MARBURG
UNIVERSITÄTSSTADT

Bau- und Planungsausschuss, Liegenschaften

Geschäftsführung: Friedhelm Stein

Telefon: 06421 201-1602
Telefax: 06421 201-1790
E-Mail: friedhelm.stein@marburg-stadt.de

Öffnungszeiten: Montag, Mittwoch, Freitag von 8 – 12 Uhr
Donnerstag von 15 – 18 Uhr
und nach Vereinbarung

Marburg, 29.11.2018

Sitzung des Bau- und Planungsausschusses, Liegenschaften (öffentlich)

Sehr geehrte Damen und Herren,

zu einer **Sitzung des Bau- und Planungsausschusses, Liegenschaften (öffentlich)** der Stadtverordnetenversammlung der Universitätsstadt Marburg am

Donnerstag, dem 06.12.2018, 18:00 Uhr,
Sitzungssaal Barfüßerstraße 11, 35037 Marburg

lade ich Sie hiermit fristgerecht ein.

Folgende Tagesordnung ist vorgesehen:

1 Eröffnung der Sitzung

2 Genehmigung der Niederschrift der Sitzung vom 15.11.2018

3 Bericht(e) aus den Arbeitsgruppen zur Lokalen Agenda 21

4 Begründung eines Erbbaurechtes in Marburg-Richtsberg
Vorlage: VO/6530/2018

5 Bauleitplanung der Universitätsstadt Marburg (FW Cappel)
Bebauungsplan Nr. 18/17, 1. Änderung Feuerwehrstützpunkt und Jugendfeuerwehrausbildungszentrum
- Aufstellungsbeschluss gemäß § 2 Baugesetzbuch (BauGB)
Vorlage: VO/6529/2018

6 Umsetzung einer Teilelektrifizierung des ÖPNV in Marburg
Kenntnisnahme der Machbarkeitsstudie von Hybrid-Oberleitungs-Busverkehr und Beauftragung eines Planfeststellungsverfahrens
Vorlage: VO/6558/2018

7 Anträge der Fraktionen

7.1 Antrag der Fraktion B90/Die Grünen betr. Milieus erhalten und stärken – Gentrifizierung entgegenwirken
(zurückgestellt aus der Sitzung am 14.06.2018)
Vorlage: VO/6267/2018

7.2 Antrag der Fraktionen von CDU, SPD und BfM betr. Micro-Apartments
Vorlage: VO/6527/2018

7.3 Antrag der Fraktionen SPD, Linke, BfM, CDU betr. Verwendung von Polystyrol bei Sanierungen und Neubauten
Vorlage: VO/6557/2018

8 Kenntnisnahmen

8.1 Niederschrift über die Sitzung des Beirats für Stadtgestaltung am 24.10.2018
Vorlage: VO/6545/2018

9 Verschiedenes

Mit freundlichen Grüßen
gez.

Uwe Meyer
Vorsitzender

MARBURG
UNIVERSITÄTSSTADT

Beschlussvorlage	Vorlagen-Nr.: **VO/6529/2018** Status: öffentlich Datum: 12.11.2018
Dezernat: Fachdienst: Sachbearbeiter/in:	I 61 - Stadtplanung und Denkmalschutz Klug, Manuela

Beratungsfolge:

Gremium	**Zuständigkeit**	**Sitzung ist**
Magistrat	Erörterung	Nichtöffentlich
Ausschuss für Umwelt, Energie und Verkehr	Erörterung	Öffentlich
Bau- und Planungsausschuss, Liegenschaften	Erörterung	Öffentlich
Stadtverordnetenversammlung	Entscheidung	Öffentlich

Bauleitplanung der Universitätsstadt Marburg
Bebauungsplan Nr. 18/17, 1. Änderung Feuerwehrstützpunkt und Jugendfeuerwehrausbildungszentrum
- Aufstellungsbeschluss gemäß § 2 Baugesetzbuch (BauGB)

Beschlussvorschlag:
Die Stadtverordnetenversammlung wird gebeten, folgende Beschlüsse zu fassen:

1. Für das Gebiet „Feuerwehrstützpunkt und Jugendfeuerwehrausbildungszentrum“ in Marburg wird gemäß § 2 Abs. 1 BauGB der Aufstellungsbeschluss für den Bebauungsplan Nr. 18/17, 1. Änderung der Universitätsstadt Marburg gefasst. Der Geltungsbereich umfasst das im Übersichtsplan gekennzeichnete Gebiet.

2. Das Bebauungsplanverfahren wird im beschleunigten Verfahren gemäß § 13a BauGB durchgeführt.

Sachverhalt:
Der aktuelle Feuerwehrstützpunkt Cappel weist einen hohen Sanierungsbedarf auf (Teilklimakonzept „Eigene Liegenschaften“). Aufgrund geänderter räumlicher und funktionaler Anforderungen an einen Feuerwehrstandort sowie der Notwendigkeit eines Trainings- und Ausbildungszentrums wurde vom Magistrat der Universitätsstadt Marburg in der Sitzung am 06.10.2014 der Neubau der Feuerwehr Cappel und eines Ausbildungs- und Trainingszentrums für alle Marburger Feuerwehren beschlossen. Für den Neubau der Feuerwache mit Trainings- und Ausbildungszentrum und des Jugendausbildungszentrums wurde ein europaweiter Planungswettbewerb (Realisierungswettbewerb) durchgeführt. In der abschließenden Preisgerichtssitzung am 29.09.2015 erfolgte die Entscheidung für den Entwurf des Architekturbüros Pussert Kosch Architekten.

Das Land Hessen beabsichtigt nunmehr den Bedarf des Jugendfeuerwehrausbildungszentrums sowie die Geschäftsstelle der Hessischen Jugendfeuerwehr am Standort der ehemaligen Erstaufnahmeeinrichtung zu decken und die bestehenden Gebäude zu nutzen.

Aufgrund der vorgesehenen Standortverlagerung des Jugendfeuerwehrausbildungszentrums des Landes Hessen wurde durch die Universitätsstadt Marburg geprüft, ob die Unterbringung des Neubaus der Feuerwehrwache Cappel mit Ausbildungs- und Trainingszentrum auf dem benachbarten, nördlichen Grundstück möglich sei (Machbarkeitsstudie). Auf der Grundlage der Ergebnisse der Machbarkeitsstudie ist die Universitätsstadt Marburg nunmehr bestrebt, den Neubau des Feuerwehrstützpunktes Cappel mit Ausbildungs- und Trainingszentrum auf dem Standort, nördlich des künftigen Jugendfeuerwehrausbildungszentrums des Landes Hessen, zu realisieren.

Die südlich der ehemaligen Erstaufnahmeeinrichtung angrenzende Fläche soll als Gewerbefläche ausgewiesen werden. Im Regionalplan Mittelhessen (2010) und im Gewerbeentwicklungskonzept der Universitätsstadt Marburg ist der Bereich südlich des Bebauungsplans 18/17 als Erweiterungsfläche des Gewerbegebietes „Cappel Süd III“ dargestellt. Die vorgesehene Gewerbefläche wird einen Übergang zwischen dem künftigen Jugendfeuerwehrausbildungszentrum des Landes Hessen und der künftigen Gewerbegebietserweiterung „Cappel Süd III“ bilden.
Die Erschließung der Gewerbefläche soll über die bestehenden Erschließungsstraßen „Lintzingsweg“ und „Zu den Sandbeeten“ erfolgen.

Der Geltungsbereich erstreckt sich über eine Fläche von 3,1 ha und ist teils bebaut. Zentral befinden sich die Strukturen der ehemaligen Erstaufnahmeeinrichtung des Landes Hessen (6 Gebäude und versiegelte Erschließungsflächen). Das nördlich benachbarte Grundstück wurde als öffentliches Sportfeld genutzt. Das südlich benachbarte Grundstück fungiert aktuell als Wiesen- bzw. Weidefläche. Bei dem betroffenen Gehölzbestand handelt es sich um jüngere Gehölz- und Grünstrukturen.

Die Flurstücke 161/3 und 161/6 innerhalb des Geltungsbereiches befinden sich im Eigentum der Universitätsstadt Marburg. Das Flurstück 161/4 wurde vom Land Hessen für das Jugendfeuerwehrausbildungszentrum bereits erworben.

Der Geltungsbereich ist planungsrechtlich im derzeitig gültigen Bebauungsplan 18/17 noch als öffentliche Grünfläche mit Sportanlagen ausgewiesen und grenzt direkt an bestehende gewerbliche Strukturen an. Die Planung fügt sich in die Eigenart der näheren Umgebung ein. Die leerstehenden Gebäude können durch die Standortverlagerung des Jugendfeuerwehrausbildungszentrums nachgenutzt werden. Durch eine Bündelung der Feuerwehrstützpunkte (Wache und Ausbildungszentrum) an einem Standort können Synergien genutzt werden. Die Erschließung ist durch die bestehenden Erschließungsstraßen und Infrastrukturen gesichert.

Begründung zum Verfahrensweg:
Die Planung dient der Nachverdichtung innerhalb der planungsrechtlich geordneten Siedlungslage. Die Planung wird gemäß § 13a BauGB als „Bebauungsplan der Innenentwicklung“ im beschleunigten Verfahren aufgestellt, da die Planung inhaltlich die materiellen Rahmenbedingungen des § 13a Abs. 1 BauGB erfüllt und insofern auch die Vorteile des beschleunigten Verfahrens in Anspruch genommen werden dürfen. Das beinhaltet auch, dass keine förmliche Umweltprüfung (Umweltbericht) nötig ist.

Finanzielle Auswirkungen:
Für den Neubau des Feuerwehrstandortes müssen städtische Mittel im Haushalt bereitgestellt werden.

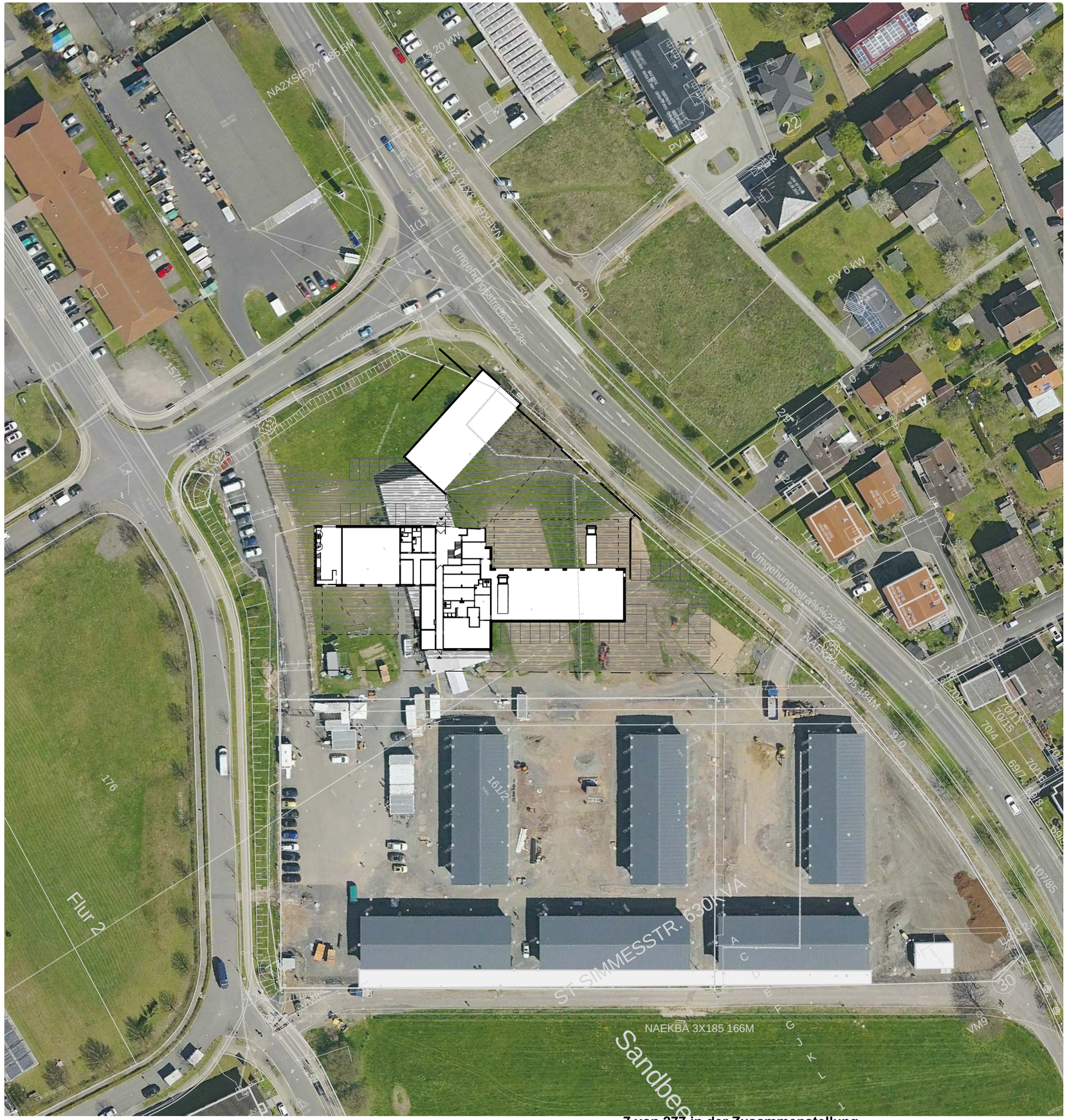
Dr. Thomas Spies
Oberbürgermeister

Anlagen:
- Übersichtsplan zum B-Plan 18/17, 1. Änderung
- Luftbild mit Planung des Feuerwehrstützpunktes Cappel mit Ausbildungs- und Trainingszentrum

Beteiligung an der Vorlage durch:

FBL 6	**FD 61**		

Übersichtsplan zum B. - Plan Nr. 18/17, 1. Änderung
Neuer Feuerwehrstützpunkt und Jugendfeuerwehraus-
bildungszentrum Marburg - Cappel



INDEX	ÄNDERUNGEN	DATUM	GEZ.

MARBURG
UNIVERSITÄTSSTADT

VORENTWURF

BAUHERR	Magistrat der Universitätsstadt Marburg Markt 1 35037 Marburg
PLANUNG	Fachbereich 6 / Planen Bauen Umwelt Fachdienst 65 / Hochbau Software-Center 1 35037 Marburg
PROJEKT	Feuerwehrstützpunkt Cappel Umgehungsstraße 35043 Marburg-Cappel
PLANINHALT	Lageplan Luftbild

PLANBEZ.:	FWC-N17-A2-LA-002	STATUS:	VORENTWURF
PRJ. - Nr.:	31/08	MAßSTAB:	1 : 1000
DATUM:	17.10.18	FORMAT:	DIN A3
GEZEICHNET:	K.Schick	GEPRÜFT:	Lenz

MARBURG
UNIVERSITÄTSSTADT

Beschlussvorlage	Vorlagen-Nr.: **VO/6558/2018** Status: öffentlich Datum: 23.11.2018
Dezernat: Fachdienst: Sachbearbeiter/in:	I 011 - Persönlicher Referent des Oberbürgermeisters Höhn, Philipp

Beratungsfolge:

Gremium	**Zuständigkeit**	**Sitzung ist**
Magistrat	Vorberatung	Nichtöffentlich
Ausschuss für Umwelt, Energie und Verkehr	Vorberatung	Öffentlich
Bau- und Planungsausschuss, Liegenschaften	Vorberatung	Öffentlich
Haupt- und Finanzausschuss	Vorberatung	Öffentlich
Stadtverordnetenversammlung	Entscheidung	Öffentlich

Umsetzung einer Teilelektrifizierung des ÖPNV in Marburg
Kenntnisnahme der Machbarkeitsstudie von Hybrid-Oberleitungs-Busverkehr und Beauftragung eines Planfeststellungsverfahrens

Beschlussvorschlag:
Die Stadtverordnetenversammlung wird gebeten, folgende Beschlüsse zu fassen:

1) Die vom Bundesverkehrsministerium (BMVI) beauftragte „Machbarkeitsstudie von Hybrid-Oberleitungs-Busverkehr in Deutschland – am Beispiel Marburg und Trier, Berichtsteil Marburg“ wird zur Kenntnis genommen.

2) Die Stadtwerke Marburg werden beauftragt, auf der Basis der vorgelegten Machbarkeitsstudie, in Zusammenarbeit mit den zuständigen Fachdiensten der Stadtverwaltung und dem BMVI ein Planfeststellungsverfahren für den Aufbau eines Hybrid-Oberleitungsbus-Systems (HO-Bus) als Teilstrategie zur Bereitstellung eines emissionsfreien ÖPNV in Marburg einzuleiten.

Sachverhalt:
Für die Erreichung der Klimaziele der Bundesregierung ist es unerlässlich, dass der Eintrag von klimaschädlichen Gasen wie z.B. von CO_2 kurzfristig entscheidend verringert wird. Der öffentliche Personennahverkehr trägt schon jetzt dazu bei, könnte jedoch durch eine Umstellung auf emissionsfreie Antriebe lokal klimaschädliche Gase in nennenswertem Umfang einsparen.
Die Belastung der Städte durch Schadstoffe, die durch den motorisierten Verkehr eingebracht werden, führt vermehrt zu Fahrverboten auf einzelnen Straßen oder in den Innenstädten.

Die Universitätsstadt Marburg war in 2016 eine der Städte in Deutschland, in der die Grenzwerte für die Belastung mit Stickoxiden (NO_x) überschritten wurden. Ein wesentlicher Grund für diese Überschreitung ist die Belastung durch die Emissionen des Verkehrs in der Innenstadt, insbesondere durch Dieselfahrzeuge, die die vorgeschriebenen Grenzwerte nicht einhalten.
Der öffentliche Personennahverkehr ist im Rahmen dieser Problematik ein wesentlicher Teil der Lösung.
Das Bundesverkehrsministerium hat im Rahmen der wissenschaftlichen Beratung zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie die Teilstudie: „Machbarkeitsstudie von HO-Busverkehr in Deutschland – am Beispiel Marburg und Trier“ beauftragt. Die Studie ist fertiggestellt und liegt der Stadtverordnetenversammlung vor.
Ziele der vorliegenden Studie sind:
- die Machbarkeit von HO-Bussen in Deutschland anhand der Beispielstadt Marburg zu analysieren,
- technische Ausgestaltungsoptionen von HO-Bussen und Elektrobussen zu vergleichen,
- verallgemeinerbare Aussagen für die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS) abzuleiten.

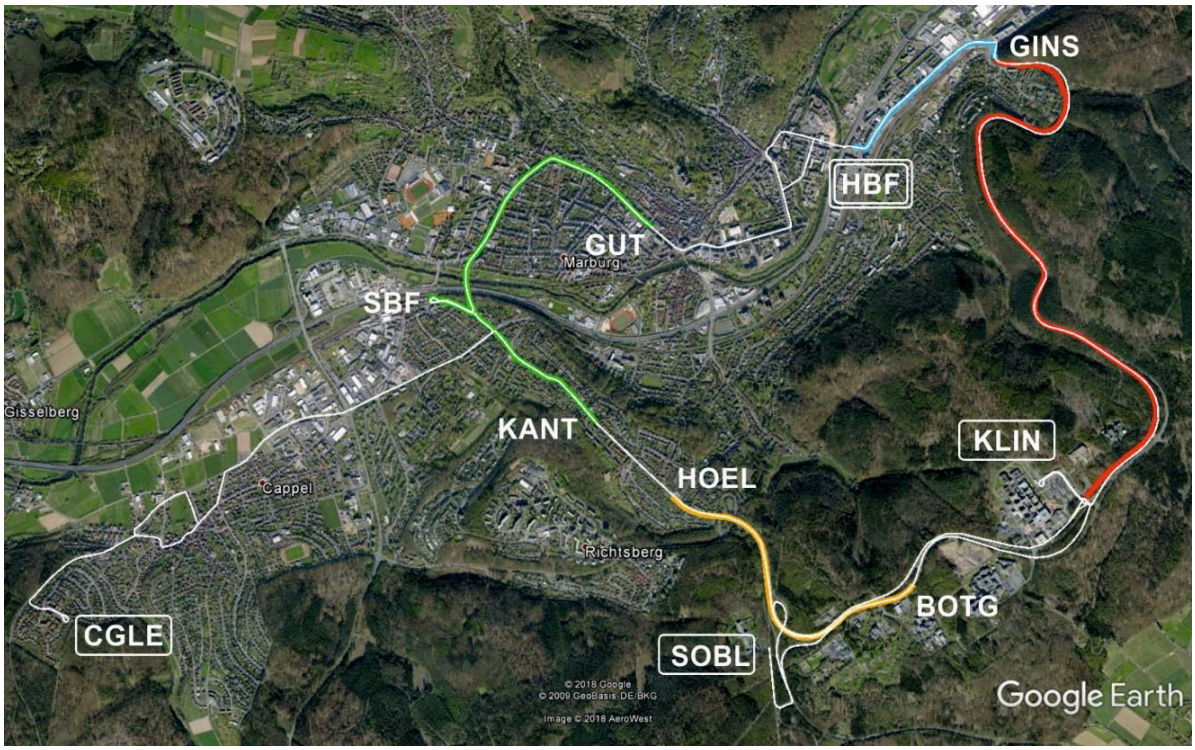
HO-Busse sind rein elektrisch angetriebene Busse, die ihren Fahrstrom aus einer Oberleitung oder einer Batterie erhalten und lokal emissionsfrei fahren. Sie können daher zur Senkung von globalen Treibhausgas- und lokalen Stickoxidemissionen im ÖPNV beitragen.

Ergebnisse der Studie:
- HO-Busse sind in deutschen Städten machbar,
- sie eignen sich für Strecken mit hohem Energiebedarf und hoher Auslastung,
- HO-Busse können auch als Großraumfahrzeuge mit 24 m Länge konfiguriert werden,
- es müssen nur 30 – 50 % der Fahrstrecke mit Oberleitung ausgestattet werden,
- anspruchsvolle Stecken sind nur schwer mit anderen elektrischen Bussen zu bewältigen,
- für einen ökonomischen Betrieb von Elektrobussen ist eine Förderung notwendig.

Für Marburg werden zunächst die Linie 2 und 7 zur Umsetzung eines HO-Bus-Systems vorgeschlagen:

- Linie 2 verkehrt vom Endpunkt Sonnenblick (Fahrplan 2018) über die Lahnberge/Klinikum über den nördlichen An-/Abstieg zum Hauptbahnhof und weiter über die Innenstadtstrecke zum Endpunkt Cappeler Gleiche.
- Linie 7 verkehrt zwischen dem Hauptbahnhof über die Innenstadt und entlang des südlichen An-/Abstieges auf die Lahnberge zum Klinikum.

Der Einsatz von HO-Bussen ist auf den Linien 2 und 7 mit minimalen Anpassungen möglich. Für die Oberleitung sind insgesamt vier Teilabschnitte vorgesehen. Auf den Steigungsstrecken zu den Lahnbergen wird jeweils in Bergaufrichtung Oberleitung vorgeschlagen. Im Innenstadtbereich sind Oberleitungsabschnitte jeweils zweispurig ausgelegt. In Summe beträgt die Länge des zu errichtenden Oberleitungsnetzes 10,6 km. Auf der Linie 2 ergibt sich ein Oberleitungsanteil von 31 %, auf Linie 7 von 41 %. Mit der Auswahl der Oberleitungsstrecken sollen Kreuzungen vermieden, Bereiche wie z.B. Rudolphsplatz, Elisabethstraße und der nordwestliche Teil der Deutschhausstraße (Elisabethkirche) aus optischen Gründen ausgenommen und die erforderlichen Investitionen optimiert werden.



Strecken der Linien 2 und 7 und Verlauf der Oberleitungen (farbig), Quelle Fraunhofer ISI

Auf Basis der Machbarkeitsstudie soll als vorbereitende Maßnahme zur Einführung eines HO-Bus-Systems für die Universitätsstadt Marburg ein Planfeststellungsverfahren durchgeführt werden. Das Verfahren stellt sicher, dass der Aufbau der notwendigen Oberleitung und die für die Stromversorgung erforderliche Infrastruktur erfasst, und im Detail durchgeplant werden. Weiterhin soll damit sichergestellt werden, dass die Stadtgesellschaft an der Planung des HO-Bus-Systems in ausreichender Form beteiligt wird.

Das Planfeststellungsverfahren wird darüber hinaus die Anteile der Forschungs- und Entwicklungskosten (FE) an den Gesamtkosten des Projekts ermitteln. Es ist davon auszugehen, dass ein hoher FE-Anteil für die Höhe der erforderlichen Fördermittel des Projektes zuträglich sein wird.

Finanzielle Auswirkungen:

Mit der Kenntnisnahme der Teilstudie und der Beschlussfassung für die Durchführung eines Planfeststellungsverfahrens sind keine finanziellen Auswirkungen für die Universitätsstadt Marburg verbunden.

Es dient der Kenntnis der Stadtverordnetenversammlung, dass die Teilstudie zu 100 % vom BMVI finanziert wurde und die Zusage vorliegt, dass die Kosten für die Durchführung des Planfeststellungsverfahrens ebenfalls zu 100 % vom BMVI übernommen werden.

Dr. Thomas Spies
Oberbürgermeister

Anlagen:

- Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie, Teilstudie „Machbarkeitsstudie von HO-Busverkehr in Deutschland – am Beispiel Marburg und Trier“, Berichtsteil Marburg
- Anhang zur Studie

Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie

Teilstudie „Machbarkeitsstudie von HO-Busverkehr in Deutschland – am Beispiel Marburg und Trier“

Berichtsteil Marburg

Autorinnen und Autoren

Fraunhofer ISI

Dr. Patrick Plötz, Dr.-Ing. Simon Funke, Dr. Uta Schneider

Fraunhofer IWES

Dr. Bernhard Ernst, Dr. René Marklein

PTV Group GmbH

Heike Schäuble, Petra Strauß

VCDB VerkehrsConsult Dresden-Berlin

Christian Soffel, Jürgen Lange

Karlsruhe, 2. Oktober 2018

Kontakt

Fraunhofer Institut für System und Innovationsforschung (ISI)
Breslauer Str. 48
76139 Karlsruhe, Germany
http://www.isi.fraunhofer.de

Dr. Patrick Plötz
Phone: +49 721 6809 289
patrick.ploetz@isi.fraunhofer.de

INHALTSVERZEICHNIS

1 Zusammenfassung 1

2 Zusammenfassung für die Stadt Marburg 3

3 Einleitung, Zielsetzung und Vorgehen 8

4 Analyse des Städtischen Busnetzes 9

4.1 Technologische Grundlagen 10
4.1.1 Elektrische Busse 10
4.1.2 Elektrische Energiespeicher 14
4.1.3 Infrastruktur 15

4.2 Vorgehensweise 26
4.2.1 Liniennetzanalyse und Linienauswahl 26
4.2.2 Datenerfassung und Evaluation 28
4.2.3 Detailuntersuchung einer Linie 29
4.2.4 Technische Machbarkeitsuntersuchung – Energiebilanzierung und Systemauslegung 32
4.2.5 Wirtschaftlichkeitsuntersuchung 33
4.2.6 Ausweisung ökologischer Parameter 36

4.3 Ergebnisse technische Machbarkeitsuntersuchung 37
4.3.1 Systemdefinitionen 37
4.3.2 Linienauswahl Marburg 39
4.3.3 Detailuntersuchung Marburg 42

4.4 Ergebnisse Wirtschaftlichkeitsuntersuchung Marburg 66
4.4.1 HO-Bus-System (optimierte Linienverläufe) 66
4.4.2 Technologieoption Batterie-Elektrobus (Overnight-Charger/Depot-Lader) 70
4.4.3 Technologieoption Batterie-Elektrobus (Opportunity-Charger) Investitionskosten 75
4.4.4 Technologieoption Batterie-Elektrobus (Opportunity-Charger vollelektisch) Investitionen 79
4.4.5 Fazit Wirtschaftlichkeitsuntersuchung Marburg 84

4.5 Zusammenfassung und Handlungsempfehlung 87

5 Bewertung der technologischen Optionen 91

5.1 Vorgehensweise ... 91
5.1.1 Festlegung der technologischen Optionen ... 91
5.1.2 Generische Bestimmung des benötigten Oberleitungsanteils ... 93
5.1.3 Multikriterielle Bewertung mittels Nutzwertanalyse ... 100
5.2 Techno-ökonomische Ergebnisse ... 101
5.2.1 Investitionen Infrastruktur ... 101
5.2.2 Kosten Fahrzeuge und laufender Betrieb ... 106
5.2.3 Robustheit und Sensitivitäten ... 112
5.2.4 Übersicht und Fazit ... 116
5.3 Weitere Ergebnisse ... 118
5.3.1 Ökologische Bewertung ... 118
5.3.2 Netzbelastung ... 121
5.3.3 Ergänzungen ... 145
5.3.4 Akzeptanz ... 152
5.3.5 Betriebliche Bewertung ... 155
5.4 Gesamtbewertung und Fazit ... 155

6 Übertragung auf Deutschland ... 159
6.1 Vorgehensweise ... 159
6.2 Ableitung eines HO-Bus-Netzes für die Stadt Marburg ... 159
6.2.1 Vorgehensweise ... 159
6.2.2 Potenzialbetrachtung Marburg ... 161
6.3 Ergebnisse für Deutschland ... 163
6.3.1 Potenziale für HO-Bus-Verkehre in Deutschland ... 163
6.3.2 CO_2-Einsparung aus HO-Bus-Betrieb in Deutschland ... 165
6.3.3 Vermeidungskostenansatz CO_{2eq} ... 166

7 Fazit ... 168

8 Quellen ... 170

9 Anhang ... 174
9.1 Annahmen zur techno-ökonomischen Analyse ... 174
9.2 Anhang Übertragbarkeit auf Deutschland ... 176

9.3 Detailauswertungen Marburg 177

ABBILUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Linienverläufe Marburg (weiß) und geplante Oberleitungsabschnitte (farbig). 3
Abbildung 2: Fotomontage eines HO-Busses in Marburg. 7
Abbildung 3: Konfigurationsmöglichkeiten Elektrobus 10
Abbildung 4: Antriebskonzepte 11
Abbildung 5: Möglichkeiten der Energiezuführung 15
Abbildung 6: Docking Station Systeme 17
Abbildung 7: Ladekabel AC-Ladung (Mode 2) 19
Abbildung 8: Ladekabel AC-Ladung (Mode 3) 20
Abbildung 9: Combo-Stecker Typ CCS 850 V 21
Abbildung 10: CCS Stecksystem 22
Abbildung 11: Stangenstromabnehmer bei Oberleitungsbussen 23
Abbildung 12: Stromabnehmer E-Bus der Firma Schunk 25
Abbildung 13: Verlaufskurve Jahresmehrkosten (Lesebeispiel) 35
Abbildung 14: Liniennetzplan Stadtbusverkehr Marburg 40
Abbildung 15: Linienführung Linie 2 Marburg 43
Abbildung 16: Linienführung Linie 7 Marburg 44
Abbildung 17: Höhenprofil Linie 2 Marburg 45
Abbildung 18: Höhenprofil Linie 7 Marburg 45
Abbildung 19: Eindrahttrichter mit Stromabnehmern auf dem Betriebshof der VBZ Zürich 47
Abbildung 20: Lageplan der Oberleitungsabschnitte Marburg (rot, gelb: einspurig Richtung KLEIN; grün, blau: zweispurig) 50
Abbildung 21: Exemplarisches SOC-Diagramm für Umlauf L2-52-MO (HO-Bus) Marburg 53
Abbildung 22: Exemplarisches SOC-Diagramm für Umlauf L7-34-MO (HO-Bus) Marburg 54
Abbildung 23: SOC-Diagramm Linie 7 Umlauf 26 (Batterie-Elektrobus Overnight-Charger) Marburg 58
Abbildung 24: SOC-Diagramm Linie 2 Umlauf 28 (Batterie-Elektrobus Overnight-Charger) Marburg 58
Abbildung 25: SOC-Diagramm Linie 7 Umlauf 26 (Batterie-Elektrobus Overnight-Charger vollelektrische Heizung) Marburg 59
Abbildung 26: SOC-Diagramm Linie 7, Umlauf 26 (Batterie-Elektrobus Opportunity-Charger) Marburg 62
Abbildung 27: SOC-Diagramm Linie 2, Umlauf 28 (Batterie-Elektrobus Opportunity-Charger) Marburg 63
Abbildung 28: SOC-Diagramm Linie 7, Umlauf 26 (Batterie-Elektrobus Opportunity-Charger vollelektrisch) Marburg 64
Abbildung 29: SOC-Diagramm Linie 2, Umlauf 28 (Batterie-Elektrobus Opportunity-Charger vollelektrisch) Marburg 64
Abbildung 30: Entwicklung der laufleistungsbezogenen Mehr- und Minderkosten für den HO-Bus Marburg (ohne Förderung) 67
Abbildung 31: Entwicklung der laufleistungsbezogenen Mehr- und Minderkosten für den Overnight-Charger Marburg 71
Abbildung 32: Verlauf der Jahresmehrkosten Overnight-Charger, nach Kostenarten (Szenario Middle-Case-b) Marburg 72

Abbildung 33: Verlauf der Folgekosten Overnight-Charger, nach Kostenarten (Szenario Middle-Case-b) Marburg ... 73

Abbildung 34: Entwicklung der laufleistungsbezogenen Mehr- und Minderkosten für den Opportunity-Charger Marburg ... 76

Abbildung 35: Verlauf der Jahresmehrkosten Opportunity-Charger, nach Kostenarten (Szenario Middle-Case-b) Marburg ... 77

Abbildung 36: Verlauf der Folgekosten Opportunity-Charger, nach Kostenarten (Szenario Middle-Case-b) Marburg ... 78

Abbildung 37: Entwicklung der laufleistungsbezogenen Mehr- und Minderkosten für den Opportunity-Charger (vollelektrisch) Marburg ... 81

Abbildung 38: Verlauf der Jahresmehrkosten Opportunity-Charger (vollelektrisch), nach Kostenarten (Szenario Middle-Case-b) Marburg ... 81

Abbildung 39: Verlauf der Folgekosten Opportunity-Charger (vollelektrisch), nach Kostenarten (Szenario Middle-Case-b) Marburg ... 83

Abbildung 40: Benötigte Oberleitungsausstattung je nach Elektrische Reichweite und Ladeleistung der Oberleitung bei durchschnittlicher Fahrleistung. ... 98

Abbildung 41: Benötigte Oberleitungsausstattung je nach Elektrische Reichweite und Ladeleistung der Oberleitung bei erhöhter Fahrleistung ... 98

Abbildung 42: Benötigte Oberleitungsausstattung je nach Elektrische Reichweite und Ladeleistung der Oberleitung bei erhöhter Fahrleistung mit Gelegenheitsladen an der Wendestelle ... 99

Abbildung 43: Benötigte Oberleitungsausstattung je nach Elektrische Reichweite und Ladeleistung der Oberleitung bei durchschnittlicher Fahrleistung im Winter (durchgezogene Linie) und Sommer (gestrichelte Linie) ... 99

Abbildung 44: Kosten der Oberleitung je Bus-km (Oberleitung in zwei Richtungen) ... 105

Abbildung 45: Kosten der Oberleitung je Bus-km (Oberleitung in eine Richtung) ... 105

Abbildung 46: Kosten je Bus-Kilometer nach Bustypen und Reichweite ... 111

Abbildung 47: Beispiel zu Kostenentwicklung 2017 bis 2030 ... 112

Abbildung 48: Linientopologien nach VDV (1992). ... 114

Abbildung 49: Abschätzung der Kosten je Platz-Kilometer inkl. Kosten der Infrastruktur ... 117

Abbildung 50: CO_{2eq} je Platz-Kilometer ... 120

Abbildung 51: Geografische Ansicht des 20 kV-Netzes im Stadtgebiet Marburg mit dem elektrifizierten Fahrweg der Buslinie 7 und Unterwerken ... 123

Abbildung 52: Dauerstrombelastbarkeit von normierten Kupferfahrdrähten bei 80° C Leitertemperatur (Kießling et al. 2014, S. 480) ... 125

Abbildung 53: O-Bus-Oberleitung Eberswalde, Brandenburg. a) Einspeisung in die Oberleitung, b) Kreuzung, c) Streckentrenner, d) Querkupplung (Kießling et al. 2014, S. 1133) ... 126

Abbildung 54: Fahrleitungsbauweisen elektrischer Bahnen (Kießling et al. 2014, S. 165) ... 127

Abbildung 55: Oberleitung mit Beiseilaufhängung für Anwendungen im Nahverkehr (Kießling et al. 2014, S. 172) ... 127

Abbildung 56: Kettenwerk mit einem Hänger am Stützpunkt (Kießling et al. 2014, S. 173) ... 127

Abbildung 57: O-Bus-Oberleitungen in Pendelaufhängung. a) Überblick, b) Detail A (Biesenack 2006, S. 170) ... 128

Abbildung 58: Aufbau eines HO-Busses in PowerFactory ... 128

Abbildung 59: Unterwerke und Speisebereiche der Oberleitungsbusanlage Eberswalde (Kiebler 2017) ... 130

Abbildung 60: Daten des Dreiwicklungstransformators ... 131

Abbildung 61: Unterwerk in PowerFactory ... 132

Abbildung 62: Ersatzschaltbild bei einseitiger Speisung ... 133

Abbildung 63: Spannungsfall bei einseitig speisendem Unterwerk (bei x=0 km) ... 134
Abbildung 64: Ersatzschaltbild bei beidseitiger Speisung ... 135
Abbildung 65: Spannungsfall bei beidseitig speisenden Unterwerken (bei x=0 km und x=4,22 km bzw. x=8,44 km) ... 136
Abbildung 66: Spannungsfall bei einseitig speisendem Unterwerk (bei x=0 km) ... 137
Abbildung 67: Spannungsfall bei beidseitig speisenden Unterwerken (bei x=0 km und x=3 km) ... 138
Abbildung 68: Spannung am Stromabnehmer ... 139
Abbildung 69: Positionierung der Unterwerke ... 140
Abbildung 70: Situation am Abgang des Unterwerks A bei Versorgung von 4 Bussen (insg. 960 kW) durch die drei Unterwerke ... 142
Abbildung 71: Situation am Abgang des Unterwerks B bei Versorgung von 4 Bussen (insg. 960 kW) durch die drei Unterwerke ... 142
Abbildung 72: Situation am Abgang des Unterwerk C bei Versorgung von 4 Bussen (insg. 960 kW) durch die drei Unterwerke ... 143
Abbildung 73: Komponenten einer umfassenden Zug- oder HO-Bussimulation (Biesenack 2006) ... 144
Abbildung 74: Spannungsfall bei beidseitig speisenden Unterwerken und maximalen Fahrleitungslängen ... 146
Abbildung 75: Positionierung der Unterwerke ... 148
Abbildung 76: Spannung am Stromabnehmer ... 149
Abbildung 77: Situation am Abgang des Unterwerks A bei Versorgung von 5 Bussen (insg. 2 MW) durch die 5 Unterwerke ... 149
Abbildung 78: Situation am Abgang des Unterwerks B bei Versorgung von 5 Bussen (insg. 2 MW) durch die 5 Unterwerke ... 150
Abbildung 79: Situation am Abgang des Unterwerks C bei Versorgung von 5 Bussen (insg. 2 MW) durch die 5 Unterwerke ... 150
Abbildung 80: Situation am Abgang des Unterwerks D bei Versorgung von 5 Bussen (insg. 2 MW) durch die 5 Unterwerke ... 151
Abbildung 81: Situation am Abgang des Unterwerks E bei Versorgung von 5 Bussen (insg. 2 MW) durch die 5 Unterwerke ... 151
Abbildung 82: Akzeptanzmodell (eigene Darstellung nach Wüstenhagen et al. 2007) ... 152
Abbildung 83: Oberleitungen in Salzburg ... 155
Abbildung 84: Gesamtbewertung der Optionen nach Gewichtung der Stadtwerke ... 157
Abbildung 85: Gesamtbewertung der Optionen nach Gewichtung der Forscher ... 157
Abbildung 86: CO_2eq der Linien in Marburg mit Horizont 2030 (EE-Strom) ... 162
Abbildung 87: Einsparung NO_X in Marburg mit Bezugsjahr 2015 und Horizont 2030 ... 163
Abbildung 88: Bandbreite CO_2eq des Busverkehrs aller potenziell für den HO-Bus-Betrieb geeigneten Unternehmen ... 165
Abbildung 89: Benötigte Oberleitungsausstattung je nach Elektrische Reichweite und Ladeleistung der Oberleitung bei durchschnittlicher Fahrleistung (Solo-Bus) ... 175
Abbildung 90: Benötigte Oberleitungsausstattung je nach Elektrische Reichweite und Ladeleistung der Oberleitung bei durchschnittlicher Fahrleistung (Doppelgelenkbus) ... 175

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Investitionen in Elektrobusse und Infrastruktur in Marburg. 5
Tabelle 2: Differenz der Barwerte nach 40 Jahren von Elektrobussen gegenüber Dieselbussen in Marburg. 6
Tabelle 3: Oberleitungsabschnitte Marburg 49
Tabelle 4: Oberleitungsanteile Marburg 50
Tabelle 5: Ergebnisse der Simulation des Energieverbrauchs (HO-Bus) Marburg 52
Tabelle 6: Bewertung der Umläufe (HO-Bus) Marburg 55
Tabelle 7: Ergebnisse der Simulation des Energieverbrauchs (Batterie-Elektrobus Overnight-Charger) Marburg 57
Tabelle 8: Ergebnisse der Simulation des Energieverbrauchs (Batterie-Elektrobus Opportunity-Charger) Marburg 62
Tabelle 9: Durchschnittliche laufleistungsbezogene Kosten HO-Bus vs. Dieselbus Marburg 67
Tabelle 10: Durchschnittliche Folgekosten mit Diskontierung HO-Bus vs. Dieselbus Marburg 69
Tabelle 11: Ökologische Parameter HO-Bus Marburg 70
Tabelle 12: Durchschnittliche laufleistungsbezogene Kosten Overnight-Charger vs. Dieselbus Marburg 71
Tabelle 13: Durchschnittliche Folgekosten mit Diskontierung Overnight-Charger vs. Dieselbus Marburg 73
Tabelle 14: Ökologische Parameter Overnight-Charger Marburg 74
Tabelle 15: Durchschnittliche laufleistungsbezogene Kosten Opportunity-Charger vs. Dieselbus Marburg 76
Tabelle 16: Durchschnittliche Folgekosten mit Diskontierung Opportunity-Charger vs. Dieselbus Marburg 78
Tabelle 17: Ökologische Parameter Opportunity-Charger Marburg 79
Tabelle 18: Durchschnittliche laufleistungsbezogene Kosten Opportunity-Charger (vollelektrisch) vs. Dieselbus Marburg 80
Tabelle 19: Durchschnittliche Folgekosten mit Diskontierung Opportunity-Charger (vollelektrisch) vs. Dieselbus Marburg 82
Tabelle 20: Ökologische Parameter Opportunity-Charger (vollelektrisch) Marburg 84
Tabelle 21: Übersicht über die Investitionen Marburg 84
Tabelle 22: Übersicht über die Gesamtkosten Marburg 85
Tabelle 23: Übersicht über die Folgekosten Marburg (ohne Förderung) 85
Tabelle 24: Übersicht über die ökologischen Parameter Marburg 86
Tabelle 25: Untersuchte Ausgestaltungsoptionen des HO-Busses. 91
Tabelle 26: Durchschnittliche Fahrenergiebedarfe Winter [kWh/km]. 92
Tabelle 27: Angenommene Batteriegrößen für Überschlagsrechnungen 93
Tabelle 28: Durchschnittliche Batterielebensdauer eines Gelenkbusses in Jahren 96
Tabelle 29: Benötigte Oberleitungsausstattung eines Gelenkbusses in Abhängigkeit des Batteriehubs bei 200 kW Ladeleistung 96
Tabelle 30: Annahmen Rahmenbedingungen Linienbetrieb 97
Tabelle 31: Gewichte für Bewertung 101
Tabelle 32: Größenordnung der Investitionen in die Infrastruktur 102
Tabelle 33: Jährliche Infrastrukturkosten je km Oberleitung 103

Tabelle 34: Kapitaldienst und Unterhaltung Oberleitung in eine Richtung (Preisstand 2017) ... 104
Tabelle 35: Kapitaldienst und Unterhaltung Oberleitung in eine Richtung (Preisstand 2030) ... 104
Tabelle 36: Kapitaldienst und Unterhaltung Oberleitung in zwei Richtungen (Preisstand 2017) ... 104
Tabelle 37: Kapitaldienst und Unterhaltung Oberleitung in zwei Richtungen (Preisstand 2030) ... 104
Tabelle 38: Infrastrukturkosten der weiteren Ladeinfrastruktur je Fahrzeug-km ... 106
Tabelle 39: Definition der betrachteten Fahrzeugtypen ... 107
Tabelle 40: Neupreis Fahrzeuge ... 108
Tabelle 41: Neupreis Batterie ... 108
Tabelle 42: Energiepreise ... 110
Tabelle 43: Betriebskosten Solo-Bus ... 110
Tabelle 44: Betriebskosten Gelenkbus ... 110
Tabelle 45: Betriebskosten Doppelgelenkbus ... 111
Tabelle 46: Sensitivitätsanalysen: Vergleich der Gesamtkosten von Elektro-Bussen gegenüber Dieselbussen in Marburg (Differenzkosten als diskontierter Cash-Flow über 40 Jahre). Ohne Förderung. In Klammern: Werte für Dieselhybridheizung. n.v. : nicht verfügbar, da technisch nicht darstellbar. ... 115
Tabelle 47: Sensitivitätsanalysen: Vergleich der Gesamtkosten von Elektro-Bussen gegenüber Dieselbussen in Marburg (Differenzkosten als diskontierter Cash-Flow über 40 Jahre). Mit Förderung. In Klammern: Werte für Dieselhybridheizung. n.v. : nicht verfügbar, da technisch nicht darstellbar. ... 116
Tabelle 48: Treibhausgase (CO_2eq) Solo-Bus ... 119
Tabelle 49: Treibhausgase (CO_2eq) Gelenkbus ... 119
Tabelle 50: Treibhausgase (CO_2eq) Doppelgelenkbus ... 120
Tabelle 51: Dauerstromtragefähigkeiten von normierten Kupferfahrleitungen bei 80° C Leitertemperatur (Kießling et al. 2014, S. 480) ... 124
Tabelle 52: Daten von bestehenden Oberleitungsbusanlagen in Deutschland ... 130
Tabelle 53: DC-Normspannungswerte nach EN 50163 „Bahnanwendungen-Speisespannungen von Bahnnetzen“ (Biesenack et al. 2006, S. 12) ... 131
Tabelle 54: Verwendete Zahlenwerte ... 133
Tabelle 55: Die mit Ersatzschaltbildern abgeschätzten maximalen Fahrleitungslängen ... 136
Tabelle 56: Planungswerte für die Fahrleitungslängen bzw. Unterwerksabstände ... 138
Tabelle 57: Speiseorte der Unterwerke im 20 kV Netz ... 140
Tabelle 58: Auslastung der 110 /22 kV Netzkuppeltransformatoren des Umspannwerks Süd ... 141
Tabelle 59: Spezifischer Energieverbrauch von Oberleitungsfahrzeugen (inklusive Verluste in der Fahrleitung und im Triebfahrzeug) (Filipovic 1995) ... 144
Tabelle 60: Leistungs- und Strombedarf bei variabler Busanzahl ... 145
Tabelle 61: Dauerstromtragefähigkeiten von normierten Kupferfahrleitungen bei 80 °C Leitertemperatur (Kießling et al., S. 480) ... 145
Tabelle 62: Verwendete Zahlenwerte ... 146
Tabelle 63: Abschätzung der Speiseabschnittlängen und benötigten Unterwerksanzahl ... 146
Tabelle 64: Speiseorte der Unterwerke im 20 kV Netz. ... 148
Tabelle 65: Akzeptanzbewertung ... 154
Tabelle 66: Ergebnis der Bewertung ... 156
Tabelle 67: Linien Marburg (vergleiche auch Liniennetzplan Stadtbusverkehr Marburg) ... 161
Tabelle 68: Linien HO-Bus-Netz Marburg ... 162

Tabelle 69: Anzahl Unternehmen und Betriebsleistung 164
Tabelle 70: Durchschnittliche Fahrenergiebedarfe Sommer [kWh/km] 174
Tabelle 71: Batterieparameter: Ergebnisse Literaturrecherche 174
Tabelle 72: Durchschnittliche Leistungsbedarfe Gelenkbus bei Fahrt in Ebene 174
Tabelle 73: Durchschnittliche Leistungsbedarfe Gelenkbus bei Fahrt in Ebene 174
Tabelle 74: Daten zu Verkehrsverbünden in Deutschland 176

1 Zusammenfassung

Batterie-Hybrid-Oberleitungs-Busse (HO-Busse) sind rein elektrisch angetriebene Busse, die ihren Fahrstrom aus einer Oberleitung oder einem mitgeführten Batteriespeicher erhalten. Sie fahren lokal emissionsfrei und können daher einen Beitrag zur Senkung von lokalen Stickoxid- und globalen Treibhausgasemissionen im ÖPNV leisten. Die Verwendung von Strom aus der Oberleitung, teilweise in einer Batterie gepuffert, bietet besonders hohe Wirkungsgrade. Im Unterschied zu existierenden Oberleitungsbussen können HO-Busse relevante Strecken auch ohne Oberleitung fahren. HO-Busse sind zu unterscheiden von reinen Batteriebussen, die nur über Nacht geladen werden oder solchen die an Haltestellen zwischenladen, sog. Gelegenheitslader.

Ziele der vorliegenden Studie sind (1) die Machbarkeit von HO-Bussen in Deutschland anhand der Beispielstadt Marburg zu analysieren, (2) technische Ausgestaltungsoptionen von HO-Bussen und Elektrobussen zu vergleichen und (3) verallgemeinerbare Aussagen für die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS) abzuleiten. Für die Erreichung dieser Ziele wurden umfangreiche Fahrdaten von Bussen gesammelt und Rechnungen zu den technischen, ökologischen und ökonomischen Auswirkungen von HO-Bussen in den Städten und generell durchgeführt.

Aus den Ergebnissen bzgl. Machbarkeit von HO-Bussen in Deutschland ergibt sich folgendes Fazit:

- **HO-Busse sind machbar in deutschen Städten.** Für Marburg wurden Detailanalysen durchgeführt und Empfehlungen für konkrete Linien ausgesprochen. Die ausgewählten topographisch anspruchsvollen Linien sind mit minimalen Anpassungen technisch durch HO-Busse durchführbar.
- **Es eignen sich vor allem Strecken mit hohem Energiebedarf und hoher Auslastung.** Darüber hinaus zeigt die Analyse, dass linienreine Umläufe besonders gut geeignet sind. Für derartige Linien müssten 30 – 50 % der Fahrstrecke mit Oberleitung ausgestattet werden. Zwischenladen an Wendepunkten reduziert den Bedarf an Oberleitung.
- **Anspruchsvolle Stecken sind nur schwer mit anderen elektrischen Bussen zu bewältigen.** Linien mit hohem Fahrgastaufkommen und schwerer Topographie können technisch nur schwer mit reinen Batteriebussen gefahren werden. Beim Laden nur über Nacht (Depot-Lader) ist ein rein elektrischer Betrieb nicht möglich, es ist eine Dieselzusatzheizung notwendig um sehr große Energiespeicher zu vermeiden. Letztere würden die Möglichkeit, Passagiere zu befördern, stark einschränken. Beim Zwischenladen an Haltestellen (Gelegenheitslader) ist ein rein elektrischer Betrieb möglich, jedoch mit einer Verringerung der Fahrgastkapazität verbunden. Zudem sprechen die Betriebszuverlässigkeit und eine spätere Kapazitätsausweitung für den HO-Bus. Ein Umstieg auf größere Doppelgelenkfahrzeuge ist nach gegenwärtigem Stand der Technik nur mit einem HO-Bus-System realisierbar.

- Im **wirtschaftlichen Vergleich** weisen alle Elektrobusse nennenswerten Investitionsbedarf auf. Für einen ökonomischen Betrieb der Elektrobusse ist eine Förderung notwendig. Im Vergleich liegen die anfallenden Investitionen des Gelegenheitsladers unter denen des HO-Busses, was insbesondere auf die Errichtung des Oberleitungssystems zurückzuführen ist. Bei den langfristigen Betriebskosten muss das Bild jedoch differenzierter betrachtet werden. Während der Gelegenheitslader ohne Förderung die elektrische Alternative mit den günstigsten Betriebskosten ist, kann der HO-Bus mit der aktuellen Förderkulisse sowie einer entsprechenden Optimierung durch leichte Anpassung auf reine Linienumläufe der Antrieb mit den günstigsten Betriebskosten sein, wie das Beispiel Marburg zeigt. Diese Aussagen sind vor dem Hintergrund zu bewerten, dass zunächst nur die initiale Umstellung einer oder zwei Linien der städtischen Busnetze untersucht worden ist. Weitere wirtschaftliche Vorteile ergeben sich für den HO-Bus durch einen weiteren Ausbau des Systems auf weitere Linien. Die Infrastruktur einer ersten Ausbaustufe kann in weiteren Ausbaustufen mitgenutzt werden und senkt die Investitionen pro km für weitere Linien um 25-30%. Ähnliches gilt nicht für den Gelegenheitslader, da mit jeder Linie zusätzliche Schnellladepunkte errichtet werden müssen.
- **Die Übertragung auf Deutschland zeigt sinnvolle Optionen und Entwicklungsbedarf.** Da nur stark ausgelastete Strecken ökonomisch sinnvoll sind und der Fuhrpark eine Mindestgröße haben sollte, eignen sich HO-Busse nicht für alle Linien und Städte Deutschlands. Je nach Auslegung der Busse und Ihrer Batteriegrößen müssen bis zu 50% der Strecke mit Oberleitung ausgestattet sein. In Marburg reicht allerdings die Elektrifizierung von nur vier Linien aus, um jeweils ca. 45 % des Passagieraufkommens zu elektrifizieren. Damit würden gleichzeitig ca. 25% CO_2-Emissionen eingespart. Ein weiterer Ausbau auf vier zusätzliche Linien sorgt für Elektrifizierung von zwei Drittel in Marburg.
- **Weitere technische Entwicklungen können HO-Busse attraktiver machen.** Heizung und Klimatisierung sind starke Nebenverbraucher, eine erhebliche Senkung des Verbrauchs durch evtl. neue Konzepte könnte HO-Busse attraktiver machen. Einfache Lademöglichkeiten an Wendepunkten stellen eine interessante Ergänzung zur Oberleitung dar. Automatisches An- und Abdrahten ist noch in der Entwicklung.
- **Mittlere Batteriegrößen sind ein sinnvoller Kompromiss zwischen Reichweite und Anschaffungskosten**. Mit der Batteriegröße in HO-Bussen steigt die Reichweite und Autonomie der Busse und es wird weniger Infrastruktur benötigt. Allerdings brauchen gerade große Busse sehr große Batterien, die erhebliche Mehrkosten in der Anschaffung bedeuten und auch den Platz für Passagiere reduzieren können.

2 Zusammenfassung für die Stadt Marburg

Marburg

Technische Ergebnisse

Die Linien 2 und 7 wurden für eine Umstellung auf HO-Busse in Marburg ausgewählt. Linie 7 verkehrt zwischen dem Hauptbahnhof über die Innenstadt und entlang des südlichen An-/Abstieges auf die Lahnberge zum Klinikum. Die Linie 2 verkehrt vom Endpunkt Sonnenblick über die Lahnberge/Klinikum über den nördlichen An-/Abstieg zum Hauptbahnhof und weiter über die Innenstadtstrecke zum Endpunkt Cappeler Gleiche.

Für die Oberleitungsinfrastruktur sind insgesamt vier Oberleitungsabschnitte vorgesehen. Auf den topographisch anspruchsvollen Steigungsstrecken auf die Lahnberge wurde jeweils in Bergaufrichtung Oberleitung vorgesehen. Im Innenstadtbereich sind Oberleitungsabschnitte jeweils zweispurig ausgelegt. In Summe beträgt die Länge des zu errichtenden Oberleitungsnetzes 10,6 km. Auf der Linie 2 ergibt sich ein Oberleitungsanteil von 31 % (bezogen auf gesamten Umlauf), auf Linie 7 von 41 %. Es werden darüber hinaus zwei Haltestellen mit Schnellladeinfrastruktur ausgerüstet (Klinikum, Klinik Sonnenblick), am Hauptbahnhof kann die Ladung über die vorhandene Oberleitung erfolgen. Eine Schnellladeмöglichkeit an der Cappeler Gleiche war angedacht, kann aber entfallen.

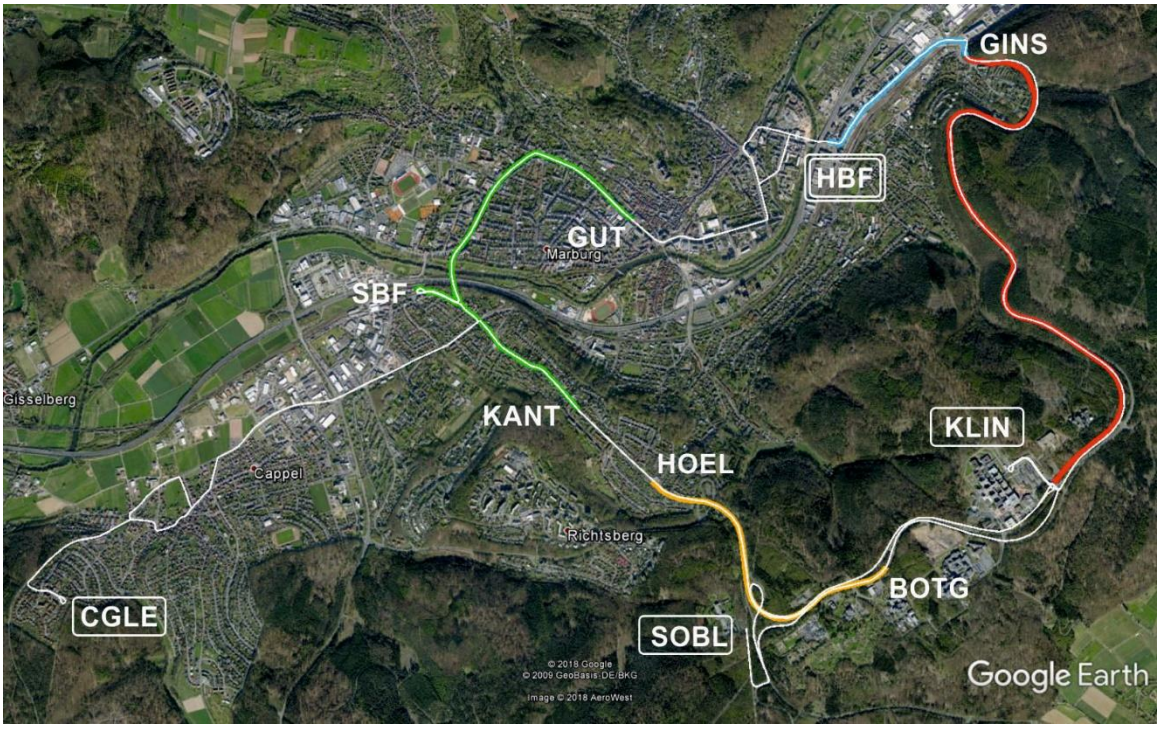


Abbildung 1: Linienverläufe Marburg (weiß) und geplante Oberleitungsabschnitte (farbig).

Der Einsatz von HO-Bussen ist auf allen untersuchten Umläufen entlang der Linien 2 und 7 mit minimalen Anpassungen möglich. Für den HO-Bus wurde angenommen, dass die Umläufe auf reine Linienumläufe (der Linien 2 und 7 kombiniert) umgestellt werden. Die elf Gelenkbusse wurden mit einem 100 kWh LTO-Traktionsspeicher konfiguriert und erhalten eine vollelektrische Heizung und Klimatisierung im Fahrgastraum. Die Energieübertragung erfolgt über die Stangenstromabnehmer, die mit einem speziellen Übertragungssystem ausgestattet werden, um höhere Ladeleistungen im Stand zu ermöglichen. Im Streckenverlauf wird an den genannten Haltestellen ein Lademast mit zwei Übertragungskontakten errichtet, am Hauptbahnhof wird die Oberleitungsinfrastruktur um eine Schnellladevorrichtung ergänzt. Während der nächtlichen Betriebspause erfolgt die Betriebshof-Nachladung ebenfalls über das Oberleitungssystem.

Eine denkbare Alternative wäre der Einsatz von Elektrobussen als reinen Batteriebussen mit Laden nur während der Nacht (Depot-Lader). Hierfür wurden die Gelenkbusse mit einem 390 kWh LiFePO4-Traktionsspeicher und eine Hybridheizung mit temperaturabhängig ergänzender Diesel-Zusatzheizung konfiguriert. Dieser Batteriebus ist auf den untersuchten Umläufen technisch nicht darstellbar. Die für den kompletten Tagesumlauf erforderliche Energiemenge kann bis auf einzelne Umläufe in der zur Verfügung stehenden Ladezeit während der nächtlichen Betriebspause nicht übertragen werden (bei maximaler Ladeleistung von 200 kW). Ein Batteriebus wäre gegenwärtig nur durch eine Verkürzung der Umläufe möglich. Hierzu müssten jedoch zwei zusätzliche Busse auf der Linie eingesetzt werden. Um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen, wurde die Variante Batteriebus mit den beiden zusätzlichen Fahrzeugen in der Kostenrechnung in Kapitel 4.3.3 mit betrachtet.

Der Einsatz von Batteriebussen als Gelegenheitslader, d.h. mit Laden während der Nacht und Zwischenladen an den vier oben genannten Haltestellen, ist eine weitere denkbare elektrische Alternative zum HO-Bus. Die Gelenkbusse wurden hierfür mit einem 250 kWh LiFePO4-Traktionsspeicher konfiguriert, wodurch die Zahl möglicher Passagiere reduziert wird. Während der nächtlichen Betriebspause erfolgt die Betriebshof-Nachladung mit 150 kW. Der Einsatz von Batteriebussen als Gelegenheitsladern ist auf den dargestellten Umläufen technisch möglich.

Die technische Machbarkeit des Gelegenheitsladers wird in einer Stellungnahme des Busherstellers HESS (auch für einen geringen Ladezustand der Batterie) bestätigt, jedoch wird eine Auslegung mit einem kleineren Batteriespeicher, aber mit mehr Schnellladestandorten favorisiert. Als Gründe werden die hohen Speicherkosten sowie die deutlich verminderte Personenkapazität genannt (100-110 Personen bei 250 kWh Batteriespeicher). Insgesamt ist in der detaillierten Auslegung des Gelegenheitsladers ein Abwägen notwendig zwischen einer verminderten Personenkapazität aufgrund einer großen Batterie und einer geringeren Flexibilität im Betrieb mit hoher Ladeinfrastrukturausstattung, da an Haltestellen mit Schnellladeinfrastruktur aufgrund des Ladevorgangs unvermeidbare

Standzeiten entstehen, sodass Wendezeiten nicht zum Kompensieren etwaiger Verspätungen genutzt werden können.

Wirtschaftlicher Vergleich

Für die untersuchten Varianten in Marburg ergeben sich in Summe die in Tabelle 1 dargestellten Investitionen. Dabei wurde zwischen den Fällen ohne Förderung und unter Inanspruchnahme einer Förderung der Investitionen in Oberleitung sowie der Mehrkosten für den Oberleitungsbus durch den Bund in Höhe von knapp 80%, wie bspw. in Solingen für die Oberleitungsinfrastruktur erfolgt, unterschieden.

Bezogen auf die Investitionen stellt der Gelegenheitslader die günstigste Variante dar, obwohl hier neben der Ladeinfrastruktur im Betriebshof auch vier Schnelllader im Streckenverlauf errichtet werden müssen. Beim HO-Bus wirkt sich in erheblichem Umfang die Errichtung der Oberleitungsinfrastruktur aus, beim Batteriebus erzeugen die zwei zusätzlich erforderlichen Fahrzeuge mit zudem deutlich größeren Energiespeicher erhebliche Nachteile in den Investitionen.

Ohne Förderung	**HO-Bus**	**Depot-Lader**	**Gelegenheitslader**
Fahrzeuge	9,8 Mio. €	Nicht möglich.	9,9 Mio. €
Ladeinfrastruktur	12,7 Mio. €	Nicht möglich.	2,7 Mio. €
Sonstige Kosten	1,8 Mio. €	Nicht möglich.	1,1 Mio. €
GESAMT	24,3 Mio. €	Nicht möglich.	13,7 Mio. €
Mit Förderung	HO-Bus	Depot-Lader	Gelegenheitslader
Fahrzeuge	4,8 Mio. €	Nicht möglich.	4,8 Mio. €
Ladeinfrastruktur	2,6 Mio. €	Nicht möglich.	0,5 Mio. €
Sonstige Kosten	0,9 Mio. €	Nicht möglich.	0,6 Mio. €
GESAMT	8,3 Mio. €	Nicht möglich.	5,9 Mio. €

Tabelle 1: Investitionen in Elektrobusse und Infrastruktur in Marburg.

Neben den Investitionen müssen die Betriebskosten berücksichtigt werden. Betrachtet man aufgrund der Langlebigkeit der Oberleitungsinfrastruktur einen Zeitraum von 40 Jahren und zwei mögliche Energiepreisentwicklungen (Optimistisch bzw. pessimistisch für Elektrobusse, optimistisch sind hohe Dieselpreise und günstige Strompreise – die hohen Dieselpreise im optimistischen Szenario entsprechen langfristig ungefähr einem günstigen Import von synthetischem Diesel aus erneuerbarem Strom), dann ergeben sich folgende Differenzen in den Barwerten gegenüber dem Dieselbusbetrieb bei 2% Zins (positive Werte bedeuten Mehrkosten der Elektrobusse gegenüber dem Dieselbus, negative Werte zeigen Kostenvorteile der Elektrobusse).

Förderung	Szenario	HO-Bus (optimierte Umläufe)	Depot-Lader	Gelegenheits-lader
Ohne Förderung	Optimistisch	5,2 Mio. €	-	-1,0 Mio. €
	Pessimistisch	16,2 Mio. €	-	12,4 Mio. €
Mit Förderung	Optimistisch	-10,1 Mio. €	-	-8,6 Mio. €
	Pessimistisch	0,9 Mio. €	-	4,7 Mio. €

Tabelle 2: Differenz der Barwerte nach 40 Jahren von Elektrobussen gegenüber Dieselbussen in Marburg.

Die Langfristbetrachtung relativiert die erheblichen Investitionen in die Oberleitungsinfrastruktur, die über 40 Jahre abgeschrieben wird. Mit Förderung wären alle Elektrobusvarianten in der langfristigen Betrachtung wirtschaftlich. Der Gelegenheitslader kann in der Langfristbetrachtung sogar ohne die Einbeziehung von Fördermitteln im positiven Preisentwicklungsszenario Kostenvorteile gegenüber dem Dieselbus als Referenzsystem erzielen. Mit Förderung liegt der HO-Bus vor den beiden Vergleichstechnologien.

Fazit Marburg

Die Linien 2 und 7 lassen sich ohne betriebliche Einschränkungen mit dem HO-Bus und dem Gelegenheitslader auf Elektrobusbetrieb umstellen. Für den Einsatz eines Depot-Laders (reinen Batteriebusses) müssten die Umläufe verkürzt werden, wodurch der Einsatz zweier zusätzlicher Busse erforderliche wäre. Daher ist diese Variante mit vollelektrischer Heizung unter aktuellen Umständen als nicht möglich einzustufen.

Im wirtschaftlichen Vergleich ist der der HO-Bus unter Nutzung aktueller Fördermöglichkeiten sowie bei Optimierung der Umläufe auf den HO-Bus die günstigste Variante, bezogen auf die Betriebskosten über 40 Jahre.

Im wirtschaftlichen Vergleich ist der Gelegenheitslader ohne Förderung dem HO-Bus deutlich überlegen. Sowohl die anfallenden Investitionen als auch die langfristigen Betriebskosten liegen unter denen des HO-Busses, was insbesondere auf die Errichtung des Oberleitungssystems zurückzuführen ist. Diese Aussage ist jedoch vor dem Hintergrund zu bewerten, dass zunächst nur die initiale Umstellung zweier Linien des Marburger Busnetzes untersucht worden ist. Weitere wirtschaftliche Vorteile ergeben sich für den HO-Bus durch einen weiteren Ausbau des Systems auf weitere Linien. Die Infrastruktur einer ersten Ausbaustufe kann in weiteren Ausbaustufen mitgenutzt werden und senkt die spezifischen Investitionen um 25-30% bzw. ca. 15 – 30 ct/km. Durch eine sukzessive Umstellung weiterer Buslinien auf die alternative Technologie, könnte die Entscheidung für den HO-Bus demnach deutliche Vorteile ergeben. Insbesondere auf den zweispurigen Innenstadtabschnitten besteht erhebliches Potential für weitere HO-Bus-Linien. So verkehren auf der zentralen Achse zwischen Wilhelmsplatz und Hauptbahnhof bis zu 11 Buslinien.

Im Vergleich dazu bedeutet eine Umstellung weiterer Linien auf Gelegenheitslader, dass für jeden zusätzlichen Linienendpunkt eine Schnellladestation vorzusehen ist.

Abbildung 2: Fotomontage eines HO-Busses in Marburg.

