung dieser Arbeit hin. Auch die spezifischen Energiebedarfe innerhalb von Fahrzeugen derselben Linie unterscheiden sich, da nicht jeder Umlauf denselben Fahrweg und dieselbe Pausenzeit an den Endstationen hat. Werden im Stillstand Energien durch die Hilfsbetriebe benötigt, so hat dieser Verbrauch einen Einfluss auf den spezifischen Energiebedarf, da zur selben Zeit keine Strecke zurückgelegt wurde.

Wenngleich die Traktionsmotoren im Gegensatz zu den Hilfsbetrieben (Licht, Klimatisierung, Steuerung) große Leistungen abfordern, besitzen beide Verbrauchergruppen im Nahverkehr vergleichbare Energiebedarfe. Dies liegt daran, dass die Hilfsbetriebe meist durchgehend betrieben werden, während die Traktionsmotoren hohe Leistungen nur zeitweise beziehen.

Der Hilfsbetriebeleistungsbedarf der Fahrzeuge ist von verschiedenen Parametern (z.B. der Fahrzeuginnentemperatur und der Umgebungstemperatur) abhängig und variiert über den Tag. Klimatisierung bzw. Heizung arbeiten vorwiegend mit höheren Leistungen in den besonders warmen bzw. kalten Monaten. Da dieser Leistungsbedarf im Rahmen der technischen Machbarkeit nicht detailliert modelliert und simuliert werden kann, wird für die Energieberechnung auf Basis der Tagesfahrpläne mit den modellierten spezifischen Beladungszuständen der elektrische Hilfsbetriebeleistungsbedarf der Fahrzeuge in Abhängigkeit der installierten Leistung variiert. Als Werte wurden 33% bzw. 75% der installierten Hilfsbetriebeleistung als mittlerer Leistungswert gewählt und der entsprechende Tagesenergiebedarf berechnet.

In fünf Monaten des repräsentativen Jahres wird ein Mittelwert der Hilfsbetriebe von 75 % des Spitzenwertes angenommen, während in den restlichen sieben Monaten im Mittel ein Wert von 33 % des Spitzenwertes bezogen wird. Für die eingesetzten Fahrzeugtypen „Gelenktrolleybus“ und „Doppelgelenktrolleybus“ sind die daraus resultierenden Hilfsbetriebeleistungen in folgender Tabelle aufgelistet:

Tabelle 4-11: Hilfsbetriebeleistungen

Relativer Leistungsbedarf der Hilfsbetriebe	Gelenktrolleybus (GTB)	Doppelgelenktrolleybus (DGTB)
100 %	45 kW	63 kW
75 %	33,8 kW	47,3 kW
33 %	15 kW	21 kW

Aus den Tagesgang-Simulationsläufen wurden die spezifischen Energiebedarfe des gesamten Netzes des jeweiligen Szenarios berechnet.

Für die Ermittlung des Energiebedarfs pro Jahr werden 7 Monate mit einem geringen Energiebedarf der Hilfsbetriebe und 5 Monate mit einem hohen Energiebedarf der Hilfsbetriebe zu Grunde gelegt. Die Werte sind in Tabelle 4-12 dargestellt und werden später im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung weiterverwendet.

Tabelle 4-12: Energiebedarfe der Szenarien

Parameter	Szenario A Gesamtnetz / hoher Elektrifizierungsgrad	Szenario B Gesamtnetz / reduzierte Elektrifizierung	Szenario C reduziertes Netz
Laufleistung	41.338,9 km	41.338,9 km	30.937,7 km
Tagessumme bei 33 % - Hilfsbetriebe	84,1 MWh	84,1 MWh	53,8 MWh

<b>Parameter</b>	<b>Szenario A Gesamtnetz / hoher Elektrifizierungsgrad</b>	<b>Szenario B Gesamtnetz / redu- zierte Elektrifizierung</b>	<b>Szenario C reduziertes Netz</b>
Energiebedarf bei 75 % - Hilfsbetrie- beleistung (pro Tag)	129,9 MWh	129,9 MWh	89,3 MWh
<b>Energiebedarf pro Jahr</b>	<b>37,7 GWh</b>	<b>37,7 GWh</b>	<b>25,0 GWh</b>
Spezifischer Ener- giebedarf	2,5 kWh / km	2,5 kWh / km	2,22 kWh / km

Auf Basis der Laufleistung der Fahrzeuge wurde der spezifische Energiebedarf berechnet. Durch die verschiedenen Anzahlen an Gelenk- und Doppelgelenkbussen liegt dieser Wert zwischen den aus der Literatur bekannten Werten und kann somit als plausibel erachtet werden.

Bei den Werten des Gesamtenergiebedarfs fallen die annähernd gleichen Energiewerte (Abweichungen in nicht dargestellten Nachkommastellen) für das Szenario A und B auf. Dies scheint auf den ersten Blick widersprüchlich, da es sich um elektrisch verschiedene Netzkonfigurationen handelt und erwartet worden wäre, dass die Szenarien einen unterschiedlichen Energiebedarf haben. Grundsätzlich ist es so, dass die umzusetzende Energie für die Transportaufgabe (diese ist bei beiden Szenarien gleich) aus den Unterwerken bereitgestellt werden muss. Energiespeicher sind dabei als bilanzierende elektrische Netz-elemente zu betrachten. In den Simulationen werden Energiespeicher derart modelliert, dass sie am Ende der Simulation den gleichen Ladezustand haben wie zu Beginn der Simulation. Zusätzlich wird durch die Kabelverbindungen in dem Fahrleitungsnetz des Szenarios B ein vergleichbarer Grad der elektrischen Vermaschung wie bei Szenario A hergestellt. So kann die rückgespeiste Leistung der Fahrzeuge bei beiden Szenarien in einem hohen Anteil für die Nachladung der Batterie oder leistungsaufnehmende Fahrzeuge im Netz genutzt werden. Dadurch ergeben sich die nahezu identischen Werte des Jahresenergiebedarfs für beide Szenarien.

## 4.5 Betriebshof

### 4.5.1 Allgemeines

Der Betriebshof Spandau wird von der BVG als erster Hof für die Einführung von Hobussen vorgesehen.

Derzeit kommen die Fahrzeuge von der Linie, fahren in Richtung Servicehalle und tanken in einem ersten Schritt Diesel (Dauer: ca. vier Minuten) nach bzw. den für die Abgasreinigung benötigten Grundstoff Ad-Blue. Anschließend wird der Bus im Servicegebäude mit Hilfe der Portal- und/oder der Unterflurwaschanlage gereinigt und nach Beendigung auf der Freifläche abgestellt. Am nächsten Morgen wird der Bus rund fünf Minuten vor Abfahrt vom Fahrer in Betrieb genommen. Der Bus wird vor Einsatzbeginn nicht vorgeheizt.

In der Werkstatt werden alle planmäßigen Instandhaltungsarbeiten durchgeführt, mit Ausnahme

- von Reparaturen, die nur vom Hersteller bestimmter Einzelkomponenten durchgeführt werden können und
- von größeren Schäden an der Karosserie, am Getriebe, am Motor und den Achsen.

Der Betrieb mit Hobussen erfordert zahlreiche Anpassungen in den Busdepots und Werkstätten. Die Nachladeinfrastruktur und zusätzliche Werkstattausrüstung müssen neu beschafft und die betrieblichen Abläufe sinnvoll geregelt werden. Außerdem müssen die Beschäftigten für das Arbeiten mit Elektrosystemen und deren Gefahren qualifiziert werden.

### 4.5.2 Nachladekonzept für den Betriebshof Spandau

Die grundlegenden Möglichkeiten wurden in Kapitel 3.4.7.2 dargestellt. Für die Umsetzung im Betriebshof Spandau wird empfohlen, eine steckerbasierte Lösung in Betracht zu ziehen. Dies bedeutet den Aufbau von bis zu 18 Anschlussstellen auf der Abstellfläche (siehe Tabelle 6-2) sowie ein Leitungsnetz zu deren Energieversorgung. Die Ladegeräte sind im Elektrant zu integrieren, der Steckeranschluss vom Elektrant zum Bus arbeitet mit Gleichstrom.

Die Anschlüsse sollen für Schnellladung konzipiert werden. Ein Lademanagementsystem für alle Fahrzeuge des Hofes kann jedoch dazu genutzt werden, individuell die Ladezeit bei geringerer Ladeleistung zu verlängern, falls genug Zeit zur Verfügung steht.

### 4.5.3 Flächenbedarf

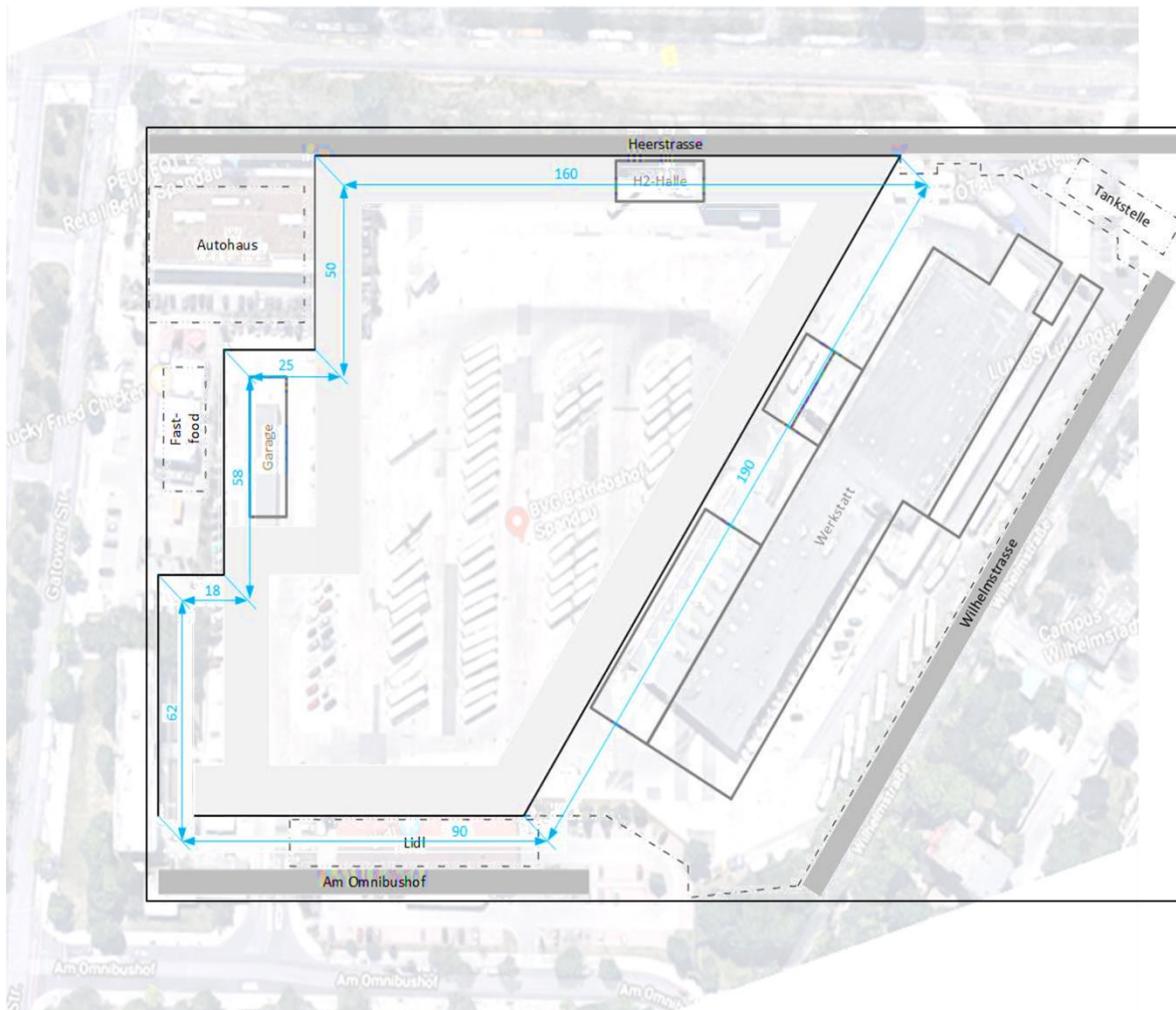


Abbildung 4-26: Ermittlung der Abmessungen des Betriebshof Berlin Spandau

In Abbildung 4-27 ist die sich aus Abbildung 4-26 ergebende vereinfachte Form des Betriebshof Berlin Spandau dargestellt. Auf der Freifläche (ca. 13750 m<sup>2</sup>) zwischen

- Service- und Werkstatthalle,
- der ehemaligen Werkstatt für H<sub>2</sub>-Busse
- und einer Garage

können ca. 225 konventionelle Dieselfahrzeuge abgestellt werden. Derzeit werden die Plätze zur Abstellung von 135 Gelenkfahrzeugen, 34 Doppeldeckern und 40 Solobussen genutzt [99].

Die dargestellte umlaufende Fahrspur (grau) wurde mit 15 m Breite angenommen, so dass die sich ergebenden Kurvenradien der in Abbildung 4-28 dargestellten Schleppkurve genügen.



Abbildung 4-27: Betriebshof Spandau, vereinfachte Darstellung

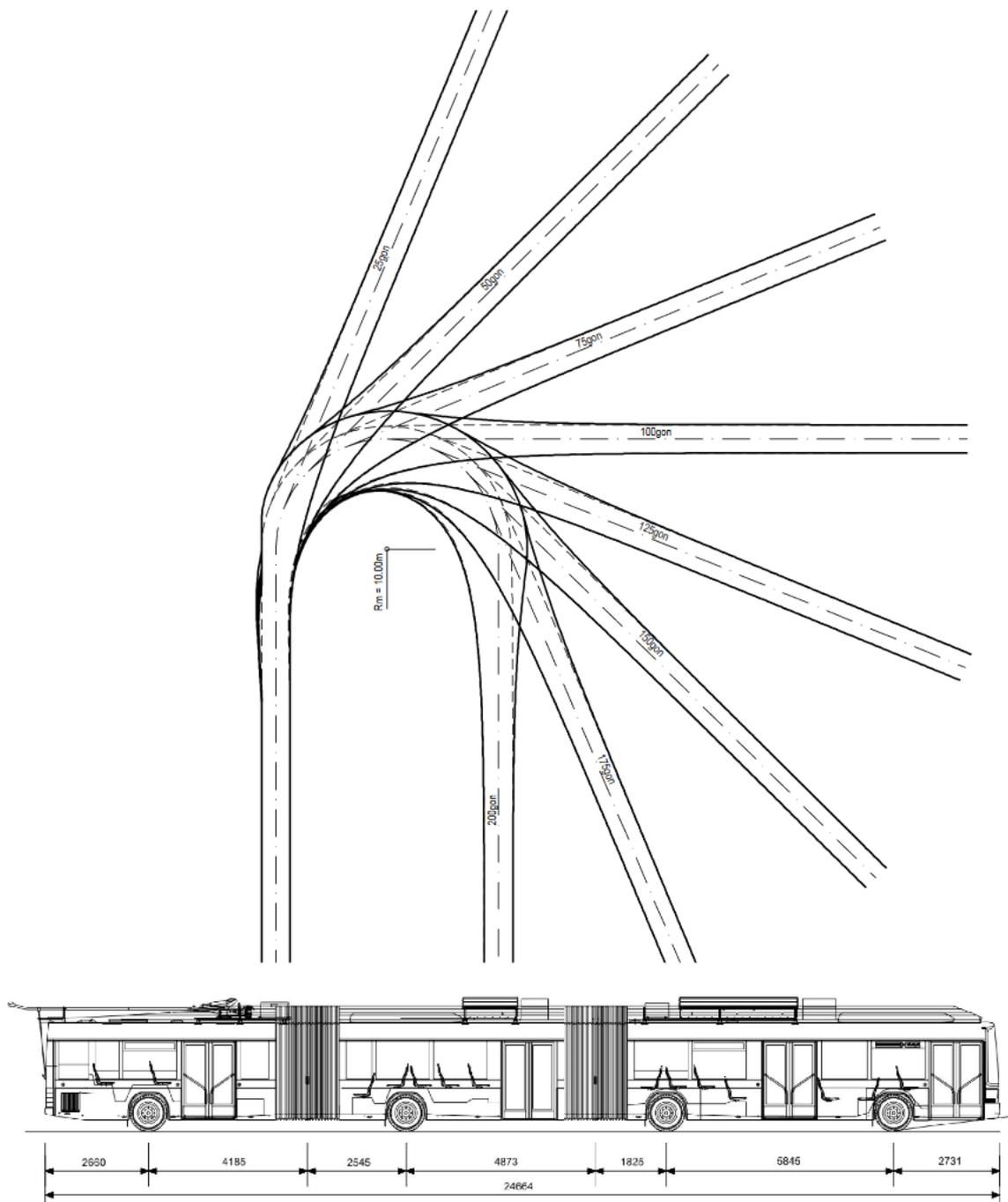


Abbildung 4-28: Schleppkurve Doppelgelenkbuss (Länge: 24,70m) im Maßstab 1:500, nach [101]

Einige an den Betriebshof Spandau angrenzende Flächen gehören der BVG und sind verpachtet. Langfristig könnten sie für den Eigenbedarf angemeldet werden, falls eine größere Abstellfläche gebraucht wird.

In Abbildung 4-27 und Abbildung 4-29 sind die an den Betriebshof angrenzenden Flächen nur skizziert. Die realen Flächenverhältnisse des angrenzenden Supermarkts gehen daraus

nicht hervor. Tatsächlich ergibt sich entsprechend Abbildung 4-30 durch Rückholung der derzeit verpachteten Fläche ca. 5.680 m<sup>2</sup> zusätzliche Fläche.

Nicht nur die Abstellflächen, auch die Gebäudefläche wird voraussichtlich erhöht werden müssen [100]:

- Erhöhung der Zahl der Durchfahrtsgruben,
- Erhöhung der Zahl der Dacharbeitsstände,
- Einrichtung eines Prüf- und Testbereichs mit Spannungsanschluss,
- Erhöhung Lagerkapazität für Ersatzteile und Werkzeuge (extensiv in der Übergangszeit, in der Diesel- und Elektrobusse nebeneinander verwendet werden)
- Einrichtung einer Gleichspannungsenergieversorgung für Prüfstrecke und Prüfstände.

Auch dafür können aktuell verpachtete Flächen genutzt werden. Zudem besteht die Möglichkeit, bestehende Infrastrukturanlagen anderweitig zu nutzen. Zum Beispiel kann die einstige Werkstatt für Wasserstoff-Fahrzeuge zu einer Prüfhalle für Hochspannungskomponenten bzw. der Traktionsanlage von Hobussen umgebaut werden.

Der erhöhte Flächenbedarf des Abstellbereichs ergibt sich durch folgende Effekte:

- Nachladeeinrichtungen erfordern einen vergrößerten Abstand der Abstellgassen,
- Die von der BVG teilweise beabsichtigte Verlegung der Innenraumreinigung aus der Servicehalle auf die Abstellfläche verlangt Zugänge auch zu den im Inneren der Fläche abgestellten Fahrzeugen.
- Doppelgelenkbusse sind weniger manövrierfähig und sind in Parallelabstellung schlechter kombinierbar (ggf. am Reihende verschenkter Platz, wenn kein ganzer Bus mehr auf die Restlänge passt).

Die BVG empfiehlt auf der Abstellfläche folgende Mindestabstände [100]:

- quer 1,0m,
- längs 0,8m.

Das ist notwendig, da perspektivisch auch Fahrzeug-Innenraum-Reinigungsarbeiten auf der Abstellfläche durchgeführt werden sollen und dafür zusätzliche Fläche für den Zugang des Reinigungspersonals vorgehalten werden muss. Ein erweiterter Abstand ergibt sich durch die Aufstellung von Elektranten zur Nachladung über Kabel und Stecker.

Hersteller von Ladestationen liefern schnellladefähige DC-Ladesäulen mit CSS-2.0-Steckern. Typische Abmessungen sind ca. 1.900 mm x 850 mm x 450 mm (HxBxT, u.a. [102]). Einschließlich der bereitzuhaltenden Durchgangsabstände ergeben sich freizuhaltenen seitliche Abstände von etwa 2,50 m zwischen den abgestellten Bussen bei mittig angeordneten, zweiseitig nutzbaren Ladesäulen (jeder zweite Durchgang).

Die Batterieladung erfolgt in allen Simulations-Szenarien primär im Fahrbetrieb unter Oberleitung. Die für den Betriebshof vorgesehenen Ladeeinrichtungen dienen vor allem der Absicherung des Betriebes für nicht unter Fahrleitung aufladbare Batterien (siehe Kapitel 3.4.7.2).

a) Simulations-Szenarien A und B

Für die Simulations-Szenarien A und B ergibt sich nach Tabelle 6-2 ein Fahrzeugbedarf von 102 Gelenkbussen (18 m lang) und 67 Doppelgelenkbussen (24 m lang). Zusätzlich sind 10% Reservefahrzeuge je Fahrzeugtyp berücksichtigt. Entsprechend Tabelle 6-2 müssen für die Szenarien A und B 18 Nachladeeinrichtungen (11 für Einfachgelenk- und 7 für Doppelgelenkbusse) vorgehalten werden.

Abbildung 4-29 zeigt, dass die momentan im Betriebshof Spandau zur Verfügung stehenden Abstellflächen nicht genügen, um den geplanten Fuhrpark der Szenarien A und B auf dem Betriebsgelände unterzubringen. Bei bestmöglicher Anordnung der Fahrzeuge in Parallelabstellung und unter Berücksichtigung oben erwähnter Abstände (einschließlich vergrößerter Gassen für die Ladestationen) können nur 99 Einfachgelenkbusse und 61 Doppelgelenkbusse beherbergt werden. Für die noch unterzubringenden

- 14 Einfachgelenkbusse und
- 13 Doppelgelenkbusse

werden zusätzlich etwa 2.000 m<sup>2</sup> Fläche benötigt. Dies ist nur ein Teil der oben erwähnten rückholbaren Fläche, so dass die Vergrößerung der Abstellfläche und auch ein Zuwachs an Gebäudefläche möglich sind.

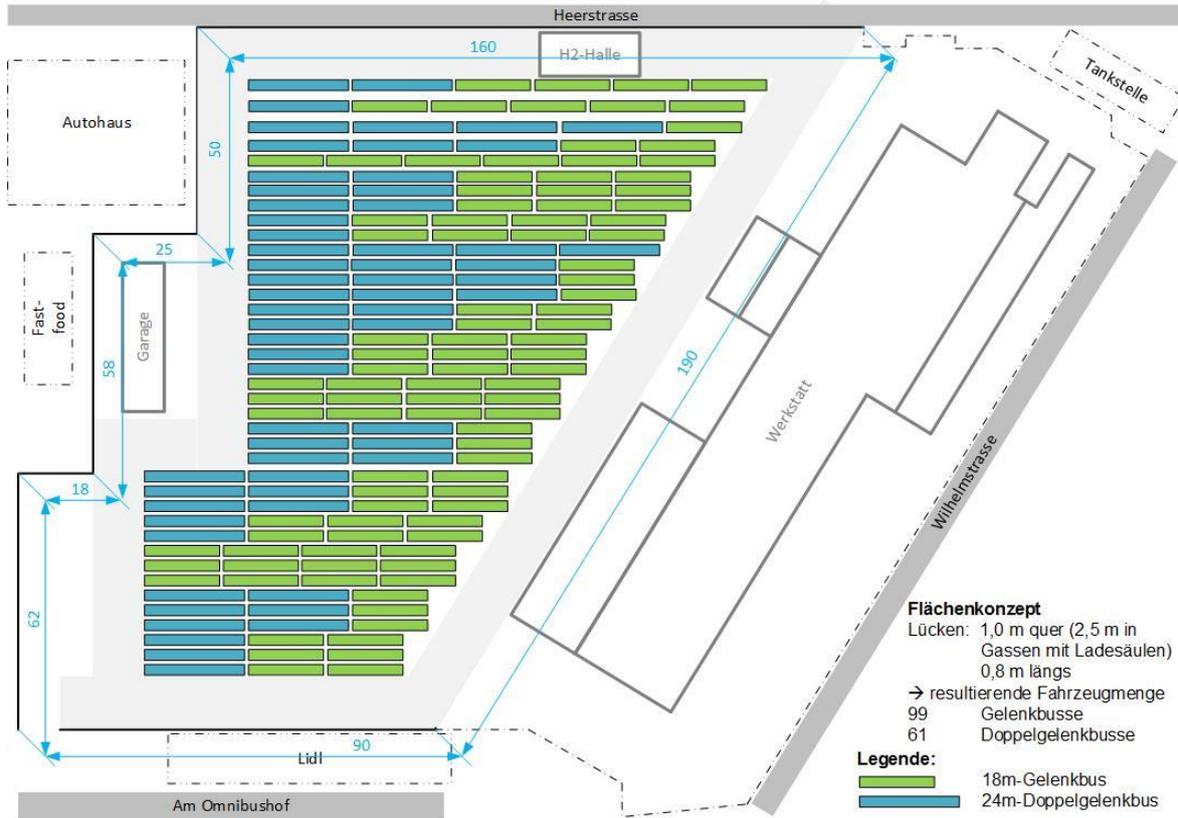


Abbildung 4-29: Parallelabstellung des geplanten Fuhrparks für die Simulations-Szenarien A und B

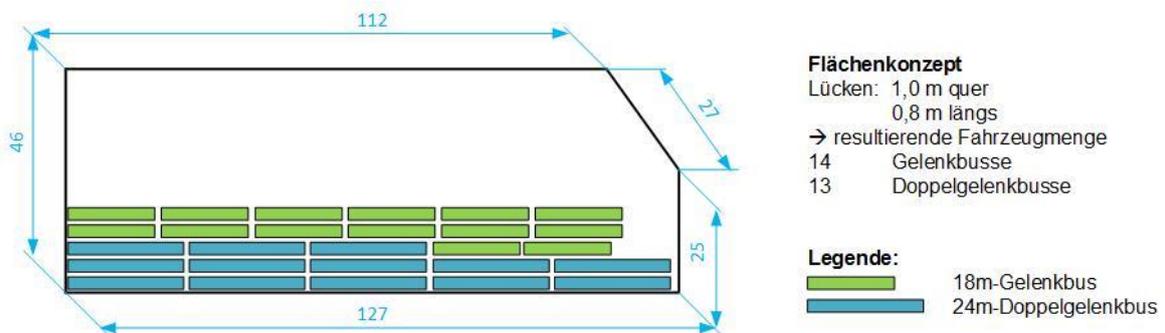


Abbildung 4-30: Parallelabstellung des restlichen Fuhrparks der Szenarien A und B auf dem angrenzenden Supermarktgelände (Abriss Gebäude)

#### b) Simulations-Szenarien C

Für das Szenario C ist im Unterschied zu A und B lediglich die Beschaffung von 14 Doppelgelenkbussen, bei ebenfalls 102 zu beschaffenden Einfachgelenkbussen, vorgesehen. Zusätzlich sind 10% Reservefahrzeuge je Fahrzeugtyp zu berücksichtigen. Entsprechend Tabelle 6-2 müssen für Szenario C 13 Ladestationen (11 für Einfachgelenk- und 2 für Doppelgelenkbusse) im Betriebshof Spandau vorgehalten werden.

Aus Abbildung 4-31 wird ersichtlich, dass es hinsichtlich der verfügbaren Abstellfläche für den im Simulations-Szenario C angenommenen Fuhrpark (deutlich verringerte Anzahl an Doppelgelenkbussen) keine Schwierigkeiten gibt. Bei nur 14 geplanten Doppelgelenkbussen ist es dann entweder möglich, (bis zu 38 Einfachgelenk-) Fahrzeuge anderer Linien im Betriebshof abzustellen oder/und die notwendigen Werkstatteerweiterungen ohne Generierung neuer Flächen durchzuführen.



Abbildung 4-31: Parallelabstellung des geplanten Fuhrparks für die Simulations-Szenario C

#### 4.5.4 E-Umstellung der Werkstatt

Die Diagnose, Instandhaltung und Wartung von Hobussen bzw. von Elektrobussen im Allgemeinen erfordert auch eine Anpassung der Werkstatteinfrastuktur. Dies gilt insbesondere für:

- Ladestationen,
- Dacharbeitsstände mit einer Krantraverse,
- Prüfplätze oder Prüfanlagen,
- Anpassung der Portalwaschanlage,
- Lager für die Batterien,
- Spezialwerkzeuge und

- Persönliche Schutzausrüstung.

Für den Betriebshof Spandau gilt es zudem, die Werkstatt durch geeignete Maßnahmen so einzurichten, dass der bisherige Betriebsablauf weitestgehend erhalten bleiben kann. Allerdings wird empfohlen, die Anzahl der auf Durchgang angelegten Grubenplätze deutlich zu erhöhen. Für die Doppelgelenkbusse ist dies zwingend erforderlich (einschließlich Bereitstellung der nötigen Grubenhöhe und Anhebeplätze). Aber auch die Instandhaltung von Einfachgelenkbussen wird einfacher durch Durchgangsräume. Kopfgruben (Grubenstände vor der Wand, bei denen zurück rangiert werden muss) sollten in der Regel nur für kurze Bustypen verwendet werden. Der so entstehende Mehrbedarf an Fläche kann voraussichtlich innerhalb der bestehenden Halle nicht realisiert werden, wodurch ggf. ein Anbau oder Neubau notwendig wird.

Werden Instandsetzungsarbeiten am HV-System des Fahrzeugs durchgeführt, benötigt das Werkstattpersonal entsprechende Arbeitsmittel und Werkstatthilfen. In Abhängigkeit der Einbaulage der HV-Komponenten ist ein Dacharbeitsstand erforderlich. Zusätzlich werden spezielle Messgeräte, isoliertes Werkzeug und persönliche Schutzausrüstung benötigt.

Prinzipiell besteht das Problem, dass die in einer Werkstatt bereitzuhaltende Ausrüstung immer auf die unterzubringenden Fahrzeuge abgestimmt sein muss (Spezialwerkzeuge). Die beschriebenen Maßnahmen zur Umgestaltung der Werkstatt sind notwendig, so dass in Zukunft auch Doppelgelenkbusse und Fahrzeuge mit HV-Ausrüstung repariert und gewartet werden können. Zusätzliche Anpassungen und Nachrüstungen für konkrete Bustypen müssen kurzfristig (in Abstimmung mit dem Fahrzeughersteller) erfolgen.

#### **4.5.5 Qualifizierung des Personals**

Für das Arbeiten an elektrischen Anlagen hat sich ein allgemeiner Sprachgebrauch etabliert und es existieren allgemein verbindliche Richtlinien. Die im Folgenden verwendeten Definitionen, ebenso wie die aufgeführten Handlungsempfehlungen sind dem Leitfaden „Elektromobilität – Arbeiten an Omnibussen mit Hochvolt-Systemen“ der Verwaltungs-Berufsgenossenschaft [73] entnommen. Darin wird umfassend und lehrbuchhaft auf benötigte Qualifikationen und die Systematik der Schulung der Beschäftigten von Verkehrsunternehmen des ÖPNV bei der Einführung von Omnibussen mit Hochvolt-Systemen eingegangen.

Um einen reibungslosen Betrieb und die Integration des Trolleybus-Systems in alle betrieblichen Abläufe zu realisieren müssen die Mitarbeiter der Bereiche

- Fahrbetrieb,
- Fahrzeuginstandhaltung,
- Instandhaltung der elektrischen Infrastruktur (einschließlich der Ladestationen),
- Leitstelle,
- Informationstechnik,
- Fahr- und Umlaufplanung und

- Ausbildungswerkstätten

zielgerichtet und in Abhängigkeit der geplanten Tätigkeiten auf den Umgang mit Hochvoltanlagen vorbereitet und weiter qualifiziert werden. Die Einführung von Bussen mit Hochvolt-Systemen (HV-Systeme) birgt zusätzliche Gefahren, durch

- HV-Komponenten bei Tätigkeiten am Fahrzeug,
- neue Werkstattinfrastruktur und
- Mängel in der Werkstattorganisation

und erfordert daher eine Anpassung der bestehenden Gefährdungsbeurteilung. Um das zu vermittelnde Wissen zu festigen und Unsicherheiten vorzubeugen müssen theoretische und praktische Schulungen wiederholt durchgeführt werden [72].

Hinsichtlich der Qualifikation der Mitarbeiter ist künftig zwischen elektrotechnischen Laien, elektrotechnisch unterwiesenen Personen (EuP) und Elektrofachkräften (EfK) zu unterscheiden.

Für das Fahr- und Reinigungspersonal sind nach [72] und [73] Sicherheitsunterweisungen hinsichtlich möglicher Gefahren bei unsachgemäßem Verhalten und für die Fahrer zusätzlich ein Fahrertraining durchzuführen – sie gelten dann als elektrotechnisch unterwiesene Personen für Reinigungstätigkeiten (HV-Bus-R) bzw. für Fahrtätigkeiten (HV-Bus-F).

Ebenso müssen Beschäftigte, die Servicearbeiten und mechanische Instandsetzungsarbeiten durchführen und nicht direkt mit dem HV-System arbeiten, durch Unterweisung zu EuP qualifiziert werden (HV-Bus-EuP).

Mitarbeiter der Instandsetzung, welche eigenständig an HV-Anlagen arbeiten, müssen zu Elektrofachkräften für Arbeiten an Bussen mit HV-Systemen aus- bzw. weitergebildet werden. Die Dauer hängt dabei von bereits erworbenen, beruflichen Qualifikationen und den durchzuführenden Tätigkeiten (arbeiten im spannungsfreien Zustand oder arbeiten unter Spannung) ab [73].

Elektrofachkraft (EfK) gilt per Definition nicht als Berufsbezeichnung. Der Begriff zeigt nur an, dass die betreffende Person das Vermögen und die Fertigkeiten besitzt, elektrotechnische Arbeiten in einem bestimmten Bereich der Elektrotechnik eigenverantwortlich und selbständig durchzuführen. Grundsätzlich gibt es für alle Bereiche der Elektrotechnik Elektrofachkräfte. Jedoch sind Elektrofachkräfte bestimmter anderer Bereiche nicht automatisch Elektrofachkräfte für HV-Systeme in Fahrzeugen. Die fachliche Qualifikation als Elektrofachkraft wird nach DGUV Information 203-011 und DGUV Vorschrift 3 „Elektrische Anlagen und Betriebsmittel“ durch den Abschluss einer Berufsausbildung dokumentiert.

Für Arbeiten an Bussen mit HV-Systemen sind die in Abbildung 4-32 dargestellten Qualifikationsstufen erforderlich.

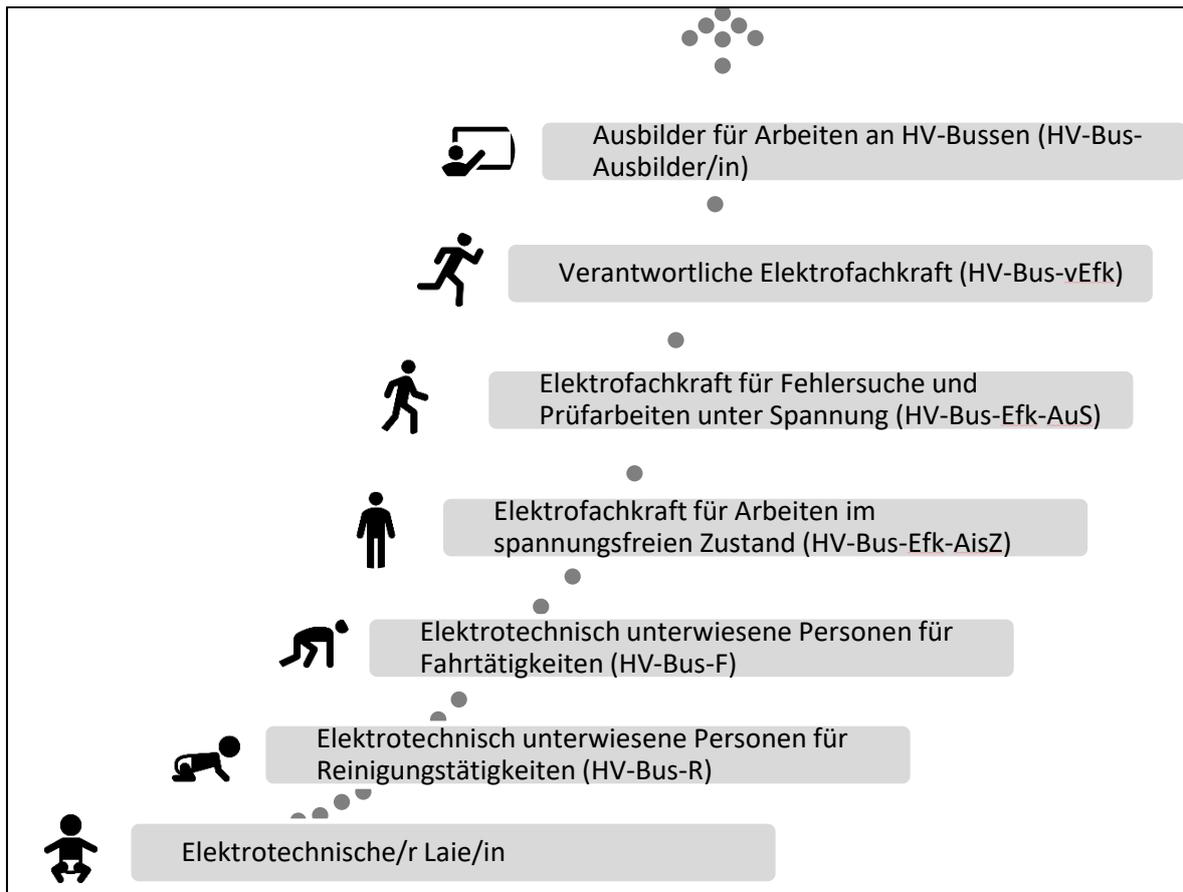


Abbildung 4-32: Qualifizierung für Arbeiten mit HV-Bussen (eigene Darstellung nach [73])

Zusätzlich müssen die verantwortlichen Ersthelfer und Ersthelferinnen im Betrieb für den Umgang mit Stromunfällen entsprechend den Ausführungen im Heft der BG ETE „Erste Hilfe mit Sonderteil Stromunfälle“ weitergebildet werden.

#### 4.5.6 Abschleppkonzept

Wie auch bei konventionellen Bussen besteht bei Hobussen das Risiko, dass von Zeit zu Zeit Fahrzeuge abzuschleppen sind, z.B. von der Strecke zum Betriebshof. Neben der Beschaffung von Abschlepptechnik kommt es vor allem darauf an, den Lieferanten der Busse auf einen effizienten Abschleppmodus zu verpflichten. Aufwendige Arbeiten auf der Straße, um einen liegengebliebenen Bus schlepptauglich zu machen, müssen vermieden werden.

## 5 Einführung des Systems

Zur Festlegung einer ersten umzusetzenden Hobus-Strecke wurde die Linie M32 von der BVG und der Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz als geeignete erste Linie ausgewählt. Die Linie M32 bietet sich aus den folgenden Gründen als Pilotlinie an:

- Die Linie M32 ist eine stark nachgefragte Linie mit hohem Fahrgastaufkommen. Sie wird heute mit Gelenkbussen in dichter Taktfolge bedient.
- Für die Linie werden weitere Fahrgaststeigerungen erwartet, sodass sie ab 2030 mit Doppelgelenkbussen bedient werden soll.
- Die Linie M32 eignet sich außerdem, weil es eine Linie mit einer Stammstrecke und verschiedenen Ästen ist.
- Die M32 ist gemäß aktuellem Nahverkehrsplan nicht von Straßenbahnplanungen betroffen.
- Für die mit Oberleitung auszurüstenden Streckenabschnitte sind keine relevanten Störungen des Stadtbildes zu erwarten.
- Die Entfernung zum Betriebshof ist gering.

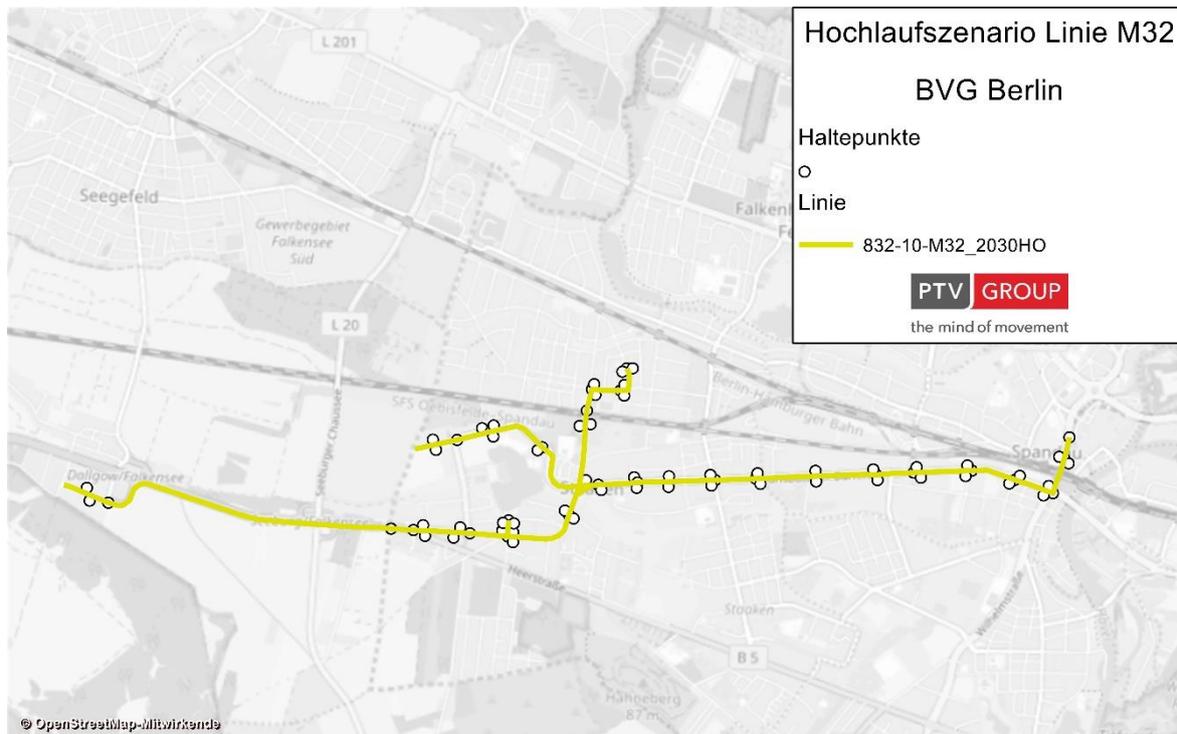


Abbildung 5-1: Linienvverlauf der Linie M32

Die Linie M32 verkehrt, wie in Abbildung 5-1 dargestellt, von der Haltestelle S+U Rathaus Spandau zu der Haltestelle Staaken, Heidebergplan sowie zu den weiteren drei Endhaltestellen Staaken, Brunsbütteler Damm/Stadtgrenze, Staaken, Schulstraße und Dallgow-Döberitz, Havelpark. Zur Bedienung der Linie M32 wird im Istzustand ein Diesel-Gelenkbus eingesetzt. Für den Einsatz eines Hybridoberleitungsbusses wird ein Doppelgelenkbus unterstellt. Es wird empfohlen, sowohl Gelenk- als auch Doppelgelenkfahrzeuge einzusetzen, um erste Betriebserfahrungen mit beiden Fahrzeugtypen zu sammeln.

Bei dem Einsatz von Doppelgelenkfahrzeugen sind, entsprechend der Lenkeigenschaften (Schleppkurve) der Fahrzeuge, im Linienverlauf bauliche und verkehrstechnische Anpassungen erforderlich. Beispielsweise müssen einige Endstellen erweitert und befestigt, Haltestellen verändert oder Lichtsignalanlagen angepasst werden.

Für den Betrieb der Linie M32 ergeben sich die betrieblichen Kennzahlen wie in Tabelle 5-1 dargestellt.

Tabelle 5-1: Fahrzeugbedarf und betriebliche Kenngrößen der Linie M32

Linie	Anzahl der Fahrzeuge	Anzahl Fahrten pro Werktag	Fahrplankilometer pro Tag	Fahrplankilometer pro Jahr
M32	14	494	3.461	1.263.173

Von der Linie M32 werden ca. 11,1 Doppel-km und 2,5 Einzel-km des Gesamtnetzes befahren, was eine gesamte Netzlänge von 24,7 km ergibt. Für diese Linie wird eine Länge von ca. 13,7 km mit Oberleitung ausgerüstet. Dies entspricht einem Fahrleitungsanteil von ca. 56 %.

Bezüglich der Ausstattung (Fahrleitungen mit Masten und Eindrahteinrichtungen, Unterwerke mit Speise- und Rückleiterkabeln sowie Masttrennschaltern und Nachladepunkte als kurze Abschnitte mit Oberleitung) wurde von Szenario B oder C als Endzustand ausgegangen. Für die Linie M32 ist lediglich die Ausstattung eines Unterwerks verschieden. Benötigt werden die Unterwerke 09 Brunsbüttler Damm (Ruhlebener Str.), 55 Zeppelinstr. (Seegfelder Str.) sowie die Unterwerke 40 Brunsbüttler Damm (Nennhauser Damm), 57 Finkenkruger Weg, 60 Heerstr. (Nennhauser Damm) und 28 Dallgow-Döberitz Havelpark. Die ermittelten Mengen je Szenario sind in Tabelle 6-3 und Tabelle 5-3 enthalten. Alle Mengen stellen eine Teilmenge des gesamten Mengengerüsts für das jeweilige Szenario dar.

Tabelle 5-2: Fahrleitungslängen, Anzahl Maste und Fundamente für das HochlaufszENARIO (Endzustand Szenario B oder Szenario C)

Parameter	Szenario B und Szenario C reduziertes Netz
Linienetzlänge	24,7 km
Einspurig (2-dräftig)	1,1 km
Zweispurig (4- und mehrdräftig)	6,3 km
<b>Gesamtfahrleitungslänge (Einzel-km)</b>	<b>13,7 km</b>
<b>Anzahl Maste</b>	<b>450</b>
<b>Anzahl Fundamente</b>	<b>450</b>

Parameter	Szenario B und Szenario C reduziertes Netz
Fahrleitungstrenner	6
Eindrahteinrichtungen	7

Tabelle 5-3: Anzahl Unterwerke, Ladeeinrichtungen, Schalter und Kabellängen für das HochlaufszENARIO (Endzustand Szenario B oder Szenario C)

Unterwerkstyp	Szenario B	Szenario C reduziertes Netz
1 Gleichrichter (500 A), 1 Transformator 500 kVA	2	2
1 Gleichrichter (750 A), 1 Transformator 750 kVA	1	1
1 Gleichrichter (1.000 A), 1 Transformator 1.000 kVA	2	2
1 Gleichrichter (1.500 A), 1 Transformator 1.500 kVA	1	2
2 Gleichrichter (je 1.000 A), 2 Transformatoren je 1000 kVA	1	-
<b>Unterwerksanzahl gesamt</b>	<b>7</b>	<b>7</b>
<b>Grundstücksfläche gesamt</b>	<b>350 m<sup>2</sup></b>	<b>350 m<sup>2</sup></b>
<b>Länge Einspeisekabel (Guw-FL) gesamt</b>	9.800 m	9.800 m
<b>Anzahl Leistungsschalter</b>	14	14
<b>Anzahl Masttrennschalter</b>	14	14
<b>Ladeeinrichtungen Endhaltestellen</b>	1	1
<b>Ladeeinrichtungen im Depot</b>	2	2

Durch die zu errichtende elektrische Infrastruktur insbesondere:

- die Fahrleitungsanlagen inkl. Stützpunkten und Kettenwerk
- die Energieversorgungsanlagen (Gleichrichter-Unterwerke, Erdkabeltrassen, Freileitungen, Netzanschlüsse im Mittelspannungsnetz)

ist davon auszugehen, dass für die Realisierung des Projektes ein Planfeststellungsverfahren eingeleitet werden muss. Die Grundlage dafür legt § 41 (bzw. § 28) des Personenbeförderungsgesetzes. Derzeit wird von einem Planfeststellungsverfahren ausgegangen, da insbesondere zwei der Ausschlusskriterien für die Planfeststellung:

- Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung ist nicht notwendig
- Rechte Anderer werden nicht oder nicht wesentlich beeinträchtigt oder die Betroffenen haben sich mit der Inanspruchnahme ihres Eigentums oder eines anderen Rechts schriftlich einverstanden erklärt

als nicht realisierbar eingeschätzt werden.

Als Vorbereitung für die Planfeststellung müssen im Rahmen der nachfolgenden Planungsschritte (Entwurfs- und Genehmigungsplanung) die Eingriffe in Betroffenheiten Dritter identifiziert und geklärt werden.

Bevor ein Planfeststellungsverfahren beginnen kann, müssen die Planungsunterlagen erarbeitet werden. Dies beinhaltet die Entwurfsplanung (Phase III HOAI) und darauf aufbauend die Genehmigungsplanung (Phase IV HOAI). Weiterhin müssen diese Planungsunterlagen zusammengestellt und die Betroffenheiten Dritter bzgl. des Straßenraums (Gestaltung, Fahrspuren, Schildersicht, LSA, Überwege, etc.) und der Fußwege, Hochbauten, aber auch Entwässerungsanlagen und Rohrleitungen dargestellt werden. Die Auswirkungen auf angrenzende Naturräume, aber auch die Elektrosicherheit und die Elektromagnetische Verträglichkeit sind ebenfalls Gegenstand dieser Darstellung. Schließlich wird die Genehmigungsplanung durch das zuständige Amt geprüft und zur Planfeststellung freigegeben.

Das Planfeststellungsverfahren selbst beginnt mit der Festlegung, welche Behörde für das Verfahren zuständig ist. Dies können z. B. das Innenministerium, ein Regierungspräsidium oder eine Landesbehörde, aber auch eine regionale Straßenbauverwaltung sein. Gleichfalls wird eine Anhörungsbehörde festgelegt.

Auf Antrag wird das eigentliche Planfeststellungsverfahren eingeleitet. Die im Vorfeld erarbeitete Genehmigungsplanung wird innerhalb dieses Verfahrens öffentlich bekanntgegeben und ausgelegt. Einwendungen können nach Verwaltungsverfahrensgesetz §73 Abs. 4 während der Auslegung und bis zu zwei Wochen danach eingereicht werden. Die Planungsunterlagen werden auch an die betroffenen Träger öffentlicher Belange und weiterer Interessengruppen versendet. Träger öffentlicher Belange / Interessengruppen sind z. B. Polizei, Feuerwehr, Rettungsdienste und weitere Behörden, aber auch Verkehrs- und Verkehrsinfrastrukturunternehmen sowie Energieversorger, Telekommunikationsnetzbetreiber, die Betreiber von Rohr- und Kabelnetzen, Bürger, Anwohner, Grundstückseigentümer und Interessenverbände.

Im weiteren Verlauf des Verfahrens finden Anhörungs- und Erörterungstermine bezogen auf die vorgelegten Planungsunterlagen statt. Diese werden durch die Anhörungsbehörde

protokolliert und die Protokolle dieser Termine gehen anschließend an die Planfeststellungsbehörde. Letztere erstellt unter Abwägung der geäußerten Betroffenheiten und der jeweiligen Rechtslage einen Planfeststellungsbeschluss. Der Beschluss ist Grundlage für die Erteilung des Baurechts. Er kann von Betroffenen beklagt werden, was eine aufschiebende Wirkung haben kann.

Der Ablauf der Anhörung ist exemplarisch in Abbildung 5-2 dargestellt und enthält auch exemplarisch geschätzte Zeitangaben der einzelnen Schritte. Die genannten Zeitangaben sind von vielen Faktoren abhängig und können weitreichenden Änderungen unterliegen,

z. B. bei besonders komplexen, schwierigen Baumaßnahmen oder wenn während der Anhörung neue Erkenntnisse auftreten, die z. B. eine Planänderung bzw. Planergänzung erforderlich machen.

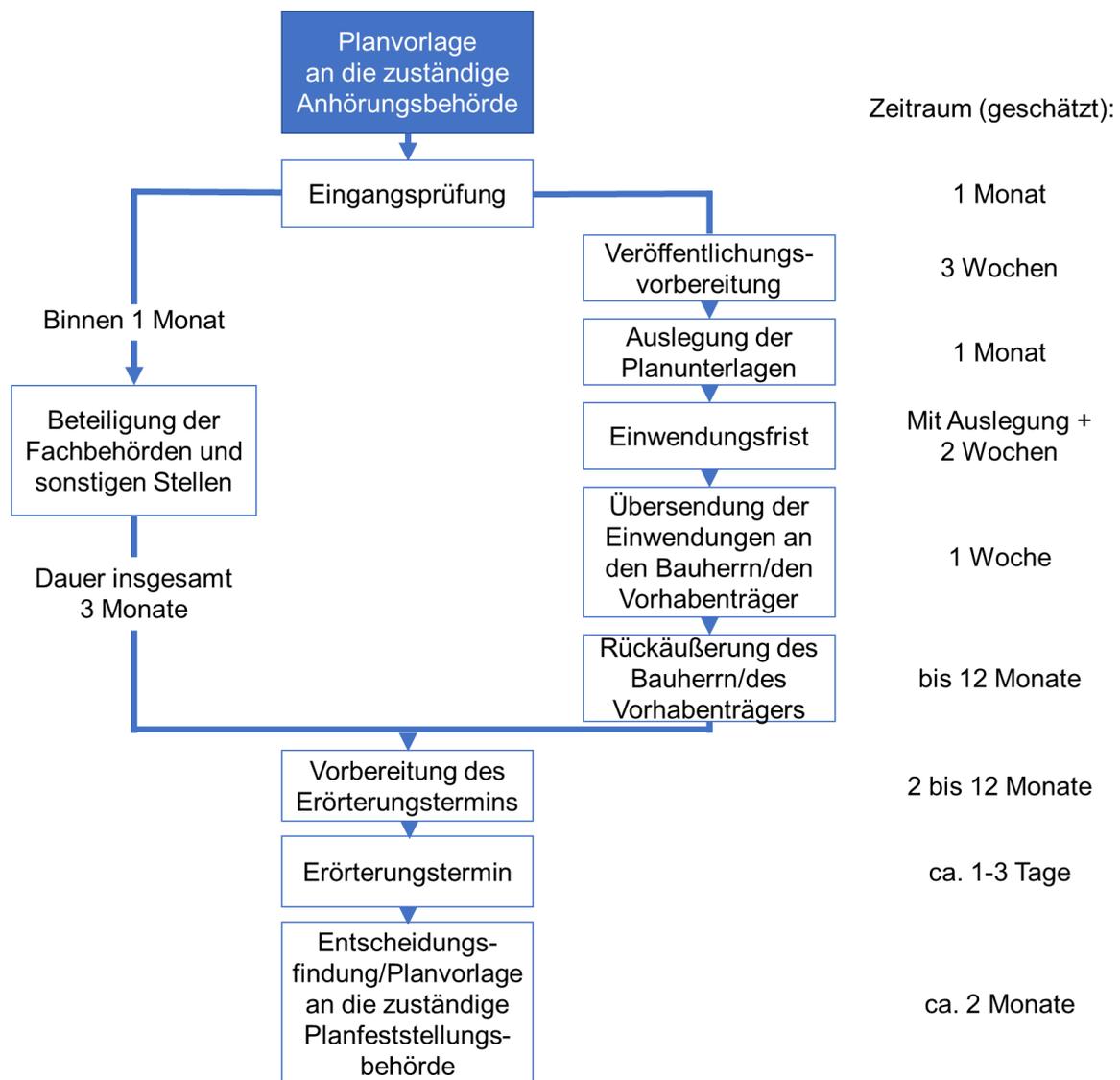


Abbildung 5-2: Schematische Darstellung des Anhörungsablaufs

## 6 Wirtschaftlichkeit

### 6.1 Technische Mengengerüste

#### 6.1.1 Flottengröße

Basierend auf den vorgegebenen Betriebskonzepten wurden für die drei untersuchten Szenarien die erforderlichen Busflottengrößen ermittelt. Zur Sicherstellung des Umlaufbetriebes werden im Szenario A insgesamt 169 Busse benötigt. Im Szenario B ist die erforderliche Busflotte im Vergleich zu Szenario A unverändert.

Im Szenario C entfallen in der vorliegenden Untersuchung gegenüber den Szenarien A und B die Linien 136, 137, 236, M37 und X36. Damit umfasst die Busflotte des Szenarios C insgesamt 116 Fahrzeuge.

Die linienspezifische Busanzahl ist für alle untersuchten Szenarien in Tabelle 6-1 dargestellt. Für die Nachtlinie N34 werden drei Busse benötigt. Diese werden aus den Flotten der anderen Linien bereitgestellt.

Tabelle 6-1: Linienspezifische Busflotte, Szenarien A, B und C

Linie	Anzahl Busse Szenarien A und B	Anzahl Busse Szenario C reduziertes Netz
130	8	8
134	13	13
136	10	-
137	11	-
236	9	-
237	8	8
M32	14	14
M37	17	-
M45	24	24
M49	13	13
X33	14	14
X34	13	13
X36	6	-

Linie	Anzahl Busse Szenarien A und B	Anzahl Busse Szenario C reduziertes Netz
X49	9	9
<b>Summe</b>	<b>169</b>	<b>116</b>

Die Linien 136, 137, 236, M32, M37 und X36 werden im Gegensatz zu den übrigen mit Gelenkbussen betriebenen Linien mit Doppelgelenkbussen bedient. Die gesamte Busflotte der Szenarien A und B von 169 Fahrzeugen für den Umlaufbetrieb unterteilt sich damit in 102 Gelenkbusse und 67 Doppelgelenkbusse. Im Szenario C entfallen gegenüber den Szenarien A und B nur Linien, die mit Doppelgelenkbussen bedient werden. Damit ist die Anzahl der erforderlichen Gelenkbusse gegenüber den Szenarien A und B mit 102 Fahrzeugen unverändert. Die Flotte der erforderlichen Doppelgelenkbusse sinkt auf 14 Fahrzeuge.

Für erforderliche Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen und zur Sicherstellung des geplanten Umlaufbetriebes auch im Fall von Busstörungen müssen Reservebusse beschafft werden. Die Anzahl von Reservefahrzeugen wurde in der vorliegenden Untersuchung mit 10% der für den ungestörten Betriebsumlauf erforderlichen Busflotte angesetzt. Somit sind für die Szenarien A und B 11 Gelenkbusse und 7 Doppelgelenkbusse und im Szenario C 11 Gelenkbusse und 2 Doppelgelenkbusse als Reserve erforderlich.

In Tabelle 6-2 sind für die untersuchten Szenarien die erforderlichen Busflotten zusammengestellt.

Tabelle 6-2: Gesamtbusflotten der Szenarien A, B und C

Busflotte	Szenario A	Szenario B	Szenario C reduziertes Netz
Flotte für Umlauf GB / DGB	102 / 67	102 / 67	102 / 14
Reserve GB / DGB	11 / 7	11 / 7	11 / 2
<b>Gesamtflotte</b>	<b>187</b>	<b>187</b>	<b>129</b>

## 6.1.2 Anlagen- und Mengengrüste Infrastruktur

### 6.1.2.1 Fahrleitung

Im Szenario A als Basisszenario bezüglich des Elektrifizierungsgrades wurden lediglich Kreuzungen zur Vermeidung von Fahrleitungsweichen sowie optisch / architektonisch sensible Bereiche von der Fahrleitungsüberspannung ausgenommen. Von dem betrachteten

Liniennetz mit insgesamt ca. 235 km wurden etwa 197 km mit einer Trolleybusfahrleitung versehen. Davon sind 7,0 km einspurig (2-dräftige Fahrleitung) und 95,0 km zweispurig (4- und mehrdräftige Fahrleitung) ausgeführt.

Im optimierten Szenario B mit dem Ziel einer Reduzierung der Fahrleitungslänge und längeren Abschnitten mit Energiebezug aus den Fahrzeugbatterien bei gleicher Gesamtliniennetzlänge von 235 km verringert sich die Gesamtfahrleitungslänge auf 147,6 km, davon sind 3,5 km einspurig (2-dräftige Fahrleitung) und 72,05 km zweispurig (4- und mehrdräftige Fahrleitung) ausgeführt.

Im Szenario C reduziert sich mit dem Entfall bestimmter Linien das betrachtete Liniennetz, welches mit Hobussen bedient wird, auf 200 km. Bei einer Optimierung von Fahrleitungslänge und erforderlicher Batteriekapazität analog zur Variante B ergibt sich für Szenario C eine Gesamtfahrleitungslänge von 109 km. Davon sind 3,5 km einspurig (2-dräftige Fahrleitung) und 52,7 km zweispurig (4- und mehrdräftige Fahrleitung) ausgeführt.

In Tabelle 6-3 sind die Fahrleitungslängen, die Anzahl der Maste, Fundamente, Fahrleitungstrenner und Eindrahteinrichtungen für die untersuchten Szenarien zusammengestellt. Der durchschnittliche Mastabstand beträgt bei allen Szenarien 31,5 m. Fahrleitungsquerverbinder wurden alle 100 m mit jeweils 5x 120 mm<sup>2</sup> Cu berücksichtigt. Um den Netzcharakter der Fahrleitungsanlage zu erhalten, wurden zwischen einzelnen Oberleitungsabschnitten unterirdische Kabelverbindungen (120 bzw. 240 mm<sup>2</sup> Cu) vorgesehen.

Tabelle 6-3: Fahrleitungslängen, Anzahl Maste und Fundamente

Parameter	Szenario A	Szenario B	Szenario C reduziertes Netz
Liniennetzlänge	235 km	235 km	200 km
Einspurig (2-dräftig)	7,0 km	3,5 km	3,5 km
Zweispurig (4- und mehrdräftig)	95,0 km	72,05 km	52,7 km
<b>Gesamtfahrleitungslänge (Einzel-km)</b>	<b>197,0 km</b>	<b>147,6 km</b>	<b>108,9 km</b>
<b>Anzahl Maste</b>	<b>6.270</b>	<b>4.700</b>	<b>3.480</b>
<b>Anzahl Fundamente</b>	<b>6.270</b>	<b>4.700</b>	<b>3.480</b>
<b>Fahrleitungstrenner</b>	<b>111</b>	<b>65</b>	<b>55</b>
<b>Eindrahteinrichtungen</b>	<b>121</b>	<b>97</b>	<b>84</b>

### 6.1.2.2 Energieversorgung

In Abhängigkeit der örtlichen Leistungsanforderungen wird die Fahrleitung von Gleichrichter-Unterwerken verschiedener Leistungsklassen gespeist. Basierend auf den Simulationsergebnissen wurden verschiedene Unterwerkstypen mit Transformatoren von jeweils 500 kVA, 750 kVA, 1.000 kVA und 1.500 kVA festgelegt. Für die untersuchten Szenarien ist in Tabelle 6-4 die erforderliche Unterwerksanzahl mit den entsprechenden Gleichrichtern und Transformatoren dargestellt.

Jedes Gleichrichter-Unterwerk ist an das Mittelspannungsnetz des örtlichen Energieversorgers anzubinden. Die dafür notwendigen Komponenten und deren Kosten sind in der vorliegenden Untersuchung pauschal berücksichtigt, Abschnitt 6.2.2.

Im Szenario A ist aufgrund der größten Gesamtfahrleitungslänge die höchste Anzahl an Unterwerken der untersuchten Szenarien erforderlich. In diesem Szenario sind neben den Gleichrichterunterwerken noch zwei zusätzliche Schaltstellenstandorte in den Bereichen Brunsbüttler Damm/Nennhauser Damm (BRNH) und Falkenseer Chaussee/Stadtrandstraße (FAST) erforderlich. Im Szenario C mit dem kürzesten Fahrleitungsnetz sind zwar nahezu gleichviel Unterwerksstandorte wie im Szenario B erforderlich. Die Mehrheit der Unterwerke im Szenario C weisen aber geringere Leistungen im Vergleich zum Szenario B auf.

Zur Ermittlung der für die Gleichrichterunterwerke erforderlichen Grundstücksflächen wurde bei allen Unterwerkstandorten von einer kompakten Containerbauweise der Anlagen ausgegangen. Pro Unterwerks- und zusätzlichem Schaltstellenstandort wurde eine Grundstücksfläche von 50 m<sup>2</sup> inklusive Zufahrt angesetzt. Die Unterwerksgesamtflächen der Szenarien sind in Tabelle 6-4 zusammengestellt.

Die Einspeisung von den Gleichrichterunterwerken in die Fahrleitung erfolgt über Kabelanlagen (Leiterquerschnitt 400 mm<sup>2</sup> Cu) und Leistungsschalter. Die erforderlichen Einzelkabelängen und die Anzahl von Schaltern sind in Tabelle 6-4 aufgelistet.

Zur Sicherstellung der erforderlichen Batterieladezustände auch an den nicht fahrleitungsüberspannten Linienenden sind einige Linienenden mit zusätzlichen Ladeeinrichtungen zum langsamen Befahren ausgestattet (Tabelle 6-4). Hierfür sind im Mengengerüst und bei der Kostenberechnung jeweils 25 m Fahrleitung, 5 Maste, 2 Eindrahteinrichtungen sowie Leistungs- und Masttrennschalter berücksichtigt. Zusätzliche stationäre Ladeeinrichtungen sind szenarioabhängig im Depot jeweils für die entsprechende Anzahl an Reservefahrzeugen vorgesehen (Tabelle 6-4).

Tabelle 6-4: Anzahl Unterwerke, Ladeeinrichtungen, Schalter und Kabellängen

<b>Unterwerkstyp</b>	<b>Szenario A</b>	<b>Szenario B</b>	<b>Szenario C reduziertes Netz</b>
1 Gleichrichter (500 A), 1 Transformator 500 kVA	23	17	28
1 Gleichrichter (750 A), 1 Transformator 750 kVA	16	10	10
1 Gleichrichter (1.000 A), 1 Transformator 1.000 kVA	11	14	4
1 Gleichrichter (1.500 A), 1 Transformator 1.500 kVA	2	4	2
2 Gleichrichter (je 1.000 A), 2 Transformatoren je 1000 kVA	1	1	-
<b>Unterwerksanzahl gesamt</b>	<b>53</b>	<b>46</b>	<b>44</b>
<b>Grundstücksfläche gesamt</b>	<b>2.750 m<sup>2</sup></b>	<b>2.300 m<sup>2</sup></b>	<b>2.200 m<sup>2</sup></b>
<b>Länge Einspeisekabel (Guw-FL) gesamt</b>	54.210 m	65.700 m	58.500 m
<b>Anzahl Leistungsschalter</b>	129	103	93
<b>Anzahl Masttrennschalter</b>	129	103	93
<b>Ladeeinrichtungen Endhaltestellen</b>	10	13	10
<b>Ladeeinrichtungen im Depot</b>	18	18	13

## 6.2 Einzelkostenwerte und Betriebskosten

### 6.2.1 Investitionen für Fahrzeuge

Erste Recherchen ergaben einen vergleichsweise breiten Investitionsrahmen von 300.000 bis 1.000.000 € für HO-Gelenkbusse [126] [16] [112]. Reale Daten von Fahrzeugbeschaffungen verringern diesen Rahmen auf 500.000 € bis 800.000 €. Für die vorliegende Studie wurde unter Berücksichtigung von signifikanten Skaleneffekten für das Hobus Netz in Berlin ein Wert von 760.000 € für einen Gelenkbus angesetzt (Tabelle 6-5). Für HO-Doppel-Gelenkbusse ergaben Recherchen eine Investitionsbandbreite von 1.000.000 bis 1.700.000 € [126] [117]. Unter Berücksichtigung von Erfahrungswerten [112] [113] und Skaleneffekten wurden in der vorliegenden Untersuchung Investitionen von 1.200.000 € pro Doppel-Gelenkbus angesetzt (Tabelle 6-5).

Recherchen zu Investitionskosten für Batterien lieferten ebenfalls große Spannen. Signifikante Unterschiede in den Investitionen ergaben sich hier vor allem zwischen Literaturangaben und den Erfahrungswerten [116] [112]. Genauere Recherchen ergaben, dass eine Batterie mit Kühlung und Managementsystem Investitionen von mindestens 800 €/kWh [121] erfordert. Erfahrungswerte zeigen jedoch, dass auch Werte von bis zu 1.200 €/kWh [16] möglich sind. Unter Berücksichtigung zukünftig sinkender Herstellerkosten, aber aufgrund rasant steigender Nachfrage und steigender Marktpreise wurde für die Berechnungen ein Wert von 1.000 €/kWh angesetzt (Tabelle 6-5).

Tabelle 6-5: Einzelkostenschätzung für Busse und Batterien

Investition	Kostenschätzung	Einheit
HO-Gelenkbus, ohne Batterien	760.000	€/Stk.
HO-Doppelgelenkbus, ohne Batterien	1.200.000	€/Stk.
Batterien	1.000	€/kWh

### 6.2.2 Investitionen der Infrastruktur

Die Investitionen in die Infrastruktur wurden auf Basis bisheriger Studien der Professur für Elektrische Bahnen und Expertengesprächen ermittelt, wobei als Richtwert für einen Kilometer Oberleitungsinfrastruktur 500.000 € angegeben wurden.

Grundsätzlich lässt sich die Infrastruktur in Komponenten der Fahrleitungsanlage und der Energieversorgung unterteilen. Die Fahrleitung besteht aus Komponenten wie den Fahrdrähten, Verstärkungsleitungen, Masten und deren Fundamenten. Zusätzlich umfasst sie unter anderem Fahrleitungsverbinder, Trenner und Eindrahteinrichtungen.

Zur Energieversorgung zählen Unterwerke, Mittelspannungsanschlüsse, Kabel, Einspeisungspunkte mit der jeweiligen Schalterausrüstung und Ladestationen im Depot und an den Endhaltestellen.

Im Rahmen der Recherche zu den erwartenden Investitionen wurde für die Infrastruktur eine Bandbreite erstellt, die analysiert und eingegrenzt wurde. So ergaben sich für eine 2-drähtige Fahrleitung Investitionen zwischen 85.000 und 150.000 €/km, für eine 4-drähtige Fahrleitung Werte zwischen 150.000 und 245.000 €/km und für eine 8-drähtige Fahrleitung Werte zwischen 280.000 und 380.000 €/km. Für Masten ergaben sich Investitionen zwischen 2.000 und 4.100 € pro Stück und 1.800 bis 3.000 € pro Fundament. Die Prüfung dieser Bandbreiten unter Berücksichtigung von Herstellerangaben ergab, dass sich die zu erwartenden Investitionen am unteren Rand der angegebenen Bandbreiten bewegen werden. Für die vorliegende Berechnung wurden Investitionen von 95.000 €/km für eine 2-drähtige Fahrleitung, 160.000 €/km für eine 4-drähtige Fahrleitung und 300.000 €/km für eine 8-drähtige Fahrleitung angesetzt (Tabelle 6-6). Für Masten wurden Stückkosten von 2.200 €, und für deren Fundamente 3.000 € festgelegt. Bei einem Mastabstand von 31,5m ergeben sich für die reine Oberleitung Investitionen von 266.000 €/km (2-drähtig), 491.000 €/km (4-drähtig) und 631.000 €/km (8-drähtig) [16] [124] [112] [120] [125].

Für die Querverbindung von Fahrleitungen wurden Investitionen von 850 €/Stk. Angesetzt. Für die Trenner, die einzelne Speiseabschnitte elektrisch voneinander trennen, wurden Investitionen von 5.000 €/Stk. Angesetzt. Hier wird von Diodentrennern ausgegangen, um bei Fahrten über die Trenner bei hohen Strömen Lichtbögen zu vermeiden, da diese die Trenner auf Dauer zerstören können. Für Eindrahteinrichtungen wurden in der vorliegenden Untersuchung Investitionen von 600 €/Stk. Angesetzt [16] [112] Tabelle 6-6.

Da der Bau von innerstädtischen Oberleitungsanlagen auch Bauarbeiten in der Nacht erfordert, wird auf die Gesamtinvestitionen der Anlage ein pauschaler Nachzuschlag von 22,5% aufgeschlagen [16].

Ein signifikanter Investitionsschwerpunkt bei der Energieversorgung des Hobusnetzes sind Gleichrichterunterwerke (GUW). Hier zeigen Recherchen, dass es sehr unterschiedliche Angaben zu den Investitionen gibt.

Für den Neubau eines Unterwerks wurden Investitionen von 600.000 €/MW veranschlagt, die sich aus Investitionen für Transformatoren, Gleichrichtern, Lasttrennschaltern, Streckenabgängen sowie Belüftung zusammensetzen [122] [120] [125]. Der Anschluss der GUWs an das Mittelspannungsnetz wird jeweils mit 10.000 €/Stk. Angesetzt [123]. Für die

Kabelverbindungen zwischen GUV und Einspeisepunkt an der Fahrleitung (Leiterquerschnitte von 400 mm<sup>2</sup> Cu) wurden Investitionen von 300 €/m veranschlagt. [123] [115] [114] [120]. Diese setzen sich aus den Investitionen für den Tiefbau im bebauten Gelände und den Materialkosten zusammen. Die Investitionen für die Fahrleitungseinspeisungen, Leistungsschalter (High-Speed circuit breakers) und Masttrennschalter wurden mit 61.000 €/Stk und 6.000 €/Stk. Berücksichtigt. [112] [16]. Der durchschnittliche Grunderwerbswert liegt gemäß [118] zwischen 1.100 und 1.200 €/m<sup>2</sup>. Dieser Wert wird maßgeblich durch Unterwerksstandorte am Bahnhof S+U Zoologischer Garten, Schlüterstraße und Kaiser-Friedrich-Straße (Kantstraße) beeinflusst (Tabelle 6-6).

Trotz weitgehender Energieversorgung der Busse über die Oberleitungsanlage wurden Ladevorrichtungen an bestimmten Endhaltestellen und im Depot berücksichtigt. An den betroffenen Endhaltestellen wurden jeweils 25 m Fahrdraht berücksichtigt, um den Bus dort mit maximal 80 A zu laden. Für diese Ladevorrichtungen wurden Investitionen von 90.600 €/Stk. Veranschlagt. Für eine Ladestation im Depot wurden 25.000 €/Stk. Angesetzt (Tabelle 6-6). Hier kann auf eine handelsübliche Ladestation zurückgegriffen werden. [112]

Planungskosten und Unvorhergesehenes wurden mit einem pauschalen Ansatz von 12% und 2% der Infrastrukturinvestitionen berücksichtigt (Tabelle 6-6).

Tabelle 6-6: Investitionsschätzung für Fahrleitung, Energieversorgung, Grunderwerb und Zusatzkosten

Kategorie	Komponenten	Kosten	Einheit
Fahrleitungsanlage	Fahrleitung 2-dr. Ri107,	95.000	€/km
	Fahrleitung 4-dr. Ri107,	160.000	€/km
	Fahrleitung 8-dr. Ri107,	300.000	€/km
	Masten	2.200	€/Stk.
	Fundamente	3.000	€/Stk.
<b>Zusätzliches Fahrleitungsmaterial</b>	FL-Querverbinder	850	€/Stk.
	Diodentrenner	5.000	€/Stk.
	Eindrahteinrichtung	600	€/Stk.
	120 mm <sup>2</sup> Cu-Verbindungskabel	150	€/m

Kategorie	Komponenten	Kosten	Einheit
	240 mm <sup>2</sup> Cu-Verbindungskabel	200	€/m
	Kabelverlegung unterhalb Straße	50	€/m
<b>Energieversorgung</b>	Gleichrichterunterwerke	600.000	€/MW
	Mittelspannungsanschlüsse	10.000	€/Stk.
	Kabel G UW-Einspeisung (400 mm <sup>2</sup> Cu)	300	€/m
	Lasttrennschalter (High-Speed Circuit Breaker)	61.000	€/Stk.
	Masttrennschalter	6.000	€/Stk.
<b>Ladeeinrichtungen</b>	Endhaltestelle	90.600	€/Stk.
	Depot	25.000	€/Stk
Grunderwerb	Grunderwerb Unterwerke	1.200	€/m <sup>2</sup>
Zusatzkosten	Nachtzuschlag auf Fahrleitungsanlage	22,5	%
	Planung	12	%
	Unvorhergesehenes	2	%

### 6.2.3 Betriebskostenschätzung

Die Betriebskosten setzen sich aus Instandhaltungskosten für Fahrzeuge und Infrastruktur, Energiekosten, Betriebspersonal sowie Reinvestitions- und Refurbishment-Kosten zusammen.

Für die Berechnung der Energiekosten wurden 15 ct/kWh angenommen. Dieser Wert entstammt den grundsätzlichen Annahmen der MKS zum Strompreis der Industrie (16 ct/kWh) [69]. Da bei Hybridoberleitungsbussen die zu leistende Energiesteuer geringer ist, reduziert sich der Energiepreis der Industrie um 1 ct/kWh.

Die Instandhaltungs- und Reparaturkosten berechnen sich aus den jährlichen Fahrleistungen und dem Unterhaltungskostensatz pro km. Als Unterhaltungskostensatz des Hybrid-oberleitungsgelenkbusses werden Annahmen der BVG von 0,50 Euro pro km verwendet. Aufbauend auf diesen Kostensatz wurden die Unterhaltungskosten für Doppelgelenkbusse auf 0,56 Euro pro km hochgerechnet. Die Hochrechnung lehnt sich an der Standardisierten Bewertung an. [103]

Nach 10 Jahren wird der Bus überholt, um verschlissene und austauschbare Komponenten wie die Inneneinrichtung zu erneuern (Refurbishment). Diese Überholungskosten wurden mit 30.000 € pro Bus berücksichtigt [16] (Tabelle 6-7). Die gesamte Bus-Lebensdauer beträgt 16 Jahre. Der Restwert des Busses wird linear über die Nutzungsdauer bestimmt. Die Fahrzeugversicherung wurde mit 3.500 €/a je Fahrzeug angesetzt

Die Instandhaltung der Fahrleitung enthält Kosten für Fahrleitungspersonal, Fahrzeuge und Material. Die Instandhaltungskosten einer 2-dräftigen Fahrleitung betragen ca. 2.500 €/km pro Jahr. Diese Kosten wurden für 4-dräftige und 8-dräftige Fahrleitungen linear skaliert, d.h. auf 5.000 €/km pro Jahr für 4-dräftige und 10.000 €/km pro Jahr für 8-dräftige Fahrleitungen. In Abhängigkeit der Abnutzung werden alle 30 bis 35 Jahre ein Fahrdrahttausch und alle 20 bis 25 Jahre ein Tausch der Aufhängung erforderlich. Dafür wurden Kosten von 25.000 €/km für eine zweispurige Fahrleitung und 20.000 €/km für die Aufhängung angesetzt (Tabelle 6-7).

Weitere Betriebskosten der Fahrleitungsanlage entstehen durch die Wartung von Gleichrichterunterwerken, die mit 3.300 €/a berücksichtigt wurden. Jährliche Wartungskosten von Masten wurden mit 2% der Investitionskosten angesetzt [119] [120]. Diese enthalten die jährliche Inspektion, die Reinigung sowie die im 5-jährigen Zyklus durchgeführte Prüfung, die in der BOStrab vorgesehen ist.

Die Kosten für das Fahrpersonal beruhen auf Angaben der BVG zum Personaleinsatz.

Für die Instandhaltung pro Ladestation wurden 2.000 €/a angesetzt [112].

Tabelle 6-7: Basis der Betriebskostenschätzung der Hobusse

Kategorie	Komponenten	Kosten	Einheit
<b>Energiekosten</b>	Stromkosten	15	ct/kWh
<b>Instandhaltung</b>	Gelenkbus	50,0	ct/Fzg-km
	Doppelgelenkbus	56	ct/Fzg-km
	Fahrzeugversicherung	3.500	€/a

Kategorie	Komponenten	Kosten	Einheit
	FL-Turmwagen	4.500	€/a
	Fahrleitung (2-dr.)	2.500	€/km pro Jahr
	Fahrleitung (4-dr.)	5.000	€/km pro Jahr
	Fahrleitung (8-dr.)	10.000	€/km pro Jahr
	Gleichrichterunterwerke	3.300	€/a
	Masten	2	% der Investitionskosten
	Instandhaltung Ladestation	2.000	€/a
<b>Modernisierung</b>	Austausch Fahrdrabt	25.000	€/km
	Austausch Fahrdrabtaufhängung	20.000	€/km
	Modernisierung Fahrzeug	30.000	€

## 6.3 Szenariospezifische Investitionen

### 6.3.1 Zusammenfassung der Szenarien

Tabelle 6-8 zeigt eine Übersicht über die Investitionen aller Szenarien, die in den Abschnitten 6.3.2 bis 6.3.5 weiter erläutert werden.

Tabelle 6-8: Investitionen der untersuchten Szenarien

Kategorie	Szenario A	Szenario B	Szenario C reduziertes Netz	HochlaufszENARIO
Gelenkbusse (inkl. Reserve)	94.016 T€	94.016 T€	94.016 T€	-
Doppelgelenkbusse (inkl. Reserve)	94.128 T€	94.128 T€	20.352 T€	20.352 T€
Fahrleitung	64.391 T€	51.508 T€	37.878 T€	5.241 T€
Zusätzliches Fahrlei- tungsmaterial	1.828 T€	745 T€	654 T€	48 T€
Energieversorgung	49.136 T€	49.871 T€	41.321 T€	8.238 T€
Ladeeinrichtungen	1.416 T€	1.705 T€	1.291 T€	147 T€
Grunderwerb	3.493 T€	2.599 T€	2.552 T€	406 T€
Planung und Unvor- hergesehenes	16.837 T€	14.900 T€	11.717 T€	1.971 T€
<b>Fahrzeuge Gesamt</b>	<b>188.144.000 €</b>	<b>188.144.000 €</b>	<b>114.368.000 €</b>	<b>20.352.000 €</b>
<b>Infrastruktur Gesamt</b>	<b>137.100.138 €</b>	<b>121.328.227 €</b>	<b>95.412.319 €</b>	<b>16.051.419 €</b>
<b>Investitionen Gesamt</b>	<b>325.244.138 €</b>	<b>309.472.227 €</b>	<b>209.780.319 €</b>	<b>36.403.419 €</b>

### 6.3.2 Szenario A

Szenario A weist den höchsten Elektrifizierungsgrad aller untersuchten Szenarien auf, weshalb die Investitionen der Infrastruktur und die Gesamtinvestitionen im Vergleich zu Szenarien B und C höher ausfallen. Für den Regelbetrieb werden in diesem Szenario 102 Gelenkbusse und 67 Doppelgelenkbusse benötigt. Die Anzahl der erforderlichen Reservefahrzeuge beträgt 11 Gelenk-, und 7 Doppelgelenkbusse. Basierend auf den in Abschnitt 7.2

aufgeführten Investitionsansätzen entstehen für die Busflotte im Szenario A Gesamtinvestitionen von 188.144.000 €. Der Batterieanteil an den Gesamtinvestitionen beträgt 13.464.000 € (ca. 7% der Fahrzeuggesamtkosten).

Die Fahrleitungsanlage im Szenario A besteht aus 7.000 m 2-drähtiger Fahrleitung, 65.750 m 4-drähtiger Fahrleitung und 29.250 m 8-drähtiger Fahrleitung. Das entspricht einer Fahrleitungslänge von insgesamt 197 km. Die Investitionen in die Fahrleitungsanlage (inkl. Nachtzuschlag von 22,5%) betragen 66.219.026 €. Die Gesamtinvestitionen in die Energieversorgung belaufen sich auf 49.136.000 €. Davon entfallen ca. 50% auf die Unterwerke und ca. 33% die Speisekabel (ca. 54 km) zwischen den Unterwerken und Einspeisepunkten. Die übrigen Investitionen in die Energieversorgung entfallen auf die Mittelspannungsanschlüsse, Leistungs- und Masttrennschalter. Die Ladeeinrichtungen und der Grunderwerb stellen mit 1% (1,4 Mio. €) bzw. 2,5% (3,5 Mio. €) vergleichsweise geringe Anteile der Infrastrukturinvestitionen dar. Die Investitionen in die Infrastruktur (inklusive Planung und Unvorhergesehenes) betragen im Szenario A insgesamt 137.100.138 €.

Die Gesamtinvestitionen (Fahrzeuge und Infrastruktur) betragen im Szenario A 325.244.138 €.

### **6.3.3 Szenario B**

In diesem Szenario ist gegenüber dem Szenario A der Elektrifizierungsgrad reduziert. Das zu Grunde liegende Liniennetz bleibt unverändert. Die Gesamtfahrzeugflotte und damit die Fahrzeuginvestitionen sind gegenüber Szenario A identisch und betragen 188.144.000 €.

Für Szenario B sind mit der Reduzierung des Elektrifizierungsgrades 3.500 m 2-drähtige Fahrleitung, 31.000 m 4-drähtige Fahrleitung und 41.050 m 8-drähtige Fahrleitung zu errichten. Dies ergibt eine Fahrleitungslänge von insgesamt 147,6 km. Die Investitionen in die Fahrleitungsanlage betragen insgesamt 52.252.795 €. Die Investitionen in die Energieversorgung betragen 49.871.000 €. Davon entfallen ca. 45% auf die Unterwerke und 40% auf die Speisekabel (ca. 66 km) zwischen den Unterwerken und Einspeisepunkten. Für die Ladeeinrichtungen sind mit 1.705.000 € gegenüber Szenario A aufgrund der reduzierten Fahrleitungslänge etwas höhere Investitionen erforderlich. Durch die geringere Unterwerksanzahl reduzieren sich die Aufwendungen für den Grunderwerb der Unterwerke gegenüber Szenario A um ca. 900.000 € auf 2.599.000 €. Die Investitionen in die Infrastruktur (inklusive Planung und Unvorhergesehenes) betragen im Szenario B 121.328.227 €.

Die Gesamtinvestitionen (Fahrzeuge und Infrastruktur) betragen im Szenario B 309.472.227 € und liegen damit um insgesamt ca. 16 Mio. € (5%) niedriger im Vergleich zum Szenario A.

### 6.3.4 Szenario C

Im Szenario C ist die mit HObussen betriebene Liniennetzlänge gegenüber den Szenarien A und B um 35 km (15%) kürzer. Damit reduzieren sich die Fahrzeuganzahl sowie die Aufwendungen zur Errichtung und Betrieb der Infrastruktur.

Die Fahrzeugflotte für den Betrieb setzt sich aus 102 Gelenkbussen und 14 Doppelgelenkbussen zusammen. Unter Berücksichtigung von 10% Reservefahrzeugen werden für Szenario C 129 Busse benötigt, deren Investitionen insgesamt 114.368.000 € betragen.

Im Szenario C werden 3.500 m mit 2-drähtiger Fahrleitung, 23.700 m mit 4-drähtige Fahrleitung und 29.000 m mit 8-drähtiger Fahrleitung bespannt. Das ergibt eine Gesamtfahrleitungslänge von 108,9 km, ca. 39 km (26%) weniger als in Szenario B. Die Investitionen für die Fahrleitungsanlage betragen insgesamt 38.531.266 €. Die Investitionen in die Energieversorgung betragen 41.321.000 €. Davon entfallen 17.100.000 € (ca. 41%) auf die Unterwerke und 17.550.000 € (ca. 42%) auf die Speisekabel (ca. 59 km) zwischen den Unterwerken und Einspeisepunkten. Aufgrund der geringeren Liniennetzlänge und kleineren Busflotte sind die Investitionen für Ladeeinrichtungen an Endhaltestellen und im Depot mit insgesamt 1.291.000 € geringer als im Szenario B. Die Aufwendungen für den Grunderwerb der Unterwerke sind mit 2.552.000 € vergleichbar zum Szenario B. Die Investitionen für die Infrastruktur (inklusive Planung und Unvorhergesehenes) betragen im Szenario C 95.412.319 €.

Die Gesamtinvestitionen (Fahrzeuge und Infrastruktur) betragen im Szenario C 209.780.319 € und liegen damit um ca. 100 Mio. € (32%) niedriger im Vergleich zum Szenario B.

### 6.3.5 HochlaufszENARIO

Als erste zu realisierende Linie wurde von der BVG die Linie M32 festgelegt. Für diese Linie wurden die erforderlichen Mengen und Investitionen separat ermittelt.

Für das HochlaufszENARIO sind 14 Doppelgelenkbusse und zusätzlich 2 Busse als Reserve anzuschaffen. Die Investitionen für die benötigten Fahrzeuge betragen mit den unter 6.2.1 beschriebenen Ansätzen 20.352.000 €.

Für die Fahrleitungsanlage sind folgende Hauptkomponenten erforderlich: 1.100 m 2-drähtiger Fahrdraht, 400 m 4-drähtiger Fahrdraht und 5.900 m 8-drähtiger Fahrdraht sowie 450 Maste und Fundamente. Unter Berücksichtigung des Nachtzuschlages und dem zusätzlichem Fahrleitungsmaterial (Trenner, Eindrahteinrichtungen, Querverbinder) ergeben sich 5.289.000 € für die Investition der Fahrleitung. Die Investitionen für die Energieversorgung (Unterwerke, Einspeisekabel, Leistungs- und Masttrennschalter) betragen 8.238.000 €. Für die Ladeeinrichtungen an Endhaltestellen und im Depot liegen die Investitionen bei ca. 147.000 €. Der Grunderwerb beträgt ca. 406.000 €. Die Investitionen für die Infrastruktur

(inklusive Planung und Unvorhergesehenes) des Hochlaufszenarios belaufen sich auf insgesamt 16.051.419 €.

Die Gesamtinvestitionen (Fahrzeuge und Infrastruktur) betragen für das HochlaufszENARIO 36.403.419 €. Das sind ca. 17% der Investitionen des gesamten Szenarios C.

## 6.4 Wirtschaftlichkeitsuntersuchung

### 6.4.1 Untersuchungsfälle

Die Untersuchungsfälle zum Hybridoberleitungsbus sollen untereinander und mit dem heutigen Verkehrsangebot in Spandau, also dem Dieselbus-Einsatz verglichen werden. Darüber hinaus bestand zusätzlich der Wunsch einen Vergleich mit reinen Elektrobussen durchzuführen. Hierzu sind bei der BVG aktuell zwei Technologievarianten in der engeren Betrachtung, der so genannte „Depotlader“ und der „Gelegenheitslader“. Damit ergeben sich für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung die folgenden Untersuchungsfälle:

- Hybridoberleitungsbus („Streckenlader“)
  - Szenario A = Gesamtnetz / "Hoher Elektrifizierungsgrad"
  - Szenario B = Gesamtnetz / "Reduzierte Elektrifizierung"
  - Szenario C = Betrieblich reduziertes Netz (mit Berücksichtigung Straßenbahn)
- Dieselbusnetz (Vergleichsfall, Istzustand 2018)
- Elektrobusse
  - Depotlader
  - Gelegenheitslader

Die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung erfolgt unter Zusammenführung des technischen und betrieblichen Mengengerüsts der Untersuchung. Die Kosten zur Errichtung der Infrastruktur für den Hybridoberleitungsbus wurden vom IFB und der TU Dresden übernommen. Die spezifischen Kostensätze des Betriebes des Hybridoberleitungsbusses wurden von der TU Dresden ermittelt, abgestimmt und in die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung eingearbeitet.

Hinsichtlich der gewählten Kostenansätze und erforderlicher Annahmen für den Hybridoberleitungsbus wurde grundsätzlich ein Abgleich mit den relevanten früheren MKS-Studien (vgl. [128]) vorgenommen.

Von der BVG wurden relevante Kostensätze und fahrzeugspezifische Daten und Annahmen aus dem Istzustand (Vergleichsfall Dieselbuseinsatz) und zum Elektrobuseinsatz (Vergleichsfall Depot- und Gelegenheitslader) zur Verfügung gestellt. Für den Elektrobuseinsatz wurden darüber hinaus von der BVG Infrastrukturkosten angenommen, um die Vergleichbarkeit der Untersuchungsfälle so gut wie möglich herzustellen.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Untersuchungsfälle zum Elektrobuseinsatz nicht im Untersuchungsumfang der Machbarkeitsstudie enthalten sind und hierzu keine eigenen Berechnungen oder Simulationen erfolgt sind. Die dargestellten Elektrobussen-Untersuchungsfälle dienen dem Vergleich und der Einordnung der Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Technologiealternativen. Alle Angaben und Kostenansätze zum Elektrobuseinsatz ent-

stammen eigenen Untersuchungen der BVG. Hingewiesen wird auch darauf, dass die Bearbeitungstiefe für die Elektrobus-Untersuchungsfälle nicht der Bearbeitungstiefe der vorliegenden Machbarkeitsstudie zum Hybridoberleitungsbus entspricht, da weder eine technische Planung für die Infrastruktur noch eine Betriebssimulation der Depot- und Gelegenheitslader vorliegen.

Im Folgenden werden zunächst weitere Annahmen für den Hybridoberleitungsbus dargestellt. Im Anschluss daran werden die Kosten der Vergleichsfälle (Diesel- und Elektrobus) aufgezeigt.

Der Vergleich der Wirtschaftlichkeit der einzelnen Untersuchungsfälle erfolgt anhand einer Life Cycle Cost - Analyse (Lebenszykluskosten). In der Life Cycle Cost - Analyse werden die relevanten Investitionen und Betriebskosten in einem festgelegten Betrachtungszeitraum berücksichtigt. Die Anwendung von Life Cycle Cost - Analysen bei der Fahrzeugbeschaffung wird auch vom Verband deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) empfohlen [107]. Aufgrund der bisherigen Planungstiefe auf der Ebene der Machbarkeitsstudie sind die Life Cycle Cost - Analysen im vorliegenden Fall gegenüber einer umfänglichen Life Cycle Cost - Analyse, die bei einer Fahrzeugbeschaffung durchgeführt wird, deutlich vereinfacht und beschränkt sich auf die wesentlichen Investitionen und laufenden Kosten.

#### 6.4.2 Ergänzende Kennziffern Hybridoberleitungsbus

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für den Hybridoberleitungsbus werden jeweils für die Szenarien A, B und C durchgeführt. Eine detaillierte Erläuterung der Szenarien ist im Kapitel 4.3 zu finden. Die Beschreibung der Infrastrukturkosten und der spezifischen Betriebskostensätze für den Hybridoberleitungsbus sind in den Kapiteln 6.1 - 6.3 im Einzelnen dargestellt.

Ergänzend sind im Folgenden die Platzkapazitäten der eingesetzten Fahrzeugtypen als Summe aus Sitz- und Stehplätzen aufgeführt. Mithilfe der Platzkapazität und der Fahrleistung können die angebotenen Platzkilometer je Szenario ermittelt werden.

Tabelle 6-9: Platzkapazität der Fahrzeugtypen der Hybridoberleitungsbusse

Plätze/Bus	Einheit	Hybrid-Oberleitungsbus		
		Szenario A	Szenario B	Szenario C
Doppelgelenkbus	Personen	130	130	130
Gelenkbus	Personen	99	99	99

Das Kriterium „Platzkilometer“ dient im Folgenden als zusätzliche Kenngröße zum Vergleich der verschiedenen Szenarien und Technologiealternativen miteinander.