Auch der Aspekt der Betriebszuverlässigkeit kann für den HO-Bus sprechen. Gerade in topographisch anspruchsvollen Regionen sind rein batterieelektrische Lösungen teilweise an die Grenzen der Leistungsfähigkeit gestoßen, was bei einem oberleitungsbasierten System nicht zu erwarten ist. Zudem ist eine spätere Kapazitätsausweitung, etwa durch größere Doppelgelenkfahrzeuge, nach gegenwärtigem Stand der Technik nur mit einem HO-Bus-System realisierbar.

3 Einleitung, Zielsetzung und Vorgehen

Hybrid-Oberleitungs-Busse sind lokal emissionsfrei und können daher einen Beitrag zur Senkung von lokalen Stickoxid- und globalen Treibhausgasemissionen leisten. Nur überwiegend strombetriebene Fahrzeuge können diese Vorgabe erfüllen, wobei eine Verwendung von Strom aus der Oberleitung, teilweise in einer Batterie gepuffert, besonders hohe Wirkungsgrade bietet. HO-Busse können von reinen Oberleitungsbussen dadurch abgegrenzt werden, dass sie relevante Fahranteile ohne Oberleitung fahren können, da ihre Traktionsbatterie ausreichend dimensioniert ist. Sie erfüllen das Kriterium der Emissionsfreiheit, bedürfen aber einer Infrastruktur mit verschiedenen Ausgestaltungsoptionen, die mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen verbunden sind.

Ziel dieser Untersuchung ist es, zum einen die Machbarkeit von HO-Bussen generell zu analysieren und zum anderen ein Bewertungsschema für technische Ausgestaltungsoptionen von HO-Bussen zu erstellen sowie anzuwenden. Das Bewertungsschema soll dabei helfen, verallgemeinerbare Aussagen für die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS) abzuleiten.

Im Rahmen des Projektes werden deshalb zwei Betrachtungsebenen verfolgt, eine stadtspezifische (in diesem Fall für Marburg) und eine übergeordnete (die für das MKS-Konsortium verfolgt wird). Dies spiegelt sich bei den ortsspezifischen Daten des städtischen Busnetzes (Kapitel 4) im Vergleich zur allgemein nutzbaren Darstellung der technologischen Ausgestaltungsoptionen (Kapitel 5) wider. Nach der Erstellung des Bewertungsschemas (Abschnitt 5.1), das auch eine generelle Perspektive hat, folgt eine Bewertung und Auswahl von sinnvollen Optionen aus techno-ökonomischer Sicht (Abschnitt 5.2) und weiteren Sichtweisen (Abschnitt 5.3) sowie die Gesamtbewertung (Abschnitt 5.4). In Kapitel 6 werden die Ergebnisse der Streckenanalyse auf Deutschland übertragen, abschließend in Kapitel 7 ein Fazit gezogen.

4 Analyse des Städtischen Busnetzes

Für das Erreichen der nationalen und internationalen Klimaschutzziele wird oft postuliert, dass eine Energiewende nur gelingen kann, wenn sie von einer Mobilitätswende begleitet wird. Der ÖPNV-Sektor nimmt als Mitglied des Umweltverbundes seit jeher eine Vorreiterrolle bei umwelt- und klimafreundlicher Mobilität ein. Nachdem schienengebundene öffentliche Verkehrsmittel schon lange zu einem erheblichen Anteil elektrisch angetrieben werden und damit zumindest lokal emissionsfrei verkehren, hat sich in der Branche im Zuge der neuen Entwicklungen in der Elektromobilität zunehmend der Anspruch etabliert, auch den Busbereich in absehbarer Zeit zu elektrifizieren und so verkehrsbedingte Emissionen zu senken.

Hybrid-Oberleitungs-Busse sind lokal emissionsfrei und können daher einen Beitrag zur Senkung von lokalen Stickoxid- und globalen Treibhausgasemissionen leisten. Nur überwiegend strombetriebene Fahrzeuge können diese Vorgabe erfüllen, wobei eine Verwendung von Strom aus der Oberleitung, teilweise in einer Batterie gepuffert, besonders hohe Wirkungsgrade bietet. HO-Busse erfüllen das Kriterium der Emissionsfreiheit, bedürfen aber einer Infrastruktur mit verschiedenen Ausgestaltungsoptionen sowie unterschiedlichen Vor- und Nachteilen.

Ziel dieser Untersuchung ist es, zum einen die Machbarkeit von HO-Bussen generell zu analysieren und zum anderen ein Bewertungsschema für technische Ausgestaltungsoptionen von HO-Bussen zu erstellen sowie anzuwenden. Das Bewertungsschema soll dabei hinreichend konkret sein, um zwei Fallstudien u.a. mit Marburg zu bewerten und andererseits ausreichend abstrakt darzustellen, um verallgemeinerbare Aussagen für die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS) abzuleiten.

Ergänzend wurden durch die VCDB für denselben Anwendungsfall die Technologieoptionen des Batteriebusses als Overnight-Charger (Depot-Lader) und als Opportunity-Charger (Gelegenheitslader) untersucht.

Für alle Technologieoptionen erfolgte zusätzlich eine grundlegende Wirtschaftlichkeitsuntersuchung inklusive der Ausweisung von ökologischen Parametern, um den erforderlichen Mitteleinsatz für die neuen Bustechnologien dem jeweils erzielbaren Nutzen gegenüberzustellen.

4.1 Technologische Grundlagen

4.1.1 Elektrische Busse

Als Elektrobusse werden im Folgenden straßengebundene Fahrzeuge des ÖPNV bezeichnet, die über einen elektrischen Hauptantrieb verfügen. In holistischer Betrachtung der Antriebskonzepte wird zwischen folgenden Elektrobustypen unterschieden:

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

Die Elektrobustypen werden zudem nach der Antriebskonfektionierung und den Energiezuführungskonzepten weiter differenziert. In Abbildung 2 sind die verschiedenen Konfigurationsmöglichkeiten für den Elektrobus aufgezeigt. Allen Elektrobussen gemein ist die Möglichkeit der Rückgewinnung von Bremsenergie (Rekuperation).

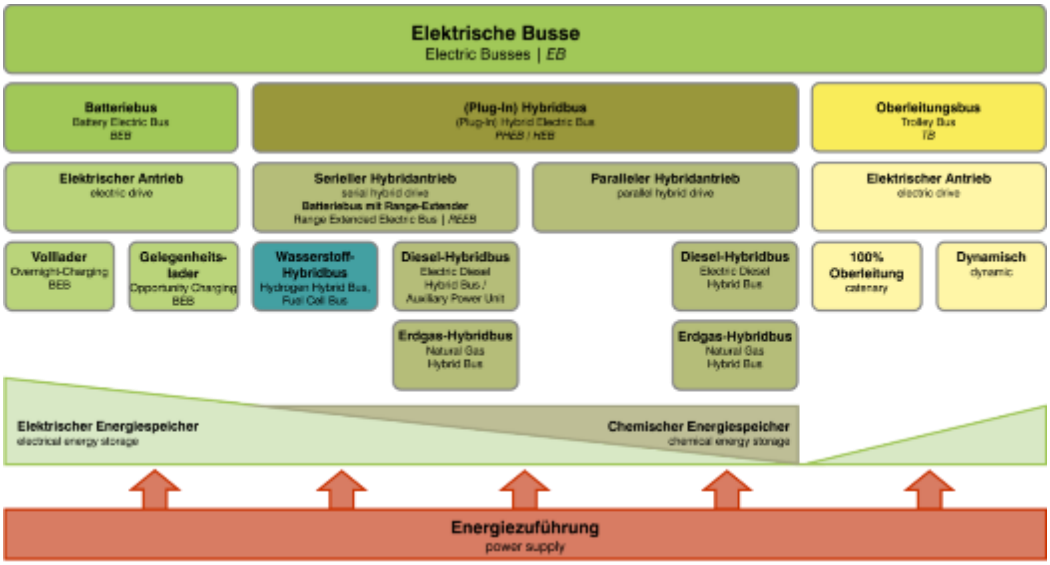


Abbildung 3: Konfigurationsmöglichkeiten Elektrobus

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

Ein Hybridbus (engl. Hybrid Electric Bus, HEB) ist mit mehreren Antriebssystemen ausgestattet, d. h. es werden elektrische und nicht-elektrische Antriebs- und Energiesysteme in einem Fahrzeug vereint. Sobald der elektrische Energiespeicher über das stationäre Energienetz aufgeladen werden kann, spricht man von einem Plug-In Hybridbus (engl. Plug-In Hybrid Electric Bus, PHEB). Nur diese am Energienetz aufladbaren PHEBs zählen in (förder-)politischer Lesart zu den Elektrofahrzeugen.

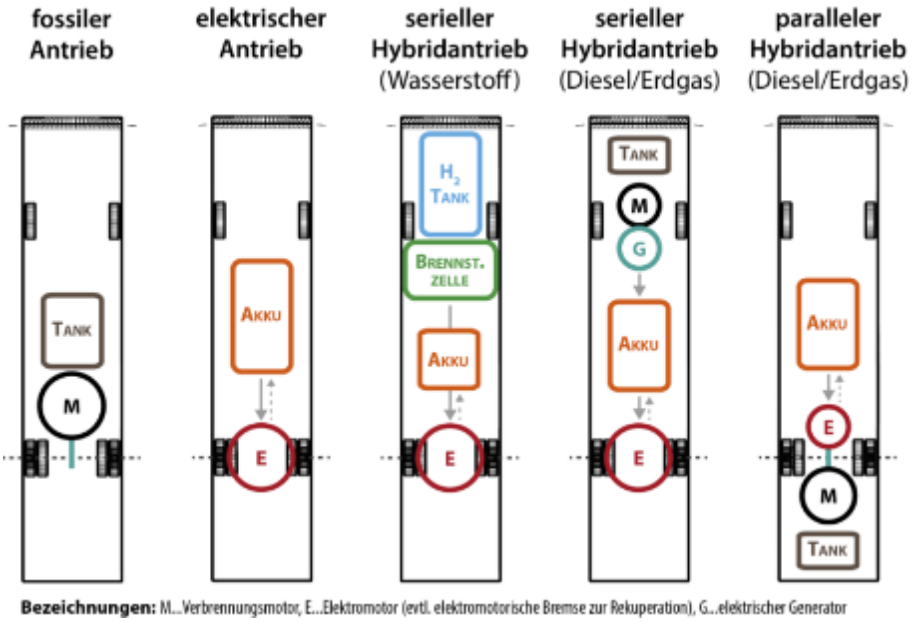


Abbildung 4: Antriebskonzepte

Der Hybridbus kann je nach Anforderungsprofil mit parallelem oder seriellem Antrieb konzipiert werden. In Abbildung 3 werden die verschiedenen Antriebskonzepte schematisch dargestellt. Wird im seriellen Hybridantrieb der Elektromotor als primärer Antrieb eingesetzt und das nicht-elektrische Energiesystem deutlich kleiner dimensioniert, spricht man populärwissenschaftlich von einem Reichweitenverlängerer (engl. Range-Extender).

Oberleitungsbusse (engl. Trolley Bus, TB) werden bezüglich ihrer Bauart und der Möglichkeit zur dynamischen Energiezuführung gesondert kategorisiert. Die Busse beziehen die benötigte Antriebsenergie über eine durchgängige oder partielle Oberleitung. Die Energiezuführung erfolgt dynamisch, also während der Fahrt, und nur bei der partiellen Oberleitung auf Teilstrecken aus einer entsprechend (gering) dimensionierten Batterie. Durch die baulich festgesetzte Lage der Oberleitungen sind Abweichungen vom regulären Streckenverlauf nur beschränkt möglich.

Im praktischen Umfeld haben sich die Rückgewinnung der Bremsenergie (Rekuperation) und die daraus resultierende dynamische Ladung des elektrischen Energiespeichers als günstig erwiesen und kommen daher in Elektrischen Bussen vermehrt zum Einsatz. Diese Art der Leistungsverzweigung dient der Effizienzsteigerung und Reichweitenoptimierung. Rekuperationsraten von 75% der abgerufenen kinetischen Energie sind unter Optimalbedingungen realisierbar.

Bei Batteriebussen (BEB) wird die Reichweite grundsätzlich durch die zur Verfügung stehende elektrische Energiespeicherkapazität bestimmt. Entsprechend der Liniencharakteristik (Umlauflänge, Einsatzzeit, Topographie, Fahrcharakteristik etc.) werden das Betriebskonzept und die Ladestrategie definiert. Einen weiteren signifikanten Einfluss auf die Energiebilanz haben Nebenaggregate, wie beispielsweise elektrische Klimatisierung. Um

die Busse hinsichtlich Ihres Ladekonzepts vergleichen zu können, werden solche Systementscheidungen im Folgenden nicht betrachtet.

Batteriebusse werden entsprechend der Ladestrategie und somit der Batteriekapazität wie folgt kategorisiert:

- Volllader (engl. Overnight Charging BEB)
- Gelegenheitslader (engl. Opportunity Charging BEB)

4.1.1.1 Volllader (Overnight-Charger)

Ist die Kapazität des Energiespeichers im Fahrzeug für einen ganzen Tageseinsatz ausgelegt, so handelt es sich um einen Volllader. Die Nachladung der im Vergleich zum Gelegenheitslader größeren Energiespeicher erfolgt an zentralen Punkten während der Betriebspause, vorzugsweise im Betriebshof. Bei zeitgleicher Ladung von mehreren Bussen an einem Ort ist eine entsprechende Anzahl von Ladepunkten vorzusehen. Die Auslegung der Ladepunkte ist abhängig von der Batteriekapazität und der möglichen Nachladeleistung innerhalb eines Zeitintervalls. Diese Parameter bestimmen das Betriebskonzept.

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

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

In Einzelfällen ist es möglich, auch beim Volllader eine Zwischenladung während des Einsatztages zu realisieren um die Reichweite zu optimieren oder die Netzlast während der Nachtladung zu reduzieren. Eine solche Zwischenladung mit geringer Ladeleistung kann beispielsweise bei längeren Betriebspausen im Betriebshof oder an den Wendepunkten erfolgen.

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

4.1.1.2 Gelegenheitslader (Opportunity-Charger)

Der Gelegenheitslader verfügt über einen kleineren Energiespeicher, welcher nicht für einen kompletten Tageseinsatz ausgelegt ist. Der Energiespeicher muss während des Linieneinsatzes auf der Strecke nachgeladen werden. Im Gegensatz zum Volllader mit

Zwischenladung kommen beim Gelegenheitslader hohe Ladeleistungen und oft auch ein eigens hierfür vorgesehenes Ladesystem (z. B. Docking Station) zur Anwendung.

Die Ladestrategie sieht entsprechend der Streckencharakteristik neben einer Nachladung auf dem Betriebshof weitere Ladepunkte an Wendepunkten vor. Zusätzlich können ausgewählte Haltestellen mit längerer Haltezeit als Ladepunkte mit hoher Nachladeleistung ausgelegt werden.

Der Einsatz kleinerer Energiespeicher wirkt sich in mehreren Aspekten positiv auf das Gesamtfahrzeug aus: Kleinere Energiespeicher haben ein geringeres Gewicht, nehmen weniger Bauraum in Anspruch und sind kostengünstiger in der Anschaffung. Für 1 kWh Batteriekapazität sind bis zu 10 kg Batteriegewicht einschließlich Batteriemanagement anzusetzen.

Im Ergebnis bieten die Opportunity-Charging-Batteriebusse ein höheres Platz- und Gewichtspotenzial für die Personenbeförderung sowie für den Verbau weiterer Aggregate.

Der Batteriebus fährt einen Ladepunkt an, der an einer (End-) Haltestelle eingerichtet ist. Sobald das Fahrzeug am Ladesystem positioniert ist, wird automatisch oder durch eine Aktion des Fahrpersonals die Kontaktherstellung ausgelöst und anschließend die Energieübertragung gestartet.

Durch die hohen Ladeleistungen werden herkömmliche Akkumulatoren stärker beansprucht, was sich u. a. negativ auf die Lebensdauer des elektrischen Energiespeichers auswirken kann. Aufgrund der Möglichkeit zur Gelegenheitsladung ist es dafür nicht notwendig, wie beim Overnight Charging Konzept große, kostenintensive und schwere Energiespeicher im Fahrzeug mitzuführen.

4.1.1.3 Oberleitungsbusse mit Energiespeicher („HO-Bus“)

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

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

Dabei können unter Umständen komplexe und dadurch kostenintensive Infrastrukturelemente wie Weichen, Kreuzungen oder Kurvenkonstruktionen reduziert und städtebaulich

sensible Bereiche vom Oberleitungsnetz ausgespart werden. Der Einsatzradius des oberleitungsfreien Fahrens ist abhängig von der Kapazität des Energiespeichers.

4.1.2 Elektrische Energiespeicher

Energiespeicher sind hochkomplexe Bauteile, die heute in vielen technischen Geräten verwendet werden. Obwohl sie scheinbar problemlos enorme Leistungen bereitstellen können, sind ihre Anwendungsgebiete an bestimmte Randbedingungen geknüpft. Das für den Elektrobus vorgesehene Einsatzkonzept sowie die darin verwendete Ladestrategie haben wesentlichen Einfluss auf die Art und den Typ des Energiespeichers. Entsprechend dem gegenwärtigen Diskurs zur Elektromobilität werden im Folgenden die Begriffe „Batterie“ und „Akkumulator“ synonym verwendet. Die Bezeichnung von wieder aufladbaren Energiespeichern als „Batterie“ hat sich trotz der gewissen begrifflichen Unschärfe als Konsens auch im wissenschaftlichen Umfeld etabliert.

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

Für den Einsatz von Elektrobussen werden derzeit vorwiegend elektrische Energiespeicher zweier unterschiedlicher chemischer Zusammensetzungen verwendet: einerseits Lithium-Titanat-Oxid-Akkumulatoren (LTO) und andererseits Lithium-Eisenphosphat-Oxid-Akkumulatoren ($LiFePO_4$). LTO- basierende Speicher weisen eine Leistungsdichte von bis zu 4000 W/kg und eine Energiedichte von bis 90 Wh/kg auf. Bei der $LiFePO_4$-basierenden Technologie verringert sich die Leistungsdichte auf ca. 3000 W/kg. Dafür kann eine Energiedichte von bis zu 110 Wh/kg erreicht werden. Beide Energiespeicherarten können als Hochleistungsbatterie oder als Hochenergiebatterie produziert werden.

Hochleistungsbatterien sind dadurch gekennzeichnet, dass sie bei der Nachladung innerhalb einer kurzen Zeitspanne eine hohe Energiemenge aufnehmen können, ohne dass ein überproportionaler Alterungsprozess einsetzt. Dieser Typ des Energiespeichers ist daher besonders für den Einsatz in Hybrid- und Brennstoffzellenbussen bzw. Elektrobussen in Verbindung mit der Gelegenheits-Ladestrategie geeignet. Aufgrund höherer technischer Anforderungen ist der Durchschnittspreis je Kilowattstunde größer als der einer Hochenergiebatterie.

Hochenergiebatterien eignen sich besonders für den Einsatz von Elektrobussen mit der Voll-Ladestrategie. Sie werden mit einer moderaten Ladeleistung geladen, um eine überproportionale Alterung zu vermeiden. Daher ist dieser Typ des Energiespeichers kostengünstiger als eine Hochleistungsbatterie.

4.1.3 Infrastruktur

Folgende Technologien zur Energiezuführung bei Elektrobussen werden erläutert, bewertet und gegenübergestellt:

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

Die stationäre Ladung umfasst alle elektrischen Energiezuführungsarten, bei denen ein elektrischer Bus im Stillstand geladen wird, wohingegen bei dynamischen Ladeverfahren die Lade- und Antriebsenergie während der Fahrt bereitgestellt wird.

Die Möglichkeiten der elektrischen Energiezuführung zum Nachladen von elektrischen Bussen werden nachfolgend in Abbildung 4 dargestellt.

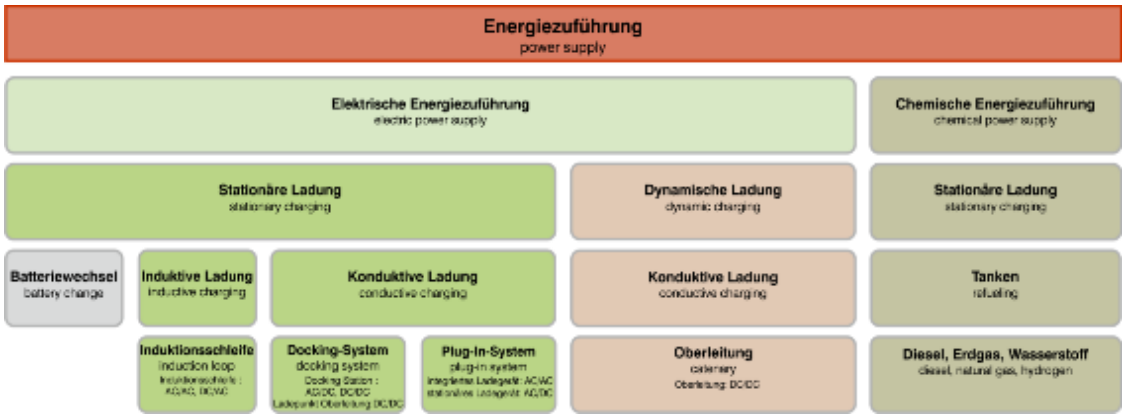


Abbildung 5: Möglichkeiten der Energiezuführung

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

Es wird zwischen folgenden Ladesystemen unterschieden:

- Docking System
- Ladepunkt Oberleitung
- Plug-In System
- Fahrzeugseitiges Ladegerät
- Stationäres Ladegerät

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

Grundsätzlich werden Energiespeicher mit Gleichspannung nachgeladen. Wird der Ladestrom aus einer Wechselstrom-Quelle (engl. Alternating Current; AC) bezogen, ist dieser für das Laden der Speicher in Gleichstrom (engl. Direct Current; DC) zu wandeln. Eine Spezifizierung der Ladungsarten wird in den folgenden Abschnitten vorgenommen.

Umfang und Dauer des Nachladens sind abhängig von:

- den Abständen zwischen den einzelnen Ladestationen,
- der Verweildauer an der Ladestation,
- der Höhe des Ladestroms,
- der Größe des Energiespeichers,
- der Entladungstiefe des Energiespeichers,
- dem Alter des Energiespeichers und
- der Außentemperatur.

Mit Hilfe des ermittelten Energie- und Leistungsbedarfs werden die notwendigen Energiespeichergrößen in den Bussen sowie die Ladeinfrastruktur überschlägig dimensioniert. Als Bewertungskriterien sind folgende Faktoren einzubeziehen:

- Technische Umsetzbarkeit
- Realisierbarkeit im vorgesehenen Projektzeitraum
- Energieeffizienz
- Kosten

Um eine Systementscheidung treffen zu können, sind die genannten Faktoren im Kontext mit den betrieblichen Anforderungen des jeweiligen Einsatzszenarios zu bewerten.

Die Entscheidung über die Nachladestrategie hat erhebliche Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit des Systems in Verbindung mit der Attraktivität der Verkehrsdurchführung und der Einsatzstabilität.

4.1.3.1 Docking Station (stationär, konduktiv)

Stationäre, konduktive Energiezuführungssysteme dienen ausschließlich dem Laden der Energiespeicher im Fahrzeugstillstand. Dazu können große Leistungen zwischen wegseitiger Ladeeinrichtung und fahrzeugseitigem Energiespeichersystem übertragen werden.

Bei stationärer, konduktiver Energiezuführung mittels Docking Station wird der fahrzeugseitige Energiespeicher an punktuell im Linienverlauf installierten Ladestationen nachgeladen. Das Nachladen erfolgt auf der Strecke während planmäßiger Fahrzeugstopps an Wendepunkten und/oder Haltestellen. Hier spricht man von Gelegenheitsladung (Opportunity Charging).

Das Spannungs- und Leistungsniveau ist nicht vorgegeben und richtet sich nach dem jeweiligen Anwendungsfall. Im Allgemeinen liegen die Spannungsparameter im Bereich von 600 V bis 900 V und mehreren hundert Kilowatt Ladeleistung.

Im Weiteren wird der Begriff „Docking Station“ als Synonym für stationäre, konduktive Energiezuführungssysteme verwendet (vgl. Abbildung 6).

Je nach Kopplungsrichtung wird zwischen folgenden Ausführungsvarianten unterschieden:

- Hub-Docking Station (Stromabnehmer zur Kontaktherstellung auf dem Fahrzeugdach)
- Seiten-Docking Station (Stromabnehmer zur Kontaktherstellung an der Ladestation, Kontaktherstellung auf der Fahrzeugseite)
- Senk-Docking Station (Stromabnehmer zur Kontaktherstellung an der Ladestation)

Hub-Docking Station
im Projekt SEB Dresden

Seiten-Docking Station
im Projekt SEB Münster

Senk-Docking Station
im Projekt Hamburg

Abbildung 6: Docking Station Systeme[1]

Die Ladung per Docking Station erfolgt mit einer hohen Leistungsübertragung. Aufgrund der großen Anschlussleistung kann das übergeordnete Energienetz unzulässig hoch belastet werden, sodass in diesem Fall ein zusätzlicher Zwischenspeicher am Ladestandort erforderlich wäre.

Docking Systeme sind mit einer Sicherheitsfunktion ausgerüstet. Durch die vier Kontakte – PE, Plus, Minus, Control-Pilot – mit gesicherter Einhaltung der Kontaktreihenfolge sind Gefährdungen ausgeschlossen. Der Control-Pilot erkennt die ordnungsgemäße Kontaktherstellung und fordert die Nachladung an. Über den PE-Kontakt (Schutzleiter) erfolgen im Fehlerfall die Schutzerdung der Anlage und die automatische Abschaltung der Energieversorgung.

Das Ladesystem (Docking Station) ist in erster Linie durch die Fähigkeit gekennzeichnet, einen Ladevorgang mit hoher Ladeleistung vollautomatisch und in kürzester Zeit durchzuführen.

Folgende Vorteile bietet der Einsatz von Docking Station Systemen:

- Durch planbare Zwischenladungen an den Nachladepunkten können die notwendige Batteriekapazität und damit die Fahrzeugkosten deutlich verringert werden.
- Die Autonomie der Fahrzeuge wird nur in geringem Umfang beschränkt.

[1] Bildquellen | Fraunhofer IVI, VCDB, Wikipedia/Creative Commons (v. l. n. r.)

- Ein sicherer Betrieb ist gewährleistet, Gefährdungen für Mensch und Material bei der Energieübertragung können ausgeschlossen werden. Es sind keine Einschränkungen bei der Fahrgastbeförderung zu erwarten.
- Zusätzliches Personal oder besondere Kenntnisse in der Bedienung sind nicht nötig.
- Mögliche Abweichungen in der Halteposition des Busses und Fahrzeugabsenkungen (engl. Kneeling) können teilweise durch die Docking Station ausgeglichen werden.
- Das System ist gegenüber jahreszeitlich bedingten Witterungsbedingungen robust und daher ganzjährig, ohne weitere Vorkehrungsmaßnahmen einsetzbar.

Beim Einsatz von Docking Stationen sind jedoch folgende einschränkende Aspekte zu berücksichtigen:

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

Der zusätzlich notwendige Investitionsaufwand in die Ladeinfrastruktur führt zu verhältnismäßig hohen Gesamtsystemkosten. Da jedoch eine Docking Station in der Regel durch mehrere Busse auf einer Linie genutzt werden kann, verringert sich der Kostenanteil der Ladeinfrastruktur pro Bus zugunsten der Gesamtsystemkosten. Hinzu kommt der geringere Investitionsbedarf für den Einsatz kleiner dimensionierter Batterien im Fahrzeug.

Bei der Einbindung von Straßenbahn-Unterwerken ist ein zusätzlicher Investitionsaufwand zu erwarten. Es ist der Einsatz eines Wandlers notwendig, der die vom Unterwerk ausgehenden Spannungen (bis 1.400 V) auf die Spannungsebene der Ladestation (bis 750 V) reguliert und die Vermeidung von Kurzschlussströmen entsprechend der DIN VDE 100 sicherstellt. Für eine potentialfreie Verbindung der unterschiedlichen Energiekreise ist eine galvanische Trennung vorzusehen.

Eine direkte Anbindung an das 400-V-Netz ist hier die wirtschaftlichere Variante. Sollten entsprechende Leitungswege aus dem Ortsnetz für die Nachladestationen fehlen, bzw. die zusätzliche Leistung nicht gesichert sein, kann auch eine Anbindung der Ladestation an die Oberleitung der Straßenbahn wirtschaftlich darstellbar sein, sofern die Zuleitungswege deutlich kürzer sind.

Für die Ladung in der Betriebspause ist in jedem Fall eine zusätzliche Lademöglichkeit im Betriebshof vorzusehen.

4.1.3.2 Fahrzeugseitiges Ladegerät (Plug-In System / stationär, konduktiv)

Bei der Plug-In-Ladung befindet sich das Ladegerät als Kopplung zwischen Netzanschluss und fahrzeugseitigem Energiespeicher im Fahrzeug. Über das Ladekabel wird ein infrastrukturunabhängiger Netzzugang gewährleistet.

Zum konduktiven Laden des Energiespeichers eines Elektrofahrzeuges wurden durch die International Electrotechnical Commission in der Norm IEC 62196 die Lademodi AC/AC-Ladung inklusive der zugehörigen Steckverbinder definiert:

Mode 1 beschreibt das Laden unter Nutzung einer konventionellen, einphasigen 230-V-AC-Haushaltssteckdose (Schuko/CEE). Diese Anschlüsse sind im Allgemeinen mit 16 A abgesichert und stellen so eine maximale Ladeleistung von rund 3,7 kW zur Verfügung. Dieser Mode stellt nach vorherrschender Meinung selbst für den PKW-Bereich nur eine Notlösung dar, da zum einen die Ladezeiten sehr hoch und die Ladewirkungsgrade sehr niedrig (50 – 80 %) sind. Im ÖPNV findet er keine Verwendung.

Im Mode 2 unterteilt sich das Laden in das einphasige Laden an der Haushaltssteckdose mit 3,7 kW, wie in Mode 1, allerdings mit eigener Absicherung und Kommunikation (ICCB), und das 3-phasige Laden am CEE-Anschluss mit 32 A und 22 kW. Wie bei Mode 1 ist auch hier das Ladegerät mobil im Fahrzeug verbaut. Die Verbindung erfolgt durch ein Ladekabel mit AC-Anschluss (vgl. Abbildung 7).

Abbildung 7: Ladekabel AC-Ladung (Mode 2)[2]

Mode-3-Laden beschreibt das Wechselstromladen an Ladesäulen, bei denen Kommunikations- und Schutzmodule fest integriert sind. Es wird weiterhin ein fahrzeugseitiges Ladegerät genutzt. Der Ladestrom ist auf 63 A begrenzt, es ergibt sich eine Ladeleistung von 44 kW (vgl. Abbildung 8).

[2] Bildquelle | http://www.emfm.de/ladestationen/ladekabel/

Abbildung 8: Ladekabel AC-Ladung (Mode 3)[3]

Die an ein Kabel gebundene konduktive Lademöglichkeit stellt technisch eine einfache Lösung dar. Durch die Integration des Ladegeräts in das Fahrzeug können die Infrastrukturkosten reduziert werden. Ein fahrzeugseitig vorgesehenes Ladegerät führt jedoch zur Erhöhung des Fahrzeuggesamtgewichts.

Das AC-Ladesystem ist für den Betrieb von Elektrobussen aufgrund geringer Ladeleistungen nicht zweckmäßig und wird daher nicht weiter betrachtet.

Sofern ein Elektrobus über einen Anschluss an das 400-V-AC-Bordnetz verfügt, ist es möglich, diese Verbindung für Wartungs- und Instandhaltungszwecke zu nutzen.

4.1.3.3 Externes Ladegerät (Plug-In System / stationär, konduktiv)

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

Mode 4 definiert das Laden mit Gleichstrom. Dieser wird von stationär installierten Gleichrichtern bereitgestellt, ein Ladegerät im Fahrzeug ist nicht notwendig. Die genaue Ladespannung hängt von der zulässigen Spannung des zu ladenden Energiespeichers und den an die Ladesäule übermittelten Zustandsdaten (z. B. SOC) ab und liegt damit üblicherweise im Bereich von etwa 400 V bis 800 V.

[3] Bildquelle | http://www.emfm.de/ladestationen/ladekabel/

Abbildung 9: Combo-Stecker Typ CCS 850 V

Es wird zwischen zwei Ladevarianten unterschieden:

- Die DC-low-Ladung erfolgt fahrzeugseitig über eine Typ-2-Kabelverbindung; die maximale Ladeleistung beträgt 38 kW.
- Die DC-high-Ladung nutzt in Europa die Ladeschnittstelle Combo Typ 2 (auch CCS genannt) mit zwei zusätzlichen DC-Kontakten. Perspektivisch sollen mit dem CCS-Standard bis zu 350 kW übertragen werden können (vgl. Abbildung 10).

Das AC/DC-Ladesystem wird grundsätzlich für das Laden in der Betriebsruhe, d. h. für das sogenannte Overnight Charging, verwendet. Die Ladezeit wird durch die Ladeleistung und die Ladekapazität der einzelnen Batterien bestimmt.

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

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

Der Einsatz von Plug-In Systemen erfordert im Vergleich zu Docking Station Systemen einen höheren Zeitaufwand (manuelles Einstecken des Ladekabels durch den Fahrer). Dies kann die Akzeptanz seitens des Fahrpersonals negativ beeinflussen.

Die Investitionskosten für die Ladesäule können unter Umständen. anteilig auf mehrere Elektrobusse umgelegt werden, da eine Ladesäule bei einer intelligenten Ladestrategie für das Nachladen mehrerer Fahrzeuge genutzt werden kann.

Stationäre Ladegeräte sollten als Rückfallebene für das Docking Station System vorgesehen werden. Die Auswahl der Ladung über Mode 3 oder Mode 4 erfolgt im Kontext mit der Fahrzeugauswahl und dem integrierten Ladekonzept.

Die stationäre Ladesäule ist flexibel einsetzbar und kann als Rückfallebene für andere Ladesysteme oder andere Einsatzgebiete dienen.

Namenhafte Hersteller von E-Bussen und Ladesysteme haben sich auf CCS als zukünftigen Standard für das Laden per Kabel geeinigt. Ab 2018 wird die Version 2.0 mit mehr Features eingeführt. Damit ist eine Ladeleistung bis 350 kW möglich, es erfolgt eine automatische Authentifizierung („PnC“ Plug and Charge) und eine intelligente Leistungsbegrenzung.

Das CCS – Datenaustauschsignal basiert auf einem Analogsignal mit einer aufmodulierten Pulsfolge (Pulsweitenmodulation = PWM-Signal). Es werden u. a. die zur Verfügung stehende Ladeleistung und die benötigte Ladeleistung ausgetauscht und der Ladestrom entsprechend eingestellt.

Abbildung 10: CCS Stecksystem

4.1.3.4 Oberleitung (dynamisch, konduktiv)

Unter der dynamischen, konduktiven Energiezuführung ist leitungsgebundenes Laden während der Fahrt zu verstehen. Das Energieübertragungssystem entspricht der Funktionsweise eines Oberleitungsbusses (O-Bus). Die Energie wird über die Fahrleitung (Oberleitung) als Energiequelle durch die fahrzeugseitigen Stangenstromabnehmer übertragen (vgl. Abbildung 11). Für die Stromabnahme werden zwei Fahrdrähte (Plus und Minus) benötigt.

Die Elektrobusse beziehen ihre Energie zum Nachladen des Energiespeichers aus der abschnittsweise installierten Oberleitung. Während der Fahrt unter der Oberleitung gelten diese Fahrzeuge nicht als Batteriebusse, sondern als Oberleitungsbusse und wurden deshalb gesondert kategorisiert.

Pantograph Stangenstromabnehmer angedrahtet

Dachgeräte

Abbildung 11: Stangenstromabnehmer bei Oberleitungsbussen[4]

Die Oberleitungsanlage muss sowohl der elektrischen als auch der mechanischen Beanspruchung standhalten.

Das Kriterium für die elektrische Beanspruchung ist die elektrische Leistung. Moderne Fahrzeuge mit einer hohen Traktionsleistung und hohem Beschleunigungsvermögen erfordern auch eine hohe elektrische Leistungsabgabe.

Hohe Leistungsübertragungen von der Oberleitung auf das Fahrzeug haben eine starke Erhitzung des Fahrdrahtes zur Folge, die bis zur Zerstörung des Systems führen kann. Aufgrund einer drohenden Überhitzung des Fahrdrahts ist ein Nachladen bei niedrigen Geschwindigkeiten nur mit geringer Leistung möglich. Die Leistungsaufnahme ist somit abhängig vom Geschwindigkeitsprofil des Fahrzeugs. Beispielsweise wird im Geschwindigkeitsband von 0 bis 30 km/h die externe Energiezuführung hauptsächlich für den Beschleunigungsvorgang des Fahrzeugs benötigt. Aufgrund der maximal zulässigen Leistungsübertragung zwischen Oberleitung und Fahrzeug kann während des Anfahrvorgangs also nur eine geringe Leistung für das Nachladen des Energiespeichers genutzt werden.

Die durch die Oberleitung bereitgestellte Energie wird vorrangig für das Fahren genutzt. Die während des Fahrvorgangs abgeforderten Leistungsspitzen können durch Hochleistungskondensatoren (SuperCaps) ausgeglichen werden, die neben dem Batteriespeicher als zusätzliche Energiequelle dienen (Kombispeicher) – jedoch erneut unter Erhöhung des Fahrzeugleergewichts. Der Batteriespeicher wird kontinuierlich während der Fahrt unter der Oberleitung nachgeladen. Der notwendige Ladestrom wird über das Energiemanagementsystem im Fahrzeug festgelegt.

Die begrenzten Stromstärken, die für das Nachladen des Energiespeichers zur Verfügung stehen, beeinflussen die Ladezeit und somit die erforderliche Dauer des Fahrens unter der Fahrleitung. Als pauschale Annäherung kann ein Verhältnis von 2:1 für das Fahren

4 Bildquelle | VCDB GmbH

unter Oberleitung zum leitungsunabhängigen Fahren angesetzt werden, wobei die genaue Relation immer von den örtlichen Bedingungen abhängt.

Für die mechanische Belastbarkeit der Oberleitung gelten folgende Anforderungen: Eine Nutzung der Oberleitungsanlage der Straßenbahn ist nur dann möglich, wenn diese auch für O-Busse ausgelegt ist. Dabei ist neben den oben genannten Anforderungen folgendes zu beachten:

- Die Aufnahme des Fahrdrahtes ist so zu ändern, dass die Schleifschuhe der O-Bus-Stangenstromabnehmer den Fahrdraht ohne Beschädigung umschließen können. Dies ist bei üblichen Straßenbahn-Fahrleitungsanlagen nicht gegeben, da Straßenbahnpantographen den Kontakt mit einem Schleifstück ohne Umfassen der Fahrleitung herstellen. Aktuell laufen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten eines geraden Schleifstücks, die sich jedoch noch in einem frühen Technologiereifestadium befinden.

Es ist ein zweiter Fahrdraht für die Rückleitung erforderlich. Bei Straßenbahnen erfolgt die Rückleitung über die Schiene. Sofern die Strecke auch weiterhin durch die Straßenbahn befahren werden soll, stellt die Doppelnutzung aufgrund der bestehenden Kurzschlussgefahr eine besondere Herausforderung dar.

Der Einsatz von Batteriebussen mit dynamischer, konduktiver Nachladung macht den Neubau einer Fahrleitungsanlage notwendig. Um eine circa 5 km lange Oberleitungsanlage zu errichten und den Anschluss an ein bestehendes Unterwerk herzustellen, sind Investitionen in Höhe von rund 4 Millionen Euro zu erwarten.

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

4.1.3.5 Ladepunkt Oberleitung (stationär, konduktiv)

Bei der DC-Ladung wird der Ladestrom direkt von einer Gleichstrom-Quelle in das Fahrzeug übertragen. Dies erfolgt über die Einbindung der Straßenbahnunterwerke bzw. über einen Abzweig von der Straßenbahnfahrleitung mittels Mast-Trennschalter. Physisch wird die Ladestation als Oberleitung mit zwei Fahrleitungen für Plus und Minus ausgeführt.

Um die thermische Belastung der mit hohen Strömen beanspruchten Komponenten gering zu halten (etwa Überhitzungen der Fahrleitung und des Kontaktsystems am Fahrzeug), wird der Ladestrom begrenzt. In einem Anwendungsfall in Wien wurde der Ladestrom für das Laden der Busse an der Haltestelle beispielsweise auf 90 A beschränkt.

Die DC-Ladung erfordert kein infrastrukturseitiges Ladegerät, stattdessen ist dieses im Fahrzeug verbaut.

Da bei der zweipoligen DC-Ladung kein Schutzkontakt vorhanden ist, muss das Fahrzeug, wie bei Oberleitungsbussen üblich, doppelt isoliert werden.

Die Energieübertragung zwischen Fahrleitung und Fahrzeug erfolgt über einen adaptierten Stromabnehmer, nach Straßenbahn-Baumuster. Zur Minimierung des Gefährdungspotentials, wurde der Stromabnehmer mit einer zusätzlichen Erdung ausgestattet (vgl. Abbildung 12). Bei diesem Stromabnehmer sind die Kontakte (Positiv, Negativ, Erdung) voneinander isoliert. Ein Control-Pilot, der die richtige Reihenfolge der Kontaktherstellung überwacht, ist hier nicht notwendig.

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

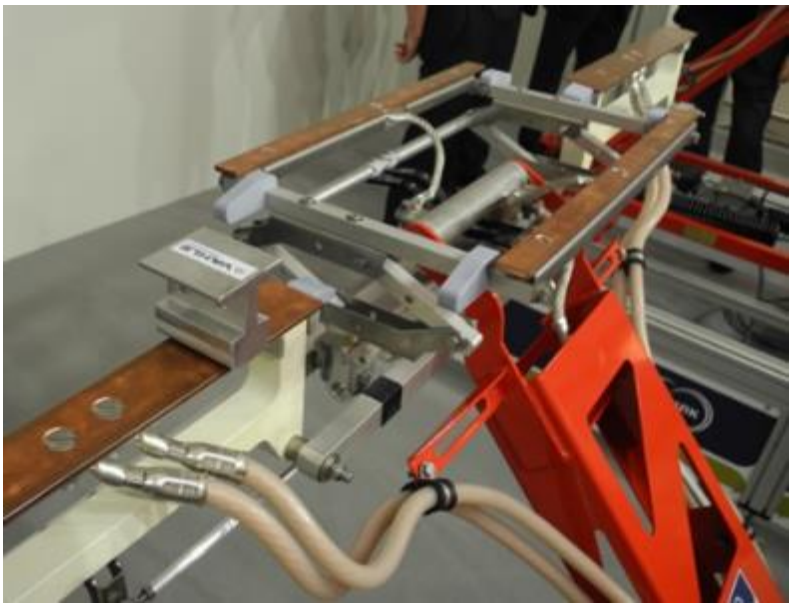


Abbildung 12: Stromabnehmer E-Bus der Firma Schunk[5]

Das DC-Ladesystem ist aufgrund der vergleichsweise geringen Ladeleistung von bis zu 100 kW nur bedingt für die Gelegenheitsladung an Unterwegshaltestellen einsetzbar. Anstelle eines externen Ladegerätes wird im Fahrzeug zusätzlich ein Umrichter benötigt, der das Spannungsniveau des Betriebssystems reguliert. Weiterhin sind eine galvanische Trennung zur potentialfreien Verbindung sowie eine doppelte Isolierung am Fahrzeug vorzusehen.

Die zusätzlich benötigten elektrischen Einbauten im Fahrzeug sowie gegebenenfalls ein größerer Energiespeicher erhöhen die Fahrzeugkosten.

5 Bildquelle | VCDB GmbH

Die DC-Ladung stellt eine Alternative zur AC/DC-Ladung dar. Voraussetzung ist, dass die Ladestandorte die spezifischen Anforderungen der DC-Ladung erfüllen. DC-Ladesysteme können an Ladestandorten eingesetzt werden, an denen ausreichend Ladezeit zur Verfügung steht, beispielsweise zur Ladung nach Betriebsschluss, oder an Ladestandorten, an denen nur eine geringe Energiemenge nachgeladen werden muss.

4.2 Vorgehensweise

Die Analyse der städtischen Busnetze in den beteiligten Partnerstädten Marburg und Trier bildet die empirische Grundlage für die Machbarkeitsuntersuchung von HO-Bus-Systemen und deren Übertragbarkeit in weitere Städte.

Die Analyse erfolgte in zwei Stufen. Zunächst wurden die gesamten Liniennetze von Marburg und Trier (in diesem Berichtsteil für Marburg dargestellt) betrachtet und potentiell geeignete Linien für den Einsatz von HO-Bussen identifiziert. Im zweiten Schritt wurde diese ausgewählte Linie bzw. Linienkombination in hohem Detaillierungsgrad untersucht, um konkrete Aussagen über die technische und betriebliche Machbarkeit treffen zu können. Mit dem von der VCDB entwickelten Planungs- und Bewertungstool BeSystO® wurde eine Energiebilanzierung durchgeführt und das HO-Bus-System sowie die batterieelektrischen Varianten mit allen technischen und infrastrukturellen Komponenten so ausgelegt, dass der gegenwärtige Betrieb weitestgehend unverändert mit den alternativen Technologien durchgeführt werden kann.

Bei der durchgeführten Analyse handelt es sich um eine rein rechnerische Simulation zur grundsätzlichen Bewertung der Machbarkeit und zur Erlangung von Größenordnungen für die Systemauslegung, die im konkreten Realisierungsfall auf Basis exakt vorgegebener Systemparameter im Rahmen einer Gesamtsystemsimulation zu verifizieren wären.

Für Marburg (und Trier) wurden ausschließlich Gelenkbusse (18 m) untersucht.

4.2.1 Liniennetzanalyse und Linienauswahl

Bei der Analyse des Liniennetzes sind im Wesentlichen drei Faktoren zu untersuchen:

- Die Struktur des Liniennetzes
- Die Topographie und Struktur der Linienwege
- Die verkehrliche Funktion und Verkehrsnachfrage der Linie

Die Struktur des Liniennetzes umfasst die Linienverläufe (von/bis) der einzelnen Linien, deren Position innerhalb des Liniennetzes und zueinander sowie parallele Linienverläufe. Auch die Lage von Linienendpunkten, von wichtigen Umsteigepunkten oder die Lage von Betriebsstätten (insbesondere Betriebshof) werden einbezogen. Die Betrachtung des Liniennetzes ist grundsätzlich bei der Analyse von Busnetzen hinsichtlich deren Potentiale für den Elektrobuseinsatz von großer Bedeutung, insbesondere aber bei allen Systemen,

die auf gebaute Infrastruktur im Linienverlauf angewiesen sind. Dies betrifft alle Elektrobussysteme mit der Ladestrategie des Opportunity-Charging (Gelegenheitsladung), weil hier die Ladeinfrastruktur an strategisch sinnvollen Positionen im Netz geplant werden soll (z. B. Linienendpunkte, idealerweise mehrerer Linien oder Haltestellen mit längeren Aufenthaltszeiten). Für HO-Bus-Systeme, die ebenfalls den Opportunity-Chargern zuzurechnen sind, gilt dies in besonderem Umfang, da ihre Ladeinfrastruktur nicht nur an einzelnen Punkten errichtet wird, sondern in Form der (partiellen) Oberleitung das virtuelle Liniennetz physisch nachzeichnet. Vor diesem Hintergrund eignen sich insbesondere Linien, die teilweise parallel mit weiteren Linien verkehren (beispielsweise Stammstrecken im Stadtzentrum), die später ebenfalls auf HO-Bus-Betrieb umgestellt werden können und so die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems erhöhen.

Für eine erste strukturelle Einordnung des Liniennetzes lässt sich der schematisierte Liniennetzplan heranziehen. Er erlaubt erste Rückschlüsse auf die Netzstruktur und die Linienverläufe. Für ein detaillierteres Bild ist jedoch eine topographische Darstellung des Liniennetzes erforderlich. Auf dieser Basis lassen sich Aussagen zu den exakten Längen der Linienwege, zu deren Topographie (insbesondere Gefälle und Steigungen) und zu den Haltestellenabständen (→ Häufigkeit von Brems- und Anfahrvorgängen, Haltezeiten) treffen, die wiederum eine erste Einordnung zur Eignung als Elektro- bzw. HO-Bus-Linie erlauben.

Nicht zuletzt sind die einzelnen Linien des Liniennetzes bezüglich ihrer verkehrlichen Funktion und ihrer Verkehrsnachfrage zu bewerten. Dies ist aus zwei zentralen Gründen wichtig: Zum einen eignen sich HO-Bus-Linien insbesondere für stark ausgelastete und mithin energieintensive Linien, da bei ihnen energetisch besonders anspruchsvolle Streckensegmente mit partiellen Oberleitungen versehen werden können. Gleichzeitig ist zu beachten, dass hohe Anforderungen an die Beförderungskapazität den Spielraum für die Größe (und das Gewicht) der mitgeführten Energiespeichermedien reduzieren. Aus wirtschaftlicher Sicht ist es ebenfalls sinnvoll, neue und mit hohen Investitionskosten einhergehende Technologien auf hoch ausgelasteten und entsprechend ertragreichen Linien mit sehr engen Taktzeiten einzusetzen.

Da in aller Regel nicht davon auszugehen ist, dass ein städtisches Bussystem in kurzer Zeit vollständig auf HO- oder Elektrobusse umgestellt wird, sondern vielmehr eine sukzessive Erschließung über einen längeren Zeitraum erfolgt, ist bei der Auswahl der ersten umzustellenden Linien und der gegebenenfalls mit Oberleitungen und/oder Ladestationen zu elektrifizierenden Streckenabschnitte auf Synergieeffekte für weitere Linien zu achten.

Die Analyse des städtischen Busnetzes in Marburg wurde durch die VCDB auf Basis der beschriebenen Kriterien in enger Zusammenarbeit mit den Stadtwerken Marburg vorgenommen. Die Einbeziehung des lokalen Betreibers ist essentiell, um dessen betriebliche Erfahrungswerte, strategische Aspekte der örtlichen Verkehrssystementwicklung und ggf. lokale Besonderheiten (städtebaulich sensible Bereiche, politische Aspekte etc.) in die

Linienauswahl einfließen zu lassen und eine realitätstaugliche, umsetzbare Planung zu liefern. Bei der Auswahl der Streckenabschnitte mit möglicher Oberleitung wurden bereits im Vorfeld der Betrachtung städtebauliche und verkehrspolitische Auswirkungen betrachtet. Die mögliche Umsetzung wurde mit den Akteuren der Verkehrsbetriebe besprochen. Trotzdem ist die Herangehensweise als Konzeptstudie zu betrachten und stellt keine Vorplanung zur konkreten Umsetzung dar.

4.2.2 Datenerfassung und Evaluation

Sowohl für die Liniennetzanalyse und Linienauswahl als auch insbesondere für die Detailuntersuchung der ausgewählten Linien wurden umfangreiche und detaillierte Daten erfasst und ausgewertet. Berücksichtigt wurden dabei sowohl vorhandene Bestandsdaten der Verkehrsunternehmen als auch eigens für die Machbarkeitsstudie generierte Daten.

Die in die Analyse einbezogenen Daten lassen sich grob in folgende Kategorien unterteilen:

- Liniendaten (Linienverläufe, Liniennetz- und Linienpläne, topographische Linieninformationen)
- Planungsdaten (Fahr- und Umlaufpläne, Kurskarten)
- Messdaten (GPS-basierte Aufnahmen von Fahrtrajektorien der betrachteten Linien)

Über eine standardisierte Eingabemaske des Systems BeSystO® (vgl. folgender Abschnitt 4.2.3) wurden im Rahmen von Interviews mit den SWM weitere betriebliche Parameter aus folgenden Bereichen erfasst:

- Fahrleistungen (Kilometerleistung, Einsatzzeiten)
- Durchschnittliche Besetzungsgrade (zeitlich gestaffelt)
- Durchschnittliche Verspätungslagen (zeitlich gestaffelt)
- Ausstattungsmerkmale Dieselbus (Referenzfahrzeug)
- Ausstattungsmerkmale Elektrobus/HO-Bus (Planfahrzeug)
- Klimafaktoren
- Energieinfrastruktur Strecke und Betriebshof
- Betriebliche Parameter Betriebshof (Abläufe, Zeiten, Services)

Um eine erste Abschätzung zu weiteren Anforderungen im Falle der Projektrealisierung geben zu können, wurden zudem folgende Parameter aufgenommen:

- Werkstattausrüstung
- Personalqualifizierung

Um einen Abgleich der von den Verkehrsbetrieben bereitgestellten Solldaten (Fahr- und Umlaufpläne) sowie der benannten durchschnittlichen Verspätungslagen mit der realen Situation vor Ort vornehmen zu können und die Daten zu verifizieren, wurden über einen Zeitraum von zwei bis drei Wochen Datenlogger auf Linienbussen in Marburg verbaut, die in diesem Zeitraum auf relevanten Umläufen eingesetzt wurden.

4.2.3 Detailuntersuchung einer Linie

Für die Detailuntersuchung der ausgewählten Linien wurde das bereits erwähnte Tool BeSystO® eingesetzt. BeSystO® steht als Akronym für „Bewertungsverfahren für Systeminnovationen im ÖPNV“. Es ist ein von der VCDB entwickeltes Softwaretool, das mittels standardisierter, vorgegebener Rechenalgorithmen und auf Basis projekt- bzw. fallspezifischer Eingangsparameter eine umfassende und multikriterielle Bewertung eines geplanten Einsatzes innovativer Verkehrssysteme im Busbereich ermöglicht. Von der Grundidee ist das Verfahren insofern an die „Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen des öffentlichen Personennahverkehrs“ angelehnt.

BeSystO® umfasst die Module „SOC“ und „TCO“. SOC steht für „State of Charge“ und umfasst die Energiebilanzierung, Systemauslegung (Fahrzeug und Ladeinfrastruktur) und Simulation des innovativen Verkehrssystems. TCO bedeutet „Total Cost of Ownership“ und liefert eine betriebs- und volkswirtschaftliche Bewertung des Elektrobuseinsatzes verglichen mit dem derzeitigen Dieselbus als Referenz. Zudem lassen sich im Rahmen einer gesamtwirtschaftlichen Betrachtung auch ökologische Auswirkungen (z. B. Emissionsreduzierungen und deren Teilmonetarisierung) ausweisen.

Für die technische Machbarkeitsuntersuchung kam das Modul BeSystO® SOC zum Einsatz, die Wirtschaftlichkeits- und Ökologiebetrachtungen erfolgten in BeSystO® TCO (vgl. Abschnitte 4.2.5 und 4.2.6).

Die Detailuntersuchung der Linie stellt die Basis für beide Untersuchungen (technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit) dar. In BeSystO® erfolgt die Simulation eines typischen Betriebstages inklusive aller Einflussfaktoren (Streckentopographie, Verspätungslagen, Zuladung, Einsatz Heizung und Klimatisierung, Prozesse Betriebshof, Linien- und Dienstfahrten) als Worst-Case-Betrachtung. Grundlage dieser Herangehensweise ist der Anspruch, dass das neu auszulegende System in der Lage sein muss, den ungünstigsten Betriebsfall abbilden zu können.

Die Besonderheit von BeSystO® ist die dynamische Verknüpfung aller Eingangsdaten und Rechenoperationen, so dass sich alle Änderungen von einzelnen Parametern sofort im Ergebnis darstellen. Dadurch ist es möglich, sich in iterativer Vorgehensweise dem für den jeweiligen Anwendungsfall geeigneten Optimum zu nähern.

Bei der Detailuntersuchung der Linien bzw. Linienkombinationen in Marburg wurde wie folgt vorgegangen:

- Integration evaluierter Unternehmensdaten
  - Importieren der Evaluationsergebnisse in BeSystO® (Eingabemaske „Eingangsdaten“)
- Aufbereitung Umlaufpläne
  - Analyse, Linienzuordnung, Formatierung
  - Splittung in Streckenabschnitte, Rückkopplung Fahrplanzeiten

- Einfügen in BeSystO® (Eingabemaske „Fahrplan“)

Die von den Verkehrsunternehmen übermittelten Dokumente bzw. Datensätze werden auf Relevanz und Linienbezug überprüft. Die Datenformatierung wird angepasst und die einzelnen Fahrten in Streckenabschnitte gesplittet, sofern mehrere vorgesehene Oberleitungsabschnitte tangiert sind.

- Integration Streckendaten
  - Eingabe von Endhaltestellen (Linienend- und –wechselpunkte)
  - Einfügen weiterer Haltestellen, die Oberleitungsabschnitte begrenzen

Definierte End- und Unterwegshaltestellen fungieren als „Ankerpunkte“ bei der Energiebilanzierung für den Tagesverlauf. Weiterhin markieren sie die Position von punktueller Nachladung im Stand sowie Beginn und Ende von Oberleitungsabschnitten.

- Bewertung der Trassierung
  - Aufbereitung der GPS-Messdaten und Einfügen in die BeSystO®-Eingabemaske Trassierung“
  - Berechnung der Einstufung SORT (Stopps/km, Haltezeitanteil, Durchschnittsgeschwindigkeit)
  - Berechnung der Einstufung TOPO (Höhenprofil, Maxima Steigung und Gefälle)

Die aufbereiteten GPS-Daten werden in das System importiert und analysiert. Es erfolgt eine Kategorisierung in eine von drei Einstufungen SORT (angelehnt an die „Standardised On Road Cycles“ der UITP zur Bewertung von Fahrtverläufen) und TOPO (topographische Bewertung des Linienwegs auf Basis der genannten Parameter). Die SORT- und TOPO-Einstufung führt zu Beaufschlagungen in der Energiebilanzierung.

- Definition Nachladung „Strecke“
  - Berechnung geeigneter Haltestellen für Nachladung im Stand (Anzahl Stopps, Summe Wendezeiten, potentielle Ladezeit pro Halt)
  - Festlegung Ladepunkte und Ladeleistung
  - Festlegung und Definition Oberleitungsabschnitte
  - Definition der möglichen Ladeleistung während der Fahrt pro Oberleitungsabschnitt (zusätzlich zur benötigten Traktionsenergie unter Berücksichtigung der Streckentopographie)

Bei der Technologieoption HO-Bus wird davon ausgegangen, dass während des täglichen Betriebs die Fahrten unter der Oberleitung nicht ausreichen, um die Traktionsenergiespeicher für die oberleitungsfreien Abschnitte ausreichend aufzuladen. Daher werden an geeigneten Haltestellen (also solche, an denen längere Halte-/Wendezeiten auftreten und die im Tagesgang häufig angefahren werden) zusätzlich Schnellladestationen vorgesehen, an denen die HO-Busse über das vorhandene Stangenstromabnehmersystem mit erhöhter Leistung nachladen können. Die an den Ladepunkten der Technologieoption Opportunity-Charger verfügbare Ladeleistung kann höher ausgelegt werden.

- Definition Nachladung „Betriebshof“

- Ermittlung der Grundlagen für die Energiebereitstellung am Betriebshof (insbesondere maximal mögliche Anschlussleistung)
- Energetische Bewertung der fahrzeugbezogenen Prozesse im Betriebshof
- Festlegung der Ladetechnologie und –leistung

Während der nächtlichen Betriebspause werden die Traktionsenergiespeicher der aller untersuchten Elektro- und HO-Busse bis zur zulässigen Obergrenze (SOC_{max}) aufgeladen. Bei HO-Bussen erfolgt diese Nachladung sinnvollerweise über das Oberleitungssystem, bei den anderen Elektrobussen wird ein Plug-In-System eingesetzt. Die Abstellung ist entsprechend auszurüsten. Zur Vermeidung von Spitzenlasten und zur Schonung der Speicher und des fahrzeugseitigen Übertragungssystems erfolgt die Übernachtladung mit geringer Leistung.

- Konfiguration Elektro-/HO-Bus
  - Gefäßgröße und erforderliche Fahrgastkapazität, ggf. Auflastung
  - Festlegung der Heizung
  - Festlegung Art und Leistung des Antriebs
  - Festlegung der durchschnittlichen täglichen Nutzungsdauer Heizung/Klimatisierung
  - Berechnung des Energieverbrauchs für das voll beladene Fahrzeug bei maximaler Heiz-/Klimatisierungsleistung

Es erfolgt zunächst eine Konfiguration des Fahrzeugs hinsichtlich Größe, Antrieb und Heizung/Klimatisierung, aus der sich der Energiebedarf errechnet. Die Traktionsenergiespeicher werden hier noch nicht berücksichtigt. Es wird immer davon ausgegangen, dass das zulässige (bzw. aufgelastete) Gesamtgewicht erreicht wird (Worst-Case-Betrachtung). Darin muss das Gewicht der Speicher zwingend enthalten sein.

- Konfiguration Traktionsenergiespeicher
  - Auswahl Speicherart und –technologie (beeinflusst den nutzbaren SOC)
  - Ausweisung SOC_{min} und SOC_{max} als nutzbaren Speicherinhalt sowie Festlegung einer Energiereserve
  - Festlegung der Auslegungsgröße des Traktionsenergiespeichers (beeinflusst die vollelektrische Reichweite und die Fahrgastkapazität)

Bei der Speicherauslegung ist neben dem erwarteten Energiebedarf pro Betriebstag insbesondere auch die aus dem Speicher abrufbare Leistung zu berücksichtigen. Weiterhin muss beachtet werden, dass in Abhängigkeit von der gewählten Speichertechnologie immer nur ein begrenzter Ladebereich (SOC = State of Charge) genutzt werden darf, um vorzeitige Alterung und Kapazitätseinbußen der Speicher zu vermeiden. Der nutzbare Bereich des Energiespeichers wird durch den minimalen Ladestand (SOC_{min}) und den maximal zulässigen Ladestand (SOC_{max}) begrenzt. Zusätzlich wird eine Energiereserve festgelegt, die während des Betriebstages verfügbar bleiben soll, damit das Fahrzeug aus jedem Punkt des Einsatzgebietes den Betriebshof im Havariefall ohne Unterwegsladung erreichen kann.

- Berechnung Energiebedarf pro Tag

- Berechnung des SOC-Verlaufs für den betrachteten Umlauf
- Ausweisung der SOC-Diagramme (Verlaufskurve)

In Zusammenführung aller Daten und Berechnungsergebnisse wird für jeden betrachteten Umlauf eine Energieverlaufskurve ausgewiesen. Ob sich der ausgewählte Umlauf mit der aktuellen Systemauslegung abbilden lässt, erkennt man daran, ob die SOC-Verlaufskurve bis zum Einrückezeitpunkt am Betriebshof nicht unter den Wert SOC_{min} bzw. die Markierung für die Energiereserve sinkt (auf der Einrückefahrt kann ein Absinken unter die Reserve-Markierung jedoch toleriert werden).

Alle zentralen Ergebnisdaten der Detailanalyse werden von BeSystO® teilautomatisiert in Ergebnisblättern dargestellt.

4.2.4 Technische Machbarkeitsuntersuchung – Energiebilanzierung und Systemauslegung

Die Ermittlung der für den Antrieb notwendigen Energie setzt sich zusammen aus der Berechnung des Energiebedarfes für das leere Fahrzeug sowie des zusätzlichen Bedarfs aus der gemittelten Zuladung (Fahrgäste) im Tagesverlauf. Der Energiebedarf der Nebenverbraucher wird gesondert bewertet. Die Nebenverbraucher werden entsprechend dem notwendigen technischen Bedarf, wie z. B. Druckluft, Leistung Lenkunterstützung, Verbraucher für Fahrgastraum, Sicherheitsfunktionen für den Fahrer, Betriebssicherheit des Fahrzeuges usw. bestimmt.

Zusätzliche Nebenverbraucher für gehobene Beförderungsqualität wie Klimatisierung, Heizung und Lüftung werden mit effizienten und energiesparenden Systemen konfiguriert. In Marburg kommt eine E-Bus-spezifische Klimatisierung im Fahrgastraum mit reduzierter Kühlleistung zum Tragen.

Die Beheizung erfolgt für HO-Bus-Konfiguration durch eine maßgeschneiderte HO-Bus-Heizungsanlage. Hiermit sind Anlagen gemeint, bei denen die volle Heizleistung nur während der Oberleitungsfahrt abgerufen wird. Während der Fahrt auf oberleitungsfreien Abschnitten ist die Heizleistung deutlich reduziert und nutzt nur die Energie die beim Rekuperieren erzeugt wird.

Die übrigen Technologieoptionen werden mit einer so genannten Hybridheizung konfiguriert. Hierbei handelt es sich um ein teilelektrisches Heizsystem, bei den mäßigen Leistungsanforderungen über eine elektrische Heizung, Leistungsspitzen an kälteren Tagen (< 5°C Außentemperatur) jedoch über eine fossile Zusatzheizung (Diesel oder andere fossile Brennstoffe – auch bspw. regenerativ erzeugte wie Bioethanol) ergänzt werden.

Für die HO-Busse wurde aufgrund der anspruchsvollen topographischen Anforderungen mit hohen Entlade- (Anfahrt auf Steigungsstrecken) und Ladeleistungen (Rekuperation auf Gefällstrecken) Lithium-Titanat-Akkumulatoren (LTO) als Hochleistungsbatterien aus-

gewählt. Dieser Batterietyp besitzt zwar eine etwas geringere Energiedichte (unter 1,0 kWh/kg), ist jedoch beim (Ent-) Laden mit höheren Leistungen belastbarer als andere lithiumbasierte Zelltechnologien. Es handelt sich um klassische Schnelllader-Speicher, die Ladeleistungen um etwa 10 C aushalten. LTO-Zellen gelten zudem als sehr betriebssicher, da technologiebedingt ein thermisches Durchgehen selbst bei mechanischer Beschädigung nicht auftritt.

Nach Herstellerinformationen sollten LTO-Akkumulatoren im Automotivebereich in einem Ladeband zwischen 70 % und 30 % betrieben werden. Damit stehen für Traktion und Nebenverbraucher des Fahrzeugs 40 % der Nominalkapazität des Traktionsenergiespeichers zur Verfügung.

Für die Gelenkbusse in Marburg wurde abschließend ein Traktionsenergiespeicher mit einer Nominalkapazität von 100 kWh definiert.

Für die übrigen Technologieoptionen wurde die Auslegung der Traktionsenergiespeicher auf Basis der ersten Ergebnisse der Energiebilanzierung vorgenommen und bedarfsweise im weiteren Untersuchungsverlauf angepasst. Im Ergebnis wurden die Speicher für den Opportunity-Charger auf 200 kWh (Marburg) ausgelegt. Für die Simulation als Overnight-Charger wurden die Traktionsspeicher mit einer Kapazität von 390 kWh versehen. Als Speicher kommen hier Lithiumeisenphosphat-Akkus zum Tragen, die sowohl als Hochenergie als auch Hochleistungsbatterie eingesetzt werden können. Diese Zelltechnologie ist im Allgemeinen kostengünstiger. Zudem liegt der nutzbare Speicherbereich, je nach Konfiguration, für höhere Kapazitätsforderungen zwischen 90 und 10 % SOC seiner Nennkapazität (Hochenergiebatterie) und für höhere Leistungsanforderungen zwischen 80 und 20 % SOC (Hochleistungbatterie).

4.2.5 Wirtschaftlichkeitsuntersuchung

Die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen erfolgen in dem BeSystO®-Modul TCO (steht für „Total Cost of Ownership“). Durch die systeminterne Schnittstelle werden alle technischen und betrieblichen Parameter wie auch die Untersuchungsergebnisse aus der technischen Machbarkeitsuntersuchung und der Energiebilanzierung in BeSystO®-SOC automatisch übernommen. Auch nachträgliche Änderungen, beispielsweise in der Systemkonfiguration und –auslegung werden dynamisch in die Wirtschaftlichkeitsanalysen integriert.

Für die wirtschaftliche Betrachtung der zu untersuchenden Linie wird eine betriebswirtschaftliche Gesamtkostenbetrachtung durchgeführt. Diese erfolgt auf Basis der Kapitalwertmethode. Es fließen sämtliche Investitionskosten und die erforderliche Erneuerung der Traktionsenergiespeicher in bestimmten Intervallen unter Berücksichtigung der Kosten für die Kapitalverzinsung ein. Hierzu existiert in BeSystO® eine entsprechende Datenbank, die auf der Grundlage kontinuierlicher Marktbeobachtung durch Projektdaten und Herstel-

lerinterviews regelmäßig aktualisiert wird. Weiterhin werden sämtliche Betriebskosten in Relation zur Laufleistung in die Betrachtung integriert.

Da es sich um eine prognostische Vorausschau handelt, in deren Bezugszeitraum teilweise nicht oder nur schwer vorherzusagende Entwicklungen stattfinden, erfolgt die Berechnung für den Betrachtungszeitraum in verschiedenen Szenarien. In diesen Szenarien sind jeweils bestimmte Preisentwicklungsmodelle für Dieselkraftstoff, elektrischen Strom und Energiespeichermedien hinterlegt.

Schließlich werden für jede untersuchte Technologieoption die laufleistungsbezogenen Mehrkosten gegenüber dem Referenzsystem (Dieselbus, Ohnefall) ausgewiesen.

Im Einzelnen werden die folgenden Kostenpositionen in der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung berücksichtigt:

- Systemkosten (Investitionskosten)
  - Fahrzeug
    - Grundfahrzeug (reduziert um Traktionskomponenten Diesel)
    - Traktionsausrüstung Elektrotraktion
    - Nebenaggregate
    - Fahrzeugseitige Ladeinfrastruktur
    - Traktionsenergiespeicher
  - Ladeinfrastruktur Strecke und Betriebshof (inklusive Bau- und Errichtungskosten, Planungs- und Baunebenkosten)
    - Übertragungssystem
    - Energiebereitstellung
    - Leitungswege
  - Werkstattausrüstung
    - Dacharbeitsstände, Arbeitsbühnen
    - Flurfördergeräte und Kräne (stationär/mobil)
    - Hochvolt-Spezialwerkzeug
    - Prüf- und Messgeräte
    - Persönliche Schutzausrüstung für Mitarbeiter

Zusätzlich werden die Personal-Aufwendungen für die Erstqualifizierung von Mitarbeitern in Fahrdienst und Werkstatt für die Arbeit an und mit Elektrobussen sowie Personalkosten für das Projektmanagement als Einmalkosten in die Betrachtung einbezogen.

Für die Gegenüberstellung der untersuchten Technologieoption mit dem Ohnefall, also dem Dieselbusbetrieb, werden neben den abgezinsten Investitionskosten auch die laufleistungsbezogenen Betriebskosten integriert. Diese umfassen folgende Kategorien:

- Laufleistungsparameter (gemäß Ermittlung in BeSystO® SOC)
  - Jahreskilometerleistung (pro Fahrzeug und Jahr)
  - Jahresbetriebsdauer (pro Fahrzeug und pro Jahr)
- Verbrauchswerte pro km
  - Referenzfahrzeug (Diesel, Heizöl, Erdgas, AdBlue)

- Elektrofahrzeug (elektrischer Strom, Heizöl)
- Energiekosten
  - Einkaufspreise für Diesel, Heizöl und AdBlue
  - Einkaufpreise für Strom unter Berücksichtigung der aktuellen Rechtslage für Elektrobusse (Gleichsetzung mit Straßenbahn bei Stromsteuer)
- Personalkosten
  - Fahrdienstpersonal
  - Werkstattpersonal (Instandhaltungsmehraufwand, sofern definiert)
- Fahrzeugreserve
  - Aufwand für erhöhte Reservevorhaltung aufgrund der neuen Technologie
  - Gestaffelt nach Betriebsjahr 1 bis 2 und Folgejahre

Da in der Betrachtung der elektromobilen Technologieoptionen die Einrichtungen zur Energieversorgung, also die Ladeinfrastruktur voll in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einfließen, muss auch die Nutzung einer eigenen Tankstelle kostenseitig mit betrachtet werden. Hier wurde ein Pauschalwert von 4 ct. je Liter angesetzt, der die Abschreibungskosten sowie die Unterhaltungsaufwendungen für die Einrichtungen zur Kraftstoffversorgung abbildet.

Schließlich wird die Darstellung der Mehrkosten noch um ein Förderszenario ergänzt. Um die positiven Auswirkungen von Fördermitteln bei hochinvestiven Maßnahmen deutlich darzustellen, wurde ein offensives Förderszenario gewählt, bei dem sowohl für die systembezogenen Fahrzeugmehrkosten (inkl. Energiespeicher) als auch für die Ladeinfrastruktur eine Zuwendungshöhe von 80 % veranschlagt wurde.

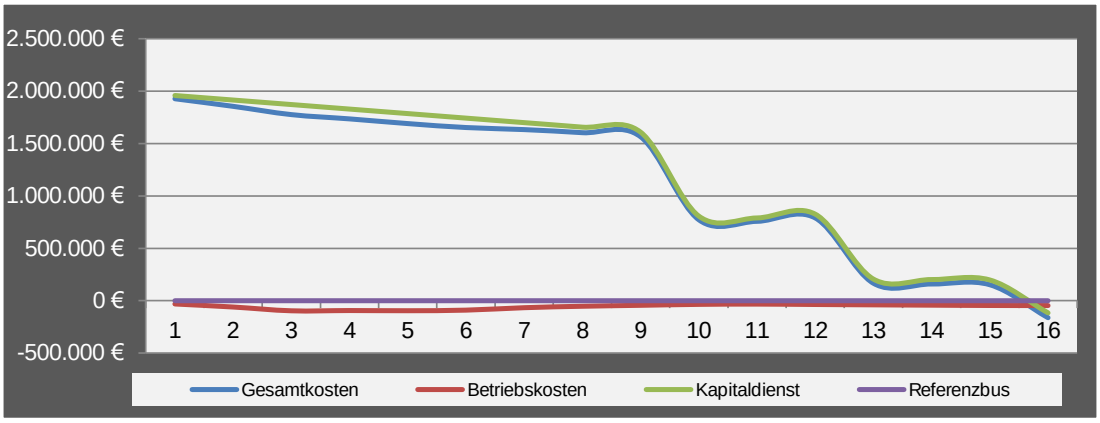


Abbildung 13: Verlaufskurve Jahresmehrkosten (Lesebeispiel)

Abbildung 13 zeigt exemplarisch den typischen Verlauf der Jahresmehrkosten eines Elektrobussystems gegenüber dem konventionellen Dieselbuseinsatz über einen Betrachtungszeitraum von 16 Jahren.

Das Diagramm besteht aus der x-Achse, auf der die einzelnen Jahre abgetragen sind, und der y-Achse mit den Jahresmehr- bzw. –minderkosten für das gesamte betrachtete System. Die Kosten des Dieselbussystems als Referenzwert betragen 0. Die Gesamtkos-

ten summieren sich aus den Betriebskosten und den Kosten für den Kapitaldienst der getätigten Investitionen (Fahrzeugmehrkosten, Infrastrukturkosten, sonstige Einmalkosten wie Weiterbildungsmaßnahmen etc.).

Im gezeigten Beispiel erkennt man deutlich die erheblichen jährlichen Mehrkosten zu Beginn des Betrachtungszeitraums. Sie werden durch die Fahrzeugmehrkosten und die getätigten Investitionen, insbesondere in Ladeinfrastruktur, hervorgerufen. Im achten Betrachtungsjahr erzeugt die fällige Speichererneuerung einen leichten Anstieg der Mehrkosten, gefolgt von einem deutlichen Abfallen aufgrund des abgelaufenen Abschreibungszeitraums des Elektrobusses. Der Restwert der Dieselbusse erzeugt bei deren Aussonderung im zwölften Betriebsjahr erneut einen leichten relativen Anstieg der Systemmehrkosten des Elektrobusses, unmittelbar gefolgt von einem starken Absinken bedingt durch die Ersatzbeschaffung der Dieselfahrzeuge. Schließlich pendeln sich die Mehrkosten auf einem relativ niedrigen Niveau ein und sinken im 16. Betriebsjahr unter das Niveau des Dieselbusses. Die Betriebskosten des untersuchten Elektrobusses liegen zunächst leicht unterhalb des Diesel-Referenzsystems, erreichen jedoch im Laufe der ersten 10 Jahre dessen Niveau, unter anderem aufgrund eines prognostizierten Preisanstiegs bei elektrischer Energie.

Das Lesebeispiel zeigt ein mittleres Kostenentwicklungsszenario und ist ohne Hinzuziehung von Fördermitteln gerechnet. Die Hinzunahme einer Förderung auf Fahrzeugmehrkosten und systemspezifische Infrastrukturen würde den Zeitpunkt der Systemrentabilität, also des Absinkens der Gesamtkostenkurve unter das Diesel-Referenzsystem, zeitlich nach vorne verlagern.

Ergänzend wird eine Folgekostenrechnung über einen Betrachtungszeitraum von 40 Jahren vorgenommen, bei der die Barwertermittlung unter Einbeziehung einer exponentiellen Diskontierung mit 2 % erfolgt.

4.2.6 Ausweisung ökologischer Parameter

Ein zentrales Motiv für Untersuchungen zur Umstellung von fossil betriebenen Bussystemen auf Elektrobussysteme sind ökologische Effekte.

BeSystO liefert eine laufleistungsbezogene CO_2-Bilanzierung als Vergleichsdarstellung zwischen einem konventionell betriebenen Referenzbus (Dieselbus) auf der einen und dem Elektrobus mit verschiedenen Strommixen (lokaler Erzeuger, bundesdeutscher Durchschnitt aktuell/Prognose 2020, Ökostrom) auf der anderen Seite.

Die Energieverbräuche werden in folgende Wirkungsketten differenziert:

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

Bei allen Betrachtungen werden der Energieverbrauch und die Menge an CO_2-Äquivalent auf Grundlage der DIN EN 16258 (2013) sowie die Kosten der CO_2-Äquivalent-Ausstöße nach Standardisierter Bewertung dargestellt. Die Energieketten des Referenzbusses und des Elektrobusses werden für den ausgewählten Umlauf auf Grundlage der ermittelten Energiewerte verglichen.

Für den Referenzbus werden zusätzlich die lokalen Schadstoffemissionen von NO_X, Feinstaub (PM), CO und HC mengenmäßig ermittelt und dargestellt. Diese werden direkt im Straßenverkehr lokal emittiert und fließen daher ausschließlich in die Tank-to-Weel-Betrachtung ein. Die Mischung des Fuhrparks und die Euro-Abgasnorm der Verbrennungsmotoren werden dabei berücksichtigt.

Abschließend erfolgt noch die Monetarisierung der Emissionen auf Basis der Verfahrensanleitung zur Standardisierten Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen des öffentlichen Personennahverkehrs und die Berechnung der Treibhausgas-Vermeidungskosten aus der Differenz von Technologiezusatzkosten und eingesparten Energiekosten im Verhältnis zur erzielten Reduktion des Ausstoßes von CO_2-Äquivalenten (EUR/t CO_2-e).

4.3 Ergebnisse technische Machbarkeitsuntersuchung

4.3.1 Systemdefinitionen

HO-Bus-System

Die Technologieoption HO-Bus sieht den Einsatz hybridisierter Oberleitungsbusse vor, also O-Busse, die zusätzlich zur Energieversorgung über die Oberleitung mit einem Traktionsenergiespeicher ausgerüstet sind, der reguläre Linienfahrten über mehrere Kilometer jenseits des Oberleitungsnetzes ermöglicht[6]. Während der Oberleitungsfahrt wird neben der Traktionsenergie auch der Ladestrom für die Energiespeicher über das Stromabnehmersystem übertragen.

Ergänzend zu den Oberleitungsabschnitten kommen an drei Linienendpunkten stationäre Ladepunkte zum Einsatz, an denen über ein modifiziertes Übertragungssystem an den Stangenstromabnehmern auch im Stillstand mit einer höheren Leistung geladen werden kann. Auch während der nächtlichen Betriebspause im Depot werden die Energiespeicher über die Stromabnehmer aufgeladen. Hierfür ist die Abstellanlage ebenfalls mit Oberleitungen auszurüsten.

6 Im Gegensatz zu O-Bussen, die anstelle eines Hilfsaggregats über einen kleinen Energiespeicher verfügen, der lediglich kurze Umfahrungen bei Verkehrsstörungen und Havarien oder kurze Rangierfahrten im Depot erlaubt.

Ein HO-Bus-System nutzt die jahrzehntelange Erfahrung mit konventionellen O-Bussen. Gleichzeitig können durch die erweiterte netzunabhängige Fahrfähigkeit die Infrastrukturkosten reduziert werden, weil einerseits nur 40 bis 60 Prozent der Strecke elektrifiziert werden müssen und andererseits teurere Elemente wie Kurven, Kreuzungen oder Weichen reduziert werden können. Gerade auf topographisch anspruchsvollen Streckenabschnitten erhöht die kontinuierliche Energiezufuhr die Leistungsfähigkeit des Systems.

Allerdings sind sowohl Infrastruktur als auch Fahrzeuge selbst im Vergleich zu anderen Elektrobuskonzepten teurer und es ist mit Umsetzungshemmnissen zu rechnen, wenn in einer Stadt ein neues Oberleitungsnetz etabliert werden soll.

Depot-Lader (Overnight-Charger)

Bei der Technologieoption Batterie-Elektrobus als Overnight-Charger sollen die Dieselbusse 1:1 durch Batteriebusse ersetzt werden, die ausschließlich während der Betriebspause nachts im Depot geladen werden. Eine streckenbegleitende Ladeinfrastruktur wird bei dieser Variante nicht vorgehalten. Die Ladung im Betriebshof erfolgt über eine konventionelle Plug-In-Lösung (Stecker-Kabel).

Overnight-Charging Elektrobusse erzeugen keinen Infrastrukturaufwand auf der Strecke, was die Investitionskosten einerseits senkt. Andererseits müssen die Traktionsspeicher erheblich größer ausgelegt werden als bei anderen Systemen, um die erforderliche Reichweite zu gewährleisten. Dies erhöht wiederum die Fahrzeugkosten und geht mitunter zu Lasten der Fahrgastkapazität.

Zudem ist zu beachten, dass am Betriebshofstandort in einem relativ kurzen Zeitfenster die vollständige Energie für den Tageseinsatz der gesamten Elektrobusflotte zur Verfügung gestellt werden muss. Entsprechend hoch sind die Leistungsanforderungen an die Netzinfrastruktur und die Anschlusskosten für den Betriebshof. Je nach Anzahl der zu versorgenden Elektrobusse kann eine eigene Umspannstation erforderlich werden.

Gelegenheitslader (Opportunity-Charger)

Bei der Technologieoption Batteriebus als Opportunity-Charger werden die Fahrzeuge mit deutlich kleineren Traktionsenergiespeichern ausgerüstet, die jedoch nach (annähernd) jeder Fahrt am Linienendpunkt aufgeladen werden. Hierfür erhalten die Busse ein Pantographensystem, an ausgewählten Endpunkten wird eine Docking-Station errichtet.

Während der nächtlichen Betriebspause wurde zusätzlich zur Pantographen-Technik ein Plug-In-Anschluss vorgesehen, da diese Technik eine höhere Flexibilität im Abstellbereich ermöglicht. Infrastrukturseitig entspricht die Ausstattung des Betriebshofes mit Ladegeräten der Technologieoption Overnight-Charger.

Opportunity-Charger-Busse sind aufgrund der hohen Preise für Energiespeichermedien in der Regel trotz des Schnelllade-Übertragungssystems bei den Investitionskosten günstiger als Overnight-Charger. Allerdings müssen mehrere Schnellladestationen im Einsatzgebiet realisiert werden, was wiederum Investitionskosten verursacht und auch Probleme bei der städtebaulichen Integration hervorrufen kann. Zudem kann die Einsatzstabilität eines Opportunity-Charging Systems empfindlich gestört werden, wenn etwa eine der Ladestationen ausfallen sollte.

4.3.2 Linienauswahl Marburg

Die Universitätsstadt Marburg ist ein Oberzentrum im Regierungsbezirk Gießen in Mittelhessen. Mit knapp 74.000 Einwohnern ist sie die achtgrößte Stadt des Landes Hessen. Nach einem zwischenzeitlichen Einbruch Anfang der 1990-er Jahre, bedingt durch den Abzug von Bundeswehrstandorten, ist die Bevölkerungsentwicklung seit 1995 durchgehend leicht positiv. An der Philipps-Universität Marburg studieren knapp 26.000 Studierende, von denen etwa die Hälfte mit Hauptwohnsitz in Marburg gemeldet ist. Die Universität ist zugleich der größte Arbeitgeber in der Stadt mit 4.600 Beschäftigten zuzüglich etwa 9.700 Beschäftigten der Universitätskliniken Gießen und Marburg am Standort Lahnberge.

Der öffentliche Personennahverkehr im Stadtgebiet wird vollständig von den Stadtwerken Marburg erbracht. Die Stadtwerke Marburg sind zu 100 % in Besitz der Stadt Marburg. Der Verkehrsbetrieb gehört neben den Bereichen „Netze und Erzeugung“ und „Kundenservice, Vertrieb und Handel“ zum Kerngeschäft der Stadtwerke, daneben gibt es zahlreiche Beteiligungsgesellschaften, darunter die Marburger Verkehrsgesellschaft mbH, welche für die Erbringung der Verkehrsleistung verantwortlich ist. Neben dem städtischen Busverkehr gehören auch die Parkraumbewirtschaftung und der Betrieb einer Erdgastankstelle zum Leistungsumfang im Geschäftsbereich „Stadtverkehr“.

Bei einer Verkehrsleistung von etwa 3,4 Mio. Nutzwagenkilometern wurden durch die Stadtwerke Marburg im Jahr 2015 rund 17,5 Mio. Fahrgäste transportiert. Der Zuwachs im Vergleich zum Vorjahr betrug 17 %, allein die Semesterticketnutzung stieg dabei um fast 30 % an. Die Marburger Busflotte umfasst 85 Fahrzeuge. Zum Einsatz kommen Gelenk- Solo- und Midibusse in Niederflurbauweise. Erstmals in Hessen setzen die Stadtwerke Marburg einen Buszug ein, außerdem wurde im Jahr 2016 ein Elektrobus im Marburger Liniennetz getestet.

Das Liniennetz der Stadtwerke Marburg wird durch eine westlich der Lahn, also auf Seite der historischen Altstadt, verlaufende Stammstrecke bestimmt, über die ein Großteil der Stadtverkehrslinien verkehrt. Diese Stammstrecke verläuft zwischen den Haltestellen Südbahnhof und Hauptbahnhof, wobei die höchste Liniendichte zwischen den Haltestellen Wilhelmsplatz und Rudolphsplatz besteht (14 Linien). Ausgehend von dieser Stammstre-

cke, die neben den beiden Bahnhöfen und dem Stadtzentrum auch die in der Altstadt gelegenen Campusteile der Universität erschließt, verlaufen die Linien radial und erschließen jeweils einzelne Stadtteile und Vororte in einem Radius von fünf bis sieben Kilometern. Zentrale Umsteigeknoten sind der Hauptbahnhof und der Rudolphsplatz, die beide von nahezu allen Stadtverkehrslinien angefahren werden.

Die Stammstrecke markiert zudem grob den Verlauf der zwischen 1903 und 1951 verkehrenden einzigen Marburger Straßenbahnlinie zwischen Hauptbahnhof und Südbahnhof. Nach deren Einstellung verkehrten auf weitestgehend gleichem Linienweg bis zum Jahr 1968 sogar Oberleitungsbusse.

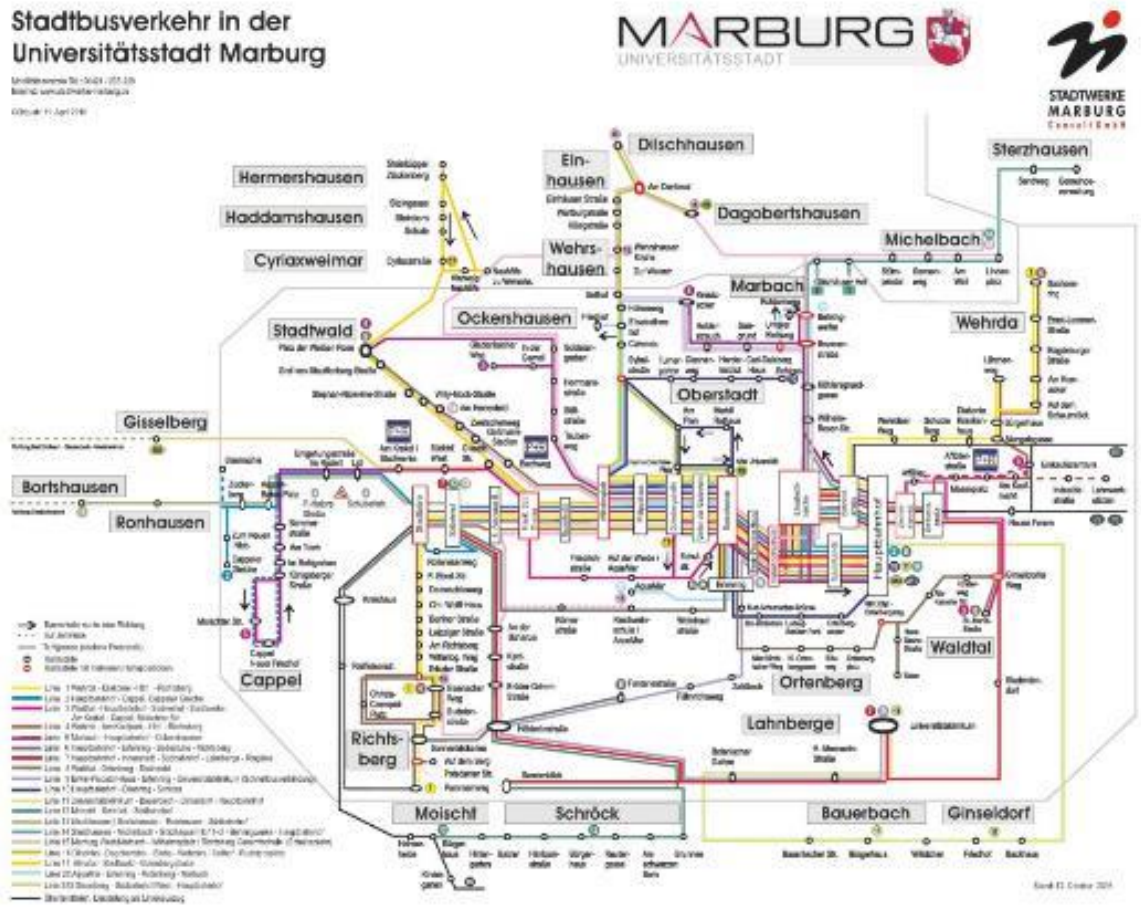


Abbildung 14: Liniennetzplan Stadtbusverkehr Marburg

Eine Besonderheit stellt die Linie 7 dar, die als Ringlinie verkehrt und im Zweirichtungsbetrieb den Innenstadtbereich einschließlich der gesamten Stammstrecke mit dem Campus Lahnberge der Universität und dem dort gelegenen Universitätsklinikum verbindet. Neben der Führung als Ringlinie ist die Linie 7 aufgrund ihrer erheblichen verkehrlichen Bedeutung hervorzuheben. Durch den Pendler-, Studierenden- und Besucherverkehr der Kliniken ist sie eine der nachfragestärksten Verbindungen im Marburger Netz. Schließlich ist die Linie 7 auch aus topographischer Sicht interessant, da sie als eine von wenigen Linien

aus dem Lahntal herauf auf die Lahnberge führt. Dabei wird ein Höhenunterschied von rund 180 m überwunden.

Für die Kombination der Linien 2 und 7 sprechen u.a. verschiedene Gründe: Beide Linien spiegeln in ihrer kombinierten Betrachtung den aktuellen Betriebsalltag wieder und sie nutzen beide die Stammstrecke in der Innenstadt. Somit kann die dort errichtete Infrastruktur von beiden Linien genutzt werden.

Die Linie 7 eignet sich aus zwei zentralen Gründen:

- Hohe und weiter steigende Verkehrsnachfrage
- Topographische Situation

Beide Faktoren stellen hohe energetische Anforderungen an einen Elektrobusbetrieb, so dass eine dynamisch konduktive Energieversorgung mittels eines partiellen Oberleitungssystems als geeignete Lösung erscheint. Zudem sehen sich die Stadtwerke Marburg vor der Herausforderung, angesichts stark steigender Verkehrsprognosen, unter anderem aufgrund des Ausbaus der universitären Einrichtungen auf den Lahnbergen, eine sowohl umweltfreundliche als auch kapazitätsstarke Verbindung zwischen Altstadt und Klinikum/Uni-Campus sicherzustellen.

Für die Kombination mit der Linie 2 sprachen verschiedene Gründe: Zum einen sind gegenwärtig viele Umläufe für die Linie 7 mit der Linie 2 verknüpft. Somit spiegelt die kombinierte Betrachtung beider Linien den heutigen Betriebsalltag weitgehend wieder. Weiterhin verkehrt die Linie 2 im Bereich der Stammstrecke parallel zur Linie 7, so dass dort errichtete Oberleitungsinfrastruktur von beiden Linien genutzt werden kann. Ein wichtiger Punkt für die Wirtschaftlichkeit des Systems. Schließlich bildet die Linie 2 topographisch einen gewissen Kontrast zur Linie 7, da sie dem Lahntal folgt und bis auf den südlichsten Streckenast von ca. 1,4 km keine signifikanten Steigungen überwindet.

Im Ergebnis des Linienauswahlprozesses wurden somit nach Rücksprache mit der Projektleitung die Linien 7 und 2 als Untersuchungsgegenstand für Marburg definiert.

Im Rahmen einer ersten energetischen Untersuchung des Einsatzes von HO-Bussen auf dieser Linienkombination zeigte sich jedoch, dass ein Großteil der Linien voraussichtlich nicht mit einem alternativen Antriebssystem (konkret dem HO-Bus) abgebildet werden könnte. Dabei spielten allerdings weniger topographische oder verkehrliche Aspekte eine Rolle als vielmehr die Tatsache, dass die aktuellen Umläufe linienübergreifend geplant sind. Dadurch war auf den meisten untersuchten Umläufen der tägliche Fahrtanteil auf den Linien 2 und 7 in der Regel zu gering und damit die Verweilzeiten unter der konfigurierten Oberleitung zu kurz, um die Umläufe auf den HO-Bus umstellen zu können. Da bei einer sukzessiven, linienbezogenen Systemumstellung jedoch davon ausgegangen werden kann, dass Fahrzeuge und Ladetechnologie (sprich Oberleitungsnetz) aufeinander abgestimmt eingesetzt werden, wurden von den Stadtwerken Marburg für die weitere Un-

tersuchung linienreine Umläufe die beiden Linien konzipiert. In diesem Zuge wurden auch die Linienführungen auf den bestehenden Strecken angepasst. Auffälligste Maßnahme war hier die Berechnung der ursprünglichen Ringlinie 7.

4.3.3 Detailuntersuchung Marburg

Im Zuge der Detailuntersuchung der Linienkombination 2/7 wurden die nachfolgenden Prozesse einmalig für den Standort durchgeführt:

- Liniendaten Linie 2/7
- Liniencharakteristik Linie 2/7
- Auslegung Oberleitungssystem
- Ergebnis Betrieb und Technik Hybrid-Obus
- Ergebnis Betrieb und Technik Overnight-Charger/Depot-Lader
- Ergebnis Betrieb und Technik Opportunity-Charger

Umlaufbezogen wurden folgende Berechnungen erstellt:

- Ermittlung Energiebedarf HO-Bus
  - Simulation Energieverbrauch
  - Auslegung Speicher inkl. SOC-Verlaufsdarstellung
- Ermittlung Energiebedarf Overnight-Charger
  - Simulation Energieverbrauch
  - Auslegung Speicher inkl. SOC-Verlaufsdarstellung
- Ermittlung Energiebedarf Opportunity-Charger
  - Simulation Energieverbrauch
  - Auslegung Speicher inkl. SOC-Verlaufsdarstellung

Die einzelnen Dokumente sind alle im Anhang zu dieser Studie zu finden.

4.3.3.1 Liniencharakteristik und –klassifizierung

Die Linien 2 und 7 sind hoch ausgelastete Linien im Stadtverkehr Marburg. Auch die modifizierte Linienführung im Rahmen der Umlaufneuordnung wird hieran nichts ändern.

Linie 2 verkehrt von dem neuen Endpunkt Sonnenblick über die Lahnberge/Klinikum über den nördlichen An-/Abstieg zum Hauptbahnhof und weiter über die Innenstadtstrecke mit den dortigen Universitäts-Instituten und den Südbahnhof zum ursprünglichen Endpunkt Cappeler Gleiche, ca. 4 km südlich des Stadtzentrums.

Linie 7 verkehrt nun nur noch zwischen dem Hauptbahnhof über die Innenstadtstrecke, den Südbahnhof und den südlichen An-/Abstieg auf die Lahnberge (unter Auslassung der Haltestelle Sonnenblick) und endet am Klinikum.

Beide Linien sind topographisch anspruchsvoll, da sie auf ihrem Linienweg den An- bzw. Abstieg vom Lahntal hinauf auf die Höhenlage der Lahnberge zu bewältigen haben.

Die Streckenlänge der Linie 2 beträgt 18,0 km, die fahrplanmäßige Reisezeit 1 Stunde und 2 Minuten. Die Linie 7 hat eine Streckenlänge von 10,2 km, die in 35 Minuten zurückgelegt werden. Daraus ergibt sich eine rechnerische Durchschnittsgeschwindigkeit für beide Linien von 17-19 km/h. Dieser Wert ist durchaus stadtverkehrstypisch.

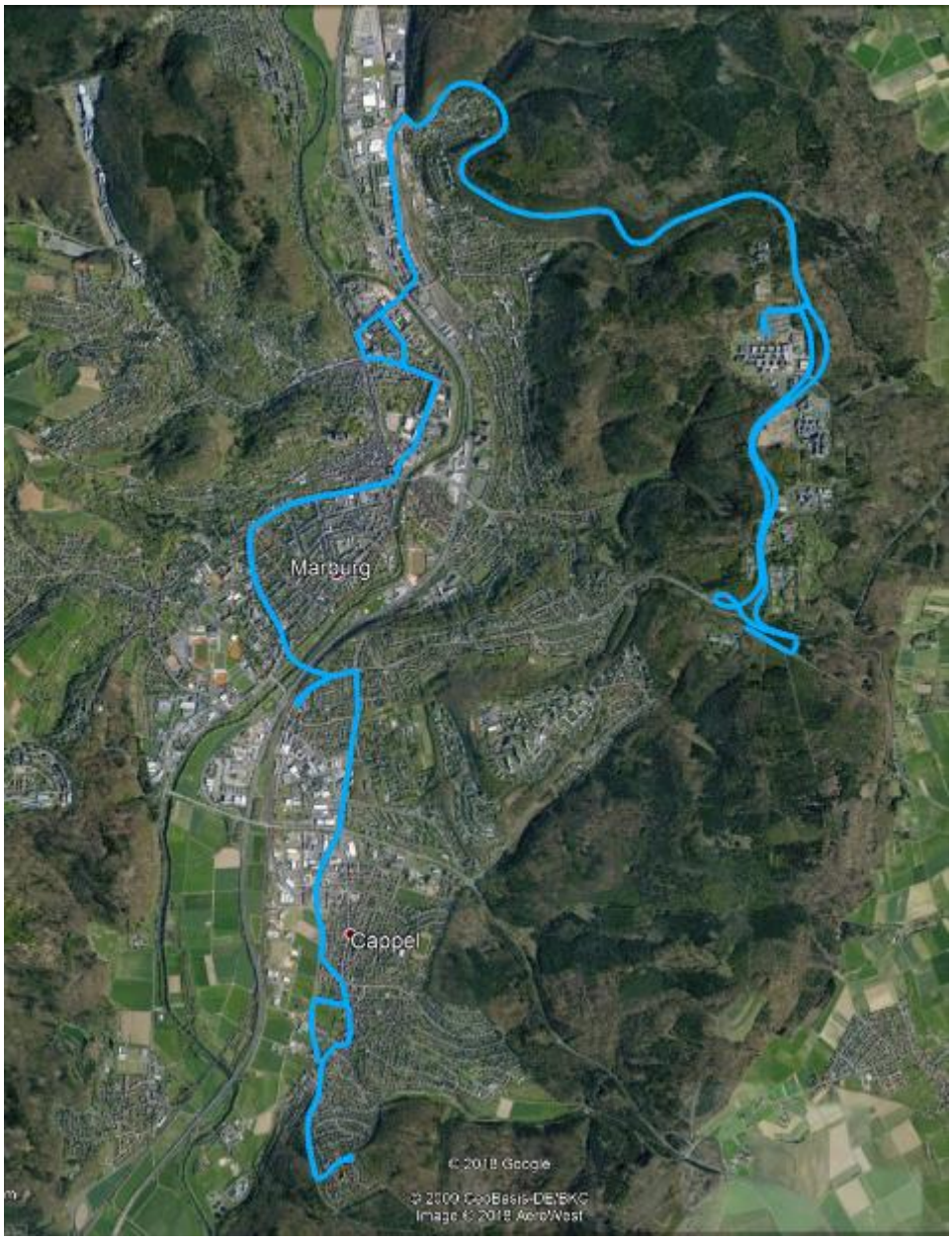


Abbildung 15: Linienführung Linie 2 Marburg

Abbildung 16: Linienführung Linie 7 Marburg

Die Linien 2 und 7 werden gegenwärtig mit 18-m-Niederflurbussen bedient. Die im Zuge der Detailuntersuchung HO-Bus-System (Reduzierte Oberleitung) betrachteten 6 Umläufe sind: L2-38-MO, L2-52-MO, L2-54-MO, L7-13-MO, L7-31-MO, L7-34-MO.

Die betrachteten Umläufe summieren sich auf eine Jahreslaufleistung von etwa 0,58 Millionen Fahrzeugkilometern. Die jährliche Betriebsdauer beläuft sich auf knapp 19.730 Stunden. Entsprechend den elf betrachteten Umläufen werden elf Fahrzeuge zur Abbildung eines typischen Betriebswerktages benötigt.

Die Linienklassifizierung nach SORT und TOPO ergab die Einstufung SORT 2 und TOPO 1. Der SORT-Einstufung lagen folgende Werte zu Grunde:

- 3 Stopps/km
- 37 % Haltezeitanteil
- 19,0 km/h Durchschnittsgeschwindigkeit (GPS-Messung)[7]

In die TOPO-Einstufung sind einerseits das Höhenprofil (relevant für die Energiemenge) und andererseits die Maximalwerte für Steigung und Gefälle (relevant für die erforderliche Leistung) eingeflossen:

- Höhendifferenz auf der Strecke: 220 m (H_{max}: 380 m üNN, H_{min}: 160 m üNN)
- Maximale Steigung: 8 %

[7] Hinweis: Bedingt durch die Einbeziehung der Ein- und Ausrückefahrten sowie einzelner Leerfahrten und Fahrten auf Drittlinien weicht die real gemessene Geschwindigkeit von den berechneten Fahrplangeschwindigkeiten der beiden Linien ab. Zudem schlägt sich die Dominanz der Linie 7 in den Umläufen nieder. Die Realgeschwindigkeit ist als relevante Größe in die Energiebilanzierung eingegangen.

- Maximales Gefälle: -8 %
- Maximum aus Steigung und Gefälle: +/- 8 %

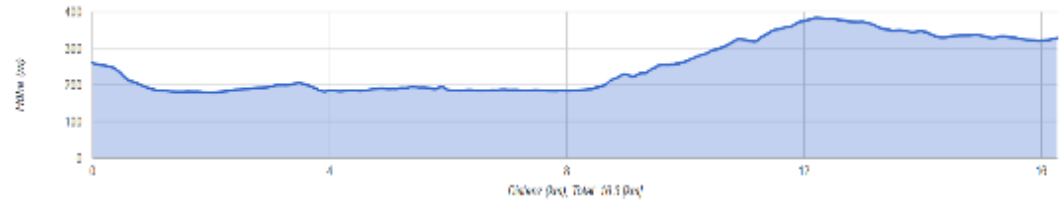


Abbildung 17: Höhenprofil Linie 2 Marburg

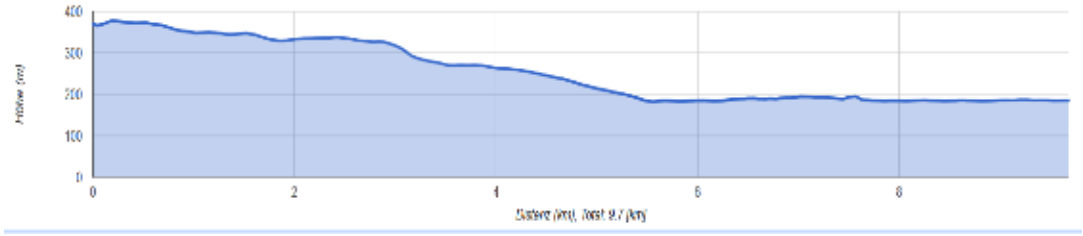


Abbildung 18: Höhenprofil Linie 7 Marburg

4.3.3.2 HO-Bus-System (optimierte Linienverläufe)

Auslegung Oberleitung

Das HO-Bus-System Marburg beruht auf einem kombinierten Energieversorgungskonzept, das aus den folgenden Komponenten besteht:

- Nachladung auf dem Betriebshof während der nächtlichen Betriebspause über Oberleitung in der Abstellung (Nachladung der Traktionsenergiespeicher über SOC_{max} bis 90 kWh, Erhaltungsladung, Systemenergie und Vorkonditionierung Fahrzeug)
- Partielle Oberleitung im Linienverlauf (Traktionsenergie während der Fahrt und im Stand, Nachladung der Traktionsenergiespeicher)
- Stationäre Nachladung an ausgewählten Linienendpunkten mit erhöhter Ladeleistung (Nachladung der Traktionsenergiespeicher bis SOC_{max})

Grundsätzlich erfolgt die Energieübertragung über das Oberleitungssystem und die Stangenstromabnehmer des Fahrzeugs. Während der Fahrt können in Abhängigkeit von den im Bus verbauten elektrischen Komponenten Leistungen bis zu 300 kW dynamisch bei festgelegten Minimalgeschwindigkeiten übertragen werden. Aufgrund der sehr geringen Kontaktfläche zwischen den Fahrleitungen und den Schleifkohlen der Stromabnehmer ist üblicherweise bei Stillstand des Fahrzeuges nur eine vergleichsweise geringe Energieübertragungsleistung möglich (in der Regel maximal 90 kW). Eine signifikant höhere Leistungsübertragung führt unmittelbar zu Schäden an der Fahrleitung und den Schleifkohlen am Stromabnehmer. Eine Marktrecherche und Umfrage bei renommierten Herstellern hat jedoch gezeigt, dass es innovative Lösungen gibt, die erhöhte Ladeleistungen im Stand bis zu 220 kW (brutto) erlauben. Ermöglicht wird diese erhöhte Ladeleistung durch eine modifizierte Kontaktaufnahme am Schleifschuh. Wurde bisher nur das Kohleschleifstück

zur Energieübertragung genutzt, wird in diesem Anwendungsfall die Flanke des Schleifschuhs an eine seitliche Kontaktstelle kraftschlüssig verbunden. Diese vergrößerte Kontaktfläche erlaubt eine höhere Energieübertragung.

Aufgrund der identifizierten Haltezeitparameter Anzahl Stopps, Summe Wendezeiten und potentielle Ladezeit pro Halt wurden folgende Haltestellen als geeignete Standorte für eine stationäre Nachladung identifiziert:

- Hauptbahnhof
- Cappeler Gleiche
- Klinikum
- Sonnenblick

Bei der Sensitivitätsanalyse zeigte sich, dass insbesondere die Haltestelle Cappeler Gleiche zur stationären Nachladung nicht benötigt wird. Dadurch kann die kostenintensive Errichtung eines dafür erforderlichen Netzanschlusses eingespart werden. Ebenfalls ergab die Analyse, dass die Ladestation am Hauptbahnhof mit einer verringerten Ladeleistung ausgelegt werden kann, sodass die Nachladung unter der Oberleitung erfolgen kann und keine kostenintensive Ladestation errichtet werden muss.

Die technische Umsetzung der Ladestationen erfolgt entweder durch einen sehr kurzen, abgespannten Oberleitungsabschnitt mit speziellen Eindrahttrichtern für die Nachladung mit erhöhter Leistung oder über einen Lademasten, an dem zwei Ladehauben mit Eindrahthilfe und einem integrierten Ladekontakt angebracht sind.

Für die Bereitstellung der notwendigen Antriebsenergie und der „dynamisch-konduktiven“ Nachladung, also das Nachladen der Traktionsenergiespeicher während der Fahrt an der Oberleitung kommen konventionelle Oberleitungssysteme zum Einsatz. Diese werden nicht im gesamten Streckenverlauf errichtet, sondern auf selektierten Streckenabschnitten als so genannte partielle Oberleitung. Wesentliche Vorteile eines partiellen Oberleitungssystems sind:

- Reduzierung der Investitionskosten in Infrastruktur durch die geringere erforderliche Netzlänge
- Reduzierung der Investitionskosten in Infrastruktur durch die mögliche Vermeidung teurer Streckenelemente (komplexe Kurven, Kreuzungen, Weichen)
- Reduzierung politischen und gesellschaftlichen Vorbehalte durch die mögliche Vermeidung städtebaulich sensibler Areale.

Der Beginn der einzelnen Oberleitungsabschnitte wurde grundsätzlich an Haltestellen festgelegt. Zwar gibt es in Forschung und Industrie verschiedene Ansätze für das dynamische An- und Abdrahten, teilweise sogar während der Fahrt. Jedoch stecken diese Projekte noch in den Kinderschuhen und mit einer kurz- bis mittelfristigen zuverlässigen Systemverfügbarkeit ist hier nicht zu rechnen.

Abbildung 19: Eindrahttrichter mit Stromabnehmern auf dem Betriebshof der VBZ Zürich[8]

Das Andrahten der Stangenstromabnehmer erfolgt deshalb an einem normalen Halt teilautomatisiert per Knopfdruck durch den Fahrer. Die Stangenstromabnehmer werden entriegelt und langsam pneumatisch oder elektrisch zur Oberleitung geführt. Mit so genannten Eindrahttrichtern (siehe Abbildung 19) erfolgt die punktgenaue Ausrichtung der Schleifkohlen auf den Oberleitungsdraht. Ein solches System wird bei den Verkehrsbetrieben Zürich bereits erfolgreich, d. h. insbesondere mit geringer Fehlerhäufigkeit, eingesetzt. Ein Andrahtvorgang dauert dort nicht länger als etwa zehn Sekunden, ist also im Rahmen eines normalen Fahrgastwechsels möglich.

Die Festlegung der Oberleitungsabschnitte erfolgte in enger Absprache mit den Stadtwerken Marburg. Für die Bergstrecken wurde durch die Stadtwerke Marburg mittels eingetragener Messpunkte ein Höhenprofil erstellt. Oberleitungen wurden nur dort vorgesehen, wo die Steigung größer 4 % betrugen.

Zunächst stand fest, dass die Steigungsstrecken zu den Lahnbergen mit Oberleitung zu versehen sind, um den Energiebedarf, insbesondere aber auch die Leistungsanforderungen der Bergfahrt abzudecken.

Die Analyse ergab, dass für den Nordanstieg (Ginseldorfer Weg – Abzweig Klinikum) keine Möglichkeit besteht Oberleitungsstrecken einzusparen. Bei dem Südanstieg zwischen Südbahnhof und Klinikum zeigte sich, dass die Streckenabschnitte Kantstraße (KANT) – Hölderlinstraße (HOEL) und Botanischer Garten (BOTG) – Klinikum (KLIN) entfallen könnten.

8 Bildquelle | VCDB GmbH

Zunächst wurde von den Stadtwerken Marburg vorgeschlagen, dass ab Südbahnhof die folgenden Strecken zweispurig mit Oberleitung überspannt werden könnten:

- Südbahnhof (SBF) – An der Schanze – Kantstraße (KANT)
- Hölderlinstraße (HOEL) – Botanischer Garten (BOTG)

Im Zuge der Sensitivitätsanalyse zeigte sich, dass der zweispurige Oberleitungsabschnitt zwischen Hölderlinstraße (HOEL) – Botanischer Garten (BOTG) nicht erforderlich ist und somit die Oberleitung nur einspurig für die Bergauffahrt benötigt wird.

Während der Bergabfahrten besteht für die Fahrzeuge ein je nach Streckenabschnitt mäßiges bis starkes Rekuperationspotential zur Nachladung der Traktionsenergiespeicher.

Zwei weitere Oberleitungsabschnitte wurden im Innenstadtbereich realisiert, zum einen in einem vorwiegend gewerblich geprägten Stadtviertel nördlich des Hauptbahnhofs, zum anderen in der westlichen Innenstadt bis hin zum Südbahnhof. Bei letzterem Teilstück war zu berücksichtigen, dass ein städtebaulich sensibles Areal zwischen der Haltestelle Volkshochschule und dem Bereich Lahntor mit dem dortigen Gebäudeensemble der Alten Universität ausgespart bleibt. Die ursprünglich hier vorgesehene Oberleitungsstrecke wurde entsprechend gekürzt.

Tabelle 3 zeigt eine Übersicht über die für Marburg geplanten Oberleitungsabschnitte:

Von	Nach	Länge[9]		Ø Ladeleistung
Ginseldorfer Weg	Klinikum (Abzw.)[10]	einspurig	4.256 m	50 kW
Südbahnhof	Kantstraße	zweispurig	1.326 m	70 kW
Hölderlinstraße	Botanischer Garten	einspurig	1.596 m	50 kW
Hauptbahnhof	Ginseldorfer Weg	zweispurig	1.298 m	79 kW
Gutenbergstraße	Südbahnhof	zweispurig	2.122 m	79 kW

Tabelle 3: Oberleitungsabschnitte Marburg

Die ausgewiesene Ladeleistung beschreibt lediglich den Energieanteil, der zusätzlich zur vom Fahrzeug für Traktion und Nebenverbraucher während der Fahrt benötigten Energie für die Nachladung zur Verfügung steht. Hier ist auf ebener Strecke eine gemittelte Ladeleistung von Weg und Zeit von ca. 79 kW möglich, auf den beiden Steigungsstrecken ist die mögliche Ladeleistung mit 70 bzw. 50 kW bedingt durch die Topographie geringer.

Mit dem rund zehn Kilometer langen Oberleitungsnetz wird auf der Linie 2 unter Berücksichtigung der teilweise nur in einer Richtung verfügbaren Segmente ein Oberleitungsanteil von etwas unter 31 % erreicht. Auf der Linie 7 beträgt der Oberleitungsanteil rund 41 %[11]. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass die Oberleitungsstrecken teilweise nur einspurig ausgeführt sind, so dass man eigentlich einen Umlauf aus Hin- und Rückfahrt kombiniert sehen müsste.

9 Aufgrund von topographischen und streckengeometrischen Abweichungen der Oberleitungsabschnitte je Fahrtrichtung wurde bei zweispurigen Abschnitten jeweils der Mittelwert ausgewiesen.

10 Das Abdrahten erfolgt vor dem Kreisverkehr an der Abzweigung zur Zufahrtsstraße zum Klinikgelände (Baldingerstraße). Damit soll zum einen ein komplexes Oberleitungsbauwerk im Kreisverkehr vermieden werden, andererseits sollen mögliche Einschränkungen oder Auflagen für die Errichtung und den Betrieb der Oberleitung durch Aspekte der EMT-Verträglichkeit (Klinikeinrichtungen!) umgangen werden. Für das Abdrahten wird keine infrastrukturseitige Hilfseinrichtung benötigt, die Stromabnehmer werden lediglich vom Fahrdraht abgezogen. Das kann bei einem kurzen Stillstand (etwa beim Einordnen in den Kreisverkehr) geschehen oder sogar bei geringer Geschwindigkeit während der Fahrt.

11 Weitere Eckdaten und Parameter zur Auslegung des Oberleitungssystems in Marburg können dem Ergebnisblatt 4.4.3 Auslegung Oberleitungssystem entnommen werden, das sich im Anhang befindet.

Linie	Streckenlänge	Oberleitung	Anteil
2	18,0 km	5,5 km[12]	30,8 %
7	10,2 km	4,1 km	41,2%

Tabelle 4: Oberleitungsanteile Marburg

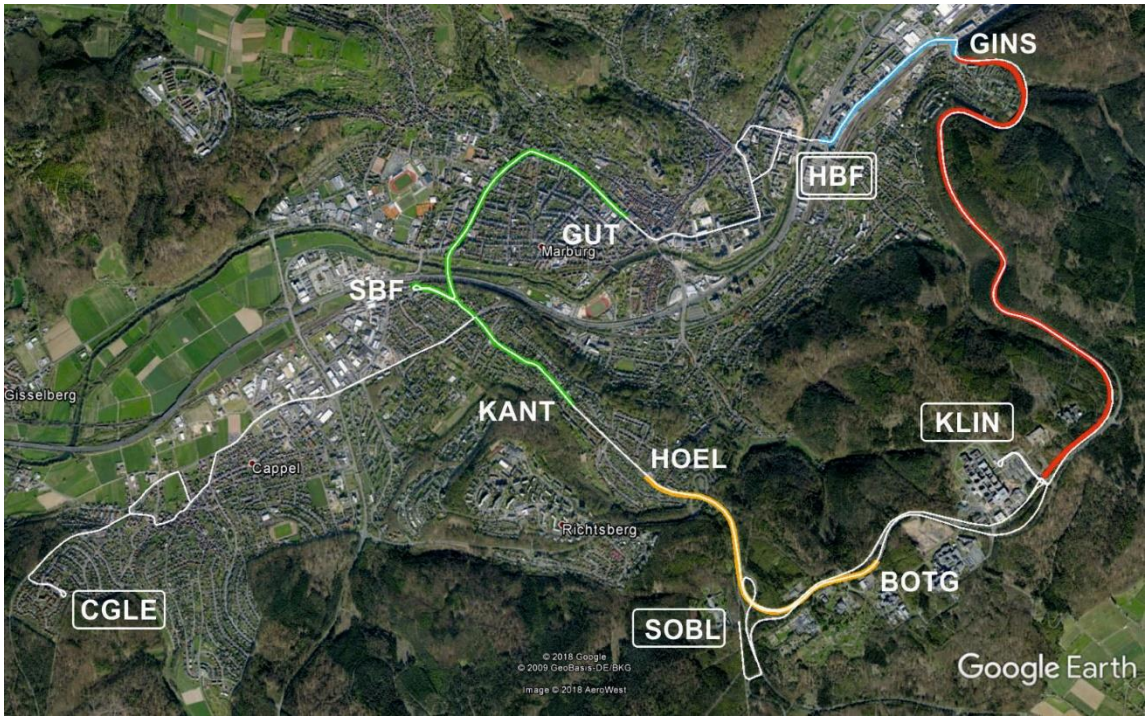


Abbildung 20: Lageplan der Oberleitungsabschnitte Marburg (rot, gelb: einspurig Richtung KLEIN; grün, blau: zweispurig)

Schließlich ist auch für den Betriebshof die Nachladung während der nächtlichen Betriebspause (bzw. bei Aufenthalten während des Tages) über das vorhandene Oberleitungssystem vorgesehen. Es wurde diskutiert, inwieweit es technisch, betrieblich und wirtschaftlich sinnvoll ist, für den Betriebshof ein Plug-In-System mit Kabel-Stecker-Verbindung vorzusehen. Jedoch kam man zu der Überzeugung, dass die Nutzung des ohnehin vorhandenen Abnehmersystems für die Oberleitung betrieblich und ergonomisch von Vorteil ist. Zwar muss der Abstellbereich des Betriebshofes für die HO-Busse ebenfalls mit Oberleitungen versehen werden, jedoch ist dies vom technischen und wohl auch wirtschaftlichen Aufwand nicht signifikant aufwändiger, als die Ausrüstung aller Abstellplätze mit einem Ladepunkt (inkl. Energiebereitstellung). Betrieblich sind sogar Vorteile zu erwarten.

12 Durchschnittswert der beiden einspurigen Oberleitungen in Bergaufrichtung, da jeweils nur ein Abschnitt befahren wird.

Die nächtliche Nachladung der Traktionsenergiespeicher bis zum zulässigen Ladehöchststand SOCmax erfolgt mit verminderter Ladeleistung unter Ausnutzung des gesamten zur Verfügung stehenden Zeitintervalls. Dadurch werden einerseits die Speichersysteme geschont, was deren Lebensdauer optimiert, andererseits werden unnötige Spitzenleistungen beim Anschlusswert des Betriebshofes an das öffentliche Stromnetz vermieden, welche den Netzentgeltanteil des Energiepreises beeinflussen.

Bei entsprechend schonender Ladung der Traktionsenergiespeicher unter Idealbedingungen über Nacht ist es möglich, bis zu einem SOC von 100 % zu laden. Damit ist im Umlaufbeginn des neuen Tageseinsatzes eine erhöhte Speicherreserve vorhanden, die sich insbesondere dann positiv auf den Tagesumlauf auswirkt, wenn die Ausrückfahrt weitere Distanzen ohne Oberleitung umfasst.

Auslegung Fahrzeug und Energiespeicher

In Marburg wurden ausschließlich Gelenkbusse untersucht.

In die Fahrzeugauslegung wurden folgende, für die Energiebilanzierung relevante Merkmale einbezogen:

- Fahrzeugtyp: HO-Bus
- Ladesystem: Standard-Oberleitung, Stangenstromabnehmer mit erhöhter Ladeleistung im Stand
- Fahrgastkapazität: 139
- Durchschnittliche Antriebsleistung ab Batterie: 160 kW
- Antriebsart: Zentralmotor (Anlagenwirkungsgrad 0,75 unter Berücksichtigung der Rekuperation)
- Klimatisierung: E-Bus-Klimaanlage mit reduzierter Leistung
- Heizung: Heizungsanlage HO-Bus mit normaler Leistung auch während des Akkubetriebes (oberleitungsfrei)
- Traktionsenergiespeicher: LTO-Akkumulator mit 100 kWh Nominalkapazität (nutzbar: 70-30 % SOC)

Ergebnisse Energiebilanzierung und SOC-Verlauf

Die Simulation des Energieverbrauchs erfolgte für jeden untersuchten Umlauf. Dabei zeigten sich die folgenden Ergebnisse:

Der Gesamtenergieverbrauch des Fahrzeugs setzt sich aus mehreren Teilverbräuchen zusammen:

- Energiebedarf des leeren Fahrzeugs (inkl. Zuschläge SORT und TOPO sowie Minderung durch Rekuperationsrate)
- Zuschlag Energiebedarf für die Fahrgastbeförderung (inkl. Zuschläge SORT und TOPO)
- Energiebedarf Nebenverbraucher

- Nebenverbraucher allgemein (betriebsnotwendige Fahrzeugsysteme wie Beleuchtung, Kompressoren, Lenkhilfe, Türantriebe etc.)
- Klimatisierung in der jeweils gewählten Konfiguration
- Heizung in der jeweils gewählten Konfiguration

Zu beachten ist, dass bei Heizung und Klimatisierung im Zuge der Worst-Case-Betrachtung nur der jeweils höhere Wert Berücksichtigung findet, da beide Systeme nicht gleichzeitig betrieben werden.

Energieverbrauch Gelenkbus	Traktionsenergie		Nebenverbraucher		
	Leerfahrzeug	Fahrgast-beförderung	Nebenverbraucher allgemein	Heizung	GESAMT
2/7 - L2 – 38 - MO	0,640 kWh/km	0,260 kWh/km	0,524 kWh/km	0,863 kWh/km	2,29 kWh/km
2/7 - L2 – 52 - MO	0,644 kWh/km	0,261 kWh/km	0,528 kWh/km	0,870 kWh/km	2,30 kWh/km
2/7 - L2 – 54 – MO	0,644 kWh/km	0,261 kWh/km	0,528 kWh/km	0,871 kWh/km	2,30 kWh/km
2/7 - L7 – 13 - MO	0,680 kWh/km	0,276 kWh/km	0,568 kWh/km	0,936 kWh/km	2,46 kWh/km
2/7 - L7 – 31 - MO	0,683 kWh/km	0,277 kWh/km	0,572 kWh/km	0,942 kWh/km	2,47 kWh/km
2/7 - L7 – 34 - MO	0,679 kWh/km	0,276 kWh/km	0,567 kWh/km	0,935 kWh/km	2,46 kWh/km
Mittelwert	0,930 kWh/km		1,451 kWh/km		2,38 kWh/km
Prozentualer Anteil	39%		61%		100%

Tabelle 5: Ergebnisse der Simulation des Energieverbrauchs (HO-Bus) Marburg

Aus Tabelle 5 lassen sich zahlreiche Erkenntnisse ableiten. In Summe beträgt der durchschnittliche Energieverbrauch eines Gelenkbusses auf allen untersuchten Marburger Umläufen 2,38 kWh pro Kilometer. Die Bandbreite der Ergebnisse liegt zwischen 2,29 kWh/km und 2,46 kWh/km.

Es zeigt sich, wie schon häufig im Rahmen von Elektrobusstudien festgestellt wurde, dass trotz der in Marburg anspruchsvollen topographischen Bedingungen die Traktionsenergie keineswegs den Verbrauch dominiert. Der Energieverbrauch der Nebenverbraucher liegt in Summe sogar über dem Energiebedarf für den Fahrzeugantrieb. Im Durchschnitt über alle betrachteten Umläufe sind die Anteile beim Gelenkbus wie folgt aufgeteilt:

- Anteil Traktion: 39 %
- Anteil Nebenverbraucher: 23 %
- Anteil Heizung/Klimatisierung: 38 %

Auf Basis dieser ermittelten Energieverbrauchsparameter wurden wiederum umlaufbezogen in BeSystO® die SOC-Verläufe simuliert. In einem SOC-Diagramm wurde für jeden betrachteten Umlauf die Ladeverlaufskurve des Traktionsenergiespeichers dargestellt.

Anhand dieser SOC-Diagramme lässt sich direkt ablesen, welche Umläufe in der festgelegten Systemkonfiguration realisiert werden können und welche nicht oder nur eingeschränkt. Erreicht ein Fahrzeug am Ende des Betriebstages den Betriebshof mit einem SOC oberhalb der SOC_{min}-Marke (bzw. idealerweise auch oberhalb der Reserve-Marke) und hat diese Grenzwerte auch während des Betriebstages nicht unterschritten, so ist dieser Umlauf erfolgreich umsetzbar.

Anhand des Umlaufs L2-52-MOin der nachfolgenden Abbildung 20 lassen sich die Grundlagen des SOC-Diagramms gut erläutern.

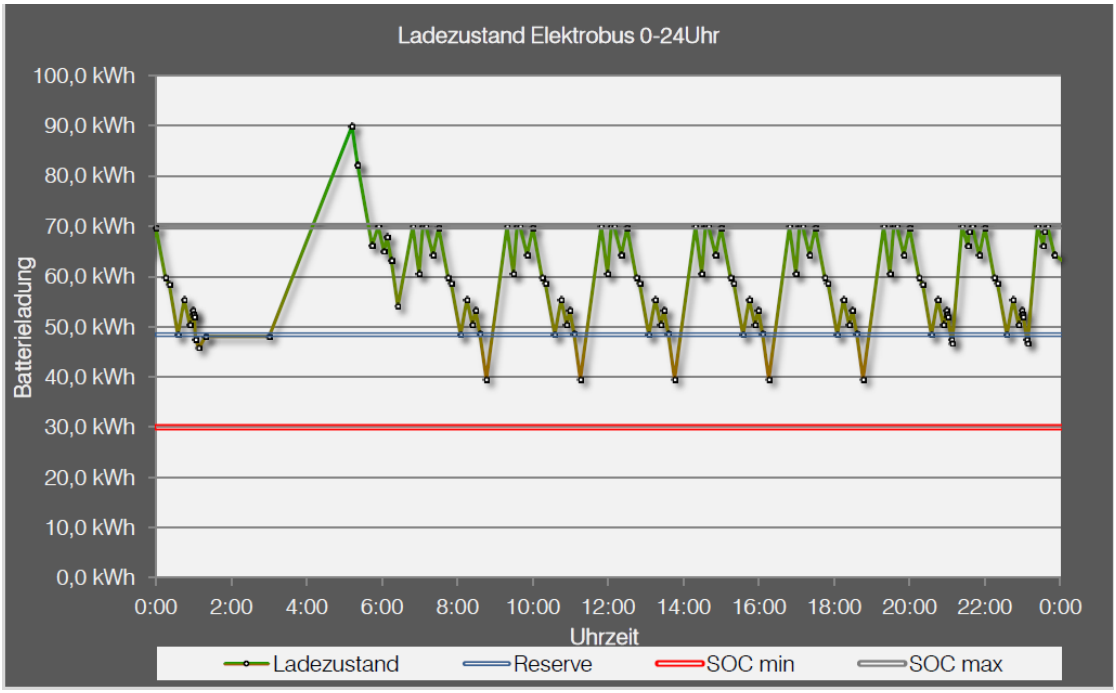


Abbildung 21: Exemplarisches SOC-Diagramm für Umlauf L2-52-MO (HO-Bus) Marburg

Der Grundaufbau zeigt den Tagesverlauf auf der X-Achse und die jeweilige Ladeleistung auf der Y-Achse. Weiterhin sind die Markierungen für den höchstzulässigen Ladezustand SOC_{max} (graue Linie) und den tiefstmöglichen Entladezustand SOC_{min} (rote Linie) sowie die blaue Linie für die Reserveenergie zur sicheren Rückkehr zum Betriebshof im Havariefall eingetragen.

Deutlich erkennbar beim Umlauf *L2-52-MO* ist die allmähliche Aufladung des Energiespeichers während der nächtlichen Betriebspause über den SOC_{max} hinaus. Diese nur bei der Übernachtladung empfohlene Nachladung ermöglicht, dass der Traktionsenergiespeicher nachdem Ausrücken aus dem Betriebshof bei Ankunft am Einsatzpunkt genügend

Energieinhalt hat, um den Tageseinsatz zu bewältigen. In der Folge sieht man eine stetig wechselnde Abfolge von Entlade- und Ladeabschnitten. Der SOC bleibt dabei bis auf wenige Ausnahmen während des gesamten Betriebstages in einem Bereich zwischen 50 und 70 kWh, wobei die Reserve kurzzeitig und regelmäßig auf dem Weg zum Linienendpunkt Sonnenblick unterschritten wird. In Anbetracht der dort vorhandenen stationären Ladestationen ist diese Unterschreitung vertretbar, da das Fahrzeug in der verfügbaren Wendezeit wieder vollständig nachgeladen wird. Des Weiteren sinkt der Ladezustand bei der Einrückfahrt bis zur Reserve hinab, was tolerierbar ist, da das Fahrzeug sich in Richtung Betriebshof bewegt.

Ein etwas anderes Bild zeigt das SOC-Diagramm des Umlaufs L7-34-MO. Wie in Abbildung 21zu sehen ist, verläuft das SOC-Diagramm auf der Linie 7 nach der Ausrückfahrt konstant in einem sehr komfortablen Bereich zwischen 60 und 70 kWh. Lediglich beim Einrücken in den Betriebshof sinkt der Ladezustand bis zu Reserve hinab, was wiederum tolerierbar ist, da das Fahrzeug sich auf dem Weg in den Betriebshof befindet.

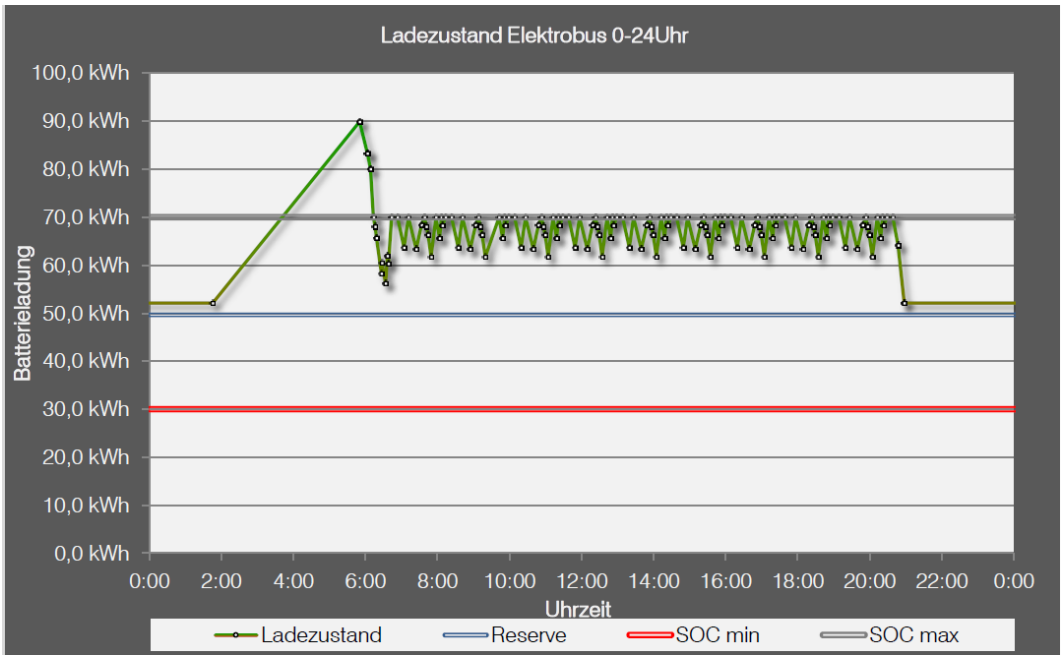


Abbildung 22: Exemplarisches SOC-Diagramm für Umlauf L7-34-MO (HO-Bus) Marburg

Umlaufnummer	Bewertung	Erläuterung/Anmerkung
2/7 - L2 – 38 - MO	möglich	Zeitgleich mit dem Einrücken erreicht der Bus SOCmin
2/7 - L2 – 52 - MO	möglich	SOC läuft in die Reserve, aber erreicht nicht SOCmin
2/7 - L2 – 54 – MO	möglich	SOC läuft kurzzeitig und regelmäßig in die Reserve, aber erreicht nicht SOCmin
2/7 - L7 – 13 - MO	möglich	SOC verläuft in einem sehr komfortablen Bereich zwischen 60 und 70 kWh
2/7 - L7 – 31 - MO	möglich	SOC verläuft in einem sehr komfortablen Bereich zwischen 60 und 70 kWh, lediglich beim Einrücken erreicht der Bus nahezu die Reserve
2/7 - L7 – 34 - MO	möglich	SOC verläuft in einem sehr komfortablen Bereich zwischen 60 und 70 kWh, lediglich beim Ein- und Ausrücken sinkt er unter 60 kWh erreicht aber nicht die Reserve

Tabelle 6: Bewertung der Umläufe (HO-Bus) Marburg

Tabelle 6 zeigt eine Zusammenfassung der Umlaufbewertungen. Demnach ist der Einsatz des HO-Bus-Systems mit reduzierter Oberleitung bei allen sechs untersuchten Umläufen möglich. Betriebliche Anpassungen könnten eine höhere Umsetzungsreife erzeugen, da bei einem Umlauf der Ladezustand beim Einrücken in einen kritischen Ladezustand abfällt. Ebenfalls fällt der Traktionsenergiespeicher bei zwei Umläufen in die Reserve ab. Wie schon beim im Hauptbericht betrachteten HO-Bus-System könnte auch beim HO-Bus-System mit reduzierter Oberleitung auf der Linie 7 aufgrund des hohen Oberleitungsanteils das Elektrobussystem mit deutlich kleiner dimensionierten Energiespeichern realisiert werden. Der lange oberleitungsfreie Abschnitt auf der Linie 2 zwischen Südbahnhof und Cappeler Gleiche erfordert jedoch die Speicherauslegung auf 100 kWh.

4.3.3.3 Technologieoption Batterie-Elektrobus (Overnight-Charger/Depot-Lader)

Auslegung Ladeinfrastruktur

Für die Technologieoption Batterie-Elektrobus als Overnight-Charger beschränkt sich die erforderliche Ladeinfrastruktur auf die Ausrüstung des Betriebshofes. Hier muss für jeden Elektrobus im Bereich der Abstellung ein Ladepunkt vorgesehen werden, um die erforderliche Energie (Nachladung der Traktionsenergiespeicher bis SOC_{max}, Erhaltungsladung, Systemenergie und Vorkonditionierung Fahrzeug) zu übertragen.

Systemstandard bei Overnight-Chargern ist die Plug-In-Lösung mittels Ladegerät und Wallbox. Die Übertragung ins Fahrzeug erfolgt über einen Combo-2-Stecker (vgl. Abschnitt 4.1). Als maximale Ladeleistung werden 150 kW vorgesehen, wobei davon ausgegangen werden kann, dass während der nächtlichen Betriebspause mit deutlich geringerer Ladeleistung geladen werden kann.

Im betrachteten Untersuchungsfall der Linie 2/7 wird für jedes Fahrzeug ein Ladegerät bis 150 kW (DC) vorgehalten. Für die Energiebereitstellung am Betriebshof werden zwei Unterwerke als 1.600 kVA Kompaktstationen ausgelegt.

Zur Vermeidung von Leistungsspitzen und somit zur Verringerung des Anschlusspreises und auch der Investitionskosten für die Herstellung einer ausreichenden Energiebereitstellung sollte ein intelligentes Lademanagementsystem etabliert werden. Über Datenschnittstellen zum Betriebsleitsystem kann so für einzelne Fahrzeuge in Abhängigkeit von deren Ein- und Ausrückzeitpunkt die Nachladung zeitversetzt und/oder mit reduzierter Leistung erfolgen.

Auslegung Fahrzeug und Energiespeicher

In die Fahrzeugauslegung wurden folgende, für die Energiebilanzierung relevante Merkmale einbezogen:

- Fahrzeugtyp: Batterie-Elektrobus als Overnight-Charger
- Ladesystem: Externes Ladegerät (Plug-In-System)
- Fahrgastkapazität: 114
- Durchschnittliche Antriebsleistung ab Batterie: 160 kW (18 m)
- Antriebsart: Zentralmotor (Anlagenwirkungsgrad 0,75 unter Berücksichtigung der Rekuperation)
- Klimatisierung: E-Bus-Klimaanlage mit reduzierter Leistung
- Heizung: Hybridheizung Diesel und Variante vollelektrische Heizung
- Traktionsenergiespeicher: Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator ($LiFePO_4$) mit 390 kWh Nominalkapazität (nutzbar: 90-10 % SOC)

Aufgrund des im Vergleich zum HO-Bus abweichenden Anforderungsprofils kommen im Overnight-Charger LiFePO4-Akkumulatoren zum Einsatz. Während beim HO-Bus aufgrund der zahlreichen, vergleichsweise kurzen Ladevorgänge mit hoher Ladeleistung während des Betriebstages ein Speichermedium mit hoher Zyklenfestigkeit und hoher Energieaufnahme benötigt wird, so steht beim Overnight-Charger die Maximierung der Energiedichte im Fokus, um bei noch vertretbarem Energiespeichergewicht die für den Tagesumlauf erforderliche Energiemenge mitführen zu können. Hier sind LiFePO4-Zellen gegenüber den im HO-Bus konfigurierten LTO-Akkumulatoren im Vorteil. Zudem sind die Lithium-Eisenphosphat-Akkus etwas preisgünstiger.