Zu berücksichtigen ist, dass die Szenarien unterschiedlich ausgeprägte Verkehrsangebote beinhalten, z.B. ist das Hybridoberleitungsbusnetz im Szenario C deutlich kleiner, da es ergänzt zum Straßenbahnausbau konzipiert ist. Die Szenarien unterscheiden sich vom derzeitigen Busangebot generell durch die unterschiedlichen Fahrzeuggrößen der verschiedenen Fahrzeugtypen. In den Hybridoberleitungsbus-Szenarien wird das Platzangebot ausgeweitet, um weitere Fahrgaststeigerungen aufzunehmen. Mit der Kenngröße Platzkilometer bzw. mit dem zusätzlichen Ausweis der Kenngröße Kosten pro Platzkilometer soll dieser Aspekt adressiert werden.

Des Weiteren sind die angenommene Nutzungsdauer der Fahrzeuge und die Nutzungsdauer der Batterie signifikant für die Life Cycle Cost Analyse. Mithilfe der Festlegung der Nutzungszeiten kann ein Reinvestitionszeitraum festgelegt oder der Restwert des Fahrzeuges und der Batterie bestimmt werden.

Tabelle 6-10: Nutzungsdauer der Hybridoberleitungsbusse

Nutzungsdauer	Einheit	Hybrid-Oberleitungsbus
<b>Fahrzeuge</b>		
Doppelgelenkbus	Jahre	16
Gelenkbus	Jahre	16
<b>Batterie</b>		
Batterie	Jahre	6

Die Nutzungsdauer der Hybridoberleitungsbusse orientiert sich an Nutzungsdauern und Erfahrungswerten aus konventionellen Oberleitungsbusbetrieben. Mit 16 Jahren für die HObus-Fahrzeuge und 6 Jahren für die Batterie im HObus werden eher konservative Ansätze gewählt, um bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auf die sichere Seite zu gehen. Da die Lebensdauer von Fahrzeug und Batterie beim HObus derzeit technisch so eingeschätzt wird, dass 18 Jahre (Fahrzeug) und 8 Jahre (Batterie) möglich sein sollten, werden hierzu entsprechende sensitive Betrachtungen durchgeführt (vgl. Tabelle 6-25).

Darüber hinaus wird zusätzlich eine Sensitivitätsrechnung angestellt, in der die Nutzungsdauer des HObus-Fahrzeugs auf 12 Jahre herabgesetzt wird (entspricht 2\*6 Jahre Batterielebenszeit).

Es wird zusätzlich davon ausgegangen, dass die Batterien nach ihrer angesetzten Lebensdauer von 6 Jahren einen Restwert von 25% besitzen. Dieser Ansatz ist für alle Szenarien gleich. Aufgrund der nicht prüfaren Annahme, dass dieser Restwert auch sicher erzielt werden kann, wird zusätzlich eine Sensitivitätsberechnung durchgeführt, die den Restwert der Batterien in allen Szenarien von 25% auf 0 setzt (vgl. Tabelle 6-25).

### 6.4.3 Vergleichsfall Diesel- und Elektrofahrzeuge

Für die Vergleichsfälle Depot- und Gelegenheitslader wurde festgelegt, dass grundsätzlich die gleichen Fahrzeugtypen wie im Dieselbusbetrieb angenommen werden, also Standard- und Gelenkbusse. Für die heute im Einsatz befindlichen Busse des Typs Doppeldecker, der derzeit nur für den Dieselbusbetrieb verfügbar ist, wird angenommen, dass der Fahrzeugbedarf durch Elektrogelenkbusse abgedeckt wird.

Tabelle 6-11: Fahrzeugbedarf Diesel- und Elektrobus

Fahrzeugbedarf	Dieselbus	Elektrobus (Depotlader)	Elektrobus (Gelegenheitslader)
Gelenkbus	116	211	194
Doppeldecker	61		
Standardbus	10	12	11
<b>Summe</b>	<b>187</b>	<b>223</b>	<b>205</b>

Für die Reservehaltung ist in allen Untersuchungsfällen ein Fahrzeugbedarf von pauschal 10% berücksichtigt.

Aufgrund der zusätzlich anfallenden Ladevorgänge entsteht im elektrischen Betrieb ein zusätzlicher Fahrzeugmehrbedarf. Dieser liegt entsprechend den Annahmen der BVG beim Gelegenheitslader bei 10 % und beim Depotlader bei voraussichtlich 20 %. Aufgrund der unsicheren Annahmen zur weiteren technologischen Entwicklung wird zusätzlich eine Sensitivitätsberechnung durchgeführt, die den Fahrzeugmehrbedarf für den Depotlader auf 15% reduziert (vgl. Tabelle 6-25).

Insgesamt ergibt sich damit für das Spandauer Busnetz ein Fahrzeugmehrbedarf von 18 Fahrzeugen beim Gelegenheitslader und 36 Fahrzeugen beim Depotlader.

Für den Depotlader wird zusätzlich unterstellt, dass ein Mehrbedarf an Fahrleistung und Einsatzzeit von rund 5% entsteht, da diese Fahrzeuge für jeden Ladevorgang wieder ins Depot zurückkehren müssen und damit mehr Fahrleistung und Personaleinsatz erforderlich ist.

Im Dieselbusbetrieb wird die identische Anzahl an Fahrzeugen wie im Szenario A und B des Hybridoberleitungsbusses benötigt. Die Fahrzeuggrößen unterscheiden sich, da beim Dieselbus das Platzangebot der BVG (Stand 2018) angesetzt wird, während bei Hybridoberleitungsbuss eine Ausweitung der Platzkapazitäten berücksichtigt ist.

Die Platzkapazitäten je eingesetztem Fahrzeugtyp der Vergleichsfälle zeigt nachfolgende Tabelle. Angaben zu den Platzkapazitäten der Hybridoberleitungsbusse zeigt [Tabelle 6-9].

Tabelle 6-12: Platzkapazität Diesel- und Elektrobus

Plätze/Bus	Einheit	Dieselbus	Elektrobus (Depotlader)	Elektrobus (Gelegenheitslader)
Gelenkbus	Personen	99	92	99
Doppeldecker	Personen	113		
Standardbus	Personen	70	65	70

Die Annahmen zur Nutzungsdauer der einzelnen Fahrzeugtypen der Vergleichsfälle ist Tabelle 6-12 zu entnehmen. Die Lebenszeit der Dieselbusse entspricht den Erfahrungen der BVG aus dem heutigen Betrieb. Informationen zu den Nutzungsdauern der Hybridoberleitungsbusse sind in Tabelle 6-10 enthalten. Die Annahme zur Nutzungsdauer der HObusse orientiert sich an den Erfahrungen aus konventionellem O-Bus-Betrieb und liegt bei 16 Jahren. Bei den Elektrobussen geht die BVG von einer Nutzungsdauer von 12 Jahren aus.

Die Batteriebenszeit wird bei allen Elektrobustypen (Depotlader, Gelegenheitslader, HObus) einheitlich mit 6 Jahren angenommen.

Tabelle 6-13: Nutzungsdauer Diesel- und Elektrobus

Nutzungsdauer	Einheit	Dieselbus	Elektrobus (Depotlader)	Elektrobus (Gelegenheitslader)
<b>Fahrzeuge</b>				
Gelenkbus	Jahre	10	12	12
Doppeldecker	Jahre	12	12	12
Standardbus	Jahre	10	12	12
<b>Batterie</b>				
Batterie	Jahre		6	6

### 6.4.3.1 Investitionskosten

Für die Untersuchungsfälle Dieselbus und Elektrobus sind die Investitionen in der Tabelle 6-14 und Tabelle 6-15 aufgeführt. Beim Dieselbus fallen keine Infrastrukturinvestitionen an.

Für Elektrobusse sind Ladeeinrichtungen vorzusehen. Die Kosten für Ladeeinrichtungen belaufen sich beim Depotlader auf 65 TEUR pro Ladesäule. Es wird angenommen, dass pro Depotlader 0,5 Ladesäulen benötigt werden. Demgegenüber liegt der Bedarf an High Power Charger für Gelegenheitslader bei 0,2 Stück pro Fahrzeug. Die Ladeinfrastruktur für High Power Charger wird mit 541 TEUR pro Stück angesetzt.

Der Vergleichsfall Depotlader beinhaltet Kosten in Höhe von 5 Mio. Euro zur Ertüchtigung des Verteilernetzes, im Vergleichsfall Gelegenheitslader werden dafür Kosten in Höhe von 4 Mio. Euro angenommen (subsummiert unter Position Ladeeinrichtungen; Angaben BVG).

Tabelle 6-14: Investitionen Dieselbus

Kenngröße Investition	Einheit	Dieselbus			
		Standardbus	Gelenkbus	Doppeldecker	Summe
Neupreis je Fahrzeug	TEUR	270	350	450	
<b>Summe Fahrzeuge</b>	<b>TEUR</b>	<b>2.700</b>	<b>40.600</b>	<b>27.450</b>	<b>70.750</b>
<b>Summe Investition</b>	<b>TEUR</b>	<b>2.700</b>	<b>40.600</b>	<b>27.450</b>	<b>70.750</b>

Tabelle 6-15: Investitionen Elektrobus

Kenngröße Investition	Einheit	Elektrobus (Depotlader)			Elektrobus (Gelegenheitslader)		
		Standardbus	Gelenkbus	Summe	Standardbus	Gelenkbus	Summe
Neupreis je Fahrzeug	TEUR	428	588		421	580	
Neupreis je Batterie	TEUR	197	246		203	253	
Neupreis je Fahrzeug inkl. Batterie	TEUR	625	834		624	833	
<b>Summe Fahrzeuge</b>	<b>TEUR</b>	<b>5.136</b>	<b>124.068</b>	<b>129.204</b>	<b>4.631</b>	<b>112.520</b>	<b>117.151</b>
<b>Summe Batterien</b>	<b>TEUR</b>	<b>2.364</b>	<b>51.906</b>	<b>54.270</b>	<b>2.233</b>	<b>49.082</b>	<b>51.315</b>
<b>Summe Fahrzeuge inkl. Batterien</b>	<b>TEUR</b>	<b>7.500</b>	<b>175.974</b>	<b>183.474</b>	<b>6.864</b>	<b>161.602</b>	<b>168.466</b>
<b>Summe Ladeeinrichtungen</b>	<b>TEUR</b>			<b>12.248</b>			<b>26.181</b>
Grunderwerb	TEUR						<b>135</b>
Planung	TEUR			<b>1.470</b>			<b>3.158</b>
Unvorhergesehenes	TEUR			<b>245</b>			<b>526</b>
<b>Summe Investitionen</b>	<b>TEUR</b>	<b>7.500</b>	<b>175.974</b>	<b>197.436</b>	<b>6.864</b>	<b>161.602</b>	<b>198.466</b>

Im Vergleich zu den beiden betrachteten Elektrobusvarianten weist der Dieselbus die deutlich geringeren Investitionen auf. Dies liegt an den nicht benötigten Infrastrukturinvestitionen. Weitere Gründe sind die geringeren spezifischen Fahrzeugpreise sowie der geringere Fahrzeugbedarf.

Für den Depot- und Gelegenheitslader ergeben sich Investitionskosten in gleicher Größenordnung. Der hohe Fahrzeugmehrbedarf wird beim Depotlader durch die geringeren Kosten für die Ladeinfrastruktur wieder ausgeglichen.

Eine Übersicht der Investitionen der Hybridoberleitungsbus-Varianten zeigt Tabelle 6-8 in Kapitel 6.3.1 Die Investitionen der Vergleichsvarianten sind in der Summe geringer als die Investitionen beim Hybridoberleitungsbus, insbesondere aufgrund der geringeren Infrastrukturinvestitionen.

#### 6.4.3.2 Jährlich anfallende Kosten

Die jährlichen Kosten für den Dieselbus und die beiden Elektrobusvarianten gliedern sich in Energie- und Unterhaltungskosten sowie Kosten für das Fahrpersonal und Fahrzeugversicherungen.

Die Kosten für Fahrzeugversicherung werden in allen Untersuchungsfällen einheitlich mit pauschal 3.500 Euro pro Fahrzeug angesetzt.

Tabelle 6-16: Jährliche Kosten Betrieb - Dieselbus

		Dieselbus			
Jährliche Kosten Betrieb	Einheit	Standardbus	Gelenkbus	Doppeldecker	Summe
Energieverbrauch	l/100 km, kWh/km	40	50	60	
Energiepreis	EUR/l, EUR/kWh	0,9	0,9	0,9	
Energiekosten	EUR/km	0,36	0,45	0,54	
Energiekosten	TEUR/a	298	4.306	2.726	<b>7.331</b>
Unterhaltungskosten Fahrzeuge	EUR/km	0,4	0,5	0,6	
Unterhaltungskosten Fahrzeuge	TEUR/a	331	4.785	3.029	<b>8.145</b>
Fahrpersonal	TEUR/a	858	12.693	5.950	<b>19.500</b>
Sonstiges (Versicherung)	TEUR/a	35	406	214	<b>655</b>
<b>Summe laufende jährliche Kosten Betrieb</b>	<b>TEUR/a</b>	<b>1522</b>	<b>22.190</b>	<b>11.919</b>	<b>35.631</b>

Für den Dieselbus fallen demnach rund 35,6 Mio. Euro Betriebskosten an.

Beim Depot- und Gelegenheitslader fallen zusätzlich jährliche Unterhaltungskosten der Ladeeinrichtungen an. Diese belaufen sich auf rund 2% der Erstinvestition für die Infrastruktur.

Dieser Wert wurde in Analogie zu den Unterhaltungssätzen für elektrische Anlagen aus der Standardisierten Bewertung [103] festgelegt.

Tabelle 6-17: Jährliche Kosten Betrieb & Infrastruktur - Elektrobus

	Einheit	Elektrobus (Depotlader)			Elektrobus (Depotlader)		
		Standard-bus	Gelenk-bus	Summe	Standard-bus	Gelenk-bus	Summe
<b>Jährliche Kosten Infrastruktur</b>							
Unterhaltung Ladeeinrichtung	TEUR/a			145			444
<b>Jährliche Kosten Betrieb</b>							
Energieverbrauch	l/100 km, kWh/km	2,10	2,63		2,10	2,63	
Energiepreis	EUR/l, EUR/kWh	0,15	0,15		0,15	0,15	
Energiekosten	EUR/km	0,32	0,39		0,32	0,39	
Energiekosten	TEUR/a	274	6.055	6.329	261	5.767	6.028
Unterhaltungskosten Fahrzeuge	EUR/km	0,40	0,50		0,40	0,50	
Unterhaltungskosten Fahrzeuge	TEUR/a	348	7.675	8.022	331	7.309	7.640
Fahrpersonal	TEUR/a	901	19.574	20.475	901	19.574	20.475
Sonstiges (Versicherung)	TEUR/a	42	739	781	39	679	718
<b>Summe laufende jährliche Kosten Betrieb</b>	<b>TEUR/a</b>	<b>1.564</b>	<b>34.043</b>	<b>35.607</b>	<b>1531</b>	<b>33.330</b>	<b>34.861</b>
<b>Jährliche Kosten Infrastruktur und Betrieb</b>	<b>TEUR/a</b>			<b>35.752</b>			<b>35.304</b>

Bei den jährlich anfallenden Kosten zeigen sich leichte Kostenvorteile beim Gelegenheitslader gegenüber dem Depotlader. Insgesamt ergeben sich für den Depotlader jährliche Kosten in Höhe von 35,75 Mio. Euro und 35,3 Mio. Euro für den Gelegenheitslader.

Eine Übersicht der jährlichen Kosten der Hybridoberleitungsbus-Varianten zeigt nachfolgende Tabelle. Szenario A liegt danach bei 35,4 Mio. Euro und Szenario B bei 35,3 Mio. Euro. Die Unterschiede sind demnach sehr gering und sind allein auf die unterschiedlichen Unterhaltungskosten für die Infrastruktur zurückzuführen. Aufgrund des kleineren zu elektrifizierenden Netzes ist dies bei Szenario B günstiger. Szenario C ist aufgrund des kleineren Liniennetzes nicht direkt vergleichbar.

Bei einem Vergleich der jährlichen Kosten ist ferner zu berücksichtigen, dass beim Hybridoberleitungsbus größerer Fahrzeuge eingesetzt werden.

Tabelle 6-18: Jährliche Kosten Betrieb & Infrastruktur – Hybridoberleitungsbus

	Einheit	HOBus		
		Szenario A	Szenario B	Szenario C reduziertes Netz
<b>Jährliche Kosten Infrastruktur</b>				
Unterhaltung Infrastruktur	TEUR/a	1.146	995	762
<b>Jährliche Kosten Betrieb</b>				
Energieverbrauch	MWh/a	40.610	40.610	26.325
Energiepreis	EUR/kWh	0,15	0,15	0,15
Energiekosten	TEUR/a	6.091	6.091	3.949
<b>Unterhaltungskosten Fahrzeuge</b>				
Leistung Gelenkbus	1000 km/a	10.245	10.245	10.245
Leistung Doppelgelenkbus	1000 km/a	5.201	5.201	1.263
Unterhaltung Gelenkbus	EUR/km	0,5	0,5	0,5
Unterhaltung Doppelgelenkbus	EUR/km	0,56	0,56	0,56
Unterhaltungskosten Fahrzeuge	TEUR/a	8.035	8.035	5.830
<b>Fahrpersonal</b>				
Einsatzzeit aus Modell	1000 h/a	780	780	553
Fahrpersonal	TEUR/a	19.500	19.500	13.815
<b>Sonstiges</b>				
Sonstiges (Versicherung)	TEUR/a	655	655	452
<b>Summe laufende jährliche Kosten Betrieb</b>	TEUR/a	<b>34.281</b>	<b>34.281</b>	<b>24.045</b>
<b>Jährliche Kosten Infra- struktur und Betrieb</b>	TEUR/a	<b>35.427</b>	<b>35.276</b>	<b>24.807</b>

## 6.4.4 Life Cycle Cost Analyse

Anfallende Kosten für die Entwicklung, Produktion und Entsorgung eines Produktes über den gesamten Lebenszyklus hinweg werden als Life Cycle Costs bezeichnet. In der Life Cycle Cost - Analyse werden die relevanten Investitionen und Betriebskosten in einem festgelegten Betrachtungszeitraum berücksichtigt. [107]

In der vorliegenden Betrachtung umfassen die Life Cycle Costs die Investitions- und Instandhaltungs- sowie die Betriebskosten über einen festgesetzten Nutzungszeitraum. Für den Hybridoberleitungsbus sowie die Technologiealternativen werden zunächst die Investitionen gegenübergestellt. Danach erfolgt die Darstellung der jährlich anfallenden Kosten. Anschließend werden der Kapitalwert und die Annuität berechnet. Kapitalwert und Annuität sind Kennzahlen der dynamischen Investitionsrechnung.

Das Szenario C wird im folgenden Kapitel in separaten Tabellen dargestellt, da in diesem Szenario ein Teil des Netzes für den Straßenbahnbetrieb ausgebaut wird und das Netz des Hybridoberleitungsbusbes deshalb angepasst und kleiner ist. Bei Szenario C ist zudem zu beachten, dass zu den aufgeführten Kosten die Kosten des Straßenbahnbaus und -betriebs hinzukommen.

### 6.4.4.1 Investitionskosten

Wichtiger Bestandteil des Kostenvergleichs sind die relevanten Fahrweginvestitionen.

Tabelle 6-19: LCC-Analyse – Investitionskosten

	Einheit	Dieselbus	Elektrobus (Depotlader)	Elektrobus (Gelegenheitslader)	HObus	
					Szenario A	Szenario B
<b>Investitionskosten</b>						
<b>Fahrzeuge</b>						
Investitionskosten Fahrzeuge (o. Batterie)	TEUR	70.750	129.204	117.151	174.680	174.680
Investitionskosten Batterien	TEUR		54.270	51.315	13.464	13.464
<b>Summe Investi- tion Fahrzeuge</b>	<b>TEUR</b>	<b>70.750</b>	<b>183.474</b>	<b>168.466</b>	<b>188.144</b>	<b>188.144</b>
<b>Investition Fahrzeug/ Platz- kilometer</b>	<b>ct/ Platz- km</b>	<b>4,49</b>	<b>12,49</b>	<b>11,19</b>	<b>11,13</b>	<b>11,13</b>
<b>Infrastruktur</b>						
Fahrleitung inkl. zus. Fahrleitungs- material	TEUR				26.279	22.314

	Einheit	Dieselbus	Elektrobus (Depotlader)	Elektrobus (Gelegenheitslader)	HObus	
					Szenario A	Szenario B
Masten und Fundamente	TEUR				39.940	29.939
Unterwerke	TEUR				49.136	49.871
Ladeeinrichtungen	TEUR		12.248	26.181	1.416	1.705
Grunderwerb/ Entschädigung	TEUR			135	3.493	2.599
Unvorhergesehenes	TEUR		245	526	2.405	2.129
Planung	TEUR		1.470	3.158	14.432	12.771
<b>Summe Investition Infrastruktur</b>	<b>TEUR</b>		<b>13.962</b>	<b>30.000</b>	<b>137.100</b>	<b>121.328</b>
<b>Summe Investitionen</b>	<b>TEUR</b>	<b>70.750</b>	<b>197.436</b>	<b>198.466</b>	<b>325.244</b>	<b>309.472</b>

Im Vergleich der Antriebstechnologien weisen die beiden Szenarien des Batterie-Oberleitungsbusses die höchsten Investitionen auf. Dies liegt vor allem an der für den Betrieb von Batterie-Oberleitungsbussen benötigten Infrastruktur sowie an den hohen Fahrzeugpreisen.

Im Vergleich besitzt der Dieselbus die geringsten Investitionen, da für diese Antriebstechnologie keine zusätzliche Infrastruktur benötigt wird. Ein weiterer Grund ist der geringere Fahrzeugpreis. Der Elektrobus besitzt ähnlich hohe Fahrzeuginvestitionen wie der Hybridoberleitungsbuss, hingegen geringere Infrastrukturinvestitionen, da nur Ladeeinrichtungen errichtet werden müssen.

Die Angaben zu den Investitionen geben einen Überblick für die Erstinvestitionen (Infrastruktur und Fahrzeuge) der Szenarien und der Vergleichsfälle. Ein reiner Vergleich der Investitionen erlaubt noch keine Aussage zur Wirtschaftlichkeit. Beim Vergleich der Investitionen wird nicht berücksichtigt, dass die Fahrzeuge der Szenarien und Vergleichsfälle teilweise unterschiedliche Nutzungsdauern haben. Darüber hinaus ist nicht berücksichtigt, dass die Nutzungsdauer der Infrastruktur deutlich länger ist als die Nutzungsdauer der Fahrzeuge.

Tabelle 6-20: LCC-Analyse - Investitionskosten Szenario C

	Einheit	HObus Szenario C
<b>Investitionskosten</b>		
<b>Fahrzeuge</b>		
Investitionskosten Fahrzeuge (o. Batterie)	TEUR	105.080
Investitionskosten Batterien	TEUR	9.288
<b>Summe Investition Fahrzeuge</b>	<b>TEUR</b>	<b>114.368</b>
<b>Investition Fahrzeug/ Platzkilometer</b>	<b>ct/Platz-km</b>	<b>9,70</b>
<b>Infrastruktur</b>		
Fahrleitung inkl. zus. Fahrleitungsmaterial	TEUR	16.364
Masten und Fundamente	TEUR	22.168
Unterwerke	TEUR	41.321
Ladeeinrichtungen	TEUR	1.291
Grunderwerb/Entschädigung	TEUR	2.552
Unvorhergesehenes	TEUR	1.674
Planung	TEUR	10.043
<b>Summe Investition Infrastruktur</b>	<b>TEUR</b>	<b>95.412</b>
<b>Summe Investitionskosten</b>	<b>TEUR</b>	<b>209.780</b>

Die Investitionskosten des Szenario C werden getrennt ausgewiesen, da sie aufgrund des betrachteten Liniennetzes nicht mit den Kosten der anderen Szenarien vergleichbar sind. Die Investitionskosten des Szenario C sind im Vergleich zu den Kosten der Antriebstechnologien der anderen Hybridoberleitungsbus-Szenarien [Tabelle 6-19] geringer, da in diesem Szenario ein Teil des Netzes für den Straßenbahnbetrieb ausgebaut wird und das Netz des Hybridoberleitungsbusbes deshalb kleiner ist. Bei Szenario C ist zu beachten, dass zu diesen Kosten die Investitionen für die Straßenbahn noch hinzukommen.

#### 6.4.4.2 Jährlich anfallende Kosten

Neben den Investitionen wird die Wirtschaftlichkeit der Szenarien und der Vergleichsfälle durch die jährlich anfallenden Kosten beeinflusst. Die jährlichen Kosten beinhalten die Unterhaltungskosten für die Infrastruktur und die Betriebskosten.

Tabelle 6-21: LCC-Analyse - jährlich anfallende Kosten

	Einheit	Dieselbus	Elektrobus (Depotlader)	Elektrobus (Gelegenheitslader)	HObus	
					Szenario A	Szenario B
<b>jährlich anfallende Kosten</b>						
<b>Unterhaltung Infrastruktur</b>						
Fahrleitung	TEUR/a				639	574
Unterwerke	TEUR/a				175	152
Ladestationen	TEUR/a		145	444	56	62
Masten	TEUR/a				276	207
<b>Summe jährliche Kosten Infrastruktur</b>	<b>TEUR/a</b>		<b>145</b>	<b>444</b>	<b>1.146</b>	<b>995</b>
<b>Jährliche Kosten Infrastruktur je Platz-km</b>	<b>ct/ Platz-km</b>		<b>0,0099</b>	<b>0,0295</b>	<b>0,0678</b>	<b>0,0589</b>
<b>Betriebskosten</b>						
Energiekosten	TEUR/a	7.331	6.329	6.028	6.091	6.091
Energiekosten/ Platz-km	ct/ Platz-km	0,4652	0,4310	0,4005	0,3604	0,3604
Unterhaltungskosten Fahrzeuge	TEUR/a	8.145	8.022	7.640	8.035	8.035
Unterhaltungskosten Fahrzeuge	ct/ Platz-km	0,517	0,546	0,508	0,475	0,475
Fahrpersonal	TEUR/a	19.500	20.475	20.475	19.500	19.500
Fahrpersonal/ Platz-km	ct/ Platz-km	1,237	1,394	1,360	1,154	1,154
Sonstiges (Versicherung)	TEUR/a	655	781	718	655	655
<b>Summe jährliche Betriebskosten</b>	<b>TEUR/a</b>	<b>35.631</b>	<b>35.607</b>	<b>34.861</b>	<b>34.281</b>	<b>34.281</b>
<b>Jährliche Betriebskosten je Platz-km</b>	<b>ct/ Platz-km</b>	<b>2,2610</b>	<b>2,4245</b>	<b>2,3161</b>	<b>2,0280</b>	<b>2,0280</b>
<b>Summe jährlich anfallende Kosten</b>	<b>TEUR/a</b>	<b>35.631</b>	<b>35.752</b>	<b>35.304</b>	<b>35.427</b>	<b>35.276</b>
<b>Summe jährlich anfallende Kosten</b>	<b>ct/ Platz-km</b>	<b>2,2610</b>	<b>2,4344</b>	<b>2,3455</b>	<b>2,0957</b>	<b>2,0868</b>

Die jährlich anfallenden Kosten sind bei allen Antriebstechnologien in der Summe in einer ähnlichen Größenordnung, obwohl sie sich unterschiedlich zusammensetzen.

Bei den Hybridoberleitungsbusse fallen höhere Kosten für die Unterhaltung der Infrastruktur an als bei den Elektrobussen. Bei den Dieselnissen sind keine zusätzlichen Kosten der Infrastruktur berücksichtigt.

Bei den laufenden Kosten des Betriebs unterscheiden sich die Szenarien und Vergleichsfälle vor allem bei den Energiekosten. Diese sind bei den elektrisch betriebenen Fahrzeugen niedriger als beim Dieselniss. Die Unterschiede bei den Unterhaltungskosten der Fahrzeuge und der sonstigen Kosten (Versicherung) unterscheiden sich nicht deutlich.

Der größte Anteil der jährlichen Kosten resultiert aus dem Fahrpersonal. Da in allen Szenarien und Varianten das gleiche Fahrtenangebot unterstellt wird, sind die Kosten bei den Hybridoberleitungsbusen und dem Dieselniss vergleichbar. Bei den Elektrobussen (Depot- und Gelegenheitslader) sind die Personalkosten höher, da hier der Personalaufwand aufgrund der Nachladezeiten der Batterien steigt.

Bei einem direkten Vergleich der Summen der jährlichen Kosten ist zu berücksichtigen, dass bei den Szenarien der Hybridoberleitungsbusse deutlich größere Platzkapazitäten angeboten werden. Erst im Vergleich der jährlichen Kosten pro Platzkilometer zeigt sich deshalb, dass das Szenario B der Hybridoberleitungsbusse bezogen auf den Platzkilometer am kostengünstigsten ist. Der Dieselniss ist im Vergleich zu den Hybridoberleitungsbusen pro Platzkilometer teurer. Dies liegt vor allem an der geringeren Platzkapazität. Zudem fallen beim Dieselniss die höchsten Energiekosten an. Gegenüber dem Elektrobus ist der Dieselniss auch pro Platzkilometer etwas günstiger.

Da das Szenario A mit hohem Elektrifizierungsgrad gegenüber dem Szenario B mit reduziertem Elektrifizierungsgrad in keiner Hinsicht einen Vorteil aufweist, auch nicht signifikant beim Energieverbrauch, ist Szenario B dem Szenario A grundsätzlich vorzuziehen.

Tabelle 6-22: LCC-Analyse - jährlich anfallende Kosten Szenario C

	Einheit	HObus Szenario C
<b>jährlich anfallende Kosten</b>		
<b>Unterhaltung Infrastruktur</b>		
Fahrleitung	TEUR/a	417
Unterwerke	TEUR/a	145
Ladestationen	TEUR/a	46
Masten	TEUR/a	153

	Einheit	HObus Szenario C
<b>Summe jährliche Kosten Infrastruktur</b>	<b>TEUR/a</b>	<b>762</b>
<b>Jährliche Kosten Infrastruktur je Platz-km</b>	<b>ct/Platz-km</b>	<b>0,0646</b>
<b>Betriebskosten</b>		
Energiekosten	TEUR/a	3.949
Energiekosten/ Platz-km	ct/Platz-km	0,3351
Unterhaltungskosten Fahrzeuge	TEUR/a	5.830
Unterhaltungskosten Fahrzeuge	ct/Platz-km	0,4947
Fahrpersonal	TEUR/a	13.815
Fahrpersonal/ Platz-km	ct/Platz-km	1,1723
Sonstiges (Versicherung)	TEUR/a	452
<b>Summe jährliche Betriebskosten</b>	<b>TEUR/a</b>	<b>24.045</b>
<b>Jährliche Betriebskosten je Platz-km</b>	<b>ct/Platz-km</b>	<b>2,0404</b>
<b>Summe jährlich anfallende Kosten</b>	<b>TEUR/a</b>	<b>24807</b>
<b>Summe jährlich anfallende Kosten</b>	<b>ct/Platz-km</b>	<b>2,1050</b>

Die jährlichen Kosten des Szenario C werden getrennt ausgewiesen, da sie aufgrund des betrachteten Liniennetzes nicht mit den Kosten der anderen Szenarien vergleichbar sind. In diesem Szenario wird unterstellt, dass ein Teil des Netzes für den Straßenbahnbetrieb ausgebaut wird und das Netz des Batterie-Oberleitungsbusses deshalb kleiner ist. Bei Szenario C ist zu beachten, dass zu diesen Kosten die jährlichen Kosten des Straßenbahnbetriebs noch hinzukommen.

#### 6.4.4.3 Berechnung Kapitalwert und Annuität

Ein Vergleich der Kosten der Szenarien und Vergleichsfälle erfolgt über den Kapitalwert und die Annuität.

Der Kapitalwert ist eine Kennzahl der dynamischen Investitionsrechnung. Sie zeigt auf, welcher Betrag zum Beginn des Betrachtungszeitraums vorhanden sein müsste, um alle im Betrachtungszeitraum anfallenden Zahlungsströme abdecken zu können. Der Kapitalwert bezieht sich auf den Beginn des Betrachtungszeitraums. Dies wird durch eine Abzinsung

der später anfallenden Zahlungen berücksichtigt. Restwerte am Ende des Betrachtungszeitraums werden ebenfalls berücksichtigt.

Zusätzlich wird die Annuität ausgewiesen. Mit der Annuität werden die durchschnittlichen jährlichen Zahlungsströme aufgezeigt. Sie bezieht sich wie der Kapitalwert auf den Beginn des Betrachtungszeitraums.

Die Umrechnung der Investitionen in die jährlichen Kosten für Abschreibung und Verzinsung ermittelt sich bei der Annuitätenmethode gemäß folgender Formel:

$$a = N \cdot \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1}$$

a: Annuität

N: Nettoinvestition

i: Zinssatz [ %]

n: Nutzungsdauer in Jahren

In den Berechnungen wird ein mit der BVG abgestimmter Betrachtungszeitraum von 30 Jahren angenommen. Zur Beurteilung von Investitionsmaßnahmen zum Ausbau der Infrastruktur ist dies ein üblicher Korridor. Bestehende Restwerte (nach 30 Jahren) werden in der Life Cycle Cost Analyse linear über die Nutzungsdauer berücksichtigt.

Zur Berechnung des Kapitalwerts und der Annuität wurden in Abstimmung im Arbeitskreis folgende Annahmen getroffen:

- Zinssatz: 3%
- jährliche Preissteigerungsrate: 1%

Daraus ergibt sich ein Realzinssatz von 1,98%.

Für alle Investitionen und Aufgaben wird eine einheitliche Preissteigerung angenommen. Die Preissteigerung orientiert sich dabei an den Preissteigerungen der Erzeugerpreise für elektrische Ausrüstungen gemäß Preisindex „GP09-27 Elektrische Ausrüstungen“ des Statistischen Bundesamtes [104]

Die folgenden Tabellen zeigen das Gesamtergebnis des Wirtschaftlichkeitsvergleichs, das sich als Kapitalwert oder als jährliche Annuität ausdrücken lässt, jeweils über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren berechnet.

Tabelle 6-23: LCC-Analyse - Kapitalwert &amp; Annuität

	Einheit	Diesel- bus	Elektrobus (Depotlader)	Elektrobus (Gelegen- heitslader)	HObus	
					Szenario A	Szenario B
<b>Kapitalwert (30a)</b>						
Fahrzeuge (Investition/ Erneuerung)	TEUR	- 166.812	- 445.260	- 410.291	- 346.162	- 346.162
Infrastruktur (Investition/ Erneuerung)	TEUR	0	- 13.962	- 29.925	- 126.289	- 113.235
Jährlich anfal- lende Kosten Betrieb/Infrastr.	TEUR	- 800.176	- 802.905	- 792.850	- 795.600	- 792.216
<b>Kapitalwert (30a)</b>	<b>TEUR</b>	<b>- 966.988</b>	<b>- 1.262.127</b>	<b>- 1.233.066</b>	<b>- 1.268.052</b>	<b>- 1.251.613</b>
<b>Annuitätenmethode</b>						
Fahrzeuge (Investition/ Erneuerung)	TEUR/a	- 7.428	- 19.827	- 18.270	- 15.414	- 15.414
Infrastruktur (Investition/ Erneuerung)	TEUR/a	0	- 622	- 1.333	- 5.623	- 5.042
Jährlich anfal- lende Kosten Betrieb/Infrastr.	TEUR/a	- 35.631	- 35.752	- 35.304	- 35.427	- 35.276
<b>Annuität</b>	<b>TEUR/a</b>	<b>- 43.058</b>	<b>- 56.201</b>	<b>- 54.907</b>	<b>- 56.464</b>	<b>- 55.732</b>
<b>Annuität je Platz-km</b>	<b>ct/ Platz-km</b>	<b>- 2,732</b>	<b>- 3,827</b>	<b>- 3,648</b>	<b>- 3,340</b>	<b>- 3,297</b>

Der Dieselbus besitzt im Vergleich mit den Technologiealternativen im Betrachtungszeitraum von 30 Jahren in der Summe den geringsten Kapitalwert und die geringste Annuität. Die Kosten des Untersuchungsfalls Dieselbus liegen 25 - 30 % unter denjenigen der elektrischen Antriebsvarianten, da die Fahrzeug- und Infrastrukturkosten (Investition/Erneuerung) am geringsten sind. Bei den jährlichen Kosten des Betriebs und der Infrastrukturunterhaltung unterscheiden sich die Szenarien und Vergleichsfälle in geringerem Umfang.

Ein reiner Vergleich der Kapitalwerte und der Annuitäten ermöglicht noch keine Aussage zur Wirtschaftlichkeit. Denn bei den Szenarien A und B des Hybridoberleitungsbusses werden aufgrund der größeren Fahrzeuge deutlich höhere Platzkilometer angeboten. Deshalb sind für einen Vergleich der Hybridoberleitungsbuss-Szenarien und der Varianten die jährlichen Kosten (Annuität) auch pro Platzkilometer ausgewiesen.

Die relative Vorteilhaftigkeit des Dieselmotors im betriebswirtschaftlichen Vergleich gilt auch bezogen auf die angebotenen Platzkilometer. Da im Untersuchungsfall Dieselmotor weniger Platzkilometer als beim Hybridoberleitungsbus angeboten werden, relativiert sich die Vorteilhaftigkeit jedoch deutlich gegenüber den Hybridoberleitungsbusvarianten.

Im Vergleich der Untersuchungsfälle mit Strom angetriebenen Fahrzeugen zeigt sich, dass die Ergebnisse relativ nah beieinander liegen, insbesondere angesichts der teilweisen noch unsicheren Annahmen zur weiteren Entwicklung der Batterie- und Fahrzeugtechnologie und der entsprechenden Erzeugerpreise.

Bezogen auf die angebotenen Platzkilometer weist der Batterie-Oberleitungsbus unter den heute als realistisch getroffenen Annahmen jedoch einen signifikanten Kostenvorteil auf. Im Ergebnis der projektspezifischen Lebenszykluskostenbetrachtung sind die auf den **Platzkilometer bezogenen Annuitäten** des HOusses und des Dieselmotors in vergleichbarer Höhe und bis zu 22% günstiger als bei den Elektrobussen in der Ausführung als Depot- und Gelegenheitslader. Wesentliche Gründe dafür liegen im geringeren Fahrzeugbedarf und einer geringeren Fahrleistung des HOussesystems, da keine zusätzlichen Ladezeiten an den Endstellen oder im Depot erforderlich sind. Die Lebenszeit der Fahrzeuge ist mit 16 Jahren beim HOBus höher als bei den Depot- und Gelegenheitsladern (12 Jahre). Bei den Depot- und Gelegenheitsladern fallen wegen der erforderlichen Batteriegrößen zudem höhere Kosten beim Auswechseln der Batterien an (Lebenszeit der Batterien: ca. 6 Jahre). Darüber hinaus bietet das HOussystem durch den Einsatz von Doppelgelenkbussen eine sehr hohe Kapazität und Leistungsfähigkeit, was sich günstig auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt.

Tabelle 6-24: LCC-Analyse - Kapitalwert & Annuität Szenario C

	Einheit	HOBus Szenario C
<b>Kapitalwert (30a)</b>		
Fahrzeuge (Investition/Erneuerung)	TEUR	- 213.451
Infrastruktur (Investition/Erneuerung)	TEUR	- 89.071
Jährlich anfallende Kosten Betrieb und Unterhaltung Infrastruktur	TEUR	- 557.103
<b>Kapitalwert (30a)</b>	<b>TEUR</b>	<b>- 859.626</b>
<b>Annuitätenmethode</b>		
Fahrzeuge (Investition/Erneuerung)	TEUR/a	- 9.505
Infrastruktur (Investition/Erneuerung)	TEUR/a	- 3.966
Jährlich anfallende Kosten Betrieb und Unterhaltung Infrastruktur	TEUR/a	- 24.807
<b>Annuität</b>	<b>TEUR/a</b>	<b>- 38.278</b>
<b>Annuität je Platz-km</b>	<b>ct/Platz-km</b>	<b>-3,248</b>

Die Ergebnisse des Szenario C werden getrennt ausgewiesen, da sie aufgrund des betrachteten Liniennetzes nicht mit den Kosten der anderen Szenarien vergleichbar sind.

Das Szenario C hat im Vergleich zu andere Untersuchungsfällen den geringsten Kapitalwert und die geringste Annuität, da in dieser Berechnung die Betrachtung des Straßenbahnbaus und -betriebs nicht enthalten ist.

Die Ergebnisse sind für den Fall eines Straßenbahnausbaus Spandau relevant und mit diesem im Zusammenhang zu sehen.

#### 6.4.4.4 Sensitivitätsbetrachtungen

Um die Ergebnisse abzusichern wurden verschiedene Sensitivitätsbetrachtungen durchgeführt. Insbesondere wurden Annahmen zur Nutzungsdauer der Fahrzeuge und der Batterien variiert. Darüber hinaus wurde der angenommene Restwert der Batterien (nach einer Nutzungsdauer von 6 Jahren) sensitiv auf 0 gesetzt, um die Effekte auf die Wirtschaftlichkeit abzubilden. Auch die Annahme zum Fahrzeugmehrbedarf bei den Depotladern wurde von 20% auf 15 % herabgesetzt, um eine mögliche technologische Entwicklung sensitiv zu antizipieren.

Tabelle 6-25: LCC-Analyse - Sensitivitätsbetrachtungen

Annuität [ct pro Platzkilometer]	Elektrobus (Depot- lader)	Elektrobus (Gelegen- heitslader)	HObus Szenario A	HObus Szenario B	HObus Szenario C reduzier- tes Netz
<b>Basisrechnung</b>	-3,827	-3,648	-3,340	-3,297	-3,248
Sensitivität: Fahrzeugmehrbedarf Depotlader 20% -> 15%	-3,763				
Sensitivität: Restwert Batterie 25% -> 0	-3,973	-3,783	-3,372	-3,329	-3,279
Sensitivität: Nutzungsdauer Batterie für HObus 6 -> 8 Jahre			-3,314	-3,270	-3,222
Sensitivität: Nutzungsdauer Fahrzeug für HObus 16 -> 18 Jahre			-3,274	-3,231	-3,191
Sensitivität: Nutzungsdauer Fahrzeug für HObus 16 -> 12 Jahre			-3,537	-3,494	-3,414
Sensitivität: Umrechnungs- faktor von Tag zu Jahr 365 -> 320	-4,031	-3,842	-3,530	-3,481	-3,423
Sensitivität: Platzkapazität HObus: Doppelgelenkbus 130 Plätze -> 156 Plätze pro Fahrzeug (Gesamtplatzzahl)			-3,093	-3,053	-3,160

Insgesamt zeigt sich, dass die Ergebnisse auch bei der Variation der genannten Annahmen stabil sind. Die relative Vorteilhaftigkeit des HObusses gegenüber den anderen elektrischen Antriebstechnologien bleibt, bezogen auf den Wirtschaftlichkeitsindikator jährliche Kosten pro Platzkilometer auch unter ungünstigeren Annahmen erhalten.

Da die Annahme zur Gesamtplatzzahl des HO-Doppelgelenkbusses mit 130 Plätzen/Bus im Vergleich mit den Herstellerangaben eher vorsichtig ist, wurde auch hierzu eine Sensitivitätsrechnung ergänzt. Bei der Annahme von 4 Personen/m<sup>2</sup> für die Stehplatzfläche (analog zu den Gefäßgrößen der Vergleichsvarianten) ergeben sich für einen Doppelgelenkbus 156 Gesamtplätze. Daraus resultieren spezifische Annuitäten für die Szenarien A/B/C von: 3.09 / 3.05 / 3.16 ct pro Platz-km.

Aus wirtschaftlicher Sicht ist damit festzuhalten, dass der HObus für die untersuchte Verkehrsleistung im Untersuchungsgebiet zu empfehlen ist.

Die nachfolgende Tabelle stellt die wesentlichen Kenngrößen zum Mengengerüst und die wesentlichen Ergebnisse aus der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung überblicksartig zusammen.

Tabelle 6-26: Wesentliche Ergebnisse Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

	Einheit	Dieselbus	Elektrobus (Depotlader)	Elektrobus (Gelegenheitslader)	HObus Szenario A	HObus Szenario B	HObus Szenario C
<b>Fahrzeugbedarf</b>							
Anzahl Fahrzeuge	Stück	187	223	205	187	187	reduziertes Netz 129
Anzahl Solo-/Doppelstock-/Gelenk-/Doppelgelenkbusse	Stück	10/61/116/0	12/0/211/0	11/0/194/0	0/0/113/74	0/0/113/74	0/0/113/16
Neupreis Fahrzeuge (inkl. Batterie) nach Solo-/Doppelstock-/Gelenk-/Doppelgelenkbusse	TEUR/Fahrzeug	270/450/350/-	625/-/834/-	624/-/833/-	-/-/832/1272	-/-/832/1272	-/-/832/1272
<b>Anteil Oberleitung</b>							
Anteil Oberleitung	% (betr. Netzlänge)				0,84	0,63	0,54
<b>Betriebliche Kenngrößen</b>							
Anzahl Linien	Stück	14	14	14	14	14	9
Fahrleistung	Mio. Fzg km/a	15,45	16,22	15,45	15,45	15,45	11,51
Platzkilometer	Mio. Platz-km/a	1.576	1.469	1.505	1.690	1.690	1.178
<b>Investitionen</b>							
Fahrzeuge inkl. Batterie	TEUR/a	70.750	183.474	168.466	188.144	188.144	114.368
Infrastruktur	TEUR/a		13.962	30.000	137.100	121.328	95.412
Summe	TEUR/a	70.750	197.436	198.466	325.244	309.472	209.780
<b>Jährlich anfallende Kosten</b>							
Unterhaltung Infrastruktur	TEUR/a		145	444	1.146	995	762
Betriebskosten	TEUR/a	35.631	35.607	34.861	34.281	34.281	24.045
Summe jährliche Kosten	TEUR/a	35.631	35.752	35.304	35.427	35.276	24.807
Jährliche Kosten je Platz-km	ct/Platz-km	2,261	2,424	2,316	2,028	2,028	2,040
<b>Kenngrößen zur Wirtschaftlichkeit</b>							
Kapitalwert (30a)	TEUR	- 966.988	- 1.262.127	- 1.233.066	- 1.268.052	- 1.251.613	- 859.626
Annuität	TEUR/a	- 43.058	- 56.201	- 54.907	- 56.464	- 55.732	- 38.278
Annuität je Platz-km	ct/Platz-km	-2,732	-3,827	-3,648	-3,340	-3,297	-3,248

## 7 Nachhaltigkeit

Die BVG betreibt das größte Busnetz in Deutschland. Im Rahmen der #BerlinSteigtUm Strategie der BVG werden die Rahmenbedingungen auf Basis des Berliner Mobilitätsgesetzes und des Nahverkehrsplans für eine umweltfreundliche Mobilität in Berlin dargestellt. Ein Pfad der Strategie ist die Umstellung der Motorisierung von Verbrennungsmotoren hin zu elektrischen Antrieben. Ziel ist es, bis 2030 eine 100% lokal emissionsfreie Busflotte zu betreiben.

Mit einem Umstieg vom Dieselbetrieb auf elektrisch betriebene Fahrzeuge kann der Ausstoß an klimarelevanten Emissionen (vor allem CO<sub>2</sub>) und sonstigen Luftschadstoffen (beispielsweise die Stickstoffe NO<sub>x</sub>, bei dem in vielen Städten Grenzwerte überschritten werden) deutlich reduziert werden.