Aufgrund der erwarteten hohen energetischen Anforderungen auf den Linien 2/7 wurde der Energiespeicher mit einer Nominalkapazität von 390 kWh konfiguriert. Aufgrund des Eigengewichts des Speichers von 2,7 Tonnen reduziert sich die zulässige Fahrgastzahl im nicht aufgelasteten Gelenkbus auf 114. Diese Fahrgastkapazität liegt unter dem Wert der aktuellen Diesel-Gelenkbusse (~ 120 Fahrgäste). Im Tagesmittel dürfte die reduzierte Beförderungskapazität ausreichen, in der Frühspitze könnte es zu Engpässen kommen.

Um den Bedarf an elektrischer Energie nicht weiter zu erhöhen, fiel beim Beheizungskonzept die Entscheidung auf eine Hybridheizung, bei der Spitzenheizleistungen im Win-

ter durch eine Diesel-Zusatzheizung gewährleistet werden. Als Variantenvergleich wurde dennoch die Ausstattung mit vollelektrische Heizung kurz gegenübergestellt.

Ergebnisse Energiebilanzierung und SOC-Verlauf

Vorbemerkung: Bei der Untersuchung aller Umläufe auf der Linie 2/7 für die Technologieoption HO-Bus stellte sich heraus, dass die Umläufe ähnlich homogen sind und sich nicht signifikant hinsichtlich der Struktur und des Energieverbrauchs voneinander unterscheiden. Daher wird bei den weiteren Technologieoptionen nur zwei Umläufe im Detail betrachtet. Hierfür wurde der Umlauf 26 (2/7 – L7 – 26 - MO) und 28 (2/7 – L2 – 28 - MO) ausgewählt, die in Bezug auf die Aufgabenstellung am repräsentativsten sind.

Bei der Simulation des Energieverbrauchs für Umlauf 26 und 28 zeigten sich folgende Ergebnisse:

Energieverbrauch Gelenkbus	Leerfahrzeug	Fahrgastbeförderung	Nebenverbraucher	Klimaanlage	Heizung	GESAMT
2/7 – L7 – 26 - MO	0,664 kWh/km	0,269 kWh/km	0,550 kWh/km	0,248 kWh/km	0,385 kWh/km	1,869 kWh/km
2/7 – L2 – 28 - MO	0,646 kWh/km	0,262 kWh/km	0,531 kWh/km	0,239 kWh/km	0,371 kWh/km	1,810 kWh/km

Tabelle 7: Ergebnisse der Simulation des Energieverbrauchs (Batterie-Elektrobus Overnight-Charger) Marburg

In Summe beträgt der durchschnittliche Energieverbrauch eines Gelenkbusses auf Umlauf 26 in Marburg 1,869 kWh pro Kilometer. Der im Vergleich zum HO-Bus etwas niedrigere Verbrauch begründet sich durch die geringere Heizleistung, weil im hier konfigurierten System ein Teil der Heizleistung durch die Diesel-Zusatzheizung erbracht wird und somit nicht in die Bilanz der elektrischen Energie fällt. Weiterhin zeigt sich, dass die Heizung energetisch höher gegenüber der Klimaanlage ist

Im Durchschnitt sind die Anteile beim Gelenkbus wie folgt aufgeteilt:

- Durchschnittlicher Verbrauch des Umlaufs 26:1,869 kWh/km 100 %
  - Anteil Traktion: 50 %
  - Anteil Nebenverbraucher: 29 %
  - Anteil Heizung/Klimatisierung: 21 %

Mit BeSystO® wurden auch hier die SOC-Diagramme über den Verlauf der Ladezustandskurve an einem typischen Einsatztag erstellt. Dabei zeigt sich für Umlauf 26 folgendes Resultat:

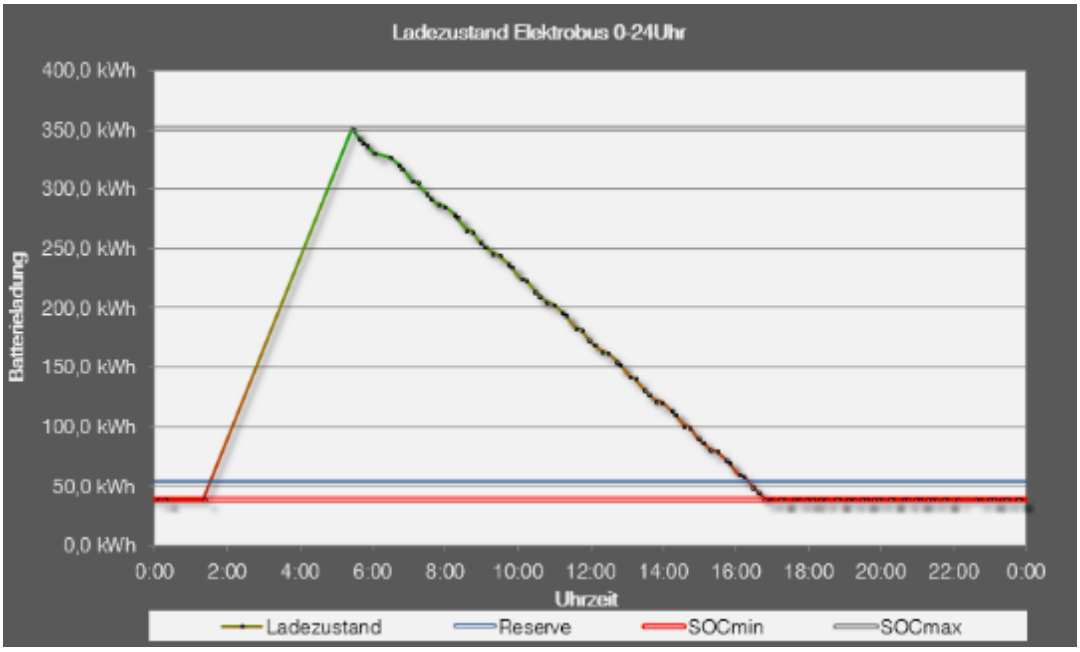


Abbildung 23: SOC-Diagramm Linie 7 Umlauf 26 (Batterie-Elektrobus Overnight-Charger) Marburg

Es ist klar zu erkennen, dass der Batterie-Elektrobus in der gewählten Konfiguration nicht als Overnight-Charger betrieben werden kann. Bereits gegen 17 Uhr fällt der Ladezustand des Traktionsenergiespeichers unter die zulässige SOC_{min}-Grenze von 10 %. Eine stichprobenartige Überprüfung anderer Umläufe in BeSystO® zeigte identische Ergebnisse, wie an Abbildung 23 gut zu erkennen ist.

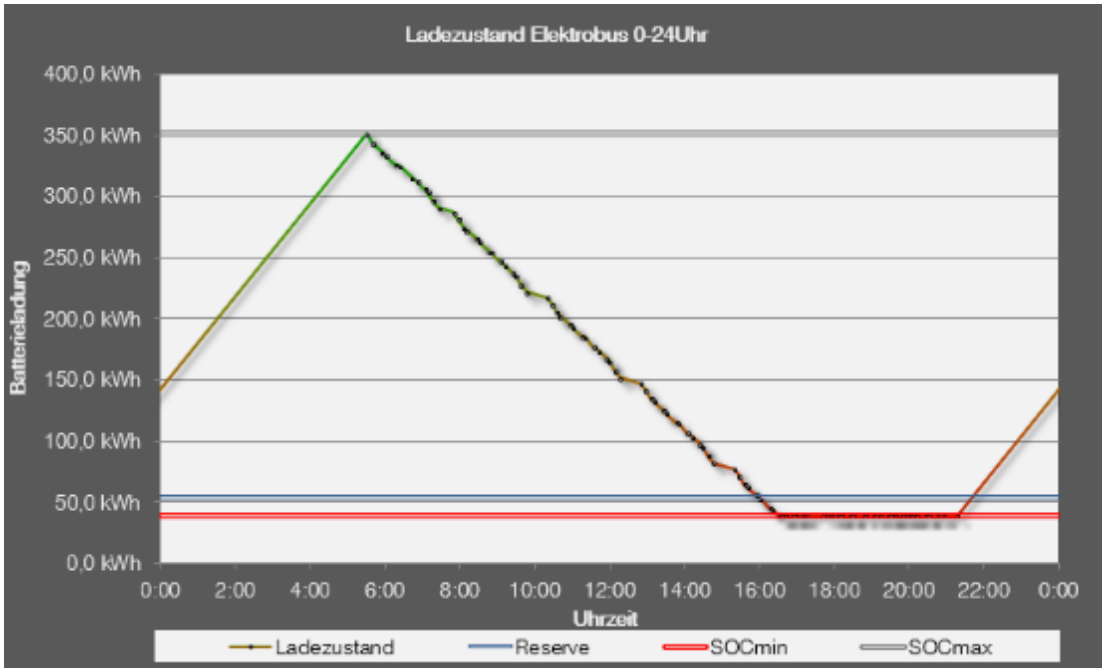


Abbildung 24: SOC-Diagramm Linie 2 Umlauf 28 (Batterie-Elektrobus Overnight-Charger) Marburg

In der Varianten mit vollelektrischer Heizung zeigen sich folgende Ergebnisse:

- Durchschnittlicher Energiebedarf: 3,134 kWh/km 100 %
  - Anteil Traktion: 29 %
  - Anteil Nebenverbraucher: 18 %
  - Anteil Heizung/Klimatisierung: 53 %

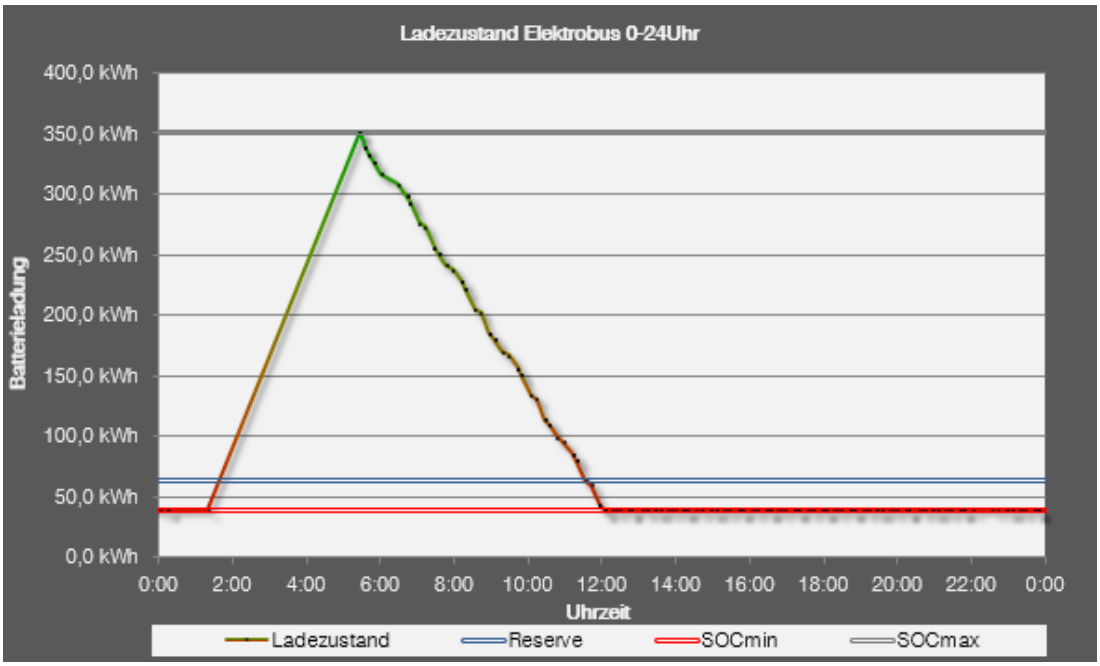


Abbildung 25: SOC-Diagramm Linie 7 Umlauf 26 (Batterie-Elektrobus Overnight-Charger vollelektrische Heizung) Marburg

Abbildung 24 entspricht der Fahrzeugkonfiguration mit vollelektrischer Heizung.

Um auf der Linie 2/7 ein Elektrobussystem mit dem Ladekonzept Overnight-Charger zu realisieren, müssen also Systemmodifikationen vorgenommen werden. Eine weitere Vergrößerung des Traktionsspeichers erscheint aus wirtschaftlichen Gründen nicht sinnvoll. Zum einen sinkt das Platzangebot der Fahrzeuge weiter, zum anderen steigt der Fahrzeugpreis.

Es bleibt also nur die Möglichkeit, die Umläufe anzupassen und zusätzliche Fahrzeuge auf der Linie 2/7 einzusetzen. Für dieses Betriebsszenario wurden mit zwei zusätzlichen Fahrzeugen dreizehn Gelenkbusse auf der Linie 2/7 vorgesehen. Die Fahrzeuge rücken während des Umlaufs, vor Erreichen eines kritischen Ladezustands zum Betriebshof ein und werden dort während einer etwa zweieinhalbstündigen Aufenthaltszeit nachgeladen. Die Fahrer wechseln auf ein anderes, bereits geladenes Fahrzeug (sofern nicht ohnehin ein planmäßiger Dienstwechsel stattfindet).

Sollte sich diese Variante für eine spätere Realisierung konkretisieren, so könnte auch hier im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse noch untersucht werden, inwieweit sich Speichergröße und Nachladepause weiter optimieren lassen.

Es wurde keine vollumfängliche Umlaufüberplanung durchgeführt. Es wurde annäherungsweise untersucht, wie sich die Implementierung zweier Zusatzfahrzeuge betrieblich und wirtschaftlich auswirken könnte.

Eine Auslegung des Overnight-Chargers mit vollelektrischer Heizung ist in diesem Zusammenhang nicht weiter zu verfolgen. Wie sich gezeigt hat, laufen die Energiespeicher hierbei noch deutlich schneller leer. Daher wären deutlich mehr als die zuvor beschriebenen zwei Zusatzfahrzeuge erforderlich, um die Umläufe abzubilden, vermutlich wäre eine annähernde Verdopplung des Fahrzeugeinsatzes die Folge. Vor diesem Hintergrund erfolgt keine separate Betrachtung des Overnight-Chargers mit vollelektrischer Heizung in der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung.

Für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen wird nur das Betriebsszenario mit den beiden Zusatzfahrzeugen mit Hybridheizung untersucht. Die Auslegung der Betriebshof-Ladeinfrastruktur erhöht sich entsprechend auf 13 externe Ladegeräte, die Energiebereitstellung durch Unterwerke muss nicht angepasst werden.

4.3.3.4 Technologieoption Batterie-Elektrobus (Opportunity-Charger)

Auslegung Ladeinfrastruktur

In der Technologieoption Batterie-Elektrobus als Opportunity-Charger sind sowohl der Betriebshof als auch die ausgewählten Endhaltestellen mit Ladeinfrastruktur auszustatten.

Die Ausrüstung des Betriebshofes ist mit der des Overnight-Charger-Konzeptes identisch. Zum einen empfiehlt es sich, für den Fall außerplanmäßiger Betriebszustände auch mit einer höheren Ladeleistung arbeiten zu können. Für den hier betrachteten Fall der Linie 2/7 werden also auch für das Ladekonzept Opportunity-Charger elf Ladegeräte bis 150 kW (DC) vorgehalten. Für die Energiebereitstellung am Betriebshof werden weiterhin zwei Unterwerke als 1.600 kVA Kompaktstationen ausgelegt.

Die Ladepunkte an den Endhaltestellen werden als Docking-Station für die Schnellladung ausgelegt. Die Energieübertragung erfolgt über das Fahrzeugdach mittels eines Pantographen, der entweder vom Fahrzeug ausgefahren oder von der Ladesäule zu diesem abgesenkt wird (siehe Abbildung 4). Für den Anwendungsfall in Marburg wurden vier Ladestationen (Docking-Station) mit einer Leistung von bis zu 360 kW konfiguriert. Die Anbindung an das Mittelspannungsnetz erfolgt über ein 650 kVA Unterwerk als Kompaktstation.

Als potentielle Ladepunkte wurden dieselben Endhaltestellen wie bei der Technologieoption HO-Bus ausgewählt:

- Hauptbahnhof
- Cappeler Gleiche
- Klinikum

- Sonnenblick

Auslegung Fahrzeug und Energiespeicher

In die Fahrzeugauslegung wurden folgende, für die Energiebilanzierung relevante Merkmale einbezogen:

- Fahrzeugtyp: Batterie-Elektrobus als Opportunity-Charger (Gelegenheitslader)
- Ladesystem: Externes Ladegerät (Plug-In-System)
- Fahrgastkapazität: 129
- Durchschnittliche Antriebsleistung ab Batterie: 160 kW
- Antriebsart: Zentralmotor (Anlagenwirkungsgrad 0,75 unter Berücksichtigung der Rekuperation)
- Klimatisierung: E-Bus-Klimaanlage mit reduzierter Leistung
- Heizung: Hybridheizung Diesel und Variante vollelektrische Heizung
- Traktionsenergiespeicher: Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator ($LiFePO_4$) mit 200 kWh Nominalkapazität (nutzbar: 80-20 % SOC)

Aufgrund der regelmäßigen Nachladungen im Tagesverlauf kann beim Opportunity-Charger ein deutlich kleinerer Traktionsspeicher konfiguriert werden. Die stationären Nachlademöglichkeiten mit vier Ladepunkten sind identisch wie beim HO-Bus, jedoch ohne die ergänzenden Nachladephasen unter der Oberleitung.

Bei der Zelltechnologie fiel hier ebenfalls die Wahl auf den Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator ($LiFePO_4$) als Hochleistungsvariante und nicht auf Lithium-Titanat-Ausführung (LTO) wie beim HO-Bus. Den höheren Leistungsanforderungen des Schnellladens wurde dadurch begegnet, dass der $LiFePO_4$-Speicher beim Opportunity-Charger nur in einem etwas schmaleren Ladeband zwischen 80 und 20 % SOC betrieben wird (und nicht zwischen 90 und 10 % wie beim Overnight-Charger). Somit lässt sich trotz der häufigeren Ladevorgänge mit teils höherer Ladeleistung eine vergleichbare Lebensdauer erzielen.

Auch beim Opportunity-Charger wurde eine Hybridheizung ausgewählt, bei der die Spitzenheizleistungen im Winter durch eine Diesel-Zusatzheizung gewährleistet werden.

Ergebnisse Energiebilanzierung und SOC-Verlauf

Bei der Simulation des Energieverbrauchs für Umlauf 26 und 28 zeigten sich folgende Ergebnisse:

Energieverbrauch Gelenkbus	Leerfahrzeug	Fahrgast-beförderung	Neben-verbraucher	Klimaanlage	Heizung	GESAMT
2/7 – L7 – 26 - MO	0,664 kWh/km	0,269 kWh/km	0,550 kWh/km	0,248 kWh/km	0,385 kWh/km	1,869 kWh/km
2/7 – L2 – 28 - MO	0,646 kWh/km	0,262 kWh/km	0,531 kWh/km	0,239 kWh/km	0,371 kWh/km	1,810 kWh/km

Tabelle 8: Ergebnisse der Simulation des Energieverbrauchs (Batterie-Elektrobus Opportunity-Charger) Marburg

Der im Vergleich zum HO-Bus etwas niedrigere Verbrauch begründet sich durch die vorkonfigurierten Nebenaggregate. Es zeigt sich, dass der Verbrauch der Heizung gegenüber der Klimaanlage stärker hervortritt.

So teilen sich beispielhaft die energetischen Anteile wie folgt auf:

- Durchschnittlicher Energiebedarf für Umlauf 28:1,869 kWh/km 100 %
  - Anteil Traktion: 50 %
  - Anteil Nebenverbraucher: 29,4 %
  - Anteil Heizung/Klimatisierung: 20,6 %

Das mit BeSystO® erstellte SOC-Diagramm über den Verlauf der Ladezustandskurve an einem typischen Einsatztag zeigt sich für Umlauf 26 und 28 in der Technologieoption Opportunity-Charger folgende Bilder:

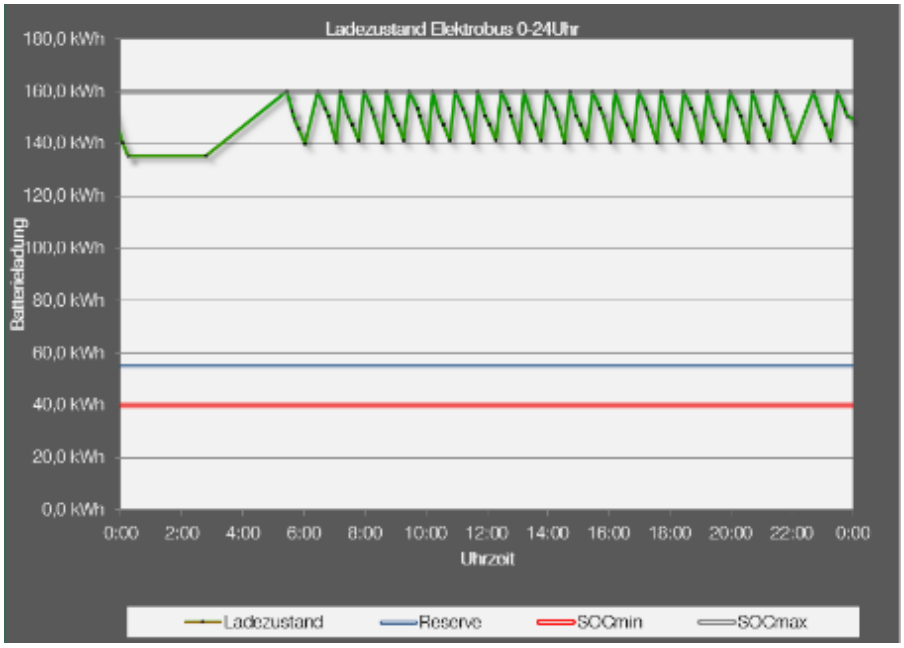


Abbildung 26: SOC-Diagramm Linie 7, Umlauf 26 (Batterie-Elektrobus Opportunity-Charger) Marburg

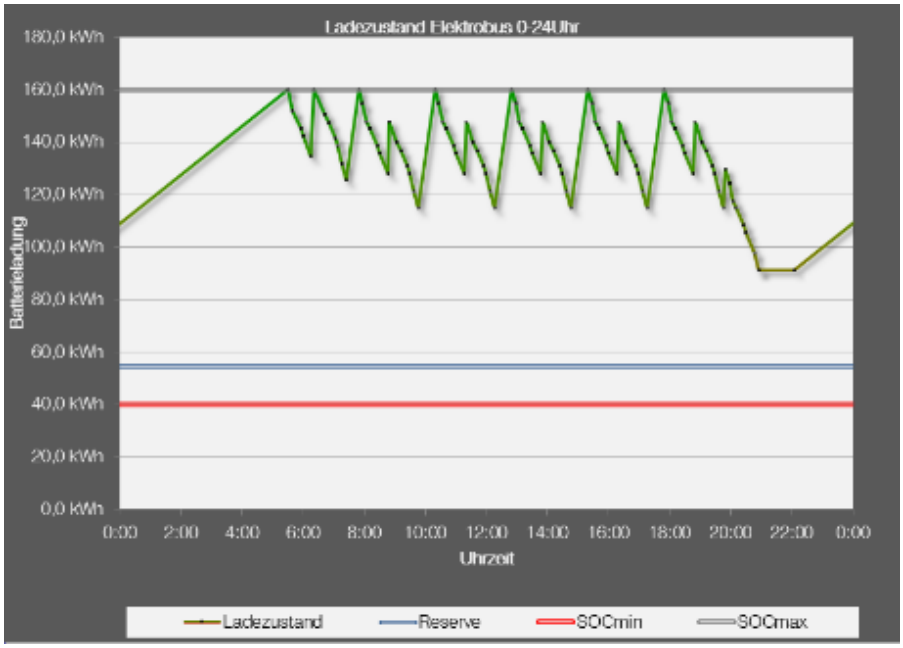


Abbildung 27: SOC-Diagramm Linie 2, Umlauf 28 (Batterie-Elektrobus Opportunity-Charger) Marburg

Im Diagramm erkennt man das typische „Sägezahnmuster“, das durch die Zwischenladungen an den Linienendpunkten entsteht. Der Umlauf 26 lässt sich problemlos abbilden. Der Umlauf 28 ist energetisch etwas anspruchsvoller, verletzt aber zur keiner Zeit die vorkonfigurierten SOC-Grenzwerte.

Wie schon beim HO-Bus-System könnte auch in der Variante Opportunity-Charger der Betrieb auf der Linie 2/7 mit kleiner dimensionierten Energiespeichern realisiert werden. Bei den Umläufen 21 und 34 der Linie 2 kommt hinzu, dass in den Abendstunden längere Wendezeiten an der Endhaltestelle St.-Martin-Straße absolviert werden. Würden diese Wendezeiten auf einen mit Ladeinfrastruktur ausgestatteten Endpunkt verlagert, ließen sich alle betrachteten Umläufe mit einem 150-kWh-Energiespeicher abbilden. Alternativ könnte die Haltestelle St.-Martin-Straße mit Ladeinfrastruktur ausgerüstet werden, was jedoch nur für zwei der betrachteten Umläufe sinnvoll wäre und daher aus wirtschaftlichen Gründen wohl ausscheidet.

In der Varianten mit vollelektrischer Heizung zeigen sich folgende Ergebnisse:

- Durchschnittlicher Energiebedarf: 3,134 kWh/km 100 %
  - Anteil Traktion: 29 %
  - Anteil Nebenverbraucher: 18 %
  - Anteil Heizung/Klimatisierung: 53 %

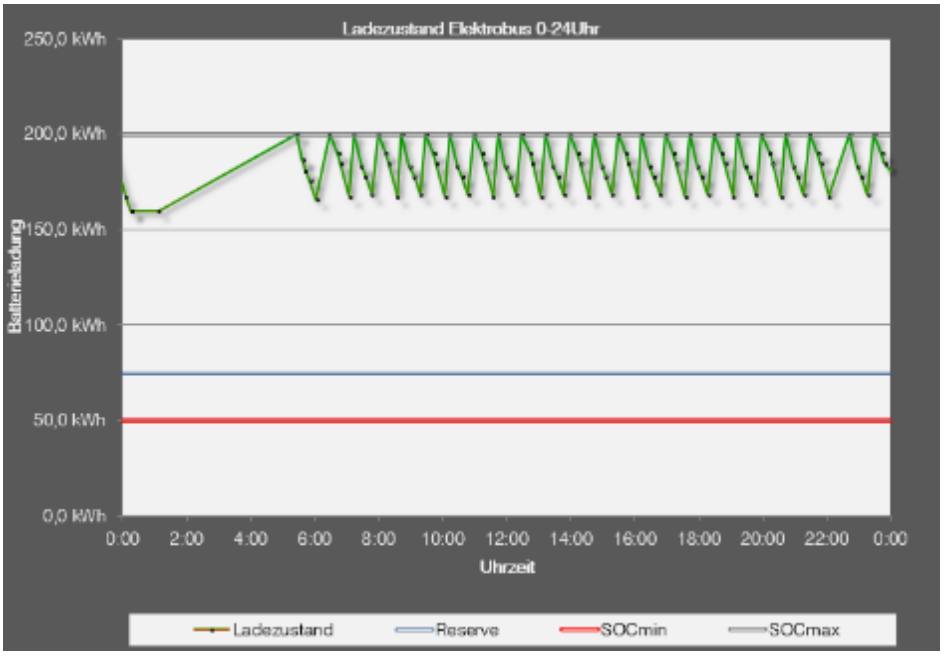


Abbildung 28: SOC-Diagramm Linie 7, Umlauf 26 (Batterie-Elektrobus Opportunity-Charger vollelektrisch) Marburg

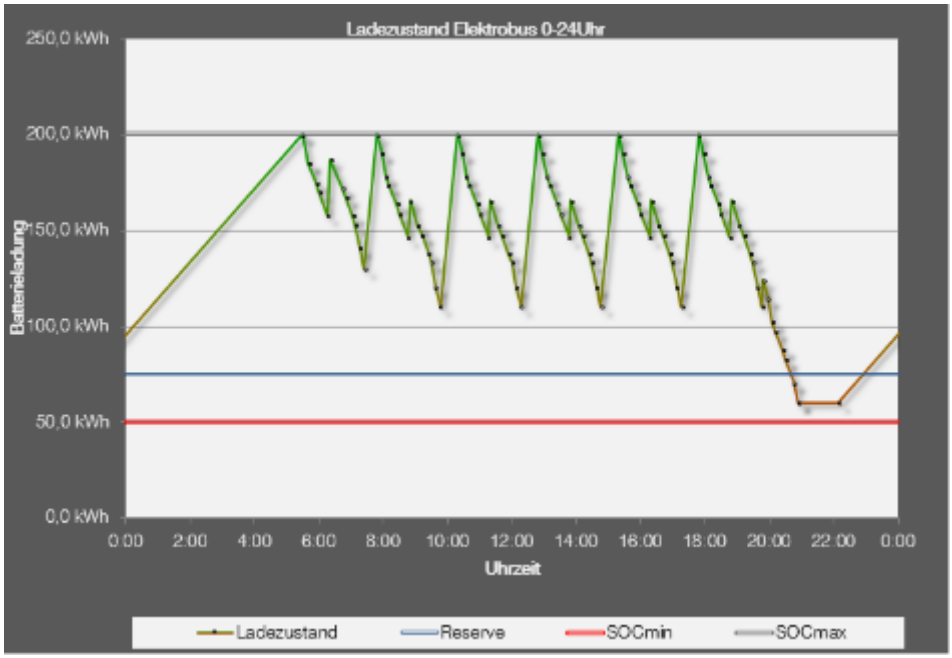


Abbildung 29: SOC-Diagramm Linie 2, Umlauf 28 (Batterie-Elektrobus Opportunity-Charger vollelektrisch) Marburg

Anhand des Umlaufs 28 der Linie 2 (vgl. Abbildung 29) wird zwar die Reservekapazität unterschritten, doch wird der minimale SOC nicht erreicht. Gänzlich unbeeindruckt verhält sich der Umlauf 26 der Linie 7. Hier steigt die Bandbreite des SOC-Verlaufs um etwa 25 kWh an. Dabei steht der vollelektrische Opportunity-Charger zur keiner Zeit vor großen energetischen Herausforderungen. Die Linie 7 ist demnach ohne jede weitere Anpassung komplett als Opportunity-Charger mit vollelektrischer Heizung abbildbar.

Grundsätzlich zeigte sich bei der Überprüfung der Variante mit vollelektrischer Heizung zunächst, dass in der gewählten Konfiguration bereits 7 der 11 Umläufe ohne weitere Anpassungen gefahren werden könnten. Erhöht man die Energiespeicherkapazität auf 250 kWh, so können zwei weitere Umläufe der Linie 2 abgebildet werden. Diese verbliebenen zwei Umläufe haben in den Abendstunden längere Wendezeiten an der nicht mit Schnellladern ausgerüsteten Endhaltestelle St.-Martin-Straße. Diese Wenden führen dazu, dass die Umläufe 2-21 und 2-34 in allen Technologievarianten am ehesten in Grenzbereiche des SOC geraten. Grundsätzlich erscheint eine Wendezeitverlagerung auf eine mit Ladeinfrastruktur ausgestattete Endhaltestelle (z. B. Hauptbahnhof) als sinnvoll. In der Variante Opportunity-Charger mit vollelektrischer Heizung wären dann alle Umläufe auch der Linie 2 mit dem 250 kWh-Speicher realisierbar.

Die Fahrgastkapazität sinkt mit dem größeren Speicher um etwa 4 % auf 124 Plätze. Damit liegt die Platzkapazität weiterhin über der des Overnight-Chargers mit Hybridheizung. Aus diesem Grund kommt für diese Variante auch eine Wirtschaftlichkeitsuntersuchung in Betracht (vgl. Abschnitt 5.3.4).

4.3.3.5 Zwischenfazit technische Machbarkeitsuntersuchung

Die Untersuchung der technischen Machbarkeit hat gezeigt, dass der Einsatz elektromobiler Technologien auf der Linie 2/7 grundsätzlich möglich ist. Mit allen untersuchten Technologieoptionen lässt sich der Dieselbusbetrieb ersetzen, wobei im Falle des Batterie-Elektrobusses als Overnight-Charger eingeschränkt werden muss, dass sich die aktuellen Umläufe nur durch zwei zusätzliche Fahrzeuge und eine Ladepause während des Tages abbilden lassen („Depot-Charger“).

Bezüglich der Integrierbarkeit in das städtische Umfeld sind der Overnight-Charger zu bevorzugen, da diese Technologieoption keine baulichen Eingriffe und Aufbauten im öffentlichen Stadtraum erforderlich machen. Beim Opportunity-Charger sind dagegen die Linienendpunkte, beim HO-Bus zusätzlich längere Streckenabschnitte mit Oberleitungsanlagen auszurüsten. Beim Overnight-Charger ist dagegen zu untersuchen, ob am Betriebshof-Standort die Energiebereitstellung für die Übernachtladung der (perspektivisch) gesamten Busflotte erfolgen kann.

Unter den gegebenen topographischen Umständen und nicht zuletzt auch vor dem Hintergrund der klimatischen Bedingungen in Südwestdeutschland würde – außer bei der Variante HO-Bus, die über eine kontinuierliche Energieversorgung auf den Anstiegen verfügt – ein Elektrobussystem mit einer fossilen Hybrid-Zusatzheizung ausgestattet werden. Diese kann durch den Einsatz alternativer Brennstoffe wie Bioethanol durchaus emissionsarm und sogar lokal CO2-neutral betrieben werden.

Die Varianten mit vollelektrischer Heizung im Overnight- und Opportunity-Charger dienen daher eher der Herstellung einer direkten Vergleichbarkeit mit dem HO-Bus, als dass sie

eine Option mit Realisierungschance darstellen. Gleichwohl hat sich gezeigt, dass auf der Linie 7 auch die vollelektrische Heizung ohne weitere Anpassungen gefahren werden könnte. Der Overnight-Charger hingegen, der schon mit einer Hybrid-Zusatzheizung nur durch eine einmalige Zwischennachladung auf dem Betriebshof und die daraus folgende Erhöhung der Fahrzeuganzahl um zwei Einheiten machbar wäre, scheitert an der elektrischen Zusatzheizung vollständig.

Aus rein technisch-betrieblicher Perspektive zeichnet sich insofern noch keine klare Vorzugsoption ab, so dass sich eine Handlungsempfehlung erst nach Einbeziehung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ableiten lässt. Hier wird insbesondere die Abwägung zwischen zusätzlich notwendigen Fahrzeugen und erforderlicher Ladeinfrastruktur im Linienverlauf durchzuführen sein.

4.4 Ergebnisse Wirtschaftlichkeitsuntersuchung Marburg

4.4.1 HO-Bus-System (optimierte Linienverläufe)

Investitionen

Die Gesamt-Investitionen für die Umsetzung der Technologieoption HO-Bus wie in Abschnitt 4.5.2 beschrieben betragen 24.279.233 Euro. Diese untergliedern sich wie folgt:

- Fahrzeug (11 Gelenkbusse): 9.759.684 EUR
- Ladeinfrastruktur: 12.656.515 EUR
- Sonstige Kosten 1.863.034 EUR
- **Gesamtkosten: 24.279.233 EUR**

Unter Einbeziehung einer angenommenen Förderung auf die systembedingten Zusatzkosten reduzieren sich die Gesamt-Investitionen auf einen Betrag von 8.258.204 Euro. Die Untergliederung in die Teilkategorien stellt sich in diesem Fall wie folgt dar:

- Fahrzeug (11 Gelenkbusse): 4.795.384 EUR
- Ladeinfrastruktur: 2.531.303 EUR
- Sonstige Kosten 931.517 EUR
- **Gesamtkosten: 8.258.204 EUR**

Eine weitere Untergliederung der einzelnen Positionen ist im Anhang wiedergegeben.

Kostenvergleich Ohnefall (Dieselbus)

Der Kostenvergleich zum aktuellen Dieselbus-Betrieb bezieht die zuvor ausgewiesenen Investitionen (bzw. den Kapitaldienst zu deren Umsetzung) sowie die laufenden Betriebskosten ein.

Über einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren betragen die durchschnittlichen Betriebskosten pro Fahrzeugkilometer im mittleren Kostenentwicklungsszenario[13] am Beispiel des Umlaufs 26:

Middle-Case-b	ohne Förderung	mit Förderung
durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten Elektrobus:	4,32 EUR/km	3,43 EUR/km
durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten Dieselbus:	3,90 EUR/km	3,90 EUR/km
Mehr- (+) / Minder- (-) kosten HO-Bus:	**+0,41 EUR/km**	**-0,47 EUR/km**

Tabelle 9: Durchschnittliche laufleistungsbezogene Kosten HO-Bus vs. Dieselbus Marburg

In der Jahresscheibenbetrachtung stellt sich die Entwicklung der laufleistungsbezogenen Mehr-und Minderkosten als Absolutwerte wie folgt dar:

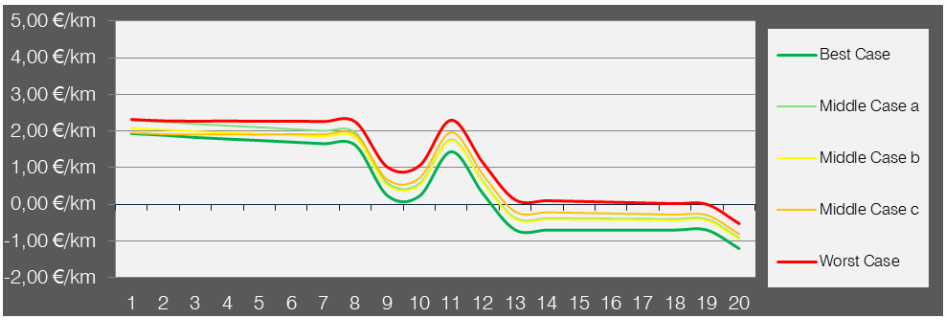


Abbildung 30: Entwicklung der laufleistungsbezogenen Mehr- und Minderkosten für den HO-Bus Marburg (ohne Förderung)

Bezogen auf einen Gesamtbetrachtungszeitraum von 20 Jahren muss im Falle einer Umstellung der Linie 2/7 auf die Technologieoption HO-Bus-System (Reduzierte Oberleitung) mit Mehrkosten in Höhe von durchschnittlich 0,48 EUR pro Fahrzeugkilometer im Vergleich zum aktuellen Dieselbus-Betrieb gerechnet werden. In den ersten 8 Jahren liegen die Mehrbelastungen in einem Bereich um 2,00 Euro/Fz-km. Nach Ende des Abschreibungszeitraums von 8 Jahren für die Fahrzeuge sinken die Mehr-kosten in den Bereich unter 1 Euro/Fz-km. Nach einem Anstieg, bedingt durch den Restwerterlös des im Jahre

13 Das mittlere Kostenentwicklungsszenario Middle-Case-b definiert eine mittlere Kostenentwicklung beim zu untersuchenden E-Bus-System und eine ebenfalls mittlere Kostenentwicklung für den Dieselbus. Dies umfasst sowohl Investitionskosten (Fahrzeuge, Energiespeicher) als auch Betriebskosten (Preisentwicklung Dieselkraftstoff und elektrische Energie). Im Berichtsteil wird jeweils das Szenario „Middle-Case-b“ betrachtet.

12 auszusondernden Dieselbusses erreicht das HO-Bus-System (Reduzierte Oberleitung) schließlich im 13. Betriebsjahr den Bereich der Rentabilität.

Der Verlauf der Jahresmehrkosten im Betrachtungszeitraum von 20 Jahren ist analog zur laufleistungsbezogenen Darstellung.

Im Anhang 7.6 und 7.7 sind ergänzend Darstellungen unter Berücksichtigung einer Förderung enthalten. Nimmt man eine erreichbare Förderquote von 80 % auf systembedingte Mehrkosten bei Fahrzeugen und Infrastruktur an, so reduzieren sich die Beträge der Mehrkosten. Die Systemrentabilität kann in der Betrachtung mit Förderung bereits im 12. Betriebsjahr erwartet werden.

Die sehr hohen Anfangsinvestitionen in Fahrzeuge, Energiespeicher, Ladestationen und Oberleitungsnetz (zuzüglich weiterer Einmalkosten) machen die Technologieoption HO-Bus zu einem Geschäftsmodell, das auch in Marburg sehr langfristig gedacht werden muss.

Folgekostenbetrachtung

Die Folgekostenbetrachtung zum aktuellen Dieselbus-Betrieb bezieht die zuvor ausgewiesenen Investitionen sowie die laufenden Betriebskosten ein und kumuliert diese für den Betrachtungszeitraum von 40 Jahren. Dabei betragen die durchschnittlichen Betriebskosten im mittleren Kostenentwicklungsszenario[14] für den Barwert bei einer exponentiellen Diskontierung von 2 %:

[14] Das mittlere Kostenentwicklungsszenario Middle-Case-b definiert eine mittlere Kostenentwicklung beim zu untersuchenden E-Bus-System und eine ebenfalls mittlere Kostenentwicklung für den Dieselbus. Dies umfasst sowohl Investitionskosten (Fahrzeuge, Energiespeicher) als auch Betriebskosten (Preisentwicklung Dieselkraftstoff und elektrische Energie). Im Berichtsteil wird jeweils das Szenario „Middle-Case-b“ betrachtet.

Middle-Case-b	ohne Förderung	mit Förderung
Betriebs- und Investitionskosten mit 11 Elektrobussen:	-81.560.728 EUR	-66.282.429EUR
Betriebs- und Investitionskosten mit 11 Dieselbusen:	-72.483.082 EUR[15]	-72.483.082 EUR
Mehr- (+) / Minder- (-) kosten HO-Bus:	**+ 9.077.646 EUR**	**-6.200.653 EUR**

Tabelle 10: Durchschnittliche Folgekosten mit Diskontierung HO-Bus vs. Dieselbus Marburg

Bezogen auf einen Gesamtbetrachtungszeitraum von 40 Jahren muss im Falle einer Umstellung der Linie 2/7 auf die Technologieoption HO-Bus-System (Reduzierte Oberleitung) mit Mehrkosten in Höhe von 9.077.646 EUR gerechnet werden. Bei der Berücksichtigung einer Förderquote von 80 % auf systembedingte Mehrkosten bei Fahrzeugen und Infrastruktur kann das HO-Bus-System (Reduzierte Oberleitung) wirtschaftlicher betrieben werden als der Dieselbus.

Ökologische Parameter

Die Berechnung der ökologischen Auswirkungen einer Systemumstellung ergibt sich aus dem Zusammenwirken der Vorkette der Energieproduktion (Dieselkraftstoff/elektrischer Strom, Well-to-Tank) und den Auswirkungen der Energieumwandlung am Einsatzort (Verbrennung von Dieselkraftstoff im Verbrennungsmotor bzw. Nutzung von Strom im Elektromotor, Tank-to-Wheel). Während die lokalen Emissionen der Tank-to-Wheel-Betrachtung praktisch auf null sinken (abgesehen von den Emissionen einer eventuellen Diesel-Zusatzheizung), muss für eine seriöse Gesamtbetrachtung der ökologischen Auswirkungen die Vorkette mit einbezogen werden. Für eine realistische Einschätzung wird bei der Energieerzeugung der Strommix Deutschland angesetzt, auch wenn sich durch den Einkauf von Ökostrom die Emissionen per definitionem und auf dem Papier „wegrechnen“ lassen.[16]

Die Betrachtung der Gesamtkette Well-to-Wheel ergibt für die Technologieoption HO-Bus die folgenden Werte:

15 Für den HO-Bus wurden die Linienumläufe leicht angepasst, sodass sich Haltezeiten an den Endhaltestellen verlängern. Dies führt auch beim Dieselbus zu erhöhten (Personal-)Kosten. Dies ist bei den anderen Alternativen nicht berücksichtigt.

16 Zur Methodik der Ausweisung von ökologischen Parametern vergleich auch Abschnitt 4.2.6 im Methodenteil.

Energieverbrauch und CO_2-e /a	Absolut	Relativ
Energieverbrauch	8.303.998 MJ	
Einsparung ggü. Dieselbus	-9.535.554 MJ	-53 %
CO_2-e	403.215	
Einsparung ggü. Dieselbus	-862.429 kg	-68 %
CO_2-e (monetarisiert)	58.466 €	
Einsparung ggü. Dieselbus	-125.052 €	-68 %

Tabelle 11: Ökologische Parameter HO-Bus Marburg

Durch den Einsatz von HO-Bussen anstelle von Dieselbussen könnte der Ausstoß von CO_2-Äquivalenten auf der Linie 2/7 der SWM jährlich um etwa 862 Tonnen reduziert werden. Der lokale Ausstoß von Stickoxiden (NO_X) würde durch den Einsatz von HO-Bussen auf der Linie 2/7 jährlich um etwa 4,7 Tonnen gesenkt.

Um mit der Technologieoption HO-Bus im Betrachtungszeitraum von 20 Jahren den Ausstoß von CO_2-Äquivalenten um eine Tonne zu erreichen, müssen im mittleren Kostenentwicklungsszenario 405 Euro pro Jahr aufgebracht werden (Treibhausgasvermeidungskosten).

Eine in die Teilketten Well-to-Tank und Tank-to-Wheel aufgeschlüsselte Darstellung einschließlich der Ausweisung weiterer Schadstoffgruppen ist in Anhang 4.9 wiedergegeben. Dort finden sich auch die Ergebnisse der Treibhausgasvermeidungskosten für die weiteren Szenarien.

4.4.2 Technologieoption Batterie-Elektrobus (Overnight-Charger/Depot-Lader)

Investitionskosten

Die Gesamt-Investitionskosten für die Umsetzung der Technologieoption Overnight-Charger wie in Abschnitt 4.5.3 beschrieben betragen 14.332.076 Euro. Diese untergliedern sich wie folgt:

- Fahrzeug (13 Gelenkbusse): 11.740.872 EUR
- Ladeinfrastruktur: 1.663.200 EUR
- Sonstige Kosten 928.004 EUR
- **Gesamtkosten: 14.332.076 EUR**

Unter Einbeziehung einer angenommenen Förderung auf die systembedingten Zusatzkosten reduzieren sich die Gesamt-Investitionskosten auf einen Betrag von 6.505.254 Euro. Die Untergliederung in die Teilkategorien stellt sich in diesem Fall wie folgt dar:

- Fahrzeug (13 Gelenkbusse): 5.708.612 EUR
- Ladeinfrastruktur: 332.640 EUR
- Sonstige Kosten 464.002 EUR

- **Gesamtkosten: 6.505.254 EUR**

Eine weitere Untergliederung der einzelnen Positionen ist in Anhang 5.6 wiedergegeben.

Kostenvergleich Ohnefall (Dieselbus)

Der Kostenvergleich zum aktuellen Dieselbus-Betrieb bezieht die zuvor ausgewiesenen Investitionen (bzw. den Kapitaldienst zu deren Umsetzung) sowie die laufenden Betriebskosten ein.

Über einen Betrachtungszeitraum von 16 Jahren betragen die durchschnittlichen Betriebskosten pro Fahrzeugkilometer im mittleren Kostenentwicklungsszenario[17] am Beispiel des Umlaufs 26:

Middle-Case-b	ohne Förderung	mit Förderung
durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten Elektrobus:	4,62 EUR/km	3,78 EUR/km
durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten Dieselbus:	3,82 EUR/km	3,82 EUR/km
Mehr- (+) / Minder- (-) kosten HO-Bus:	**+0,80 EUR/km**	**-0,04 EUR/km**

Tabelle 12: Durchschnittliche laufleistungsbezogene Kosten Overnight-Charger vs. Dieselbus Marburg

In der Jahresscheibenbetrachtung stellt sich die Entwicklung der laufleistungsbezogenen Mehr-und Minderkosten als Absolutwerte wie folgt dar:

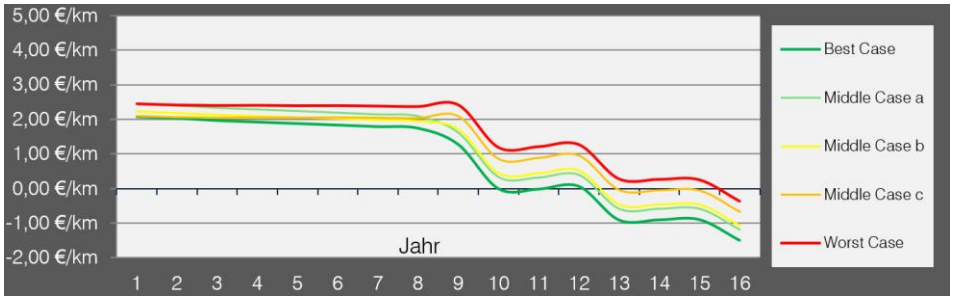


Abbildung 31: Entwicklung der laufleistungsbezogenen Mehr- und Minderkosten für den Overnight-Charger Marburg

17 Das mittlere Kostenentwicklungsszenario Middle-Case-b definiert eine mittlere Kostenentwicklung beim zu untersuchenden E-Bus-System und eine ebenfalls mittlere Kostenentwicklung für den Dieselbus. Dies umfasst sowohl Investitionskosten (Fahrzeuge, Energiespeicher) als auch Betriebskosten (Preisentwicklung Dieselkraftstoff und elektrische Energie). Im Berichtsteil wird jeweils das Szenario „Middle-Case-b“ betrachtet. Zur Verdeutlichung der möglichen Bandbreite sind in Anhang 5.7 noch vier weitere Szenarien dargestellt. Hier sind ebenso die für die Entwicklung der Szenarien zugrunde liegenden Quellen benannt.

Bezogen auf einen Gesamtbetrachtungszeitraum von 16 Jahren muss im Falle einer Umstellung der Linie 2/7 auf die Technologieoption Overnight-Charger mit Mehrkosten in Höhe von durchschnittlich 0,80 Euro pro Fahrzeugkilometer gerechnet werden. In den ersten 8 Jahren liegen die Mehrbelastungen in einem Bereich von etwa 2 Euro/Fz-km. Nach Ende des Abschreibungszeitraums von 8 Jahren für die Fahrzeuge sinken die Mehrkosten in einen Bereich von etwa 0,50 Euro/Fz-km. Nach dem Restwerterlös des im Jahre 12 auszusondernden Dieselbusses erreicht der Overnight-Charger im 13. Betriebsjahr den Bereich der Rentabilität.

Die Betrachtung der jährlich aufzuwendenden Mehr- bzw. Minderkosten gegenüber dem Dieselbus, untergliedert nach Kostenarten Kapitaldienstkosten für Investitionen und Einmalausgaben und Betriebskosten, stellt sich folgendermaßen dar:

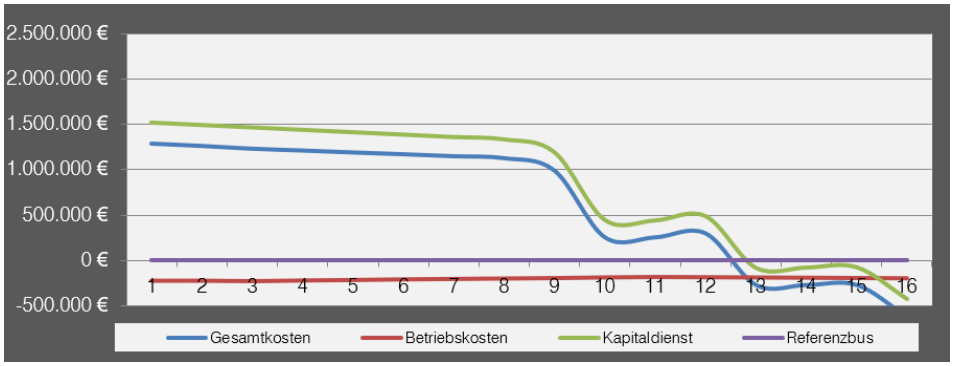


Abbildung 32: Verlauf der Jahresmehrkosten Overnight-Charger, nach Kostenarten (Szenario Middle-Case-b) Marburg

Der Verlauf der Jahresmehrkosten im Betrachtungszeitraum von 16 Jahren ist analog zur laufleistungsbezogenen Darstellung. In den ersten 8 Jahren müssen die Stadtwerke Marburg mit jährlichen Mehrkosten für die Systemumstellung in Höhe von 1,2-1,3 Millionen Euro rechnen.[18]

Der Mehrkostenanteil ab dem 8. Betriebsjahr sticht im fördermittelfreien Szenario etwas stärker hervor als beim HO-Bus, da die Energiespeicher im Overnight-Charger deutlich größer und teurer sind.

Folgekostenbetrachtung

Die Folgekostenbetrachtung zum aktuellen Dieselbus-Betrieb bezieht die zuvor ausgewiesenen Investitionen sowie die laufenden Betriebskosten ein und kumuliert diese für den Betrachtungszeitraum von 40 Jahren. Dabei betragen die durchschnittlichen Be-

[18] In Anhängen sind ergänzend noch Darstellungen unter Berücksichtigung einer Förderung enthalten. Nimmt man eine erreichbare Förderquote von 80 % auf systembedingte Mehrkosten bei Fahrzeugen und Infrastruktur an, so reduzieren sich die Beträge der Mehrkosten.

triebskosten im mittleren Kostenentwicklungsszenario[19] für den Barwert bei einer exponentiellen Diskontierung von 2 %:

Middle-Case-b	ohne Förderung	mit Förderung
Betriebs- und Investitionskosten mit 13 Elektrobussen:	-81.455.350 EUR	-73.646.905 EUR
Betriebs- und Investitionskosten mit 11 Dieselbusen:	-70.312.290 EUR	-70.312.290 EUR
Mehr- (+) / Minder- (-) kosten HO-Bus:	**+11.143.061 EUR**	**+3.334.616 EUR**

Tabelle 13: Durchschnittliche Folgekosten mit Diskontierung Overnight-Charger vs. Dieselbus Marburg

Bezogen auf einen Gesamtbetrachtungszeitraum von 40 Jahren muss im Falle einer Umstellung der Linie 2/7 auf die Technologieoption Overnight-Charger mit Mehrkosten in Höhe von 11.143.061 EUR gerechnet werden. Auch mit der Berücksichtigung einer Förderquote von 80 % auf systembedingte Mehrkosten bei Fahrzeugen und Infrastruktur kann diese Technologie nicht wirtschaftlicher betrieben werden als der Dieselbus.

In der Jahresscheibenbetrachtung stellt sich die Entwicklung der kumulierten Mehr- und Minderkosten als Absolutwerte wie folgt dar:

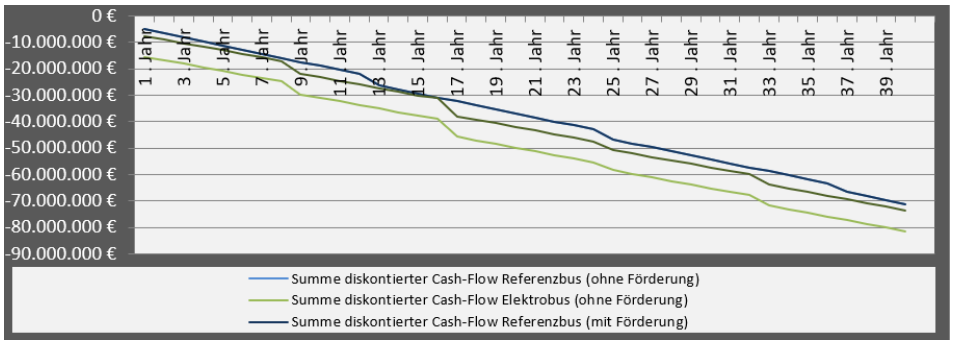


Abbildung 33: Verlauf der Folgekosten Overnight-Charger, nach Kostenarten (Szenario Middle-Case-b) Marburg

[19] Das mittlere Kostenentwicklungsszenario Middle-Case-b definiert eine mittlere Kostenentwicklung beim zu untersuchenden E-Bus-System und eine ebenfalls mittlere Kostenentwicklung für den Dieselbus. Dies umfasst sowohl Investitionskosten (Fahrzeuge, Energiespeicher) als auch Betriebskosten (Preisentwicklung Dieselkraftstoff und elektrische Energie). Im Berichtsteil wird jeweils das Szenario „Middle-Case-b“ betrachtet. Zur Verdeutlichung der möglichen Bandbreite sind in Anhang 5.8 noch vier weitere Szenarien dargestellt.

Ökologische Parameter

Die Berechnung der ökologischen Auswirkungen einer Systemumstellung ergibt sich aus dem Zusammenwirken der Vorkette der Energieproduktion (Dieselkraftstoff/elektrischer Strom, Well-to-Tank) und den Auswirkungen der Energieumwandlung am Einsatzort (Verbrennung von Dieselkraftstoff im Verbrennungsmotor bzw. Nutzung von Strom im Elektromotor, Tank-to-Wheel). Während die lokalen Emissionen der Tank-to-Wheel-Betrachtung praktisch auf null sinken (abgesehen von den Emissionen einer eventuellen Diesel-Zusatzheizung), muss für eine seriöse Gesamtbetrachtung der ökologischen Auswirkungen die Vorkette mit einbezogen werden. Für eine realistische Einschätzung wird bei der Energieerzeugung der Strommix Deutschland angesetzt, auch wenn sich durch den Einkauf von Ökostrom die Emissionen per definitionem und auf dem Papier „wegrechnen" lassen.[20]

Die Betrachtung der Gesamtkette Well-to-Wheel ergibt für die Technologieoption HO-Bus die folgenden Werte:

Energieverbrauch und CO_2-e /a	Absolut	Relativ
Energieverbrauch	9.124.769 MJ	
Einsparung ggü. Dieselbus	-8.714.782 MJ	-49 %
CO_2-e	461.317 kg	
Einsparung ggü. Dieselbus	-804.327 kg	-64 %
CO_2-e (monetarisiert)	66.891 €	
Einsparung ggü. Dieselbus	-116.627 €	-64 %

Tabelle 14: Ökologische Parameter Overnight-Charger Marburg

Durch den Einsatz von HO-Bussen anstelle von Dieselbussen könnte der Ausstoß von CO_2-Äquivalenten auf der Linie 2/7 der SWM jährlich um etwa 804 Tonnen reduziert werden. Der lokale Ausstoß von Stickoxiden (NO_X) würde durch den Einsatz von HO-Bussen auf der Linie 2/7 jährlich um etwa 4,7 Tonnen gesenkt.

Um mit der Technologieoption Overnight-Charger im Betrachtungszeitraum von 16 Jahren den Ausstoß von CO_2-Äquivalenten um eine Tonne zu erreichen, müssen im mittleren Kostenentwicklungsszenario 579 Euro pro Jahr aufgebracht werden (Treibhausgasvermeidungskosten).

[20] Zur Methodik der Ausweisung von ökologischen Parametern vergleich auch Abschnitt 4.2.6 im Methodenteil.

4.4.3 Technologieoption Batterie-Elektrobus (Opportunity-Charger) Investitionskosten

Investitionen

Die Gesamt-Investitionskosten für die Umsetzung der Technologieoption Opportunity-Charger wie in Abschnitt 4.5.5 beschrieben betragen 12.661.236 Euro. Diese untergliedern sich wie folgt:

- Fahrzeug (11 Gelenkbusse): 8.848.334 EUR
- Ladeinfrastruktur: 2.679.600 EUR
- Sonstige Kosten 1.133.302 EUR
- **Gesamtkosten: 12.661.236 EUR**

Unter Einbeziehung einer angenommenen Förderung auf die systembedingten Zusatzkosten reduzieren sich die Gesamt-Investitionskosten auf einen Betrag von 5.715.685 Euro. Die Untergliederung in die Teilkategorien stellt sich in diesem Fall wie folgt dar:

- Fahrzeug (11 Gelenkbusse): 4.613.114 EUR
- Ladeinfrastruktur: 535.920 EUR
- Sonstige Kosten 566.651EUR
- **Gesamtkosten: 5.715.685 EUR**

Eine weitere Untergliederung der einzelnen Positionen ist im Anhang wiedergegeben.

Kostenvergleich Ohnefall (Dieselbus)

Der Kostenvergleich zum aktuellen Dieselbus-Betrieb bezieht die zuvor ausgewiesenen Investitionen (bzw. den Kapitaldienst zu deren Umsetzung) sowie die laufenden Betriebskosten ein.

Über einen Betrachtungszeitraum von 16 Jahren betragen die durchschnittlichen Betriebskosten pro Fahrzeugkilometer im mittleren Kostenentwicklungsszenario[21] am Beispiel des Umlaufs 26:

Middle-Case-b	ohne Förderung	mit Förderung
durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten Elektrobus:	3,97 EUR/km	3,26 EUR/km
durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten Dieselbus:	3,82 EUR/km	3,82 EUR/km

21 Das mittlere Kostenentwicklungsszenario Middle-Case-b definiert eine mittlere Kostenentwicklung beim zu untersuchenden E-Bus-System und eine ebenfalls mittlere Kostenentwicklung für den Dieselbus. Dies umfasst sowohl Investitionskosten (Fahrzeuge, Energiespeicher) als auch Betriebskosten (Preisentwicklung Dieselkraftstoff und elektrische Energie). Im Berichtsteil wird jeweils das Szenario „Middle-Case-b“ betrachtet.

Mehr- (+) / Minder- (-) kosten HO-Bus:	**+0,15 EUR/km**	**-0,56 EUR/km**

Tabelle 15: Durchschnittliche laufleistungsbezogene Kosten Opportunity-Charger vs. Dieselbus Marburg

In der Jahresscheibenbetrachtung stellt sich die Entwicklung der laufleistungsbezogenen Mehr-und Minderkosten als Absolutwerte wie folgt dar:

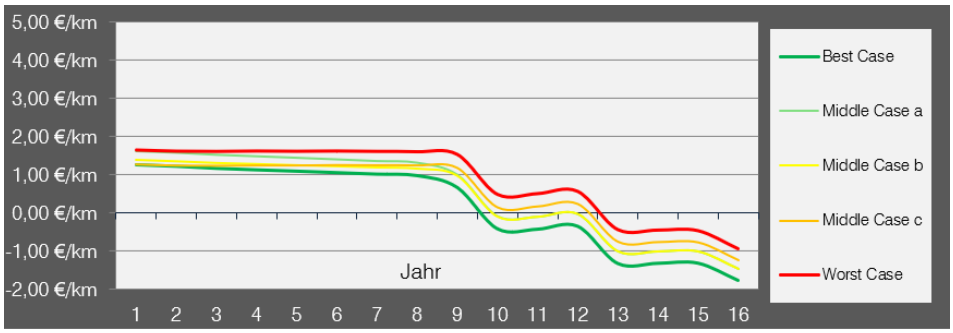


Abbildung 34: Entwicklung der laufleistungsbezogenen Mehr- und Minderkosten für den Opportunity-Charger Marburg

Bezogen auf einen Gesamtbetrachtungszeitraum von 16 Jahren muss im Falle einer Umstellung der Linie 2/7 auf die Technologieoption Opportunity-Charger mit Mehrkosten in Höhe von durchschnittlich 0,15 Euro pro Fahrzeugkilometer gerechnet werden. In den ersten 8 Jahren liegen die Mehrbelastungen in einem Bereich von etwa 1,40 Euro/Fz-km. Nach Ende des Abschreibungszeitraums von 8 Jahren für die Fahrzeuge sinken die Mehrkosten ab dem 10. Jahr sogar unter 0 Euro/Fz-km. Nach leichtem (relativem) Anstieg bedingt durch den Restwerterlös des im Jahre 12 auszusondernden Dieselbusses erreicht der Opportunity-Charger schließlich erneut den rentablen Betriebsbereich im 12. Betriebsjahr.

Im Vergleich mit den beiden zuvor beschriebenen Technologieoptionen zeigt der Opportunity-Charger ein etwas schnelleres Erreichen der ersten Rentabilitätsschwelle. Hierbei profitiert er von der deutlich geringeren streckenbegleitenden Infrastruktur gegenüber dem HO-Bus und der nicht erforderlichen Vergrößerung der Fahrzeugflotte um zwei Busse im Vergleich zum Overnight-Charger.

Die Betrachtung der jährlich aufzuwendenden Mehr- bzw. Minderkosten des HO-Bus-Systems gegenüber dem Dieselbus, untergliedert nach Kostenarten Kapitaldienstkosten für Investitionen und Einmalausgaben und Betriebskosten, stellt sich folgendermaßen dar:

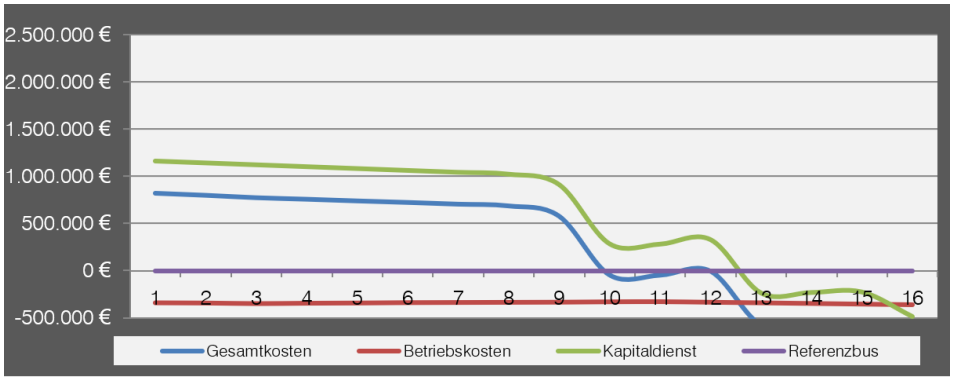


Abbildung 35: Verlauf der Jahresmehrkosten Opportunity-Charger, nach Kostenarten (Szenario Middle-Case-b) Marburg

Der Verlauf der Jahresmehrkosten im Betrachtungszeitraum von 16 Jahren ist analog zur laufleistungsbezogenen Darstellung. In den ersten 8 Jahren müssen die Stadtwerke Marbug mit jährlichen Mehrkosten für die Systemumstellung in Höhe von 0,7 Millionen Euro rechnen.

In den Anlagen 6.6 und 6.7 sind ergänzend noch Darstellungen unter Berücksichtigung einer Förderung enthalten. Nimmt man eine erreichbare Förderquote von 80 % auf systembedingte Mehrkosten bei Fahrzeugen und Infrastruktur an, so reduzieren sich die Beträge der Mehrkosten wie bei den anderen Technologieoptionen deutlich. Die Systemrentabilität kann in der Betrachtung mit Förderung endgültig im 10. Betriebsjahr erwartet werden.

Folgekostenbetrachtung

Der Kostenvergleich zum aktuellen Dieselbus-Betrieb bezieht die zuvor ausgewiesenen Investitionen (bzw. den Kapitaldienst zu deren Umsetzung) sowie die laufenden Betriebskosten ein.

Über einen Betrachtungszeitraum von 40 Jahren betragen die durchschnittlichen Betriebskosten pro Fahrzeugkilometer im mittleren Kostenentwicklungsszenario[22] am Beispiel des Umlaufs 26:

22 Das mittlere Kostenentwicklungsszenario Middle-Case-b definiert eine mittlere Kostenentwicklung beim zu untersuchenden E-Bus-System und eine ebenfalls mittlere Kostenentwicklung für den Dieselbus. Dies umfasst sowohl Investitionskosten (Fahrzeuge, Energiespeicher) als auch Betriebskosten (Preisentwicklung Dieselkraftstoff und elektrische Energie). Im Berichtsteil wird jeweils das Szenario „Middle-Case-b“ betrachtet. Zur Verdeutlichung der möglichen Bandbreite sind in Anhang 6.8 noch vier weitere Szenarien dargestellt.

Middle-Case-b	ohne Förderung	mit Förderung
Betriebs- und Investitionskosten mit 11 Elektrobussen:	-70.174.640 EUR	-63.356.515 EUR
Betriebs- und Investitionskosten mit 11 Dieselbusen:	-70.312.290 EUR	-70.312.290 EUR
Mehr- (+) / Minder- (-) kosten HO-Bus:	**-137.650 EUR**	**-6.955.775 EUR**

Tabelle 16: Durchschnittliche Folgekosten mit Diskontierung Opportunity-Charger vs. Dieselbus Marburg

Bezogen auf einen Gesamtbetrachtungszeitraum von 40 Jahren muss im Falle einer Umstellung der Linie 2/7 auf die Technologieoption Opportunity-Charger mit Minderkosten in Höhe von durchschnittlich -137.650 EUR gerechnet werden. Bei der Berücksichtigung einer Förderquote von 80 % auf systembedingte Mehrkosten bei Fahrzeugen und Infrastruktur liegt dieser Wert sogar bei -6.955.775 EUR.

In der Jahresscheibenbetrachtung stellt sich die Entwicklung der kumulierten Mehr- und Minderkosten als Absolutwerte wie folgt dar:

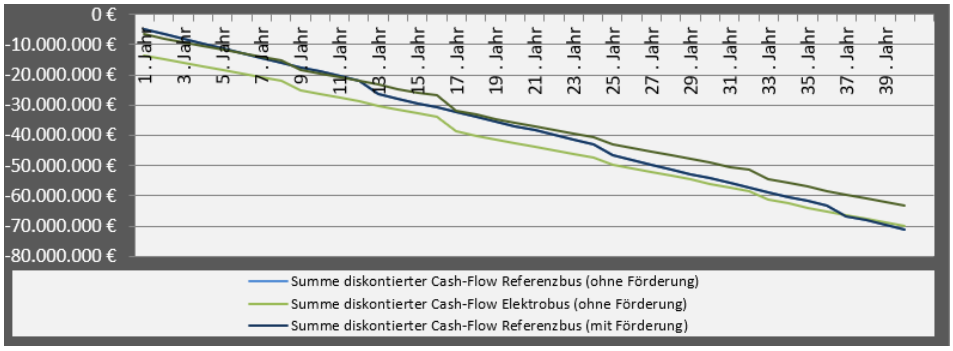


Abbildung 36: Verlauf der Folgekosten Opportunity-Charger, nach Kostenarten (Szenario Middle-Case-b) Marburg

Ökologische Parameter

Die Berechnung der ökologischen Auswirkungen einer Systemumstellung ergibt sich aus dem Zusammenwirken der Vorkette der Energieproduktion (Dieselkraftstoff/elektrischer Strom, Well-to-Tank) und den Auswirkungen der Energieumwandlung am Einsatzort (Verbrennung von Dieselkraftstoff im Verbrennungsmotor bzw. Nutzung von Strom im Elektromotor, Tank-to-Wheel). Während die lokalen Emissionen der Tank-to-Wheel-Betrachtung praktisch auf null sinken (abgesehen von den Emissionen einer eventuellen Diesel-Zusatzheizung), muss für eine seriöse Gesamtbetrachtung der ökologischen Auswirkungen die Vorkette mit einbezogen werden. Für eine realistische Einschätzung wird bei der Energieerzeugung der Strommix Deutschland angesetzt, auch wenn sich durch

den Einkauf von Ökostrom die Emissionen per definitionem und auf dem Papier „wegrechnen“ lassen.[23]

Die Betrachtung der Gesamtkette Well-to-Wheel ergibt für die Technologieoption Opportunity-Charger die folgenden Werte:

Energieverbrauch und CO_2-e /a	Absolut	Relativ
Energieverbrauch	8.683.359 MJ	
Einsparung ggü. Dieselbus	-9.156.193 MJ	-51 %
CO_2-e	439.001 kg	
Einsparung ggü. Dieselbus	-826.643 kg	-65 %
CO_2-e (monetarisiert)	63.655 €	
Einsparung ggü. Dieselbus	-119.863 €	-65 %

Tabelle 17: Ökologische Parameter Opportunity-Charger Marburg

Durch den Einsatz von HO-Bussen anstelle von Dieselbussen könnte der Ausstoß von CO_2-Äquivalenten auf der Linie 2/7 der SWM jährlich um etwa 827 Tonnen reduziert werden.

Der lokale Ausstoß von Stickoxiden (NO_X) würde durch den Einsatz von HO-Bussen auf der Linie 2/7 jährlich um etwa 4,7 Tonnen gesenkt.

Um mit der Technologieoption HO-Bus im Betrachtungszeitraum von 16 Jahren den Ausstoß von CO_2-Äquivalenten um eine Tonne zu erreichen, müssen im mittleren Kostenentwicklungsszenario 106 Euro aufgebracht werden (Treibhausgasvermeidungskosten).

Eine in die Teilketten Well-to-Tank und Tank-to-Wheel aufgeschlüsselte Darstellung einschließlich der Ausweisung weiterer Schadstoffgruppen ist in Anhang 6.9 wiedergegeben. Dort finden sich auch die Ergebnisse der Treibhausgasvermeidungskosten für die weiteren Szenarien.

4.4.4 Technologieoption Batterie-Elektrobus (Opportunity-Charger vollelektisch) Investitionen

Investitionen

Die Gesamt-Investitionskosten für die Umsetzung der Technologieoption Opportunity-Charger mit vollelektrischer Heizung betragen 13.700.736 Euro. Diese untergliedern sich wie folgt:

[23] Zur Methodik der Ausweisung von ökologischen Parametern vergleich auch Abschnitt 3.6 im Methodenteil.

- Fahrzeug (11 Gelenkbusse): 9.887.834 EUR
- Ladeinfrastruktur: 2.679.600 EUR
- Sonstige Kosten 1.133.302 EUR
- **Gesamtkosten: 13.700.736 EUR**

Unter Einbeziehung einer angenommenen Förderung auf die systembedingten Zusatzkosten reduzieren sich die Gesamt-Investitionskosten auf einen Betrag von 5.923.585 Euro. Die Untergliederung in die Teilkategorien stellt sich in diesem Fall wie folgt dar:

- Fahrzeug (11 Gelenkbusse): 4.821.014 EUR
- Ladeinfrastruktur: 535.920 EUR
- Sonstige Kosten 566.651EUR
- **Gesamtkosten: 5.923.585 EUR**

Eine weitere Untergliederung der einzelnen Positionen ist in Anhang 6.6 wiedergegeben.

Kostenvergleich Ohnefall (Dieselbus)

Der Kostenvergleich zum aktuellen Dieselbus-Betrieb bezieht die zuvor ausgewiesenen Investitionen (bzw. den Kapitaldienst zu deren Umsetzung) sowie die laufenden Betriebskosten ein.

Über einen Betrachtungszeitraum von 16 Jahren betragen die durchschnittlichen Betriebskosten pro Fahrzeugkilometer im mittleren Kostenentwicklungsszenario[24] am Beispiel des Umlaufs 26:

Middle-Case-b	ohne Förderung	mit Förderung
durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten Elektrobus:	4,24 EUR/km	3,44 EUR/km
durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten Dieselbus:	3,82 EUR/km	3,82 EUR/km
Mehr- (+) / Minder- (-) kosten HO-Bus:	**+0,42 EUR/km**	**-0,38 EUR/km**

Tabelle 18: Durchschnittliche laufleistungsbezogene Kosten Opportunity-Charger (vollelektrisch) vs. Dieselbus Marburg

In der Jahresscheibenbetrachtung stellt sich die Entwicklung der laufleistungsbezogenen Mehr-und Minderkosten als Absolutwerte wie folgt dar:

24 Das mittlere Kostenentwicklungsszenario Middle-Case-b definiert eine mittlere Kostenentwicklung beim zu untersuchenden E-Bus-System und eine ebenfalls mittlere Kostenentwicklung für den Dieselbus. Dies umfasst sowohl Investitionskosten (Fahrzeuge, Energiespeicher) als auch Betriebskosten (Preisentwicklung Dieselkraftstoff und elektrische Energie). Im Berichtsteil wird jeweils das Szenario „Middle-Case-b“ betrachtet. Zur Verdeutlichung der möglichen Bandbreite sind in Anhang 6.7 noch vier weitere Szenarien dargestellt. Hier sind ebenso die für die Entwicklung der Szenarien zugrunde liegenden Quellen benannt.

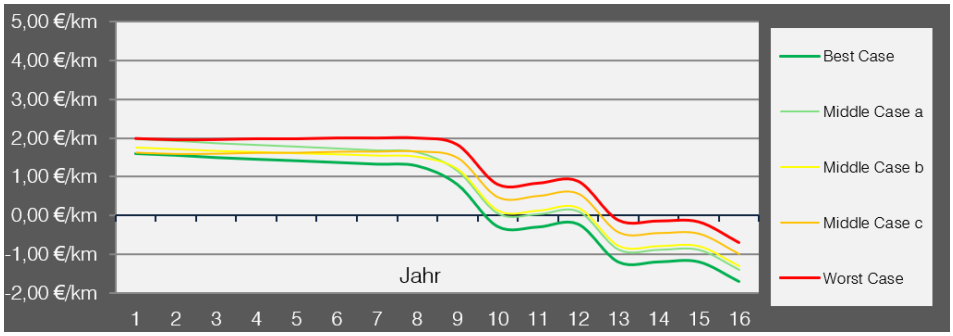


Abbildung 37: Entwicklung der laufleistungsbezogenen Mehr- und Minderkosten für den Opportunity-Charger (vollelektrisch) Marburg

Bezogen auf einen Gesamtbetrachtungszeitraum von 16 Jahren muss im Falle einer Umstellung der Linie 2/7 auf die Technologieoption Opportunity-Charger mit Mehrkosten in Höhe von durchschnittlich 0,42 Euro pro Fahrzeugkilometer gerechnet werden. In den ersten 8 Jahren liegen die Mehrbelastungen in einem Bereich von etwa 1,70 Euro/Fz-km. Nach Ende des Abschreibungszeitraums von 8 Jahren für die Fahrzeuge sinken die Mehrkosten ab dem 10. Jahr sogar kurzzeitig auf 0 Euro/Fz-km. Nach leichtem (relativem) Anstieg bedingt durch den Restwerterlös des im Jahre 12 auszusondernden Dieselbusses erreicht der Opportunity-Charger schließlich erneut den rentablen Betriebsbereich im 12. Betriebsjahr.

Im Vergleich zu den anderen Technologieoptionen zeigt der vollelektrische Opportunity-Charger ein etwas schnelleres Erreichen der ersten Rentabilitätsschwelle. Hierbei profitiert er von der deutlich geringeren streckenbegleitenden Infrastruktur gegenüber dem HO-Bus und der nicht erforderlichen Vergrößerung der Fahrzeugflotte um zwei Busse im Vergleich zum Overnight-Charger.

Die Betrachtung der jährlich aufzuwendenden Mehr- bzw. Minderkosten des HO-Bus-Systems gegenüber dem Dieselbus, untergliedert nach Kostenarten Kapitaldienstkosten für Investitionen und Einmalausgaben und Betriebskosten, stellt sich folgendermaßen dar:

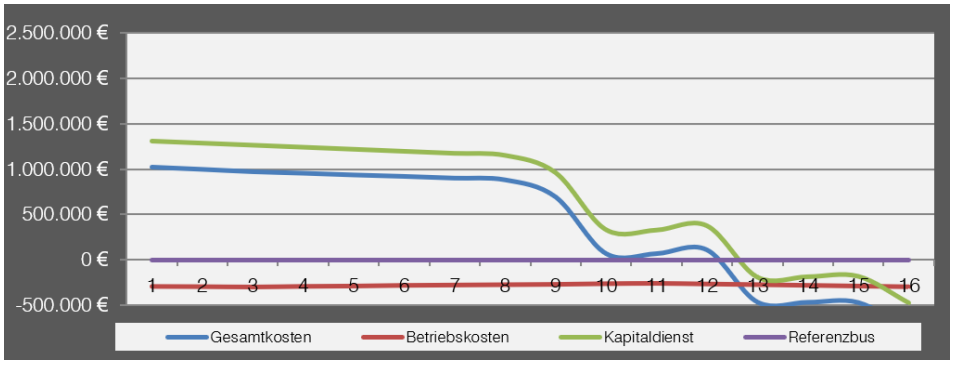


Abbildung 38: Verlauf der Jahresmehrkosten Opportunity-Charger (vollelektrisch), nach Kostenarten (Szenario Middle-Case-b) Marburg

Der Verlauf der Jahresmehrkosten im Betrachtungszeitraum von 16 Jahren ist analog zur laufleistungsbezogenen Darstellung. In den ersten 8 Jahren müssen die Stadtwerke Marburg mit jährlichen Mehrkosten für die Systemumstellung in Höhe von etwa 1 Millionen Euro rechnen.

In den Anlagen 6.6 und 6.7 sind ergänzend noch Darstellungen unter Berücksichtigung einer Förderung enthalten. Nimmt man eine erreichbare Förderquote von 80 % auf systembedingte Mehrkosten bei Fahrzeugen und Infrastruktur an, so reduzieren sich die Beträge der Mehrkosten wie bei den anderen Technologieoptionen deutlich. Die Systemrentabilität kann in der Betrachtung mit Förderung endgültig im 12. Betriebsjahr erwartet werden.

Folgekostenbetrachtung

Der Kostenvergleich zum aktuellen Dieselbus-Betrieb bezieht die zuvor ausgewiesenen Investitionen (bzw. den Kapitaldienst zu deren Umsetzung) sowie die laufenden Betriebskosten ein.

Über einen Betrachtungszeitraum von 40 Jahren betragen die durchschnittlichen Betriebskosten pro Fahrzeugkilometer im mittleren Kostenentwicklungsszenario[25] am Beispiel des Umlaufs 26:

Middle-Case-b	ohne Förderung	mit Förderung
Betriebs- und Investitionskosten mit 11 Elektrobussen:	-74.162.175 EUR	-66.515.450 EUR
Betriebs- und Investitionskosten mit 11 Dieselbusen:	-70.312.290 EUR	-70.312.290 EUR
Mehr- (+) / Minder- (-) kosten HO-Bus:	**+3.849.885 EUR**	**-3.799.840 EUR**

Tabelle 19: Durchschnittliche Folgekosten mit Diskontierung Opportunity-Charger (vollelektrisch) vs. Dieselbus Marburg

Bezogen auf einen Gesamtbetrachtungszeitraum von 40 Jahren muss im Falle einer Umstellung der Linie 2/7 auf die Technologieoption Opportunity-Charger mit Minderkosten in Höhe von durchschnittlich 3.849.885 EUR gerechnet werden. Bei der Berücksichtigung einer Förderquote von 80 % auf systembedingte Mehrkosten bei Fahrzeugen und Infrastruktur liegt dieser Wert sogar bei -3.799.840 EUR.

25 Das mittlere Kostenentwicklungsszenario Middle-Case-b definiert eine mittlere Kostenentwicklung beim zu untersuchenden E-Bus-System und eine ebenfalls mittlere Kostenentwicklung für den Dieselbus. Dies umfasst sowohl Investitionskosten (Fahrzeuge, Energiespeicher) als auch Betriebskosten (Preisentwicklung Dieselkraftstoff und elektrische Energie). Im Berichtsteil wird jeweils das Szenario „Middle-Case-b“ betrachtet. Zur Verdeutlichung der möglichen Bandbreite sind in Anhang 6.8 noch vier weitere Szenarien dargestellt.

In der Jahresscheibenbetrachtung stellt sich die Entwicklung der kumlierten Mehr-und Minderkosten als Absolutwerte wie folgt dar:

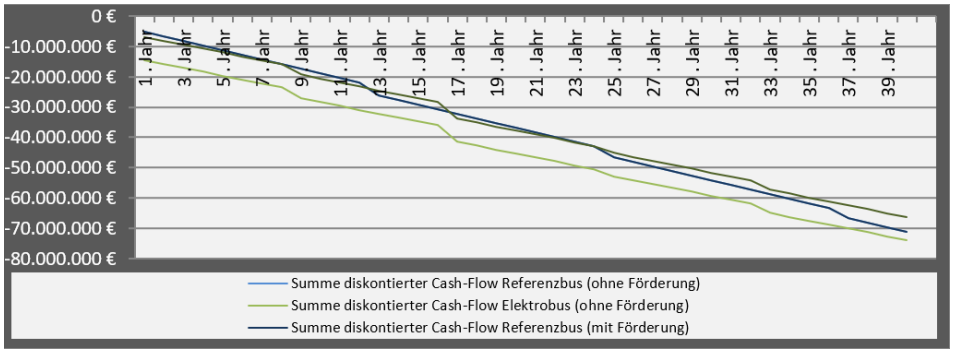


Abbildung 39: Verlauf der Folgekosten Opportunity-Charger (vollelektrisch), nach Kostenarten (Szenario Middle-Case-b) Marburg

Ökologische Parameter

Die Berechnung der ökologischen Auswirkungen einer Systemumstellung ergibt sich aus dem Zusammenwirken der Vorkette der Energieproduktion (Dieselkraftstoff/elektrischer Strom, Well-to-Tank) und den Auswirkungen der Energieumwandlung am Einsatzort (Verbrennung von Dieselkraftstoff im Verbrennungsmotor bzw. Nutzung von Strom im Elektromotor, Tank-to-Wheel). Während die lokalen Emissionen der Tank-to-Wheel-Betrachtung praktisch auf null sinken (abgesehen von den Emissionen einer eventuellen Diesel-Zusatzheizung), muss für eine seriöse Gesamtbetrachtung der ökologischen Auswirkungen die Vorkette mit einbezogen werden. Für eine realistische Einschätzung wird bei der Energieerzeugung der Strommix Deutschland angesetzt, auch wenn sich durch den Einkauf von Ökostrom die Emissionen per definitionem und auf dem Papier „wegrechnen“ lassen.[26]

Die Betrachtung der Gesamtkette Well-to-Wheel ergibt für die Technologieoption Opportunity-Charger die folgenden Werte:

Energieverbrauch und CO_2-e /a	Absolut	Relativ
Energieverbrauch	11.481.934 MJ	
Einsparung ggü. Dieselbus	-6.357.618 MJ	-36 %
CO_2-e	557.525 kg	
Einsparung ggü. Dieselbus	-708.119 kg	-56 %
CO_2-e (monetarisiert)	80.841 €	
Einsparung ggü. Dieselbus	-102.677 €	-56 %

[26] Zur Methodik der Ausweisung von ökologischen Parametern vergleich auch Abschnitt 3.6 im Methodenteil.

Tabelle 20: Ökologische Parameter Opportunity-Charger (vollelektrisch) Marburg

Durch den Einsatz von HO-Bussen anstelle von Dieselbussen könnte der Ausstoß von CO_2-Äquivalenten auf der Linie 2/7 der SWM jährlich um etwa 708 Tonnen reduziert werden.

Der lokale Ausstoß von Stickoxiden (NO_X) würde durch den Einsatz von HO-Bussen auf der Linie 2/7 jährlich um etwa 4,7 Tonnen gesenkt.

Um mit der Technologieoption HO-Bus im Betrachtungszeitraum von 16 Jahren den Ausstoß von CO_2-Äquivalenten um eine Tonne zu erreichen, müssen im mittleren Kostenentwicklungsszenario 345 Euro aufgebracht werden (Treibhausgasvermeidungskosten).

Eine in die Teilketten Well-to-Tank und Tank-to-Wheel aufgeschlüsselte Darstellung einschließlich der Ausweisung weiterer Schadstoffgruppen ist in Anhang 6.9 wiedergegeben. Dort finden sich auch die Ergebnisse der Treibhausgasvermeidungskosten für die weiteren Szenarien.

4.4.5 Fazit Wirtschaftlichkeitsuntersuchung Marburg

In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zeigten die einzelnen Technologieoptionen teilweise erheblich unterschiedliche Ergebnisse. Dies betrifft sowohl die Investitionen als auch die langfristigen Gesamtkosten.

In Tabelle 21 sind zunächst die Investitionskosten zur Umsetzung der Technologieoptionen gegenübergestellt:

Technologieoption	Fahrzeuge	Ladeinfrastruktur	Sonstige Kosten	GESAMT
HO-Bus	9.759.684 EUR	12.656.515 EUR	1.863.034 EUR	**24.279.233 EUR**
Overnight-Charger	11.740.872 EUR	1.663.200 EUR	928.004 EUR	**14.332.076 EUR**
Opportunity-Charger	8.848.334 EUR	2.679.600 EUR	1.133.302 EUR	**12.661.236 EUR**
Opportunity-Charger (VE Heizung)	9.887.834 EUR	2.679.600 EUR	1.133.302 EUR	**13.700.736 EUR**

Tabelle 21: Übersicht über die Investitionen Marburg

Demnach verursacht die Technologieoption Batterie-Elektrobus als Opportunity-Charger die geringsten Einmalkosten bei der Systemumsetzung. Mit geringem Abstand folgt dasselbige Betriebskonzept mit vollelektrischer Heizung und danach die Auslegung als Overnight-Charger. Am teuersten ist das HO-Bus-System. Dies ist der umfangreichen Infrastruktur aus Oberleitungsabschnitten und Schnellladestationen an vier Linienendpunkten geschuldet.

Bei der Gegenüberstellung der laufleistungsbezogenen durchschnittlichen Betriebskosten über einen Betrachtungszeitraum von bis zu 20 Jahren zeigt sich folgendes Bild[27]:

Technologieoption	Technologieoption EUR/Fz.-km	Dieselbus EUR/Fz.-km	Mehrkosten EUR/Fz.-km
HO-Bus	4,31	3,90	**+ 0,41**
Overnight-Charger	4,62	3,82	**+ 0,80**
Opportunity-Charger	3,97		**+ 0,15**
Opportunity-Charger (vollelektrische Heizung)	4,24		**+ 0,42**

Tabelle 22: Übersicht über die Gesamtkosten Marburg

Der Opportunity-Charger bleibt auch in der laufleistungsbezogenen Kostenbetrachtung die kostengünstigste Technologieoption. Die zu erwartenden Mehrkosten pro Fahrzeugkilometer betragen hier 15 Cent. Aufgrund der erhöhten Jahreslaufleistung und des zusätzlichen Personaleinsatzes ist der Overnight-Charger das Schlusslicht bei dieser Betrachtung.

Technologieoption	Folgekosten Technologieoption	Folgekosten Dieselbus	Mehrkosten
HO-Bus	-81.560.728 EUR	-72.483.082 EUR[28]	**+ 9.077.646 EUR**
Overnight-Charger	-81.455.350 EUR	-70.312.290 EUR	**+ 11.143.061 EUR**
Opportunity-Charger	-70.174.640 EUR		**- 137.650 EUR**
Opportunity-Charger (vollelektrische Heizung)	-74.162.175 EUR		**+ 3.849.885 EUR**

Tabelle 23: Übersicht über die Folgekosten Marburg (ohne Förderung)

Der HO-Bus ist bei den Investitionen mit Abstand am teuersten. Bei der Betrachtung der Folgekosten verringert sich die große Kostenlücke zu den anderen Technologien durch die langfristig (über 40 Jahre) abzuschreibende Infrastruktur, bleibt aber in der Rangfolge hinten. Der Einsatz von zwei zusätzlichen Gelenkbussen beim Overnight-Charger hält die Betriebskosten deutlich über den des Opportunity-Chargers. Die beiden Zusatzfahrzeuge

27 Auch hier werden die Werte für das mittlere Kostenentwicklungsszenario „Midle-Case-b“ betrachtet.

28 Für den HO-Bus wurden die Linienumläufe leicht angepasst, sodass sich Haltezeiten an den Endhaltestellen verlängern. Dies führt auch beim Dieselbus zu erhöhten (Personal-)Kosten. Dies ist bei den anderen Alternativen nicht berücksichtigt.

erzeugen zwar bezogen auf das Gesamtsystem zunächst geringere Investitionen, müssen aber dauerhaft mit Personal besetzt werden und verbrauchen zusätzliche Energie, da zusätzliche Ein- und Ausrückfahrten auch die Jahreslaufleistung erhöht. Wird die Förderquote mitberücksichtigt, können alle Technologien bis auf den Overnight-Charger wirtschaftlicher als ein Dieselbus betrieben werden. Dies ist jedoch stark von der Förderhöhe abhängig. Bei der Folgekostenbetrachtung ohne Berücksichtigung einer Förderung ist der Opportunity-Charger mit Hybridheizung als Vorzugslösung zu wählen, da dieses System gegenüber einem Dieselbus als Referenzfahrzeug in den rentablen Bereich fährt.

Abschließend sollen auch die ökologischen Parameter vergleichend gegenübergestellt werden:

Technologieoption	Einsparung Energie (ggü. Diesel)	Einsparung CO_2-e (ggü. Diesel)	THG-Vermeidung (EUR/t CO_2-e)
HO-Bus	53 %	68 %	405 EUR
Overnight-Charger	49 %	64 %	579 EUR
Opportunity-Charger	51 %	65 %	106 EUR
Opportunity-Charger (vollelektrische Heizung)	36 %	56 %	345 EUR

Tabelle 24: Übersicht über die ökologischen Parameter Marburg

Hier zeigt sich der HO-Bus wieder als energieeffizienteste und damit klimafreundlichste Technologieoption.

Bezüglich der volkswirtschaftlichen Gesamtkosten, gemessen am Indikator der Treibhausgas-Vermeidungskosten ist jedoch der Opportunity-Charger mit Hybrid-Zusatzheizung das System mit der höchsten Gesamteffizienz. Zwar ist das Energieeinspar- und Emissionsvermeidungspotential nicht so hoch wie beim HO-Bus, allerdings müssen zur Erreichung der Effekte geringere Investitionen getätigt werden. Der Overnight-Charger belegt in dieser Betrachtung den letzten Rang, bedingt durch die geringeren Einspar- und Reduktionspotentiale sowie die relativ hohen Investitionskosten aufgrund der beiden Zusatzfahrzeuge.

4.5 Zusammenfassung und Handlungsempfehlung

Im Rahmen der Untersuchungen der Liniennetze sowie der Detailuntersuchung ausgewählter Linien in Marburg hat sich gezeigt, dass ein HO-Bus-System grundsätzlich machbar wäre. Insbesondere vor dem Hintergrund der vorhandenen topographischen Bedingungen, bei denen verkehrsstarke Linien zwischen dem im Tal gelegenen Stadtzentren und auf einer Hochebene vorhandenen Hochschul- und Klinikstandorten verkehren, treten die Vorteile eines oberleitungsbasierten Verkehrssystems klar zum Vorschein.

Die Besonderheit der partiellen Oberleitung, die nicht die kompletten Linienwege begleiten muss, ist nicht nur wegen der zu erwartenden geringeren Investitionen in Infrastrukturanlagen ein großer Vorteil, sondern auch wegen des vorhandenen historischen Stadtzentrums.

Konkret wurde deutlich, dass trotz der topographisch anspruchsvollen Bedingungen und der Maßgabe einer weitgehenden Reduzierung der Traktionsenergiespeichergröße ein HO-Bus-System mit einem Oberleitungsanteil von etwa 30 bis 50 Prozent betreiben lässt. Jedoch war es erforderlich, die streckenbegleitenden Oberleitungsabschnitte durch stationäre Ladeeinrichtungen mit erhöhter Ladeleistung an ausgewählten Linienendpunkten zu ergänzen. Das bedingt natürlich eine entsprechende Haltezeit am Endpunkt, um genügend Energie nachladen zu können. Hier sollte die Wendezeit nach der 1/6 Regelung vergeben werden[29]. Dass dieses eventuell mit Personalmehrkosten verbunden ist, sollte in der Wirtschaftlichkeitsberechnung berücksichtigt werden.

Der Vergleich mit den Technologievarianten des Batteriebusses als Overnight-Charger (Depot-Lader) und als Opportunity-Charger (Gelegenheitslader) hat ergeben, dass diese Varianten ebenfalls grundsätzlich machbar wären, jedoch mit gewissen Modifikationen bzw. betrieblichen Anpassungen verbunden sind.

Beide Batteriebus-Technologien wurden zunächst mit einer Hybrid-Zusatzheizung konfiguriert. Vor dem Hintergrund der gegebenen topographischen Situation würde dort im Realisierungsfall zum heutigen Zeitpunkt kein Elektrobussystem mit einer vollelektrischen Heizung zum Einsatz kommen. Der geringe Anteil von Heiztagen unter 5°C würde die zusätzlichen Energiespeicherkapazitäten wirtschaftlich nicht rechtfertigen, zumal gesamtbilanziell (d. h. auch unter Berücksichtigung des realen Strommixes) aufgrund des höheren Brennwertes von fossilen Energieträgern eine Zusatzheizung sogar aus ökologischer Sicht der Heizung des Fahrzeugs ausschließlich mit elektrischem Strom zu bevorzugen

29 Die 1/6-Regelung kann im Linienverkehr bei einem durchschnittlichen Haltestellenabstand von unter 3 km zur Einhaltung der Lenk- und Ruhezeiten angewendet werden. Sie besagt, dass die Wendezeiten jeweils 1/6 der reinen Lenkzeit betragen müssen, wobei die anrechenbare Wendezeit mindestens 10 Minuten betragen muss. Diese Regelung begünstigt Elektrobussysteme, die auf einer Nachladung am Linienendpunkt basieren.

wäre. Dies gilt insbesondere, wenn anstatt von Dieselkraftstoff oder Heizöl ein regenerativ erzeugter Brennstoff (z. B. Bioethanol) zum Einsatz käme. Komplette lokale Emissionsfreiheit bietet freilich nur eine vollelektrische Heizung.

Um eine vollständige Vergleichbarkeit mit dem HO-Bus zu ermöglichen, wurden dennoch beide Batteriebus-Varianten zusätzlich mit einer vollelektrischen Heizungsanlage simuliert. Aus oben genannten Gründen ist die vollelektrische Heizung jedoch als rein hypothetischer Vergleichsfall zu betrachten.

Im Ergebnis zeigte sich, dass der Opportunity-Charger in der Variante mit Hybrid-Zusatzheizung die Einsatzszenarien vollständig abbilden könnte. Auch die Variante mit vollelektrischer Heizung könnte die untersuchten Umläufe bewältigen, wenn die Energiespeicherkapazitäten um ca. 20 % erhöht würde. Die aufgrund der größeren Energiespeicher zu erwartende Minderung der Fahrgastkapazität sind überschaubar und vor dem Hintergrund, dass die rechnerisch maximale Fahrgastkapazität (4 Personen/m²) in der Praxis nicht erreicht wird, vernachlässigbar.

Der Overnight-Charger (Depot-Lader) mit Hybrid-Zusatzheizung wäre nur mit Einschränkungen in den Untersuchungsgebieten einzusetzen. Da der Speicherinhalt nicht für einen kompletten Betriebstag ausreicht, müssten die Fahrzeuge zur Tagesmitte in den Betriebshof zurückkehren und für zwei bis drei Stunden nachgeladen werden. Für dieses Szenario wären jedoch zwei zusätzliche Fahrzeuge auf den Umläufen einzusetzen. Eine Variante mit vollelektrischer Heizung zeigt entsprechend noch deutlichere Ergebnisse. Hier wären in einem Ausmaß zusätzliche Fahrzeuge erforderlich, dass die Unwirtschaftlichkeit auf der Hand liegt.

Das Fazit der technischen Machbarkeitsuntersuchung lautet folglich, dass sowohl der HO-Bus als auch der Batteriebus als Opportunity-Charger auf den untersuchten Linien in Marburg machbar wären – beim Opportunity-Charger auch in der unter den gegebenen Einsatzbedingungen nach heutigem Stand der Technik hypothetischen Variante mit vollelektrischer Heizung. Beim Overnight-Charger sind betriebliche Kompromisse in Form eines zusätzlichen Ladeaufenthaltes und daraus folgendem Mehraufwand von zwei Fahrzeugen erforderlich – was eine Umsetzung mutmaßlich ausschließt.

In der Wirtschaftlichkeitsberechnung wurden der HO-Bus, der Opportunity-Charger mit Hybrid-Zusatzheizung und vollelektrischer Heizung sowie der Overnight-Charger mit Hybrid-Zusatzheizung untersucht. Der Overnight-Charger wurde berücksichtigt, um zu untersuchen, ob die wirtschaftlichen Auswirkungen der erforderlichen Zusatzfahrzeuge dadurch relativiert werden können, dass keine linienbegleitende Ladeinfrastruktur benötigt wird. In der Variante mit vollelektrischer Heizung wurde aufgrund der offensichtlichen Unwirtschaftlichkeit (betrieblich unrealistische Zahl erforderlicher Zusatzfahrzeuge) auf eine vertiefende Untersuchung verzichtet.

Die für die Umsetzung des HO-Bus-Systems erforderlichen Investitionen in die partielle Oberleitungsinfrastruktur wirken sich in erheblichem Ausmaß aus und liegen um den Faktor 4 bis 6 über den Infrastrukturinvestitionen beim Opportunity-Charger. Im Laufe der Zeit relativiert sich dieser Kostennachteil zwar etwas aufgrund der langen Abschreibungszeit für das Oberleitungssystem, dennoch bleibt der HO-Bus ohne Förderung auch in der langfristigen Betrachtung dem Opportunity-Charger unterlegen – auch in der Variante mit vollelektrischer Heizung. Unter der aktuellen Förderkulisse, die einen hohen Anteil der Investitionen in die teure Oberleitungsinfrastruktur übernimmt, ist der HO-Bus bei Anpassung der Umläufe für die Verkehrsbetriebe in Marburg die interessanteste Option.

Auch ist bei diesen Ergebnissen zu berücksichtigen, dass die Betrachtung nur für eine bzw. zwei Linien der Stadtverkehrsnetze erfolgte. Kostenintensive Infrastrukturen wie die Oberleitungssysteme rechnen sich insbesondere dort, wo sie intensiv genutzt werden. Das bedeutet, dass sich der Kostennachteil des HO-Busses relativieren kann, wenn es gelingt, weitere Linien auf das System umzustellen, ohne dabei in nennenswertem Umfang das Oberleitungsnetz ausbauen zu müssen. Hierfür gibt es Ansatzpunkte, da die Oberleitungsabschnitte in der Innenstadt von Marburg zu einem guten Teil auf Verkehrsachsen liegen, die mit 7 bis 11 Buslinien stark belastet sind. In den drei deutschen Städten mit bestehendem Oberleitungsbusnetz ist der HO-Bus in jedem Fall eine gut machbare und vor dem Hintergrund deutlich geringerer Investitionen in die Infrastruktur wohl auch die wirtschaftlichste Lösung zur Ausweitung des Elektrobuseinsatzes.

Auch der Aspekt der betrieblichen Zuverlässigkeit unter anspruchsvollen topographischen Bedingungen ist ein Faktor, bei dem nach heutigem Stand der Technik der HO-Bus Vorteile entfalten kann. Es ist davon auszugehen, dass die Fahrzeughersteller von Batteriebussen bei der Systemauslegung die topographischen Bedingungen genau berücksichtigen und die Systeme im Vergleich zur Standardkonfiguration anpassen müssen. Dass jedoch auch mit batterieelektrischen Bussen topographisch anspruchsvolle Bedingungen bewältigt werden können, zeigt der Hybrid-Oberleitungsbus in Esslingen, der auf einem Linienast den Anstieg auf die Filderebene im oberleitungsfreien Betrieb, also als Batteriebus absolviert.

Eine Kapazitätsausweitung – etwa auf Doppelgelenkbusse – ist unter anspruchsvollen topographischen Bedingungen dagegen Stand heute vermutlich nur mit dem HO-Bus machbar.

Die Entscheidung zwischen HO-Bus und Opportunity-Charger wird letztlich unter Berücksichtigung einer Gesamtnetzbetrachtung zu treffen sein. Ein wesentlicher Faktor ist zudem der angestrebte Realisierungszeitraum. Fortschritte in der Entwicklung von Energiespeichersystemen erhöhen die Reichweite und auch die Leistungsparameter von elektrisch betriebenen Bussen. Letztlich ist auch zu erwarten, dass hierdurch innerhalb der Betrachtungszeiträume dieser Untersuchung auf Verbrenner-Zusatzheizungen grundsätzlich verzichtet werden kann – auch unter anspruchsvollen Einsatzbedingungen.

Mit Blick auf den HO-Bus lassen sich in der Zusammenschau aller Ergebnisse folgende Stichpunkte kondensieren, die relevant für die Machbarkeit von HO-Bus-Systemen sind bzw. diese begünstigen:

- Nachfragestarke Linien bei anspruchsvoller Topographie
- Möglichst linienreine Umlaufplanung und schlüssiges Migrationskonzept für die Netzentwicklung
- Verlagerung von Wendezeiten auf Endpunkte mit Nachlademöglichkeit (1/6-Regelung oder Pausenzeiten)
- Fundierte Energiebilanzierung zur optimalen Systemabwägung Oberleitungsanteil – Speichergröße – stationäre Ladestationen
- Maßgeschneiderte energieeffiziente Lösungen für die Heizung und Klimatisierung

5 Bewertung der technologischen Optionen

Verschiedene technische Varianten von HO-Bussen sind möglich. Gegenstand dieses Kapitels ist eine vergleichende und systematische Bewertung von vier Ausgestaltungsoptionen mit unterschiedlichen Reichweiten. Dafür werden in Abschnitt 5.1 die Varianten sowie die Vorgehensweise genauer beschrieben. In Abschnitt 5.2 werden die Ergebnisse der einzelnen Bewertungskategorien vorgestellt und schließlich in Abschnitt 5.4 alle Ergebnisse zu einer Gesamtbewertung zusammengeführt.

5.1 Vorgehensweise

5.1.1 Festlegung der technologischen Optionen

HO-Busse weisen gegenüber reinen Elektro-Bussen den Vorteil auf, dass ihre Batterie unter sonst gleichen Rahmenbedingungen kleiner dimensioniert werden kann. Hierdurch sinkt das Gesamtfahrzeuggewicht, sodass potentiell höhere Beförderungskapazitäten möglich sind. Weiterhin sinken die erforderlichen Investitionen in die Batterie. Nachteile des HO-Bus-Konzepts sind die erforderlichen Investitionen in fahrzeugseitige Oberleitungstechnik sowie langfristige Investitionen in die Oberleitungsinfrastruktur, die innerstädtischen Bauraum einnimmt. Die Herausforderung bei der Umsetzung von HO-Bussen ist es, eine optimale Kombination aus Batteriekapazität, d. h. Fahrzeugreichweite, und benötigter Oberleitungslänge zu finden. Eine allgemeine optimale Kombination kann es nicht geben, da sich die Rahmenbedingungen eines möglichen Einsatzes von HO-Bussen je nach Stadt und Buslinie hauptsächlich hinsichtlich zweier Kriterien unterscheiden: Erstens unterscheiden sich die betrieblichen Einsatzbedingungen der unterschiedlichen Buslinien – beispielsweise hinsichtlich Wendezeiten und benötigten Beförderungskapazitäten – und zweitens unterscheiden sich die baulichen Rahmenbedingungen, die unterschiedliche Oberleitungsanteile je Buslinie erlauben. Um dennoch allgemein gültige Schlussfolgerungen ziehen zu können, werden HO-Busse der unterschiedlichen Größenklassen (Solo-Bus, Gelenkbus und Doppelgelenkbus) mit jeweils vier unterschiedlichen „oberleitungsfreien“ Reichweiten untersucht, wie im Folgenden dargestellt.

Um unterschiedlichen Einsatzbedingungen von HO-Bussen zu adressieren, werden folgende vier Reichweiten für alle Busgrößen betrachtet:

	HO-Klein	HO-Mittel	HO-Groß	HO-Max
Elektrische Reichweite [km]	20	50	75	100

Tabelle 25: Untersuchte Ausgestaltungsoptionen des HO-Busses.

Diese Reichweiten wurden festgelegt, um die Bandbreite des möglichen Einsatzes von HO-Bussen abzubilden. Die Option mit der kleinsten Reichweite („HO-Klein“) hat eine

Reichweite von 20 km, um die An- und Abfahrt des Busses an dem Depot zu gewährleisten sowie einen relevanten Fahranteil der Fahrstrecke oberleitungsfrei zu ermöglichen. Die Option „HO-Max“ ermöglicht einen oberleitungsfreien Einsatz von ca. 100 km. Eine höhere Reichweite wird für HO-Busse nicht angenommen, da benötigte Oberleitungslängen so gering werden (vgl. Kapitel 4.2), dass nicht mehr von einem Hybrid-Oberleitungsbus gesprochen werden kann.

Die genannten Reichweiten sind als Mindestreichweiten zu verstehen, die auch unter winterlichen Bedingungen sowie zu Ende der Batterielebensdauer gewährleistet sein müssen. Die notwendigen Batteriekapazitäten κ der einzelnen Ausgestaltungsoptionen des HO-Busses werden aus der geforderten Reichweite RW, den Energiebedarf des Busses im Winter c_{Winter} sowie dem Batteriehub DOD wie folgt bestimmt

$$\kappa = \frac{c_{winter}\, RW}{DOD}. \quad (1)$$

Für den Fahrenergiebedarf wurden auf Basis aktueller Forschungsprojekte durchschnittliche Werte bestimmt (vgl. Tabelle 26). Für die Variante HO-Mittel konnten Literaturwerte für die Buslängen 12m und 18m direkt recherchiert werden (Göhlich et al. 2014, Lajunen 2014, Rogge et al. 2015, Bergk et al. 2016, NOW 2016). Für den Doppelgelenkbus (24m) wurde angenommen, dass der Fahrenergiebedarf mit erhöhter Beförderungskapazität steigt – durchschnittlich um 30 % im Vergleich zum Gelenkbus (vgl. z.B. Van Hool AGG300 (Doppelgelenkbus, 200 Plätze) & Hess Swisstrolley (Gelenkbus, 160 Plätze)). Diese Werte wurden mit den Vertretern der Verkehrsbetriebe diskutiert und wurden verwendet, um den Fahrenergiebedarf der anderen Varianten proportional zum Fahrzeuggewicht zu bestimmen. Auf Basis einer Fahrleistungsberechnung[30] wurden folgende Annahmen getroffen: der Fahrenergiebedarf der Variante „HO-Klein“ sinkt im Vergleich zur Variante „HO-Mittel“ um 5 %. Die Energiebedarfe der Varianten „HO-Groß“ bzw. „HO-Max“ steigen um 5 % bzw. 10 %.

Busgröße	HO-Klein	HO-Mittel	HO-Groß	HO-Max
Solo-Bus (12 m)	1,9	2,0	2,1	2,2
Gelenkbus (18 m)	3,0	3,1	3,3	3,4
Doppelgelenkbus (24 m)	3,8	4,0	4,2	4,4

Tabelle 26: Durchschnittliche Fahrenergiebedarfe Winter [kWh/km].

Die Werte für den Sommer liegen um ca. 30 %-50 % niedriger (vgl. Anhang: Tabelle 70).

30 Für die Methodik der Fahrleistungsberechnung vgl. z.B. Funke und Plötz 2014. Die für die Berechnung notwendigen Fahrzeugparameter für Busse entsprechend (verkehr-bs 2014, Lajunen 2014, Gauger und Funke 2015).

Der Batteriehub DOD wird mit 70 % angenommen. Diesem Parameter liegt die Annahme zu Grunde, dass die Batterie zu Lebensende noch eine nutzbare Kapazität in Höhe von 80 % der ursprünglich nutzbaren Kapazität besitzt und diese zu 90 % ausgenutzt werden kann. Für die Interpretation ist zu beachten, dass sich der Batteriehub von 70 % zu Beginn der Batterielebensdauer zu winterlichen Bedingungen ergibt. Der Batteriehub sinkt proportional mit den geringeren Fahrenergiebedarfen im Sommer und ergibt sich im Sommer unter sonst gleichen Bedingungen zu 40-50 %.

Daraus ergeben sich die folgenden Batteriegrößen für die verschiedenen Bus-Varianten:

		HO-Klein	HO-Mittel	HO-Groß	HO-Max
Elektrische Reichweite	km	20	50	75	100
Batteriekapazität in kWh	Solo-Bus	65	170	265	370
	Gelenkbus	100	260	410	570
	Doppelgelenkbus	130	335	525	735

Tabelle 27: Angenommene Batteriegrößen für Überschlagsrechnungen

5.1.2 Generische Bestimmung des benötigten Oberleitungsanteils

Wie eingangs erläutert, bieten höhere Fahrzeugreichweiten der Busvarianten den Vorteil, dass ein geringerer Anteil der Strecke mit Oberleitungen ausgestattet werden muss. Der folgende Absatz beschreibt den Ansatz zur Bestimmung des minimalen Streckenanteils, der bei gegebener Fahrzeugreichweite mit Oberleitungen ausgestattet sein muss, um einen Betrieb mit HO-Bussen zu ermöglichen. Die Angabe der minimalen Streckenausstattung impliziert die Annahme einer optimalen Positionierung der Oberleitung. Die Analyse erfolgt für den reinen Oberleitungsbetrieb sowie zusätzlich unter der Annahme einer Lademöglichkeit an der Endhalte- bzw. Wendestelle.

Für die Skalierung der Oberleitungsinfrastruktur wird von Winterbedingungen ausgegangen.

5.1.2.1 Berechnungsverfahren

Zunächst muss die durch Oberleitungen pro Umlauf bereitzustellende Strecke berechnet werden, die sich wie folgt ergibt:

$$RW_{OL} = \frac{\#U\ l_U - (R_{Bus} - d_P)}{\#U}. \quad (2)$$

RW_{OL}	km	durch Oberleitung bereitzustellende Strecke je Umlauf
$\#U$	-	Anzahl Umläufe pro Bus und Tag

l_U	km	Streckenlänge eines Umlaufs
R_{Bus}	km	Reichweite des Busses im Winter
d_P	km	Pufferstrecke, beispielsweise An- und Abfahrt ins Depot

Die Reichweite des Busses im Winter entspricht den Auslegungswerten entsprechend Tabelle 25. Die bereitzustellende Strecke am Tag ergibt sich als Gesamtfahrleistung im Linienbetrieb abzüglich der Reichweite des Busses, die um eine vorgegebene Pufferstrecke reduziert wurde. Die Pufferstrecke folgt der Logik, dass Busse diese Strecke oberleitungsfrei vom Depot zur Linienstrecke zurücklegen müssen.

Diese bereitzustellende Strecke LR_{OL} wird der pro km an Oberleitungen nachladbaren Strecke gegenübergestellt, um die minimale Ausstattung der Strecke mit Oberleitungen zu erhalten. Diese ergibt sich zu:

$$LR_{OL} = \frac{P_{OL} - P_D}{v_{\emptyset} c_{\emptyset}}. \quad (3)$$

LR_{OL}	km/km	Pro km Oberleitung nachladbare Strecke [km]
P_{OL}	kW	Leistung der Oberleitung
P_D	kW	Durchschnittliche Fahrleistung
$v_{\emptyset}$	km/h	Durchschnittliche Geschwindigkeit
$c_{\emptyset}$	km	Durchschnittlicher Fahrenergiebedarf (Winter)

Der Nenner von Formel 3 entspricht der Leistung, mit der die Batterie während der Fahrt nachgeladen werden kann. Der Zähler entspricht der notwendigen durchschnittlichen Fahrleistung. Der Quotient ergibt schließlich die Strecken [km], die pro km zurückgelegter Strecke nachgeladen werden kann. Beträgt der nachladbare Streckenanteil beispielsweise 0,5 km, bedeutet dies, dass während der Fahrt von einem km Länge durchschnittlich die Energiemenge nachgeladen werden kann, die für zusätzlich 0,5 km (oberleitungsfreier) Fahrt notwendig sind.

Aus Formel 2 und 3 kann schließlich die minimale Oberleitungslänge berechnet werden zu:

$$l_{OL} = \frac{RW_{OL}}{1 + LR_{OL}}. \quad (4)$$

l_{OL}	km	minimale Länge Oberleitung

Der Nenner von Formel 4 ergibt sich aus der Tatsache, dass pro einem km an Oberleitung gefahrener Strecke durchschnittlich insgesamt $(1 + LR_{OL})$ km Strecke zurückgelegt werden können. Durch Lademöglichkeiten an Haltestellen, vor allem an der Wendestelle, kann die minimal benötigte Oberleitungslänge l_{OL} gesenkt werden, da die durch Oberlei-

tungen bereitzustellende Strecke RW_{OL} [km] um die durch die Lademöglichkeit bereitgestellte Strecke RW_{GL} [km] sinkt:

$$l_{OL} = \frac{RW_{OL} - RW_{GL}}{1 + LR_{OL}}. \quad (5)$$

RW_{GL}	km	Durch die Lademöglichkeit an der Wendestelle bereitgestellte Strecke

Die durch die Lademöglichkeit an der Wendestelle bereitgestellte Strecke RW_{GL} ergibt sich aus der ladeinfrastrukturseitigen Nettoladeleistung P_{GL} [kW], der Ladezeit LD [h] sowie des Energiebedarfs des Busses $c_{\emptyset}$ [kWh/km] zu:

$$RW_{GL} = \frac{P_{GL} * LD}{c_{\emptyset}}. \quad (6)$$

P_{GL}	kW	Ladeinfrastrukturseitigen Nettoladeleistung
L	h	Ladezeit

Für die weiteren Parameter vgl. die vorangegangenen Formeln 1 bis 5.

Die Berechnungen wurden für unterschiedliche Parameter (z.B. Ladeleistungen, Streckenlängen) durchgeführt, wie im Folgenden dargestellt.

5.1.2.2 Oberleitungsausstattung und Batterielebensdauer

Die Lebensdauer einer Batterie ist abhängig von vielen Einflussfaktoren, wie beispielsweise den Temperaturverhältnissen oder der Zyklenanzahl, d.h. der Anzahl der Be- und Entladevorgänge (Ketterer et al. 2009). Im Allgemeinen steigt die Batterielebensdauer der Batterie umgekehrt proportional zum Batteriehub (Kley 2011).

Im Rahmen dieses Projekts stellt sich die Frage, wie stark die Lebensdauer der Batterie durch einen erhöhten Zubau an Oberleitungen erhöht werden kann, da ein höherer Oberleitungsanteil unter sonst gleichen Bedingungen zu einem geringeren Ladehub führt. Zur Abschätzung der Größenordnung dieses Effekts wird die Lebensdauer der Batterie in Abhängigkeit der Zyklenanzahl entsprechend folgendem mathematischen Modell bestimmt (vgl. Kley 2011). Zunächst wird die maximale Anzahl der Batteriezyklen in Abhängigkeit des Ladehubs wie folgt bestimmt

$$N_{max} = \alpha \, DOD^{\beta}.$$

Die Parameter $\alpha = 2.700$ und $\beta = -1{,}665$ werden auf Basis einer Literaturrecherche bestimmt (vgl. Anhang: Tabelle 71). Die Annahmen sind als konservativ einzustufen und sind daher konsistent mit den angenommenen Batteriepreisen. Insgesamt ist die Alterung der Batterie abhängig von der Chemie der Batteriezelle (Ketterer et al. 2009). Die Darstel-

lung eines durchschnittlichen Wertes, wie vorgenommen, ist im Einklang mit dem Fokus des Projekts.

Unter Annahme der oben genannten Alterungsparameter und einer Jahresfahrleistung von 60.000 km (vgl. auch Bergk et al. 2016) ergeben sich folgende Batterielebensdauern.

Batteriehub	HO-Klein	HO-Mittel	HO-Groß	HO-Max
40 % SOC	3,3	8,3	12,6	16,3
60 % SOC	2,5	6,3	9,6	12,4
80 % SOC	2,1	5,2	7,9	10,3

Tabelle 28: Durchschnittliche Batterielebensdauer eines Gelenkbusses in Jahren

Man erkennt, dass im Besonderen für die Ausgestaltungsoption „HO-Klein“ eine hohe Beanspruchung der Batterie zu einer geringen Lebensdauer führt. Mit zunehmender Batteriekapazität steigt die Batterieliebensdauer, da aufgrund der größeren Batteriekapazitäten die Anzahl der Vollzyklen bei sonst gleichen Rahmenbedingungen sinkt. Dieser erhöhten Lebensdauer stehen aber höhere Investitionen sowie ein höheres Fahrzeuggewicht entgegen.

In Abhängigkeit des Batteriehubs wurden minimal benötigte Oberleitungslängen derart bestimmt, dass der vorausgesetzte maximale Ladehub der Batterie voll ausgenutzt wurde. Für die angenommenen Rahmenbedingungen ergeben sich für durchschnittliche Fahrleistungen folgende minimale Oberleitungsausstattungen.

Batteriehub	HO-Klein	HO-Mittel	HO-Groß	HO-Max
40 % SOC	25 %	23 %	22 %	20 %
60 % SOC	24 %	22 %	20 %	17 %
80 % SOC	23 %	19 %	16 %	12 %

Tabelle 29: Benötigte Oberleitungsausstattung eines Gelenkbusses in Abhängigkeit des Batteriehubs bei 200 kW Ladeleistung

Man erkennt, dass durch einen erhöhten Ladehub die benötigte Oberleitungsausstattung gesenkt werden kann. Diese ist jedoch im Besonderen für die kleineren Ausgestaltungsoptionen mit wenigen Prozentpunkten gering. Zwar ist der Aufbau von Oberleitungsinfrastruktur mit hohen Investitionen verbunden. Eine Senkung des Oberleitungsinfrastrukturbedarfs durch die Erhöhung des Ladehubs erscheint aber vor dem Hintergrund der deutlich geringeren Batterielebensdauer allgemein nicht geeignet und wird daher nicht weiter untersucht.

Die Ergebnisse dieser generischen Rechnung geben Hinweise, wie in Städten generell die Ausstattung mit Oberleitung sein könnten, stimmen aber nicht mit den Detailanalysen

für Marburg überein, da hier linienscharf optimiert wurde. Darüber hinaus bestehen Unsicherheiten, mit welcher Ladung realistisch während der Fahrt geladen werden kann.

Im Folgenden sind die benötigten Oberleitungslängen in Abhängigkeit der unterschiedlichen Auslegungsoptionen dargestellt. Aufgrund des Projektfokus auf Gelenkbusse werden die Analysen für diese Buslänge dargestellt. Die Darstellung der Ergebnisse für Solo-Busse und Doppelgelenkbusse erfolgt ergänzend und ist im Anhang dargestellt.

Die zugrundeliegenden Annahmen zum Linienbetrieb der Fahrzeuge ist für alle nachfolgenden Analysen identisch und in Tabelle 30 dargestellt. Es wird standardmäßig von 15 Umläufen pro Tag ausgegangen (vgl. auch Bergk et al. 2016), in einer Sensitivitätsanalyse werden 12 Umläufe pro Tag untersucht.

Parameter	Wert	Einheit
Streckenlänge pro Umlauf	15,3	km
Umläufe pro Bus und Tag	15 (12)	
Pufferstrecke	10	km
Durchschnittsgeschwindigkeit	18	km/h

Tabelle 30: Annahmen Rahmenbedingungen Linienbetrieb

Der Streckenanteil der benötigten Oberleitungslänge in Abhängigkeit der Ausgestaltungsoption (Elektrische Reichweite des Busses) sowie in Abhängigkeit der an der Oberleitung verfügbaren Leistung ist in folgender Abbildung 40 für eine durchschnittliche Fahrleistung von 52,5 bis 60 kW (je nach Ausgestaltungsoption) dargestellt. Die durchschnittliche Fahrleistung entspricht der Fahrleistung bei 18 km/h in der Ebene. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für 12 Umläufe pro Tag sind gestrichelt dargestellt. Es wird von keiner weiteren Lademöglichkeit auf der Strecke ausgegangen.

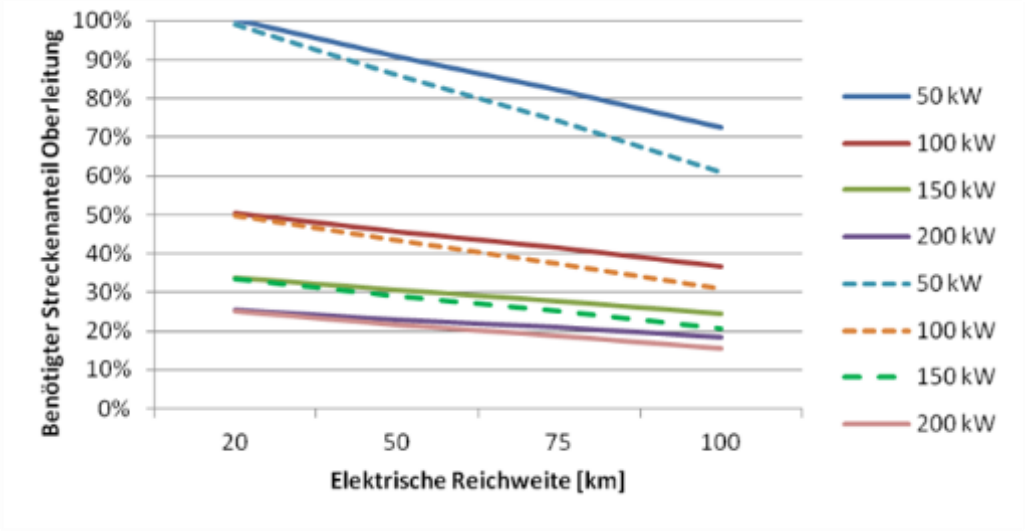


Abbildung 40: Benötigte Oberleitungsausstattung je nach Elektrische Reichweite und Ladeleistung der Oberleitung bei durchschnittlicher Fahrleistung.

Man erkennt, dass im Besonderen für geringe Ladeleistungen der Oberleitung die Oberleitungsausstattung sinken kann, für Ladeleistungen ab 100 kW insgesamt für vergleichsweise geringe elektrische Reichweiten Oberleitungsausstattungen von unter 50 % der Linienstrecke notwendig sind. Der Einfluss verminderter Umlaufzahlen ist ebenfalls als begrenzt einzustufen.

Ist die benötigte durchschnittliche Fahrleistung des Busses, beispielsweise aufgrund anspruchsvoller Topologie oder höheren Geschwindigkeiten, doppelt so hoch (105 bis 120 kW, je nach Ausstattungsvariante), ergeben sich deutlich höhere Bedarfe der Oberleitungsausstattung. Mit Ladeleistungen von maximal 50 kW sowie für die Option HO-Klein bei maximal 100 kW Ladeleistung ist ein Hybrid-Oberleitungsbus nicht darstellbar.

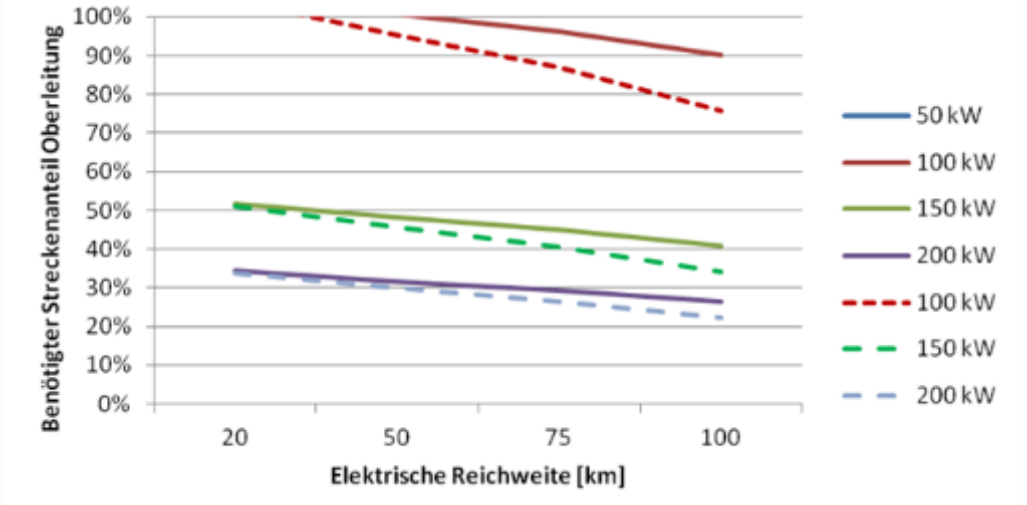


Abbildung 41: Benötigte Oberleitungsausstattung je nach Elektrische Reichweite und Ladeleistung der Oberleitung bei erhöhter Fahrleistung

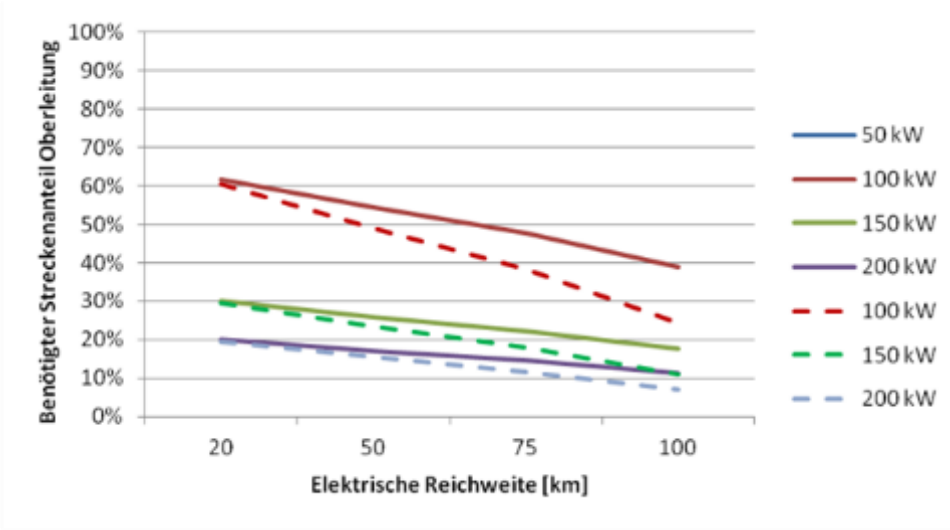


Abbildung 42: Benötigte Oberleitungsausstattung je nach Elektrische Reichweite und Ladeleistung der Oberleitung bei erhöhter Fahrleistung mit Gelegenheitsladen an der Wendestelle

Ist bei hohen Fahrleistungen zusätzlich noch eine Lademöglichkeit an der Wendestelle vorhanden – mit 6 Minuten Ladezeit bei 180 kW Ausgangsladeleistung der Ladeinfrastruktur – ergibt sich der in folgender Abbildung 43 dargestellte Bedarf.

Durch Gelegenheitslademöglichkeiten, im Besonderen bei hohen Ladeleistungen, kann die Oberleitungsausstattung deutlich reduziert werden, sodass eine zusätzliche Lademöglichkeit in Erwägung gezogen werden sollte, falls möglich, da diese das Potential von Hybrid-Oberleitungsbussen deutlich erhöht.

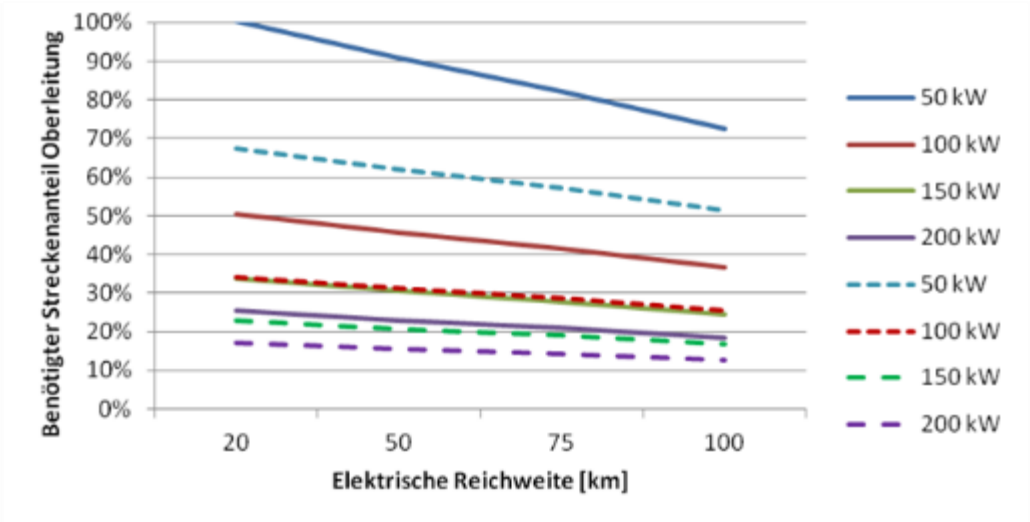


Abbildung 43: Benötigte Oberleitungsausstattung je nach Elektrische Reichweite und Ladeleistung der Oberleitung bei durchschnittlicher Fahrleistung im Winter (durchgezogene Linie) und Sommer (gestrichelte Linie)

Die gezeigten Ergebnisse beziehen sich auf den maximalen Auslegungsfall im Winter. Stellt man diesen Oberleitungsbedarfen die Bedarfe im Sommer gegenüber, ergibt sich folgende Grafik. Die Bedarfe im Sommer sind gestrichelt dargestellt, die Leistung wurde entsprechend der Energiebedarfe skaliert.

5.1.3 Multikriterielle Bewertung mittels Nutzwertanalyse

In der Regel sehen sich Entscheidungsträger bei der Auswahl einer Alternative nicht nur mit einem Kriterium konfrontiert, sondern vielmehr mit mehreren Kriterien gleichzeitig, die es entsprechend zu berücksichtigen gilt. Um dem Entscheider hierbei eine Hilfestellung zu bieten, wurden in den letzten Jahrzehnten eine Vielzahl methodischer Ansätze entwickelt, die ihn mit Hilfe formalisierter expliziter Modelle bei der Bewertung und Auswahl von Alternativen unterstützen sollen (vgl. Zhang et al. 2009). Die Auswahl eines passenden methodischen Ansatzes erfolgt dabei in Abhängigkeit des vorliegenden Problems, wobei zwischen zwei grundsätzlichen Verfahren unterschieden werden kann (vgl. Zimmermann und Gutsche 1991):

Beim Multi-Objective Decision Making (MODM) steht die Identifikation einer optimalen Alternative in einem stetigen Lösungsraum mit nicht eindeutig vorliegenden Alternativen im Vordergrund („Optimierung“). Während beim Multi-Attribute Decision Making (MADM) aus einer gegebenen Anzahl an Alternativen, die vorteilhafteste ausgewählt werden soll. Im Kontext dieser Studie sind vor allem letztere Verfahren von Relevanz, wobei sich diese nochmals nach der Art und Qualität der vorliegenden Informationen über die Präferenzen des Entscheiders unterteilen lassen. So ist es beispielsweise für eine techno-ökonomische oder ökologische Bewertung notwendig, dass das Verfahren in der Lage ist auch entsprechende kardinale Informationen zu berücksichtigen. Die bekanntesten multikriteriellen Methoden, die hierzu in Frage kommen, sind der Analytische Hierarchie Prozess, PROMETHEE und die Nutzwertanalyse (vgl. Götze 2008). Die Nutzwertanalyse stellt dabei eine einfache und leicht zugängliche Methode zur systematischen Strukturierung von multikriteriellen Entscheidungsproblemen dar und ist daher in der Praxis weit verbreitet und etabliert (vgl. Oberschmidt 2010). Auch für die hier vorliegende Fragestellung stellt sie aufgrund ihrer Transparenz und Nachvollziehbarkeit eine geeignete Methode dar.

Die Ermittlung des „Nutzwertes“ einer Alternative erfolgt dabei in drei Schritten:

1. Zuerst werden die Alternativen entsprechend dem relativen Vorteil für ein Attribut geordnet.
2. Im zweiten Schritt werden die Gewichtungen der Kriterien entsprechend der Präferenz des Entscheiders bestimmt. Die Kriterien werden hierzu in ihrer Gesamtheit gegenübergestellt und die resultierenden Gewichtungen daraufhin normiert.
3. Im letzten Schritt wird anschließend der Präferenzindex einer Alternative $\phi^{NWA}(A_i)$ durch die gewichtete Summe der Einzelwerte ermittelt.

Das Ergebnis aus obiger Gleichung liefert einen Präferenzindex im Intervall [0,1]. Für den Entscheider ist dabei jene Alternative am vorteilhaftesten, die den höchsten Wert aufweist (vgl. Götze 2008). Für das vorliegende Projekt wurde eine fünfteilige Skala verwendet, d.h. alle Attribute werden von 1 – schlecht bis 5 – sehr gut bewertet. Die Attribute werden wo möglich quantifiziert (Umrechnung auf 1 – 5 Skala) und sonst erfolgt die Bewertung qualitativ.

In der Bewertung der HO-Bus-Varianten wird die Nutzwertanalyse gewählt. Die Gewichte der Attribute wurden in einem gemeinsamen Treffen festgelegt. Um die Robustheit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurden die Gewichte einmal durch die potenziellen Betreiber (die Stadtwerke Marburg und Trier) und einmal durch die beteiligten Forscher bestimmt. Die Gewichte sind in Tabelle 31 zusammengefasst.

Gruppe	Akzeptanz	Techno-ökonomisch	Ökologisch	Betrieb	Netzbelastung
Stadtwerke	29 %	23 %	23 %	18 %	7 %
Forscher	18 %	25 %	29 %	22 %	6 %

Tabelle 31: Gewichte für Bewertung

5.2 Techno-ökonomische Ergebnisse

Im Rahmen der techno-ökonomischen Bewertung werden die Kosten der Infrastruktur und des Betriebs betrachtet. Diese umfassen die Investitionen für die Infrastruktur, die Fahrzeuge und die Batterie sowie die laufenden Kosten des Betriebs. Für die Vergleichbarkeit werden alle Investitionen und laufenden Kosten auf Kosten je Bus- und Platz-Kilometer heruntergebrochen. Die Betrachtung erfolgt mit Preisstand 2016/2017 (Zeitpunkt der Untersuchung) und für den Zeithorizont 2030.

5.2.1 Investitionen Infrastruktur

Die Infrastrukturkosten für ein HO-Bus-Netz hängen maßgeblich vom Anteil der elektrifizierten Abschnitte am Liniennetz ab. Der erforderliche Elektrifizierungsanteil wiederum hängt von der Netzstruktur, dem Anteil der Linien auf denen HO-Busse eingesetzt werden und nicht zuletzt von der elektrischen Reichweite der Batterie in den HO-Bussen ab. Die Höhe der Investitionen in eine eigene Ladeinfrastruktur wird darüber hinaus von den örtlichen Gegebenheiten und den gestalterischen Ansprüchen beeinflusst. Bezogen auf den Bus-km sinken die Infrastrukturkosten proportional zur Fahrtenanzahl unter der Oberleitung.

Konkrete Aussagen zu den Infrastrukturinvestitionen sind deshalb nur ortsspezifisch auf Grundlage von detaillierten Planungen möglich. Die folgenden Angaben zu Investitionen

in die HO-Bus-Infrastruktur können deshalb nur Auskunft über die Größenordnung der zu erwartenden Investitionen in die Infrastruktur geben, aber keine detaillierte Planung und Kalkulation ersetzen.