Mit der vorliegenden Machbarkeitsstudie wird eine Umstellung des Busnetzes in Berlin-Spandau auf elektrische betriebene Hybridoberleitungsbusse geprüft. In den Szenarien A und B werden 187 dieselbetriebene Busse durch Hybridoberleitungsbusse ersetzt, mit einer Betriebsleistung von 15,5 Mio. Fahrzeugkilometer pro Jahr. In Szenario C, in dem ein Teil des Busnetzes durch Straßenbahnen ersetzt wird, werden 129 Dieselbusse durch Hybridoberleitungsbusse ersetzt – insgesamt mit 11,5 Mio. Fahrzeugkilometer pro Jahr. Im Vergleich mit anderen Städten mit (Hybrid-)Oberleitungsbusen würde Berlin damit europaweit zu den Städten mit den größten (Hybrid-)Oberleitungsbusnetzen zählen.

Auf der Basis der Modellrechnungen lassen sich Wirkungen bei Treibhausgas-Emissionen und im Primär- und Endenergieverbrauch ermitteln. Berücksichtigt werden direkte Emissionen und Verbräuche für den Betrieb der Fahrzeuge sowie indirekte Emissionen und Verbräuche, die bei der Energieerzeugung, dem Herstellen und Transport des Stroms bzw. Kraftstoffs, freigesetzt werden.

Im Rahmen des Projektes wird eine Betrachtung der gesamten Wirkkette für die Fortbewegung (Well-to-Wheel) vorgenommen. Primäres Ziel der Nachhaltigkeitsbewertung ist die Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzials der verschiedenen Technologiealternativen. Nicht quantifiziert werden Emissionen beim Bau und Betrieb der Infrastruktur.

Ergänzend zur Ermittlung des CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzials wird als ein Eckwert zur Luftreinhaltung die Stickstoffbilanz (NO<sub>x</sub>) der Dieselbusse ermittelt.

Bei einer Umstellung von Diesel- auf Hybridoberleitungsbus-Betrieb ist darüber hinaus davon auszugehen, dass die Lärmbelastung entlang des Busnetzes sinkt. Nach [109] sind Elektroantriebe wesentlich leiser als Verbrennungsmotoren und bei den im Stadtverkehr üblichen Geschwindigkeiten ist das Motorgeräusch der Busse maßgebend. Eine Abschätzung der Auswirkungen kann im Rahmen der Machbarkeitsstudie nicht erfolgen.

## 7.1 Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>eq)

Wesentliche Eingangsgröße zur Ermittlung der Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>eq) ist der Energieverbrauch zur Durchführung des Betriebs. Über den Energieverbrauch und spezifische Emissionsraten werden die Treibhausgasemissionen je Untersuchungsfall bestimmt.

Darüber hinaus werden zur Bestimmung der Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>eq) die Emissionen bei der Fahrzeugherstellung berücksichtigt.

Für die Untersuchungsfälle der Elektrobusse und den Hybridoberleitungsbussen werden zusätzlich die Emissionen bei der Batterieherstellung ermittelt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Angaben zu Emissionen, die bei der Batterieproduktion entstehen, stark variieren und je nach Zellchemie sowie Energiedichte weit auseinanderliegen. Um die Unsicherheit abzubilden erfolgt eine Betrachtung mit einer unteren und oberen Grenze.

Die Emissionsberechnungen erfolgen nach umfangreicher Datenrecherche und Abstimmung im Arbeitskreis unter folgenden Annahmen:

Tabelle 7-1: CO<sub>2</sub>-eq Emissionsraten

	Einheit	CO <sub>2</sub> eq
<b>Fahrzeugherstellung</b>		
Eindecker	t/Fahrzeug	85
Gelenkbus	t/Fahrzeug	120
Doppeldecker	t/Fahrzeug	120
Doppelgelenk	t/Fahrzeug	150
<b>Batterieherstellung</b>		
untere Grenze	t/kWh	0,075
oberer Grenze	t/kWh	0,15
<b>Fahrzeugbetrieb</b>		
Diesel	kg/kWh	0,334
Strom 2016	kg/kWh	0,527
Strom 2030	kg/kWh	0,192
Ökostrom	kg/kWh	0

Die berücksichtigten Ansätze zu den Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>eq) bei der Fahrzeugherstellung und im Fahrzeugbetrieb in Tabelle 7-1 werden aus der „Machbarkeitsstudie von HObusverkehr in Deutschland – am Beispiel Marburg und Trier“ übernommen [128].

Zur Berechnung des Energiegehaltes von Dieselmotorkraftstoff wird auf das Lehrbuch „Chemie für Ingenieure“ von Jan Hoinkis und Eberhard Lindner verwiesen. Dort wird ein Heizwert (LHV) von 43,0 MJ/kg angegeben. Laut DIN EN 590 darf Dieselmotorkraftstoff eine minimale

Massedichte von 820 kg/m<sup>3</sup> (gleich 0,82 kg/L) bei 15 Grad Celsius haben. Daraus ergibt sich ein Energiegehalt von ziemlich genau 9,8 kWh/L (1kWh gleich 3,6 MJ).

Quellen:

Hoinkis, Jan; Lindner, Eberhard [ Autor/In ] Chemie für Ingenieure - [12. Aufl. ], Weinheim [u.a.]: Wiley-VCH, 2001 12. Aufl.

DIN EN 590: 2017-08 Kraftstoffe-Dieselmotoren-Anforderungen und Prüfverfahren, Deutsche Fassung, Deutsches Institut für Normung e.V.

Für die Treibhausgaswirkung in der Batterieproduktion wird, auch in Anbetracht der Umsetzung in frühestens 2-3 Jahren, ein Standardwert von 150kg CO<sub>2</sub>eq/kWh angesetzt. Als untere Grenze werden 75kg CO<sub>2</sub>eq/kWh angenommen.

*In Schrader (2017) werden die Angaben aus verschiedenen Quellen bezüglich der CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Kilowattstunde Speicherkapazität der Batterie mit 110 bis 200 kg angegeben. Dies deckt sich auch mit anderen Studien (siehe die Angabe von 150 bis 200 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh in der Metastudie von Romare et al. (2017)). In einer aktuellen Studie (Regett et al. 2019), die sich sehr ausführlich mit der THG-Bilanzierung von Fahrzeugbatterien auseinandersetzt, werden Werte von 62 bis 212 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh angegeben. Beim ICCT (2018) variieren die Werte auf Basis einer aktuellen Literaturliteraturauswertung von 30 bis 494 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh, wobei die meisten Studien Werte von 100 bis 200 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh ausweisen.*

Quelle: <https://www.isi.fraunhofer.de/de/presse/2019/presseinfo-07-elektroautos-klimabilanz.html> - Seite 7 (bzw. 10 im pdf)

Zu ähnlichen Ergebnissen kommt auch das ifeu: <https://www.agora-verkehrswende.de/presse/newsuebersicht/elektroautos-beschleunigen-den-klimaschutz-von-jahr-zu-jahr-mehr/> (Seite 20ff).

Festzuhalten ist, dass die Werte in der Literatur stark schwanken und hierzu nur eine Annäherung über eine Bandbreite möglich erscheint.

Hinsichtlich des anzusetzenden Strommixes wird zur Darstellung der unterschiedlichen Entwicklungspfade ebenfalls mit einer Bandbreite gearbeitet. Für eine obere Abschätzung der Treibhausgaswirkung wird der Strommix 2030 angesetzt [128], da in Berlin bereits heute „grüner Strom“ verwendet wird. Zusätzlich erfolgt ein Ansatz für emissionsfreien Ökostrom.

Die Emissionsraten werden auf die Mengengerüste der Untersuchungsfälle angewendet. Die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungsfälle zeigt folgende Tabelle.

Tabelle 7-2: Umweltwirkungen Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>eq)

	Einheit	Diesel- bus	Elektrobus (Depotlader)	Elektrobus (Gelegen- heitslader)	Hybrid-Oberleitungs- bus	
					Szenario A	Szenario B
<b>Emissionen Herstel- lung / pro Jahr</b>						
Doppelgelenkbus	t CO <sub>2</sub> eq/a				694	694
Gelenkbus	t CO <sub>2</sub> eq/a	1.392	2.110	1.940	848	848
Doppeldecker	t CO <sub>2</sub> eq/a	610	0	0		
Standardbus	t CO <sub>2</sub> eq/a	85	85	78		
Batterie min	t CO <sub>2</sub> eq/a		1.131	535	168	168
Batterie max	t CO <sub>2</sub> eq/a		2.261	1.070	337	337
<b>Summe min</b>	<b>t CO<sub>2</sub>eq/a</b>	<b>2.087</b>	<b>3.326</b>	<b>2.553</b>	<b>1.710</b>	<b>1.710</b>
<b>Summe max</b>	<b>t CO<sub>2</sub>eq/a</b>	<b>2.087</b>	<b>4.456</b>	<b>3.088</b>	<b>1.878</b>	<b>1.878</b>
<b>Betrieb</b>						
Energieverbrauch	MWh/a	79.009	42.194	40.185	40.610	40.610
Diesel	t CO <sub>2</sub> eq/a	26.391				
Strom / Kraftwerkpark 2030	t CO <sub>2</sub> eq/a		8.101	7.716	7.797	7.797
Ökostrom	t CO <sub>2</sub> eq/a		0	0	0	0
<b>Gesamtsumme min (Strom 2030)</b>	<b>t CO<sub>2</sub>eq/a</b>	<b>28.478</b>	<b>11.427</b>	<b>10.268</b>	<b>9.507</b>	<b>9.507</b>
<b>Gesamtsumme min (Strom 2030) je Platz-km</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>eq/a/ Platz-km</b>	<b>18,071</b>	<b>7,781</b>	<b>6,822</b>	<b>5,624</b>	<b>5,624</b>
<b>Gesamtsumme max (Strom 2030)</b>	<b>t CO<sub>2</sub>eq/a</b>	<b>28.478</b>	<b>12.557</b>	<b>10.803</b>	<b>9.675</b>	<b>9.675</b>
<b>Gesamtsumme max (Strom 2030) je Platz-km</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>eq/a/ Platz-km</b>	<b>18,071</b>	<b>8,550</b>	<b>7,177</b>	<b>5,723</b>	<b>5,723</b>
<b>Gesamtsumme min (Ökostrom)</b>	<b>t CO<sub>2</sub>eq/a</b>	<b>28.478</b>	<b>3.326</b>	<b>2.553</b>	<b>1.710</b>	<b>1.710</b>
<b>Gesamtsumme min (Ökostrom) je Platz- km</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>eq/a/ Platz-km</b>	<b>18,071</b>	<b>2,264</b>	<b>1,696</b>	<b>1,011</b>	<b>1,011</b>
<b>Gesamtsumme max (Ökostrom)</b>	<b>t CO<sub>2</sub>eq/a</b>	<b>28.478</b>	<b>4.456</b>	<b>3.088</b>	<b>1.878</b>	<b>1.878</b>
<b>Gesamtsumme max (Ökostrom) je Platz- km</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>eq/a/ Platz-km</b>	<b>18,071</b>	<b>3,034</b>	<b>2,051</b>	<b>1,111</b>	<b>1,111</b>
<b>min. Reduktion CO<sub>2</sub> ggü. Diesel</b>	<b>Strommix 2030</b>		<b>- 60%</b>	<b>- 64%</b>	<b>- 67%</b>	<b>- 67%</b>

	Einheit	Diesel- bus	Elektrobus (Depotlader)	Elektrobus (Gelegen- heitslader)	Hybrid-Oberleitungs- bus	
					Szenario A	Szenario B
min. Reduktion CO <sub>2</sub> ggü. Diesel	Ökostrom		- 88%	- 91%	- 94%	- 94%

Die Tabelle 7-2 zeigt, dass der Dieselbus in der Herstellung die geringsten CO<sub>2</sub>-Emissionen erzeugt, insbesondere da keine Batterie benötigt wird und kleinere Fahrzeuge als bei den Szenarien mit Hybridoberleitungsbus eingesetzt werden. Aufgrund der vergleichsweise geringen Batterieausstattung zeigt auch der Hybridoberleitungsbus in der Herstellung noch deutliche Vorteile gegenüber dem Elektrobus. Zusätzlich wirkt sich beim Hybridoberleitungsbus die längere Nutzungsdauer der Fahrzeuge (ohne Batterie) günstig auf die jährlichen Emissionen der Fahrzeugherstellung aus.

Für die Emissionen des Betriebs sind die Emissionsraten der verwendeten Kraftstoffe ausschlaggebend. Im Betrieb entstehen beim Dieselbus mit 26.391 t CO<sub>2</sub> pro Jahr die höchsten Werte hinsichtlich der CO<sub>2</sub> Emissionen. Hybridoberleitungsbusse sowie Gelegenheitslader liegen deutlich darunter. Von hoher Bedeutung ist hierbei aber die Entwicklung des Strommixes. Unter der Annahme eines Strommixes 2030 wird eine Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes auf rund 30% im Vergleich zum Dieselbusbetrieb erreicht.

Tabelle 7-3: Umweltwirkungen Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>eq) - Szenario C

	Einheit	HObus Szenario C
<b>Emissionen Herstellung / pro Jahr</b>		
Doppelgelenkbus	t CO <sub>2</sub> eq/a	150
Gelenkbus	t CO <sub>2</sub> eq/a	848
Doppeldecker	t CO <sub>2</sub> eq/a	
Standardbus	t CO <sub>2</sub> eq/a	
Batterie min	t CO <sub>2</sub> eq/a	116
Batterie max	t CO <sub>2</sub> eq/a	232
<b>Summe min</b>	<b>t CO<sub>2</sub>eq/a</b>	<b>1.114</b>
<b>Summe max</b>	<b>t CO<sub>2</sub>eq/a</b>	<b>1.230</b>
<b>Betrieb</b>		
Energieverbrauch	MWh/a	26.325
Diesel	t CO <sub>2</sub> eq/a	
Strom / Kraftwerkpark 2030	t CO <sub>2</sub> eq/a	5.054

	Einheit	HObus Szenario C
Ökostrom	t CO <sub>2</sub> eq/a	0
<b>Gesamtsumme min (Strom 2030)</b>	<b>t CO<sub>2</sub>eq/a</b>	<b>6.168</b>
<b>Gesamtsumme min (Strom 2030) je Platz-km</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>eq/a/ Platz-km</b>	<b>5,234</b>
<b>Gesamtsumme max (Strom 2030)</b>	<b>t CO<sub>2</sub>eq/a</b>	<b>6.284</b>
<b>Gesamtsumme max (Strom 2030) je Platz-km</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>eq/a/ Platz-km</b>	<b>5,332</b>
<b>Gesamtsumme min (Ökostrom)</b>	<b>t CO<sub>2</sub>eq/a</b>	<b>1.114</b>
<b>Gesamtsumme min (Ökostrom) je Platz-km</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>eq/a/ Platz-km</b>	<b>0,945</b>
<b>Gesamtsumme max (Ökostrom)</b>	<b>t CO<sub>2</sub>eq/a</b>	<b>1.230</b>
<b>Gesamtsumme max (Ökostrom) je Platz-km</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>eq/a/ Platz-km</b>	<b>1,043</b>
<b>min. Reduktion CO<sub>2</sub> ggü. Diesel</b>	<b>Strommix 2030</b>	<b>-78%</b>
<b>min. Reduktion CO<sub>2</sub> ggü. Diesel</b>	<b>Ökostrom</b>	<b>-96%</b>

Die Ergebnisse des Szenario C werden getrennt ausgewiesen, da sie aufgrund des betrachteten kleineren Liniennetzes nicht mit anderen Szenarien vergleichbar sind.

Die Treibhausgase (CO<sub>2</sub>eq) des Szenario C sind im Vergleich zu den Emissionen der Antriebstechnologien in der

Tabelle 7-3 am geringsten, da in diesem Szenario ein Teil des Netzes für den Straßenbahnbetrieb ausgebaut wird und das Netz des Batterie-Oberleitungsbusses deshalb kleiner ist. Bei Szenario C ist zu beachten, dass die Emissionen des Straßenbahnbaus und -betriebs noch hinzukommen.

## 7.2 NO<sub>x</sub> Bilanz

Zusätzlich zu den klimarelevanten Emissionen wird als Kennwert für die Luftreinhaltung eine NO<sub>x</sub> Bilanz erstellt. Bisher führen Stickoxide auch in Berlin zu Problemen, da die vorgegebenen Grenzwerte nicht überall eingehalten werden.

Bei den derzeit eingesetzten Dieselbusflotten stellen die Stickoxid-Emissionen oft ein Problem dar. Bei Hybridoberleitungsbussen werden beim Betrieb vor Ort keine Stickoxide ausgestoßen. Dies trägt im Einzugsbereich zur Luftreinhaltung bei.

Für die Antriebstechnologie der Dieselbusse werden als ein Eckwert zur Luftreinhaltung Stickoxide (NO<sub>x</sub>) berechnen. Das Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA) gibt für das Jahr 2017 einen NO<sub>x</sub>-Wert von 5,514 g/km an. Für das Jahr 2030

reduziert sich laut HBEFA der  $\text{NO}_x$ -Wert auf 0,646 g/km.[104] Daraus ergeben sich Stickoxidbelastungen aus dem betrachteten Dieselbusbetrieb, wie in der Tabelle 7-4 dargestellt.

Tabelle 7-4:  $\text{NO}_x$  Bilanz Dieselbus

	Einheit	Dieselbus
$\text{NO}_x$ Bilanz		
Laufleistung	1000 km/a	15.446
Diesel 2017	kg/a	85.171
Diesel 2030	kg/a	9.978

Mit Bezugsjahr 2017 kann der  $\text{NO}_x$ -Ausstoß in Berlin-Spandau durch die Umstellung von Dieseln auf Hybridoberleitungsbusse in erheblichem Umfang reduziert werden. Langfristig gesehen ist davon auszugehen, dass sich der Vorteil aufgrund des Einsatzes emissionsärmerer Dieseln deutlich reduzieren wird.

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN 50119:2014-01 (VDE 0115-601): Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen - Oberleitungen für den elektrischen Zugbetrieb
- [2] DIN EN 50122-1:2017-10 (VDE 0115-3): Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen - Elektrische Sicherheit, Erdung und Rückleitung - Teil 1: Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag
- [3] DIN EN 50153:2018-01 (VDE 0115-2): Bahnanwendungen - Fahrzeuge - Schutzmaßnahmen in Bezug auf elektrische Gefahren
- [4] DIN EN 50163:2005-07 (VDE 0115-102): Bahnanwendungen - Speisespannungen von Bahnnetzen
- [5] DIN EN 50502:2016-03 (VDE 0115-502): Bahnanwendungen - Fahrzeuge - Elektrische Ausrüstung in Obussen - Sicherheitsanforderungen und Stromabnehmersysteme
- [6] Weise, Durth u.a.: Straßenbau – Planung und Entwurf; 3. Auflage, Verlag für Bauwesen, Berlin 1997
- [7] Gerstenberg, Lehmann, Zauner: Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen; in: Elektrische Bahnen 8-9/2012, Seite 452-460
- [8] Bühs, Keil, Lehmann: Stromabnehmer für schwere Nutzfahrzeuge; in: Elektrische Bahnen 4/2013; Seite 249-256
- [9] Brodkorb, A.: Truck Trolley System; Vortrag Siemens AG 2014
- [10] Bernhardt, Sauer, Hendrix: Ermittlung des Energiebedarfs zur Bewegung von Fahrzeugen in mikroskopischen Verkehrssimulationen; in: Wissenschaftliche Beiträge TH Wildau, Januar 2015, S. 29-37
- [11] Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung vom 11. Dezember 1987 (BGBl. I S. 2648), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 16. Dezember 2016 (BGBl. I S. 2938) geändert worden ist („BOStrab“)
- [12] Projektplakat „eBus Skorpion – Elektrobus im Südraum Leipzig“; Westsächsische Hochschule Zwickau, 2016
- [13] Kiepe Elektrik GmbH: Obus-Stromabnehmer; Druckschrift 12SA2DEI, Düsseldorf 2002
- [14] Die Omnibusflotte der BVG, BVG 2016

- [15] Schwertner, M.: Energetischer Systemvergleich von Diesel-, Hybrid- und Elektrobussen; 2017
- [16] Frenzel, A.: Elektrobussysteme – Technologiebetrachtung und daraus resultierende Chancen und Risiken für Verkehrsunternehmen; 2014
- [17] E-Mobilität: Welche Rolle kann der Trolleybus spielen; in: Der Nahverkehr, Juni 2018, S. 54-63
- [18] E-Bus Standard „Ansätze zur Standardisierung und Zielkosten für Elektrobusse“, Fraunhofer IVI 2017
- [19] Optimierung des Oberleitungsnetzes bei einer Elektrifizierung des Busverkehrs mittels In Motion Charging am Beispiel der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG); Fabien Laurent; 2017
- [20] BBG Barnimer Busgesellschaft mbH: Fahrplan 861 gültig ab 12.02.2018. online
- [21] BBG Barnimer Busgesellschaft mbH: Fahrplan 862 gültig ab 12.02.2018. online
- [22] BMVI (Hrsg.): Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung 2018.
- [23] Bombardier Transportation: Datenblatt Primove Lommel. online
- [24] Bühlow, H.: Die Obus-Stadt-Eberwalde
- [25] Dongfeng Yangtse (Hrsg.): Trolleybusses. <http://en.yzjqc.com/index.php/Index/pru/aid/45>
- [26] Google (Hrsg.): Google Maps
- [27] Global World Logistic Ltd (Hrsg.): WB-LYP100AHA LiFeYPO4 (3.2V/100Ah TALL). <https://www.ev-power.eu/Winston-40Ah-200Ah/WB-LYP100AHA-LiFeYPO4-3-2V-100Ah-TALL.html>
- [28] Hondius, H.: Der Trolleybus-Hybridbetrieb in Esslingen. stadtkverkehr 6/17 (62. Jg.) S. 20 ff.
- [29] Hondius, H.: E-Mobilität: Welche Rolle kann der Trolleybus spielen? Der Nahverkehr 6/2018
- [30] Kiebler, R.: Der Obus- und DuObus-Betrieb in Esslingen am Neckar. <http://www.obus-es.de/netz.htm>
- [31] Kiepe Electric (Hrsg.): Esslingen, Batteriegelenkbus mit IMC 500

- [32] Kiepe Electric (Hrsg.): In Motion Charging (IMC®)-Busse - Referenzen . <http://www.kiepe.knorr-bremse.com/elektrobusse/trolleybusse-in-motion-charging/vkproduktordner.2008-05-14.2954039772>
- [33] Klamann, S.: Obus rollt tiefer nach Finow hinein. <https://www.moz.de/landkreise/barnim/eberswalde/artikel4/dg/0/1/1399169/>
- [34] Lehmann, J.: Die 5.Generation - Die ersten vier BatterieOberleitungsBusse (BOB) der Firmen Solaris/Kiepe-Electric. <http://obus269rb.bplaced.net/s259BOB.pdf>
- [35] Lehmann, J.: Zusammenfassung der Meldungen von TrolleyMotion 01.03.2018 bis 31.05.2018 . <http://trolleyemotion.bplaced.net/okb112.pdf>
- [36] ElektroMobilität NRW (Hrsg.): Elektrobusse in NRW - Marktübersicht und -entwicklungen. [https://www.elektromobilitaet.nrw.de/fileadmin/Daten/Download\\_Dokumente/Brosch%C3%BCre\\_E-Busse\\_\\_in\\_NRW\\_2016.pdf](https://www.elektromobilitaet.nrw.de/fileadmin/Daten/Download_Dokumente/Brosch%C3%BCre_E-Busse__in_NRW_2016.pdf)
- [37] Petersson, V.: Europas erster Hybrid-Obus rollt. <https://www.moz.de/landkreise/barnim/eberswalde/artikel4/dg/0/1/1027645/>
- [38] Pütz, R. et Al.: Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVI in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffen und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima
- [39] Rohlf, W.: Electrification of bus routes with ebuses & fast charging stations – in case of no overhead wires
- [40] SVE (Hrsg.): Fahrplan 118
- [41] SVE (Hrsg.): Fahrplan 113
- [42] Stadtwerke Solingen (Hrsg.): Verkehrsbetrieb mit Weltruf. <http://www.sobus.net/die-sws/>
- [43] Stadtwerke Solingen: Fahrplan 695 Ri. Abteiweg
- [44] Stadtwerke Solingen: Fahrplan 695 Ri. Meigen
- [45] Stadtwerke Solingen (Hrsg.): Bob - Batterie Oberleitungsbus. <https://www.bob-solingen.de/>
- [46] TROLLEY (Hrsg.): Trolley - Promoting Electric Public Transport Teil A
- [47] TROLLEY (Hrsg.): Trolley - Promoting Electric Public Transport Teil B

- [48] Uhl, A.: Quartier-eBus: Die VBZ setzen Elektrifizierungsstrategie fort. [https://www.stadt-zuerich.ch/vbz/de/index/die\\_vbz/medien/medienmitteilungen/quartier-ebus--die-vbz-setzen-elektrifizierungsstrategie-fort.html](https://www.stadt-zuerich.ch/vbz/de/index/die_vbz/medien/medienmitteilungen/quartier-ebus--die-vbz-setzen-elektrifizierungsstrategie-fort.html)
- [49] VBZ (Hrsg.): «SwissTrolley plus» – ein Batterie-Trolleybus. <https://www.swisstrolleyplus.ch>
- [50] Walther, C.: Ein BOB für Solingen. Stadtverkehr 5/18 (63. Jg.) S. 6 ff.
- [51] Werwitzke, C.: Städtischer Verkehrsbetrieb Esslingen wird rein elektrisch. <https://www.electrive.net/2017/07/25/esslinger-verkehrsbetrieb-wird-rein-elektrisch/>
- [52] Wruck, F. Et al.: Eberswalde Use Case set up Report Pillar A. ELIPTIC - electricification of public transport in cities
- [53] Wruck, F. Et al.: Eberswalde Final Use Case Report .ELIPTIC - electricification of public transport in cities
- [54] Kompendium: Li - Ionen - Batterien Im BMWi Förderprogramm IKT Für Elektromobilität II: Smart Car Smart Grid Smart Traffic Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze Und Normen Stand: Juli 2015
- [55] Lithium-Ionen-Batterietechnologie; Vortrag an der Hochschule RheinMain Rüsselsheim, 03.Juni 2016, Dr. Jochen Mähliß, [www.batteryuniversity.eu](http://www.batteryuniversity.eu)
- [56] DIN 43539 Teil4; 9 „Akkumulatoren; Prüfungen; Ortsfeste Zellen und Batterien“
- [57] „Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030“; Fraunhofer – Institut für System - und Innovationsforschung I S I; Karlsruhe Dez. 2015
- [58] „Energiespeicher-Roadmap (Update 2017)“; Fraunhofer – Institut für System - und Innovationsforschung I S I; Karlsruhe Dez. 2017
- [59] „Batteriesysteme für Schienentriebzüge“; VDE Studie 27. August 2018
- [60] VDV-Schrift 230/1, 03/2018, Rahmenempfehlung für elektrisch betriebene Stadt-Niederflur-Linienbusse (E-Bus)
- [61] <https://www.windkraft-journal.de/2018/08/16/kit-szenario-2050-lithium-und-kobalt-koennten-knapp-werden/126076>; 16.08.2018, „KIT: Szenario 2050: Lithium und Kobalt könnten knapp werden“
- [62] <https://www.bmbf.de/de/lithium-aus-deutschland-nachhaltig-und-kostenguenstig-5576.html>; 05.02.2018; „Lithium aus Deutschland: nachhaltig und kostengünstig“

- [63] \* Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit; 18.04.2017 | Webseite „Umweltbilanz der Elektromobilität - Erneuerbare Energien tanken“; „Strom- und Ressourcenbedarf von Elektromobilität (PDF barrierefrei, 662 KB)“
- [64] Biesenack, H.; George, G.; Hofmann, G.: Energieversorgung elektrischer Bahnen. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag, 2006.
- [65] Kießling, F.; Puschmann, R.; Schmieder, A.; Schmidt, P.: Fahrleitungen elektrischer Bahnen, Planung, Berechnung, Ausführung. Stuttgart, Leipzig: B.G. Teubner Verlag, 1998.
- [66] Kießling, F.; Puschmann, R.; Schmieder, A.: Fahrleitungen elektrischer Bahnen, Planung, Berechnung, Ausführung, Betrieb. Erlangen: Publicis Publishing, 2014.
- [67] Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. <https://www.zvei.org/verband/fachverbaende/fachverband-batterien/wo-liegt-eigentlich-der-unterschied-zwischen-einer-batterie-und-einem-akku/>
- [68] Auf der Maur, A.; Rommerskirchen, S.; Strassburg, S. (2015): Aktualisierung des Referenzszenarios für die Einsparpotenziale der Treibhausgas-Emissionen und des Endenergieverbrauchs im Verkehr für die Zeithorizonte 2020 und 2050 – Aktualisierung der Prognoseergebnisse sowie Abschätzung und Bewertung politischer Maßnahmen. Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Basel: Prognos AG (vertraulich)
- [69] Berliner Verkehrsbetriebe: Lageplan Omnibusbetriebshof Spandau, 22.01.2019
- [70] Coordination Office Charging Interface, c/o Carmeq GmbH: Combined Charging System 1.0, Specification – CCS 1.0, 09.07.2015
- [71] Rema USA LLC (Hrsg.): CCS 1 DC Fast Charge Electric Vehicle Connector. <http://rema-ev.com/dc-fast-charge/>
- [72] Berliner Verkehrsbetriebe, Solaris Deutschland GmbH, Bombardier Transportation GmbH, u.w.: Schaufenster Elektromobilität, E-Bus-Berlin – Betrieb der Buslinie 204 mit einer Flotte von Elektrobussen inklusive Infrastruktur zur induktiven Zwischenladung, 14.12.2016
- [73] Verwaltungs-Berufsgenossenschaft, Prof. Dr.-Ing. Friedbert Pautzke, Dipl.-Ing. Christian Hain u.a.: Elektromobilität – Arbeiten an Omnibussen mit Hochvolt-Systemen, 10/2016
- [74] Matutis, M.: Die Elektrobuss-Werkstatt als wichtiger Bestandteil eines funktionierenden Elektrobuss-Systems; Vortrag Daimler AG 12.10.2018

- [75] Bender GmbH & Co.KG (Hrsg.): Elektrische Sicherheit für die Elektromobilität. [https://www.bender.de/fileadmin/content/Products/b/d/Emobility\\_PROSP\\_de.pdf](https://www.bender.de/fileadmin/content/Products/b/d/Emobility_PROSP_de.pdf); abgerufen am 14.03.2019
- [76] Hammer, S.; Stephan, A; Wundratsch, G.; u.w.: Stand und Entwicklungstendenzen bei elektrisch betriebenen Linienbussen, Systemstudie; Hrsg.: trolley:motion, Verein zur Förderung moderner Trolleybussysteme, März 2017
- [77] HOPPECKE Batterien GmbH & Co. KG: Moderne Batterietechnologien für den Einsatz in Elektrobussen des ÖPNV. [http://www.trolley-project.eu/fileadmin/user\\_upload/Library/6S\\_Gunter\\_Schaedlich.pdf](http://www.trolley-project.eu/fileadmin/user_upload/Library/6S_Gunter_Schaedlich.pdf) (abgerufen am 25.04.2019)
- [78] Neudorfer, H.: Vergleich unterschiedlicher Antriebsmaschinen im Traktionsbereich, [http://www.ieam.tuwien.ac.at/fileadmin/t/ieam/download\\_bereich/tagungen/2008-ove2008\\_neudorfer.pdf](http://www.ieam.tuwien.ac.at/fileadmin/t/ieam/download_bereich/tagungen/2008-ove2008_neudorfer.pdf) (abgerufen am 24.07.2014)
- [79] Knotte, T., Haufe, B., Saroch, L.: E-Bus-Standard „Ansätze zur Standardisierung und Zielkosten für Elektrobusse“; Hrsg.: Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme, Mai 2017
- [80] Ballard Power Systems, Inc.: Product Portfolio., <http://www.ballrd.com/files/PDF/ProductPortfolio.pdf> (abgerufen 30.04.2014)
- [81] Dongxiang Yan, Languang Lu, Fuchao Jiang, u.w.: Comparing the performances of different energy storage cells for hybrid electric vehicle; EVS28 Kintex, Korea, 3.-6. Mai 2015
- [82] D.W. Corson: High power battery systems for hybrid vehicles; Journal of Power Sources, ISSN 0378-7753, 105 (2002), Seite 110-113
- [83] Bauer, S.: Akku Welt; Hrsg.: Vogel Business Media, 2017
- [84] Dambrowski, J.: Methoden der Ladezustandsbestimmung – mit Blick auf LiFePO<sub>4</sub>/Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub>-Systeme. [http://www.deutronic.com/fileadmin/images/products/Ladegeraete/Literatur\\_LG/Methoden\\_der\\_Ladezustandsbestimmung.pdf](http://www.deutronic.com/fileadmin/images/products/Ladegeraete/Literatur_LG/Methoden_der_Ladezustandsbestimmung.pdf), (abgerufen 28.03.2019)
- [85] Müller-Hellmann, A.: Überlegungen zu Batteriebus-Systemen, Vor- und Nachteile verschiedener Ladesysteme; Der Nahverkehr, Sonderheft Elektrobusse 2017
- [86] Lindenmüller, L.: Untersuchung eines mittelfrequent schaltenden DC/DC-Konverters für Traktionsanwendungen; Hrsg.: TUDpress, 28.Juli 2015
- [87] Robert, S.: DC/DC Book of Knowledge, praktische Tipps für Anwender; Hrsg.: RECOM

- [88] Reiter, T. M.: Reglerentwicklung und Optimierungsmethoden für DC/DC-Wandler im Kraftfahrzeug; München 13.06.2012
- [89] "Potenziale des Hybrid-Oberleitungsbusses als effiziente Möglichkeit für die Nutzung erneuerbarer Energien im ÖPNV" Heidelberg Landshut im Auftrag des BMVI 2011; nach [Pütz/Haberstock, 2015]
- [90] Vanhoutte, M.: Elektrobus Erfahrungen bei Transdev. Transdev Group. 2018
- [91] Datenblatt SILEO S25 09-10-2017, Sileo GmbH, Salzgitter. 2017
- [92] Strombelastbarkeit für PVC- und VPE-isolierte Niederspannungskabel 0,6/1 kV in Luft und Erde. Bayerische Kabelwerke AG, Roth. 2013.
- [93] Der Nahverkehr. Öffentlicher Personenverkehr in Stadt und Region. Elektrobus-Spezial 2019.
- [94] Laber, W.: Elektrobusnetz Darmstadt 2025, Ergebnisse der Machbarkeitsstudie; HEAG mobilo GmbH [https://www.h2bz-hessen.de/mm/mm001/HEAG\\_mobilo\\_Elektrobusnetz\\_Ergebnisse\\_Machbarkeitsstudie\\_AK\\_Elektrobusse\\_Rhein-Main.pdf](https://www.h2bz-hessen.de/mm/mm001/HEAG_mobilo_Elektrobusnetz_Ergebnisse_Machbarkeitsstudie_AK_Elektrobusse_Rhein-Main.pdf) (abgerufen 05.02.2019)
- [95] F. Bergk, U. Lambrecht, Prof. Dr. R. Rütz, u.a.: Potenziale des Hybrid-Oberleitungsbusses als effiziente Möglichkeit für die Nutzung erneuerbarer Energien im ÖPNV; [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/studie-hybrid-oberleitungsbusse.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/studie-hybrid-oberleitungsbusse.pdf?__blob=publicationFile) (abgerufen 21.02.2019)
- [96] ZIV – Zentrum für integrierte Verkehrssysteme GmbH: Untersuchung eines "Sammelbus-Systems" als Verbindung zwischen Darmstadt und dem östlichen Landkreis Darmstadt-Dieburg; [https://www.dadina.de/fileadmin/user\\_upload/Sammelbus\\_Final\\_30.11.2016.pdf](https://www.dadina.de/fileadmin/user_upload/Sammelbus_Final_30.11.2016.pdf) (abgerufen am 21.02.2019)
- [97] Zhengzhou Yutong Group Co., Ltd: <https://en.yutong.com/pressmedia/marketexpress/2017/2017CHJDZxXngY.html> (abgerufen am 13.01.2019)
- [98] Zhongtong Double-source Electric Trolley Bus highly welcomed in Jinan; [http://www.chinabuses.org/news/2015/0303/article\\_8746.html](http://www.chinabuses.org/news/2015/0303/article_8746.html) (abgerufen am 13.01.2019)
- [99] Schulze, M. (BVG): mündliche Mitteilung während Begehung des Betriebshofs Berlin-Spandau am 11.02.2019
- [100] Nordhaus, P.: schriftliche Mitteilung vom 07.05.2019

- [101] Verkehr und Infrastruktur, Kanton Luzern: Schleppkurven Busse Massstab 1:500, Doppelgelenkbus  
[https://vif.lu.ch/down\\_load/fachordner/fachordner\\_strassen/schleppkurven](https://vif.lu.ch/down_load/fachordner/fachordner_strassen/schleppkurven) (abgerufen: 01.05.2019)
- [102] Siemens: Charge your future – mit der Siemens eBus-Ladetechnik.  
<https://w3.siemens.com/topics/global/de/elektromobilitaet/PublishingImages/ladetechnik-busse/pdf/ebus-brochure-de.pdf> (abgerufen am 12.04.2019)
- [103] BMVI (2016). Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen im schienegebundenen öffentlichen Personennahverkehr. München, 2016.
- [104] HBEFA (Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs) (2017):  
[www.hbefa.net/d/](http://www.hbefa.net/d/)
- [105] Destatis (2019), Statistisches Bundesamt. Erzeugerpreisindizes gewerblicher Produkte: GP09-27 Elektrische Ausrüstungen, 2019
- [106] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt: Nahverkehrsplan Berlin 2014-2018. S. 41. Berlin, 2014.
- [107] VDV. Herausgeber Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), Life Cycle Cost (LCC) bei Linienbussen – Bewertungskriterien bei Ausschreibungen. S.6. Köln, 2010.
- [108] EN 17186:2018-01 – Entwurf; Identifikation von Fahrzeug- und Infrastrukturkompatibilität - Kennzeichnung von elektrischem Strom für das Laden von Elektrofahrzeugen
- [109] Bergk, Lambrecht, Pütz et.al. (2015). Potenziale des Hybrid-Oberleitungsbusses als effiziente Möglichkeit für die Nutzung erneuerbarer Energien im ÖPNV, Heidelberg, Landshut, München 2015 <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/studie-hybrid-oberleitungsbusse.htm>
- [110] EN 17409:2017-07; Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge - Anschluss an eine externe Stromversorgung – Sicherheitsanforderungen
- [111] EN 15118-8:2018-08 – Entwurf; Straßenfahrzeuge - Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladestation - Teil 8: Anforderungen an physikalische und Datenverbindungsschnittstelle für die drahtlose Kommunikation
- [112] Professur Elektrische Bahnen: Interview mit Benjamin Freudenberg-Leiter Technische Anlagen BBG Eberswalde, Eberswalde, Januar 2019
- [113] Carosserie HESS: Hess erhält Trolleybus-Auftrag aus Lausanne. Stadtverkehr. 03/2019

- [114] ENSO Netz GmbH (2018) Materialpreislite 2018
- [115] HELUKABEL (2014) Auswahltabellen für Energie- & Starkstromkabel, verfügbar unter [http://www.helukabel.com/publication/DE/CATALOGUES/CW/Auswahltabellen\\_DE/Kap\\_Q\\_534\\_603\\_dt\\_link.pdf](http://www.helukabel.com/publication/DE/CATALOGUES/CW/Auswahltabellen_DE/Kap_Q_534_603_dt_link.pdf)
- [116] Hondius, H.: Busse mit Elektroantrieben heute, Stadtverkehr 10/2011
- [117] Preining, V.: Österreichweit längster Obus für Linz, meinbezirk.at, 4. September 2017, Abgerufen am 22. März 2019, verfügbar unter: [https://www.meinbezirk.at/linz/c-lokales/oesterreichweit-laengster-obus-fuer-linz\\_a2238182](https://www.meinbezirk.at/linz/c-lokales/oesterreichweit-laengster-obus-fuer-linz_a2238182).
- [118] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen (2019) Bodenrichtwerte 01.01.2019 BORIS Berlin, Abgerufen am 22. März 2019, verfügbar unter: <https://fbinter.stadt-berlin.de/boris/>.
- [119] Professur Elektrische Bahnen: Interview mit Holger Greipel (BVG) am 25 Februar 2019
- [120] Professur Elektrische Bahnen: Eigene Berechnungen, 2019
- [121] Ufert, M.: Electrification of Urban Bus Fleets: Challenges and Solutions, Vortrag an der Grid Integration of Electric Mobility 5.-6. Juni 2018, Berlin
- [122] Verkehrsverbund Mittelsachsen GmbH (2016) Neubau von zwei Gleichrichterunterwerken einschließlich deren Ausrüstung in Chemnitz, Schienenverkehrsportal, Inlocon AG, 23. Februar 2016, Abgerufen am 22.03.2019, verfügbar unter: [https://www.schienenverkehrsportal.de/referenzobjektdetails\\_Projekt\\_Nebau\\_von\\_zwei\\_Gleichrichterunterwerken\\_einschl\\_derer\\_Ausruestung\\_in\\_Chemnitz\\_09111\\_Chemnit\\_id\\_60258.html](https://www.schienenverkehrsportal.de/referenzobjektdetails_Projekt_Nebau_von_zwei_Gleichrichterunterwerken_einschl_derer_Ausruestung_in_Chemnitz_09111_Chemnit_id_60258.html).
- [123] Wietschel, M.; et al (Februar 2017) Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw, Fraunhofer ISI, Karlsruhe
- [124] Wundratsch, G.; Hammer, S.: Stand und Entwicklungstendenzen bei elektrisch betriebenen Linienbussen, Technische Universität Dresden, 2016, Dresden, Systemstudie 2015/EB-005-02
- [125] Professur Elektrische Bahnen: Auskunft Elpro GmbH 4. April 2019
- [126] Hondius, H.: ZeEus das Elektrobuskonzept der UITP, Stadtverkehr 04/2014
- [127] EBF Dresden GmbH & Fraunhofer IVI (2014) Konzept für eine städteübergreifende Einführung von elektrisch angetriebenen Linienbussen in Thüringen, 4. Juli 2014, Präsentation, Messe Erfurt

- [128] Teilstudie „Machbarkeitsstudie von HO-Busverkehr in Deutschland – am Beispiel Marburg und Trier“, Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie, Fraunhofer ISI, Fraunhofer IWES, PTV Transport Consult GmbH, VCDB VerkehrsConsult Dresden-Berlin, 2018, bisher unveröffentlicht
- [129] trolley:motion: trolley worldmap. <https://www.trolleymotion.eu/trolleystaedte/> (abgerufen am 19.06.2019)

## 9 Anhang

### 9.1 Glossar

Batterie	<p>Der Begriff „Batterie“ wird sowohl als Oberbegriff für Energiespeicher benutzt, als auch als Bezeichnung für einen nicht wieder aufladbaren Energiespeicher (Primärbatterie). Ob in einem Gerät eine nicht wieder aufladbare Primärbatterie (z.B. Langzeiteinsatz in der Armbanduhr) oder ein wieder aufladbarer Akku (z.B. im Smartphone) verwendet wird, hängt vom Einsatz ab. [67]</p> <p>Für elektrische angetriebene Fahrzeuge werden Akkumulatoren verwendet.</p>
Obus (auch Trolleybus)	<p>gummibereiftes Fahrzeug (mit seitlich eingeschränktem Einsatzbereich oder geführt) ohne sichere Schutzverbindung des Fahrgestells, die elektrisch angetrieben in einem für Personen öffentlich zugänglichen Bereich betrieben werden und galvanisch extern durch eine Stromversorgungsleitung (Oberleitung, Stromschiene) gespeist werden [5]</p>
HOBus (Hybridoberleitungsbus)	<p>ist ein Obus der zusätzlich mit Batterien ausgestattet ist, um fahrleitungsfreie Abschnitte elektrisch zu befahren.</p> <p>Prinzipiell haben sich zwei grundlegende Technologien für batterieelektrische Oberleitungsbusse entwickelt:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. der batterieelektrische Oberleitungsbus, bei dem die Batterie aus der Fahrleitung geladen und das elektrische Fahrzeug auch rekuperierte Leistung in das Fahrleitungsnetz für andere Verbraucher abgeben kann. Diese Technik ist auch unter dem Begriff In Motion Charging (IMC, Firma Kiepe) oder Streckenlader bekannt.</li> <li>2. der batterieelektrische Oberleitungsbus, bei dem die Batterie aus der Fahrleitung geladen und das elektrische Fahrzeug keine Leistung in das Fahrleitungsnetz für andere Verbraucher abgeben kann. Diese Technologie bietet u.a. die Firma ABB an. Derzeit wird dieses Technikprinzip auch im Rahmen des Forschungsprojektes Swiss Trolley Plus von der ETH Zürich, der Firma Hess und dem Nahverkehrsbetreiber der Stadt Zürich weiter beforscht und für den Einsatz erprobt.</li> </ol>
Stromabnehmersystem	<p>Gesamtheit aller Komponenten, die im Allgemeinen auf dem Fahrzeugdach montiert sind und zur Aufgabe haben, den Strom zur Versorgung der Fahrzeugbetriebsmittel den Oberleitungen zu entnehmen, sowohl im Stillstand als auch bei Bewegung des Fahrzeugs [5]</p>
Masse	<p>berührbarer, leitfähiger Teil einer elektrischen Komponente, der unter Normalbedingungen spannungsfrei ist, aber im Fehlerfall unter Spannung stehen kann. Die leitfähigen Teile des Fahrgestells und der Karosserie werden als Fahrzeugmasse definiert. [5]</p>

Zwischenmasse	leitfähiger Teil zwischen zwei isolierenden Teilen eines doppelt isolierten Betriebsmittels (Schirm, Gehäuse etc.), der nicht öffentlich zugänglich sein darf. [5]
Basisisolierung	Isolierung zwischen den spannungsführenden elektrischen Teilen und der Zwischenmasse zum Schutz von Personen, um den grundlegenden Schutz gegen einen elektrischen Schlag sicherzustellen. [5]
zusätzliche Isolierung	Isolierung zwischen der Zwischenmasse und der Fahrzeugmasse zum Schutz von Personen. [5]
doppelte Isolierung	Isolierung, die sowohl aus Basisisolierung als auch aus zusätzlicher Isolierung besteht. [5]
Funktionsisolierung	Isolierung nicht zum Schutz von Personen, mit geringeren Anforderungen, die den Betrieb der Anlage sicherstellt. [5]
Nennspannung	bestimmter Wert für ein System, auf den sich die allgemeinen Kenndaten beziehen. [5]
Bemessungsspannungsbereich	Spannungsbereich, der zusammen mit dem Bemessungsstrom die Verwendung der Ausrüstung festlegt und auf den die anwendbaren Prüfungen und Gebrauchskategorien sich beziehen. [5]
höchste Dauerspannung ( $U_{\max 1}$ )	höchster Wert der Spannung, der voraussichtlich mit unbestimmter Dauer auftreten kann. [5]
Bemessungs-Isolationsspannung	Wert, auf den die dielektrischen Prüfspannungen und Kriechstrecken bezogen sind. [5]
Steh-Wechselspannung	effektive Wechselspannung, die unter festgelegten Prüfbedingungen keinen Isolationsfehler hervorruft. [5]
höchste nichtpermanente Spannung ( $U_{\max 2}$ )	höchster Wert der Spannung, der voraussichtlich für eine begrenzte Dauer auftreten kann. [5]
Überspannung	Spannung, deren Maximalwert den entsprechenden Maximalwert der höchsten konstanten Spannung unter normalen Betriebsbedingungen überschreitet. [5]
Langzeitüberspannung	Überspannung, die höher als $U_{\max 2}$ ist und typisch länger als 20 ms anliegt und die aufgrund von niederimpedanten Phänomenen auftritt, z. B. Anstieg der Primärspannung von Unterwerken. [5]
höchste Langzeit-Überspannung ( $U_{\max 3}$ )	Spannung, angegeben als der höchste Wert der Langzeitüberspannung für $t = 20$ ms. [5]
Maximalstrom	höchster Wert des Stromes, den das Stromabnehmersystem imstande ist zu führen. [5]
Höchstgeschwindigkeit	höchste Geschwindigkeit, die das Fahrzeug erreichen kann und die für das Stromabnehmersystem berücksichtigt werden muss, um eine störungsfreie Funktion desselben sicherzustellen. [5]
statische Andruckkraft	Wert der Kraft, der vom Schleifschuh auf die Oberleitung ausgeübt wird, gemessen im Stillstand des Fahrzeugs. Dieser Wert bezieht sich auf die mittlere Höhe der Fahrleitungen. [5]

Entgleisung	plötzliche und dauerhafte Trennung des Schleifschuhs einer oder beider Stromabnehmerstangen von der/den Oberleitung(en) bei fahrendem Obus. [5]
Fahrleitungsanlage	ist der Oberbegriff von Stromschienenanlage, Oberleitungsanlage und Stromschienenoberleitungsanlage. Sie stellt die erforderliche Anlage zur Versorgung von Fahrzeugen mit elektrischer Energie über Stromabnehmer dar. [5]
Oberleitungsanlage	ist das Netzwerk zur Versorgung elektrisch angetriebener Fahrzeuge mit elektrischer Energie. Sie umfasst: <ul style="list-style-type: none"> <li>- alle Drähte und Seile wie Längs- und Quertragseile, Fahrdrähte sowie Bahnenergieleitungen wie Rückleitungsseile, Erdseile, Blitzschutzseile, Speiseleitungen, Verstärkungsleitungen und Negativfeeder, wenn sie auf den Tragkonstruktionen befestigt sind,</li> <li>- Gründungen, Tragkonstruktionen und alle anderen Komponenten, die der Halterung, Seitenführung oder Isolierung der Leiter dienen sowie</li> <li>- Schaltgeräte, Überwachungs- und Schutzeinrichtungen, die auf oder in unmittelbarer Nähe von Tragkonstruktionen installiert sind. [5]</li> </ul>
Oberleitung	Fahrleitung, die sich oberhalb oder neben der oberen Grenze des Fahrzeugprofils befindet und über eine auf dem Dach installierte Stromabnehmer-Ausrüstung das Fahrzeug mit elektrischer Energie versorgt. [5]
Fahrdraht	ist ein elektrischer Leiter einer Oberleitung, der den Kontakt mit dem Stromabnehmer herstellt. [5]
Speiseleitung	ist eine elektrische Verbindungsleitung zwischen Schaltanlagen und Fahrleitung, die an eigenen Masten, Oberleitungsmasten oder sonstigen Stützpunkten als Freileitung oder Kabel verlegt wird. [5]
Verstärkungsleitung	ist eine parallel zur Oberleitung verlegte Freileitung oder Kabel, die zur Erhöhung des nutzbaren Leitungsquerschnitts in bestimmten Abständen mit der Oberleitung oder Stromschiene verbunden ist.
Rückleitung	sind alle Leiter, die den vorgesehenen Pfad für den Bahnrückstrom im Betriebs- und Fehlerfall bilden. Sie können Schienen-, Erd- oder geringfügig davon abweichendes Potenzial aufweisen. Dazu zählen <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fahrschienen,</li> <li>- Rückleitungsseile, -drähte (bei Obus) und -stromschienen,</li> <li>- Rückleitungsseile für Booster-Transformatoren,</li> <li>- Rückleitungskabel und</li> <li>- Erdreich (nur bei AC-Bahnen).</li> </ul>
Längsspannweite	ist der Abstand zwischen zwei benachbarten Stützpunkten einer Fahrleitung in Gleisrichtung.