	2017	2030	
Fahrleitungsanlage 2 Richtungen	1,30	1,47	Mio. €/km
Fahrleitungsanlage 1 Richtung	1,00	1,13	Mio. €/km
Nachladung Betriebshof an der Oberleitung	120,0	135,6	T€/Fahrzeug
Schnellladung am Endpunkt	90,0	101,7	T€/Fahrzeug

Tabelle 32: Größenordnung der Investitionen in die Infrastruktur

Die dargestellten Investitionen in die Infrastruktur wurden für Preisstand 2017 mit der Planungssoftware „BeSystO® – Bewertungsverfahren für Systeminnovationen im ÖPNV“ (VCDB 2017) ermittelt. Die Berechnung erfolgte jeweils inklusive Oberleitung, Unterwerk, Planungs- und Nebenkosten auf Basis von 10 km Fahrleitung oder 10 Fahrzeugen bei der Nachladung im Betriebshof oder am Endpunkt. Die Fahrleitungsanlagen beinhalten einfach gestaltete Masten, architektonisch anspruchsvolle Ausführungen können deutlich teurer sein. Zur Nachladung der Busse an der Oberleitung im Betriebshof ist berücksichtigt, dass für jedes Fahrzeug eine eigene Landeinfrastruktur eingerichtet wird. Bei der Schnellladung an einem Linienendpunkt ist hingegen unterstellt, dass die Infrastruktur täglich von zehn Fahrzeugen genutzt wird, sodass die Investition, bezogen auf das einzelne Fahrzeug, geringer ist als bei der Nachladung an der Oberleitung im Betriebshof.

Die Fortschreibung auf den Preisstand 2030 erfolgte in Anlehnung an das Verfahren der Standardisierten Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen des öffentlichen Personennahverkehrs über den Preisindex „GP09-27 Elektrische Ausrüstungen des Statistischen Bundesamtes“ (Destatis 2017). Die Preissteigerung von 2003 bis 2016 (13 %) wurde auf den Zeitraum 2017 bis 2030 übertragen.

Die Umrechnung der Investitionen in jährliche Kosten erfolgt über die Annuitätenmethode. Die jährlichen Kosten (Annuität) für Abschreibung und Verzinsung der Investitionen errechnen sich gemäß:

$$\mathrm{a} = \mathrm{N} * \frac{(1+i)^n * i}{(1+i)^n - 1}$$

a: Annuität

N: Nettoinvestition

i: Zinssatz [%]

n: Nutzungsdauer in Jahren

Da nicht absehbar ist, wie sich der Zinssatz langfristig entwickelt, wird er in der Berechnung vereinfacht mit 2 % (in Anlehnung an Investitionskredit für Kommunale und Soziale Unternehmen der KFW bei sehr guter Bonität (KFW 2017) berücksichtigt. Als mittlere Nutzungsdauer für die Infrastruktur werden 40 Jahre veranschlagt.

Zusätzlich fallen Unterhaltungskosten für die Infrastruktur an. Diese werden mit 1 % p.a. bezogen auf die Infrastrukturinvestition berücksichtigt.

Die Ansätze zur mittleren Nutzungsdauer und zu den Unterhaltungskosten berücksichtigen, dass neben der Fahrleitungsanlage und der Unterwerke auch Kosten für „einmalige Aufwendungen“ wie beispielsweise Straßenumbau und Planung in der Kalkulation enthalten sind, die nicht abzuschreiben sind und auch keine zusätzlichen Unterhaltungskosten verursachen.

	2017	2030	
Fahrleitungsanlage 2 Richtungen			
Abschreibung + Verzinsung	47.522	53.700	€/km
Unterhaltung	13.000	14.690	€/km
Summe	60.522	68.390	€/km
Fahrleitungsanlage 1 Richtung			
Abschreibung + Verzinsung	36.556	41.308	€/km
Unterhaltung	10.000	11.300	€/km
Summe	46.556	52.608	€/km

Tabelle 33: Jährliche Infrastrukturkosten je km Oberleitung

Werden die Kosten der Infrastruktur auf den Bus-km umgerechnet, dann werden die Kosten je Bus-km im Wesentlichen von zwei Einflussgrößen bestimmt:

- Anteil der Oberleitung an der gesamten Linienlänge,
- Anzahl der Fahrten unter der Oberleitung.

Die folgenden Tabellen und Grafiken verdeutlichen die Auswirkungen dieser Einflussgrößen auf die Kosten je Bus-km. Die Hochrechnung der Anzahl der Fahrten pro Jahr erfolgt über die Fahrten je Richtung und Stunde, einer mittleren Bedienungszeit von 18 Stunden/Tag und dem Hochrechnungsfaktor 300 vom Tag auf das Jahr.

Anteil Oberleitung an Linie	Investitionen Infrastuktur T€/km eine Ri.	Infrastruktur T€/a je km eine Richtung	Kosten je Bus-km						
			1	2	3	4	6	12	Fahrten je Richtung/Stunde
			5.400	10.800	16.200	21.600	32.400	64.800	Fahrten/a
10%	100	4,7	0,86	0,43	0,29	0,22	0,14	0,07	€/Fahrzeug-km
20%	200	9,3	1,72	0,86	0,57	0,43	0,29	0,14	€/Fahrzeug-km
30%	300	14,0	2,59	1,29	0,86	0,65	0,43	0,22	€/Fahrzeug-km
40%	400	18,6	3,45	1,72	1,15	0,86	0,57	0,29	€/Fahrzeug-km
50%	500	23,3	4,31	2,16	1,44	1,08	0,72	0,36	€/Fahrzeug-km
60%	600	27,9	5,17	2,59	1,72	1,29	0,86	0,43	€/Fahrzeug-km
70%	700	32,6	6,04	3,02	2,01	1,51	1,01	0,50	€/Fahrzeug-km
80%	800	37,2	6,90	3,45	2,30	1,72	1,15	0,57	€/Fahrzeug-km
90%	900	41,9	7,76	3,88	2,59	1,94	1,29	0,65	€/Fahrzeug-km
100%	1000	46,6	8,62	4,31	2,87	2,16	1,44	0,72	€/Fahrzeug-km

Tabelle 34: Kapitaldienst und Unterhaltung Oberleitung in eine Richtung (Preisstand 2017)

Anteil Oberleitung an Linie	Investitionen Infrastuktur T€/km eine Ri.	Infrastruktur T€/a je km eine Ri.	Kosten je Bus-km 1	2	3	4	6	12	Fahrten je Richtung/Stunde
			5.400	10.800	16.200	21.600	32.400	64.800	Fahrten/a
10%	113	5,3	0,97	0,49	0,32	0,24	0,16	0,08	€/Fahrzeug-km
20%	226	10,5	1,95	0,97	0,65	0,49	0,32	0,16	€/Fahrzeug-km
30%	339	15,8	2,92	1,46	0,97	0,73	0,49	0,24	€/Fahrzeug-km
40%	452	21,0	3,90	1,95	1,30	0,97	0,65	0,32	€/Fahrzeug-km
50%	565	26,3	4,87	2,44	1,62	1,22	0,81	0,41	€/Fahrzeug-km
60%	678	31,6	5,85	2,92	1,95	1,46	0,97	0,49	€/Fahrzeug-km
70%	791	36,8	6,82	3,41	2,27	1,70	1,14	0,57	€/Fahrzeug-km
80%	904	42,1	7,79	3,90	2,60	1,95	1,30	0,65	€/Fahrzeug-km
90%	1017	47,3	8,77	4,38	2,92	2,19	1,46	0,73	€/Fahrzeug-km
100%	1130	52,6	9,74	4,87	3,25	2,44	1,62	0,81	€/Fahrzeug-km

Tabelle 35: Kapitaldienst und Unterhaltung Oberleitung in eine Richtung (Preisstand 2030)

Anteil Oberleitung an Linie	Investitionen Infrastuktur T€/km zwei Ri.	Infrastruktur T€/a je km zwei Ri.	Kosten je Bus-km 1	2	3	4	**6**	12	Fahrten je Richtung/Stunde
			10.800	21.600	32.400	43.200	64.800	129.600	Fahrten/a
10%	130	6,1	0,56	0,28	0,19	0,14	0,09	0,05	€/Fahrzeug-km
20%	260	12,1	1,12	0,56	0,37	0,28	0,19	0,09	€/Fahrzeug-km
30%	390	18,2	1,68	0,84	0,56	0,42	0,28	0,14	€/Fahrzeug-km
40%	520	24,2	2,24	1,12	0,75	0,56	0,37	0,19	€/Fahrzeug-km
50%	650	30,3	2,80	1,40	0,93	0,70	0,47	0,23	€/Fahrzeug-km
60%	780	36,3	3,36	1,68	1,12	0,84	0,56	0,28	€/Fahrzeug-km
70%	910	42,4	3,92	1,96	1,31	0,98	0,65	0,33	€/Fahrzeug-km
80%	1040	48,4	4,48	2,24	1,49	1,12	0,75	0,37	€/Fahrzeug-km
90%	1170	54,5	5,04	2,52	1,68	1,26	0,84	0,42	€/Fahrzeug-km
100%	1300	60,5	5,60	2,80	1,87	1,40	0,93	0,47	€/Fahrzeug-km

Tabelle 36: Kapitaldienst und Unterhaltung Oberleitung in zwei Richtungen (Preisstand 2017)

Anteil Oberleitung an Linie	Investitionen Infrastuktur T€/km zwei Ri.	Infrastruktur T€/a je km zwei Ri.	Kosten je Bus-km 1	2	3	4	6	12	Fahrten je Richtung/Stunde
			10.800	21.600	32.400	43.200	64.800	129.600	Fahrten/a
10%	147	6,8	0,63	0,32	0,21	0,16	0,11	0,05	€/Fahrzeug-km
20%	294	13,7	1,27	0,63	0,42	0,32	0,21	0,11	€/Fahrzeug-km
30%	441	20,5	1,90	0,95	0,63	0,47	0,32	0,16	€/Fahrzeug-km
40%	588	27,4	2,53	1,27	0,84	0,63	0,42	0,21	€/Fahrzeug-km
50%	735	34,2	3,17	1,58	1,06	0,79	0,53	0,26	€/Fahrzeug-km
60%	881	41,0	3,80	1,90	1,27	0,95	0,63	0,32	€/Fahrzeug-km
70%	1028	47,9	4,43	2,22	1,48	1,11	0,74	0,37	€/Fahrzeug-km
80%	1175	54,7	5,07	2,53	1,69	1,27	0,84	0,42	€/Fahrzeug-km
90%	1322	61,6	5,70	2,85	1,90	1,42	0,95	0,47	€/Fahrzeug-km
100%	1469	68,4	6,33	3,17	2,11	1,58	1,06	0,53	€/Fahrzeug-km

Tabelle 37: Kapitaldienst und Unterhaltung Oberleitung in zwei Richtungen (Preisstand 2030)

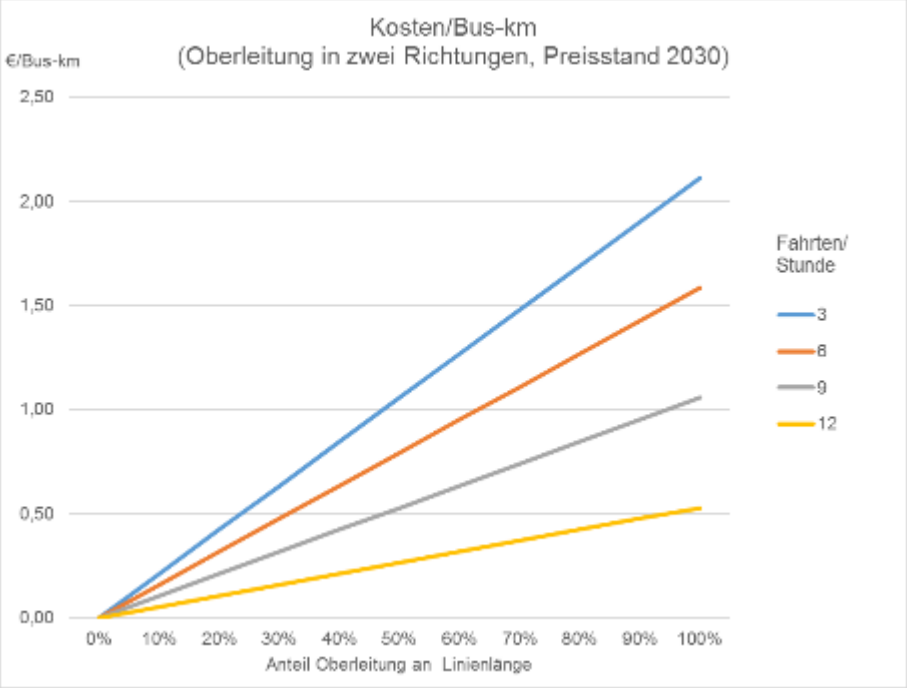


Abbildung 44: Kosten der Oberleitung je Bus-km (Oberleitung in zwei Richtungen)

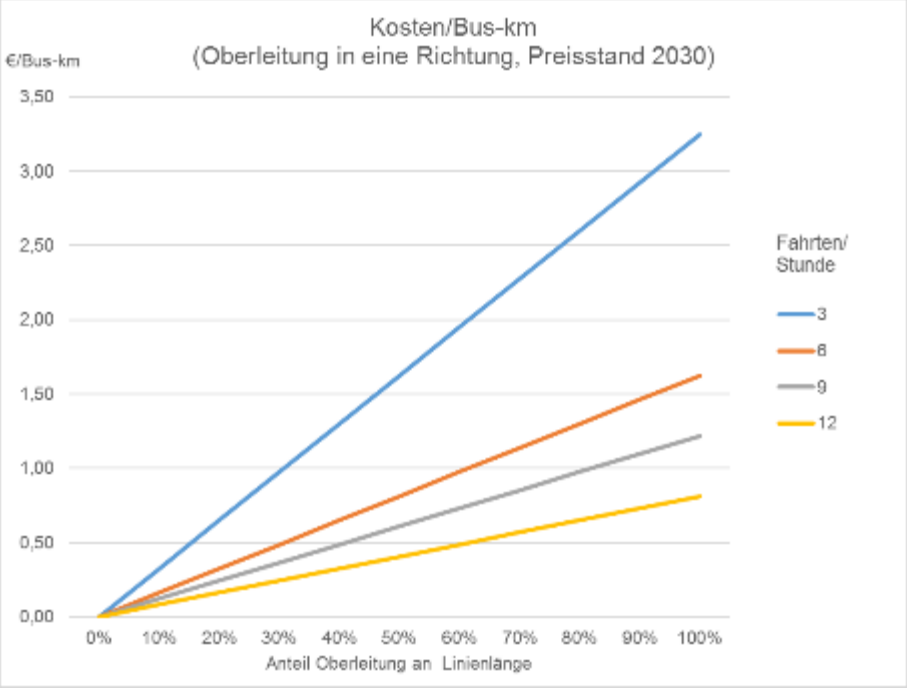


Abbildung 45: Kosten der Oberleitung je Bus-km (Oberleitung in eine Richtung)

Die Abbildungen verdeutlichen, dass die Kosten der Infrastruktur je Bus-km proportional zur Anzahl der Fahrten sinken. Aus wirtschaftlicher Sicht sind deshalb Fahrleitungsanlagen auf Streckenabschnitten mit dichtem Fahrtenangebot zu bevorzugen.

Aus der weiteren Ladeinfrastruktur (Landeinfrastruktur im Betriebshof zur Ladung über Nacht, Schnellladepunkte an Endhaltestellen) resultieren zusätzlich folgende Kosten je Bus-km:

	Preisstand 2017	Preisstand 2030	
Ladeinfrastruktur Betriebshof	0,06	0,07	€/Fahrzeug-km
Infrastruktur Schnelladung am Endpunkt	0,05	0,05	€/Fahrzeug-km

Tabelle 38: Infrastrukturkosten der weiteren Ladeinfrastruktur je Fahrzeug-km

Die Umrechnung der Investitionen in jährliche Kosten je Anlage basiert auf den gleichen Grundlagen (Zinssatz, Nutzungsdauer, Unterhaltungskosten) wie den Fahrleitungsanlagen. Die Kosten/Fahrzeug-km ergeben sich aus den jährlichen Kosten je Anlage und einer mittleren Betriebsleistung je Bus von 74 Tsd. Fahrzeug-km/a.

In der Untersuchung nicht berücksichtigt sind weitere eventuell anfallende Kosten, beispielweise für bauliche Anpassungen am Betriebshof aufgrund der Umstellung der Fahrzeugflotte.

5.2.2 Kosten Fahrzeuge und laufender Betrieb

In der techno-ökonomische Betrachtung werden Betriebskosten verschiedener HO-Bustypen (Solo-Bus, Gelenkbus, Doppelgelenkbus) und Batteriereichweiten (20 km = HO-Klein, 50 km = HO-Mittel, 75 km = HO-Groß, 100 km = HO-Max) verglichen. Die Kosten vergleichbarer Dieselbusse werden daneben gestellt.

In die Bewertung gehen folgende Investitionen und Kosten des Betriebs ein:

- Investitionen Fahrzeuge (ohne Batterie),
- Investitionen Batterie,
- Instandhaltung Fahrzeuge,
- Kosten Fahrpersonal,
- Energiekosten.

Zusätzliche Betriebskosten der Einführung eines HO-Bus-Systems (beispielweise für die Schulung der Mitarbeiter) sind bei der techno-ökonomischen Bewertung nicht berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass sich diese beim Vergleich zwischen den verschiedenen HO-Bus-Typen nicht wesentlich unterscheiden und sie gegenüber den berücksichtigen Kosten von untergeordneter Bedeutung sind.

Die Kosten für Fahrpersonal werden in der Betrachtung berücksichtigt, auch wenn sie sich bei den Bustypen nicht unterscheiden. Je nach Bustyp machen die Kosten des Fahrpersonals 50 % oder mehr der Kosten des Betriebs (ohne Overhead) aus. Würde man die Kosten des Fahrpersonals nicht berücksichtigen, könnte dies bei einem relativen Kosten-

vergleich der verschiedenen Bustypen zu Fehlinterpretationen führen, da die Fahrzeug- und Energiekosten ein zu hohes Gewicht bekommen.

		HO-Klein	HO-Mittel	HO-Groß	HO-Max	Diesel 2017	Diesel 2030
Elekrische Reichweite	km	20	50	75	100		
Batteriekapazität in kWh	Solobus	65	170	265	370		
	Gelenkbus	100	260	410	570		
	Doppelgelenkbus	130	335	525	735		
Energiebedarf Winter in kWh/km	Solobus	1,9	2,0	2,1	2,2		
	Gelenkbus	3,0	3,1	3,3	3,4		
	Doppelgelenkbus	3,8	4,0	4,2	4,4		
Energiebedarf Sommer in kWh/km	Solobus	1,4	1,5	1,6	1,7		
	Gelenkbus	2,0	2,1	2,2	2,3		
	Doppelgelenkbus	2,9	3,0	3,2	3,3		
Energiebedarf	Solobus	1,6	1,7	1,8	1,9	0,40	0,32
Mittelwerte für Jahr kWH/km	Gelenkbus	2,4	2,5	2,6	2,7	0,55	0,44
bzw. l Diesel/km	Doppelgelenkbus	3,3	3,4	3,6	3,7	0,70	0,56
Gewicht Batterie in t/Fahrzeug	Solobus	0,7	1,7	2,7	3,7		
	Gelenkbus	1,0	2,6	4,1	5,7		
	Doppelgelenkbus	1,3	3,4	5,3	7,4		
Plätze je Fahrzeug	Solobus	70	70	70	63	70	70
(unter Berücksichtigung einer guten	Gelenkbus	100	100	100	83	100	100
Beförderungsqualität für den Fahrgast)	Doppelgelenkbus	140	128	102	74	140	140

Tabelle 39: Definition der betrachteten Fahrzeugtypen

Typische Daten für Sommer und Winter zum Energieverbrauch und den damit für die gewünschten Reichweiten verbundenen Batteriekapazitäten wurden oben vorgestellt. Der mittlere Energieverbrauch der HO-Busse ergibt sich aus einer Gewichtung 40 % Winter und 60 % Sommer.

Die Energieverbrauchswerte der Dieselbusse 2030 orientieren sich an der aktuellen Version 2016 des im Auftrag des BMVI erstellten Verfahrens der Standardisierten Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen des ÖPNV (ITP 2017). Beim Dieselbus ist darin zum Prognosejahr 2030 ein Rückgang des Energieverbrauchs gegenüber heute aufgrund des technischen Fortschritts berücksichtigt. Für 2017 orientieren sich die Verbrauchswerte an der Version 2006 des Bewertungsverfahrens (ITP, VWI 2006).

Maßgebend für die nutzbaren Plätze in den HO-Bussen ist das Gewicht der benötigten Batterie. Denn bei großen Batterien kann es aufgrund des Gewichtes der Batterie zu Einschränkungen bei der Beförderungskapazität der Busse führen. Die Abschätzung der Beförderungskapazitäten basiert auf folgenden Berechnungsgrundlagen:

- Gewicht Batterie: 10 kg/kWh (vgl. Plötz et al. 2013)
- Zulässiges Gesamtgewicht gemäß StVZO für Solo-Bus 19,5 t und Gelenkbus 28 t, für Doppelgelenkbus 35 t[31]
- Leergewicht der Fahrzeuge ohne Batterie (Solo-Bus 11 t, Gelenkbus 16 t, Doppelgelenkbus 22 t)

[31] Ausnahmegenehmigung nach https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/266348/

- Maximale Anzahl der nutzbaren Plätze je Fahrzeug (Summe aus Sitz- und Stehplätzen) unter Berücksichtigung einer guten Beförderungsqualität für den Fahrgast (Solo-Bus 70 Plätze, Gelenkbus 100 Plätze, Doppelgelenkbus 140 Plätze)
- Gewicht Fahrgast: 75 kg/Person.

Zur Umrechnung der Kosten auf den Bus-km wird eine mittlere Betriebsleistung von 74.200 km/a angesetzt. Diese errechnet sich aus den folgenden Erfahrungswerten:

- Durchschnittliche Einsatzzeit je Bus: 16 h/d
- Mittlere Geschwindigkeit: 18 km/h
- Anteile Fahrzeugreserve: 8 %
- Hochrechnungsfaktor auf Jahr: 280 d/a.

Die Investitionen für Fahrzeuge und Batterien basieren auf den in Tabelle 40 und Tabelle 41 genannten Neupreisen. Die Umrechnung der Fahrzeuginvestitionen in jährliche Kosten erfolgt mit der Annuitätenmethode.

	HO-Bus (ohne Batterie)		Dieselbus	
	2017	2030	2017/2030	
Solobus	610	550	250	T€
Gelenkbus	910	820	350	T€
Doppelgelenkbus	1.110	1.000	420	T€

Tabelle 40: Neupreis Fahrzeuge

	2017	2030	
Neupreis	1.000	600	€/kWh

Tabelle 41: Neupreis Batterie

Die in Tabelle 40 dargestellten Neupreise der HO-Busse wurden für Preisstand 2017 und 2030 mit der Planungssoftware „BeSystO® – Bewertungsverfahren für Systeminnovationen im ÖPNV“ (VCDB 2017) ermittelt. Die für das Jahr 2030 prognostizierten Kosten ergeben sich sowohl aus der Amortisation der Kosten für Forschung und Entwicklung, als auch durch die Preisdegression bei verschiedenen Stückzahlen und Chargen im Fertigungsprozess sowie in der Distribution. Die Amortisation der Forschungs- und Entwicklungskosten (F&E-Kosten) basiert auf der Grundannahme, dass die Umsatzerlöse des Neuproduktes, die F&E-Kosten nach einem bestimmten Zeitraum kompensieren und somit Gewinn mit dem Produkt erzielt wird. Die verstrichene Zeitdauer, bis zu der das neue Produkt Umsatz generiert, wird nach „Pay-Back-Periode“ bestimmt und ein Amortisationsfaktor gebildet. Weitere konfigurations- und fertigungsbezogene Kostenreduktionspotenziale ergeben sich durch die abgerufenen Stückzahlen und Chargen im Fertigungsprozess.

Die Neupreise der Dieselbusse basiert auf Erfahrungswerten aus verkehrsökonomischen Untersuchungen.

Batteriepreise für Elektro-Busse liegen aktuell über den Batteriepreisen für PKW, vor allem aufgrund geringer Stückzahlen von Elektro-Bussen. Weiterhin variieren Batteriepreise je nach Zellchemie und der Einsatz in Bussen stellt hohe Anforderungen an Leistungsfähigkeit (vgl. auch Kapitel 4.1). Heutige Batteriepreise für Busse liegen bei im Mittel bei ca. 1.000 €/kWh (vgl. Bergk et al. 2016 sowie Lajunen 2014, Goehlich et al. 2013, Olsson et al. 2016, now 2016, Pihlatie et al. 2016 und CARB 2016). Zukünftig wird von deutlich fallenden Batteriepreisen ausgegangen - auch für Elektro-Busse (CARB 2016, Bergk et al. 2016). Analog zu Bergk et al. (2016) wird konservativ davon ausgegangen, dass Batteriepreise für Elektro-Busse analog zu Batteriepreisen für PKW sinken, aber auch zukünftig von höheren Batteriepreisen auszugehen ist als für PKW, sodass 2030 von Batteriepreisen in Höhe von 600 €/kWh ausgegangen wird (vgl. Plötz et al. 2013).

Als Nutzungsdauer der HO-Busse (Fahrzeuge ohne Batterie) werden 16 Jahren angesetzt, bei der Batterie 8 Jahre (Im Rahmen der angenommenen Nutzung und üblichen Batteriealterungsmodellen erscheint dies plausibel, vgl. Kapitel 5.1.2.2). Bei den Dieselbussen wird von einer Nutzungsdauer von 12 Jahren ausgegangen (ITP 2017).

Die Kosten für die Instandhaltung der Fahrzeuge sind aus den Kosten der Instandhaltung von Dieselbussen abgeleitet. Die Instandhaltungskosten eines Dieselgelenkbusses werden in Anlehnung an (Bergk, Lambrecht, Pütz et.al. 2015a) zum Preisstand 2017 mit 31.500 €/a veranschlagt. Es wird erwartet, dass die Instandhaltungskosten eines vergleichbaren HO-Busses geringfügig darunterliegen, da einige der Arbeiten nicht anfallen (beispielweise Tanken, Öl- und Filterwechsel). Die Instandhaltungskosten des HO-Gelenkbusses wird im Rahmen der Untersuchung deshalb mit 31.000 €/a zum Preisstand 2017 berücksichtigt. Die Instandhaltungskosten der Solo-Busse werden 10 % geringer und die der Doppelgelenkbusse 10 % höher angesetzt. Für den Zeithorizont 2030 werden die Kosten über jeweils über eine angenommene mittlere Kostensteigerung von 2 % p.a. fortgeschrieben.

Die Kosten für Fahrpersonal gehen für 2017 mit 1,65 €/Bus-km in die Bewertung ein (Bergk, Lambrecht, Pütz et.al. 2015b). Für den Zeithorizont 2030 werden sie über eine angenommene mittlere Kostensteigerung von 2 % p.a. auf 2,13 €/Bus-km fortgeschrieben.

Die Energiepreise 2017 bilden den mittleren Energiepreis der Städte Marburg und Trier der Fallstudie ab. Die Energiepreise 2030 basieren auf den allgemeinen Festlegungen zu den Studien im Rahmen der MKS. Der Strompreis entspricht dem „Strompreis gewerblich“ (Wietschel et.al. 2017), um 0,01 €/kWh reduziert aufgrund der vom Bundestag beschlossenen ermäßigten Stromsteuer für Elektro-Busse.

	2017	2030	
Strom	0,20	0,21	€/kWh
Diesel	0,85	1,48	€/l

Tabelle 42: Energiepreise

Tabelle 43, Tabelle 44 und Tabelle 45 geben einen Überblick über die Betriebskosten der verschiedenen HO-Bustypen (Solo-Bus, Gelenkbus, Doppelgelenkbus) mit verschiedenen Batteriereichweiten (20 km = HO-Klein, 50 km = HO-Mittel, 75 km = HO-Groß, 100 km = HO-Max) für 2017 und den Zeithorizont 2030. Die Kosten vergleichbarer Dieselbusse sind danebengestellt.

		Solobus Stand 2017					Solobus Stand 2030				
		HO-Klein	HO-Mittel	HO-Groß	HO-Max	Diesel 2017	HO-Klein	HO-Mittel	HO-Groß	HO-Max	Diesel 2030
Neupreis Bus (ohne Batterie)	T€	610	610	610	610	250	550	550	550	550	250
Neupreis Batterie	T€	65	170	265	370		39	102	159	222	
Summe Neupreis Bus (inkl. Batterie)	T€	675	780	875	980	250	589	652	709	772	250
Kapitaldienst Fahrzeug	T€/a	45	45	45	45	24	41	41	41	41	24
Kapitaldienst Batterie	T€/a	9	23	36	51		5	14	22	30	
Kapitaldienst Fahrzeug (inkl. Batterie)	T€/a	54	68	81	95	24	46	54	62	71	24
Kapitaldienst Fahrzeug (inkl. Batterie)	**€/Bus-km**	**0,73**	**0,92**	**1,09**	**1,29**	**0,32**	**0,62**	**0,73**	**0,84**	**0,95**	**0,32**
Instandhaltung Fahrzeug	T€/a	27.900	27.900	27.900	27.900	28.350	36.092	36.092	36.092	36.092	36.674
Instandhaltung Fahrzeug	**€/Bus-km**	**0,38**	**0,38**	**0,38**	**0,38**	**0,38**	**0,49**	**0,49**	**0,49**	**0,49**	**0,49**
Personalkosten	**€/Bus-km**	**1,65**	**1,65**	**1,65**	**1,65**	**1,65**	**2,13**	**2,13**	**2,13**	**2,13**	**2,13**
Energiekosten	**€/Bus-km**	**0,32**	**0,34**	**0,36**	**0,38**	**0,34**	**0,34**	**0,36**	**0,38**	**0,40**	**0,47**
Summe Kosten Betrieb (ohne Infrastruktur)	**€/Bus-km**	**3,07**	**3,28**	**3,48**	**3,69**	**2,69**	**3,57**	**3,71**	**3,84**	**3,97**	**3,42**
	€/Platz-km	**0,044**	**0,047**	**0,050**	**0,059**	**0,038**	**0,051**	**0,053**	**0,055**	**0,063**	**0,049**
Kosten HO-Bus im Vergleich zum Dieselbus	**je Bus-km**	**114%**	**122%**	**129%**	**137%**		**104%**	**108%**	**112%**	**116%**	
	je Platz-km	**114%**	**122%**	**129%**	**152%**		**104%**	**108%**	**112%**	**129%**	

Tabelle 43: Betriebskosten Solo-Bus

		Gelenkbus Stand 2017					Gelenkbus Stand 2030				
		HO-Klein	HO-Mittel	HO-Groß	HO-Max	Diesel 2017	HO-Klein	HO-Mittel	HO-Groß	HO-Max	Diesel 2030
Neupreis Bus (ohne Batterie)	T€	910	910	910	910	350	820	820	820	820	350
Neupreis Batterie	T€	100	260	410	570		60	156	246	342	
Summe Neupreis Bus (inkl. Batterie)	T€	1.010	1.170	1.320	1.480	350	880	976	1.066	1.162	350
Kapitaldienst Fahrzeug	T€/a	67	67	67	67	33	60	60	60	60	33
Kapitaldienst Batterie	T€/a	14	35	56	78		8	21	34	47	
Kapitaldienst Fahrzeug (inkl. Batterie)	T€/a	81	103	123	145	33	69	82	94	107	33
Kapitaldienst Fahrzeug (inkl. Batterie)	**€/Bus-km**	**1,09**	**1,38**	**1,66**	**1,95**	**0,45**	**0,92**	**1,10**	**1,27**	**1,44**	**0,45**
Instandhaltung Fahrzeug	T€/a	31.000	31.000	31.000	31.000	31.500	40.102	40.102	40.102	40.102	40.749
Instandhaltung Fahrzeug	**€/Bus-km**	**0,42**	**0,42**	**0,42**	**0,42**	**0,42**	**0,54**	**0,54**	**0,54**	**0,54**	**0,55**
Personalkosten	**€/Bus-km**	**1,65**	**1,65**	**1,65**	**1,65**	**1,65**	**2,13**	**2,13**	**2,13**	**2,13**	**2,13**
Energiekosten	**€/Bus-km**	**0,48**	**0,50**	**0,53**	**0,55**	**0,47**	**0,50**	**0,53**	**0,55**	**0,58**	**0,65**
Summe Kosten Betrieb (ohne Infrastruktur)	**€/Bus-km**	**3,64**	**3,95**	**4,25**	**4,57**	**2,99**	**4,10**	**4,30**	**4,50**	**4,69**	**3,78**
	€/Platz-km	**0,036**	**0,039**	**0,043**	**0,055**	**0,030**	**0,041**	**0,043**	**0,045**	**0,057**	**0,038**
Kosten HO-Bus im Vergleich zum Dieselbus	**je Bus-km**	**122%**	**132%**	**142%**	**153%**		**109%**	**114%**	**119%**	**124%**	
	je Platz-km	**122%**	**132%**	**142%**	**184%**		**109%**	**114%**	**119%**	**150%**	

Tabelle 44: Betriebskosten Gelenkbus

		Doppelgelenkbus Stand 2017					Doppelgelenkbus Stand 2030				
		HO-Klein	HO-Mittel	HO-Groß	HO-Max	Diesel 2017	HO-Klein	HO-Mittel	HO-Groß	HO-Max	Diesel 2030
Neupreis Bus (ohne Batterie)	T€	1.110	1.110	1.110	1.110	420	1.000	1.000	1.000	1.000	420
Neupreis Batterie	T€	130	335	525	735		78	201	315	441	
Summe Neupreis Bus (inkl. Batterie)	T€	1.240	1.445	1.635	1.845	420	1.078	1.201	1.315	1.441	420
Kapitaldienst Fahrzeug	T€/a	82	82	82	82	40	74	74	74	74	40
Kapitaldienst Batterie	T€/a	18	46	72	100		11	27	43	60	
Kapitaldienst Fahrzeug (inkl. Batterie)	T€/a	99	127	153	182	40	84	101	117	134	40
Kapitaldienst Fahrzeug (inkl. Batterie)	**€/Bus-km**	**1,34**	**1,72**	**2,07**	**2,45**	**0,54**	**1,14**	**1,36**	**1,57**	**1,80**	**0,54**
Instandhaltung Fahrzeug	T€/a	34.100	34.100	34.100	34.100	34.650	44.112	44.112	44.112	44.112	44.823
Instandhaltung Fahrzeug	**€/Bus-km**	**0,46**	**0,46**	**0,46**	**0,46**	**0,47**	**0,59**	**0,59**	**0,59**	**0,59**	**0,60**
Personalkosten	**€/Bus-km**	**1,65**	**1,65**	**1,65**	**1,65**	**1,65**	**2,13**	**2,13**	**2,13**	**2,13**	**2,13**
Energiekosten	**€/Bus-km**	**0,65**	**0,68**	**0,72**	**0,75**	**0,60**	**0,68**	**0,71**	**0,76**	**0,79**	**0,83**
Summe Kosten Betrieb (ohne Infrastruktur)	**€/Bus-km**	**4,10**	**4,51**	**4,90**	**5,31**	**3,25**	**4,55**	**4,81**	**5,06**	**5,32**	**4,10**
	€/Platz-km	**0,029**	**0,035**	**0,048**	**0,071**	**0,023**	**0,032**	**0,038**	**0,049**	**0,072**	**0,029**
Kosten HO-Bus im Vergleich zum Dieselbus	**je Bus-km**	**126%**	**139%**	**151%**	**164%**		**111%**	**117%**	**123%**	**130%**	
	je Platz-km	**126%**	**152%**	**206%**	**308%**		**111%**	**128%**	**169%**	**244%**	

Tabelle 45: Betriebskosten Doppelgelenkbus

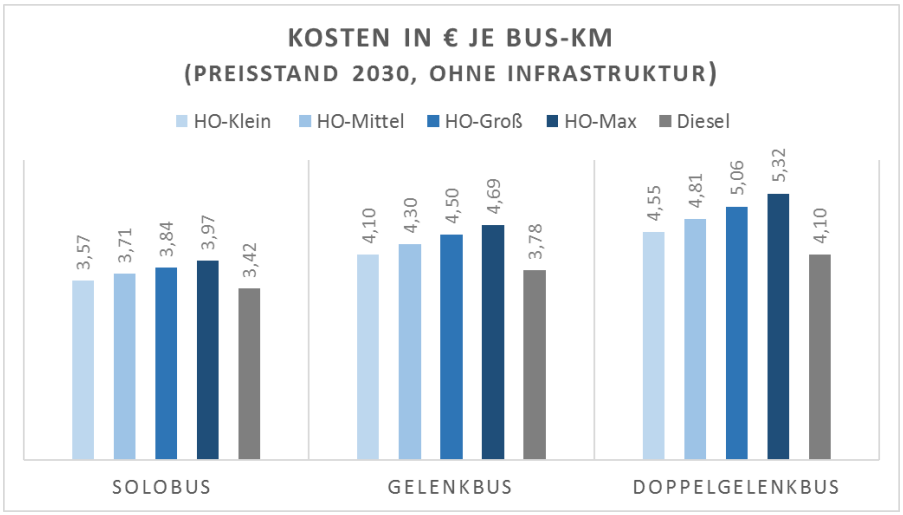


Abbildung 46: Kosten je Bus-Kilometer nach Bustypen und Reichweite

Ein Vergleich der Kosten der verschiedenen Bustypen zeigt, dass die Kosten je Bus-km (ohne Infrastruktur) mit Zunahme der Batteriegröße steigen. Bezieht man die Kosten auf den Platz-km so steigen sie mit Zunahme der Batteriegröße überproportional, wenn das Batteriegewicht zu einer Einschränkung der Beförderungskapazität führt.

Der Vergleich der Kosten je Bus-Kilometer (ohne Infrastruktur) 2017 und 2030 für HO- und Dieselbus zeigt, dass sie sich mittel- bis langfristig voraussichtlich etwas angleichen werden. Am Beispiel des Gelenkbusses (HO-Klein) ist dies in folgender Abbildung 47 dargestellt.

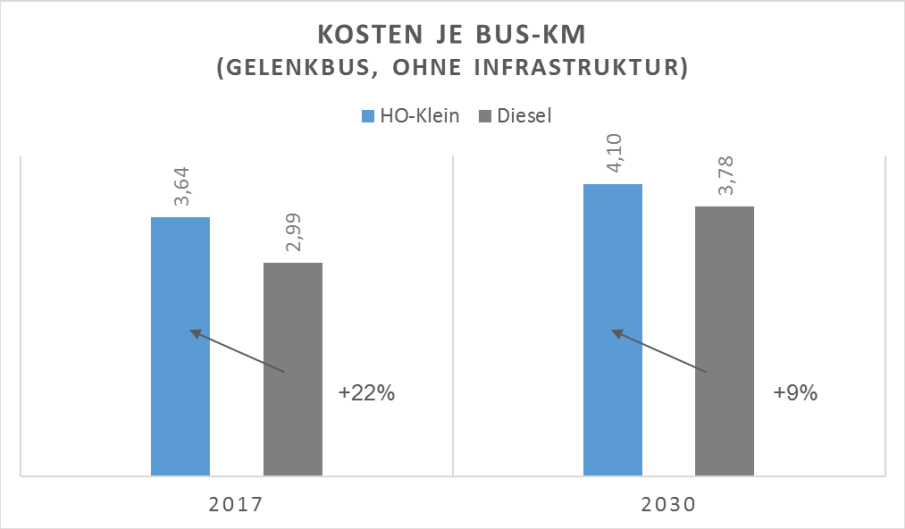


Abbildung 47: Beispiel zu Kostenentwicklung 2017 bis 2030

5.2.3 Robustheit und Sensitivitäten

Aufgrund der hohen Investitionen in Oberleitungsinfrastruktur und der allgemein langen Planungszeiträume für den Einsatz von Linienbussen sind die gezeigten Ergebnisse mit Unsicherheiten verbunden. Zur Adressierung dieser Unsicherheiten wird daher in diesem Kapitel untersucht, inwieweit eine Veränderung relevanter Annahmen die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeit des HO-Busses beeinflusst, wie im Folgenden vorgestellt.

Kraftstoffkosten

Die Bewertung der alternativen Busantriebe erfolgt in Bezug auf die Referenz eines Dieselbusses, wie er aktuell vorwiegend im Linienverkehr eingesetzt wird. Der Betrieb mit Diesel als Kraftstoff verursacht jedoch hohe Treibhausgasemissionen und eine Erreichung der Klimaziele - eine Senkung der CO_2-Emissionen um 40% bis zum Jahr 2030 und um 95% bis zum Jahr 2050 gegenüber dem Niveau von 1990 (EC 2018) - ist für einen Dieselbus nur unter Verwendung von aus erneuerbaren Energien hergestellten synthetischen Diesels ("eDiesel") möglich. Vor diesem Hintergrund wird daher davon ausgegangen, dass ab dem Jahr 2030 ein Anteil von 40% eDiesel beigemischt werden muss und dieser Anteil bis 2050 sukzessive bis auf 100% gesteigert wird, sodass sich die Kosten für Diesel entsprechend erhöhen werden. In einer Analyse der Technischen Universität Hamburg (TUHH) und des Fraunhofer ISI (TUHH und Fraunhofer ISI 2018) wurden die Kostenpotentiale für eDiesel analysiert. Entsprechend der Analysen dieser Studie könnten reine Produktionskosten eines Liters importierten eDiesel zwischen 0,95 bis 1,45 € liegen. Für die Sensitivitätsanalysen in dieser Studie werden Produktionskosten von eDiesel mit 1,20 €/l angenommen, sodass sich für die Verkehrsbetriebe entsprechend Treibstoffkosten in Höhe von 1,74 € je Liter eDiesel ergeben (unter der Voraussetzung, dass die weiteren Preiskomponenten wie Steuern und den heutigen Dieselpreiskomponenten entspre-

chen, MWV 2018). Da in den pessimistischen Szenarien der VCDB auch in Zukunft niedrige Dieselkosten unterstellt werden, würden die Kosten eines Liters Diesel (als Mischsatz aus konventionellem und erneuerbar hergestelltem Diesel) in einem 40-jährigen Betrachtungszeitraum durchschnittlich um ca. 0,18 €/l steigen (über 40 Jahre abgezinste Werte, bei einem Kalkulationszinzsatz von 2%). Im Best-case Szenario jedoch wird bereits von langfristig hohen Dieselpreisen ausgegangen, sodass eine entsprechende Beimischung von eDiesel zu einer begrenzten Preissteigerung von 0,02 €/l Diesel führen würde.

Im pessimistischen Szenario würden sich die Kosten des Dieselbusses in einem 40-Jahr-Betrachtungszeitraum in Marburg um 2,6 Millionen € erhöhen (diskontierter Cash-Flow). Im optimistischen Szenario erhöhten sich die Kosten für den Dieselbus um ca. 230.000 €.

Mehrfach-Nutzung der Infrastruktur

Für eine erstmalige Umstellung einer Buslinie auf einen Hybrid-Oberleitungs-Bus müssen Oberleitungen vollständig neu errichtet werden. Ist aber eine Buslinie bereits auf Oberleitungsbetrieb umgestellt, kann optimalerweise bei einer Umstellung weiterer Buslinien in Teilen auf die bestehende Oberleitungsinfrastruktur zurückgegriffen werden. Somit sinken anteilige Oberleitungskosten für weitere Buslinien entsprechend. Inwieweit Oberleitungen mehrfach genutzt werden können, hängt stark von den entsprechenden Linienverläufen ab.

Durch den Aufbau der Oberleitung in der Pilotphase in Marburg stehen für die zweite Umsetzungsphase bereits ca. 25% der Oberleitung zur Verfügung[32], sodass sich entsprechende Oberleitungskosten proportional verringern.

In Marburg könnten somit im Fall ohne Förderung (mit Förderung) für die weiteren Ausbaustufen die Kosten von HO-Bussen um 4,1 Millionen € (860.000 €) sinken (40 Jahre Betrachtungszeitraum).

Allgemein ist zu beachten, dass die Topologie des Liniennetzes starken Einfluss auf die Mehrfachnutzung der Oberleitung in späteren Ausbaustufen hat. Allgemeiner werden grob die folgenden Typen von Netzwerken anhand ihrer Topologie unterschieden: Ring, Raster, Radial oder Stern (siehe Abbildung 48).

32 Für die Berechnung wird unterstellt, dass die Anforderungen der Buslinien der zweiten Umsetzungsphase hinsichtlich Strecken- und Kostenanteil der Oberleitung dem der Pilotlinie entsprechen.

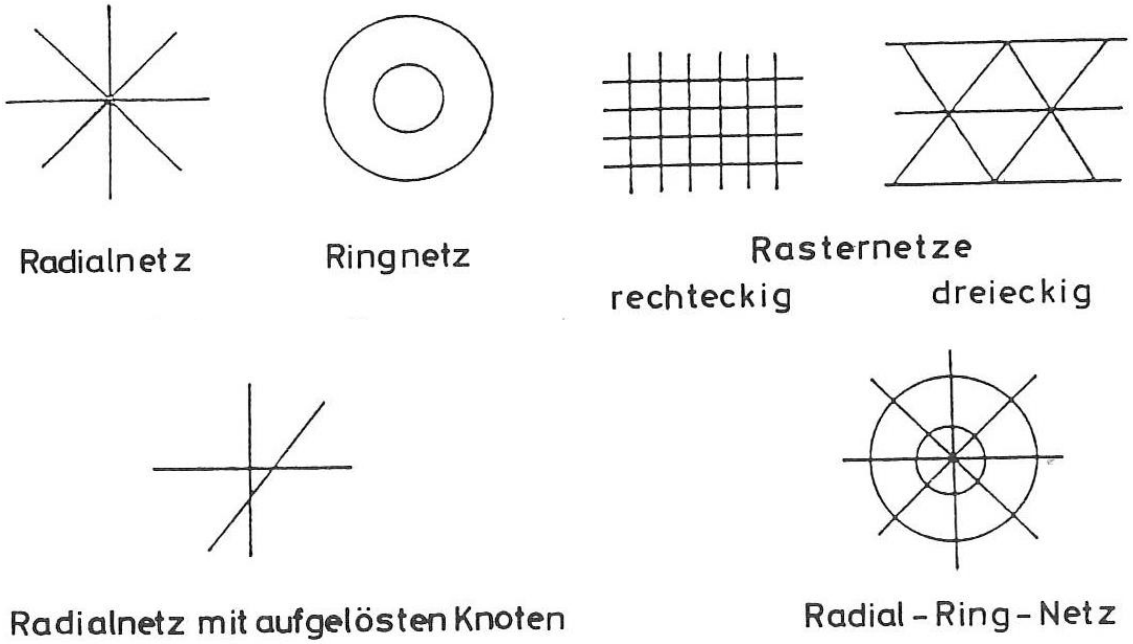


Abbildung 48: Linientopologien nach VDV (1992).

Die größten Einsparungen beim weiteren Ausbau eines Oberleitungsnetzes auf andere Linien erzielt man, wenn möglichst viele Buslinien entlang einer Linie laufen, bspw. bei einem Ringnetz mit wenigen Ringen. Die geringsten Einsparungen erhielte man bei einem reinen Radialnetz. Die hier erhaltenen 25% Einsparung pro km stellen aufgrund der Netztopologie keinen Extremfall dar, sondern sind eher im mittleren Bereich einzuordnen.

Auswirkungen längere Nutzungsdauer Oberleitungs-Infrastruktur

In den Berechnungen wird eine Lebensdauer von 40 Jahren der Oberleitungsinfrastruktur angenommen. Möglicherweise könnten Oberleitungen aber langlebiger sein, wodurch sich entsprechende Oberleitungskosten entsprechend verringern würden - ein eventuell erhöhter Wartungsaufwand für die gealterte Oberleitung wird hierbei nicht betrachtet. Bei einer Nutzungsdauer von 60 Jahren würden Infrastrukturkosten um ca. 15% sinken. Die eingesparten Kosten entsprechen hierbei der Differenz der Barwerte der Ersatzinvestition nach 40 und nach 60 Jahren.

Bei einer Nutzungsdauer von 60 Jahren der Oberleitung ergeben sich somit für Marburg Einsparmöglichkeiten über 40 Jahre in Höhe von 2,4 Millionen € (ohne Förderung) und 300.000 € (mit Förderungen). Für Marburg liegen diese Werte bei 2,4 Millionen € (ohne Förderung) bzw. 500.000 € (mit Förderung).

Fördermöglichkeiten

Auf Bundesebene ist die politische Lage zur Förderung von Elektro-Bussen derzeit sehr gut. Es besteht Förderbereitschaft aufgrund hoher Stickoxid-Belastungen in vielen deutschen Städten sowie dem Urteil des Bundesverwaltungsgerichtes zu Pkw-Fahrverboten.

Aktuelle Fördermöglichkeiten sind bspw. die laufende Förderrichtlinie „zur Förderung der Anschaffung von Elektro-Bussen im öffentlichen Personennahverkehr“ des Bundesumweltministeriums sowie die laufende Förderung von Oberleitungsbussen durch das Bundesverkehrsministerium. So wird derzeit die Beschaffung von 20 Oberleitungsbussen mit 15 Mio. € Bundesmitteln in der Stadt Solingen gefördert.

Zusammenfassung

Für einen Betrachtungszeitraum von 40 Jahren ergeben sich somit Kostendifferenzen zum Referenzbus entsprechend Tabelle 46 und Tabelle 47. Die Auswirkungen der vorgestellten Sensitivitätsrechnungen sind in den Tabellen separat aufgeführt.

	Szenario		HO-Bus (opt. Umläufe)	Gelegenheitslader	Depot-Lader
Referenz	Optimistisch	Mio. €	5,2	-1,0 (-3,0)	n.v. (1,9)
	Pessimistisch	Mio. €	16,2	12,4 (8,5)	n.v. (16,4)
2. Ausbaustufe (Mehrfachnutzung OL)	Optimistisch	Mio. €	1,1		
	Pessimistisch	Mio. €	12,1		
60 Jahre Nutzung OL	Optimistisch	Mio. €	2,8		
	Pessimistisch	Mio. €	13,8		
Beimischung eDiesel	Optimistisch	Mio. €	5,0	-1,2 (-3,2)	n.v. (1,7)
	Pessimistisch	Mio. €	14,5	10,7 (6,8)	n.v. (14,7)

Tabelle 46: Sensitivitätsanalysen: Vergleich der Gesamtkosten von Elektro-Bussen gegenüber Dieselbussen in Marburg (Differenzkosten als diskontierter Cash-Flow über 40 Jahre). Ohne Förderung. In Klammern: Werte für Dieselhybridheizung. n.v. : nicht verfügbar, da technisch nicht darstellbar.

	Szenario		HO-Bus (opt. Umläufe)	Gelegen-heitslader	Batterie-bus
Referenz	Optimistisch	Mio. €	-10,1	-8,6 (-9,9)	n.v. (-5,9)
	Pessimistisch	Mio. €	0,9	4,7 (1,7)	n.v. (8,6)
2. Ausbaustufe (Mehr-fachnutzung OL)	Optimistisch	Mio. €	-11,0		
	Pessimistisch	Mio. €	0,01		
60 Jahre Nutzung OL	Optimistisch	Mio. €	-10,6		
	Pessimistisch	Mio. €	0,4		
Beimischung eDiesel	Optimistisch	Mio. €	-10,2	-8,8 (-10,1)	n.v. (-6,1)
	Pessimistisch	Mio. €	0,7	-3,0 (0)	n.v. (6,9)

Tabelle 47: Sensitivitätsanalysen: Vergleich der Gesamtkosten von Elektro-Bussen gegenüber Dieselbussen in Marburg (Differenzkosten als diskontierter Cash-Flow über 40 Jahre). Mit Förderung. In Klammern: Werte für Dieselhybridheizung. n.v.: nicht verfügbar, da technisch nicht darstellbar.

Obgleich die Wirtschaftlichkeit des HO-Busses höher ausfallen könnte, als im Referenzfall angegeben, zeigen sich die Ergebnisse insgesamt robust gegenüber Änderungen der Annahmen. Auch für die gezeigten Sensitivitätsanalysen ist ein HO-Bus nur für optimistische Annahmen und unter Einbezug der angenommenen Förderkulisse wirtschaftlicher zu betreiben als ein Dieselbus.

5.2.4 Übersicht und Fazit

Die Infrastrukturkosten für ein HO-Bus-Netz hängen maßgeblich vom Anteil der elektrifizierten Abschnitte am Liniennetz ab. Der erforderliche Elektrifizierungsanteil wiederum hängt von der Netzstruktur, dem Anteil der Linien auf denen HO-Busse eingesetzt werden und nicht zuletzt von der elektrischen Reichweite der Batterie in den HO-Bussen ab. Bezogen auf den Bus-km sinken die Infrastrukturkosten proportional zur Fahrtenanzahl unter der Oberleitung.

Deshalb sind konkrete Aussagen zu den Infrastrukturinvestitionen nur ortsspezifisch auf Grundlage von detaillierten Planungen möglich. Im Planungsprozess sollte hierbei eine Optimierung hinsichtlich Infrastrukturausbau und Fahrzeugeinsatz angestrebt werden.

Im Rahmen der techno-ökonomischen Bewertung kann deshalb nur eine vereinfachte Abschätzung der Infrastrukturkosten vorgenommen werden, die auf Annahmen beruht:

- 7,5-Minuten-Takt unter der Oberleitung

- Anteil der Elektrifizierung[33]:
  - HO-Klein 40 % (entspricht in etwa den Pilotlinien Marburg)
  - HO-Mittel 30 %
  - HO-Groß 20 %
  - HO-Max 10 %
- Oberleitung je 50 % ein- und zweistreifig
- keine Schnellladepunkte an Endhaltestellen, stationäre Nachladung nur im Betriebshof.

Mit Preisstand 2030 resultieren daraus die in der folgenden Abbildung 49 dargestellten Kosten, die in die Bewertung eingehen.

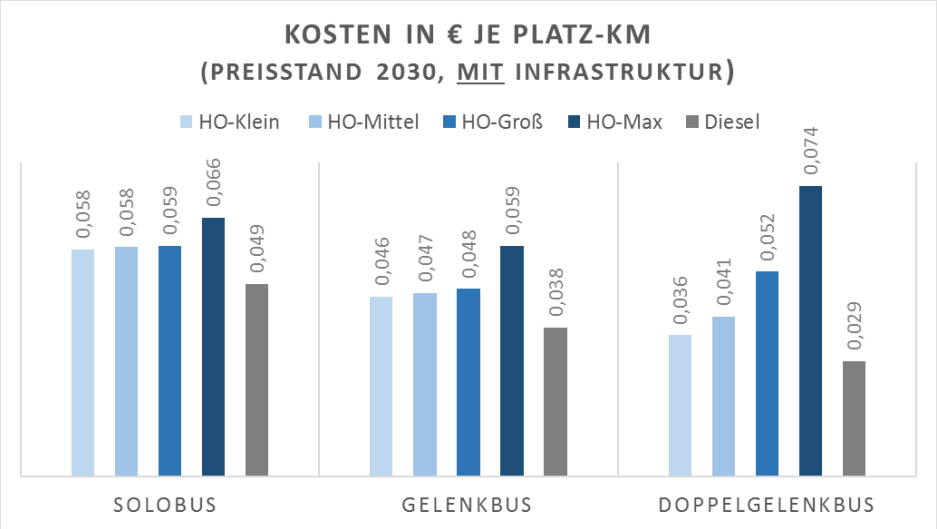


Abbildung 49: Abschätzung der Kosten je Platz-Kilometer inkl. Kosten der Infrastruktur

Für die multikriterielle Bewertung erfolgt eine Umrechnung der Kosten 2030 in eine Punkteskala. Dabei werden die Kosten zwischen dem Minimum (Doppelgelenkbus Diesel 0,029 €/Platz-km, d.h. Note 5 „sehr gut“) und dem Maximum (Doppelgelenkbus HO-Max 0,074 €/Platz-km, d.h. Note 1 „sehr schlecht“) interpoliert.

33 Diese Werte stimmen grob mit der generischen Berechnung in Kapitel 5.1.2 überein, sind aber nicht identisch, da sich die Werte hier stärker an der Detailanalyse der Städte Marburg und Trier orientieren.

5.3 Weitere Ergebnisse

5.3.1 Ökologische Bewertung

Treibhausgasemissionen

In der multikriteriellen Bewertung werden die Treibhausgase (CO_2eq) der verschiedenen Bustypen beim Betrieb und bei der Fahrzeugproduktion quantifiziert berücksichtigt. Nicht quantifiziert werden Emissionen beim Bau und Betrieb der Infrastruktur.[34]

Die Bewertung basiert auf folgenden Grundlagen zum CO_2eq bei der Fahrzeugherstellung:

- Solo-Bus: 85 t/Fahrzeug,
- Batterie: 0,1 t kWh (untere Grenze) bis 0,3 t/kWh (obere Grenze).

Die Emissionen der Fahrzeugherstellung (Solo-Bus) werden analog zu einem Dieselbus angenommen (vgl. now 2016). Emissionen, die während der Batterieproduktion entstehen, variieren je nach Zellchemie sowie Energiedichte in einem weiten Bereich zwischen 0,05 und 0,5 t je kWh (vgl. Bauer 2010, Notter 2010, Zackrisson 2010, Helms et al. 2011, Ellingsen et al. 2014, Kim et al. 2016). Die beiden angenommenen Werte für die Emissionen der Batterieproduktion (s.o.) spiegeln die Unsicherheiten bezüglich dieses Parameters wider.

Über die Fahrzeuggröße werden die CO_2eq bei der Fahrzeugherstellung für Gelenkbusse auf 120 t/Fahrzeug und für Doppelgelenkbusse auf 150 t/Fahrzeug geschätzt. Die CO_2eq der Batterieherstellung berechnen sich über die Batteriegröße in kWh.

Die Berechnung der Treibhausgase (CO_2eq) des betriebsbedingten Energieverbrauchs basieren auf folgenden Emissionssätzen[35]:

- Dieselkraftstoff (Well-to-Weel, WtW): 3,24 kg/l
- Strom (jeweils Durchschnittsemissionen deutscher Kraftwerkspark)
  - 2016[36]: 0,527 kg/kWh (UBA 2017)
  - 2030: 0,192 kg/kWh

Mit Zielhorizont 2030 schneidet der HO-Bus je Bus-km bei allen Bustypen und Batteriereichweiten deutlich günstiger ab als die vergleichbaren Dieselbusse. Bezogen auf den Bus-km ist der Vorteil 2017 aufgrund der höheren Durchschnittsemissionen bei der

34 Die Emissionen für die Infrastruktur sind deutlich geringer und werden daher vernachlässigt. Vgl. bspw. die Rechnungen für Oberleitungs-LKW (Wietschel et al. 2017).

35 Soweit nicht anders ausgewiesen folgen alle Annahmen zu Energieträgerpreisen und Emissionsfaktoren der MKS (vgl. bspw. Wietschel et al. 2017)

36 Angabe für 2017 übernommen

Stromerzeugung noch geringer, jedoch weitestgehend positiv (Ausnahme: Doppelgelenkbus HO-Max).

Der Vorteil der HO-Busse resultiert aus den geringeren Treibhausgasemissionen im laufenden Betrieb. Bei der Fahrzeugherstellung (ohne Batterie) unterscheiden sich HO- und Dieselbus nicht. Vergleicht man die HO-Bus-Varianten untereinander, so wird deutlich, dass der Vorteil des HO-Busses mit zunehmender Batteriegröße abnimmt.

Bezieht man die Emissionen auf den Platz-km, so steigen sie mit Zunahme der Batteriegröße überproportional, wenn das Batteriegewicht zu einer Einschränkung der Beförderungskapazität führt. Dies wird besonders bei Doppelgelenkbussen mit großer Batterie deutlich. Bei diesen Fahrzeugen ist die Treibhausgasbilanz bezogen auf den Platz-km ungünstig.

		Solobus Stand 2017					Solobus Stand 2030				
		HO-Klein	HO-Mittel	HO-Groß	HO-Max	Diesel 2017	HO-Klein	HO-Mittel	HO-Groß	HO-Max	Diesel 2030
CO_2eq Fahrzeugherstellung											
Fahrzeugherstellung (ohne Batterie)	t/Fahrzeug	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
Fahrzeugherstellung (ohne Batterie)	kg/Bus-km	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
Batterie (untere Grenze)	t/Batterie	7	17	27	37		7	17	27	37	
Batterie (oberer Grenze)	t/Batterie	20	51	80	111		20	51	80	111	
Batterie (untere Grenze)	kg/Bus-km	0,01	0,03	0,04	0,06		0,01	0,03	0,04	0,06	
Batterie (oberer Grenze)	kg/Bus-km	0,03	0,09	0,13	0,19		0,03	0,09	0,13	0,19	
CO_2eq Fahrzeug mit Batterie (untere Grenze)	**kg/Bus-km**	**0,08**	**0,10**	**0,12**	**0,13**	**0,07**	**0,08**	**0,10**	**0,12**	**0,13**	**0,07**
CO_2eq Fahrzeug mit Batterie (obere Grenze)	**kg/Bus-km**	**0,10**	**0,16**	**0,21**	**0,26**	**0,07**	**0,10**	**0,16**	**0,21**	**0,26**	**0,07**
CO_2eq laufender Betrieb											
Energieverbrauch	kWh o. l/Bus-km	1,6	1,7	1,8	1,9	0,40	1,6	1,7	1,8	1,9	0,32
CO_2eq aus Energie Fahrleistung	**kg/Bus-km**	**0,84**	**0,90**	**0,95**	**1,00**	**1,30**	**0,31**	**0,33**	**0,35**	**0,36**	**1,04**
Summe CO2e Betrieb inkl. Fahrzeug und Batterie											
oberer Grenze	**kg/Bus-km**	**0,93**	**1,00**	**1,06**	**1,14**	**1,37**	**0,39**	**0,43**	**0,46**	**0,50**	**1,11**
untere Grenze	**kg/Bus-km**	**0,95**	**1,05**	**1,15**	**1,26**	**1,37**	**0,41**	**0,48**	**0,55**	**0,62**	**1,11**
oberer Grenze	**kg/Platz-km**	**0,013**	**0,014**	**0,015**	**0,018**	**0,020**	**0,006**	**0,006**	**0,007**	**0,008**	**0,016**
untere Grenze	**kg/Platz-km**	**0,014**	**0,015**	**0,016**	**0,020**	**0,020**	**0,006**	**0,007**	**0,008**	**0,010**	**0,016**

Tabelle 48: Treibhausgase (CO_2eq) Solo-Bus

		Gelenkbus Stand 2017					Gelenkbus Stand 2030				
		HO-Klein	HO-Mittel	HO-Groß	HO-Max	Diesel 2017	HO-Klein	HO-Mittel	HO-Groß	HO-Max	Diesel 2030
CO_2eq Fahrzeugherstellung											
Fahrzeugherstellung (ohne Batterie)	t/Fahrzeug	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
Fahrzeugherstellung (ohne Batterie)	kg/Bus-km	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Batterie (untere Grenze)	t/Batterie	10	26	41	57		10	26	41	57	
Batterie (oberer Grenze)	t/Batterie	30	78	123	171		30	78	123	171	
Batterie (untere Grenze)	kg/Bus-km	0,02	0,04	0,07	0,10		0,02	0,04	0,07	0,10	
Batterie (oberer Grenze)	kg/Bus-km	0,05	0,13	0,21	0,29		0,05	0,13	0,21	0,29	
CO_2eq Fahrzeug mit Batterie (untere Grenze)	**kg/Bus-km**	**0,12**	**0,14**	**0,17**	**0,20**	**0,10**	**0,12**	**0,14**	**0,17**	**0,20**	**0,10**
CO_2eq Fahrzeug mit Batterie (obere Grenze)	**kg/Bus-km**	**0,15**	**0,23**	**0,31**	**0,39**	**0,10**	**0,15**	**0,23**	**0,31**	**0,39**	**0,10**
CO_2eq laufender Betrieb											
Energieverbrauch	kWh o. l/Bus-km	2,4	2,5	2,6	2,7	0,55	2,4	2,5	2,6	2,7	0,44
CO_2eq aus Energie Fahrleistung	**kg/Bus-km**	**1,26**	**1,32**	**1,39**	**1,44**	**1,78**	**0,46**	**0,48**	**0,51**	**0,53**	**1,43**
Summe CO2e Betrieb inkl. Fahrzeug und Batterie											
oberer Grenze	**kg/Bus-km**	**1,38**	**1,46**	**1,56**	**1,64**	**1,88**	**0,58**	**0,62**	**0,68**	**0,72**	**1,53**
untere Grenze	**kg/Bus-km**	**1,42**	**1,55**	**1,70**	**1,83**	**1,88**	**0,61**	**0,71**	**0,82**	**0,92**	**1,53**
oberer Grenze	**kg/Platz-km**	**0,014**	**0,015**	**0,016**	**0,020**	**0,019**	**0,006**	**0,006**	**0,007**	**0,009**	**0,015**
untere Grenze	**kg/Platz-km**	**0,014**	**0,016**	**0,017**	**0,022**	**0,019**	**0,006**	**0,007**	**0,008**	**0,011**	**0,015**

Tabelle 49: Treibhausgase (CO_2eq) Gelenkbus

		Doppelgelenkbus Stand 2017					Doppelgelenkbus Stand 2030				
		HO-Klein	HO-Mittel	HO-Groß	HO-Max	Diesel 2017	HO-Klein	HO-Mittel	HO-Groß	HO-Max	Diesel 2030
CO_2eq Fahrzeugherstellung											
Fahrzeugherstellung (ohne Batterie)	t/Fahrzeug	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Fahrzeugherstellung (ohne Batterie)	kg/Bus-km	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
Batterie (untere Grenze)	t/Batterie	13	34	53	74		13	34	53	74	
Batterie (oberer Grenze)	t/Batterie	39	101	158	221		39	101	158	221	
Batterie (untere Grenze)	kg/Bus-km	0,02	0,06	0,09	0,12		0,02	0,06	0,09	0,12	
Batterie (oberer Grenze)	kg/Bus-km	0,07	0,17	0,27	0,37		0,07	0,17	0,27	0,37	
CO_2eq Fahrzeug mit Batterie (untere Grenze)	**kg/Bus-km**	**0,15**	**0,18**	**0,21**	**0,25**	**0,13**	**0,15**	**0,18**	**0,21**	**0,25**	**0,13**
CO_2eq Fahrzeug mit Batterie (obere Grenze)	**kg/Bus-km**	**0,19**	**0,30**	**0,39**	**0,50**	**0,13**	**0,19**	**0,30**	**0,39**	**0,50**	**0,13**
CO_2eq laufender Betrieb											
Energieverbrauch	kWh o. l/Bus-km	3,3	3,4	3,6	3,7	0,70	3,3	3,4	3,6	3,7	0,56
CO_2eq aus Energie Fahrleistung	**kg/Bus-km**	**1,72**	**1,79**	**1,90**	**1,97**	**2,27**	**0,63**	**0,65**	**0,69**	**0,72**	**1,81**
Summe CO2e Betrieb inkl. Fahrzeug und Batterie											
oberer Grenze	**kg/Bus-km**	**1,87**	**1,97**	**2,11**	**2,22**	**2,39**	**0,77**	**0,84**	**0,91**	**0,97**	**1,94**
untere Grenze	**kg/Bus-km**	**1,91**	**2,09**	**2,29**	**2,47**	**2,39**	**0,82**	**0,95**	**1,08**	**1,22**	**1,94**
oberer Grenze	**kg/Platz-km**	**0,013**	**0,015**	**0,021**	**0,030**	**0,017**	**0,006**	**0,007**	**0,009**	**0,013**	**0,014**
untere Grenze	**kg/Platz-km**	**0,014**	**0,016**	**0,022**	**0,033**	**0,017**	**0,006**	**0,007**	**0,011**	**0,016**	**0,014**

Tabelle 50: Treibhausgase (CO_2eq) Doppelgelenkbus

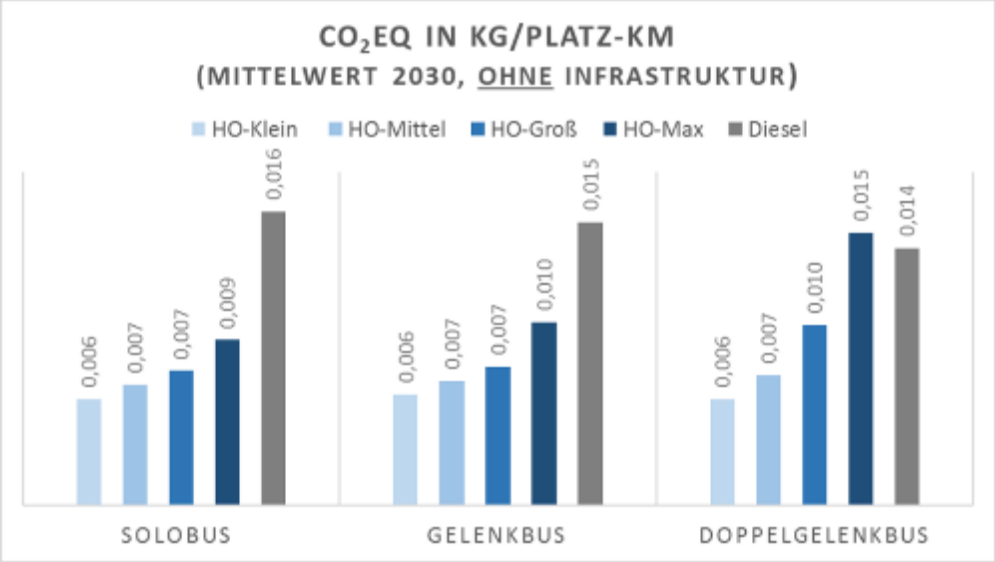


Abbildung 50: CO_{2eq} je Platz-Kilometer

Für die multikriterielle Bewertung erfolgt eine Umrechnung der Treibhausgase (CO2eq) in eine Punkteskala. Dabei werden die Treibhausgasemissionen 2030 zwischen dem Minimum (HO-Klein 0,006 kg/Platz-km, d.h. Note 5 „sehr gut“) und dem Maximum (Solo-Bus Diesel 0,016 kg/Platz-km, d.h. Note 1 „sehr schlecht“) interpoliert.