Nachspanneinrichtung	ist eine Einrichtung, die die Oberleitung selbsttätig mit einer im festgelegten Temperaturbereich nahezu konstanten Zugkraft spannt und damit temperaturbedingte Längenänderung der Oberleitung ausgleicht.
Streckentrennung	ist eine elektrische Trennung der Fahrleitung, die durch Überlappung parallel laufender, benachbarter Fahrleitungen gebildet wird, wobei die Isolation durch eine ausreichende Luftstrecke zwischen den beiden Fahrleitungen hergestellt wird
Streckentrenner	ist eine Trennstelle, die durch in die Fahrleitung eingefügte Isolatoren gebildet wird, und mit Gleitkufen oder ähnlichen Bauteilen ausgerüstet werden kann, um eine ununterbrochene Stromabnahme aufrechtzuerhalten.

## 9.2 Gesetze, Verordnungen und Normen

Im Folgenden sind für die spätere Realisierung im Rahmen einer Planfeststellung zu berücksichtigende Gesetze und Verordnungen dargestellt:

- Personenbeförderungsgesetz (PBefG), Stand 20.07.2017,
- Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG), Stand 08.09.2017,
- Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung - BOStrab), Stand 16.12.2016,
- Verordnung über den Betrieb von Kraftfahrunternehmen im Personenverkehr (BO-Kraft), Stand 31.8.2015,
- Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV), Stand 14.08.2013,

Für die Ausschreibung der elektrischen Netzinfrastruktur und der elektrischen Fahrzeuge sind in Tabelle 9-1 relevante DIN EN Normen und VDV Normen dargestellt.

Tabelle 9-1: Übersicht relevanter Normen

Quelle	Titel
DIN EN ISO 15118-8 2018-08 Entwurf	Straßenfahrzeuge – Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladestation – Teil 8: Anforderungen an physikalische und Datenverbindungsschnittstelle für die drahtlose Kommunikation
DIN EN 17186 2018-01 Entwurf	Identifikation von Fahrzeug- und Infrastrukturkompatibilität - Kennzeichnung von elektrischem Strom für das Laden von Elektrofahrzeugen
DIN EN ISO 17409 2017-07	Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge – Anschluss an eine externe Stromversorgung – Sicherheitsanforderungen

Quelle	Titel
DIN EN 50119 2014-01	Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen - Oberleitungen für den elektrischen Zugbetrieb
DIN EN 50121-1 2017-11	Bahnanwendungen - Elektromagnetische Verträglichkeit - Teil 1: Allgemeines
DIN EN 50122-1 2017-10	Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen – Elektrische Sicherheit, Erdung und Rückleitung; Teil 1: Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag
DIN EN 50123-1 2003-12	Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen; Gleichstrom-Schalt-einrichtungen - Teil 1: Allgemeines
DIN EN 50123-4/A1 2014-02	Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen – Gleichstrom-Schalt-einrichtungen; Teil 4: Freiluft-Gleichstrom-Trennschalter, -Last-trennschalter und -Erdungsschalter
DIN EN 50124-1 2017-12	Bahnanwendungen - Isolationskoordination - Teil 1: Grundlegende Anforderungen - Luft- und Kriechstrecken für alle elektrischen und elektronischen Betriebsmittel
DIN EN 50124-2 2017-12	Bahnanwendungen - Isolationskoordination - Teil 2: Überspannungen und zugeordnete Schutzmaßnahmen
DIN EN 50125-1 2014-11	Bahnanwendungen - Umweltbedingungen für Betriebsmittel - Teil 1: Betriebsmittel auf Bahnfahrzeugen
DIN EN 50153 2018-01	Bahnanwendungen; Fahrzeuge – Schutzmaßnahmen in Bezug auf elektrische Gefahren
DIN EN 50160 2011-02	Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen
DIN EN 50162 2005-05	Schutz gegen Korrosion durch Streuströme aus Gleichstromanlagen
DIN EN 50163 2005-07	Bahnanwendungen - Speisespannungen von Bahnnetzen
DIN EN 50327 2006-03	Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen - Harmonisierung der Bemessungswerte von Stromrichtergruppen und Prüfungen von Stromrichtergruppen
DIN EN 50328 2003-09	Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen - Leistungselektronische Stromrichter für Unterwerke
DIN EN 50329 2011-02	Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen - Bahn-Transformatoren
DIN EN 50502 2016-03	Bahnanwendungen - Fahrzeuge - Elektrische Ausrüstung in O-Bussen - Sicherheitsanforderungen und Stromabnehmersysteme
DIN EN 50526-1 2012-05	Bahnanwendungen - Ortsfeste Anlagen - Überspannungsableiter und Spannungsbegrenzungseinrichtung - Teil 1: Überspannungsableiter
DIN EN 50388 2012-12	Bahnanwendungen - Bahnenergieversorgung und Fahrzeuge - Technische Kriterien für die Koordination zwischen Anlagen der Bahnenergieversorgung und Fahrzeugen zum Erreichen der Interoperabilität

Quelle	Titel
DIN EN 60076-1 2012-03	Leistungstransformatoren; Teil 1: Allgemeines
VDV-Schrift 230/1 03/2018	Rahmenempfehlung für elektrisch betriebene Stadt-Niederflur-Linienbusse (E-Bus)
VDV-Schrift 260 03/2016	EBus - Infrastruktur/Ladestellen
VDV-Schrift 505 06/2005	Aufbau und Schutzmaßnahmen von Gleichrichter - Unterwerken von Gleichstrom- Nahverkehrsbahnen
VDV-Schrift 506 06/2005	Aufbau und Schutzmaßnahmen von elektrischen Energieanlagen in Betriebshöfen und Werkstätten von Gleichstrom-Nahverkehrsbahnen
VDV-Schrift 507 06/2005	Aufbau und Schutzmaßnahmen von elektrischen Energieanlagen an Strecken von Gleichstrom Nahverkehrsbahnen
VDV-Schrift 515 10/2008	Kabel und Leitungen für die Stromversorgungsanlagen von Gleichstrom- Nahverkehrsbahnen und Obussen
VDV-Schrift 520 01/2015	Kurzschluss- und Überlastschutz von Fahrstromanlagen für Gleichstrom- Nahverkehrsbahnen
VDV-Schrift 521 09/1997	Energieversorgungsanlagen von Gleichstrombahnen mit rückspeisefähigen Fahrzeugen
VDV-Schrift 525 06/2012	Überspannungsschutz für Fahrstromversorgungsanlagen von Gleichstrom Nahverkehrsbahnen
VDV-Schrift 551 08/2017	Oberleitungsmaste, Mastgründungen und Wandanker
VDV-Schrift 550 04/2003	Oberleitungsanlagen für Straßen- und Stadtbahnen

## 10 Anlage A – Technische Machbarkeit

### 10.1 Darstellung der modellierten Abschnitte und Haltestellenpositionen

In den folgenden Tabellen ist die Netzzunterteilung in Abschnitte und die wesentlichen Modellierungsparameter beschrieben, die für den Aufbau der Infrastruktur nach Kapitel 4.1.1 notwendig sind.

Tabelle 10-1: Netzzunterteilung in Abschnitte (AB)

Abschnitt (AB)	Spur	Beginn	Ende	Kilometer Beginn	Kilometer Ende	Länge [km]
01	h	Hottengrund (HOTT)	Aalemannufer (AAMN)	0,000	16,686	16,619
01	r	Hottengrund (HOTT)	Aalemannufer (AAMN)	0,000	16,686	16,686
01	h2	Wröhmännerpark (WRPK)	Eiswerderstr. (EIWD)	12,980	13,735	0,755
01	r2	S+U Rathaus Spandau (SUSP)	S+U Rathaus Spandau (SUSP)	12,240	12,250	0,010
01	h3	Ziegelhof (ZGLH)	Ziegelhof (ZGLH)	11,226	11,305	0,079
01	r3	Ziegelhof (ZGLH)	Ziegelhof (ZGLH)	11,222	11,289	0,067
01	h4	S+U Rathaus Spandau (SUSP)	S+U Rathaus Spandau (SUSP)	12,173	12,179	0,006
02	h	Alt-Kladow (ALKL)	Gutsstr. (GUTS)	0,000	3,572	3,572
02	r	Alt-Kladow (ALKL)	Gutsstr. (GUTS)	0,084	2,946	2,862
03	h	Hertzallee (ZOOH)	Dallgow-Döberitz Havelpark (DAHV)	0,000	19,039	18,989

Abschnitt (AB)	Spur	Beginn	Ende	Kilometer Beginn	Kilometer Ende	Länge [km]
03	r	Hertzallee (ZOOH)	Dallgow-Döberitz Havelpark (DAHV)	0,000	19,039	18,879
03	h2	Uhlandstr./Kantstr. (UHKA)	Savignyplatz (SAVG)	1,300	1,417	0,117
03	r2	Uhlandstr./Kantstr. (UHKA)	Uhlandstr./Kantstr. (UHKA)	1,300	1,353	0,053
03	h3	Reimerweg (REIM)	Hahneberg (HNBG)	13,196	14,018	0,822
03	r3	Reimerweg (REIM)	Hahneberg (HNBG)	13,243	14,018	0,775
04	h	Zoologischer Garten/Jebenstr. (JEBN)	Brunsbütteler Damm /Stadtgrenze (BRSG)	0,018	15,854	15,836
04	r	Zoologischer Garten/Jebenstr. (JEBN)	Brunsbütteler Damm /Stadtgrenze (BRSG)	0,000	15,854	15,638
05	h	U Haselhorst (UHS)	Wilhelmsruher Damm (WIDA)	-0,249	12,867	13,116
05	r	U Haselhorst (UHS)	Wilhelmsruher Damm (WIDA)	-0,165	12,867	13,017
06	h	Rauchstr, (RAUC)	U Haselhorst (UHS)	-0,026	3,685	3,711
06	r	Rauchstr, (RAUC)	U Haselhorst (UHS)	-0,058	3,685	3,743
07	h	S+U Rathaus Spandau (SUSP)	Seegefelder Weg (SEEG) über Finkenkruger Weg	0,000	7,637	7,637

Abschnitt (AB)	Spur	Beginn	Ende	Kilometer Beginn	Kilometer Ende	Länge [km]
			(FKRW) und I-senburger Weg (ISEN) -			
07	r	S+U Rathaus Spandau (SUSP)	Finkenkruger Weg (FKRW)	0,000	4,546	4,546
07	h2	S+U Rathaus Spandau (SUSP)	Galenstr, (GALS)	0,020	0,48	0,46
07	r2	S+U Rathaus Spandau (SUSP)	Galenstr, (GALS)	0,080	0,48	0,4
08	h	Seegefelder Weg (SEEG)	Heerstr,/ Nennhauser Damm (HENH)	0,000	3,166	3,166
08	r	Finkenkruger Weg (FKRW)	Heerstr,/ Nennhauser Damm (HENH)	0,755	3,166	2,411
09	h	Am Kurzen Weg (AMKW)	Heidebergplan (HBPL)	-0,044	0,278	0,322
10	h	Wröhmännerpark (WRPK)	Johannesstift (JOST)	-0,116	2,920	3,036
10	r	Wröhmännerpark (WRPK)	Johannesstift (JOST)	-0,089	2,920	3,009
11	h	Predigergarten (PRGT)	Wasserwerk Spandau (WWSP)	0,000	3,162	3,162
11	r	Predigergarten (PRGT)	Wasserwerk Spandau (WWSP)	0,000	3,162	3,162
12	h	Heerstr,/Magistratsweg (HEMA)	Am Kiesteich (AMKT)	-0,226	3,734	3,96
12	r	Heerstr,/Magistratsweg (HEMA)	Am Kiesteich (AMKT)	-0,056	3,686	3,742

<b>Abschnitt (AB)</b>	<b>Spur</b>	<b>Beginn</b>	<b>Ende</b>	<b>Kilometer Beginn</b>	<b>Kilometer Ende</b>	<b>Länge [km]</b>
13	h	Spektefeld (SPFD)	Zeppeliner Str./Seegefelder Str, (ZESE)	0,000	6,735	6,735
13	r	Spektefeld (SPFD)	Zeppeliner Str./Seegefelder Str. (ZESE)	0,000	6,673	6,673
14	h	Sandstr, (SAND)	Ziegelhof (ZGLH)	-0,025	2,554	2,579
14	r	Sandstr, (SAND)	Ziegelhof (ZGLH)	-0,067	2,543	2,61
15	h	Leubnitzer Weg (LEUB)	Rudolf-Wissel-Siedlung (RWSI)	0,000	0,833	0,833
15	r	Lutoner Str. (LTON)	Rudolf-Wissel-Siedlung (RWSI)	-0,455	0,833	1,288
16	h	Alt-Pichelsdorf (APIC)	Ziegelhof (ZGLH)	-0,034	1,709	1,743
16	r	Alt-Pichelsdorf (APIC)	Ziegelhof (ZGLH)	-0,046	1,725	1,771
17	h	Betckestr, (BTCK)	Melanchtonplatz (MELA)	-0,024	0,741	0,765
17	r	Betckestr, (BTCK)	Am Omnibushof (AMOM)	-0,176	1,167	1,343
18	h	S+U Rathaus Spandau (SUSP)	Machandelweg (MCHD)	0,000	3,946	3,946
18	r	S+U Rathaus Spandau (SUSP)	Machandelweg (MCHD)	0,000	3,962	3,962
19	h	U Haselhorst (UHS)	Freudstr./Goldkäferweg (FRGO)	0,000	6,517	6,517

Abschnitt (AB)	Spur	Beginn	Ende	Kilometer Beginn	Kilometer Ende	Länge [km]
19	r	U Haselhorst (UHS)	Freudstr./Goldkäferweg (FRGO)	0,025	6,517	6,492
19	h2	Falkenseer Chaussee/Zepelinstr. (FAZE)	Westerwaldstr. (WWLD02)	3,753	4,186	0,433
19	r2	Westerwaldstr. (WWLD03)	Westerwaldstr. (WWLD01)	4,060	4,164	0,104
25	h	Döberitzer Weg (DBRW)	Schulstr. (SCHU)	0,000	0,190	0,19
25	r	Döberitzer Weg (DBRW)	Schulstr. (SCHU)	0,000	0,190	0,19
26	h	Kaiser-Friedrich-Str./Kantstr. (KFKA)	U Wilmersdorfer Str./Kantstr. (UWDK)	0,000	1,079	1,079
27	h	Lutoner Str. (LTON)	Melanchtonplatz (MELA)	1,276	2,196	0,92
28	h	Seegefelder Weg (SEEG)	Hackbuschstr./Straße 603 (SSSE)	0,000	0,533	0,533

Tabelle 10-2: Kilometersprünge innerhalb der Abschnitte

Abschnitt (AB)	Spur	Ungefähre Lage	Kilometer Beginn	Kilometer Ende	Überbrückte Distanz [km]
01	h	Werderstr. (WERS)	16.029	16.096	-0.067
03	h	Hertzallee (ZOOH02)	0.322	0.372	-0.050
03	r	U Theodor-Heuss-Platz (UTHP)	5.117	5.277	-0.160

Abschnitt (AB)	Spur	Ungefähre Lage	Kilometer Beginn	Kilometer Ende	Überbrückte Distanz [km]
04	r	U Ernst-Reuter-Platz (UERP)	1.128	1.162	-0.034
04	r	U Ruhleben (URUH)	6.971	7.153	-0.182
05	r	Paulsternstr./Gartenfelder Str. (PSGF)	1.174	1.189	-0.015

Tabelle 10-3: Verbindungen der Abschnitte (AB)

AB von	Spur	Kilometer	AB nach	Spur	Kilometer	Beschreibung
01	h	0,000	01	r	0,000	Wende HOTT (134, X34, N34)
01	h	1.597	02	r	0.084	Abzweig ALKL (X34 nach ZOOH)
01	r	1.709	02	h	0,000	Abzweig ALKL (X34 nach GUTS)
01	h	5,859	01	r	5,859	Wende ALTG (134, X34)
01	h	9,601	03	r	11,123	Kreuzung GAHE (X34 nach ZOOH)
01	r	9,559	03	h	11,206	Kreuzung GAHE (X34 nach HOTT/GUTS)
01	r	9,601	03	r	11,123	Kreuzung GAHE (136/236 nach AAMN/UHS)
01	h	9,619	03	h	11,123	Kreuzung GAHE (136/236 nach AMOM)
01	h	9,850	17	r	1,168	Abzweig AMOM/MELA (N34 nach AAMN)
01	r	10,291	17	h	0,740	Abzweig MELA (N34 nach HOTT)
01	r	10,377	27	h	2,196	Abzweig MELA (137 nach AMOM)
01	h	11,226	16	h	1,709	Abzweig ZGLH (136/N34 nach

AB von	Spur	Kilometer	AB nach	Spur	Kilometer	Beschreibung
						AAMN sowie 236 nach UHS)
01	r	11,222	16	r	1,725	Abzweig ZGLH (136/236 nach AMOM sowie N34 nach HOTT)
01	h	11,339	14	h	2,554	Abzweig ZGLH (137/M37 nach FRGO/WKHS)
01	r	11,347	14	r	2,543	Abzweig ZGLH (137/M37 nach REIM/HNBG)
01	h	11,803	04	r	10,282	Kreuzung BDRU (M32/M45 nach SUSP/JOSt)
01	r	11,816	04	h	10,302	Kreuzung BDRU M32 nach DAHV/HBPL/BRSG M45 nach ZOOH
01	h	12,985	10	h	-0,116	Abzweig WRPK (134/M45 nach WWSP/JOSt)
01	r	13,012	10	r	-0,089	Abzweig WRPK (134/M45 nach HOTT/ZOOH)
01	h	15,233	06	h	-0,026	Abzweig RAUC (236/X36 nach UHS)
01	r	15,223	06	r	-0,054	Abzweig RAUC (236/X36 nach UHS)
01	h	16,029	01	r	16,096	Wende WERS (136)
01	h	25.697	01	r	25.697	Wende SHEN (136)
02	h	3.572	02	r	2.946	Endhalt GUTS (X34)
03	h	0,000	03	r	0,000	Wende ZOOH (M45, M49)
03	h	0,372	03	r	0,323	Wende ZOO (M45, M49)
03	h	0.609	04	h	0.018	Kreuzung ZOO (M45 nach JOSt)
03	r	0.651	04	r	0,000	Kreuzung ZOO (M45 nach ZOOH)
03	h2	1,300	03	r2	1,300	Wende UHKA/SAVG (M49)
03	h	2,055	26	h	1,079	Eindrahten UWDK (X49 nach ISSZ)

AB von	Spur	Kilometer	AB nach	Spur	Kilometer	Beschreibung
03	r	2,980	26	h	0,000	Beginn Wende UWD (X49)
03	h	10,341	16	r	-0,046	Abzweig APIC (136/236 nach AMOM)
03	r	10,300	16	h	-0,034	Abzweig APIC (136/236 nach AAMN/UHS)
03	r	12,219	14	h	-0,025	Abzweig SAND (M37 nach WKHS)
03	h	12,260	14	r	-0,067	Abzweig SAND (M37 nach HNBG)
03	h	12,714	12	h	0,000	Abzweig HEMA (X49 nach ISSZ)
03	r	12,659	12	r	-0,055	Abzweig HEMA (X49 nach UWD)
03	h	12,770	12	r	-0,056	Abzweig HEMA (137 nach HNBG)
03	r	12,940	12	h	-0,226	Abzweig HEMA (137 nach FRGO)
03	h3	13,420	03	r3	13,420	Wende REIM01 (M49)
03	h3	14,018	03	r3	14,018	Wende HNBG01 (M37, X49)
03	h	15.873	08	h	3.166	Kreuzung HENH (M32 nach DAHV)
03	r	15.873	08	r	3.166	Kreuzung HENH (M32 nach SUSP)
03	r	15.873	08	h	3.166	Kreuzung HENH (M49 nach ZOOH)
03	h	15,852	08	h	3,088	Wende HENH (M49)
03	h	19.039	03	r	19.039	Wende DAHV (M32)
04	h	6,439	18	h	3,946	Abzweig MCHD (130 nach URUH)
04	r	6,439	18	r	3,962	Abzweig MCHD (130 nach WKHS)
04	h	7,137	04	r	6,971	Wende URUH (130)
04	h	14.154	08	r	1.562	Kreuzung BRNH (M32 nach HBPL)
04	h	14.154	08	h	1,550	Kreuzung BRNH (M32 nach DAHV)
04	r	14.154	08	r	1.562	Kreuzung BRNH (M32 nach SUSP)
04	r	14.154	08	h	1,550	Kreuzung BRNH (M32 nach SUSP)
04	h	15.854	04	r	15.854	Wende BRSG (M32)

AB von	Spur	Kilometer	AB nach	Spur	Kilometer	Beschreibung
05	h	-0,249	19	r	0,025	Verbindung AB 05 mit AB 19 (X33 um UHS)
05	r	-0,165	19	h	0,000	Verbindung AB 05 mit AB 19 (X33 um UHS)
05	h	-0,047	06	r	3,483	Wende UHS (236/X36)
05	r	-0,129	06	h	3,540	Wende UHS (236/X36)
05	h	6,940	05	r	6,940	Wende UHHS (X33)
05	h	10,930	05	r	10,930	Wende SUWI (X33)
05	h	12,867	05	r	12,867	Wende WIDA (X33)
07	h	0,000	18	r	0,000	Kreuzung SUSP (130 nach URUH)
07	r	0,000	18	h	0,000	Kreuzung SUSP (130 nach WKHS)
07	h2	0,480	07	r2	0,480	Wende GALS (X33/X36)
07	r	1,198	13	h	6,735	Abzweig ZESE (130 nach URUH)
07	h	1,250	13	r	6,673	Abzweig ZESE (130 nach WKHS)
07	r	3,490	28	h	0,533	Abkürzung nach SSSE (237)
07	r	4,291	09	h	-0,044	Abzweig AMKW (M32 nach HBPL)
07	h	4,278	09	h	-0,031	Abzweig AMKW (M32 nach SUSP)
07	h	4,546	08	h	0,755	Abzweig FKRW (237 nach ISEN)
07	h	4,546	08	h	0,755	Abzweig FKRW (M32 nach SUSP) Abkürzung nach UNGE (237)
07	h	4,546	07	r	4,546	Kreuzung FKRW (237 nach SUSP)
07	r	4,546	08	r	0,755	Abzweig FKRW (M32 nach HBPL)
07	h	7,637	08	h	0,000	Verbindung AB 07 mit AB 08 (237 Nähe SEEG)
08	h	0,000	28	h	0,000	Abkürzung nach SSSE (237)
08	h	2,407	25	h	0,000	Abzweig DBRW (M32 nach SCHU)
08	r	2,407	25	r	0,000	Abzweig DBRW (M32 nach SUSP)

AB von	Spur	Kilometer	AB nach	Spur	Kilometer	Beschreibung
09	h	0,278	09	h	0,141	Wende HBPL (M32)
10	h	0,183	11	h	0,000	Abzweig 134 nach WWSP
10	r	0,183	11	r	0,000	Abzweig 134 nach HOTT
11	h	3,162	11	r	3,162	Wendeschleife WWSP (134)
12	r	0,4	15	h	0,833	Abzweig RWSI (137 nach REIM)
12	h	0,4	15	r	0,833	Abzweig RWSI (137 nach FRGO)
12	h	3,302	13	h	0,000	Abzweig SPFD (X49 nach ISSZ)
12	r	3,302	13	r	0,000	Abzweig SPFD (X49 nach ISSZ)
12	h	3,302	13	r	0,000	Abzweig SPFD (M37 nach HNGB)
12	r	3,302	13	h	0,000	Abzweig SPFD (M37 nach WKHS)
12	h	3,734	19	r	4,952	Abzweig AMKT (M37 nach HNGB)
12	r	3,686	19	h	5,014	Abzweig AMKT (M37 nach WKHS)
14	r	0,854	15	h	0	Abzweig LEUB (137 nach REIM)
14	h	1,309	15	r	-0,455	Abzweig LEUB (137 nach FRGO)
14	h	1,276	27	h	1,276	Abzweig LTON (137 nach AMOM)
16	h	1,076	17	r	-0,175	Abzweig BTCK (N34 nach AAMN)
16	r	0,926	17	h	-0,025	Abzweig BTCK (N34 nach HOTT)
18	h	1,044	18	r	1,044	Wende SSRW (130)
19	h	6,517	19	r	6,517	Wende FRGO (137)
25	h	0,190	25	h	0,190	Wende SCHU (M32)

Tabelle 10-4: Lage der Haltestellen in den Abschnitten (AB) sowie Haltestellenkürzel

Haltestelle	Kürzel	AB	Spur	km	Bedienung (Linien)
Am alten Gaswerk	AAGW01	04	h	15,280	M32

<b>Haltestelle</b>	<b>Kürzel</b>	<b>AB</b>	<b>Spur</b>	<b>km</b>	<b>Bedienung (Linien)</b>
Am alten Gaswerk	AAGW02	04	r	15,210	M32
Aalemannufer	AAMN02	01	r	16,694	136
Aalemannufer	AAMN03	01	h	16,675	136
Aalemannufer	AAMN04	01	h	16,714	136
Aalemannufer	AAMN05	01	h	16,636	136
Alt-Kladow	ALKL01	01	h	1,617	134, X34, N34
Alt-Kladow	ALKL04	01	h	1,633	134, X34, N34
Alt-Kladow	ALKL05	01	r	1,751	134, X34, N34
Alfons-Loewe-Str.	ALLO01	07	h	6,901	237
Alt-Gatow	ALTG02	01	h	5,885	134, X34, N34
Alt-Gatow	ALTG03	01	r	5,924	134, X34, N34
Alt-Gatow	ALTG04	01	h	5,853	134, X34, N34
Am Bogen	AMBO01	19	r	5,396	137
Am Bogen	AMBO02	19	h	5,451	137
Am Graben	AMGR01	01	h	5,374	134, N34
Am Graben	AMGR02	01	r	5,358	134, N34
Am Kiesteich	AMKT01	19	h	5,079	137
Am Kiesteich	AMKT02	19	r	4,952	137, M37
Am Kiesteich	AMKT03	12	r	3,640	M37
Am Kurzen Weg	AMKW01	07	h	4,279	237, M32
Am Kurzen Weg	AMKW02	07	r	4,290	237
Am Kurzen Weg	AMKW02	09	h	-0,043	M32
Am Omnibushof	AMOM01	01	r	9,757	134, N34
Am Omnibushof	AMOM02	01	h	9,851	134, N34
Am Omnibushof	AMOM03	01	h	9,818	
Am Omnibushof	AMOM04	01	r	9,757	136, 236
Amorbacher Weg	AMOR01	01	r	14,751	136, 236, N34
Amorbacher Weg	AMOR02	01	h	14,873	136, 236, N34
Amtsgerichtsplatz	AMTG02	03	r	3,216	M49
Amtsgerichtsplatz	AMTG03	03	h	3,300	M49
Alt-Pichelsdorf	APIC01	03	h	10,340	136, 236, M49, X49

<b>Haltestelle</b>	<b>Kürzel</b>	<b>AB</b>	<b>Spur</b>	<b>km</b>	<b>Bedienung (Linien)</b>
Alt-Pichelsdorf	APIC02	16	h	0,076	136, 236
Alt-Pichelsdorf	APIC03	03	r	10,299	M49, X49
Alt-Pichelsdorf	APIC03	16	h	-0,033	136, 236
Askaniering	ASKR01	19	r	2,994	137, M37
Askaniering	ASKR02	19	h	3,010	137, M37
Am Zeppelinpark	AZPP01	08	r	2,809	M32
Am Zeppelinpark	AZPP02	08	h	2,867	M32
Bhf Albrechtshof	BAHF01	07	h	6,424	237
Baluschekweg	BALW01	15	r	0,551	137
Baluschekweg	BALW02	15	h	0,497	137
Brunsbütteler D./Ruhlebener Str.	BDRU01	01	h	11,756	134, 136, 137, 236, 237, M37, N34
Brunsbütteler D./Ruhlebener Str.	BDRU02	04	r	10,340	M32
Brunsbütteler D./Ruhlebener Str.	BDRU03	04	h	10,323	M32
Brunsbütteler D./Ruhlebener Str.	BDRU04	01	r	11,702	134, 136, 137, 236, 237, M37, N34
Brunsbütteler D./Ruhlebener Str.1	BDRU05	04	h	10,237	M45
Brunsbütteler D./Ruhlebener Str.1	BDRU06	04	r	10,217	M45
Breitehornweg	BHNW01	01	r	4,217	134, X34, N34
Breitehornweg	BHNW02	01	h	4,168	134, X34, N34
Biberburg	BIBG01	01	r	7,561	134, X34, N34
Biberburg	BIBG02	01	h	7,596	134, X34, N34
Blasewitzer Ring	BLWR01	14	h	0,804	M37
Blasewitzer Ring	BLWR02	14	r	0,756	M37
Bötzow-Bahn	BOBA01	13	h	3,313	130
Bötzow-Bahn	BOBA02	13	r	3,446	130
Borkzeile	BRKZ01	07	h	0,549	130, 237

<b>Haltestelle</b>	<b>Kürzel</b>	<b>AB</b>	<b>Spur</b>	<b>km</b>	<b>Bedienung (Linien)</b>
Borkzeile	BRKZ02	07	r	0,656	130, 237
Breite Str./Markt	BRMA01	18	r	0,461	130
Breite Str./Markt	BRMA02	18	h	0,473	130
Brunsbütteler D./Nennhauser D.	BRNH01	04	r	14,023	M32
Brunsbütteler D./Nennhauser D.	BRNH02	04	h	14,106	M32
Brunsbütteler Damm/Stad- grenze	BRSG01	04	h	15,690	M32
Brunsbütteler Damm/Stad- grenze	BRSG02	04	r	15,688	M32
Brandwerder	BRWD01	12	h	1,787	X49
Brandwerder	BRWD02	12	r	1,732	X49
Buschower Weg	BSCW01	03	r	14,854	M49
Buschower Weg	BSCW02	03	h	14,870	M49
Bahnhof Staaken	BSTA01	08	r	1,042	M32
Bahnhof Staaken	BSTA02	08	h	1,060	M32
Betckestr.	BTCK01	16	r	0,925	136, 236
Betckestr.	BTCK01	17	h	-0,024	N34
Betckestr.	BTCK02	16	h	0,878	136, 236
Betckestr.	BTCK03	17	r	0,040	N34
Beerwinkel	BWKL01	19	h	5,278	137
Beerwinkel	BWKL02	19	r	5,204	137
Cautiusstr.	CAUT01	10	r	2,279	M45
Cautiusstr.	CAUT02	10	h	2,321	M45
Dallgow-Döberitz, Havelpark	DAHV01	03	r	18,963	M32
Dallgow-Döberitz, Havelpark	DAHV02	03	r	18,894	M32
Dallgower Str.	DALL01	07	r	0,921	130, 237
Dallgower Str.	DALL02	07	h	0,949	130, 237
Döberitzer Weg	DBRW01	25	h	0,028	M32
Döberitzer Weg	DBRW02	08	r	2,382	M32
Döberitzer Weg	DBRW03	08	h	2,467	M32

<b>Haltestelle</b>	<b>Kürzel</b>	<b>AB</b>	<b>Spur</b>	<b>km</b>	<b>Bedienung (Linien)</b>
Daumstr./Rhenaniastr.	DMRH01	06	r	1,722	236
Daumstr./Rhenaniastr.	DMRH02	06	h	1,712	236
DRK-Kliniken Westend	DRKW01	04	h	4,588	M45
DRK-Kliniken Westend	DRKW02	04	r	4,371	M45
DRK-Kliniken Westend	DRKW03	04	h	4,392	M45
Dyrotzer Str.	DYRZ01	07	r	2,200	237
Dyrotzer Str.	DYRZ02	07	h	2,321	237
Emil-Basdeck-Str.	EBSD01	01	r	7,085	134, X34, N34
Emil-Basdeck-Str.	EBSD02	01	h	7,052	134, X34, N34
Eckenerweg	ECKE01	07	h	3,813	237
Eckenerweg	ECKE02	07	r	3,819	237
Egelpfuhlstr.	EGPF01	04	h	12,238	M32
Egelpfuhlstr.	EGPF02	04	r	12,236	M32
Eiswerderstr.	EIWD01	01	h	13,737	136, 236, X36, N34
Eiswerderstr.	EIWD02	01	r	13,738	136, 236, X36, N34
Elsflether Weg	ELSF01	04	r	10,636	M32
Elsflether Weg	ELSF02	04	h	10,596	M32
Eosanderstr.	EOSN01	04	r	2,493	M45
Eosanderstr.	EOSN02	04	h	2,475	M45
Falkenseer Platz	FAPL01	19	h	2,231	137, M37
Falkenseer Platz	FAPL02	19	r	2,230	137, M37
Falkenseer Chaussee/Stadtrandstr	FAST01	13	h	1,152	M37
Falkenseer Chaussee/Stadtrandstr	FAST02	19	r	5,805	137
Falkenseer Chaussee/Stadtrandstr	FAST03	13	r	1,084	M37
Falkenseer Chaussee/Stadtrandstr	FAST04	19	h	5,817	137
Fachinger Str.	FATO01	07	h	5,264	237

<b>Haltestelle</b>	<b>Kürzel</b>	<b>AB</b>	<b>Spur</b>	<b>km</b>	<b>Bedienung (Linien)</b>
Falkenseer Chaussee/Zepelinstr.	FAZE01	19	h	3,754	137, M37
Falkenseer Chaussee/Zepelinstr.	FAZE02	13	r	5,609	130
Falkenseer Chaussee/Zepelinstr.	FAZE03	19	r	3,592	137, M37
Falkenseer Chaussee/Zepelinstr.	FAZE04	13	h	5,697	130
Ferbitzer Weg	FBZW01	07	h	5,769	237
Friedhof In den Kisseln	FIDK01	11	h	2,027	134
Friedhof In den Kisseln	FIDK02	11	r	1,994	134
Friedhof In den Kisseln	FIDK03	11	h	2,027	134
Finnenhaus-Siedlung	FIHS01	01	r	2,034	134, X34, N34
Finnenhaus-Siedlung	FIHS02	01	h	2,079	134, X34, N34
Falkenhagener Tor	FKHT01	11	r	1,264	134
Falkenhagener Tor	FKHT02	11	h	1,259	134
Finkenkruger Weg	FKRW01	07	h	4,532	237, M32
Finkenkruger Weg	FKRW02	07	r	4,520	237, M32
Földerichplatz	FLDR01	17	h	0,307	N34
Földerichplatz	FLDR02	17	r	0,295	N34
Flankenschanze	FLKS01	19	h	2,564	137, M37
Flankenschanze	FLKS02	19	r	2,502	137, M37
Flatowallee/Olympiastadion	FLTW01	03	h	7,121	M49
Flatowallee/Olympiastadion	FLTW02	03	r	7,109	M49
Frankenwaldstr.	FRAW01	11	r	2,425	134
Frankenwaldstr.	FRAW02	11	h	2,342	134
Freudstr.	FRDS02	19	h	6,192	137
Freudstr.	FRDS03	19	r	6,089	137
Freiheit 16-43	FREI01	18	r	2,066	130
Freiheit 16-43	FREI02	18	h	2,030	130
Freudstr./Goldkäferweg	FRGO	19	r	6,490	137
Freudstr./Goldkäferweg	FRGO02	19	h	6,490	137

Haltestelle	Kürzel	AB	Spur	km	Bedienung (Linien)
Freudstr./Goldkäferweg	FRGO03	19	r	6,476	137
Freybrücke	FRYB01	03	h	9,986	M49
Freybrücke	FRYB02	03	r	9,988	M49
Gartenfeld	GAFE02	05	r	1,587	X33
Gartenfeld	GAFE03	05	h	1,635	X33
Gatower Str./Heerstr.	GAHE01	01	r	9,558	134, X34, N34
Gatower Str./Heerstr.	GAHE02	03	r	11,022	136, 236, M49, X34, X49
Gatower Str./Heerstr.	GAHE03	01	h	9,654	134, N34
Gatower Str./Heerstr.	GAHE03	03	h	11,158	136, 236
Gatower Str./Heerstr.	GAHE04	03	h	11,198	M49, X49
Gatow Kirche	GAKI01	01	r	6,261	134, X34, N34
Gatow Kirche	GAKI02	01	h	6,309	134, X34, N34
Galenstr.	GALS02	07	h	0,383	134, 237, M37
Galenstr.	GALS02	07	h2	0,383	X33, X36
Galenstr.	GALS03	07	r	0,380	134, 237, M37
Galenstr.	GALS03	07	r2	0,380	X33, X36
Galenstr.	GALS04	07	r2	0,363	X33, X36
Gatower Str/Weinmeister- hornweg	GAWE01	01	r	8,880	134
Gatower Str/Weinmeister- hornweg	GAWE02	01	h	8,799	134
Güterbahnhof Ruhleben	GBRL01	04	h	8,552	M45
Güterbahnhof Ruhleben	GBRL02	04	r	8,467	M45
Gliensteig	GLST01	13	h	3,726	130
Gliensteig	GLST02	13	r	3,777	130
Glühwürmchenweg	GLWM01	13	r	1,792	M37
Glühwürmchenweg	GLWM02	13	h	1,494	M37
Genfenbergstr.	GNFB01	16	r	0,519	136, 236
Genfenbergstr.	GNFB02	16	h	0,486	136, 236
Goltzstr./Rauchstr.	GORA01	06	h	0,343	236
Goltzstr./Rauchstr.	GORA02	06	r	0,318	236

<b>Haltestelle</b>	<b>Kürzel</b>	<b>AB</b>	<b>Spur</b>	<b>km</b>	<b>Bedienung (Linien)</b>
Gredinger Str.	GREDO1	02	h	1,160	X34
Gredinger Str.	GREDO2	02	r	1,220	X34
Grünhofer Weg	GRHW01	04	h	11,039	M32
Grünhofer Weg	GRHW02	04	r	11,018	M32
Griesingerstr./Stadtrandstr.	GRST01	13	h	1,892	M32
Griesingerstr./Stadtrandstr.	GRST02	13	r	1,880	M32
Gartenstadt Staaken	GSTA01	07	h	4,083	237
Gartenstadt Staaken	GSTA02	07	r	4,080	237
General-Steinhoff-Kaserne	GSTK01	01	r	3,349	134, X34, N34
General-Steinhoff-Kaserne	GSTK02	01	h	3,489	134, X34, N34
Gößweinsteiner Gang	GSWG01	01	h	0,724	134, X34, N34
Gößweinsteiner Gang	GSWG02	01	r	0,760	134, X34, N34
Gutsstr.	GUTS02	02	r	2,941	X34
Hauptstr.	HAPT01	08	r	1,830	M32
Hauptstr.	HAPT02	08	h	1,768	M32
Heidebergplan	HBPL01	09	h	0,156	M32
Heidebergplan	HBPL02	09	h	0,180	M32
Haselhorster D./Gartenfelder Str	HDGF01	05	r	0,619	X33
Haselhorster D./Gartenfelder Str	HDGF02	05	h	0,697	X33
Haus des Rundfunks	HDRF01	03	r	4,498	M49
Haus des Rundfunks	HDRF03	03	h	4,527	M49
Heidereuterstr.	HDRT01	04	h	9,465	M45
Heidereuterstr.	HDRT02	04	r	9,512	M45
Heerstr. 438-446	HEER01	03	h	12,967	137, M37, M49, X49
Heerstr. 438-446	HEER02	03	r	12,939	137, M37, M49, X49
Heerstr./Magistratsweg	HEMA01	03	r	12,658	M49, X49
Heerstr./Magistratsweg	HEMA02	03	h	12,770	137, M37, M49, X49

<b>Haltestelle</b>	<b>Kürzel</b>	<b>AB</b>	<b>Spur</b>	<b>km</b>	<b>Bedienung (Linien)</b>
Heerstr./Magistratsweg	HEMA03	12	h	0,112	137, M37
Heerstr./Nennhauser Damm	HENH01	03	h	15,842	M49
Heerstr./Nennhauser Damm	HENH02	08	h	3,115	M32, M49
Heerstr./Nennhauser Damm	HENH03	08	r	3,103	M32
Heerstr./Wilhelmstr.	HEWI03	03	h	11,586	M49, X49
Heerstr./Wilhelmstr.	HEWI04	03	r	11,573	M49, X49
Hugo-Cassirer-Str.	HGCS02	06	h	0,795	236
Hugo-Cassirer-Str.	HGCS03	06	r	0,783	236
Hügelschanze	HGLS01	10	h	0,699	M45
Hügelschanze	HGLS02	10	r	0,774	M45
Holzhauser Str./Schubartstr.	HHSB03	05	h	7,940	X33
Holzhauser Str./Schubartstr.	HHSB06	05	r	7,928	X33
Hochhausweg	HHWG01	13	r	0,699	M37
Hochhausweg	HHWG02	13	h	0,738	M37
Helleberge	HLLB01	01	r	4,738	134, X34, N34
Helleberge	HLLB02	01	h	4,645	134, X34, N34
Hahneberg	HNBG01	03	r	13,976	M37, X49
Hahneberg	HNBG02	03	r	14,036	M49
Hahneberg	HNBG03	03	h	13,996	M49
Hahneberg	HNBG04	03	r	13,950	M37, X49
Hohenzollernring/Falkenseer Ch.	HOFA01	19	r	3,169	137, M37
Hohenzollernring/Falkenseer Ch.	HOFA02	19	h	3,199	137, M37
Hottengrund	HOTT01	01	h	0,001	X34, N34
Hottengrund	HOTT02	01	h	0,001	X34, N34
Harburger Weg	HRBW01	04	h	12,709	M32
Harburger Weg	HRBW02	04	r	12,691	M32
Havelschanze	HVLS01	01	r	14,381	136, 236, N34
Havelschanze	HVLS02	01	h	14,457	136, 236, N34
Isenburger Weg	ISEN02	07	h	5,057	237
Im Spektefeld/Schulzentrum	ISSZ01	13	h	0,48	X49, M37

<b>Haltestelle</b>	<b>Kürzel</b>	<b>AB</b>	<b>Spur</b>	<b>km</b>	<b>Bedienung (Linien)</b>
Im Spektefeld/Schulzentrum	ISSZ02	13	r	0,385	X49, M37
Im Spektefeld/Schulzentrum	ISSZ03	13	h	0,445	X49, M37
Jaczostr.	JACZ01	03	r	10,695	136, 236, M49
Jaczostr.	JACZ02	03	h	10,663	136, 236, M49
Jänickendorfer Weg	JAEW01	07	h	6,246	237
S+U Zoologischer Garten/Jebensstraße	JEBN01	04	h	0,078	M45
S+U Zoologischer Garten/Jebensstraße	JEBN02	04	r	0,265	M45
Joachimsthaler Str./Kantstr.	JOKA01	03	h	0,821	M49, X34
Joachimsthaler Str./Kantstr.	JOKA02	03	r	0,93	M49, X34
Johannesstift	JOST01	10	h	2,887	M45
Johannesstift	JOST02	10	h	2,842	M45
Kaserne Hottengrund	KAHO02	01	h	0,195	134, N34
Kaserne Hottengrund	KAHO03	01	r	0,247	134, N34
Kantstr./Leibnizstr.	KALE03	03	h	1,947	M49, X34
Kantstr./Leibnizstr.	KALE04	03	r	2,009	M49, X34
Kamener Weg	KAMW01	05	r	5,788	X33
Kamener Weg	KAMW02	05	h	5,800	X33
Königin-Elisabeth-S./Span- dauer D	KESD03	04	r	4,143	M45
Königin-Elisabeth-S./Span- dauer D	KESD04	04	h	4,175	M45
Kaiser-Friedrich-Str./Kantstr.	KFKA01	03	h	2,837	M49, X34
Kaiser-Friedrich-Str./Kantstr.	KFKA02	03	r	2,729	M49, X34
Krumme Gärten	KGRT01	14	h	2,313	M37, 137
Krumme Gärten	KGRT02	14	r	2,300	M37, 137
Kirchhofstr.	KHFS01	01	h	13,420	136, 236, N34
Kirchhofstr.	KHFS02	01	r	13,359	136, 236, N34
Klausenerplatz	KLAP01	04	h	3,334	M45