Weitere ökologische Aspekte

Aus ökologischer Sicht sind für die Städte neben dem CO_2eq weitere Umweltfaktoren relevant. Hierzu zählen beispielweise Lärm und Stickoxide (NO_X). Diese werden in der multikriteriellen Bewertung nicht berücksichtigt, da sie sich hinsichtlich der HO-Bus-Varianten nicht wesentlich unterscheiden.

Bei einer Umstellung von Diesel- auf HO-Bus-Betrieb ist davon auszugehen, dass sich die Lärmbelastung entlang der Bustrassen reduziert. Nach (Bergk, Lambrecht, Pütz et.al.

2015b) sind Elektroantriebe wesentlich leiser als Verbrennungsmotoren und bei den im Stadtverkehr üblichen Geschwindigkeiten ist das Motorgeräusch der Busse maßgebend.

Bei den derzeit eingesetzten Dieselbusflotten stellen die Stickoxid-Emissionen für die Städte oft ein Problem dar. Beim HO-Bus werden beim Betrieb vor Ort keine Stickoxide ausgeschieden. Dies trägt in den Städten zur Luftreinhaltung bei. Zwischen den HO-Bus-Varianten unterscheidet sich dies jedoch nicht. Langfristig ist davon auszugehen, dass die Bedeutung der Stickoxid-Emissionen auch bei den Dieselbussen sinkt. Nach (HBEFA 2017) sinken die NO_X-Emissionen der Linienbusse mit Dieselantrieb von im Mittel 5,514 g/km im Jahr 2015 auf 0,646 g/km im Jahr 2030.

5.3.2 Netzbelastung

5.3.2.1 Einleitung

5.3.2.1.1 Übersicht

Ein Oberleitungsbus (O-Bus) ist spurgeführt, jedoch im Unterschied zu z.B. einer Straßenbahn durch horizontal schwenkbare Stromabnehmer nicht spurgebunden.

1901 entstand in Bieletal bei Dresden eine frühe Oberleitungsbusanlage mit Verwendung der noch heute üblichen Stangenstromabnehmer (Kießling et al., 2014, S. 161). In Deutschland nahm bis Mitte der 1950er Jahre der Betrieb von O-Busstrecken zu, danach stellten immer mehr Städte den O-Bus Betrieb auf Autobusverkehr um (Kießling et al., 2014, S. 161). In Marburg wurde von 1903 bis 1951 eine Straßenbahn (Wikipedia 2017a) betrieben und von 1951 bis 1969 existierte eine O-Bus-Linie zwischen den Haltestellen Hauptbahnhof und Südbahnhof (Wikipedia 2017b). Hybrid-Oberleitungsbusse (HO-Busse oder Duo-Busse (1974, Wikipedia 2017c) besitzen als Fahrmotor einen Elektromotor, welcher durch eine externe Oberleitung oder alternativ aus einer internen Batterie gespeist werden kann (BMVI 2017a). Damit wird das O-Bus-Konzept um die Möglichkeit des elektrischen Fahrens zwischen einer oder mehreren Haltestellen ohne Fahrleitung ergänzt. Mitbedingt durch Fortschritte in der Batterietechnologie, den Wunsch nach Abgasvermeidung und die Förderung der Elektromobilität (BMVI 2017b), ist das aktuelle Interesse am Betrieb von HO-Bussen in Deutschland gestiegen (Hoffmann 2017, Bergk et al. 2016).

5.3.2.1.2 Inhalt und Zielsetzung

In dieser Machbarkeitsstudie (MKS) sollen die grundsätzlichen Auswirkungen eines HO-Bus-Betriebs in Marburg auf das Verteilungsnetz der Stadtwerke Marburg dargestellt werden. Insbesondere wird dabei die Anzahl und Position der benötigten Unterwerke betrachtet, welche die HO-Bus-Fahrleitungen versorgen. Es werden keine wirtschaftlichen

Betrachtungen angestellt. Im Vorfeld einer konkreten Ausführung ist eine weiterführende, detaillierte Studie notwendig. In dieser MKS werden zunächst die technischen Daten der Planung angegeben, danach werden Netzberechnungen in Digsilent PowerFactory durchgeführt. Abschließend wird eine Zusammenfassung der Ergebnisse mit Ausblick und Empfehlungen gegeben.

5.3.2.2 Planungsdaten

5.3.2.2.1 Mittelspannungsnetz

Die von den Stadtwerken Marburg freundlicherweise zur Verfügung gestellte PowerFactory Datei <SW Marburg2016-09-red.pfd> beinhaltet eine schematische Ansicht des 20 kV-Netzes im Stadtgebiet Marburg. Es wird davon ausgegangen, dass die in den Lastobjekten eingestellten Wirk- und Blindleistungswerte die maximal auftretenden Werte sind. Weiter wurden insgesamt 162 Lasten mit gleichnamiger Sammelschiene als Ortsnetzstationen angesehen und in Secondary Substation Objekten (Klasse ElmTrfstat) abgelegt. Fünf markante Netzpunkte (Umspannwerk Süd, HWO, Schalthaus Rudolphsplatz/ Nord/ West/ Lahnberge) wurden als Primary Substations (Klasse ElmSubstat) zusammengefasst. Die resultierenden Objektkontainer ElmTrfstats und ElmSubstats wurden durch die jeweiligen UTM-Koordinaten ergänzt. Daraufhin wurde die geografische Ansicht des übergebenen Netzes entsprechend Abbildung 51 erstellt. Farblich markiert ist die Aufteilung des Netzes in einen Nord- und einen Südteil (Feeder), welche jeweils aus einem separaten 110/20 kV-Transformator des Umspannwerks Süd versorgt werden. Einige wichtige Kabelstrecken wurden durch die Ergänzung von UTM-Koordinaten mit Orientierung an (20kV Übersichtsplan Buslinie 7) lagerichtig gezeichnet, andere Kabelstrecken sind nicht lagerichtig als reine Punkt-zu-Punkt-Verbindung dargestellt.

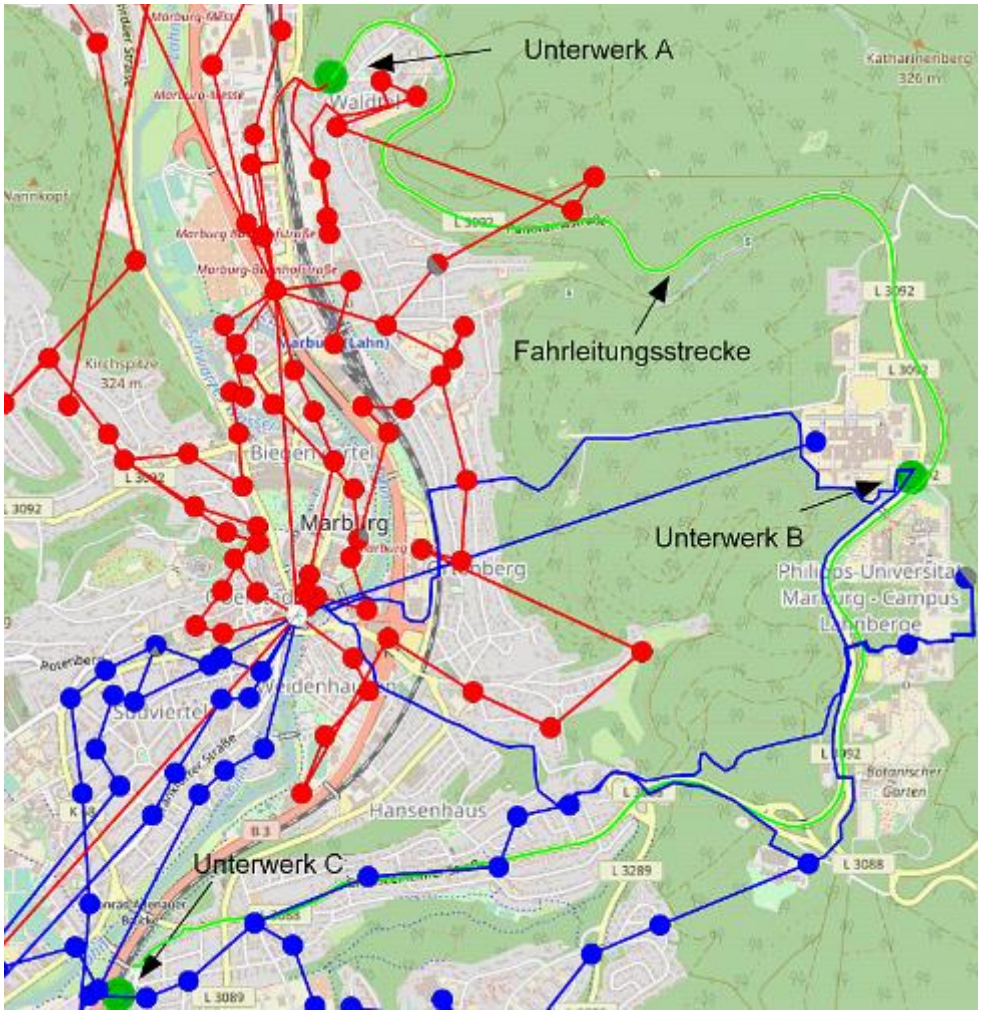


Abbildung 51: Geografische Ansicht des 20 kV-Netzes im Stadtgebiet Marburg mit dem elektrifizierten Fahrweg der Buslinie 7 und Unterwerken

5.3.2.2.2 Oberleitungsnetz

Fahrleitungsstrecke

Die Planungsdaten der Fahrleitungsstrecke für die hier vorgenommenen Berechnungen in Marburg sind:

- Der Anfang der Fahrleitungsstrecke (bei Fahrtrichtung Westen, Richtung Klinikum/Universität) ist kurz nach der Haltestelle Ginseldorfer Weg bei der Ecke Sankt-Martin Straße / Panoramastraße[37].
- Das Ende der Fahrleitungsstrecke ist bei der Haltestelle Südbahnhof[38].
- Die Länge von Anfang bis Ende der beschriebenen Fahrleitungsstrecke ist 9,7 km.

37 Entsprechend der am 14.06.2017 von den Stadtwerken Marburg übersandten Karte (E-Mail).

38 Entsprechend den Anmerkungen vom 29.06.2017 (E-Mail).

Die entsprechende Fahrleitungsstrecke ist in Abbildung 51 eingezeichnet. Der HO-Bus ist nur bei Bergauffahrt angedrahtet, d.h. in Fahrtrichtung zum Unterwerk B hin (Lahnberge aufwärts). Nur die rechte Fahrspur einer Fahrleitungsstrecke wird mit einer Oberleitung mit zwei Fahrleitungen (Hinleiter mit der Polarität L+ und Rückleiter mit der Polarität L-) versehen.

Fahrdrähte

Für O-Bus-Fahrdrähte (≙ Fahrleitungen) wird als Material typischerweise Kupfer mit einem Querschnitt zwischen 80 und 120 mm² verwendet (Wikipedia 2017d, Siemens AG 2017). Der Fahrdraht selbst wird für die Anbringung von Klemmen als sogenannter Breitrillenfahrdraht ausgeführt.

In diesem Bericht wird sowohl für die Hin- (L+) als auch für die Rückleitung (L-) ein Breitrillenfahrdraht aus Kupfer, Querschnitt 120 mm² mit dem spezifischen Widerstand R‘=0,153 Ω/km [15] angenommen. Die Normbezeichnung dieses Fahrdrahtes nach EN 50149 ist AC-120 Cu-ETP.

Nach EN 50 119:2010 ist die dauernde Grenztemperatur für Kupferleiter 80 °C [Kießling et al., 2014, S. 122]. Tabelle 51 zeigt für diese Leitertemperatur die Dauerstromtragfähigkeit, Abbildung 52 zeigt die Daten als Schaubild, der verwendete Leitertyp ist hervorgehoben.

Umgebungs-temperatur [°C]	AC-100 – Cu [A]	AC-120 – Cu [A]	AC-150 - Cu [A]
-30	830	**935**	1.081
-20	791	**891**	1.031
-10	749	**844**	976
0	704	**794**	918
10	656	**739**	855
20	605	**682**	788
30	550	**619**	716
40	485	**546**	630

Tabelle 51: Dauerstromtragefähigkeiten von normierten Kupferfahrleitungen bei 80° C Leitertemperatur (Kießling et al. 2014, S. 480)

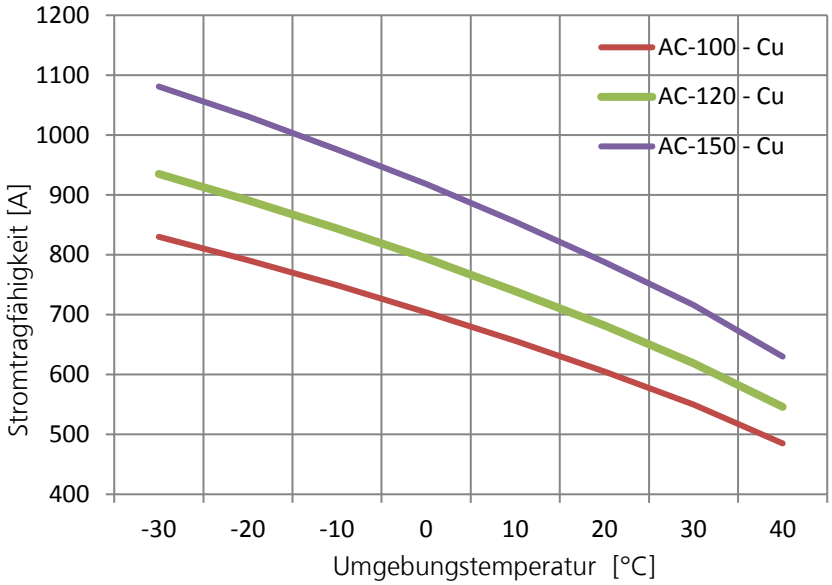


Abbildung 52: Dauerstrombelastbarkeit von normierten Kupferfahrdrähten bei 80° C Leitertemperatur (Kießling et al. 2014, S. 480)

Tragwerk

Die angenommene Tragwerkkonstruktion der Oberleitung und die Verwendung von weiteren Elementen orientiert sich an der bestehenden O-Bus-Anlage in Eberswalde, siehe hierzu Abbildung 53. Entsprechend der Systematik von Abbildung 54 zeigt Abbildung 53a) eine Einfachoberleitung ohne Beiseil. Abbildung 55 zeigt schematisch eine Einfachoberleitung mit Beiseil und Abbildung 56 eine Kettenwerksoberleitung.

Die Verwendung von Beiseilen erlaubt höhere Befahrgeschwindigkeiten durch eine höhere Elastizität der Fahrleitung. Typische maximale Befahrgeschwindigkeiten für Einfachoberleitungen sind 50-70 km/h und bis zu 120 km/h für Kettenwerksoberleitugen (Siemens AG 2017). Entsprechend Abbildung 57 können O-Bus-Oberleitungen in Pendelaufhängung mit einer maximalen Befahrgeschwindigkeit von 80 km/h (Biesenack et al. 2006) ausgeführt werden. Mit Orientierung an Abbildung 53 wird in diesem Bericht eine Einfachoberleitung ohne Beiseil in Pendelausführung entsprechend Abbildung 57 angenommen. In diesem Bericht wird nur eine Fahrspur vorgesehen, d.h. der rechte L+ und L- Fahrdraht fehlen jeweils.

Abbildung 53: O-Bus-Oberleitung Eberswalde, Brandenburg. a) Einspeisung in die Oberleitung, b) Kreuzung, c) Streckentrenner, d) Querkupplung (Kießling et al. 2014, S. 1133)

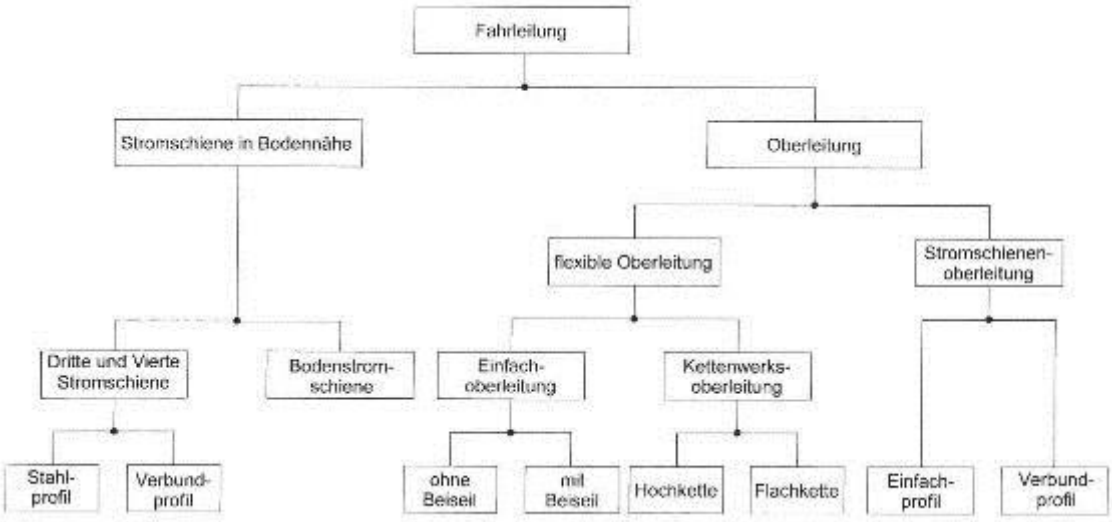


Abbildung 54: Fahrleitungsbauweisen elektrischer Bahnen (Kießling et al. 2014, S. 165)

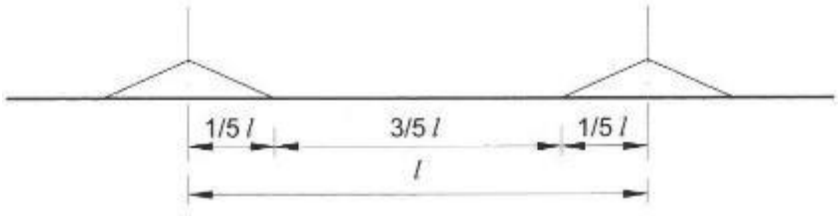


Abbildung 55: Oberleitung mit Beiseilaufhängung für Anwendungen im Nahverkehr (Kießling et al. 2014, S. 172)

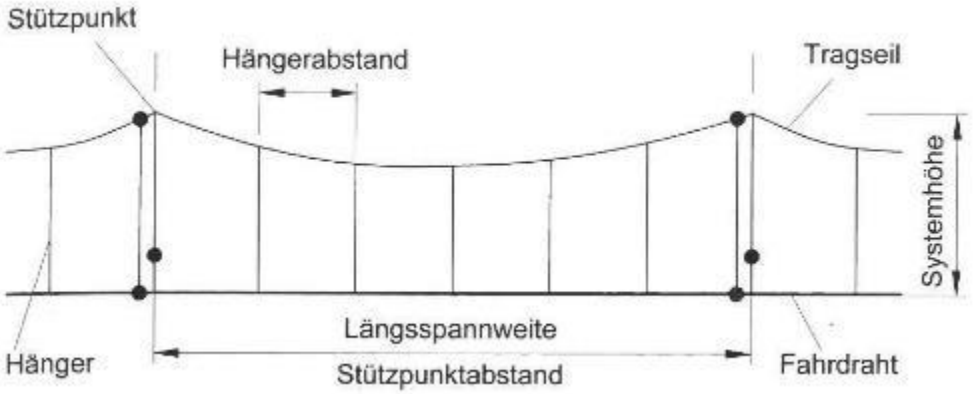


Abbildung 56: Kettenwerk mit einem Hänger am Stützpunkt (Kießling et al. 2014, S. 173)

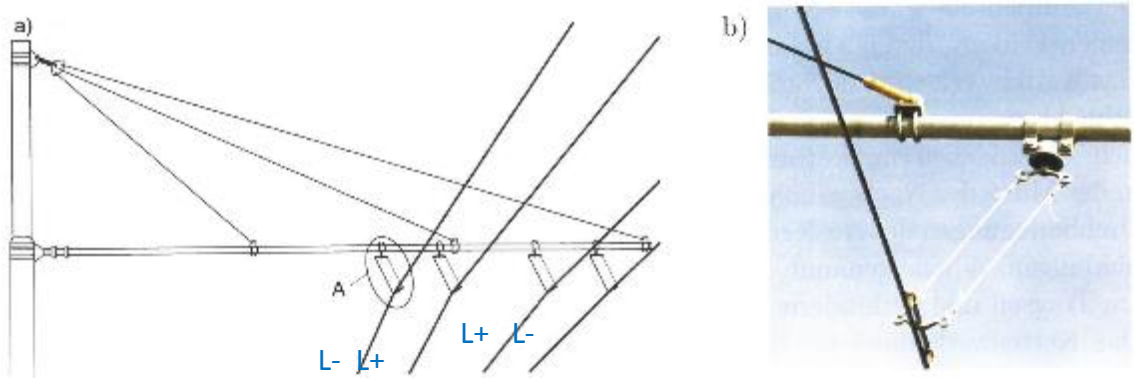


Abbildung 57: O-Bus-Oberleitungen in Pendelaufhängung. a) Überblick, b) Detail A (Biesenack 2006, S. 170)

5.3.2.2.3 Hybrid-Oberleitungsbus

Aktuell in Deutschland eingesetzte O-Bustypen sind z.B. der Swisstrolley 3 (2x160 kW, 600 V) (Wikipedia 2017e) oder der Solaris Trollino 18 (165–256 kW, 600 oder 750 V) (Wikipedia 2017f). Da eine durchgängige Oberleitung ohne Polaritätswechsel und beidseitiger elektrischer Busverkehr nach Norden und nach Süden geplant sind, ist durch die elektrische Ausrüstung des realen Busses eine freie Polaritätswahl (Hinleiter L+ links oder rechts am Stromabnehmer) zu ermöglichen. Eine Möglichkeit hierfür ist der Einsatz einer Gleichrichterbrücke in der Bustechnik, um Schäden durch falsche Polarität an den Gleichstromstellern zu verhindern (Filipovic 1995). In diesem Bericht wird eine maximale Leistungsaufnahme des Hybrid-Oberleitungsbusses zu 240 kW verwendet. Begrenzender Faktor hierbei ist der DC-DC-Steller zur galvanischen Trennung im Bus. Abbildung 58 zeigt den verwendeten Aufbau in PowerFactory.

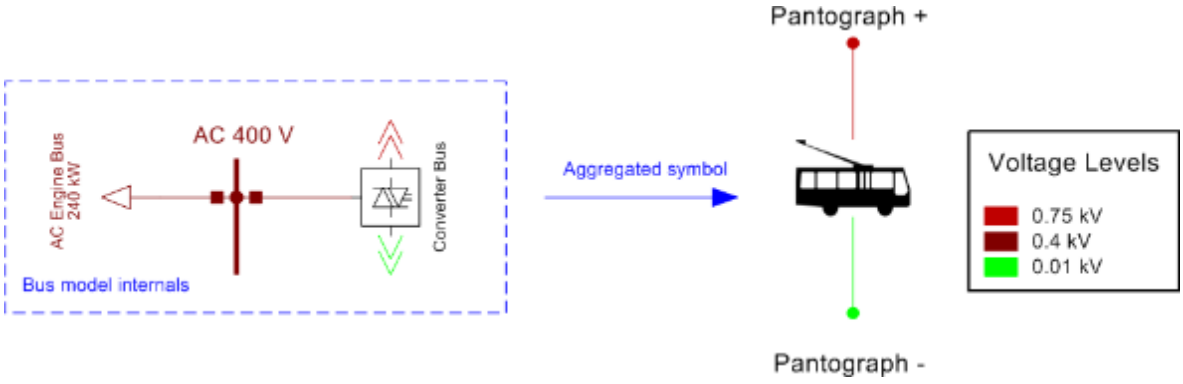


Abbildung 58: Aufbau eines HO-Busses in PowerFactory

5.3.2.2.4 Busgleichrichterunterwerke

Die angenommenen Busgleichrichterunterwerke (im Folgenden kurz „Unterwerke“, UWs genannt) wandeln Wechselstrom durch einen Dreiphasengleichrichter in Gleichstrom um.

Gesteuerte Gleichrichter verwenden Thyristoren und können damit z.B. die DC-Spannung bedarfsgerecht steuern (Biesenack et al. 2006). Im Vergleich dazu sind ungesteuerte Gleichrichter mit Siliziumdioden besonders preisgünstig (Biesenack et al. 2006) und werden im Folgenden angenommen. Zu beachten ist, dass eine Rückspeisung von z.B. Bremsenergie in das AC-Netz nur über einen zusätzlichen Wechselrichter im Unterwerk möglich wäre (Biesenack et al. 2006). Da angenommen wird, dass die Bremsenergie in der Batterie des HO-Busses gespeichert wird, kommt diesem Fall jedoch keine Bedeutung bei.

Für den Zusammenhang zwischen der speisenden Leiter-Leiter Wechselspannung U_{AC} und der resultierenden Gleichspannung U_{DC} gilt für einen verlustfreien und unbelasteten Diodengleichrichter (ungesteuert) (DIgSILENT GmbH o.J.):

$$U_{AC,0} = \frac{\pi \cdot U_{DC,0}}{3 \cdot \sqrt{2}}$$

Bei $U_{AC,0}$ =400 V AC wäre die DC-Spannung bei unbelastetem Gleichrichter (Index 0) $U_{DC,0}$=540,19 V. Bei einem belasteten Gleichrichter sinkt die DC-Spannung durch Kommutierungseffekte weiter ab. Zusätzlich verringert sich die Spannung weiter durch Gleichrichterverluste.

Ausgeführte Oberleitungsbusanlagen in Deutschland verwenden nach Tabelle 52 häufig eine Nennspannung 600 V oder 700 V (DC). In (Biesenack et al. 2006) werden 600 V Nennspannung für zukünftige Gleichstrom-Zugfördersysteme (Straßenbahnen) nicht empfohlen und für ausgeführte Anlagen wird eine Tendenz zur Erhöhung der Nennspannung von 600 auf mindestens 750 V beschrieben.

Allgemein ist eine höhere Nennspannung vorteilhaft, da mit ansteigender Nennspannung die Leitungsverluste quadratisch abnehmen. Weiterhin ist bei höherer Nennspannung aufgrund der geringeren Ströme der Spannungsfall entlang der Leitung geringer. Spannungen >1 kV sind jedoch in HO-Bussen aufgrund der fehlenden Erdung schwieriger zu beherrschen. Weiterhin gelten für Anlagen mit Nennspannung größer >1kV die strengeren normativen Anforderungen der DIN VDE 0101 (anstelle der DIN VDE 0100 für Anlagen mit Nennspannung <1kV).

In Deutschland gibt es derzeit drei bestehende Oberleitungsbusanlagen. Abbildung 59 zeigt Unterwerke und Speisebereiche der Oberleitungsbusanlage in Eberswalde. Tabelle 52 gibt die Nennspannung dieser und weiterer Anlagen an. Tabelle 53 gibt normative DC-Spannungen für Bahnanwendungen an. Auf Grundlage dieser beiden Tabellen und der vorhergehenden Überlegungen wird in diesem Bericht eine Nennspannung des Oberleitungsnetzes von 750 V vorgeschlagen und verwendet.

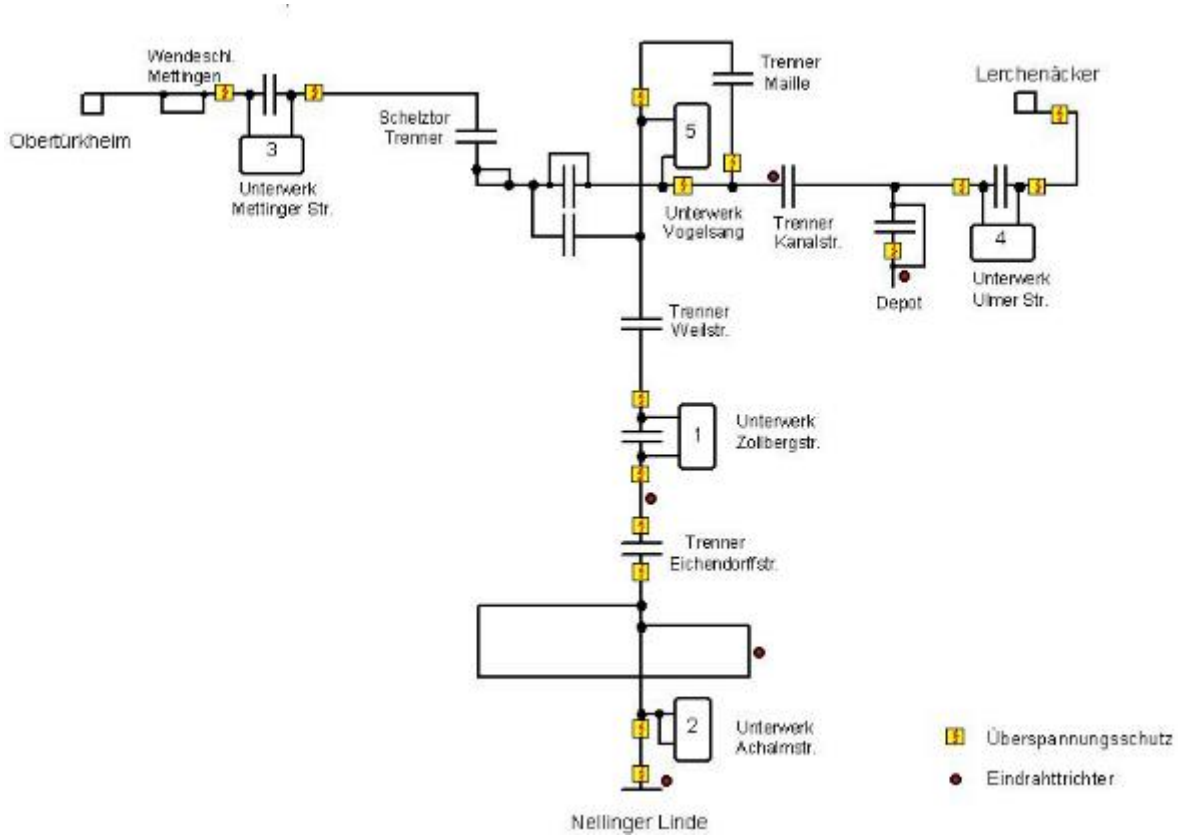


Abbildung 59: Unterwerke und Speisebereiche der Oberleitungsbusanlage Eberswalde (Kiebler 2017)

Ort	Nenn-spannung [V]	Unter-werke	Fahrleitungs-länge [km]	Unterwerke pro Fahrleitungslänge
Eberswalde	600[1] 750[3]	3[2]	44,6[2]	2,5 - 3 km (Einspeisungen und Unterwerke) [3]
Esslingen	600[4]	5[4]	27,1[4]	5,4
Solingen	600[5]	20[5]	98,7[5]	4,94
[1] Wikipedia 2017g, [2] Wikipedia 2017a, [3] Kießling et al. 2014, S. 1132, [4] Wikipedia 2017c, [5] Wikipedia 2017h				

Tabelle 52: Daten von bestehenden Oberleitungsbusanlagen in Deutschland

Typischerweise werden in Gleichrichterunterwerken zwei B6-Brückengleichrichter eingesetzt, um die entstehende Oberschwingungsbelastung zu reduzieren. Gespeist werden die Gleichrichter mit zwei mindestens um 30° versetzten Dreiphasenwechselspannungen, welche durch einen Dreiwicklungstransformator erzeugt werden (Bülow 2017, ABB 2010). Die relevanten Daten des in diesem Bericht angenommen Transformatortyps sind in Abbildung 60 gegeben.

Die sekundäre Nennspannung des Transformatortyps von 600 V (AC) resultiert bei einem unbelasteten und verlustfreien Gleichrichter in eine DC-Spannung von gerundet

$U_{DC,0}$=810 V. Im Vergleich mit der Nennspannung (750 V DC) ist diese Spannung am Speisepunkt der DC-Leitung leicht erhöht, jedoch entsprechend Tabelle 53 zulässig und förderlich im Sinne einer Reduktion des Spannungsfalls sowie der DC-Netzverluste.

Abbildung 61 zeigt den Aufbau eines Unterwerks in PowerFactory, Einzelheiten zur Verstärkungsleitung werden später im Bericht dargestellt.

Nennspannung U_n [V]	**Niedrigste Dauerspannung U_{min1} [V]**	**Höchste Dauerspannung U_{max1} [V]**
600	400	720
750	500	900
1.500	1.000	1.800
3.000	2.000	3.600

Tabelle 53: DC-Normspannungswerte nach EN 50163 „Bahnanwendungen-Speisespannungen von Bahnnetzen“ (Biesenack et al. 2006, S. 12)

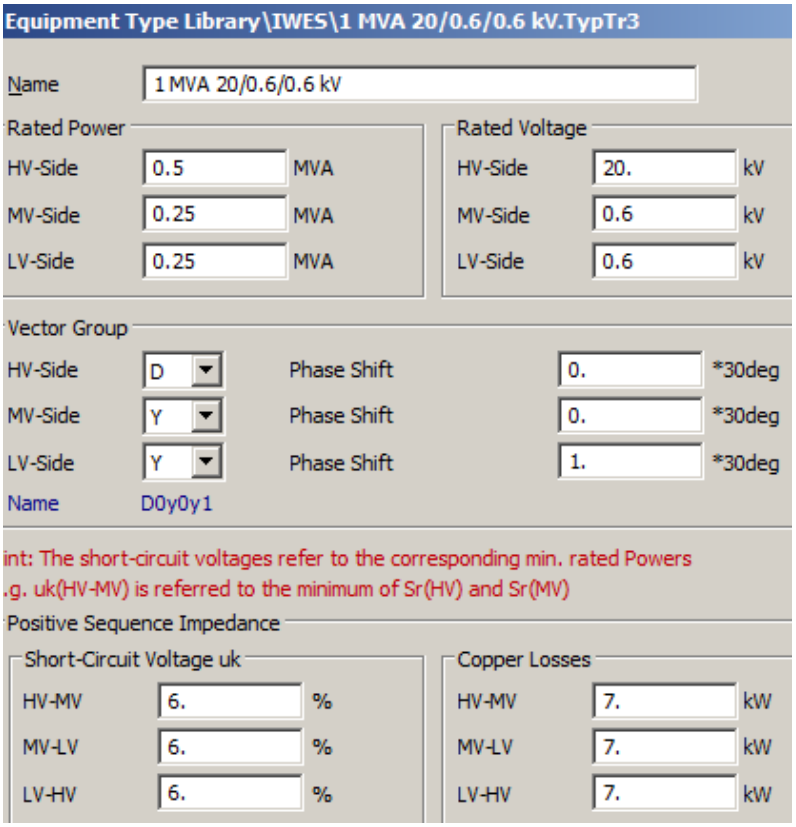


Abbildung 60: Daten des Dreiwicklungstransformators

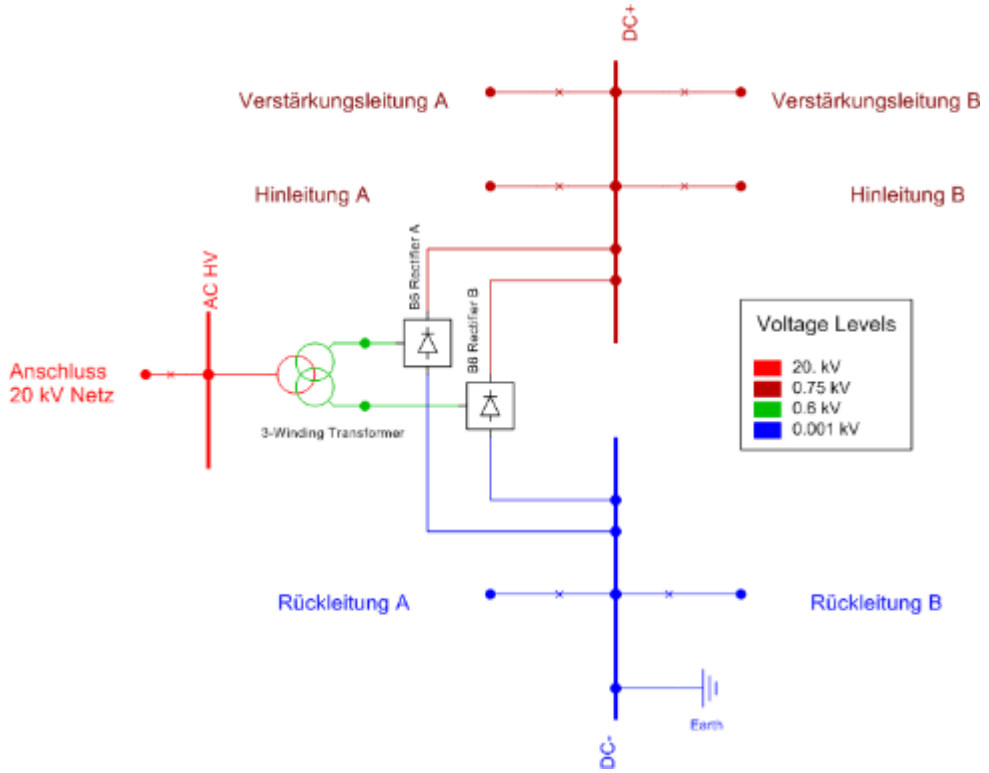


Abbildung 61: Unterwerk in PowerFactory

5.3.2.3 Studienfälle

5.3.2.3.1 Abschätzung der Unterwerksanzahl

Allgemeines

Das in Tabelle 53 für 750 V Nennspannung angegebene Spannungsband reicht von 500 V bis 900 V oder von 0,67 pu bis 1,2 pu. In einer Lastflussrechnung müssen die errechneten Spannungen typischerweise im Bereich von 0,8 pu….1,2 pu liegen, andernfalls besteht die Möglichkeit, dass der Iterationsalgorithmus nicht konvergiert. Für Studienfälle mit Spannungen <0,8 pu werden daher für gewöhnlich RMS- oder EMT-Simulationen eingesetzt.

Im bestehenden Fall kann der Spannungsfall auf der Fahrleitung auch direkt mit Ersatzschaltbildern abgeschätzt werden. Dies wird im Folgenden für ein- und zweiseitig gespeiste Fahrleitungsstrecken durchgeführt. Als Zahlenwerte hierfür werden die vorhergehend angegebenen Daten verwendet, Tabelle 54 zeigt eine Zusammenfassung. Für die Unterwerksspannung U_w wird die Ausgangsspannung des unbelasteten und verlustfreien Gleichrichters ($U_{DC,0}$) verwendet.

Beschreibung	Symbol	Wert
Unterwerksspannung	$U_w = U_{DC,0}$	810 V (DC)
Spezifischer Fahrleitungswiederstand	R‘	0,153 Ω/km
Busleistung (elektrisch)	P_b	240 kW
Niedrigste zulässige DC-Dauerspannung	$U_{b,min}$	500 V (DC)

Tabelle 54: Verwendete Zahlenwerte

Einseitige Speisung

Abbildung 62 zeigt das verwendete Ersatzschaltbild. Das Unterwerk speist mit der DC-Spannung U_w über einen Leitungswiderstand R den als variable ohmsche Last dargestellten Bus R_b. Die variable ohmsche Last R_b verbraucht dabei konstant die Leistung P_b. Der Leitungswiderstand R_l ergibt sich aus $R_l = x \cdot R'$, wobei x der Fahrleitungsweg vom Unterwerk bis zum Bus und R’ der spezifische Fahrleitungswiderstand ist. Zu beachten ist, dass U_b die Spannung am Stromabnehmer des Busses (zwischen den beiden Fahrleitungspolen) und keine Leiter-Erde Spannung (Erdpotential definiert durch den – Pol der Spannungsquelle) ist.

Für die eingezeichnete Masche M1 gilt:

$$0 = \frac{2P_b}{U_b} R' x + U_b - U_w \qquad (1)$$

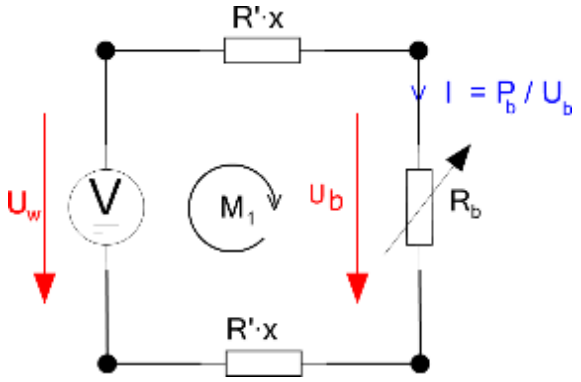


Abbildung 62: Ersatzschaltbild bei einseitiger Speisung

Aufgelöst nach U_b ergeben sich zwei Lösungen für $U_b(x)$:

$$U_{b,2}(x) = \frac{U_w}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{-8P_b R' x + U_w^2} \qquad (2)$$

$$U_b(x) = \frac{U_w}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{-8P_b R' x + U_w^2} \qquad (3)$$

$$l_{max} = \frac{U_{bMin}(U_w - U_{bMin})}{2P_b R'} \qquad (4)$$

Die zwei Wurzelfunktionen (2) und (3) bilden die beiden Hälften einer Spannungs-Wirkleistungscharakteristik („Nasenkurve“). Analog zu den Verhältnissen für Wechselstrom (Cutsem et al. 2008, S. 6) sind stabile Arbeitspunkte nur durch Gleichung (3) beschrieben.

Die maximale Fahrleitungslänge l_{max} ergibt sich aus (3) mit $x = l$ und dem Schnittpunkt der niedrigesten zulässigen Dauerspannung $U_{b,min}$. Gleichung (2) gleichgesetzt zu U_{bMin} und nach l aufgelöst ergibt Gleichung (4). Abbildung 63 zeigt den Verlauf der Funktion $U_b(x)$ mit den Werten aus Tabelle 54.

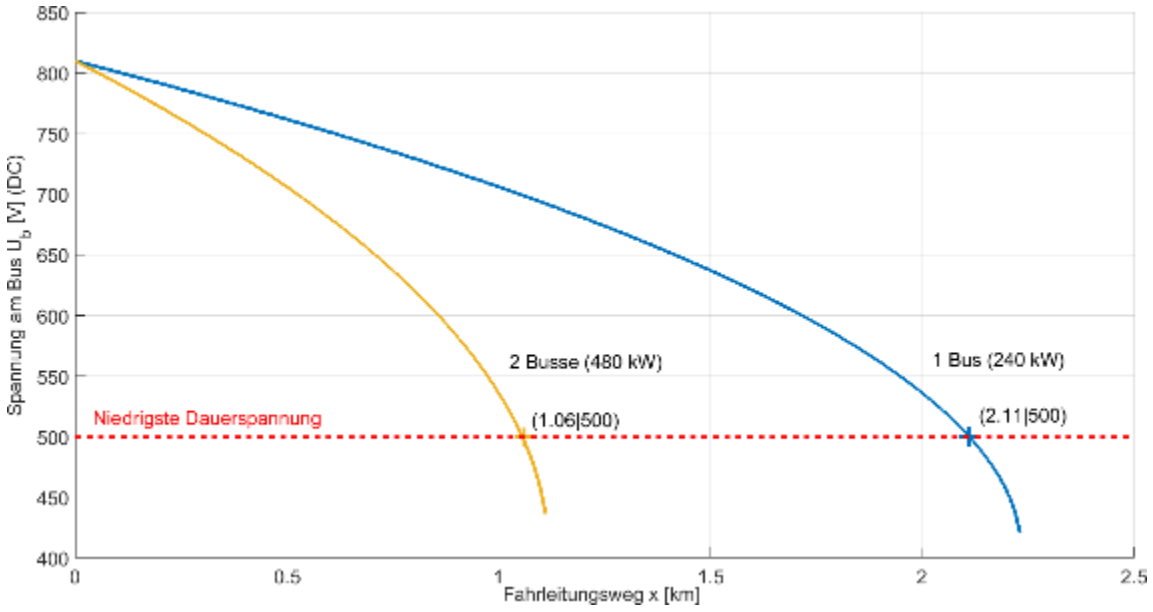


Abbildung 63: Spannungsfall bei einseitig speisendem Unterwerk (bei x=0 km)

Beidseitige Speisung

Für eine beidseitig gespeiste Fahrleitungsstrecke wird ein Ersatzschaltbild nach Abbildung 64 verwendet. Es lassen sich die Maschengleichungen (5), (6), (7) und die Knotengleichungen (8), (9) formulieren. Gleichung (8) nach I_1 sowie (9) nach I_4 aufgelöst und in (5), sowie (7) eingesetzt ergibt (10) und (11). Anschließend (10) nach I_2 aufgelöst und in (6) sowie (11) eingesetzt ergibt zwei identische Ausdrücke, von denen einer (12) ist. Ausdruck (12) nach U_b aufgelöst ergibt die Lösungen (13) und (14). Entsprechend den Verhältnissen bei einseitiger Speisung sind stabile Arbeitspunkte wieder nur durch den Ausdruck (14) beschrieben, veranschaulichbar durch das positive Vorzeichen vor der Wurzel.

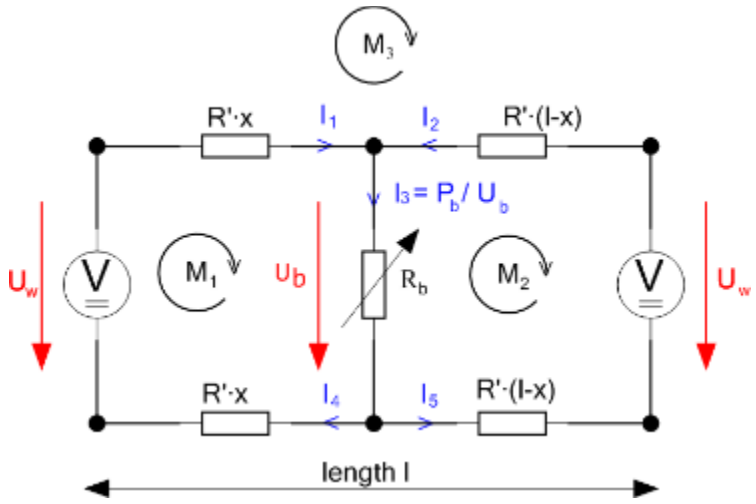


Abbildung 64: Ersatzschaltbild bei beidseitiger Speisung

$$0 = I_1 R' x + I_4 R' x + U_b - U_w \quad (5)$$

$$0 = -I_2 R' (l - x) - I_5 R' (l - x) - U_b + U_w \quad (6)$$

$$0 = I_1 R' x - I_2 R' (l - x) + I_4 R' x - I_5 R' (l - x) \quad (7)$$

$$0 = I_1 + I_2 - \frac{P_b}{U_b} \quad (8)$$

$$0 = -I_4 - I_5 + \frac{P_b}{U_b} \quad (9)$$

$$0 = -I_2 R' x - I_5 R' x + \frac{2P_b}{U_b} R' x + U_b - U_w \quad (10)$$

$$0 = -I_2 R' (l - x) - I_5 R' (l - x) - U_b + U_w \quad (11)$$

$$0 = -\frac{2P_b}{U_b} R' l + \frac{2P_b}{U_b} R' x - \frac{U_b l}{x} + \frac{U_w l}{x} \quad (12)$$

$$U_{b,2}(x) = \frac{U_w}{2} - \frac{1}{2\sqrt{l}} \sqrt{-8P_b R' l x + 8P_b R' x^2 + U_w^2 l} \quad (13)$$

$$U_b(x) = \frac{U_w}{2} + \frac{1}{2\sqrt{l}} \sqrt{-8P_b R' l x + 8P_b R' x^2 + U_w^2 l} \quad (14)$$

$$l_{max} = \frac{2U_{bMin}}{P_b R'} (U_w - U_{bMin}) \quad (15)$$

Abbildung 65 zeigt den Verlauf der Funktion $U_b(x)$. Die Lage des Tiefpunktes wird durch ableiten und auflösen von (14) nach x bestimmt. Es ergibt sich $x_{min} = l/2$, was sich durch die Symmetrie der Anordnung veranschaulichen lässt. Dieses Ergebnis in (14) für x eingesetzt, gleich U_{bMin} gesetzt und nach l aufgelöst ergibt Gleichung (15) für die maximale Fahrleitungslänge l_{max}.

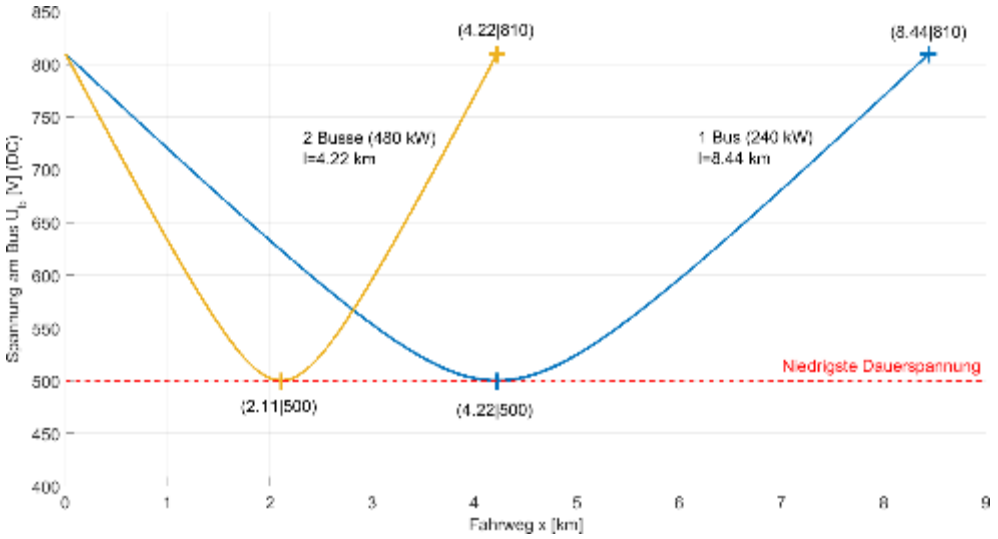


Abbildung 65: Spannungsfall bei beidseitig speisenden Unterwerken (bei x=0 km und x=4,22 km bzw. x=8,44 km)

Schlussfolgerungen

Beim Einsatz von zwei Unterwerken wird in der Mitte ein beidseitig gespeister Fahrleitungsabschnitt und weiter an beiden Unterwerken ein jeweils einseitig gespeister Fahrleitungsabschnitt angenommen. Weiterhin wird die Versorgung von einem Bus und zwei direkt hintereinanderfahrenden Bussen angenommen. Zwei direkt hintereinanderfahrende Busse werden in der Leistung zu einem Bus zusammengefasst.

Mit den Zahlenwerten aus Tabelle 54 ergeben sich aus den Gleichungen (4) und (15) die in Tabelle 55 angegebenen Werte für die abgeschätzten maximalen Fahrleitungslängen.

Anzahl Busse	Maximale Fahrleitungslänge l_{max} bei einseitiger Speisung [km]	Maximale Fahrleitungslänge l_{max} bei beidseitiger Speisung [km]
1	2,11	8,44
2	1,06	4,22

Tabelle 55: Die mit Ersatzschaltbildern abgeschätzten maximalen Fahrleitungslängen

Für zwei Unterwerke und bei zwei (direkt hintereinanderfahrenden) Bussen ist nach Tabelle 55 die maximale gesamte Fahrleitungslänge 1,06 km+4,22 km+1,06 km= 6,34 km. Eine Versorgung der geplanten Fahrleitungsstrecke durch zwei Unterwerke ist damit gemäß den vorhergehenden Betrachtungen nicht möglich.

Für drei Unterwerke und zwei Busse ist nach Tabelle 55 die maximale, gesamte Fahrleitungslänge 1,06 km+4,22 km+4,22 km+1,06 km=10,56 km. Eine Versorgung durch drei Unterwerke wäre damit gemäß der Abschätzung knapp möglich.

In den Abschätzungen des Spannungsfalls mit Ersatzschaltbildern wird die DC-Spannung eines unbelasteten und verlustfreien Gleichrichters verwendet. In der Realität wird bei belastetem Gleichrichter jedoch die DC-Spannung am Gleichrichterausgang durch Verluste und Kommutierungseffekte von diesem Wert nach unten abweichen. Damit erhöht sich auch der Spannungsfall auf der Fahrleitung. Abbildung 66 und Abbildung 67 illustrieren diesen Effekt für ein- bzw. beidseitige Unterwerksspeisung. Zusätzlich dargestellt ist in diesen Abbildungen die Auswirkung einer vom Nennwert (20 kV, AC) abweichenden Unterwerkspeisung (U_supply). Wenn die Unterwerkspeisespannung >0.95 gehalten wird, wird die niedrigste Dauerspannung auf der Oberleitungsstrecke mit einer Sicherheitsmarge eingehalten.

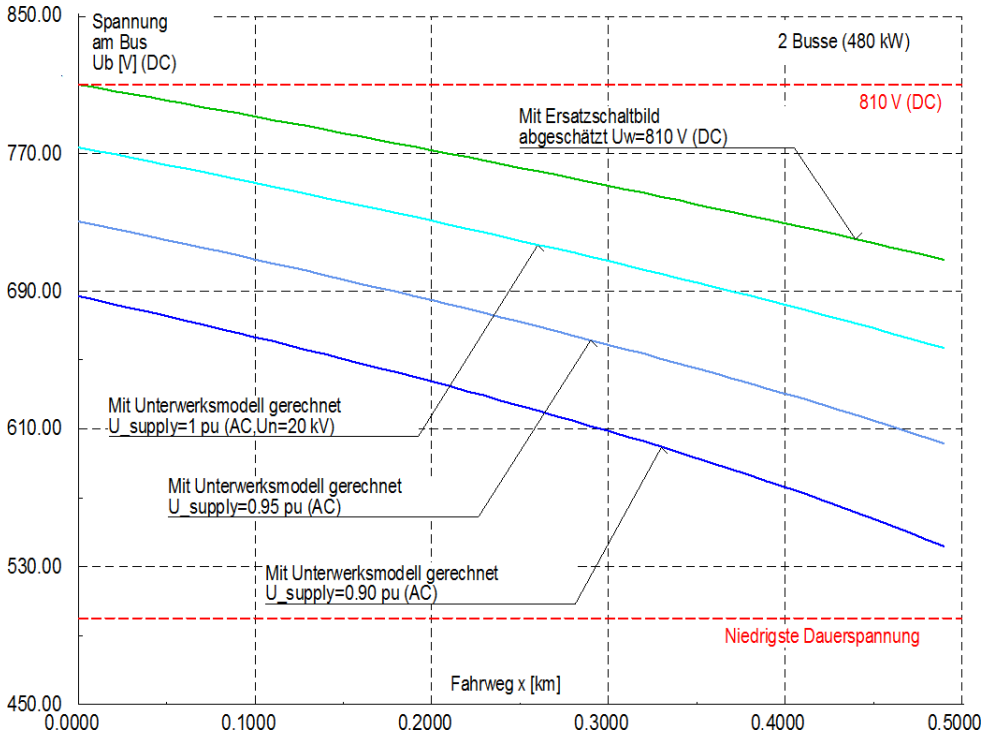


Abbildung 66: Spannungsfall bei einseitig speisendem Unterwerk (bei x=0 km)

Zusammenfassend verringern sich die abgeschätzten maximalen Fahrleitungslängen durch die Berücksichtigung der absinkenden DC-Ausgangsspannung des belasteten Gleichrichters und durch eine Berücksichtigung von reduzierten Versorgungsspannungen der Unterwerke (z. B. durch den Spannungsfall im 20 kV-Netz) auf die in Tabelle 56 festgelegten Planungswerte.

Für vier Unterwerke und zwei Busse ist nach Tabelle 56 die maximale, gesamte Fahrleitungslänge 0,5 km+3 km+3 km+3 km+0,5 km=10 km. Eine Versorgung der geplanten Fahrleitungslänge mit 9,7 km Länge ist damit gemäß der Planungsdaten von Tabelle 56 möglich.

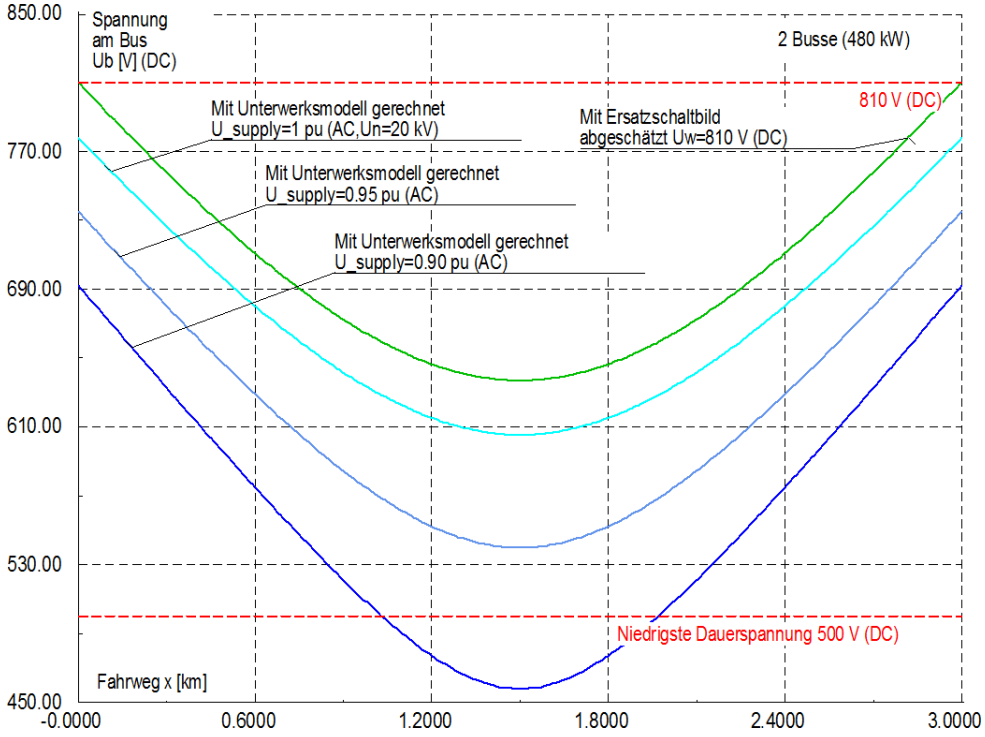


Abbildung 67: Spannungsfall bei beidseitig speisenden Unterwerken (bei x=0 km und x=3 km)

Anzahl Busse	Maximale Fahrleitungslänge l_{max} bei einseitiger Speisung [km]	Maximale Fahrleitungslänge l_{max} bei beidseitiger Speisung [km]
2	0,5	3

Tabelle 56: Planungswerte für die Fahrleitungslängen bzw. Unterwerksabstände

5.3.2.3.2 Spannungsfall auf der Fahrleitungsstrecke

Eine Möglichkeit zur Spannungsfallverminderung besteht in der Verwendung von Gleichstromleitungen und Speisungen der Fahrleitung an räumlich unterschiedlichen Punkten durch dasselbe Unterwerk mit sogenannten Verstärkungsleitungen. Die Verstärkungsleitungen können entweder als Kabel oder Freileitung ausgeführt werden.

Es wird vorgeschlagen eine Verstärkungsleitung als Freileitung mit auf das Oberleitungsgestänge aufzulegen. In Abbildung 57 wäre dann nur der linke L- Leiter nicht vorhanden. Ein L+ Leiter ist die Fahrleitung und der andere L+ Leiter ist die Verstärkungsleitung. Es wird angenommen, dass zwischen Fahr- und Verstärkungsleitung zu jedem vollen Streckenkilometer (ab Unterwerk in Fahrtrichtung UW B) Querkupplungen (Abbildung 53d) eingebaut sind. Die Ausführung (Material und Querschnitt) der Verstärkungsleitung wird gleich der Fahrleitung angenommen. Abbildung 69 zeigt den vorgeschlagenen Aufbau. Wie später gezeigt wird, kann der Spannungsfall mit einer Verstärkungsleitung begrenzt werden, sodass nur drei statt vier Unterwerke (ohne Verstärkungsleitung, siehe vorhergehenden Abschnitt) nötig sind.

Weiter wird für die Positionierung und Speisung der Unterwerke versucht, die Unterwerke möglichst direkt durch Schalthäuser zu versorgen. Schalthäuser, welche auch Schwerpunkstationen genannt werden, sind in der Regel direkt durch Kabelverbindungen an ein Umspannwerk (hier 20/110 kV) angeschlossen und somit besonders leistungsstark.

Abbildung 68 zeigt die Spannung am Stromabnehmer bei der Fahrt von zwei direkt hintereinander fahrenden Busses (Leistungsbezug eines aggregierten Busses: 2x240 kW=480 kW) vom Unterwerk A zum Unterwerk B und daraufhin anschließend für die Fahrt vom Unterwerk C zum Unterwerk B. Deutlich sichtbar ist der Effekt der Querkupplungen, welche die Spannung in regelmäßigen Abständen „nach oben ziehen“. Die minimale Spannung ist ca. 693 V (0,92 pu). Die minimale Dauerbetriebsspannung ist 500 V (0,66 pu), d.h. es besteht eine Spannungsreserve von 26 %.

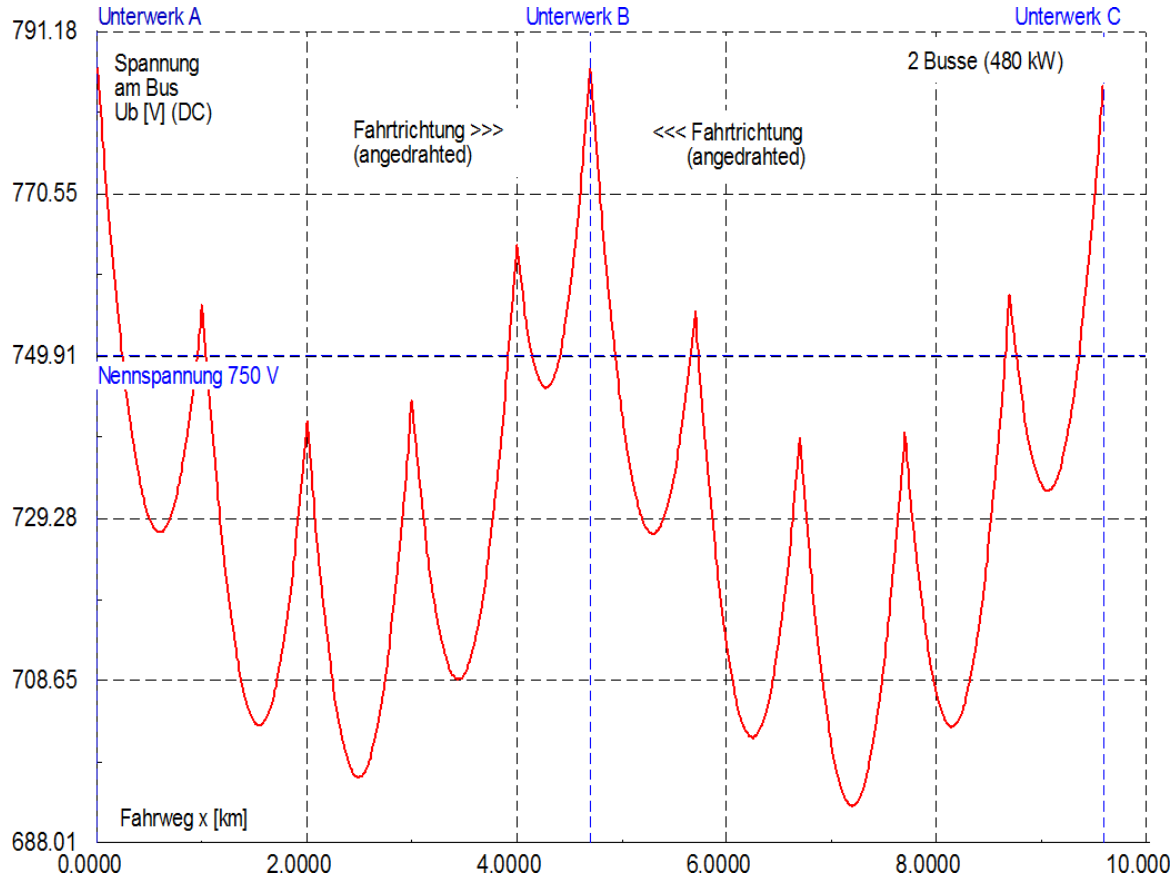


Abbildung 68: Spannung am Stromabnehmer

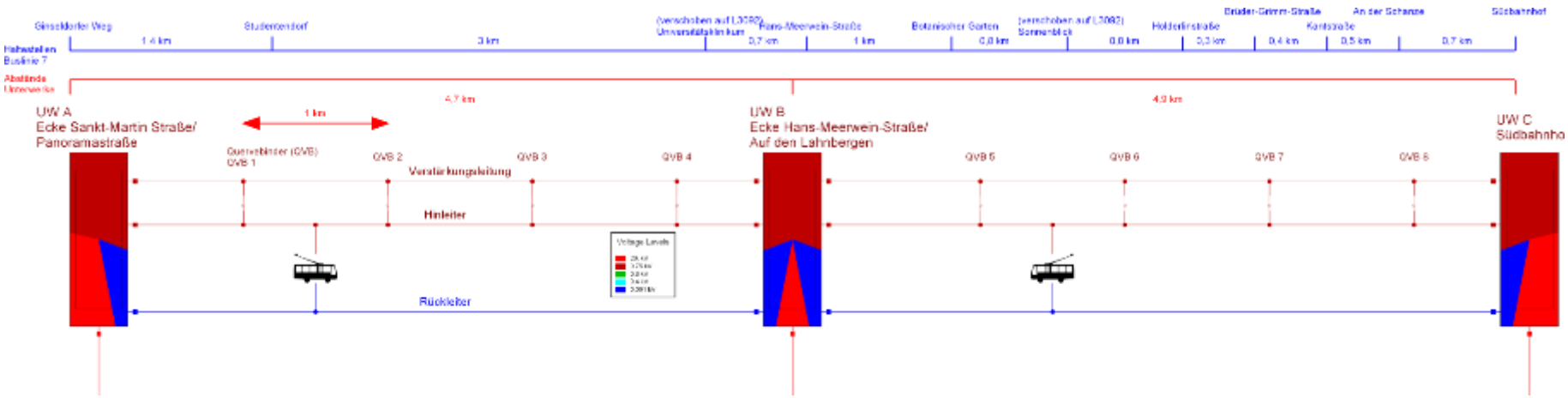


Abbildung 69: Positionierung der Unterwerke

Unterwerk	Speiseort im 20 kV Netz
A	Zwischen den Ortsnetzstationen „A.- Kasseler Str.“ und „Neumarkt Nord“, 79 m Abstand von der Ortsnetzstation „A.- Kasseler Str.“.
B	Direkt an der Sammelschiene „Lahnberge 2“ im Schalthaus Lahnberge
C	Auf halber Strecke zwischen den Ortsnetzstationen Frauenbergstraße und Fichtestraße

Tabelle 57: Speiseorte der Unterwerke im 20 kV Netz

5.3.2.3.3 Netzbelastung durch die Unterwerksversorgung

Die Auswirkungen der Unterwerksversorgung auf das 20 kV-Netz wurden nach Spannungsänderungen und Betriebsmittelauslastung im 20 kV-Netz betrachtet. Hierzu wurde die gleichzeitige Versorgung von vier Bussen zu je 240 kW Leistungsbezug mit einer Position jeweils in der Mitte eines Speisebereichs angenommen.

Es wurde eine Lastflussrechnung ohne Unterwerksversorgung und eine Lastflussrechnung mit Unterwerksversorgung durchgeführt und die Abweichungen in den Ergebnissen prozentual auf den ersten Fall (ohne Unterwerksversorgung) bezogen.

Für das 20 kV-Netz wurden die zulässigen Spannungsabweichungen zu max. ± 10 % (bezogen auf den Nennwert) und max. 80 % Kabel- bzw. Transformatorauslastung (bezogen auf die Nennleistung) angenommen.

Abbildung 70, Abbildung 71 und Abbildung 72 zeigen die nach Lastflussergebnissen eingefärbte Situation an den Abgängen der drei Unterwerke im 20 kV-Netz bei Versorgung der Unterwerke. Alle Spannungen und Kabelauslastungen sind im zulässigen Bereich. (Hier angenommen zu max. ± 10 % Spannungsabweichung vom Nennwert und max. 80 % Kabelauslastung).

Tabelle 58 zeigt die Veränderungen für die Fälle „ohne Unterwerksversorgung“ und „mit Unterwerksversorgung“ am Umspannwerk Süd, aus welchem das 20 kV-Netz gespeist wird. Die festgestellten Veränderungen in der Auslastung sind <5 %.