<b>Haltestelle</b>	<b>Kürzel</b>	<b>AB</b>	<b>Spur</b>	<b>km</b>	<b>Bedienung (Linien)</b>
Klausenerplatz	KLAP02	04	r	3,293	M45
Klosterbuschweg	KLBW01	12	h	2,110	X49
Klosterbuschweg	KLBW02	12	r	2,158	X49
Kleine Eiswerderstr.	KLEW01	06	r	2,388	236
Kleine Eiswerderstr.	KLEW02	06	h	2,388	236
Klinkeplatz	KLPL03	10	h	1,542	M45
Klinkeplatz	KLPL04	10	r	1,453	M45
Klärwerkstr.	KLRW01	18	h	2,705	130
Klärwerkstr.	KLRW02	18	r	2,642	130
Krankenhaus Havelhöhe	KRHA01	01	h	3,100	134, N34, X34
Krankenhaus Havelhöhe	KRHA02	01	r	3,021	134, N34, X34
Krematorium Ruhleben	KRRU01	04	h	7,743	M45
Krematorium Ruhleben	KRRU02	04	r	7,768	M45
Kirschenallee	KRSC01	04	h	5,007	M45
Kirschenallee	KRSC02	04	r	5,046	M45
Kastanienallee	KSTA01	04	r	4,668	M45
Kastanienallee	KSTA02	04	h	4,692	M45
Kurze Str./Mittelstr.	KUMI01	11	r	0,487	134
Kurze Str./Mittelstr.	KUMI02	11	h	0,418	134
Kuno-Fischer-Str.	KUNO01	03	r	3,614	M49
Kuno-Fischer-Str.	KUNO02	03	h	3,633	M49
Kurpromenade	KURP02	02	r	2,451	X34
Leonardo-da-Vinci-Str.	LDVI01	02	h	2,723	X34
Leubnitzer Weg	LEUB01	15	r	0,060	137
Leubnitzer Weg	LEUB02	15	h	0,046	137
Luisenpl./Schloss Charlottenburg	LPSC01	04	h	2,856	M45
Luisenpl./Schloss Charlottenburg	LPSC05	04	r	2,725	M45
Louise-Schroeder-Siedlung	LSSI01	04	r	13,439	M32
Louise-Schroeder-Siedlung	LSSI02	04	h	13,431	M32
Leuthingerweg	LTHG01	07	r	2,559	237

<b>Haltestelle</b>	<b>Kürzel</b>	<b>AB</b>	<b>Spur</b>	<b>km</b>	<b>Bedienung (Linien)</b>
Leuthingerweg	LTHG02	07	h	2,544	237
Lutoner Str.	LTON01	27	h	1,360	137, M37
Lutoner Str.	LTON02	14	r	1,192	137, M37
Lutoner Str.	LTON03	14	h	1,309	137. M37
Lüdenscheider Weg/Daumstr.	LWDM01	06	r	2,958	236
Lüdenscheider Weg/Daumstr.	LWDM02	06	h	2,955	236
Magistratsweg/Brunsbütteler D.	MABR01	12	r	1,441	X49
Magistratsweg/Brunsbütteler D.	MABR02	04	r	13,090	M32
Magistratsweg/Brunsbütteler D.	MABR03	04	h	13,093	M32
Magistratsweg/Brunsbütteler D.	MABR04	12	h	1,458	X49
Marchstr.	MARS03	04	r	1,193	M45
Marchstr.	MARS04	04	h	1,205	M45
Masurenallee/ZOB	MAZO03	03	r	4,447	M49
Masurenallee/ZOB	MDZI05	03	h	4,345	M49
Machandelweg	MCHD02	04	h	6,765	M45, 130
Machandelweg	MCHD03	04	r	6,571	M45
Melanchthonplatz	MELA01	01	r	10,29	134
Melanchthonplatz	MELA03	01	h	10,419	134
Melanchthonplatz	MELA04	17	r	0,583	N34
Merziger Str.	MERZ01	13	r	5,935	130
Merziger Str.	MERZ02	13	h	5,983	130
Metzer Str.	METZ01	01	h	10,886	134
Metzer Str.	METZ02	01	r	10,883	134
Mohrunger Allee	MHRA01	03	h	6,596	M49
Mohrunger Allee	MHRA02	03	r	6,58	M49
Miraustr.	MIRA01	05	h	8,232	X33
Miraustr.	MIRA02	05	r	8,274	X33

Haltestelle	Kürzel	AB	Spur	km	Bedienung (Linien)
Mülheimer Str.	MLHM01	19	h	4,533	137, M37
Mülheimer Str.	MLHM02	19	r	4,493	137, M37
Meiningenallee	MNGA01	04	r	5,611	M45
Meiningenallee	MNGA02	04	h	5,575	M45
Möthlower Str.	MOET02	07	h	7,244	237
Mögeldorfer Weg	MOEW01	10	r	2,012	M45
Mögeldorfer Weg	MOEW02	10	h	1,989	M45
Märkisches Zentrum	MRKZ01	05	h	11,910	X33
Märkisches Zentrum	MRKZ02	05	r	11,898	X33
Moritzstr.	MRTZ01	01	r	12,502	134, 136, 137, 236, M37, M45, N34
Moritzstr.	MRTZ02	01	h	12,43	134, 136, 137, 236, M37, M45, N34
Mertensstr.	MTNS01	01	h	15,647	136, N34
Mertensstr.	MTNS05	01	r	15,651	136, N34
Metzer Platz	MTZP01	16	r	1,375	136, 236, N34
Metzer Platz	MTZP02	16	h	1,341	136, 236, N34
Motorradwerk	MWRK01	19	r	0,676	X33
Motorradwerk	MWRK02	19	h	0,691	X33
Nauener Str.	NAUE01	04	h	11,421	M32
Nauener Str.	NAUE02	04	r	11,382	M32
Neue Bergstr.	NBGS01	01	h	13,977	136, 236, N34
Neue Bergstr.	NBGS02	01	r	13,978	136, 236, N34
Neukladower Allee	NKLA01	01	r	2,588	134, X34, N34
Neukladower Allee	NKLA02	01	h	2,534	134, X34, N34
Obstallee	OALL01	14	h	0,359	M37
Obstallee	OALL02	14	r	0,329	M37
Oberdorfer Steig	ODFS01	07	h	5,434	237
Otto-Suhr-Allee/Leibnizstr.	OSLB02	04	r	1,621	M45
Otto-Suhr-Allee/Leibnizstr.	OSLB03	04	h	1,576	M45

<b>Haltestelle</b>	<b>Kürzel</b>	<b>AB</b>	<b>Spur</b>	<b>km</b>	<b>Bedienung (Linien)</b>
Pausiner Str.	PAUS01	13	r	4,633	130
Pausiner Str.	PAUS02	13	h	4,665	130
Polizeidirektion 2	PDIR01	04	r	7,987	M45
Polizeidirektion 2	PDIR02	04	h	8,020	M45
Pfirsichweg	PFWG01	01	r	6,765	134, N34
Pfirsichweg	PFWG02	01	h	6,757	134, N34
Paul-Gerhardt-Ring	PGRG02	13	r	0,234	M37, X49
Pichelswerder	PIW01	03	h	9,396	M49
Pichelswerder	PIW02	03	r	9,437	M49
Pichelsdorfer-/Weißenburger Str.	PIWE01	16	h	1,077	136, 236, N34
Pichelsdorfer-/Weißenburger Str.	PIWE02	16	r	1,052	136, 236, N34
Pionierstr./Zeppelinstr.	PIZE01	11	r	1,639	134
Pionierstr./Zeppelinstr.	PIZE02	11	h	1,549	134
Pionierstr./Zeppelinstr.	PIZE03	13	r	5,225	130
Pionierstr./Zeppelinstr.	PIZE04	13	h	5,237	130
Park Ruhwald	PKRW01	04	r	5,883	M45
Park Ruhwald	PKRW02	04	h	5,81	M45
Predigergarten	PRGT01	10	r	0,349	M45
Predigergarten	PRGT02	10	h	0,288	M45
Parnemannweg	PRNM01	01	h	1,266	134, N34
Parnemannweg	PRNM02	01	r	1,165	134, N34
Paulsternstr./Gartenfelder Str.	PSGF02	05	h	1,055	X33
Paulsternstr./Gartenfelder Str.	PSGF03	05	r	1,043	X33
Pichelswerderstr.	PWDR01	18	r	1,289	130
Pichelswerderstr.	PWDR02	18	h	1,383	130
Päwesiner Weg	PWSW01	04	h	11,750	M32
Päwesiner Weg	PWSW02	04	r	11,747	M32
Rauchstr.	RAUC03	01	h	15,234	136, N34

Haltestelle	Kürzel	AB	Spur	km	Bedienung (Linien)
Rauchstr.	RAUC03	06	h	-0,025	236, X36
Rauchstr.	RAUC04	01	r	15,222	136, 236, X36, N34
Reimerweg	REIM01	03	h	13,341	137, M37, M49
Reimerweg	REIM02	03	h	13,196	137, M37, M49
Reimerweg	REIM03	03	r	13,289	137, M37, M49
Reimerweg	REIM04	03	r	13,238	137, M37, M49
Rex-Waite-Str.	REXW01	02	h	3,035	X34
Ragniter Allee	RGNA01	03	h	7,593	M49
Ragniter Allee	RGNA02	03	r	7,503	M49
Ruhlebener Str./Grunewald- str.	RLGW01	04	r	9,801	M45
Ruhlebener Str./Grunewald- str.	RLGW02	04	h	9,790	M45
Radelandstr./Pflegeheim	RLPF01	13	r	2,573	130
Radelandstr./Pflegeheim	RLPF02	13	h	2,604	130
Rudolf-Wissell-Siedlung	RWSI01	15	r	0,792	137
Rudolf-Wissell-Siedlung	RWSI02	12	h	0,483	X49
Rudolf-Wissell-Siedlung	RWSI03	12	r	0,206	X49; 137
Sandstr.	SAND01	14	h	0,042	M37
Sandstr.	SAND02	03	r	12,218	M49, X49
Sandstr.	SAND03	03	h	12,260	M37, M49, X49
Savignyplatz	SAVG01	03	h	1,319	M49
Savignyplatz	SAVG02	03	h	1,422	M49
Savignyplatz	SAVG03	03	r	1,378	M49
Schülerbergstr.	SCBG01	10	r	1,140	M45
Schülerbergstr.	SCBG02	10	h	1,092	M45
Schorfheidestr./Eichhorster Weg	SCEI01	05	h	11,438	X33
Schorfheidestr./Eichhorster Weg	SCEI02	05	r	11,399	X33
S Charlottenburg	SCHB02	26	h	0,382	X49

Haltestelle	Kürzel	AB	Spur	km	Bedienung (Linien)
Schulstraße	SCHU01	25	r	0,163	M32
Schulstraße	SCHU02	25	h	0,180	M32
Schallweg	SCLL01	02	r	0,397	X34
Schallweg	SCLL02	02	h	0,455	X34
Scholzplatz	SCLZ03	03	h	8,061	M49
Scholzplatz	SCLZ04	03	r	8,038	M49
Schulzenstr.	SCZS01	07	h	1,522	237
Schulzenstr.	SCZS02	07	r	1,499	237
Siedlung Haselhorst	SDHH01	05	h	0,277	X33
Siedlung Haselhorst	SDHH02	05	r	0,307	X33
Spandauer Damm/Reichsstr.	SDRE01	04	r	6,244	M45
Spandauer Damm/Reichsstr.	SDRE02	04	h	6,277	M45
Seecktstr.	SEEC01	14	h	2,002	137, M37
Seecktstr.	SEEC02	14	r	2,023	137, M37
Seegefelder Weg	SEEG02	08	h	0,043	237
Seekorso	SEEK01	02	h	2,002	X34
Seekorso	SEEK02	02	r	2,096	X34
Seegefelder Weg/Kloster- buschweg	SEKL01	07	r	3,052	237
Seegefelder Weg/Kloster- buschweg	SEKL02	12	h	2,657	X49
Seegefelder Weg/Kloster- buschweg	SEKL03	12	r	2,645	X49
Seegefelder Weg/Kloster- buschweg	SEKL04	07	h	2,976	237
Seeburger Str./Päwesiner Weg	SEPA01	14	h	1,537	137, M37
Seeburger Str./Päwesiner Weg	SEPA02	14	r	1,600	137, M37
S Heerstr.	SHST01	03	h	5,952	X34, M49, X49
S Heerstr.	SHST02	03	r	5,940	X34, M49, X49
Siedlung Hakenfelde	SIHK01	01	r	16,395	136, N34
Siedlung Hakenfelde	SIHK02	01	h	16,369	136, N34

<b>Haltestelle</b>	<b>Kürzel</b>	<b>AB</b>	<b>Spur</b>	<b>km</b>	<b>Bedienung (Linien)</b>
Schloss Charlottenburg	SLCH02	04	r	3,074	M45
Schlüterstr.	SLUE01	03	h	1,704	M49, X49, X34
Schlüterstr.	SLUE02	03	r	1,756	M49, X49, X34
S Messe Nord/ICC	SMNO02	03	r	4,058	M49, X49, X34
S Messe Nord/ICC	SMNO03	03	h	4,097	M49, X49, X34
Sandheideweg	SNDH01	01	r	9,206	134, N34, X34
Sandheideweg	SNDH02	01	h	9,247	134, N34, X34
Sophie-Charlotten-Str.	SOCN01	04	h	3,725	M45
Sophie-Charlotten-Str.	SOCN03	04	r	3,607	M45
Spektefeld	SPFD01	13	h	0,072	M37, X49
Spektefeld	SPFD02	13	r	0,059	M37, X49
Spektefeld	SPFD03	12	h	3,357	M37
Spekteweg	SPKW01	13	r	6,281	130
Spekteweg	SPKW02	13	h	6,283	130
Springerzeile	SPRZ01	12	h	0,879	X49
Springerzeile	SPRZ02	12	r	0,796	X49
Spandauer-See-Brücke	SPSB01	06	r	1,233	236
Spandauer-See-Brücke	SPSB02	06	h	1,179	236
Wasserwerk Spandau	SPWW	11	r	3,15	134
S Stresow	SSRW01	18	h	0,987	130
S Stresow	SSRW02	18	h	1,009	130
S Stresow	SSRW03	18	r	0,997	130
S Stresow	SSRW04	18	h	1,008	130
Hackbuschstr./Straße 603	SSSE01	07	r	3,527	237
Hackbuschstr./Straße 603	SSSE02	07	r	3,471	237
Staaķener Feldstr.	STFS01	04	h	14,739	M32
Staaķener Feldstr.	STFS02	04	r	14,742	M32
Stadion Haselhorst	STHH01	06	r	2,749	236
Stadion Haselhorst	STHH02	06	h	2,763	236
Steinplatz	STPL01	04	r	0,591	M45
Steinplatz	STPL02	04	h	0,526	M45
Sterkrader Str.	STRK01	05	r	6,308	X33

Haltestelle	Kürzel	AB	Spur	km	Bedienung (Linien)
Sterkrader Str.	STRK02	05	h	6,320	X33
Stresowplatz	STRP01	18	h	0,769	130
Stresowplatz	STRP02	18	r	0,738	130
Stößenseebrücke	STSB01	03	h	8,799	M49
Stößenseebrücke	STSB02	03	r	8,783	M49
S+U Rathaus Spandau	SUSP01	07	h	0,072	130, 237
S+U Rathaus Spandau	SUSP01	01	h	12,179	M32, M45
S+U Rathaus Spandau	SUSP02	01	h	12,108	M32,
S+U Rathaus Spandau	SUSP03	01	r	12,076	134, 137, M37, M45, N34, X33
S+U Rathaus Spandau	SUSP04	01	r	12,076	136, 236, M32
S+U Rathaus Spandau	SUSP06	01	h	12,169	237, M32, X33, 134, M45, 136, 236, N34, M37
S+U Rathaus Spandau	SUSP07	01	h	12,147	X33, X36
S+U Rathaus Spandau	SUSP08	01	h	12,169	136, 236, X33, X36
S+U Rathaus Spandau	SUSP09	07	h	0,072	130, 237, X33, X36
S+U Rathaus Spandau	SUSP10	07	r	0,091	130, 237, X33, X36
S+U Rathaus Spandau	SUSP13	01	h	12,147	137, M37
S+U Wittenau	SUWI01	05	r	10,691	X33
S+U Wittenau	SUWI02	05	h	10,609	X33
Schwabinger Weg	SWBW01	02	h	0,736	X34
Schwabinger Weg	SWBW02	02	r	0,678	X34
S Westend	SWND01	04	r	3,835	M45
S Westend	SWND02	04	h	3,857	M45
Sandwiesenweg	SWSW01	13	h	2,873	130
Sandwiesenweg	SWSW02	13	r	2,908	130
Schwanter Weg	SWWG01	13	h	4,165	130
Schwanter Weg	SWWG02	13	r	4,125	130
Teltower Str.	TELT01	04	h	8,943	M45

<b>Haltestelle</b>	<b>Kürzel</b>	<b>AB</b>	<b>Spur</b>	<b>km</b>	<b>Bedienung (Linien)</b>
Teltower Str.	TELT02	04	r	8,836	M45
Temmeweg	TEMM01	01	h	0,501	134, N34
Temmeweg	TEMM02	01	r	0,538	134, N34
U Altstadt Spandau	UASP01	19	r	1,806	X33
U Altstadt Spandau	UASP02	19	h	1,866	X33
U Ernst-Reuter-Platz	UERP02	04	r	0,88	M45
U Ernst-Reuter-Platz	UERP03	04	h	0,894	M45
U Holzhauser Str.	UHHS02	05	r	6,882	X33
U Holzhauser Str.	UHHS03	05	h	6,985	X33
Uhlandstr./Kantstr.	UHKA01	03	h	1,223	M49
Uhlandstr./Kantstr.	UHKA02	03	r	1,125	M49
U Haselhorst	UHS01	06	h	3,636	236, X36
U Haselhorst/Daumstr.	UHS02	06	r	3,483	236, X33, X36
U Haselhorst	UHS03	06	h	3,550	236, X36
U Haselhorst/Daumstr.	UHS05	19	r	-0,129	236, X33, X36
Ungewitterweg	UNGE02	08	h	0,421	237
U Rathaus Reinickendorf	URRD04	05	h	9,496	X33
U Rathaus Reinickendorf	URRD05	05	r	9,514	X33
U Ruhleben	URUH01	04	r	6,858	130, M45
U Ruhleben	URUH02	04	h	6,975	130
U Ruhleben	URUH04	04	h	7,024	130, M45
U Richard-Wagner-Platz	URWP01	04	r	2,188	M45
U Richard-Wagner-Platz	URWP06	04	h	2,201	M45
U Theodor-Heuss-Platz	UTHP02	03	h	4,958	M49, X49
U Theodor-Heuss-Platz Süd	UTHS01	03	r	4,854	X49
U Wilmersdorfer Str./S Charlottenburg	UWD01	26	h	0,639	X49
U Wilmersdorfer Str./S Charlottenburg	UWD02	26	h	0,601	X49
U Wilmersdorfer Str./Kantstr.	UWDK01	03	h	2,456	M49
U Wilmersdorfer Str./Kantstr.	UWDK02	03	r	2,491	M49, X34
U Zitadelle	UZIT01	19	r	0,985	X33

Haltestelle	Kürzel	AB	Spur	km	Bedienung (Linien)
U Zitadelle	UZIT02	19	h	1,028	X33
Viersener Str.	VIE01	07	r	1,769	237
Viersener Str.	VIE02	07	h	1,792	237
Warburgzeile	WBGZ01	04	r	1,890	M45
Warburgzeile	WBGZ02	04	h	1,948	M45
Wiesendammbücke	WDBR01	18	r	3,388	130
Wiesendammbücke	WDBR02	18	h	3,409	130
Weidenweg	WDWG01	03	r	14,469	M49
Weidenweg	WDWG02	03	h	14,535	M49
Werderstr.	WERS01	01	r	15,970	136
Werderstr.	WERS02	01	h	15,957	136, N34
Werderstr.	WERS03	01	r	15,902	136, N34
Wilhelmsruher Damm	WIDA01	05	h	12,791	X33
Wilhelmsruher Damm	WIDA03	05	r	12,751	X33
Wilhelmsruher D/Treuen- brietzener Str.	WITR01	05	h	12,322	X33
Wilhelmsruher D/Treuen- brietzener Str.	WITR02	05	r	12,289	X33
Waldkrankenhaus	WKHS01	13	r	2,165	130
Waldkrankenhaus	WKHS02	13	h	2,112	M37
Waldkrankenhaus	WKHS04	13	r	2,100	M37
Waldkrankenhaus	WKHS05	13	h	2,211	130
Werkring	WKRG01	18	r	3,032	130
Werkring	WKRG02	18	h	3,055	130
Wolburgsweg	WLBW01	11	r	2,846	134
Wolburgsweg	WLBW02	11	h	2,765	134
Waldallee	WLDA01	02	h	1,723	X34
Waldallee	WLDA02	02	r	1,704	X34
Windmühlenberg	WMBG01	11	r	0,879	134
Windmühlenberg	WMBG02	11	h	0,927	134
Christoph-Kolumbus-Str.	WNBH01	01	r	3,737	134, N34
Christoph-Kolumbus-Str.	WNBH02	01	h	3,786	134, N34

Haltestelle	Kürzel	AB	Spur	km	Bedienung (Linien)
Wröhmännerpark	WRPK01	01	r	13,012	134, 136, 236, M45, N34
Wröhmännerpark	WRPK02	10	h	-0,115	134, M45
Wröhmännerpark	WRPK03	01	h	12,985	136, 236, N34
Württembergallee	WTMB01	03	h	5,486	M49
Württembergallee	WTMB02	03	r	5,467	M49
Westerwaldstr.	WWLD01	19	h	4,131	130
Westerwaldstr.	WWLD02	19	h	4,187	130, 137, M37
Westerwaldstr.	WWLD03	19	r	4,059	130, 137, M37
Wasserwerk Spandau	WWSP02	11	r	3,081	134
Wasserwerk Spandau	WWSP03	11	h	3,093	134
Zeppelinstr./Seegefelder Str.	ZESE01	13	r	6,635	130
Zeppelinstr./Seegefelder Str.	ZESE02	07	r	1,198	130, 237
Zeppelinstr./Seegefelder Str.	ZESE03	07	h	1,284	237
Ziegelhof	ZGLH01	01	r	11,289	134, 136, 236, N34
Ziegelhof	ZGLH02	01	h	11,304	134, 136, 236, N34
Ziegelhof	ZGLH03	14	h	2,48	137, M37
Ziegelhof	ZGLH04	14	r	2,504	137, M37
Zur Haveldüne	ZHDN01	01	r	8,158	134, N34
Zur Haveldüne	ZHDN02	01	h	8,3	134, N34, X34
Zitadelle Spandau	ZISP01	19	h	1,308	X33
Zitadelle Spandau	ZISP02	19	r	1,260	X33
S+U Zoologischer Garten	ZOO01	03	r	0,569	M45, M49, X34
S+U Zoologischer Garten	ZOO03	03	h	0,556	M45
S+U Zoologischer Garten	ZOO04	03	h	0,556	M49, X34
Hertzallee	ZOOH01	03	r	0,108	M45
Hertzallee	ZOOH02	03	r	0,260	M49
Hertzallee	ZOOH03	03	h	0,150	M45
Hertzallee	ZOOH05	03	h	0,150	M49
Zweibrücker Str.	ZWBR01	19	r	3,364	137, M37

Haltestelle	Kürzel	AB	Spur	km	Bedienung (Linien)
Zweibrücker Str.	ZWBR02	19	h	3,385	137, M37
Zweiwinkelweg	ZWWW01	04	r	13,699	M32
Zweiwinkelweg	ZWWW02	04	h	13,714	M32

## 10.2 Darstellung der Oberleitungsbereiche, Positionen der Gleichrichterunterwerke und Nennparameter der Gleichrichtereinheiten

### 10.2.1 Szenario A

Tabelle 10-5: Oberleitungsbereiche innerhalb der Abschnitte, Szenario A

AB	Spur	Beginn (ca.)	Ende (ca.)	Kilometer Beginn	Kilometer Ende	Länge [km]
01	h	HOTT	GAHE	0,000	9,600	9,600
01	r	HOTT	GAHE	0,000	9,558	9,558
01	h	GAHE	MELA	9,654	10,363	0,709
01	r	GAHE	MELA	9,620	10,290	0,670
01	h	MELA	ZGLH	10,419	11,186	0,767
01	r	MELA	ZGLH	10,378	11,289	0,911
01	h	ZGLH	BDRU	11,226	11,756	0,530
01	r	ZGLH	BDRU	11,339	11,702	0,363
01	h	WRPK	RAUC	12,985	15,234	2,249
01	r	WRPK	RAUC	13,012	15,222	2,210
01	h	MTNS	AAMN	15,647	16,686	1,039
01	r	MTNS	AAMN	15,651	16,686	1,035
02	h	SCLL	SEEK	0,455	2,002	1,547
02	r	SCLL	SEEK	0,397	2,096	1,699
03	h	JOKA	AMTG	0,821	3,200	2,379
03	r	JOKA	AMTG	0,930	3,216	2,286
03	h	AMTG	SMNO	3,300	4,097	0,797
03	r	AMTG	SMNO	3,254	4,058	0,804

AB	Spur	Beginn (ca.)	Ende (ca.)	Kilometer Beginn	Kilometer Ende	Länge [km]
03	h	WTMB	GAHE	5,486	11,122	5,636
03	r	WTMB	GAHE	5,467	11,022	5,555
03	h	GAHE	HEMA	11,198	12,713	1,515
03	r	GAHE	HEMA	11,147	12,658	1,511
03	h	HEMA	HENH	12,770	15,842	3,072
03	r	HEMA	HENH	12,713	15,873	3,160
03	h	HENH	DAHV	15,873	18,571	2,698
03	r	HENH	DAHV	15,883	18,963	3,080
04	h	JEBN	UERP	0,078	0,894	0,816
04	r	JEBN	UERP	0,265	0,880	0,615
04	h	MARS	LPSC	1,205	2,856	1,651
04	r	MARS	LPSC	1,193	2,725	1,532
04	h	KLAP	SWND	3,334	3,857	0,523
04	r	KLAP	SWND	3,293	3,835	0,542
04	h	KESD	MCHD	4,175	6,439	2,264
04	r	KESD	URUH	4,143	6,858	2,715
04	h	MCHD	TELT	6,765	8,888	2,123
04	r	URUH	TELT	7,154	8,836	1,682
04	h	TELT	BDRU	8,943	10,237	1,294
04	r	TELT	BDRU	8,888	10,217	1,329
04	h	BDRU	HRBW	10,323	12,709	2,386
04	r	BDRU	HRBW	10,340	12,691	2,351
04	h	MABR	BRNH	13,093	14,154	1,061
04	r	MABR	BRNH	13,090	14,154	1,064
04	h	STFS	BRSG	14,739	15,854	1,115
04	r	BRNH	BRSG	14,173	15,854	1,681
05	h	UHS	UHS	-0,249	-0,047	0,202
05	r	UHS	UHS	-0,165	-0,129	0,036
05	h	SDHH	UHHS	0,277	6,925	6,648
05	r	SDHH	UHHS	0,307	6,882	6,575
05	h	UHHS	WIDA	6,985	12,867	5,882

AB	Spur	Beginn (ca.)	Ende (ca.)	Kilometer Beginn	Kilometer Ende	Länge [km]
05	r	UHHS	WIDA	6,925	12,867	5,942
06	h	RAUC	UHS	-0,026	3,540	3,566
06	r	RAUC	UHS	-0,058	3,483	3,541
07	h	SUSP	ZESE	0,072	1,249	1,177
07	r	SUSP	ZESE	0,091	1,198	1,107
07	h	ZESE	DYRZ	1,284	2,285	1,001
07	r	ZESE	DYRZ	1,251	2,200	0,949
07	h	DYRZ	FKRW	2,321	4,546	2,225
07	r	DYRZ	FKRW	2,310	4,520	2,210
07	h	FKRW	SEEG	4,550	7,637	3,087
08	h	SEEG	FKRW	0,000	0,755	0,755
08	h	BSTA	BRNH	1,060	1,550	0,490
08	r	FKRW	BRNH	0,755	1,562	0,807
08	h	HAPT	AZPP	1,786	2,809	1,023
08	r	HAPT	AZPP	1,830	2,867	1,037
08	h	HENH	HENH	3,115	3,166	0,051
10	h	PRGT	JOST	0,288	2,920	2,632
10	r	PRGT	JOST	0,349	2,920	2,571
11	h	KUMI	SPWW	0,418	3,158	2,740
11	r	KUMI	SPWW	0,487	3,081	2,594
12	h	HEMA	RWSI	0,112	0,400	0,288
12	r	HEMA	RWSI	0,021	0,400	0,379
12	h	RWSI	KLBW	0,483	2,110	1,627
12	r	RWSI	KLBW	0,405	2,158	1,753
12	h	SEKL	SPFD	2,657	3,302	0,645
12	r	SEKL	SPFD	2,645	3,302	0,657
13	h	SPFD	FAST	0,000	1,119	1,119
13	r	SPFD	FAST	0,000	1,084	1,084
13	h	FAST	WKHS	1,152	2,112	0,960
13	r	FAST	WKHS	1,107	2,100	0,993
13	h	WKHS	BOBA	2,211	3,313	1,102

AB	Spur	Beginn (ca.)	Ende (ca.)	Kilometer Beginn	Kilometer Ende	Länge [km]
13	r	WKHS	BOBA	2,165	3,313	1,148
13	h	BOBA	PAUS	3,446	4,665	1,219
13	r	BOBA	PAUS	3,446	4,633	1,187
13	h	PIZE	FAZE	5,237	5,660	0,423
13	r	PIZE	FAZE	5,225	5,609	0,384
13	h	FAZE	ZESE	5,697	6,684	0,987
13	r	FAZE	ZESE	5,660	6,635	0,975
14	h	SAND	ZGLH	0,042	2,554	2,512
14	r	SAND	ZGLH	0,014	2,543	2,529
15	h	LEUB	RWSI	0,046	0,833	0,787
15	r	LEUB	RWSI	0,060	0,833	0,773
16	h	APIC	ZGLH	0,076	1,709	1,633
16	r	APIC	ZGLH	0,033	1,725	1,692
18	h	BRMA	MCHD	0,473	3,946	3,473
18	r	BRMA	MCHD	0,461	3,962	3,501
19	h	UHS	FAPL	0,000	1,866	1,866
19	r	UHS	FAPL	0,025	1,806	1,781
19	h	FAPL	FAZE	2,231	3,660	1,429
19	r	FAPL	FAZE	2,230	3,592	1,362
19	h	FAZE	FRGO	3,754	6,517	2,763
19	r	FAZE	FRGO	3,639	6,517	2,878
26	h	SCHB	Kant- str./Krumme Str.	0,382	0,901	0,519

Tabelle 10-6: Bereiche mit Verstärkungsleitungen innerhalb der AB, Szenario A

AB	Spur	Beginn (ca.)	Ende (ca.)	Kilometer Beginn	Kilometer Ende	Länge [km]
01	h	ZGLH	BDRU	11,226	11,756	0,530
01	r	ZGLH	BDRU	11,339	11,702	0,363

AB	Spur	Beginn (ca.)	Ende (ca.)	Kilometer Beginn	Kilometer Ende	Länge [km]
01	h	WRPK	RAUC	12,985	15,234	2,249
01	r	WRPK	RAUC	13,012	15,222	2,210
03	h	UWDK	AMTG	2,839	3,200	0,362
03	r	UWDK	AMTG	2,839	3,216	0,378
03	h	AMTG	SMNO	3,300	4,097	0,797
03	r	AMTG	SMNO	3,254	4,058	0,804
03	h	WTMB	GAHE	5,486	11,122	5,636
03	r	WTMB	GAHE	5,467	11,022	5,555
03	h	GAHE	HEMA	11,198	12,713	1,063
03	r	GAHE	HEMA	11,147	12,658	1,114
03	h	HEMA	REIM	12,770	13,191	0,421
03	r	HEMA	REIM	12,713	13,191	0,478
04	h	URUH	TELT	7,154	8,888	1,734
04	r	URUH	TELT	7,154	8,836	1,682
04	h	TELT	BDRU	8,943	10,237	1,294
04	r	TELT	BDRU	8,888	10,217	1,329
04	h	BDRU	HRBW	10,323	12,709	1,428
04	r	BDRU	HRBW	10,340	12,691	1,411
04	h	MABR	BRNH	13,093	14,154	1,061
04	r	MABR	BRNH	13,090	14,154	1,064
05	h	UHS	UHS	-0,249	-0,047	0,202
05	r	UHS	UHS	-0,165	-0,129	0,036
06	h	RAUC	UHS	-0,026	3,540	3,566
06	r	RAUC	UHS	-0,058	3,483	3,541
07	h	SUSP	ZESE	0,072	1,249	1,177
07	r	SUSP	ZESE	0,091	1,198	1,107
13	h	SPFD	ISSZ	0,000	0,506	0,506
13	r	SPFD	ISSZ	0,000	0,506	0,506
14	h	SAND	ZGLH	0,042	2,554	2,512
14	r	SAND	ZGLH	0,014	2,543	2,529

AB	Spur	Beginn (ca.)	Ende (ca.)	Kilometer Beginn	Kilometer Ende	Länge [km]
16	h	APIC	ZGLH	0,076	1,709	1,633
16	r	APIC	ZGLH	0,033	1,725	1,692
19	h	FAPL	FAZE	2,231	3,660	1,429
19	r	FAPL	FAZE	2,230	3,592	1,362
19	h	FAZE	AMKT	3,754	4,952	1,198
19	r	FAZE	AMKT	3,639	4,952	1,313

Tabelle 10-7: Bereiche mit doppelter Fahrdrachtführung innerhalb der AB

AB	Spur	Beginn (ca.)	Ende (ca.)	Kilometer Beginn	Kilometer Ende	Länge [km]
01	h	ZGLH	BDRU	11,339	11,756	0,417
01	r	ZGLH	BDRU	11,339	11,702	0,363
04	r	MCHD	URUH	6,440	6,858	0,418
08	h	HENH	HENH	3,115	3,166	0,051

Tabelle 10-8: Lage der Unterwerke, Positionierung der Speise- bzw. Rückleiterkabelanschlüsse und Kabellänge, Szenario A

Unterwerk Nummer sowie ungefähre Lage (Haltestelle)	Kürzel	AB	Spur	Kilo- meter	Kabel- länge [km]
UW 01 Hottengrund	HOTT	01	h	0,000	0,100
UW 02 Alt-Kladow	ALKL	01	h	1,751	0,100
		01	h	1,752	0,100
		02	h	0,455	0,300
UW 03 General-Steinhoff-Kaserne	GSTK	01	h	3,489	0,100
		01	h	3,490	0,100
UW 04 Helleberge	HLLB	01	h	4,645	0,100
		01	h	4,646	0,100
UW 06 Gatow Kirche	GAKI	01	h	6,309	0,100
		01	h	6,310	0,100
UW 07 Zur Haveldüne	ZHDN	01	h	8,300	0,100
		01	h	8,301	0,100

Unterwerk Nummer sowie ungefähre Lage (Haltestelle)	Kürzel	AB	Spur	Kilometer	Kabellänge [km]
UW 08 Gatower Str. (Heerstr.)	GAHE	01	h	9,558	0,100
		01	h	9,654	0,100
		03	h	11,022	0,100
		03	h	11,198	0,100
		16	h	0,076	0,900
UW 09 Brunsbüttler Damm (Ruhlebener Str.)	BDRU	01	h	11,226	0,500
		01	h	11,702	0,100
		01	r	11,186	0,500
		04	h	10,217	0,100
		04	h	10,340	0,100
		07	h	0,091	0,300
UW 10 Falkenseer Platz	FAPL	01	h	13,012	0,300
		19	h	1,806	0,300
		19	h	2,231	0,300
UW 11 Havelsschanze	HVLS	01	h	14,433	0,100
		01	h	14,434	0,100
UW 13 Aalemannufer	AAMN	01	h	16,686	0,100
UW 14 Seekorso	SEEK	02	h	2,002	0,100
UW 16 Schlüterstr.	SLUE	03	h	1,704	0,100
		03	h	1,705	0,100
UW 17 Kaiser-Friedrich-Str. (Kantstr.)	KFKA	03	h	2,837	0,100
		03	h	2,838	0,100
		26	h	0,382	0,300
UW 18 S Messe Nord (ICC)	SMNO	03	h	4,058	0,100
UW 19 S Heerstraße	SHST	03	h	5,952	0,100
		03	h	5,953	0,100
UW 20 Flatowallee (Olympiastadion)	FLTW	03	h	7,121	0,100
		03	h	7,122	0,100
UW 21 Stößenseebrücke	STSB	03	h	8,790	0,100
		03	h	8,791	0,100
UW 23 Sandstr.	SAND	03	h	12,260	0,100
		03	h	12,261	0,100
		14	h	0,042	0,100
UW 24 Reimerweg	REIM	03	h	13,191	0,100
		03	h	13,192	0,100

Unterwerk Nummer sowie ungefähre Lage (Haltestelle)	Kürzel	AB	Spur	Kilometer	Kabellänge [km]
		12	h	0,400	0,400
		12	h	0,483	0,500
UW 28 Dallgow-Döberitz Havelpark	DAHV	03	h	18,571	0,100
UW 29 S+U Zoologischer Garten (Jebenstr.)	JEBN	03	h	0,930	0,400
		04	h	0,265	0,100
UW 30 U Ernst-Reuter-Platz	UERP	04	h	0,880	0,100
		04	h	1,205	0,100
UW 32 Luisenpl. (Schloss Charlottenburg)	LPSC	04	h	2,725	0,100
UW 33 Klausenerplatz	KLAP	04	h	3,334	0,100
UW 35 Kirschenallee	KRSC	04	h	5,007	0,100
		04	h	5,008	0,100
UW 36 U Ruhleben	URUH	04	h	6,765	0,100
		04	h	7,154	0,300
		04	r	6,438	0,300
		04	r	6,858	0,100
		18	h	3,946	0,300
UW 37 Teltower Str.	TELT	04	h	8,836	0,400
		04	h	8,943	0,400
		18	h	1,378	0,400
		18	r	1,379	0,400
UW 38 Päwesiner Weg	PWSW	04	h	8,836	0,100
		04	h	8,943	0,100
UW 39 Magistratweg (Brunsbüttler Damm)	MABR	04	h	12,691	0,500
		04	h	13,093	0,100
		12	h	1,441	0,100
		12	h	1,442	0,100
Schaltposten 40 Brunsbüttler Damm (Nennhauser Damm)	BRNH	04	h	14,106	0,200
		04	h	14,107	0,200
		04	h	14,742	0,400
		08	h	1,830	0,400
UW 41 Brunsbüttler Damm (Stadtgrenze)	BRSG	04	h	15,688	0,100
UW 42 U Haselhorst	UHS	05	h	-0,129	0,100
		05	h	0,307	0,300
		06	h	3,411	0,300

Unterwerk Nummer sowie ungefähre Lage (Haltestelle)	Kürzel	AB	Spur	Kilometer	Kabel-länge [km]
UW 44 Tegeler Brücke	Tegeler Brücke (ATB)	05	h	2,300	0,100
		05	h	2,301	0,100
UW 46 Kamener Weg	KAMW	05	h	5,800	0,100
		05	h	5,801	0,100
UW 47 U Holzhauser Str.	UHHS	05	h	6,882	0,100
		05	h	6,985	0,100
UW 49 U Rathaus Reinickendorf	URRD	05	h	9,496	0,100
		05	h	9,497	0,100
UW 51 Schorfheidestr. (Eichhorster Weg)	SCEI	05	h	11,438	0,100
		05	h	11,439	0,100
UW 52 Wilhelmsruher Damm	WIDA	05	h	12,791	0,100
UW 53 Hugo-Cassirer-Str.	HGCS	01	h	15,651	1,200
		06	h	0,795	0,100
		06	h	0,796	0,100
UW 55 Zeppelinstr. (Seegefelder Str.)	ZESE	07	h	1,198	0,100
		07	h	1,284	0,100
		13	h	6,635	0,100
UW 56 Seegefelder Weg (Klosterbuschweg)	SEKL	07	h	3,092	0,200
		07	h	3,093	0,200
		12	h	2,110	0,400
		12	h	2,657	0,200
UW 57 Finkenkruger Weg	FKRW	07	h	4,520	0,100
		07	h	4,550	0,100
		08	h	0,755	0,100
		08	h	1,060	0,300
UW 59 Bhf. Albrechtshof	BAHF	07	h	6,424	0,100
		07	h	6,425	0,100
UW 60 Heerstr. (Nennhauser Damm)	HENH	03	h	15,842	0,100
		03	h	15,883	0,200
		08	h	2,809	0,300
UW 61 Windmühlenberg – Hügel-schanze	WMBG	10	h	0,699	0,250
		11	h	0,927	0,250
UW 63 Cautiusstr.	CAUT	10	h	2,321	0,100
		10	r	2,322	0,100

Unterwerk Nummer sowie ungefähre Lage (Haltestelle)	Kürzel	AB	Spur	Kilometer	Kabellänge [km]
UW 67 Spektefeld – Am Kiesteich	SPFD	13	h	0,072	0,250
		13	h	0,073	0,250
		19	h	4,952	0,250
		19	h	4,953	0,250
Schaltposten 68 Falkenseer Chaussee (Stadtrandstr.)	FAST	13	h	1,084	0,100
		13	h	1,152	0,100
		19	h	5,816	0,100
		19	h	5,817	0,100
UW 69 Waldkrankenhaus	WKHS	11	h	3,081	0,700
		13	h	2,100	0,100
		13	h	2,211	0,200
UW 71 Gliensteig	GLST	11	h	2,372	0,700
		11	r	2,373	0,700
		13	h	3,726	0,100
		13	h	3,727	0,100
UW 73 Seeburger Str. (Päwesiner Weg)	SEPA	14	h	1,600	0,100
		14	h	1,601	0,100
		15	h	0,060	0,700
UW 74 Betckestr.	BTCK	16	h	0,878	0,100
		16	h	0,879	0,100
UW 79 Falkenseer Chaussee (Zeppelinstr.)	FAZE	13	h	5,609	0,100
		13	h	5,697	0,100
		19	h	3,592	0,100
		19	h	3,754	0,100
UW 80 Freudstr. (Goldkäferweg)	FRGO	19	h	6,490	0,100

Tabelle 10-9: Maximaler Betriebsstrom, Effektiver Betriebsstrom, Verhältnis beider Ströme und Nennwerte der Gleichrichtereinheiten, Szenario A

Unterwerk	$ I_B _{\max}$ [A] (1 s)	$I_{B,rms}$ [A] (3 h)	$ I_B _{\max} / I_{B,rms}$	GuW-Konfiguration $I_N / S_N$ und Belastbarkeit
UW 01 Hottengrund	878,6	220,2	4,0	500 A/500 kVA, Klasse VI

<b>Unterwerk</b>	<b><math> I_B _{\max}</math> [A] (1 s)</b>	<b><math>I_{B,rms}</math> [A] (3 h)</b>	<b><math> I_B _{\max}</math> /<math>I_{B,rms}</math></b>	<b>GuW-Konfiguration <math>I_N/S_N</math> und Belastbarkeit</b>
UW 02 Alt-Kladow	1300,3	343,2	3,8	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 03 General-Steinhoff-Kaserne	959,5	261,9	3,7	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 04 Helleberge	981,7	249,4	3,9	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 06 Gatow Kirche	868,6	219,6	4,0	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 07 Zur Haveldüne	1060,0	233,4	4,5	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 08 Gatower Str. (Heerstr.)	1887,8	738,6	2,6	1000 A/1000 kVA, Klasse VI
UW 09 Brunsbüttler Damm (Ruhlebener Str.), 2 Gleichrichter	2370,3	862,3	2,7	1000 A/1000 kVA, Klasse VI (jeweils)
UW 10 Falkenseer Platz	3148,1	1072,3	2,9	1500 A/1500 kVA, Klasse VI
UW 11 Havelschanze	2304,0	828,6	2,8	1000 A/1000 kVA, Klasse VI
UW 13 Aalemannufer	709,5	274,3	2,6	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 14 Seekorso	826,2	162,1	5,1	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 16 Schlüterstr.	1294,4	364,8	3,5	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 17 Kaiser-Friedrich-Str. (Kantstr.)	2238,0	597,6	3,7	1000 A/1000 kVA, Klasse VI oder 750 A/750 kVA, Klasse VII
UW 18 S Messe Nord (ICC)	1838,8	494,2	3,7	750 A/750 kVA, Klasse VI oder 500 A/500 kVA, Klasse VII

<b>Unterwerk</b>	<b><math> I_B _{\max}</math> [A] (1 s)</b>	<b><math>I_{B,rms}</math> [A] (3 h)</b>	<b><math> I_B _{\max}</math> /<math>I_{B,rms}</math></b>	<b>GuW-Konfiguration <math>I_N/S_N</math> und Belastbarkeit</b>
UW 19 S Heerstraße	1410,3	416,2	3,4	750 A/750 kVA, Klasse VI
UW 20 Flatowallee (Olympiastadion)	1648,2	502,7	3,3	750 A/750 kVA, Klasse VI
UW 21 Stößenseebrücke	1127,0	366,5	3,1	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 23 Sandstr.	2170,0	676,6	3,2	1000 A/1000 kVA, Klasse VI oder 750 A/750 kVA, Klasse VII
UW 24 Reimerweg	2165,6	700,6	3,1	1000 A/1000 kVA, Klasse VI oder 750 A/750 kVA, Klasse VII
UW 28 Dallgow-Döberitz Havelpark	607,0	199,2	3,0	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 29 S+U Zoologischer Garten (Jebensstraße)	1621,2	408,5	4,0	750 A/750 kVA, Klasse VI
UW 30 U Ernst-Reuter-Platz	1635,4	492,5	3,3	750 A/750 kVA, Klasse VI
UW 32 Luisenpl. (Schloss Charlottenburg)	1411,9	329,3	4,3	750 A/750 kVA, Klasse VI oder 500 A/500 kVA, Klasse VII
UW 33 Klausenerplatz	1689,6	349,3	4,8	750 A/750 kVA, Klasse VI
UW 35 Kirschenallee	1332,4	460,9	2,9	750 A/750 kVA, Klasse VI
UW 36 U Ruhleben	1848,5	532,9	3,5	750 A/750 kVA, Klasse VI
UW 37 Teltower Str.	2188,0	621,7	3,5	1000 A/1000 kVA, Klasse VI oder

<b>Unterwerk</b>	<b><math> I_B _{\max}</math> [A] (1 s)</b>	<b><math>I_{B,rms}</math> [A] (3 h)</b>	<b><math> I_B _{\max}</math> /<math>I_{B,rms}</math></b>	<b>GuW-Konfiguration <math>I_N/S_N</math> und Belastbarkeit</b>
				750 A/750 kVA, Klasse VII
UW 38 Päwesiner Weg	1809,9	753,3	2,4	750 A/750 kVA, Klasse VI
UW 39 Magistratweg (Brunsbüttler Damm)	2522,8	958,9	2,6	1000 A/1000 kVA, Klasse VI
UW 41 Brunsbütteler Damm (Stadtgrenze)	718,1	241,9	3,0	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 42 U Haselhorst	1843,1	802,7	2,3	1000 A/1000 kVA, Klasse VI
UW 44 Tegeler Brücke	900,0	322,3	2,8	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 46 Kamener Weg	1093,1	265,8	4,1	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 47 U Holzhauser Str.	1134,1	285,1	4,0	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 49 U Rathaus Reinickendorf	1021,1	271,6	3,8	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 51 Schorfheidestr. (Eichhorster Weg)	1091,7	293,4	3,7	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 52 Wilhelmsruher Damm	853,1	225,5	3,8	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 53 Hugo-Cassirer-Str.	1880,2	806,9	2,3	1000 A/1000 kVA, Klasse VI
UW 55 Zeppelinstr. (Seegfelder Str.)	1935,3	645,7	3,0	750 A/750 kVA, Klasse VI
UW 56 Seegfelder Weg (Klosterbuschweg)	1654,9	444,1	3,7	750 A/750 kVA, Klasse VI oder 500 A/500 kVA, Klasse VII
UW 57 Finkenkruger Weg	1695,8	418,6	4,1	750 A/750 kVA, Klasse VI oder 500

<b>Unterwerk</b>	<b><math> I_B _{\max}</math> [A] (1 s)</b>	<b><math>I_{B,rms}</math> [A] (3 h)</b>	<b><math> I_B _{\max}</math> /<math>I_{B,rms}</math></b>	<b>GuW-Konfiguration <math>I_N/S_N</math> und Belastbarkeit</b>
				A/500 kVA, Klasse VII
UW 59 Bhf. Albrechtshof	826,4	189,2	4,4	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 60 Heerstr. (Nennhauser Damm)	1021,7	360,7	2,8	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 61 Windmühlenberg – Hügelschanze	1804,1	676,1	2,7	750 A/750 kVA, Klasse VI
UW 63 Cautiusstr.	1362,5	471,5	2,9	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 67 Spektefeld – Am Kiesteich	2341,6	820,3	2,9	1000 A/1000 kVA, Klasse VI
UW 69 Waldkrankenhaus	1220,9	365,3	3,3	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 71 Gliensteig	1434,3	376,8	3,8	750 A/750 kVA, Klasse VI oder 500 A/500 kVA, Klasse VII
UW 73 Seeburger Str. (Päwesiner Weg)	2163,0	830,2	2,6	1000 A/1000 kVA, Klasse VI
UW 74 Betckestr.	1682,0	647,3	2,6	750 A/750 kVA, Klasse VI
UW 79 Falkenseer Chaussee (Zeppelinstr.)	3477,8	1174,5	3,0	1500 A/1500 kVA, Klasse VI
UW 80 Freudstr. (Goldkäferweg)	967,7	293,1	3,3	500 A/500 kVA, Klasse VI

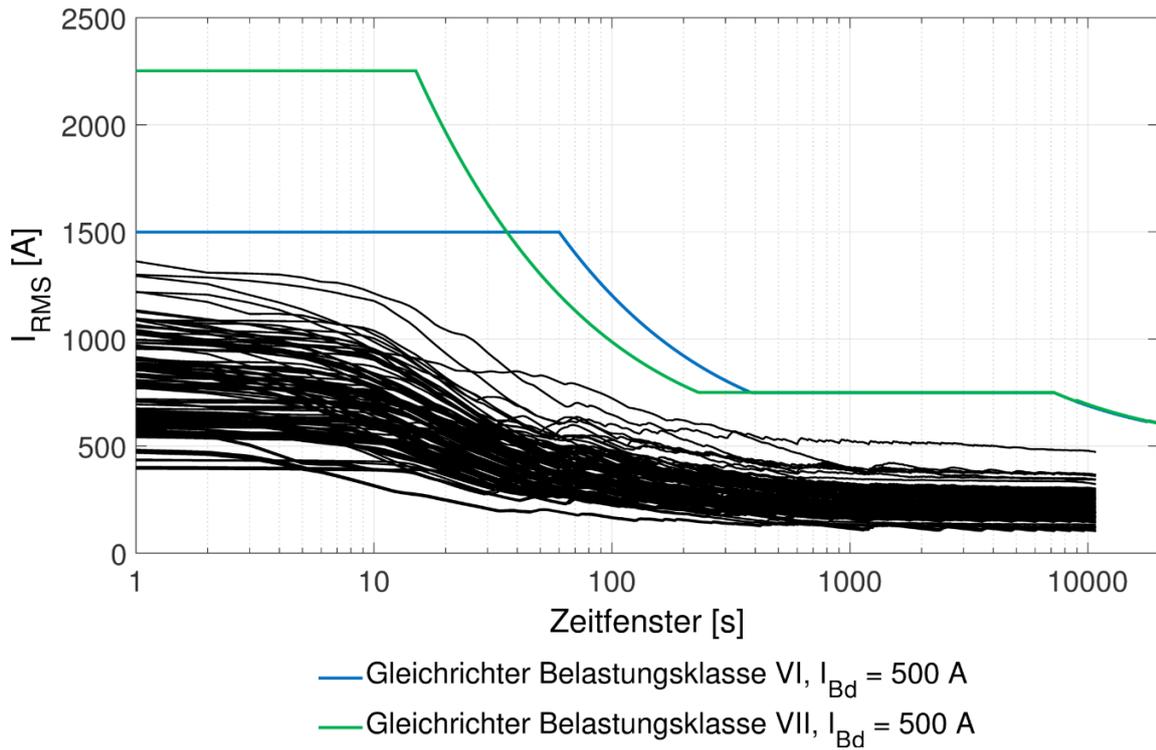


Abbildung 10-1: Belastung der Gleichrichter vs. Belastbarkeit nach DIN EN 50328,  $I_{Bd} = 500$  A (Belastbarkeitsklassen VI und VII)

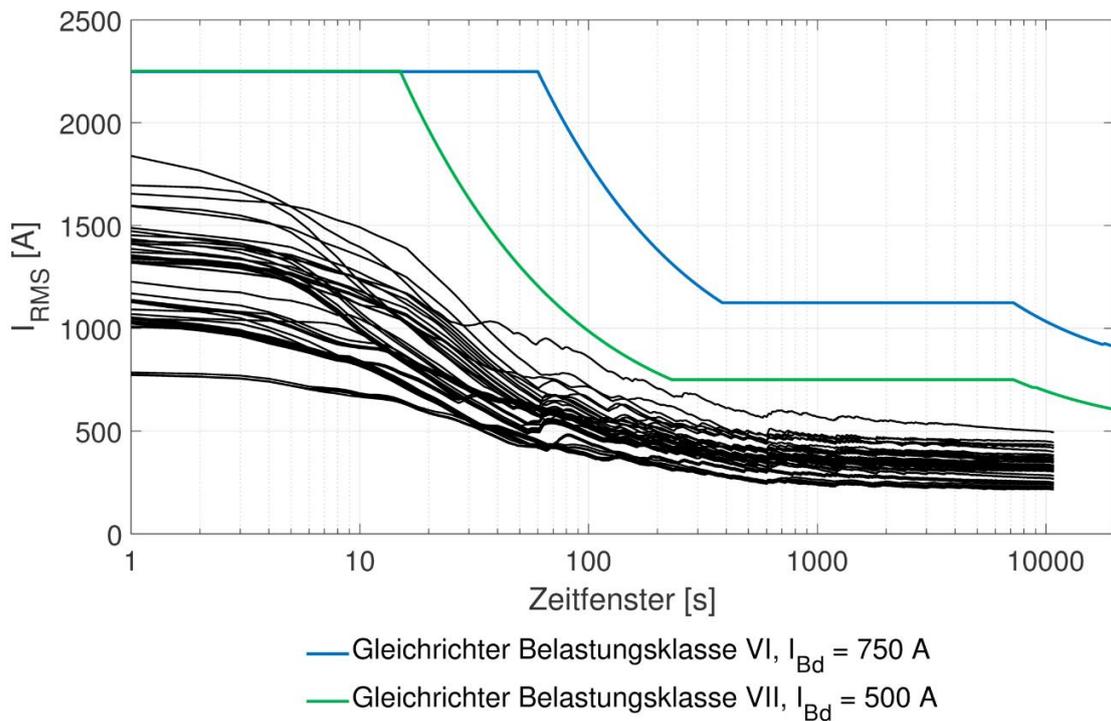


Abbildung 10-2: Belastung der Gleichrichter vs. Belastbarkeit nach DIN EN 50328,  $I_{Bd} = 750$  A (Belastbarkeitsklasse VI) und 500 A (VII)

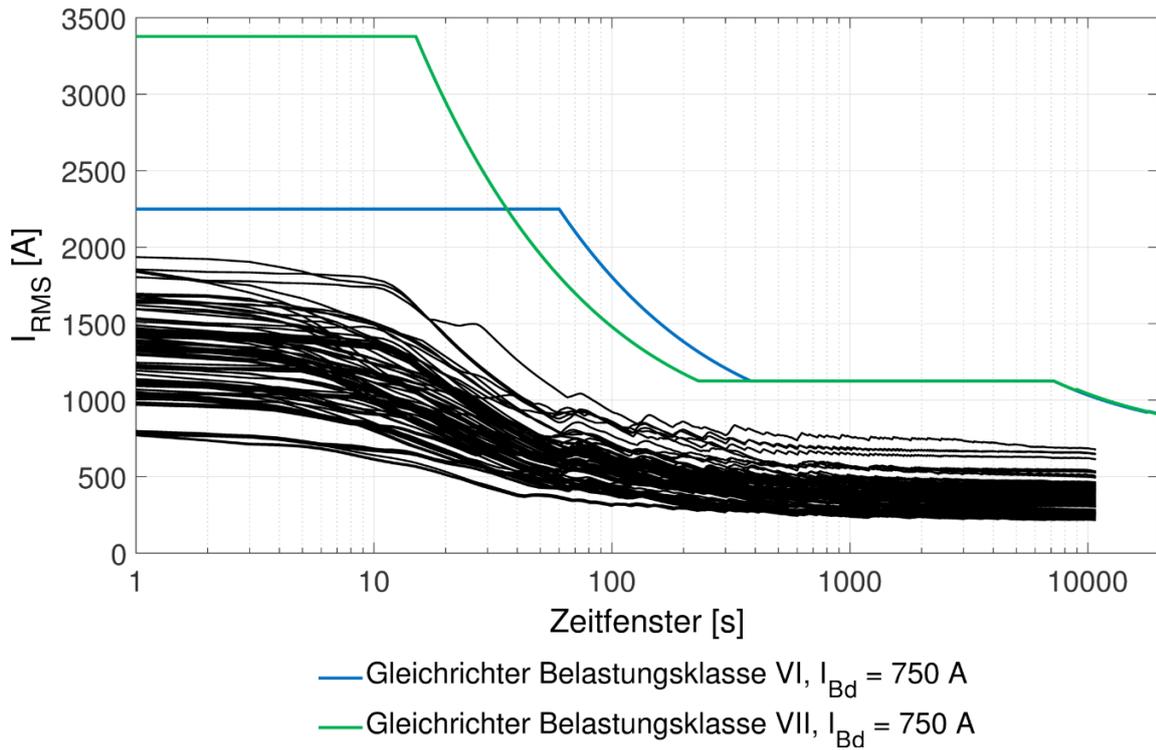


Abbildung 10-3: Belastung der Gleichrichter vs. Belastbarkeit nach DIN EN 50328,  $I_{Bd} = 750$  A (Belastbarkeitsklassen VI und VII)

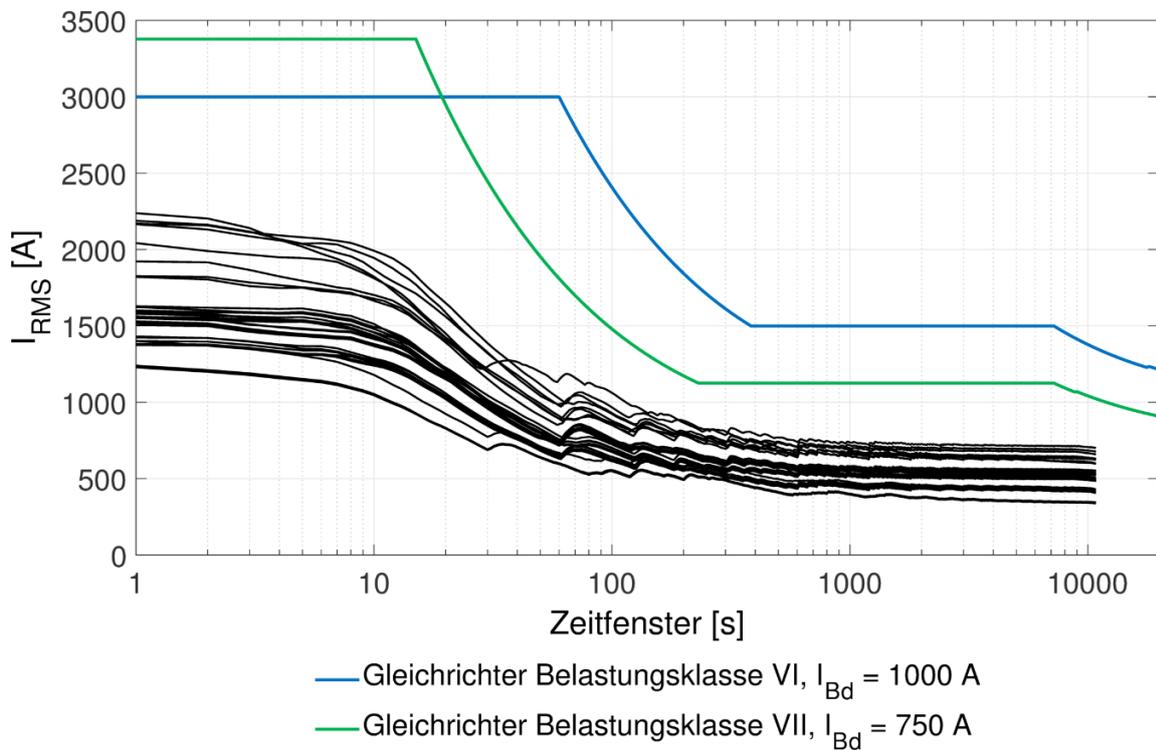


Abbildung 10-4: Belastung der Gleichrichter vs. Belastbarkeit nach DIN EN 50328,  $I_{Bd} = 1000$  A (Belastbarkeitsklasse VI) und 750 A (VII)

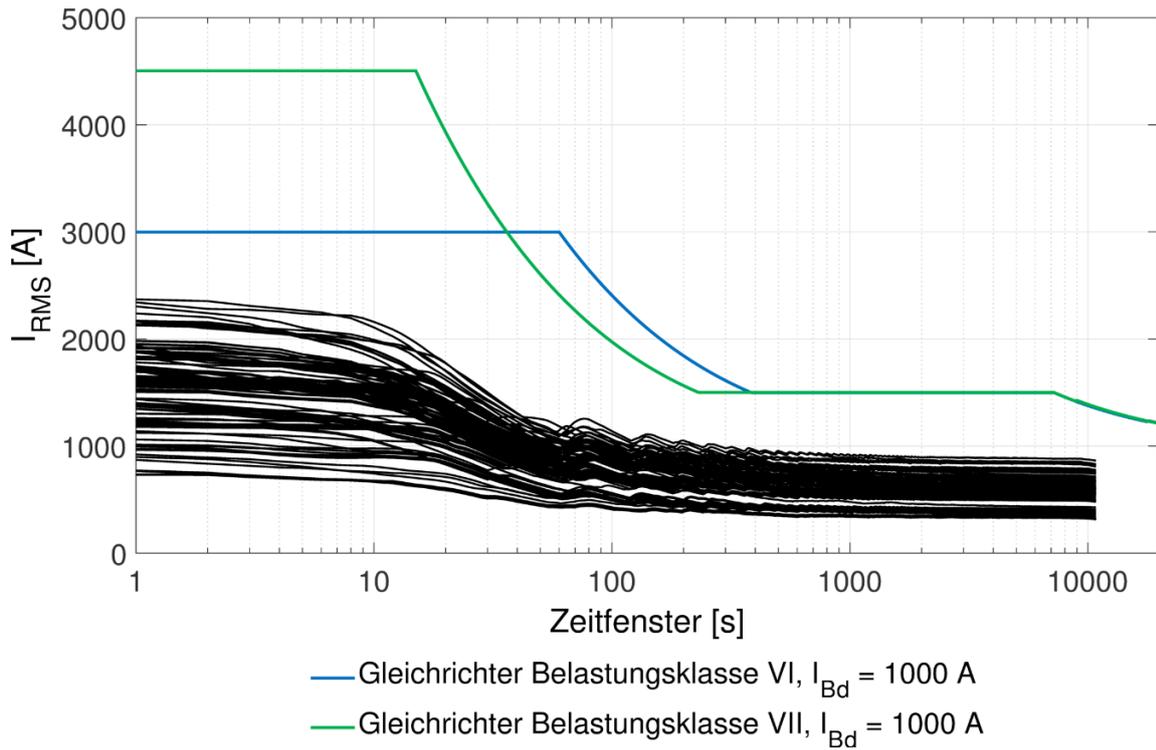


Abbildung 10-5: Belastung der Gleichrichter vs. Belastbarkeit nach DIN EN 50328,  $I_{Bd} = 1000$  A (Belastbarkeitsklassen VI und VII)

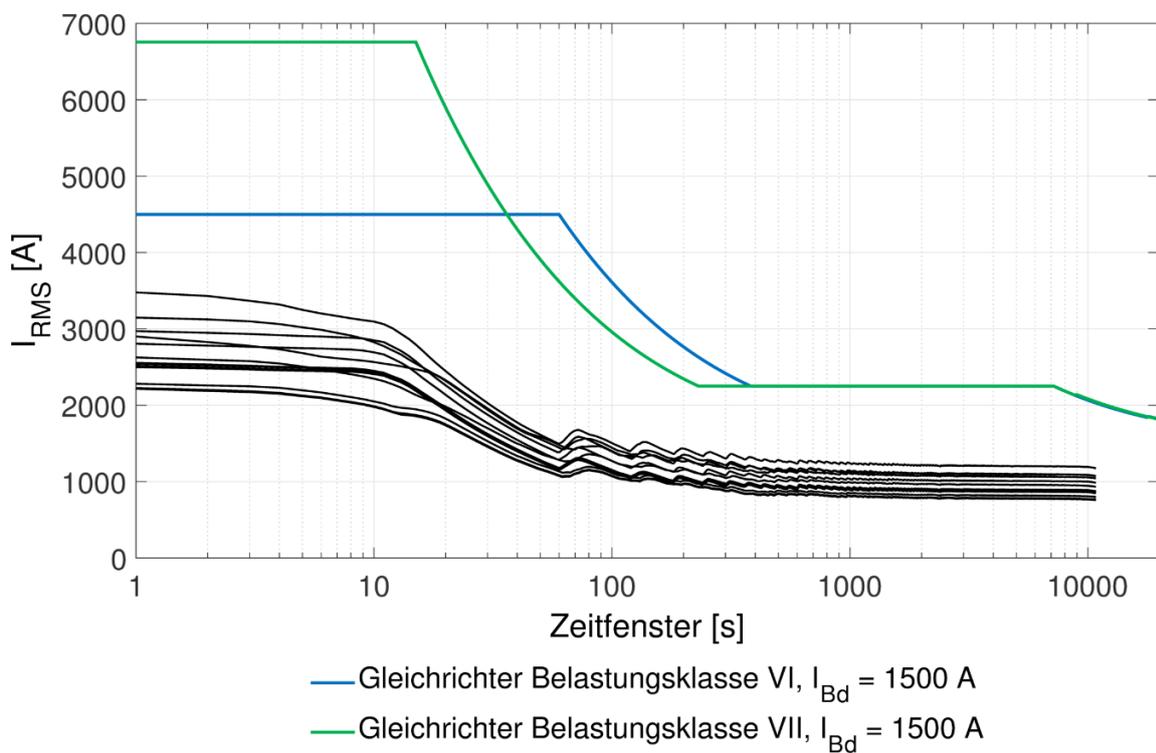


Abbildung 10-6: Belastung der Gleichrichter vs. Belastbarkeit nach DIN EN 50328,  $I_{Bd} = 1500$  A (Belastbarkeitsklassen VI und VII)

## 10.2.2 Szenario B

Tabelle 10-10: Oberleitungsbereiche innerhalb der Abschnitte, Szenario B

AB	Spur	Beginn (ca.)	Ende (ca.)	Kilometer Beginn	Kilometer Ende	Länge [km]
01	h	HOTT	AMGR	0,000	5,374	5,374
01	r	HOTT	AMGR	0,000	5,358	5,358
01	h	BIBG	GAHE	7,596	9,600	2,004
01	r	BIBG	GAHE	7,561	9,558	1,997
01	h	GAHE	MELA	9,654	10,363	0,709
01	r	GAHE	MELA	9,620	10,290	0,670
01	h	ZGLH	ZGLH	11,226	11,304	0,078
01	r	ZGLH	ZGLH	11,222	11,289	0,067
01	h	WRPK	AAMN	12,985	16,686	3,701
01	r	WRPK	AAMN	13,012	16,686	3,674
01	r2	SUSP	SUSP	12,240	12,250	0,010
01	h4	SUSP	SUSP	12,174	12,179	0,005
02	h	SCLL	SEEK	0,455	2,002	1,547
02	r	SCLL	SEEK	0,397	2,096	1,699
02	r	GUTS	GUTS	2,941	2,946	0,005
03	h	ZOOH	ZOOH	0,000	0,051	0,051
03	r	ZOOH	ZOOH	0,000	0,260	0,260
03	h	JOKA	AMTG	0,821	3,200	2,379
03	r	JOKA	AMTG	0,930	3,216	2,286
03	h	AMTG	SMNO	3,300	4,097	0,797
03	r	AMTG	SMNO	3,254	4,058	0,804
03	h	WTMB	GAHE	5,486	11,122	5,636
03	r	WTMB	GAHE	5,467	11,022	5,555
03	h	GAHE	HEMA	11,198	12,713	1,515
03	r	GAHE	HEMA	11,147	12,658	1,511
03	h	HEMA	REIM	12,770	13,196	0,426
03	r	HEMA	REIM	12,713	13,243	0,530
03	h	DAHV	DAHV	18,571	19,039	0,468

AB	Spur	Beginn (ca.)	Ende (ca.)	Kilometer Beginn	Kilometer Ende	Länge [km]
03	r	DAHV	DAHV	18,461	19,039	0,578
04	h	JEBN	UERP	0,078	0,894	0,816
04	r	JEBN	UERP	0,265	0,880	0,615
04	h	KLAP	SWND	3,334	3,857	0,523
04	r	KLAP	SWND	3,293	3,835	0,542
04	h	KESD	MNGA	4,175	5,575	1,400
04	r	KESD	MNGA	4,143	5,611	1,468
04	h	MCHD	TELT	6,765	8,888	2,123
04	r	MCHD	URUH	6,439	6,858	0,419
04	r	URUH	TELT	7,154	8,836	1,682
04	h	TELT	BDRU	8,943	10,237	1,294
04	r	TELT	BDRU	8,888	10,217	1,329
04	h	BDRU	BRNH	10,323	14,154	3,831
04	r	BDRU	BRNH	10,340	14,154	3,814
04	h	BRSG	BRSG	14,739	15,854	0,164
04	r	BRSG	BRSG	14,173	15,854	0,166
05	h	UHS	UHS	-0,249	-0,047	0,202
05	r	UHS	UHS	-0,165	-0,129	0,036
05	h	SDHH	GAFE	0,277	1,635	1,358
05	r	SDHH	GAFE	0,307	1,587	1,280
05	h	KAMW	UHHS	5,800	6,925	1,125
05	r	KAMW	UHHS	5,788	6,882	1,094
05	h	UHHS	URRD	6,985	9,496	2,511
05	r	UHHS	URRD	6,925	9,514	2,589
05	h	SUWI	WIDA	10,609	12,867	2,258
05	r	SUWI	WIDA	10,691	12,867	2,176
06	h	HGCS	UHS	0,795	3,540	2,745
06	r	HGCS	UHS	0,783	3,483	2,700
06	h	UHS	UHS	3,635	3,636	0,001
07	h	SUSP	ZESE	0,072	1,249	1,177
07	r	SUSP	ZESE	0,091	1,198	1,107

AB	Spur	Beginn (ca.)	Ende (ca.)	Kilometer Beginn	Kilometer Ende	Länge [km]
07	h	ZESE	VIE	1,284	1,792	0,508
07	r	ZESE	VIE	1,251	1,769	0,518
07	h	SEKL	FKRW	2,976	4,546	1,570
07	r	SEKL	FKRW	3,052	4,520	1,468
07	h	FKRW	FATO	4,550	5,264	0,714
07	r2	GALS	GALS	0,380	0,385	0,005
08	h	SEEG	FKRW	0,000	0,755	0,755
08	h	BRNH	HENH	1,562	3,115	1,553
08	r	BRNH	HENH	1,550	3,103	1,553
10	h	PRGT	CAUT	0,288	2,321	2,033
10	r	PRGT	CAUT	0,349	2,279	1,930
10	h	JOST	JOST	2,837	2,842	0,005
11	h	KUMI	SPWW	0,418	3,158	2,740
11	r	KUMI	SPWW	0,487	3,081	2,594
12	h	HEMA	MABR	0,112	1,458	1,346
12	r	HEMA	MABR	0,021	1,441	1,420
12	h	SPFD	AMKT	3,302	3,640	0,645
12	r	SPFD	AMKT	3,302	3,640	0,657
13	h	SPFD	FAST	0,000	1,119	1,119
13	r	SPFD	FAST	0,000	1,084	1,084
13	h	WKHS	WKHS	2,110	2,112	0,002
13	h	WKHS	GLST	2,211	3,726	1,515
13	r	WKHS	GLST	2,165	3,777	1,612
13	h	FAZE	ZESE	5,697	6,684	0,987
13	r	FAZE	ZESE	5,660	6,635	0,975
14	h	SAND	ZGLH	0,042	2,480	2,438
14	r	SAND	ZGLH	0,014	2,504	2,490
16	h	APIC	ZGLH	0,076	1,709	1,633
16	r	APIC	ZGLH	0,033	1,725	1,692
18	h	FREI	MCHD	2,030	3,946	1,916
18	r	FREI	MCHD	2,066	3,962	1,896

AB	Spur	Beginn (ca.)	Ende (ca.)	Kilometer Beginn	Kilometer Ende	Länge [km]
19	h	UHS	FAPL	0,000	1,866	1,866
19	r	UHS	FAPL	0,025	1,806	1,781
19	h	FAPL	FAZE	2,231	3,660	1,429
19	r	FAPL	FAZE	2,230	3,592	1,362
19	h	FAZE	FAST	3,754	5,817	2,063
19	r	FAZE	FAST	3,639	5,805	2,166
19	r	FRGO	FRGO	6,490	6,500	0,010
19	h2	WWLD01	WWLD01	4,126	4,131	0,005
26	h	UWD	UWD	0,596	0,601	0,005

Tabelle 10-11: Bereiche mit Verstärkungsleitungen innerhalb der AB, Szenario B

AB	Spur	Beginn (ca.)	Ende (ca.)	Kilometer Beginn	Kilometer Ende	Länge [km]
01	h	BIBG	GAHE	7,596	9,600	2,004
01	r	BIBG	GAHE	7,561	9,558	1,997
01	h	WRPK	RAUC	12,985	15,222	2,237
01	r	WRPK	RAUC	13,012	15,222	2,210
03	h	JOKA	AMTG	0,821	3,200	2,379
03	r	JOKA	AMTG	0,930	3,216	2,286
03	h	AMTG	SMNO	3,300	4,097	0,797
03	r	AMTG	SMNO	3,254	4,058	0,804
03	h	WTMB	GAHE	5,486	11,122	5,636
03	r	WTMB	GAHE	5,467	11,022	5,555
03	h	GAHE	HEMA	11,198	12,713	1,063
03	r	GAHE	HEMA	11,147	12,658	1,114
03	h	HEMA	REIM	12,770	13,196	0,426
03	r	HEMA	REIM	12,713	13,243	0,530
04	h	JEBN	UERP	0,078	0,894	0,816
04	r	JEBN	UERP	0,265	0,880	0,615

AB	Spur	Beginn (ca.)	Ende (ca.)	Kilometer Beginn	Kilometer Ende	Länge [km]
04	h	URUH	TELT	7,154	8,888	1,734
04	r	URUH	TELT	7,154	8,836	1,682
04	h	TELT	BDRU	8,943	10,237	1,294
04	r	TELT	BDRU	8,888	10,217	1,329
04	h	BDRU	BRNH	10,323	14,154	3,831
04	r	BDRU	BRNH	10,340	14,154	3,814
05	h	UHS	UHS	-0,249	-0,047	0,202
05	r	UHS	UHS	-0,165	-0,129	0,036
06	h	HGCS	UHS	0,795	3,540	2,745
06	r	HGCS	UHS	0,783	3,483	2,700
07	h	SUSP	ZESE	0,072	1,249	1,177
07	r	SUSP	ZESE	0,091	1,198	1,107
08	h	BRNH	HENH	1,562	3,115	1,553
08	r	BRNH	HENH	1,550	3,103	1,553
12	h	SPFD	AMKT	3,302	3,640	0,645
12	r	SPFD	AMKT	3,302	3,640	0,657
13	h	SPFD	FAST	0	1,119	1,119
13	r	SPFD	FAST	0	1,084	1,084
13	h	FAZE	ZESE	5,697	6,684	0,987
13	r	FAZE	ZESE	5,660	6,635	0,975
14	h	SAND	ZGLH	0,042	2,480	2,438
14	r	SAND	ZGLH	0,014	2,504	2,490
16	h	APIC	ZGLH	0,076	1,709	1,633
16	r	APIC	ZGLH	0,033	1,725	1,692
18	h	FREI	MCHD	2,030	3,946	1,916
18	r	FREI	MCHD	2,066	3,962	1,896
19	h	FAPL	FAZE	2,231	3,660	1,429
19	r	FAPL	FAZE	2,230	3,592	1,362
19	h	FAZE	AMKT	3,754	4,952	1,198
19	r	FAZE	AMKT	3,639	4,952	1,313

Bereiche mit doppelter Fahrdrachtführung sind in Szenario B nicht vorhanden.

Tabelle 10-12: Lage der Unterwerke, Positionierung der Speise- bzw. Rückleiterkabelanschlüsse und Kabellänge, Szenario B

Unterwerk Nummer sowie ungefähre Lage (Haltestelle)	Kürzel	AB	Spur	Kilometer	Kabel-länge [km]
UW 01 Hottengrund	HOTT	01	h	0,001	0,100
UW 02 Alt-Kladow	ALKL	01	h	1,751	0,100
		01	h	1,752	0,100
		02	h	0,455	0,300
UW 03 General-Steinhoff-Kaserne	GSTK	01	h	3,489	0,100
		01	h	3,490	0,100
UW 04 Am Graben	AMGR	01	h	5,358	0,100
UW 07 Biberburg	BIBG	01	h	7,596	0,100
UW 08 Gatower Str. (Heer-str.)	GAHE	01	d	9,818	0,100
		01	h	9,558	0,100
		01	h	9,654	0,100
		03	h	11,022	0,100
		03	h	11,198	0,100
		16	h	0,076	0,900
UW 09 Brunsbüttler Damm (Ruhlebener Str.), 2 Gleichrichter	BDRU	01	h	11,226	0,500
		01	h	12,179	0,400
		01	r	12,244	0,400
		04	h	10,217	0,100
		04	h	10,340	0,100
		07	h	0,091	0,400
UW 10 Falkenseer Platz	FAPL	01	h	13,012	0,700
		10	h	0,349	0,700
		11	h	0,487	0,900
		19	h	1,806	0,300
		19	h	2,231	0,200
UW 11 Havel-schanze	HVLS	01	h	14,433	0,300
		01	h	14,434	0,300
		10	h	1,092	0,600
		10	h	1,093	0,600

Unterwerk Nummer sowie ungefähre Lage (Haltestelle)	Kürzel	AB	Spur	Kilometer	Kabel-länge [km]
UW 12 Rauchstraße	RAUC	01	h	15,222	0,100
		01	h	15,223	0,100
		06	h	0,795	0,800
		10	h	2,279	0,900
		10	h	2,842	1,500
UW 13 Aalemannufer	AAMN	01	h	16,686	0,100
UW 14 Seekorso	SEEK	02	h	2,002	0,100
		02	r	2,941	0,900
UW 16 Schlüterstr.	SLUE	03	h	1,704	0,100
		03	h	1,705	0,100
		04	h	0,880	0,900
UW 17 Kaiser-Friedrich-Str. (Kantstr.)	KFKA	03	h	2,837	0,100
		03	h	2,838	0,100
		26	h	0,601	0,500
UW 18 S Messe Nord (ICC)	SMNO	03	h	4,058	0,100
UW 19 S Heerstraße	SHST	03	h	5,952	0,100
		03	h	5,953	0,100
UW 20 Flatowallee (Olympiastadion)	FLTW	03	h	7,121	0,100
		03	h	7,122	0,100
UW 21 Stößenseebrücke	STSB	03	h	8,790	0,100
		03	h	8,791	0,100
UW 23 Sandstr.	SAND	03	h	12,260	0,100
		03	h	12,261	0,100
		14	h	0,042	0,100
UW 24 Reimerweg	REIM	03	h	13,191	0,100
		03	r	13,976	0,800
		12	h	0,112	0,500
UW 28 Dallgow-Döberitz Havelpark	DAHV	03	h	18,571	0,100
		03	h	18,461	0,100
UW 29 S+U Zoologischer Garten (Jebensstraße)	JEBN	03	h	0,051	0,400
		03	h	0,930	0,400
		04	h	0,265	0,100
UW 34 S Westend	SWND	04	h	3,835	0,100

Unterwerk Nummer sowie ungefähre Lage (Haltestelle)	Kürzel	AB	Spur	Kilometer	Kabel-länge [km]
		04	h	4,175	0,400
UW 35 Kirschenallee	KRSC	04	h	5,007	0,100
		04	h	5,008	0,100
UW 36 U Ruhleben	URUH	04	h	6,765	0,100
		04	h	7,154	0,400
		04	r	6,858	0,100
		18	h	3,946	0,300
UW 37 Teltower Str.	TELT	04	h	8,836	0,400
		04	h	8,943	0,400
		18	h	2,066	0,400
UW 39 Magistratweg (Brunsbüttler Damm)	MABR	04	h	13,093	0,100
		04	h	13,094	0,100
		12	h	1,441	0,100
UW 40 Brunsbütteler Damm (Nennhauser Damm)	BRNH	04	h	15,690	1,500
		08	h	1,830	0,300
		08	h	1,831	0,300
UW 42 U Haselhorst	UHS	05	h	-0,129	0,200
		05	h	0,307	0,300
		06	h	3,411	0,100
		06	h	3,636	0,300
UW 43 Gartenfeld	GAFE	05	h	1,587	0,100
UW 46 Kamener Weg	KAMW	05	h	5,800	0,100
UW 47 Holzhauser Str. (Schubartstr.)	HHSB	05	h	7,940	0,100
		05	h	7,941	0,100
UW 49 U Rathaus Reini- ckendorf	URRD	05	h	9,496	0,100
UW 50 S+U Wittenau	SUWI	05	h	10,691	0,100
UW 51 Märkisches Zentrum	MRKZ	05	h	11,910	0,100
		05	h	11,911	0,100
UW 52 Wilhelmsruher Damm	WIDA	05	h	12,791	0,100
UW 55 Zeppelinstr. (Seege- felder Str.)	ZESE	04	h	11,750	0,400
		04	h	11,751	0,400

Unterwerk Nummer sowie ungefähre Lage (Haltestelle)	Kürzel	AB	Spur	Kilometer	Kabel-länge [km]
		07	h	1,198	0,300
		07	h	1,284	0,300
		13	h	6,635	0,300
UW 56 Eckenerweg	ECKE	07	h	3,813	0,100
		07	h	3,814	0,100
UW 57 Finkenkruger Weg	FKRW	07	h	4,520	0,100
		07	h	4,550	0,100
		08	h	0,755	0,100
UW 60 Heerstr. (Nennhau-ser Damm)	HENH	04	h	15,854	0,800
		08	h	3,115	0,100
UW 67 Am Kiesteich	AMKT	12	h	3,640	0,100
		19	h	4,952	0,100
		19	h	4,953	0,100
UW 71 Gliensteig	GLST	11	h	2,372	0,700
		11	h	2,373	0,700
		13	h	3,726	0,100
UW 73 Seeburger Str. (Päwesiner Weg)	SEPA	14	h	1,600	0,100
		14	h	1,601	0,100
UW 74 Betckestr.	BTCK	1	h	10,290	0,700
		16	h	0,878	0,100
		16	h	0,879	0,100
UW 79 Falkenseer Chaus-see (Zeppelinstr.)	FAZE	11	h	51,269	0,700
		11	h	1,270	0,700
		13	h	5,697	0,100
		19	h	3,592	0,100
		19	h	3,754	0,100
		19	h	4,131	0,500
UW 80 Glühwürmchenweg	GLWM	11	h	3,081	0,800
		13	h	1,084	0,700
		13	h	2,211	0,400
		19	h	5,816	0,400
		19	r	6,49	0,500

Tabelle 10-13: Maximaler Betriebsstrom, Effektiver Betriebsstrom, Verhältnis beider Ströme und Nennwerte der Gleichrichtereinheiten, Szenario B

Unterwerk	$ I_B _{\max}$ [A] (1 s)	$I_{B,rms}$ [A] (3 h)	$ I_B _{\max}/I_{B,rms}$	GuW-Konfiguration $I_N/S_N$ und Belastbarkeit
UW 01 Hottengrund	885,8	220,3	4,0	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 02 Alt-Kladow	1308,8	342,3	3,8	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 03 General-Steinhoff-Kaserne	1218,0	393,7	3,1	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 04 Am Graben	1020,5	287,0	3,6	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 07 Biberburg	1425,7	305,5	4,7	750 A/750 kVA, Klasse VI oder 500 A/500 kVA, Klasse VII
UW 08 Gatower Str. (Heerstr.)	2596,2	964,7	2,7	1000 A/1000 kVA, Klasse VI
UW 09 Brunsbüttler Damm (Ruhlebener Str.), 2 Gleichrichter	2258,6	778,4	2,9	1000 A/1000 kVA, Klasse VI (jeweils)
UW 10 Falkenseer Platz	3987,2	1299,1	3,1	1500 A/1500 kVA, Klasse VI
UW 11 Havelchanze	2649,1	1018,9	2,6	1000 A/1000 kVA, Klasse VI
UW 12 Rauchstraße	2476,7	987,4	2,5	1000 A/1000 kVA, Klasse VI
UW 13 Aalemannufer	667,4	262,4	2,5	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 14 Seekorso	837,6	179,6	4,7	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 16 Schlüterstr.	2363,8	736,1	3,2	1000 A/1000 kVA, Klasse VI oder

Unterwerk	$ I_B _{\max}$ [A] (1 s)	$I_{B,rms}$ [A] (3 h)	$ I_B _{\max}/$ $I_{B,rms}$	GuW-Konfiguration $I_N/S_N$ und Belastbarkeit
				750 A/750 kVA, Klasse VII
UW 17 Kaiser-Friedrich-Str. (Kantstr.)	1899,1	517,8	3,7	750 A/750 kVA, Klasse VI
UW 18 S Messe Nord (ICC)	1301,3	392,9	3,3	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 19 S Heerstraße	1411,9	420,5	3,4	500 A/500 kVA, Klasse VII
UW 20 Flatowallee (Olympi- astadion)	1710,9	510,6	3,4	750 A/750 kVA, Klasse VI
UW 21 Stößenseebrücke	1410,5	462,4	3,1	750 A/750 kVA, Klasse VI oder 500 A/500 kVA, Klasse VII
UW 23 Sandstr.	2235,9	798,7	2,8	1000 A/1000 kVA, Klasse VI oder 750 A/750 kVA, Klasse VII
UW 24 Reimerweg	2139,4	708,0	3,0	1000 A/1000 kVA, Klasse VI oder 750 A/750 kVA, Klasse VII
UW 28 Dallgow-Döberitz Havelpark	441,1	143,3	3,1	500 A/500 kVA, Klasse VII
UW 29 S+U Zoologischer Garten (Jebensstraße)	2250,4	664,0	3,4	1000 A/1000 kVA, Klasse VI oder 750 A/750 kVA, Klasse VII
UW 34 S Westend	2015,0	630,3	3,2	750 A/750 kVA, Klasse VI
UW 35 Kirschenallee	1583,6	615,1	2,6	750 A/750 kVA, Klasse VI
UW 36 U Ruhleben	1798,2	585,2	3,1	750 A/750 kVA, Klasse VI

Unterwerk	$ I_B _{\max}$ [A] (1 s)	$I_{B,rms}$ [A] (3 h)	$ I_B _{\max}/$ $I_{B,rms}$	GuW-Konfiguration $I_N / S_N$ und Belastbarkeit
UW 37 Teltower Str.	2076,3	767,6	2,7	1000 A/1000 kVA, Klasse VI oder 750 A/750 kVA, Klasse VII
UW 39 Magistratweg (Brunsbüttler Damm)	2594,2	1016,8	2,6	1000 A/1000 kVA, Klasse VI
UW 40 Brunsbütteler Damm (Nennhauser Damm)	1529,0	515,5	3,0	750 A/750 kVA, Klasse VI
UW 42 U Haselhorst	2265,0	865,8	2,6	1000 A/1000 kVA, Klasse VI
UW 43 Gartenfeld	1199,0	441,0	2,7	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 46 Kamener Weg	890,1	267,2	3,3	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 47 Holzhauser Str. (Schubartstr.)	1243,5	359,4	3,5	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 49 U Rathaus Reini- ckendorf	980,6	266,0	3,7	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 50 S+U Wittenau	726,2	190,9	3,8	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 51 Märkisches Zentrum	834,7	227,9	3,7	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 52 Wilhelmsruher Damm	592,5	157,9	3,8	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 55 Zeppelinstr. (Seege- felder Str.)	3387,9	1193,7	2,8	1500 A/1500 kVA, Klasse VI
UW 56 Eckenerweg	2066,2	458,6	4,5	750 A/750 kVA, Klasse VI oder 500 A/500 kVA, Klasse VII
UW 57 Finkenkruger Weg	2278,7	462,4	4,9	1000 A/1000 kVA, Klasse VI oder 750 A/750 kVA, Klasse VII

<b>Unterwerk</b>	<b><math> I_B _{\max}</math> [A] (1 s)</b>	<b><math>I_{B,rms}</math> [A] (3 h)</b>	<b><math> I_B _{\max}/</math> <math>I_{B,rms}</math></b>	<b>GuW-Konfiguration <math>I_N/S_N</math> und Belastbarkeit</b>
UW 60 Heerstr. (Nennhauser Damm)	959,7	310,7	3,1	500 A/500 kVA, Klasse VII
UW 67 Am Kiesteich	3170,7	909,9	3,5	1500 A/1500 kVA, Klasse VI oder 1000 A/1000 kVA Klasse VII
UW 71 Gliensteig	1450,3	400,4	3,6	750 A/750 kVA, Klasse VI oder 500 A/500 kVA, Klasse VII
UW 73 Seeburger Str. (Päwesiner Weg)	2441,4	935,2	2,6	1000 A/1000 kVA, Klasse VI
UW 74 Betckestr.	2319,3	780,6	3,0	1000 A/1000 kVA, Klasse VI
UW 79 Falkenseer Chaussee (Zeppelinstr.)	3963,2	1374,5	2,9	1500 A/1500 kVA, Klasse VI
UW 80 Glühwürmchenweg	2742,8	813,7	3,4	1000 A/1000 kVA, Klasse VI

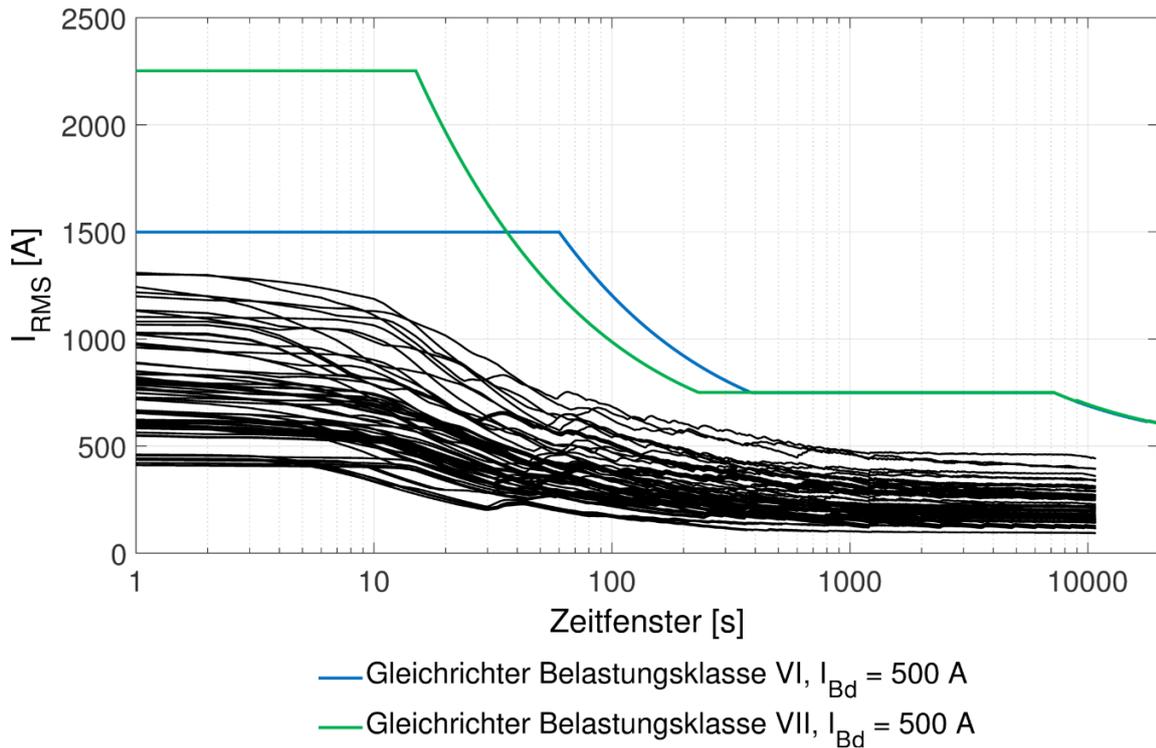


Abbildung 10-7: Belastung der Gleichrichter vs. Belastbarkeit nach DIN EN 50328,  $I_{Bd} = 500$  A (Belastbarkeitsklassen VI und VII)

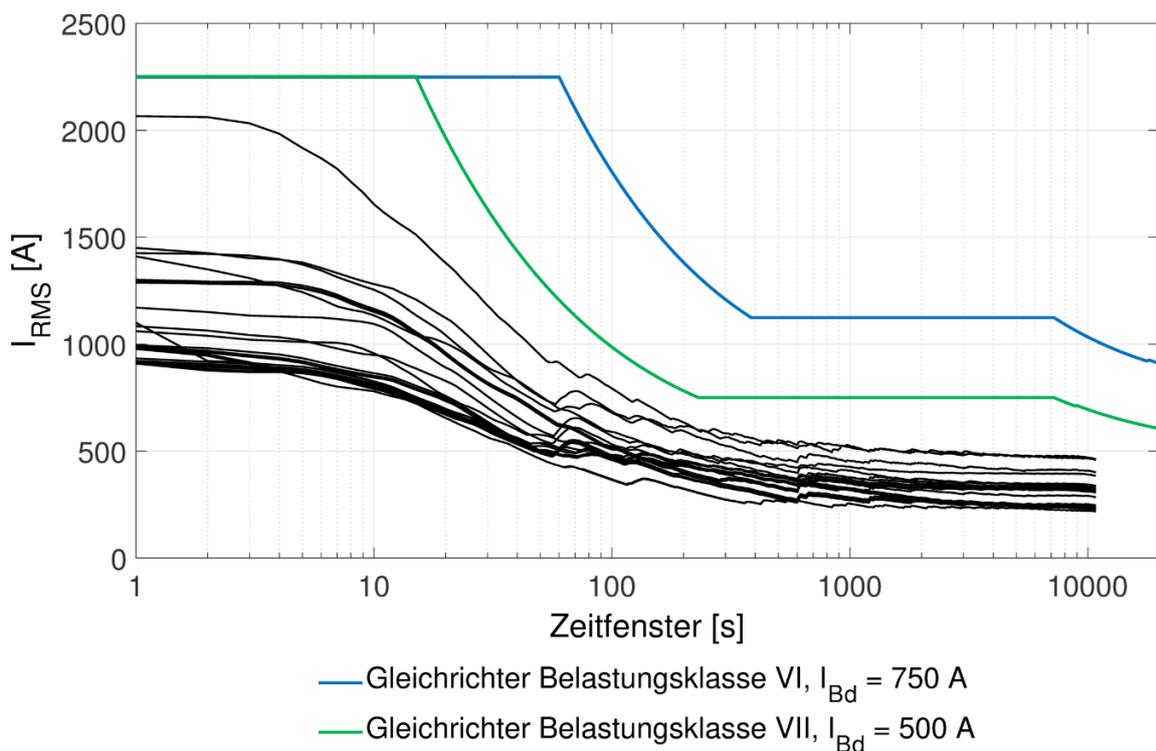


Abbildung 10-8: Belastung der Gleichrichter vs. Belastbarkeit nach DIN EN 50328,  $I_{Bd} = 750$  A (Belastbarkeitsklasse VI) und 500 A (VII)

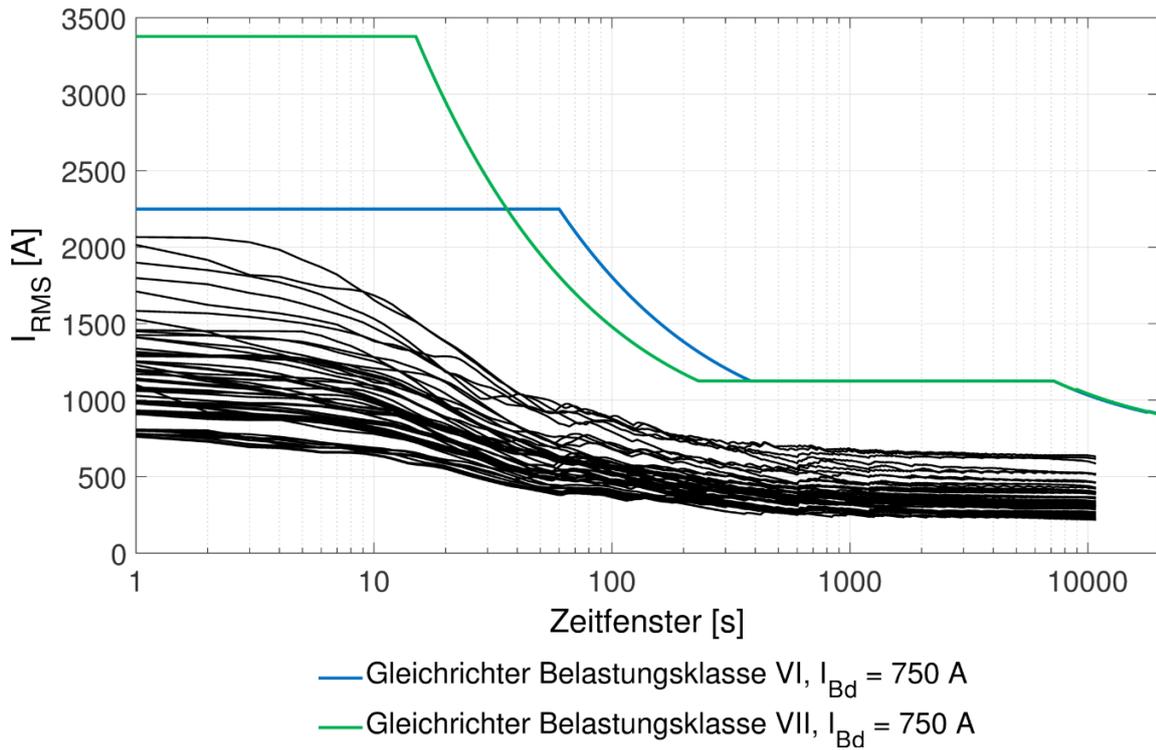


Abbildung 10-9 Belastung der Gleichrichter vs. Belastbarkeit nach DIN EN 50328,  $I_{Bd} = 750$  A (Belastbarkeitsklassen VI und VII)

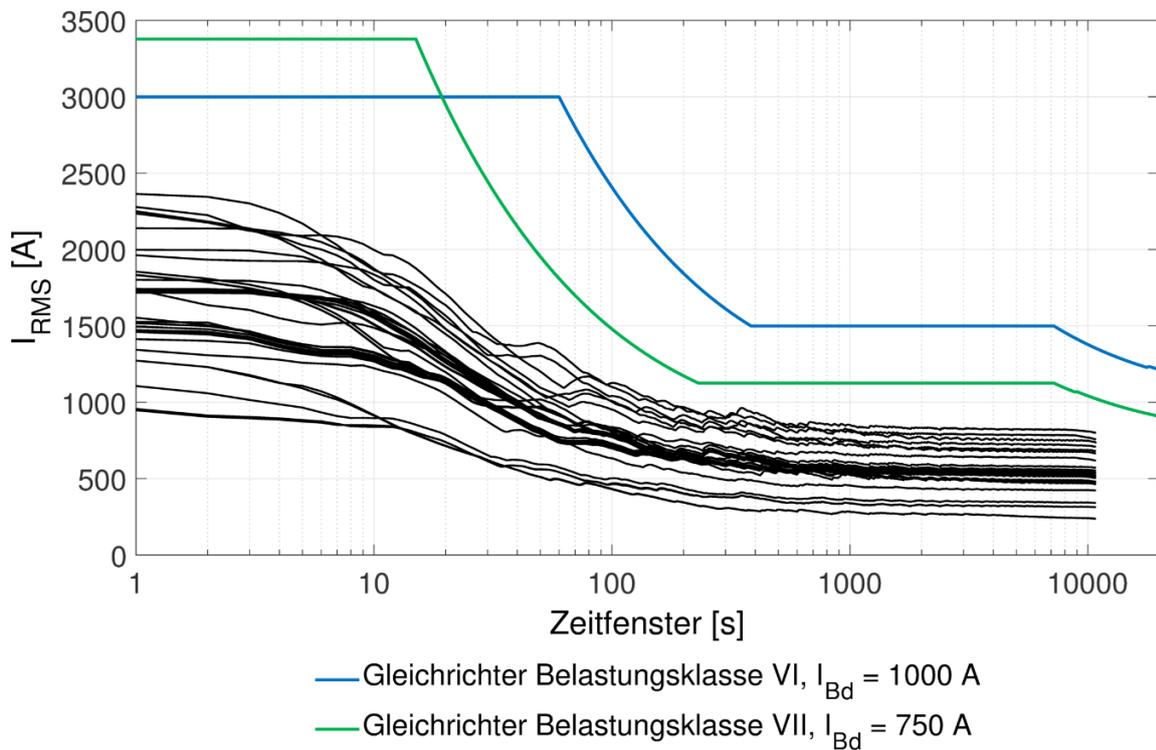


Abbildung 10-10: Belastung der Gleichrichter vs. Belastbarkeit nach DIN EN 50328,  $I_{Bd} = 1000$  A (Belastbarkeitsklasse VI) und 750 A (VII)

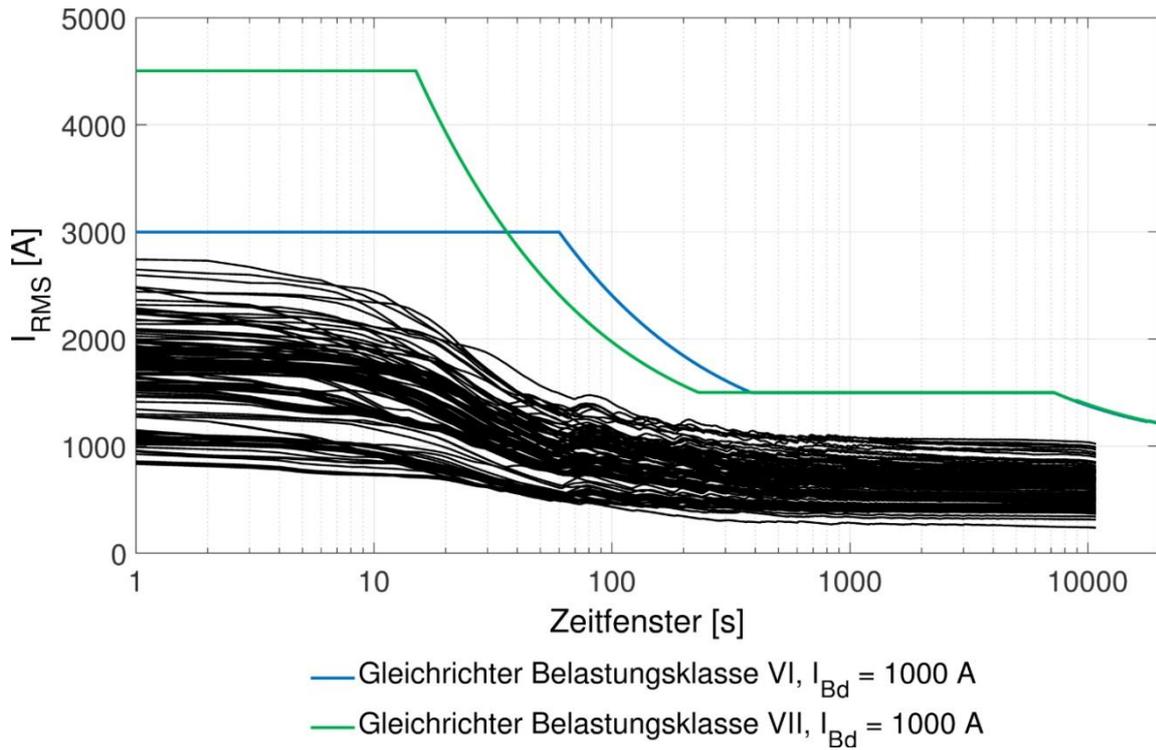


Abbildung 10-11: Belastung der Gleichrichter vs. Belastbarkeit nach DIN EN 50328,  $I_{Bd} = 1000$  A (Belastbarkeitsklassen VI und VII)

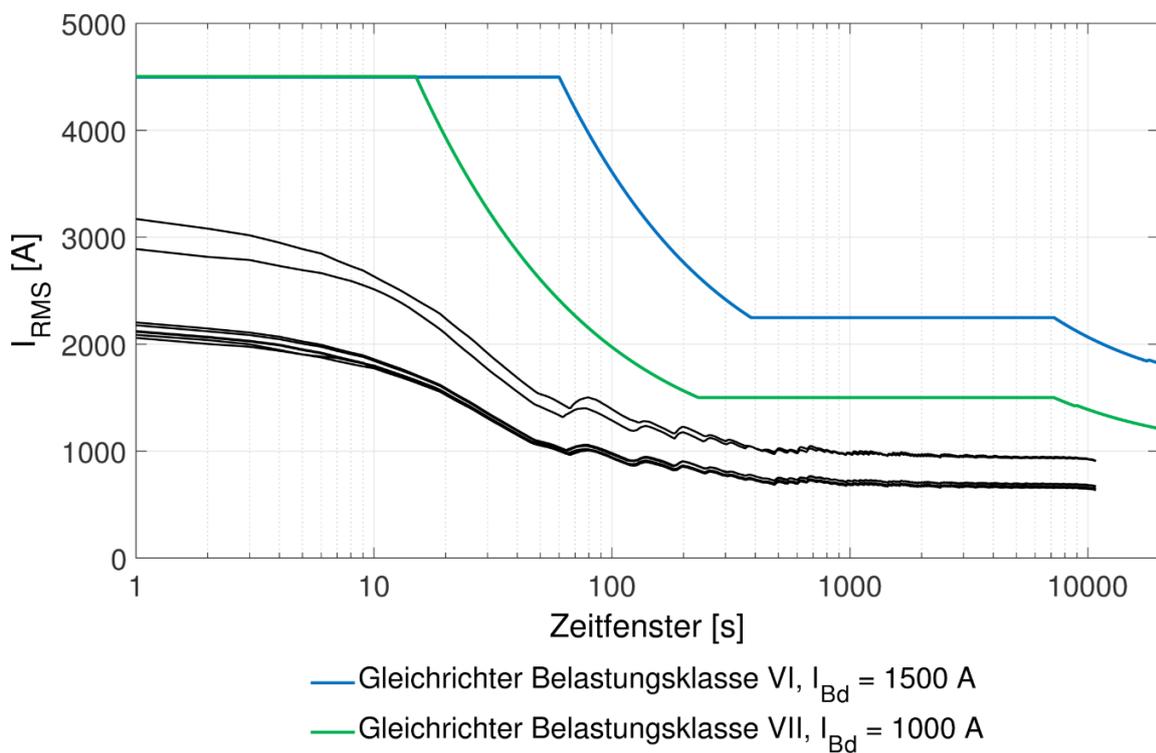


Abbildung 10-12: Belastung der Gleichrichter vs. Belastbarkeit nach DIN EN 50328,  $I_{Bd} = 1500$  A (Belastbarkeitsklasse VI) und  $1000$  A (VII)

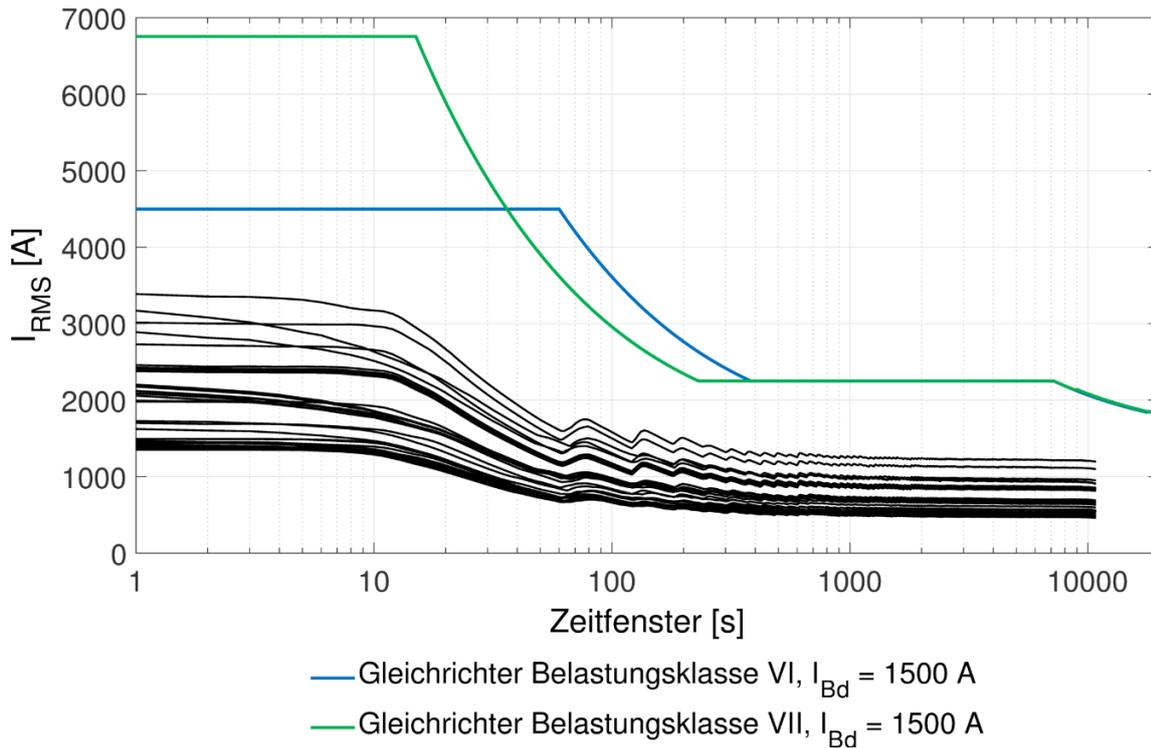


Abbildung 10-13: Belastung der Gleichrichter vs. Belastbarkeit nach DIN EN 50328,  $I_{Bd} = 1000 \text{ A}$  (Belastbarkeitsklassen VI und VII)

### 10.2.3 Szenario C

Tabelle 10-14: Oberleitungsbereiche innerhalb der Abschnitte, Szenario C

AB	Spur	Beginn (ca.)	Ende (ca.)	Kilometer Beginn	Kilometer Ende	Länge [km]
01	h	HOTT	AMGR	0,000	5,374	5,374
01	r	HOTT	AMGR	0,000	5,358	5,358
01	h	BIBG	GAHE	7,596	9,600	2,004
01	r	BIBG	GAHE	7,561	9,558	1,997
01	h	GAHE	MELA	9,654	10,363	0,709
01	r	GAHE	MELA	9,620	10,290	0,670
01	r2	SUSP	SUSP	12,240	12,250	0,010
01	h4	SUSP	SUSP	12,174	12,179	0,005
02	h	SCLL	SEEK	0,455	2,002	1,547

AB	Spur	Beginn (ca.)	Ende (ca.)	Kilometer Beginn	Kilometer Ende	Länge [km]
02	r	SCLL	SEEK	0,397	2,096	1,699
02	r	GUTS	GUTS	2,941	2,946	0,005
03	h	ZOOH	ZOOH	0,000	0,051	0,051
03	r	ZOOH	ZOOH	0,000	0,260	0,260
03	h	JOKA	AMTG	0,821	3,200	2,379
03	r	JOKA	AMTG	0,930	3,216	2,286
03	h	AMTG	SMNO	3,300	4,097	0,797
03	r	AMTG	SMNO	3,254	4,058	0,804
03	h	WTMB	GAHE	5,486	11,122	5,636
03	r	WTMB	GAHE	5,467	11,022	5,555
03	h	GAHE	HEMA	11,198	12,713	1,515
03	r	GAHE	HEMA	11,147	12,658	1,511
03	h	HEMA	REIM	12,770	13,196	0,426
03	r	HEMA	REIM	12,713	13,243	0,530
03	h	DAHV	DAHV	18,571	19,039	0,468
03	r	DAHV	DAHV	18,461	19,039	0,578
04	h	JEBN	UERP	0,078	0,894	0,816
04	r	JEBN	UERP	0,265	0,880	0,615
04	h	KLAP	SWND	3,334	3,857	0,523
04	r	KLAP	SWND	3,293	3,835	0,542
04	h	KESD	MNGA	4,175	5,575	1,400
04	r	KESD	MNGA	4,143	5,611	1,468
04	h	MCHD	TELT	6,765	8,888	2,123
04	r	MCHD	URUH	6,439	6,858	0,419
04	r	URUH	TELT	7,154	8,836	1,682
04	h	TELT	BDRU	8,943	10,237	1,294
04	r	TELT	BDRU	8,888	10,217	1,329
04	h	BDRU	BRNH	10,323	14,154	3,831
04	r	BDRU	BRNH	10,340	14,154	3,814
04	h	BRSG	BRSG	14,739	15,854	0,164
04	r	BRSG	BRSG	14,173	15,854	0,166

AB	Spur	Beginn (ca.)	Ende (ca.)	Kilometer Beginn	Kilometer Ende	Länge [km]
05	h	UHS	UHS	-0,249	-0,047	0,202
05	r	UHS	UHS	-0,165	-0,129	0,036
05	h	SDHH	GAFE	0,277	1,635	1,358
05	r	SDHH	GAFE	0,307	1,587	1,280
05	h	KAMW	UHHS	5,800	6,925	1,125
05	r	KAMW	UHHS	5,788	6,882	1,094
05	h	UHHS	URRD	6,985	9,496	2,511
05	r	UHHS	URRD	6,925	9,514	2,589
05	h	SUWI	WIDA	10,609	12,867	2,258
05	r	SUWI	WIDA	10,691	12,867	2,176
07	h	SUSP	ZESE	0,072	1,249	1,177
07	r	SUSP	ZESE	0,091	1,198	1,107
07	h	ZESE	VIE	1,284	1,792	0,508
07	r	ZESE	VIE	1,251	1,769	0,518
07	h	SEKL	FKRW	2,976	4,546	1,570
07	r	SEKL	FKRW	3,052	4,520	1,468
07	h	FKRW	FATO	4,550	5,264	0,714
07	r2	GALS	GALS	0,380	0,385	0,005
08	h	SEEG	FKRW	0,000	0,755	0,755
08	h	BRNH	HENH	1,562	3,115	1,553
08	r	BRNH	HENH	1,550	3,103	1,553
10	h	PRGT	CAUT	0,288	2,321	2,033
10	r	PRGT	CAUT	0,349	2,279	1,930
10	h	JOST	JOST	2,837	2,842	0,005
11	h	KUMI	SPWW	0,418	3,158	2,740
11	r	KUMI	SPWW	0,487	3,081	2,594
12	h	HEMA	MABR	0,112	1,458	1,346
12	r	HEMA	MABR	0,021	1,441	1,420
13	h	SPFD	ISSZ	0,067	0,480	0,413
13	r	SPFD	ISSZ	0,059	0,480	0,421
13	h	WKHS	GLST	2,211	3,726	1,515

AB	Spur	Beginn (ca.)	Ende (ca.)	Kilometer Beginn	Kilometer Ende	Länge [km]
13	r	WKHS	GLST	2,165	3,777	1,612
13	h	FAZE	ZESE	5,697	6,684	0,987
13	r	FAZE	ZESE	5,660	6,635	0,975
18	h	FREI	MCHD	2,030	3,946	1,916
18	r	FREI	MCHD	2,066	3,962	1,896
19	h	UHS	FAPL	0,000	1,866	1,866
19	r	UHS	FAPL	0,025	1,806	1,781
19	h2	WWLD01	WWLD01	4,126	4,131	0,005
26	h	UWD	UWD	0,596	0,601	0,005

Tabelle 10-15: Bereiche mit Verstärkungsleitungen innerhalb der AB, Szenario C

AB	Spur	Beginn (ca.)	Ende (ca.)	Kilometer Beginn	Kilometer Ende	Länge [km]
01	h	BIBG	GAHE	7,596	9,600	2,004
01	r	BIBG	GAHE	7,561	9,558	1,997
03	h	JOKA	AMTG	0,821	3,200	2,379
03	r	JOKA	AMTG	0,930	3,216	2,286
03	h	AMTG	SMNO	3,300	4,097	0,797
03	r	AMTG	SMNO	3,254	4,058	0,804
03	h	WTMB	GAHE	5,486	11,122	5,636
03	r	WTMB	GAHE	5,467	11,022	5,555
03	h	GAHE	HEMA	11,198	12,713	1,063
03	r	GAHE	HEMA	11,147	12,658	1,114
03	h	HEMA	REIM	12,770	13,196	0,426
03	r	HEMA	REIM	12,713	13,243	0,530
04	h	JEBN	UERP	0,078	0,894	0,816
04	r	JEBN	UERP	0,265	0,880	0,615
04	h	URUH	TELT	7,154	8,888	1,734
04	r	URUH	TELT	7,154	8,836	1,682

AB	Spur	Beginn (ca.)	Ende (ca.)	Kilometer Beginn	Kilometer Ende	Länge [km]
04	h	TELT	BDRU	8,943	10,237	1,294
04	r	TELT	BDRU	8,888	10,217	1,329
04	h	BDRU	BRNH	10,323	14,154	3,831
04	r	BDRU	BRNH	10,340	14,154	3,814
05	h	UHS	UHS	-0,249	-0,047	0,202
05	r	UHS	UHS	-0,165	-0,129	0,036
07	h	SUSP	ZESE	0,072	1,249	1,177
07	r	SUSP	ZESE	0,091	1,198	1,107
08	h	BRNH	HENH	1,562	3,115	1,553
08	r	BRNH	HENH	1,550	3,103	1,553
13	h	SPFD	ISSZ	0,067	0,480	0,413
13	r	SPFD	ISSZ	0,059	0,480	0,421
13	h	FAZE	ZESE	5,697	6,684	0,987
13	r	FAZE	ZESE	5,660	6,635	0,975
18	h	FREI	MCHD	2,030	3,946	1,916
18	r	FREI	MCHD	2,066	3,962	1,896

Bereiche mit doppelter Fahrdrachtführung sind in Szenario C nicht vorhanden.

Tabelle 10-16: Lage der Unterwerke, Positionierung der Speise- bzw. Rückleiterkabelanschlüsse und Kabellänge, Szenario C

Unterwerk Nummer sowie ungefähre Lage (Haltestelle)	Kürzel	AB	Spur	Kilometer	Kabel- länge [km]
UW 01 Hottengrund	HOTT	01	h	0,001	0,100
UW 02 Alt-Kladow	ALKL	01	h	1,751	0,100
		01	h	1,752	0,100
		02	h	0,455	0,300
UW 03 General-Steinhoff- Kaserne	GSTK	01	h	3,489	0,100
		01	h	3,490	0,100
UW 04 Am Graben	AMGR	01	h	5,358	0,100

Unterwerk Nummer sowie ungefähre Lage (Haltestelle)	Kürzel	AB	Spur	Kilometer	Kabel-länge [km]
UW 07 Biberburg	BIBG	01	h	7,596	0,100
UW 08 Gatower Str. (Heer-str.)	GAHE	01	d	9,818	0,100
		01	h	9,558	0,100
		01	h	9,654	0,100
		03	h	11,022	0,100
		03	h	11,198	0,100
UW 09 Brunsbüttler Damm (Ruhlebener Str.)	BDRU	01	h	12,179	0,400
		01	r	12,244	0,400
		04	h	10,217	0,100
		04	h	10,340	0,100
		07	h	0,091	0,400
		07	r	0,380	0,700
UW 10 Falkenseer Platz	FAPL	10	h	0,349	0,700
		11	h	0,487	0,900
		19	h	1,806	0,300
UW 11 Havelchanze	HVLS	10	h	1,092	0,600
		10	h	1,093	0,600
UW 12 Rauchstraße	RAUC	01	h	16,638	1,400
		10	h	2,279	0,900
		10	h	2,842	1,500
UW 14 Seekorso	SEEK	02	h	2,002	0,100
		02	r	2,941	0,900
UW 16 Schlüterstr.	SLUE	03	h	1,704	0,100
		03	h	1,705	0,100
		04	h	0,880	0,900
UW 17 Kaiser-Friedrich-Str. (Kantstr.)	KFKA	03	h	2,837	0,100
		03	h	2,838	0,100
		26	h	0,601	0,500
UW 18 S Messe Nord (ICC)	SMNO	03	h	4,058	0,100
UW 19 S Heerstraße	SHST	03	h	5,952	0,100
		03	h	5,953	0,100
UW 20 Flatowallee (Olympiastadion)	FLTW	03	h	7,121	0,100
		03	h	7,122	0,100

Unterwerk Nummer sowie ungefähre Lage (Haltestelle)	Kürzel	AB	Spur	Kilometer	Kabel-länge [km]
UW 21 Stößenseebrücke	STSB	03	h	8,790	0,100
		03	h	8,791	0,100
UW 23 Sandstr.	SAND	03	h	12,260	0,100
		03	h	12,261	0,100
UW 24 Reimerweg	REIM	03	h	13,191	0,100
		03	r	13,976	0,800
		12	h	0,112	0,500
UW 28 Dallgow-Döberitz Havelpark	DAHV	03	h	18,571	0,100
		03	h	18,461	0,100
UW 29 S+U Zoologischer Garten (Jebensstraße)	JEBN	03	h	0,051	0,400
		03	h	0,930	0,400
		04	h	0,265	0,100
UW 34 S Westend	SWND	04	h	3,835	0,100
		04	h	4,175	0,400
UW 35 Kirschenallee	KRSC	04	h	5,007	0,100
		04	h	5,008	0,100
UW 36 U Ruhleben	URUH	04	h	6,765	0,100
		04	h	7,154	0,400
		04	r	6,858	0,100
		18	h	3,946	0,300
UW 37 Teltower Str.	TELT	04	h	8,836	0,400
		04	h	8,943	0,400
		18	h	2,066	0,400
UW 39 Magistratweg (Brunsbüttler Damm)	MABR	04	h	13,093	0,100
		04	h	13,094	0,100
		12	h	1,441	0,100
UW 40 Brunsbütteler Damm (Nennhauser Damm)	BRNH	04	h	15,690	1,500
		08	h	1,830	0,300
		08	h	1,831	0,300
UW 42 U Haselhorst	UHS	05	h	-0,129	0,200
		05	h	0,307	0,300
UW 43 Gartenfeld	GAFE	05	h	1,587	0,100
UW 46 Kamener Weg	KAMW	05	h	5,800	0,100

Unterwerk Nummer sowie ungefähre Lage (Haltestelle)	Kürzel	AB	Spur	Kilometer	Kabel-länge [km]
UW 47 Holzhauser Str. (Schubartstr.)	HHSB	05	h	7,940	0,100
		05	h	7,941	0,100
UW 49 U Rathaus Reini- ckendorf	URRD	05	h	9,496	0,100
UW 50 S+U Wittenau	SUWI	05	h	10,691	0,100
UW 51 Märkisches Zentrum	MRKZ	05	h	11,910	0,100
		05	h	11,911	0,100
UW 52 Wilhelmsruher Damm	WIDA	05	h	12,791	0,100
UW 55 Zeppelinstr. (Seege- felder Str.)	ZESE	04	h	11,750	0,400
		04	h	11,751	0,400
		07	h	1,198	0,300
		07	h	1,284	0,300
		13	h	6,635	0,300
UW 56 Eckenerweg	ECKE	07	h	3,813	0,100
		07	h	3,814	0,100
UW 57 Finkenkruger Weg	FKRW	07	h	4,520	0,100
		07	h	4,550	0,100
		08	h	0,755	0,100
UW 60 Heerstr. (Nennhau- ser Damm)	HENH	04	h	15,854	0,800
		08	h	3,115	0,100
UW 67 Am Kiesteich	AMKT	11	h	2,372	0,700
		11	h	2,373	0,700
		13	h	0,067	0,400
UW 71 Gliensteig	GLST	11	h	2,372	0,700
		11	h	2,373	0,700
		13	h	3,726	0,100
UW 74 Betckestr.	BTCK	01	h	10,290	0,700
UW 79 Falkenseer Chaus- see (Zeppelinstr.)	FAZE	11	h	51,269	0,700
		11	h	1,270	0,700
		13	h	5,697	0,100
		19	h	4,131	0,500
UW 80 Glühwürmchenweg	GLWM	11	h	3,081	0,800
		13	h	0,385	0,700

Unterwerk Nummer sowie ungefähre Lage (Haltestelle)	Kürzel	AB	Spur	Kilometer	Kabel-länge [km]
		13	h	2,211	0,700

Tabelle 10-17: Maximaler Betriebsstrom, Effektiver Betriebsstrom, Verhältnis beider Ströme und Nennwerte der Gleichrichtereinheiten, Szenario C

Unterwerk	$ I_B _{\max}$ [A] (1 s)	$I_{B,rms}$ [A] (3 h)	$ I_B _{\max}/I_{B,rms}$	GuW-Konfiguration $I_N/S_N$ und Belastbarkeit
UW 01 Hottengrund	886,4	220,3	4,0	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 02 Alt-Kladow	1308,8	342,3	3,8	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 03 General-Steinhoff-Kaserne	1218,0	393,9	3,1	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 04 Am Graben	1020,5	287,0	3,6	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 07 Biberburg	1463,6	269,8	5,4	750 A/750 kVA, Klasse VI oder 500 A/500 kVA, Klasse VII
UW 08 Gatower Str. (Heer-str.)	1715,5	576,3	3,0	750 A/750 kVA, Klasse VI
UW 09 Brunsbüttler Damm (Ruhlebener Str.)	4140,9	1334,6	3,1	1500 A/1500 kVA, Klasse VI
UW 10 Falkenseer Platz	1428,6	406,5	3,5	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 11 Havelchanze	1301,6	444,5	2,9	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 12 Rauchstraße	1083,9	308,2	3,5	500 A/500 kVA, Klasse VI

Unterwerk	$ I_B _{\max}$ [A] (1 s)	$I_{B,rms}$ [A] (3 h)	$ I_B _{\max}/$ $I_{B,rms}$	GuW-Konfiguration $I_N/S_N$ und Belastbarkeit
UW 14 Seekorso	837,6	179,6	4,7	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 16 Schlüterstr.	2363,8	736,1	3,2	1000 A/1000 kVA, Klasse VI oder 750 A/750 kVA, Klasse VII
UW 17 Kaiser-Friedrich-Str. (Kantstr.)	1974,3	518,0	3,8	750 A/750 kVA, Klasse VI
UW 18 S Messe Nord (ICC)	1301,3	392,9	3,3	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 19 S Heerstraße	1391,7	415,4	3,4	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 20 Flatowallee (Olympiastadion)	1700,9	502,9	3,4	750 A/750 kVA, Klasse VI
UW 21 Stößenseebrücke	1074,1	359,7	3,0	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 23 Sandstr.	844,4	259,9	3,2	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 24 Reimerweg	954,7	325,9	2,9	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 28 Dallgow-Döberitz Havelpark	544,1	145,1	3,7	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 29 S+U Zoologischer Garten (Jebensstraße)	2250,4	664,0	3,4	1000 A/1000 kVA, Klasse VI oder 750 A/750 kVA, Klasse VII
UW 34 S Westend	2015,0	630,2	3,2	750 A/750 kVA, Klasse VI
UW 35 Kirschenallee	1583,6	615,2	2,6	750 A/750 kVA, Klasse VI
UW 36 U Ruhleben	1803,5	572,5	3,2	750 A/750 kVA, Klasse VI
UW 37 Teltower Str.	2031,3	746,5	2,7	750 A/750 kVA, Klasse VI

Unterwerk	$ I_B _{\max}$ [A] (1 s)	$I_{B,rms}$ [A] (3 h)	$ I_B _{\max}/$ $I_{B,rms}$	GuW-Konfiguration $I_N / S_N$ und Belastbarkeit
UW 39 Magistratweg (Brunsbüttler Damm)	2413,9	958,9	2,5	1000 A/1000 kVA, Klasse VI
UW 40 Brunsbütteler Damm (Nennhauser Damm)	1492,1	498,2	3,0	750 A/750 kVA, Klasse VI oder 500 A/500 kVA, Klasse VII
UW 42 U Haselhorst	1297,3	414,9	3,1	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 43 Gartenfeld	970,5	304,9	3,2	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 46 Kamener Weg	890,1	267,2	3,3	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 47 Holzhauser Str. (Schubartstr.)	1243,5	359,6	3,5	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 49 U Rathaus Reini- ckendorf	980,6	266,0	3,7	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 50 S+U Wittenau	726,2	190,9	3,8	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 51 Märkisches Zentrum	834,7	227,9	3,7	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 52 Wilhelmsruher Damm	592,5	157,9	3,8	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 55 Zeppelinstr. (Seege- felder Str.)	3824,6	1381,3	2,8	1500 A/1500 kVA, Klasse VI
UW 56 Eckenerweg	2121,5	458,7	4,6	750 A/750 kVA, Klasse VI oder 500 A/500 kVA, Klasse VII
UW 57 Finkenkruger Weg	2411,9	462,4	5,2	1000 A/1000 kVA, Klasse VI oder 750 A/750 kVA, Klasse VII
UW 60 Heerstr. (Nennhau- ser Damm)	1057,2	316,7	3,3	500 A/500 kVA, Klasse VI

<b>Unterwerk</b>	<b><math> I_B _{\max}</math> [A] (1 s)</b>	<b><math>I_{B,rms}</math> [A] (3 h)</b>	<b><math> I_B _{\max}/</math> <math>I_{B,rms}</math></b>	<b>GuW-Konfiguration <math>I_N</math> / <math>S_N</math> und Belastbarkeit</b>
UW 67 Am Kiesteich	1171,6	229,2	5,1	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 71 Gliensteig	822,6	182,1	4,5	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 74 Betckestr.	859,0	213,8	4,0	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 79 Falkenseer Chaussee (Zeppelinstr.)	1381,0	398,6	3,5	500 A/500 kVA, Klasse VI
UW 80 Glühwürmchenweg	1023,6	218,0	4,7	500 A/500 kVA, Klasse VI

### 10.3 Bezeichnung der Ergebnisse der elektrischen Netzbe- rechnung in den Anlagen

In den zu diesem Bericht gelieferten Ergebnissen sind die Anlagen je nach Szenario in einen Ordner gruppiert.



Anlagen Szenario A



Anlagen Szenario B



Anlagen Szenario C

Innerhalb jedes Ordners sind die Dateien mit einer Nummer kodiert (2018-615070-562.0) und dem Wort „Anlage“ bezeichnet. Es folgt das Kürzel „hobus“ Unterstrich Szenario X Unterstrich Simulation xyy. Die Dateien mit dem Zusatz „SLD“ enthalten die szenariospezifischen Übersichtsschaltpläne.

-  2018-615070-562.0-Anlage-hobus\_B\_b01.pdf
-  2018-615070-562.0-Anlage-hobus\_B\_b02.pdf
-  2018-615070-562.0-Anlage-hobus\_B\_b03.pdf
-  2018-615070-562.0-Anlage-hobus\_B\_b04.pdf
-  2018-615070-562.0-Anlage-hobus\_B\_b05.pdf
-  2018-615070-562.0-Anlage-hobus\_B\_b06.pdf
-  2018-615070-562.0-Anlage-hobus\_B\_b07.pdf
-  2018-615070-562.0-Anlage-hobus\_B\_b08.pdf
-  2018-615070-562.0-Anlage-hobus\_B\_b09.pdf
-  2018-615070-562.0-Anlage-hobus\_B\_b10.pdf
-  2018-615070-562.0-Anlage-hobus\_B\_b11.pdf
-  2018-615070-562.0-Anlage-hobus\_B\_b12.pdf
-  2018-615070-562.0-Anlage-hobus\_B\_b13.pdf
-  2018-615070-562.0-Anlage-hobus\_B\_b14.pdf
-  2018-615070-562.0-Anlage-hobus\_B\_b15.pdf
-  2018-615070-562.0-Anlage-hobus\_B\_b16.pdf
-  2018-615070-562.0-Anlage-hobus\_B\_b17.pdf
-  2018-615070-562.0-Anlage-hobus\_B\_nb.pdf
-  2018-615070-562.0-Anlage-hobus\_B\_SLD.pdf

Die Anlagen sind grundsätzlich anhand der Szenarien gruppiert (siehe Tabelle 10-18). Je Szenario existieren simulationsspezifische Ergebnisse, welche anhand von Tabelle 10-19 kodiert sind. In Tabelle 10-20, Tabelle 10-21 und Tabelle 10-22 sind die einzelnen Simulationen der Szenarien A, B und C gelistet.

Tabelle 10-18: Kennzeichnung der Anlagen: Szenarien

Abkürzung	Szenario
SzA	Szenario A
SzB	Szenario B
SzC	Szenario C

Tabelle 10-19: Kennzeichnung der Anlagen: Simulationsspezifische Ergebnisse

Abkürzung	Inhalt
UP-ABxx-y	Minimale Spannung am Stromabnehmer im AB „xx“, Teil „y“
I-ww-ABxxy-z	Maximaler Strom im Leiter „ww“ für den AB „xx“ Spur „y“, Teil „z“. Dabei gilt für „ww“: „FD“ – Fahrdraht „FD2“ – 2. Fahrdraht, falls vorhanden „VL“ – Verstärkungsleiter, falls vorhanden
UW-xxxx-y	Übersicht für Unterwerk mit der Abkürzung „xxxx“, enthält die Blätter „y“: <ol style="list-style-type: none"> <li>1- Strom in Gleichrichter, Sammelschiene und Speisekabel(n), zeitgewichtet</li> <li>2- Strom in Gleichrichter, Sammelschiene und Rückleiterkabel(n), zeitgewichtet</li> <li>3- Übersicht des Gleichrichters und der Speise- und Rückleiterkabel</li> <li>4- Übersicht des Gleichrichters</li> </ol> <p>Für den Fall, dass zwei Gleichrichter im Unterwerk vorhanden sind:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1- Strom in Gleichrichter, Sammelschiene und Speisekabel(n), zeitgewichtet</li> <li>2- Strom in Gleichrichter, Sammelschiene und Rückleiterkabel(n), zeitgewichtet</li> <li>3- Strom in Gleichrichter 1, zeitgewichtet</li> <li>4- Leistung am Gleichrichter 1, zeitgewichtet</li> <li>5- Strom in Gleichrichter 2, zeitgewichtet</li> <li>6- Leistung am Gleichrichter 2, zeitgewichtet</li> <li>7- oder 9: Übersicht des Gleichrichters und der Speise- und Rückleiterkabel</li> <li>8- oder 10: Übersicht des Gleichrichters</li> </ol>
FZG-xxx-yyy-z	Übersicht über das Fahrzeug „xxx“ (interne Nummerierung), gewählt als repräsentatives Fahrzeug für Linie „yyy“, enthält die Blätter „z“: <ol style="list-style-type: none"> <li>1- Diagramm von Spannung, Strom, SoC, Geschwindigkeit als Funktion der Zeit</li> <li>2- Tabellarische Übersicht aller Fahrplanfahrten dieses Fahrzeugs</li> </ol>

Tabelle 10-20: Liste der Simulationen für Szenario A

<b>Abkürzung</b>	<b>Inhalt</b>
SzA-NB	Szenario A, Normalbetrieb
SzA-a01	Szenario A, Ausfall der Unterwerke HOTT, AAMN, KLAP, ATB, FKRW und FRGO
SzA-a02	Szenario A, Ausfall der Unterwerke BDRU und KAMW
SzA-a03	Szenario A, Ausfall der Unterwerke ALKL, FAPL, REIM, BAHF, CAUT und WKHS
SzA-a04	Szenario A, Ausfall der Unterwerke GSTK, UHS, ZESE, HENH und SEPA
SzA-a05	Szenario A, Ausfall der Unterwerke JEBN, PWSW und UHHS
SzA-a06	Szenario A, Ausfall der Unterwerke WIDA, HGCS, SEKL und WMBG
SzA-a07	Szenario A, Ausfall der Unterwerke SMNO, KRSC und BTCK
SzA-a08	Szenario A, Ausfall der Unterwerke HLLB, HVLS, DAHV, URUH, URRD und SPFD
SzA-a09	Szenario A, Ausfall der Unterwerke GAHE und SCEI
SzA-a10	Szenario A, Ausfall der Unterwerke UERP und GLST
SzA-a11	Szenario A, Ausfall der Unterwerke LPSC und FAZE
SzA-a12	Szenario A, Ausfall der Unterwerke SEEK und MABR
SzA-a13	Szenario A, Ausfall der Unterwerke KFKA und TELT
SzA-a14	Szenario A, Ausfall des Unterwerks GAKI
SzA-a15	Szenario A, Ausfall des Unterwerks ZHDN
SzA-a16	Szenario A, Ausfall des Unterwerks SLUE
SzA-a17	Szenario A, Ausfall des Unterwerks SHST
SzA-a18	Szenario A, Ausfall des Unterwerks FLTW
SzA-a19	Szenario A, Ausfall des Unterwerks STSB

Tabelle 10-21: Liste der Simulationen für Szenario B

<b>Abkürzung</b>	<b>Inhalt</b>
SzB-NB	Szenario B, Normalbetrieb
SzB-b01	Szenario B, Ausfall der Unterwerke BIBG, FAPL, BRNH und KAMW
SzB-b02	Szenario B, Ausfall der Unterwerke GAHE, HVLS, DAHV, SWND, HHSB und ECKE
SzB-b03	Szenario B, Ausfall der Unterwerke BDRU, RAUC, SEEK, SMNO, URRD und FKRW
SzB-b04	Szenario B, Ausfall der Unterwerke SHST, FAZE, KRSC und MRKZ
SzB-b05	Szenario B, Ausfall der Unterwerke FLTW, URUH und UHS
SzB-b06	Szenario B, Ausfall der Unterwerke STSB und GAFE
SzB-b07	Szenario B, Ausfall der Unterwerke SAND, WIDA und GSTK

<b>Abkürzung</b>	<b>Inhalt</b>
SzB-b08	Szenario B, Ausfall der Unterwerke REIM, HOTT und GLWM
SzB-b09	Szenario B, Ausfall der Unterwerke MABR und AMGR
SzB-b10	Szenario B, Ausfall der Unterwerke AMKT und SLUE
SzB-b11	Szenario B, Ausfall der Unterwerke TELT und KFKA
SzB-b12	Szenario B, Ausfall der Unterwerke AAMN, ALKL, JEBN und SUWI
SzB-b13	Szenario B, Ausfall des Unterwerks ZESE
SzB-b14	Szenario B, Ausfall des Unterwerks HENH
SzB-b15	Szenario B, Ausfall des Unterwerks GLST
SzB-b16	Szenario B, Ausfall des Unterwerks SEPA
SzB-b17	Szenario B, Ausfall des Unterwerks BTCK

Tabelle 10-22: Liste der Simulationen für Szenario C

<b>Abkürzung</b>	<b>Inhalt</b>
SzC-NB	Szenario C, Normalbetrieb
SzC-c01	Szenario C, Ausfall der Unterwerke BIBG, FAPL, BRNH und KAMW
SzC-c02	Szenario C, Ausfall der Unterwerke GAHE, HVLS, DAHV, SWND, HHSB und ECKE
SzC-c03	Szenario C, Ausfall der Unterwerke BDRU, RAUC, SEEK, SMNO, URRD und FKRW
SzC-c04	Szenario C, Ausfall der Unterwerke SHST, FAZE, KRSC und MRKZ
SzC-c05	Szenario C, Ausfall der Unterwerke FLTW, URUH und UHS
SzC-c06	Szenario C, Ausfall der Unterwerke STSB und GAPE
SzC-c07	Szenario C, Ausfall der Unterwerke SAND, WIDA und GSTK
SzC-c08	Szenario C, Ausfall der Unterwerke REIM, HOTT und GLWM
SzC-c09	Szenario C, Ausfall der Unterwerke MABR und AMGR
SzC-c10	Szenario C, Ausfall der Unterwerke AMKT und SLUE
SzC-c11	Szenario C, Ausfall der Unterwerke TELT und KFKA
SzC-c12	Szenario C, Ausfall der Unterwerke HENH und ALKL
SzC-c13	Szenario C, Ausfall des Unterwerks ZESE und BTCK
SzC-c14	Szenario C, Ausfall des Unterwerks GLST, JEBN und SUWI