Name	Nennleistung [MVA]	Auslastung ohne die Unterwerksversorgung	Auslastung mit Unterwerksversorgung
Tr101	40	85,69	88,42
Tr102	40	0,07	0,07
Tr104	40	56,54	58,06

Tabelle 58: Auslastung der 110 /22 kV Netzkuppeltransformatoren des Umspannwerks Süd

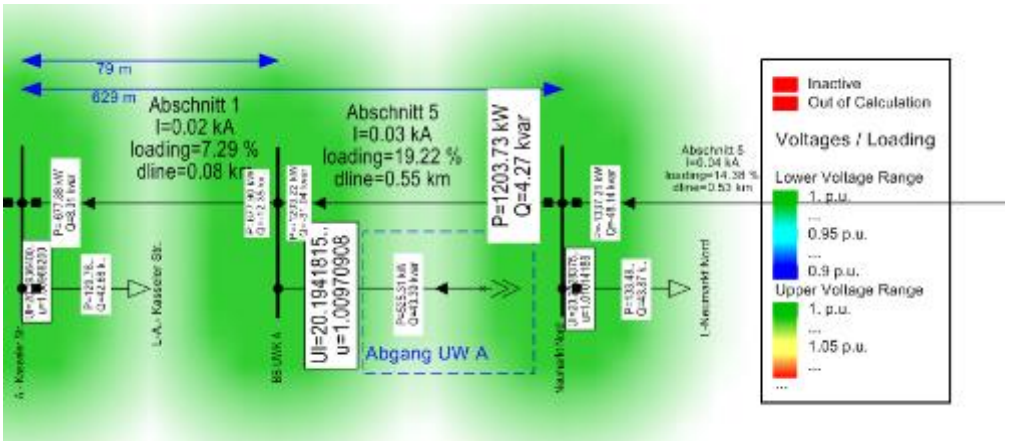


Abbildung 70: Situation am Abgang des Unterwerks A bei Versorgung von 4 Bussen (insg. 960 kW) durch die drei Unterwerke

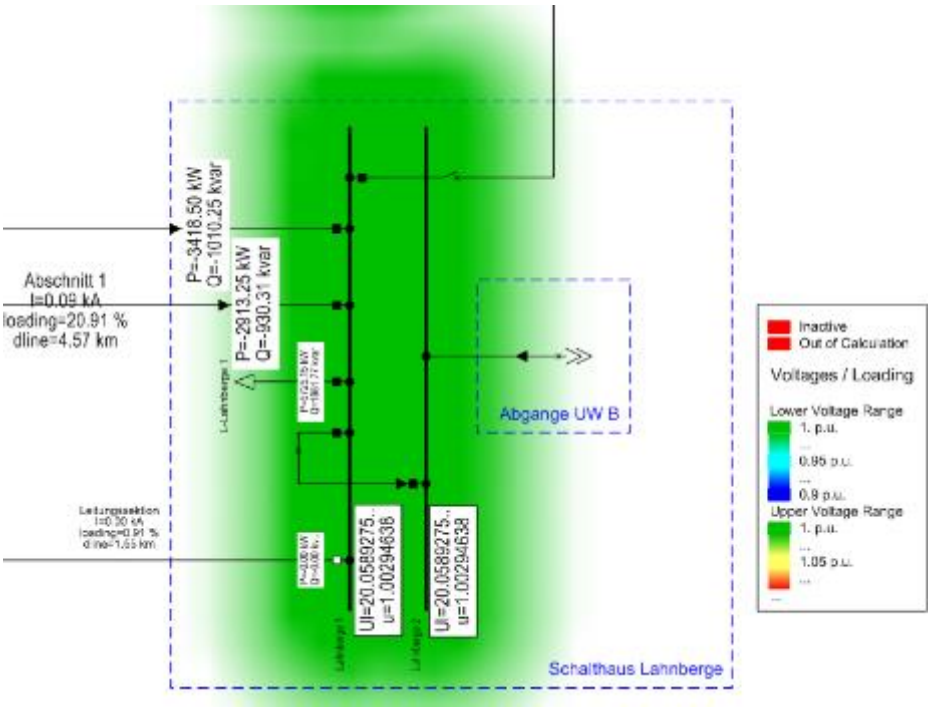


Abbildung 71: Situation am Abgang des Unterwerks B bei Versorgung von 4 Bussen (insg. 960 kW) durch die drei Unterwerke

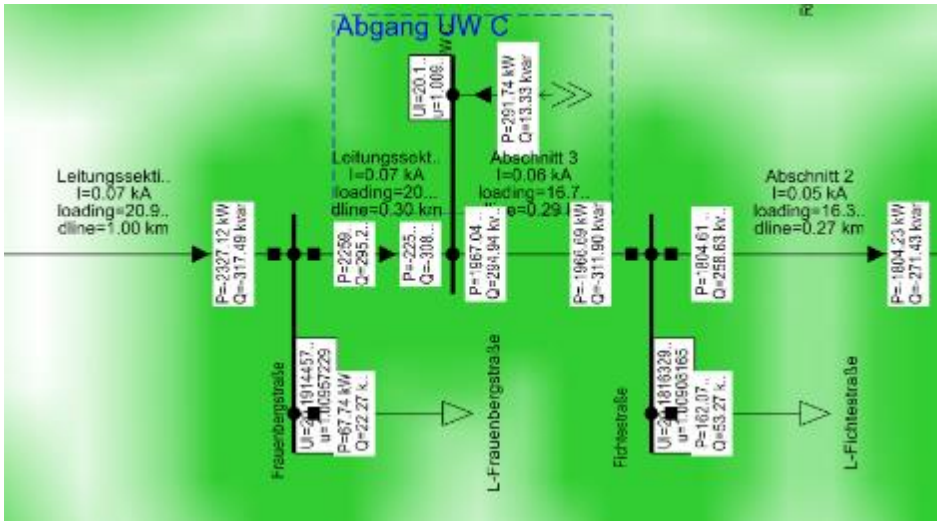


Abbildung 72: Situation am Abgang des Unterwerk C bei Versorgung von 4 Bussen (insg. 960 kW) durch die drei Unterwerke

5.3.2.4 Zusammenfassung

5.3.2.4.1 Arbeiten

Das 20 kV-Netz der übergebenen PowerFactory-Datei wurde um eine geografische Ansicht erweitert. Die geplanten Fahrleitungen wurden sowohl schematisch als auch geografisch eingefügt. Für Unterwerke und HO-Busse wurden geeignete Modelle erstellt und in den Studienpunkten verwendet. Der Spannungsfall auf der Fahrleitung wurde abgeschätzt und mit Lastflussrechnungen zusammen mit der Belastung des 20 kV Netzes überprüft.

5.3.2.4.2 Ergebnisse

Im Ergebnis wurden sowohl die Veränderungen im AC-Netz als auch der Spannungsfall im DC-Netz als unproblematisch bewertet. Ein Betrieb von HO-Bussen ist entsprechend den betrachteten Studienfällen möglich.

5.3.2.4.3 Ausblick

Fahrzeugsimulation

Als Ausblick könnten in detaillieren Studien die Daten der verwendeten Modelle mit den technischen Datenblättern der jeweiligen Betriebsmittel (Unterwerke, HO-Busse) weiter verfeinert werden. Das 20 kV Netz könnte durch Modelle der 20/0.4 kV Transformatoren ergänzt werden und die jeweiligen Lasttagesgänge als Profil in PowerFactory hinterlegt werden. Damit könnte das betrachtete Netz Tages- und Jahreszeitpunktscharf per Lastfluss berechnet werden und eine detaillierte quasistationäre Simulation (wiederholte Last-

flussrechnungen bei aufeinanderfolgenden Zeitpunkten) mit Betrachtung des Einflusses ortsveränderlicher Lasten (HO-Busse) wäre vorstellbar.

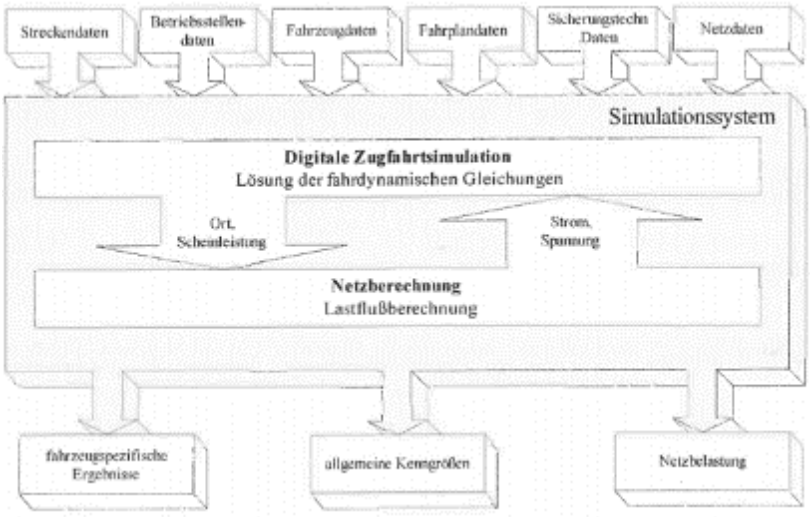


Abbildung 73: Komponenten einer umfassenden Zug- oder HO-Bussimulation (Biesenack 2006)

Leitungsverluste

Allgemein sinken elektrische Leitungsverluste quadratisch proportional zu einem Anstieg der Nennspannung. Es ist daher sehr attraktiv Leitungsverluste durch eine höhere Nennspannung effektiv zu reduzieren, der Spannungsfall wird dabei ebenso verringert. Allgemein besteht eine Tendenz zu höheren Spannungen für leistungsstarke elektrische Fahrzeuge. Es ist zu vermuten, dass eine höhere Nennspannung (neben Rollwiederständen) ein maßgeblicher Grund für den absinkenden Energieverbrauch (bei ansteigender Fahrzeugleistung) gemäß Tabelle 59 ist.

Oberleitungsfahrzeug	**Spezifischer Energieverbrauch (Wh/tkm)**
Fernbahn	20-30 (Flachland) 30-65 (Gebirge)
Stadtschnellbahn	50-75
Straßenbahn	40-90
O-Bus	90-130

Tabelle 59: Spezifischer Energieverbrauch von Oberleitungsfahrzeugen (inklusive Verluste in der Fahrleitung und im Triebfahrzeug) (Filipovic 1995)

5.3.3 Ergänzungen

In den bisherigen Auslegungen wurde ein Betrieb von maximal zwei Bussen (zu je 240 kW) vorgesehen. Als Ergänzung soll überprüft mit wieviel Unterwerken bis zu 6 Bussen (zu je 200 kW) pro Speiseabschnitt versorgt werden können.

Der nach Tabelle 61 maximal lieferbare Strom ist 630 A (Leitermaterial AC-150 – Cu bei 40°C). Im Vergleich mit Tabelle 60 sind damit maximal 5 Busse auf einem Streckenabschnitt betreibbar. (Bei einer geringfügigen Überschreitung des maximalen Stromwertes von 630 A um 6 %).

Die maximalen Längen der Speiseabschnitte wurde mit Formel (17) und den Zahlenwerten aus Tabelle 62 abgeschätzt. Abbildung 74 zeigt die entsprechenden Spannungsfallverläufe. Abschließend ergeben sich die Werte gemäß Tabelle 63.

Anzahl Busse auf einem Speiseabschnitte	**Zu versorgender Leistung [kW]**	**Oberleitungsstrom bei beidseitiger Speisung und 750 V (DC) [A]**
2	400	267
3	600	400
4	800	533
5	1.000	667
6	1.200	800

Tabelle 60: Leistungs- und Strombedarf bei variabler Busanzahl

Umgebungs-temperatur [°C]	**AC-100 – Cu [A]**	AC-120 – Cu [A]	AC-150 – Cu [A]
-30	830	935	1.081
-20	791	891	1.031
-10	749	844	976
0	704	794	918
10	656	739	855
20	605	682	788
30	550	619	716
40	485	546	630

Tabelle 61: Dauerstromtragefähigkeiten von normierten Kupferfahrleitungen bei 80 °C Leitertemperatur (Kießling et al., S. 480)

Beschreibung	Symbol	Wert
Unterwerksspannung	$U_w = U_{DC,0}$	810 V (DC)
Spezifischer Fahrleitungswiderstand	R‘	0,122 Ω/km
Busleistung (elektrisch)	P_b	200 kW
Niedrigste zulässige DC- Dauerspannung	$U_{b,min}$	500 V (DC)

Tabelle 62: Verwendete Zahlenwerte

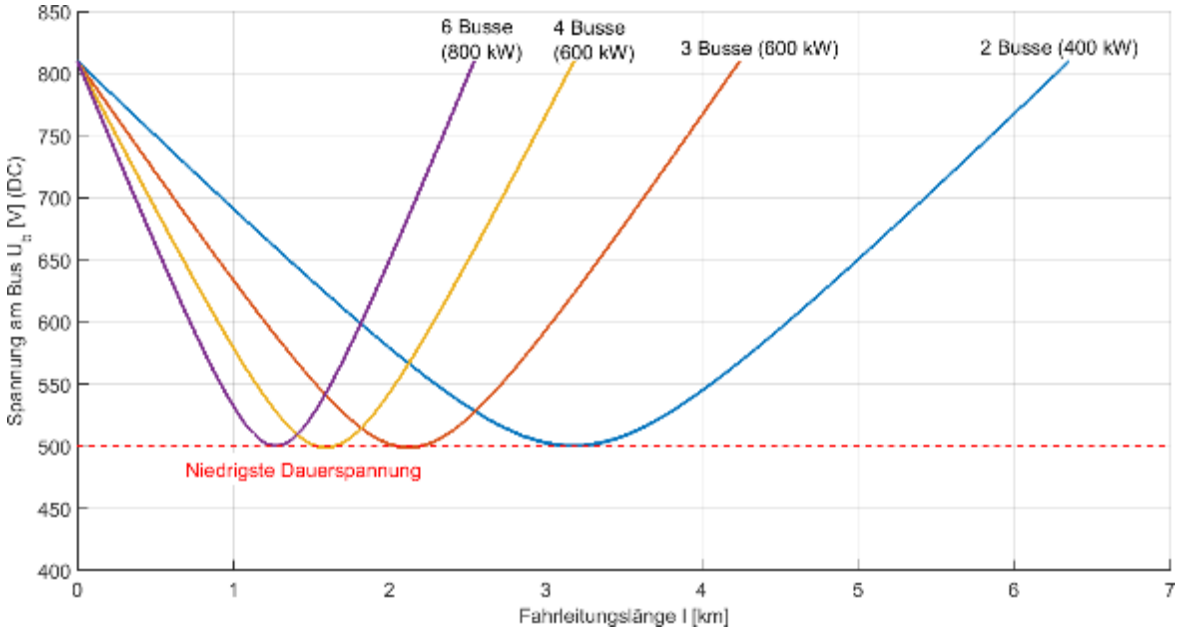


Abbildung 74: Spannungsfall bei beidseitig speisenden Unterwerken und maximalen Fahrleitungslängen

Anzahl Busse	Maximale Fahrleitungslänge l_{max} bei beidseitiger Speisung [km]	Speiseabschnitte bei 9,7 km Gesamtstrecke	Benötigte Unterwerksanzahl
2	6,35	2	3
3	4,24	2-3	3-4
4	3,18	3	4
5	2,54	4	5

Tabelle 63: Abschätzung der Speiseabschnittlängen und benötigten Unterwerksanzahl

Detaillierte Betrachtungen

Wie im vorhergehenden Abschnitt wird das Netz detailliert mit Lastflussanalyse in PowerFactory gerechnet. Abbildung 75 zeigt die Anordnung der Unterwerke und Tabelle 64 die Abgänge der Unterwerke im 20 kV AC Netz. Abbildung 76 zeigt die resultierende Spannung am Bus. Zwischen Unterwerk C und D wird die niedrigste Dauerspannung erreicht. Mit der Annahme einer aggregierten Last von 1 MW (dargestellt durch 5 Busse) wurde

jedoch ein Worst Case angenommen und die tatsächliche Spannung ist durch den räumlichen Abstand der Busse voneinander höher. Es wird vorgeschlagen eine zweite Querkupplung zwischen Unterwerk C und D in der Ausführungsplanung zu verwenden. Abbildung 77 bis Abbildung 81 zeigt die Situation an die Abgänge der Unterwerke A bis E im AC Netz. Es sind keine Spannungsband- oder Stromgrenzenverletzungen zu beobachten.

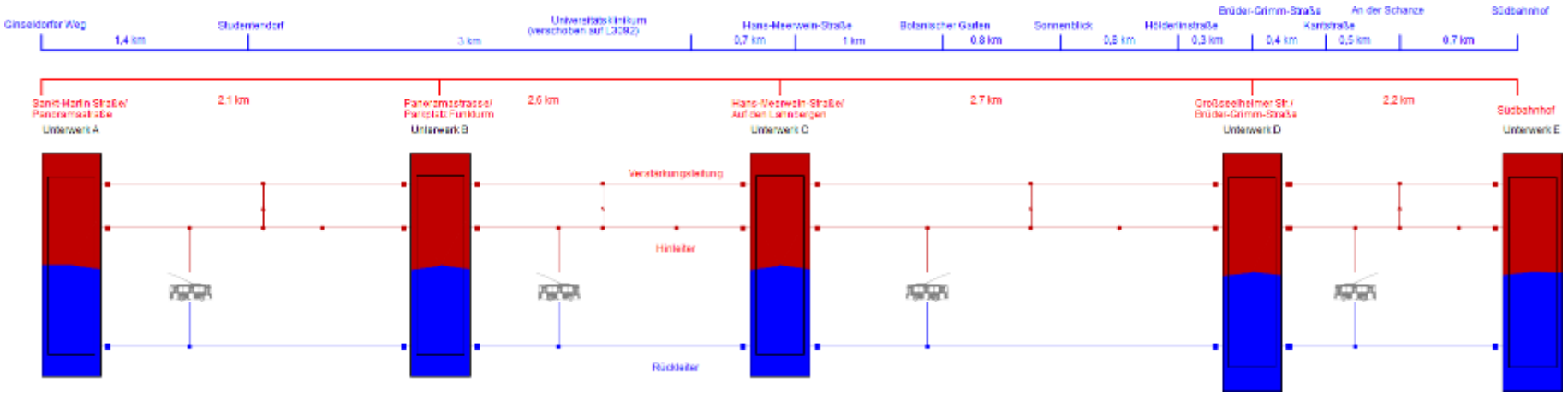


Abbildung 75: Positionierung der Unterwerke

Unterwerk	Speiseort im 20 kV Netz
A	Zwischen den Ortsnetzstationen „A.- Kasseler Str.“ und „Neumarkt Nord“, 79 m Abstand von der Ortsnetzstationen „A.- Kasseler Str.“.
B	Direkt an der Sammelschiene „Lahnberge 2“ im Schalthaus Lahnberge
C	Ortsnetzstation Funkturm
D	Ortsnetzstationen Brüder Grimm-Straße
E	Auf halber Strecke zwischen den Ortsnetzstationen Frauenbergstraße und Fichtestraße

Tabelle 64: Speiseorte der Unterwerke im 20 kV Netz.

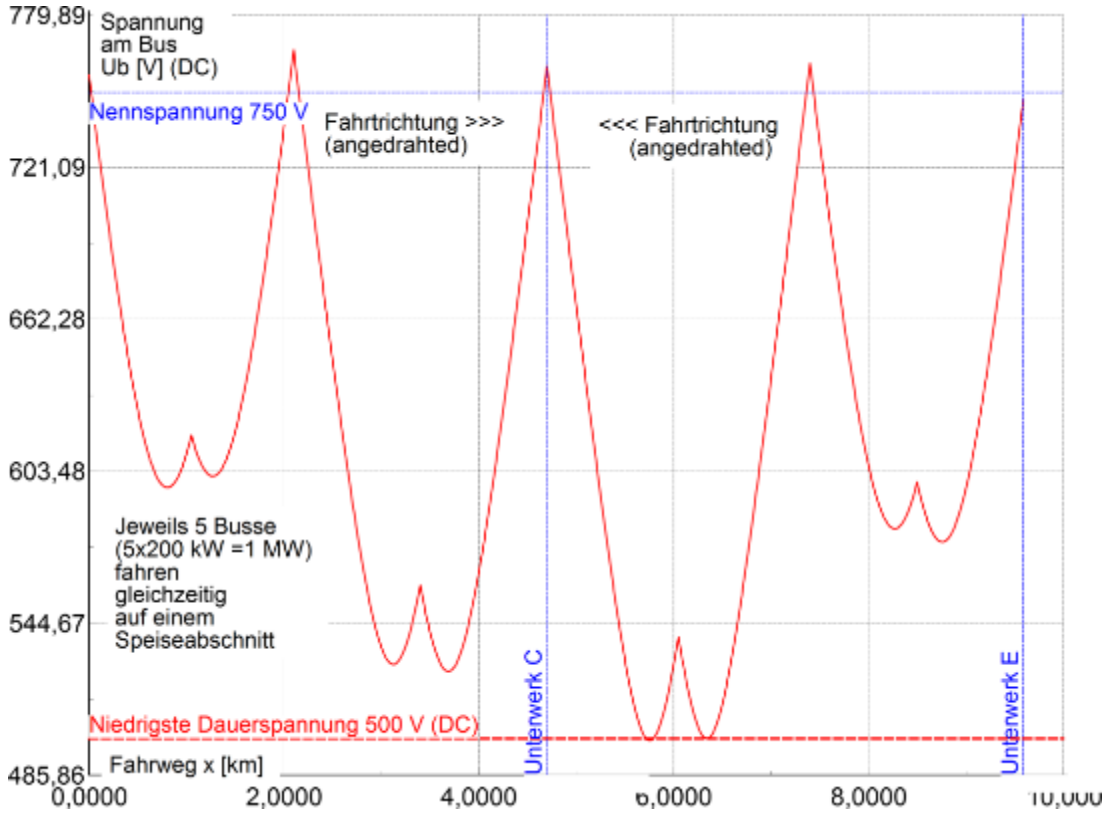


Abbildung 76: Spannung am Stromabnehmer

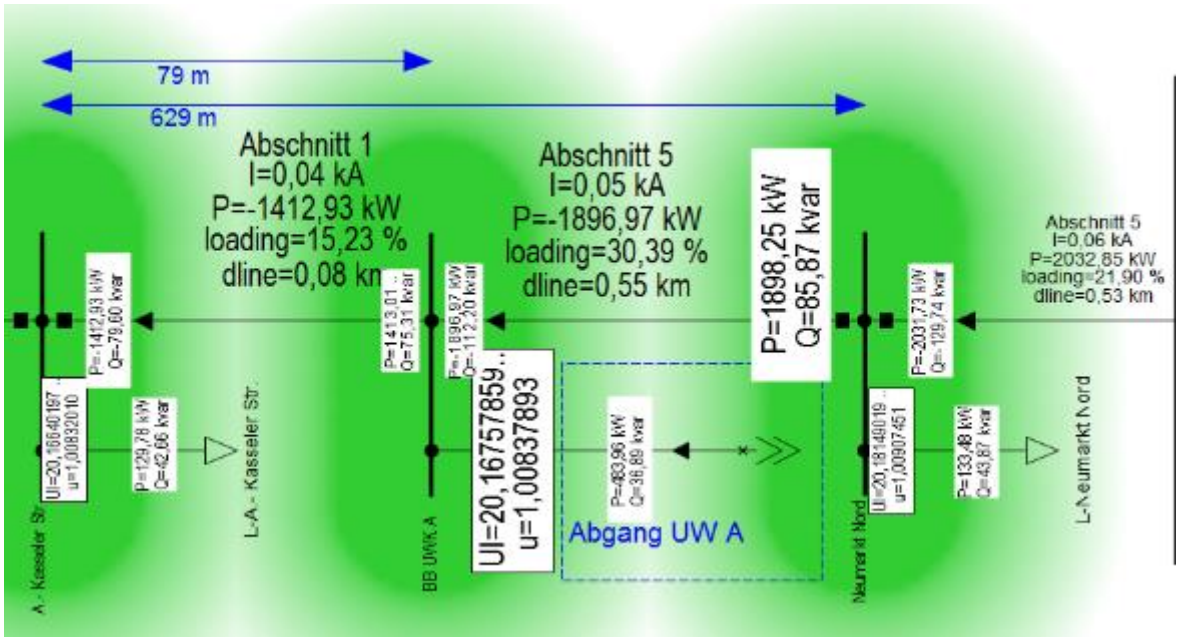


Abbildung 77: Situation am Abgang des Unterwerks A bei Versorgung von 5 Bussen (insg. 2 MW) durch die 5 Unterwerke

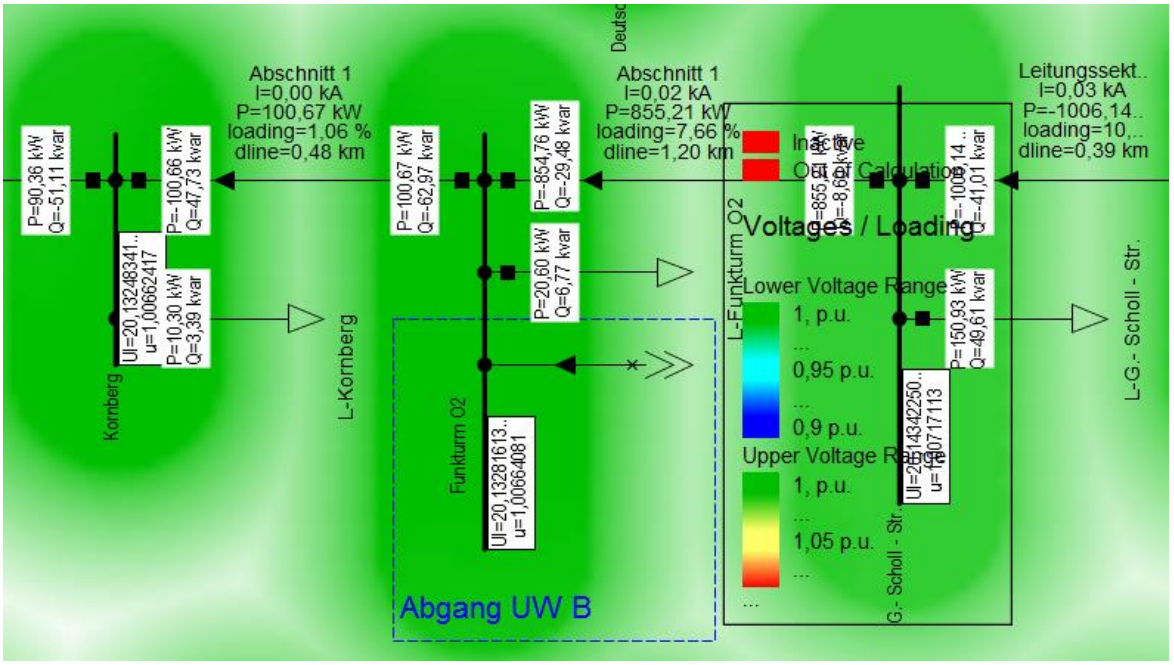


Abbildung 78: Situation am Abgang des Unterwerks B bei Versorgung von 5 Bussen (insg. 2 MW) durch die 5 Unterwerke

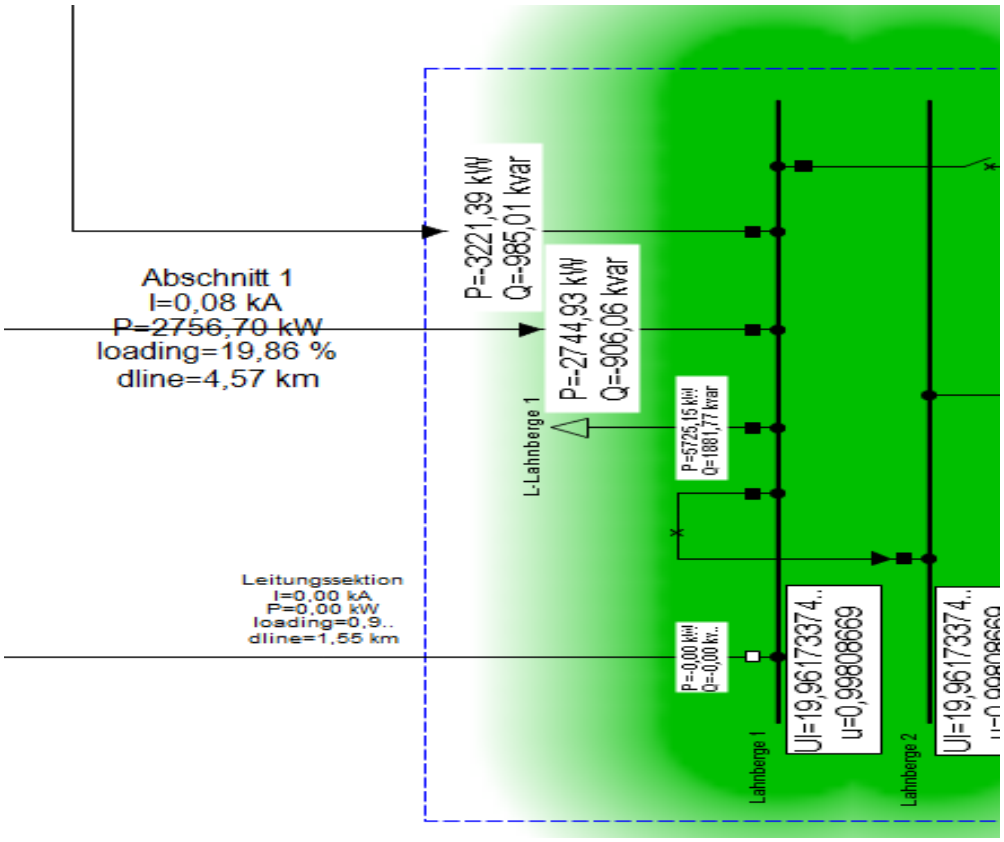


Abbildung 79: Situation am Abgang des Unterwerks C bei Versorgung von 5 Bussen (insg. 2 MW) durch die 5 Unterwerke

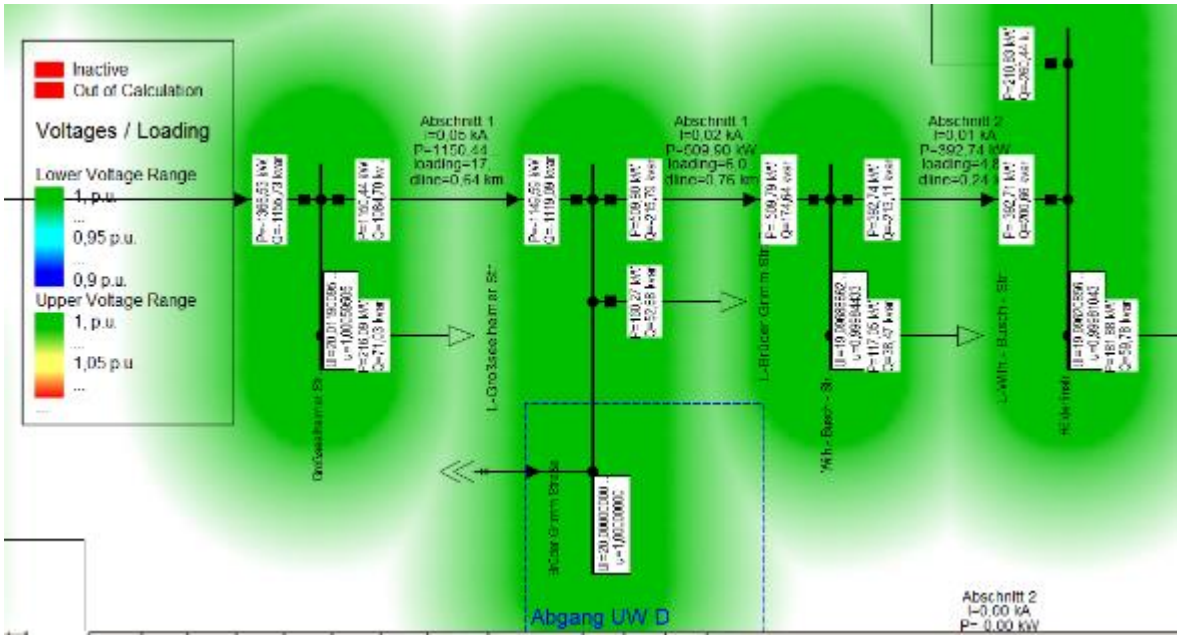


Abbildung 80: Situation am Abgang des Unterwerks D bei Versorgung von 5 Bussen (insg. 2 MW) durch die 5 Unterwerke

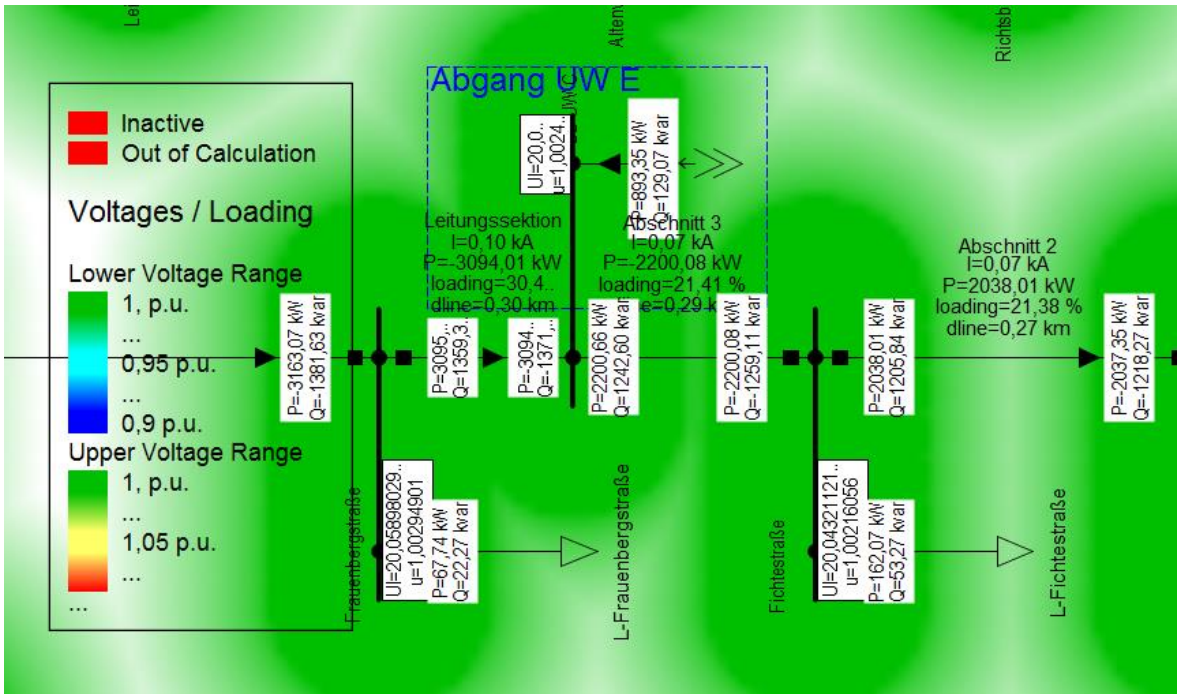


Abbildung 81: Situation am Abgang des Unterwerks E bei Versorgung von 5 Bussen (insg. 2 MW) durch die 5 Unterwerke

5.3.4 Akzeptanz

5.3.4.1 Theoretischer Hintergrund: Akzeptanzmodell

Der Bewertung des Kriteriums der Akzeptanz wurde das Akzeptanzmodell von Wüstenhagen et al. (2007) als theoretischer Hintergrund zugrunde gelegt. Dieses enthält drei Dimensionen der sozialen Akzeptanz. Bei der sozialen Akzeptanz geht es um die Unterstützung durch die Öffentlichkeit, politischen EntscheidungsträgerInnen und VertreterInnen von Regulierungsbehörden, d.h. wichtigen Stakeholdern auf unterschiedlichen Ebenen (Wüstenhagen et al. 2007). Soziale Akzeptanz hat drei Elemente, die in der folgenden Abbildung 82 dargestellt sind.

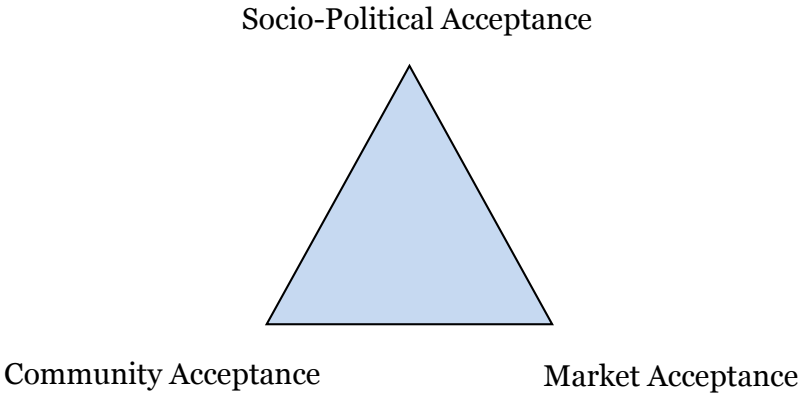


Abbildung 82: Akzeptanzmodell (eigene Darstellung nach Wüstenhagen et al. 2007)

Die lokale bzw. Vor-Ort Akzeptanz bezeichnet die Akzeptanz von Projekten mit erneuerbaren Energien auf einem lokalen Level, d.h. in Bezug auf Standortentscheidungen. Insofern sind Wahrnehmungen und Reaktionen von lokalen Stakeholdern, Behörden oder AnwohnerInnen von Interesse. Sozio-politische Akzeptanz ist die Akzeptanz einer Technologie durch die breite Öffentlichkeit, d.h. das gesellschaftliche Klima. Weitere relevante Akteure sind in diesem Zusammenhang Entscheidungsträger aus Politik, Verwaltung und Wirtschaft. Die sozio-politische Akzeptanz bildet damit den Rahmen für die lokale und Marktakzeptanz. Marktakzeptanz bezeichnet die Unterstützung durch Investoren/Betreiber, aber auch durch KonsumentInnen bzw. (potent.) KäuferInnen oder NutzerInnen der Technologie (Wüstenhagen et al. 2007). Ein Indikator für die Marktakzeptanz kann die Diffusion einer Technologie sein.

5.3.4.2 Akzeptanzbewertung

Im Folgenden werden die drei Elemente sozialer Akzeptanz auf die Technologie der Hybrid-Oberleitungs-Busse übertragen und im Anschluss die Kategorie der Akzeptanz bewertet.

Relevante Akteure für die *lokale Akzeptanz* sind in erster Linie die AnwohnerInnen, die vom Infrastrukturausbau in der Kommune, d.h. den Oberleitungen, betroffen sind. Zu erwartende akzeptanzrelevante Effekte bzw. Argumente, die von Seiten der Akteure an die Projektentwickler herangetragen werden könnten, sind

- befürchtete Risiken für Natur und Mensch (höheres Unfallrisiko durch verminderte Lärmemissionen, Stromschläge, Zugänglichkeit Feuerwehr an angrenzende Häuser),
- mögliche wirtschaftliche Vor- und Nachteile (sinkende Immobilienpreise),
- optische Beeinträchtigung durch Infrastruktur, v.a. in historischen Ortskernen.

Für die lokale Akzeptanz ist es wichtig, dass über die Vorteile des HO-Busses informiert wird. Für die Anwohner können die gegenüber dem Dieselbus geringe Schadstoff- und Lärmemissionen positiv sein. Für die Allgemeinheit ist darüber hinaus die Reduzierung der Treibhausgase ein Vorteil des HO-Busses gegenüber dem Dieselbus.

Bei der *Marktakzeptanz* interessiert die Sichtweise der potentiellen NutzerInnen der HO-Busse, d.h. NutzerInnen des öffentlichen Nahverkehrs in der Kommune. Die BetreiberInnen sind an dieser Stelle nicht relevant, da ihre Sichtweise im Rahmen der betrieblichen Bewertung analysiert wird. Für die Gruppe der potentiellen NutzerInnen sind insbesondere folgende akzeptanzrelevante Effekte zu erwarten:

- verminderte Geruchs- und Geräuschbelastung außen und im Innenraum, Feinstaub,
- sichtbare, klare Linienführung (vgl. „Schienenbonus“).

Für die *sozio-politische Akzeptanz* sind insbesondere Genehmigungsbehörden, d.h. die Bauaufsichtsbehörde, relevant. Für diese Gruppe ist vor allem interessant, wie stark der Infrastrukturausbau erfolgt.

Für die Bewertung der Varianten in Abhängigkeit von Reichweite und Oberleitungsausbau gilt:

- Bei der Vor-Ort-Akzeptanz: Je größer die Reichweite desto weniger Oberleitung desto besser. Ein Mindestmaß an Oberleitung ist aber immer da und die Situation ist nie so gut wie ohne Oberleitung.
- Bei der Markt-Akzeptanz: Je größer die Reichweite desto weniger Oberleitung wird benötigt desto schlechter für die Sichtbarkeit der Oberleitung; Für das grüne Image/Marketing reicht ein Mindestmaß an Oberleitung.
- Für die Sozio-Politische Akzeptanz: Je größer die Reichweite desto weniger Oberleitung wird benötigt desto besser ist für die Akzeptanz da weniger Probleme mit Genehmigungen und weniger Andrahten erwartet werden können.

Auf Basis dieser Überlegungen ergeben sich die Bewertungen hinsichtlich der verschiedenen Kriterien. Tabelle 65 fasst diese Akzeptanzbewertung zusammen. Diese ist für alle Busgrößen gleich und wird daher nur einmal gezeigt:

Reichweite	Vor-Ort-Akzeptanz	Markt-Akzeptanz	Sozio-politische Akzeptanz	Gesamt
klein	2	4	2	2,7
mittel	2,7	3,3	2,7	2,9
groß	3,3	2,7	3,3	3,1
max	4	2	4	3,3

Tabelle 65: Akzeptanzbewertung

Bei den Busgrößen wurden keine Differenzierungen vorgenommen. Lediglich die HO-Variante und damit der Umfang der zu errichtenden Infrastruktur, spielt hier eine Rolle. Die Vor-Ort-Akzeptanz, d.h. die Akzeptanz der AnwohnerInnen ist bei kleinen und mittleren elektrischen Reichweiten geringer (d.h. es werden weniger Punkte vergeben) als bei großen Reichweiten. Dies kommt dadurch zustande, dass bei kleineren Reichweiten ein stärkerer Infrastrukturausbau erforderlich ist, welcher eine stärkere Opposition der AnwohnerInnen hervorrufen kann. Bei der Marktakzeptanz fallen die Bewertungen für die unterschiedlichen HO-Varianten ähnlich aus; bei der Variante "groß" wird die Marktakzeptanz mit 3,5 Punkten jedoch etwas positiver beurteilt. Die sozio-politische Akzeptanz wird bei geringen positiver als bei größeren Reichweiten bewertet.

5.3.4.3 Gestaltungsoptionen

Eine Literaturrecherche ergab, dass es zur städtebaulichen Integration von O-Bus- und HO-Busverkehr bisher keine Studien gibt. Grundsätzlich ist die Wahrnehmung von O-Bus- und Straßenbahnoberleitungen ähnlich und Oberleitungssyteme bei Straßenbahnen sind in zahlreichen Städten vorhanden und akzeptiert.

Kritisch können aus gestalterischer Sicht die komplexen Oberleitungsanlagen im Bereich von Kreuzungen gesehen werden, die bei den klassischen O-Bus-Systemen erforderlich sind. Beim HO-Bus besteht die Möglichkeit, auf solch komplexe Oberleitungsanlagen zu verzichten, wenn in diesen Bereichen mit Batterie gefahren wird (vgl. Abbildung 83 für ein Negativbeispiel). Darüber hinaus kann bei HO-Bus-Systemen grundsätzlich auf Oberleitungen in städtebaulich besonders sensiblen Bereichen verzichtet werden.

Abbildung 83: Oberleitungen in Salzburg

5.3.5 Betriebliche Bewertung

Für die Flexibilität im Einsatz werden die Ausgestaltungoptionen hinsichtlich ihrer Anpassungsfähigkeit bewertet, z.B. ob zukünftige Streckenführungsänderungen ohne Weiteres durchgeführt werden können. Sind Wechsel zwischen Strecken möglich oder kann die Streckenführung geändert werden? Hier stellt Reichweite einen Puffer dar und mit steigender Reichweite steigt die Flexibilität. Weitere Kriterien, die in der betrieblichen Bewertung eine Rolle spielen, wie die Wartungskosten oder Betriebskosten sind bereits in der techno-ökonomischen Bewertung integriert und werden dort vorgestellt.

Für die betriebliche Bewertung ist daher die Reichweite maßgeblich. Busse mit größerer Reichweite würden schlicht höhere Punktzahlen erhalten. Daher wären die Komponenten der betrieblichen Bewertung, die nicht bereits in die anderen Aspekte integriert sind, nur ein anderes Maß für Reichweite. Aus diesem Grund wird die betriebliche Bewertung nicht weiter betrachtet und die Bewertung entgegen der ursprünglichen Konzeption nur auf die anderen vier Kategorien angewandt. Die Gewichte werden entsprechend angepasst.

5.4 Gesamtbewertung und Fazit

Die Bewertungsergebnisse in den einzelnen Attributen werden jetzt mittels der Nutzwertanalyse und den festgelegten Gewichten zu einer Gesamtbewertung zusammengeführt. Diese ist in Tabelle 66 aufgezeigt und in Abbildung 84 und Abbildung 85 dargestellt.

				Gesamtpunkte pro Gruppe				Techno-ökonomischen Bewertung	Ökologie	Akzeptanz			
Busgröße	**HO-Variante**	**Gesamtpunkte**	**Platz**	**Techno-ökon.**	**Ökologie**	**Akzeptanz**	Flexibiltät	Gesamt (normiert auf €/Platz-km)	Gesamt (normiert auf CO_2/Platz-km)	Vor Ort	Markt	Sozio-politische	Gesamt
Solo-Bus	klein	**3,0**	**3**	2,4	5,0	3,0	1,0	*2,4*	*5,0*	2,0	3,0	4,0	*3,0*
	mittel	**3,0**	**2**	2,4	4,7	2,8	1,7	*2,4*	*4,7*	2,0	3,0	3,5	*2,8*
	groß	**3,1**	**1**	2,3	4,4	3,2	2,3	*2,3*	*4,4*	3,0	3,5	3,0	*3,2*
	max	**2,9**	**4**	1,7	3,7	3,2	3,0	*1,7*	*3,7*	4,0	3,0	2,5	*3,2*
Gelenk-bus	klein	**3,2**	**3**	3,5	4,9	3,0	1,0	*3,5*	*4,9*	2,0	3,0	4,0	*3,0*
	mittel	**3,3**	**2**	3,4	4,6	2,8	1,7	*3,4*	*4,6*	2,0	3,0	3,5	*2,8*
	groß	**3,4**	**1**	3,3	4,3	3,2	2,3	*3,3*	*4,3*	3,0	3,5	3,0	*3,2*
	max	**3,0**	**4**	2,3	3,4	3,2	3,0	*2,3*	*3,4*	4,0	3,0	2,5	*3,2*
Doppelgelenk-bus	klein	**3,5**	**1**	4,3	5,0	3,0	1,0	*4,3*	*5,0*	2,0	3,0	4,0	*3,0*
	mittel	**3,4**	**2**	3,9	4,5	2,8	1,7	*3,9*	*4,5*	2,0	3,0	3,5	*2,8*
	groß	**3,0**	**3**	2,9	3,4	3,2	2,3	*2,9*	*3,4*	3,0	3,5	3,0	*3,2*
	max	**2,0**	**4**	1,0	1,5	3,2	3,0	*1,0*	*1,5*	4,0	3,0	2,5	*3,2*

Tabelle 66: Ergebnis der Bewertung

In den Abbildungen zur Gesamtbewertung ist jeweils die beste Option innerhalb eine Bus-Größe markiert. Man erkennt, dass Reichweiten die Flexibilität erhöhen, aber zu hohen Kosten und zu Lasten der Ökobilanz. Dies gilt sowohl bei den Gewichten der Stadtwerke als auch der Forscher.

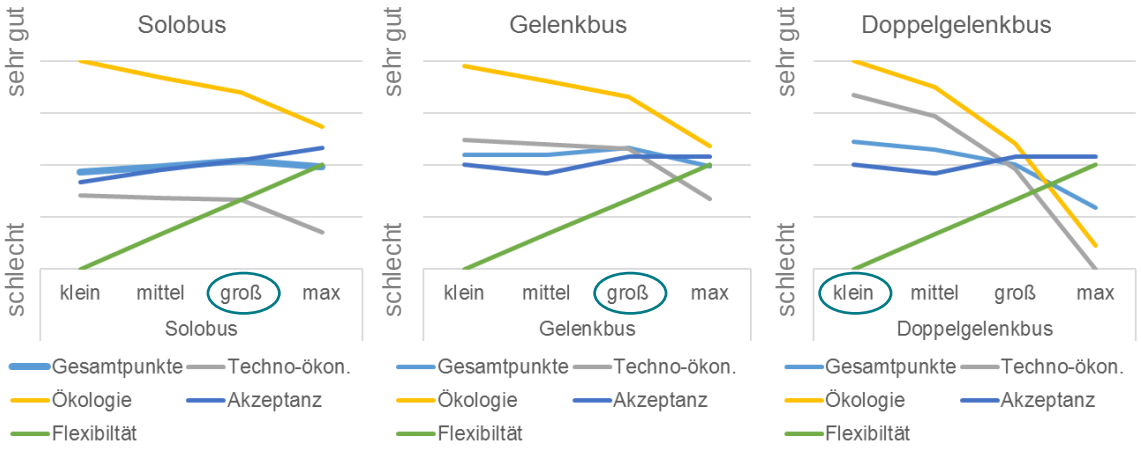


Abbildung 84: Gesamtbewertung der Optionen nach Gewichtung der Stadtwerke

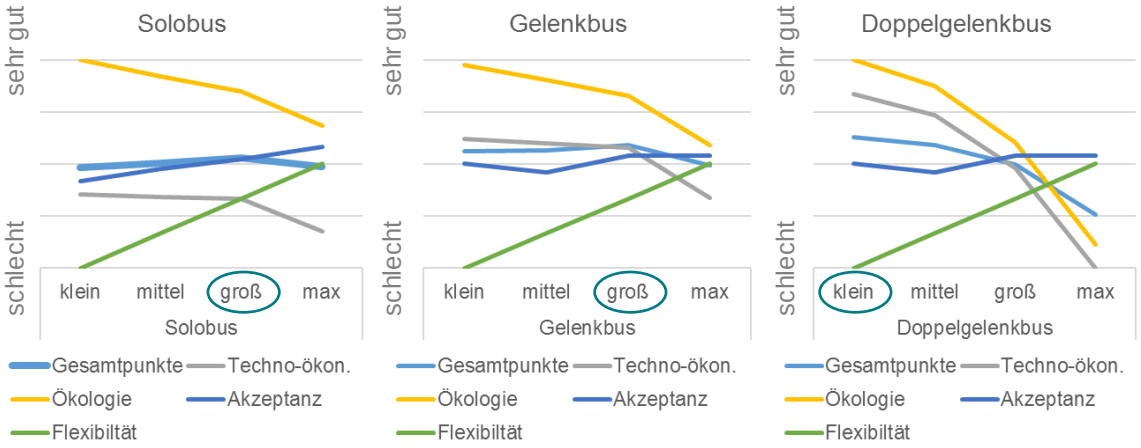


Abbildung 85: Gesamtbewertung der Optionen nach Gewichtung der Forscher

Je nach Busgröße liegt der beste Kompromiss im mittleren Bereich (Solo und Gelenkbus) oder bei eher kleinen Batterien (Doppelgelenkbus). Der Grund für diese Verschiebung zwischen den Busgrößen ist, dass die Batteriegrößen und damit die Kosten für Reichweite und Umweltauswirkungen überproportional mit der Bus-Größe steigen. Bei großen Bussen erhöht eine größere Batterie das Fahrzeuggewicht erheblich, sodass mehr Fahrenergie verbraucht wird und die Batterie für vorgegebene Reichweite noch größer sein muss.

Als Fazit lassen sich folgende Punkte für die beste HO-Bus-Variante festhalten:

- Die Bewertung soll keine Entscheidung treffen, sondern eine Entscheidung nur unterstützen durch systematische Analyse der Kriterien

- Mit der Reichweite steigen Flexibilität aber auch Kosten und Umweltbelastung aufgrund der Batterieproduktion
- Der beste Kompromiss hängt von der Bus-Größe ab, da die Kosten bei großen Bussen schneller steigen als bei kleinen
- In Summe scheint ein Kompromiss zwischen Kosten und Reichweite am besten, der bei Solo- und Gelenkbussen eher in Richtung 50 – 75 km Reichweite geht und bei Doppelgelenkbussen eher für kleine Reichweite von ca. 20 km spricht

Für weitere Untersuchungen und den Betrieb in Städten sollte aber berücksichtigt werden, dass reine Batteriebusse oder Wasserstoff-Busse prinzipiell auch eine Option darstellen, die hier nicht untersucht wurde. Gerade bei Solo-Bussen könnten Batteriebusse interessant sein, insbesondere mit Zwischenladung an einer Wendestelle, und diese sind teilweise auch schon kommerziell im Einsatz (bspw. in Göteborg, Schweden). Für die Dekarbonisierung längerer Strecken und großer Busse sind höher Energiedichten im Energiespeicher wie bspw. bei Wasserstoff nötig. Erste Wasserstoff-Busse sind auch in der Bundesrepublik bereits im Einsatz.

6 Übertragung auf Deutschland

6.1 Vorgehensweise

Für die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf ganz Deutschland werden auf Basis statistischer Daten Stadtbusverkehre identifiziert, die grundsätzlich für den Aufbau eines HO-Bus-Netzes geeignet erscheinen.

Anhand der Pilotstädte Marburg und Trier (in diesem Berichtsteil nur für Marburg dargestellt) wird exemplarisch abgeleitet, welcher Anteil der Betriebsleistung einer Stadt potenziell für einen HO-Bus-Betrieb geeignet ist.

Die Erkenntnisse aus den Pilotstädten und die statistischen Analysen zu den grundsätzlich in Deutschland für den HO-Bus-Betrieb geeigneten Stadtverkehren werden zusammengeführt.

6.2 Ableitung eines HO-Bus-Netzes für die Stadt Marburg

6.2.1 Vorgehensweise

Für die Stadt Marburg wurde die Machbarkeit einer Einführung eines HO-Bussystems anhand von Pilotlinien detailliert nachgewiesen. Ausgehend von den untersuchten Pilotlinien wurde abgeleitet, welche weiteren Linien perspektivisch für den Ausbau eines HO-Bus-Netzes geeignet sind.

Grundlage der Ableitung des Ausbaupotenzials war eine Analyse der städtischen Busnetze. Hierzu wurden für jede bestehende Buslinie folgende Daten analysiert:

- Fahrzeugtyp (Gelenkbus, Solo-Bus, Midi- oder Minibus),
- Linienweg,
- Anzahl Fahrten und typischer Takt der Linie,
- Serviceleistung (km/d) und Servicezeit (h/d),
- durchschnittliche Geschwindigkeit (km/h),
- Topografie,
- Fahrgastzahlen (Linienbeförderungsfälle/d),
- Abschnitte, die von mehreren Linien genutzt werden.

Hinsichtlich Fahrgastaufkommen und Topografie stellen die Linien zu den Universitätsstandorten, die jeweils außerhalb der Innenstädte auf Anhöhen gelegenen sind, eine große Herausforderung für den Busbetrieb dar. Als Analysezeitraum wurde deshalb ein Werktag in der Vorlesungszeit gewählt.

Als Grundlage für die Analyse wurden Verkehrsmodelle (PTV VISUM) aufgebaut oder aktualisiert. Die Verkehrsmodelle beinhalten Fahrplan-, Linienverlaufs- und Höhendaten. Mit dem Modell wurden für jede Linie die Serviceleistung, Servicezeit und die durch-

schnittliche Geschwindigkeit ermittelt. Zusätzlich lassen sich Höhenprofile der Linien darstellen.

Es wurden Nachfragedaten aus verbundweiten Fahrgasterhebungen von den Verkehrsunternehmen für die Untersuchung freigegeben und zur Verfügung gestellt. Durch Umlegung der Nachfragedaten auf das ÖV-Angebot in den Verkehrsmodellen konnte die Anzahl der Fahrgäste je Linie (Linienbeförderungsfälle) im Analysezeitraum ermittelt werden.

Die Ableitung des Ausbaupotenzials erfolgte in zwei Stufen:

- Stufe 1: Pilotlinie(n),
- Stufe 2: weitere Ausbauoptionen,

Zur Auswahl geeigneter Linien wurden folgende Kriterien herangezogen:

- heutiger Fahrzeugtyp (möglichst Gelenkbus, kein Midi- oder Minibus)
- Fahrtenhäufigkeit (möglichst 10- bis 20-Minuten-Takt und mindestens 30-min-Takt, wenn bereits ein großer Streckenanteil in vorangegangener Stufe elektrifiziert wurde)

Die Linie(n) aus Stufe 1 entsprechen den Pilotlinie(n), für die die technische Machbarkeit detailliert nachgewiesen wurde. Die in Stufe 2 gewählten Linien erscheinen besonders geeignet, das HO-Bus-Netz zu erweitern. Für die beiden Stufen wurden jeweils Einsparungen an CO_{2eq} und NO_X ermittelt.

Aufgrund der Bearbeitungstiefe im Rahmen dieser Studie dürfen die abgeleiteten HO-Bus-Netze nicht als Empfehlung für die Umsetzung verstanden werden. Für eine Umsetzung eines HO-Bus-Netzes in einer Stadt ist eine vertiefte Planung erforderlich, die in einem iterativen Prozess den Infrastrukturausbau und den Fahrzeugeinsatz optimiert. Dabei sollten unter Berücksichtigung der Nachfragepotenziale auch Anpassungen am Liniennetz und am Fahrplan in die Optimierung einbezogen werden. Nur so kann ein optimiertes HO-Bus-Netz entstehen. Die für die Stadt Marburg abgeleiteten HO-Bus-Netze stellen in diesem Sinne eine mögliche Ausbauperspektive dar. Zusätzlich sollte auch der Einsatz sonstiger Elektrobusse (Gelegenheitslader, Übernachtlader) geprüft werden.

Die aus der Untersuchung am Beispiel Marburg (und Trier) gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage zur Abschätzung der Wirkungen für eine Übertragung auf ganz Deutschland.

6.2.2 Potenzialbetrachtung Marburg

In der Potenzialbetrachtung für Marburg wurden folgende Linien analysiert:

Linie	Fahrzeugtyp	Takt [min]	Tsd. Service-km/d	Anmerkung
1	Gelenkbus	30	1,1	Linie 1und 4 auf langem Abschnitt gleicher Linienweg und ca. 15% in Stufe 1 elektrifiziert
2	Gelenkbus	30	1,5	Pilotlinie
3	Solobus	30	0,5	Solobus, nur geringe Überlagerung mit HO-Bus aus Stufe 1 und 2
4	Gelenkbus	30	1,1	Linie 1und 4 auf langem Abschnitt gleicher Linienweg und ca. 15% in Stufe 1 elektrifiziert
5	Solobus	30	0,9	Solobus, Überlagerung mit HO-Bus aus Stufe 1 im Abschnitt Wilhelmsplatz - Garten des Gedenkens
6	Gelenkbus	30	0,7	Gelenkbus, aber in Stufe 1 nicht elektrifiziert und nur im 30-min-Takt
7	Gelenkbus	15	1,0	Pilotlinie
8	Solobus	30	0,6	Solobus, nur geringe Überlagerung mit HO-Bus aus Stufe 1 und 2
9	Solobus	15	0,6	Solobus, enger Straßenraum
10	Kleinbus		0,1	
11	Solobus	60	0,5	Solobus, nur 60-min-Takt, nur geringe Überlagerung mit HO-Bus aus Stufe 1 und 2
12	Solobus	60	0,3	Solobus, nur 60-min-Takt, Überlagerung mit HO-Bus aus Stufe 1 und 2
13	Solobus	120	0,3	
14	Solobus	z.T. 30	0,5	Solobus, nur geringe Überlagerung mit HO-Bus aus Stufe 1 und 2
15	Gelenkbus	einzelne Fahrten	0,2	
16	Kleinbus		0,3	
17	Solobus	60	0,3	Solobus, nur 60-min-Takt, nur geringe Überlagerung mit HO-Bus aus Stufe 1 und 2
18	Gelenkbus	einzelne Fahrten	0,1	
19	Gelenkbus	einzelne Fahrten	0,1	
20	Kleinbus		0,2	
E2	Gelenkbus	einzelne Fahrten	0,1	
Summe			11,0	

Legende

- Auschlusskriterien: Midi-/Kleinbus oder weniger als 60-Minuten-Takt
- 1. Stufe: Pilotlinien
- 2. Stufe: weitere Ausbauoptionen
- für HO-Bus-Betrieb nicht zu empfehlen

Tabelle 67: Linien Marburg (vergleiche auch Liniennetzplan Stadtbusverkehr Marburg)

In der Tabelle 67 sind die betrachteten Linien mit dem typischen Takt und der Betriebsleistung (Service-km/Tag) aufgelistet. Die Linien sind hinsichtlich der Eignung für den HO-Bus-Betrieb farblich klassifiziert. In der Spalte „Anmerkung“ ist die Einstufung jeweils kurz begründet.

Die Einstufungen der Linien in Tabelle 68 bezieht sich auf den Einsatz als HO-Bus. Die Auswertungen zu den Pilotlinien haben gezeigt, dass auf diesen Linien auch eine Bedienung mit Gelegenheitsladern möglich ist. Der Einsatz von Depot-Ladern ist auf den Pilotlinien rein elektrisch nicht möglich. In welchem Umfang der Einsatz von Gelegenheitsladern und Depot-Ladern auf den weiteren Linien möglich ist, wurde nicht detailliert untersucht. Detailauswertungen zu den Höhenunterschieden im Busnetz zeigen aber, dass in

Marburg fast alle Linien Abschnitte mit starken Steigungen bedienen. Ein Vorteil des HO-Busses ist die Bedienung topografischer anspruchsvoller Strecken.

Mit den Pilotlinien 7 und 2 werden mit HO-Bussen 22 % der Betriebsleistung (Service-km) erbracht, 26 % der Fahrgäste (Linienbeförderungsfälle) nutzen den HO-Bus. Kommen in einer zweiten Ausbaustufe die Linien 1, 4, 5 und 6 hinzu, wird 57 % der Betriebsleistung mit dem HO-Bus erbracht und er wird von 66 % der Fahrgäste genutzt.

Wenn im gesamten HO-Bus-Netz wie bei den Pilotlinien Fahrzeuge vom Typ „HO-Klein“ eingesetzt werden, ergeben sich gegenüber dem Dieselbetrieb folgende Einsparungen beim CO_{2eq} und beim NO_X. Die Berechnungen basieren auf den durchschnittlichen Emissionsraten je Bus-km. Grundsätzlich ist zu berücksichtigen, dass sich die durchschnittlichen Emissionsraten und Energieverbräuche auf durchschnittlich topografisch bewegte Stadtverkehre bezieht. Da Marburg überdurchschnittlich topografisch bewegt ist, sind die Wirkungen in den folgenden Auswertungen tendenziell unterschätzt.

Stufen	Linien	Bustyp (heute)	Tsd. Service-km/ Werktag	kumuliert		
				Tsd. Service-km/ Werktag	Anteil Service-km	Anteil Fahrgäste (Linienbeförderungsfälle)
Stufe 1 (Pilotlinien)	Linie 7+2	Gelenkbus	2,5	2,5	22%	26%
Stufe 2 (weiterer Ausbau)	Linie 1+4	Gelenkbus	2,2	4,6	42%	49%
	Linie 5	Solobus	0,9	5,6	51%	55%
	Linie 6	Gelenkbus	0,7	6,2	57%	66%

Tabelle 68: Linien HO-Bus-Netz Marburg

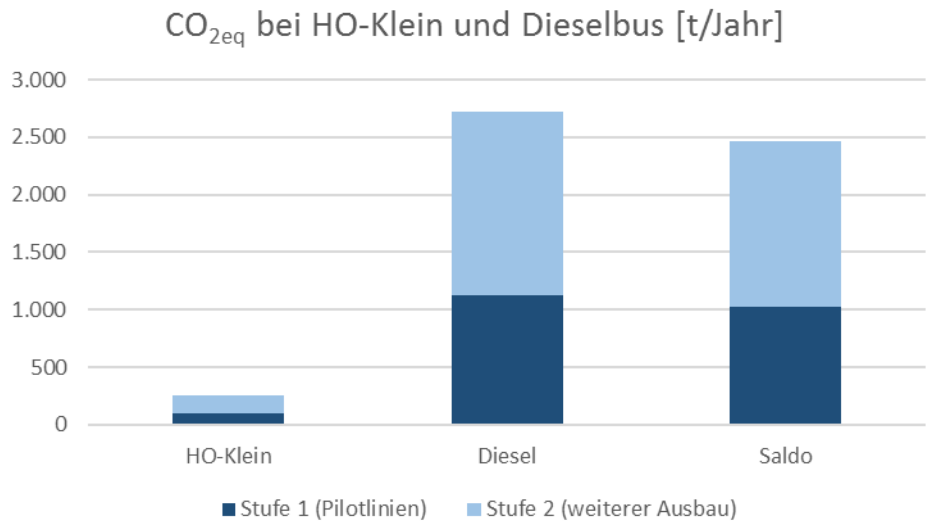


Abbildung 86: CO_2eq der Linien in Marburg mit Horizont 2030 (EE-Strom)

Gegenüber dem Dieselbetrieb können mit dem Aufbau eines HO-Bus-Netzes in Marburg jährlich fast 2.500 t CO_{2eq} eingespart werden.

Mit Bezugsjahr 2015 kann der NO_X-Ausstoß durch die Umstellung von Dieselbussen auf HO-Busse in erheblichem Umfang reduziert werden. Langfristig gesehen ist davon auszugehen, dass sich der Vorteil aufgrund des Einsatzes emissionsärmerer Dieselbusse deutliche reduzieren wird.

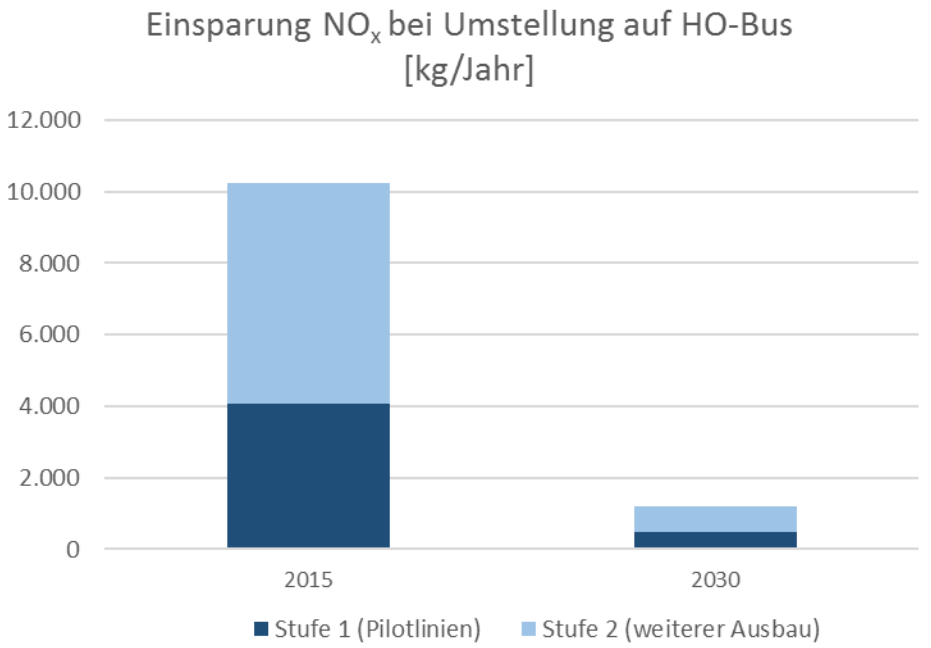


Abbildung 87: Einsparung NO_X in Marburg mit Bezugsjahr 2015 und Horizont 2030

6.3 Ergebnisse für Deutschland

6.3.1 Potenziale für HO-Bus-Verkehre in Deutschland

Die Übertragung der Ergebnisse auf Deutschland basiert auf statistischen Kenngrößen zur Identifikation potenziell geeigneter Unternehmen und Städte. Diese basieren überwiegend aus Daten des Verbandes Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) und des Statistischen Bundesamtes.

Aus der Statistik 2015 des VDV (VDV, 2016) wurden für 198 Unternehmen folgende Daten herangezogen:

- Betriebssitz, Unternehmen (alle, nur Bus),
- Einwohner im Stadt- und Einflussgebiet,
- Bestand Busse (gesamt inkl. angemieteten Bussen),
- Betriebsleistung in Fahrzeug-km.

Die Informationen wurden für die Städte (Betriebssitz der Unternehmen aus VDV Statistik) um folgenden Daten des Statistischen Bundesamtes mit Stand 31.12.2016 (Destatis, 2016) ergänzt:

- Einwohner in der Stadt (weichen teilweise von Statistik VDV ab),
- Grad der Verstädterung (dicht besiedelt, mittlere Besiedlungsdichte, gering besiedelt).

Zusätzlich wurden für die Städte Höhendaten ausgewertet. Basierend auf einem Höhenmodell wurden die mittleren Steigungen je Stadt ermittelt. Grundlage war ein digitales Geländemodell von Deutschland in 200m Auflösung sowie Verwaltungsgrenzen Maßstab 1:250.000 (Quelle: https://www.bkg.bund.de/).

Die techno-ökonomische Bewertung der Ausgestaltungsoptionen der HO-Bus-Typen zeigt, dass ein HO-Bus-Betrieb nur wirtschaftlich ist, wenn dichte Takte gefahren werden. Dies ist erfahrungsgemäß nur in dicht besiedelten Gebieten der Fall. Deshalb werden in der Potenzialabschätzung nur Unternehmen bzw. Städte berücksichtigt, auf die folgenden Kriterien zutreffen:

- Grad der Verstädterung: dicht besiedelt,
- Mindestanzahl Einwohner in der Stadt: 60.000,
- Mindestanzahl Busse: 60.

Die Potenzialabschätzung bezieht sich auf Stadtverkehre und nicht auf Regionalbusverkehre. Als Hilfsgröße zur Abschätzung der Betriebsleistung und der Fahrzeugzahl im Stadtverkehr werden für jedes Unternehmen der Anteil der Einwohner im Stadtgebiet am Anteil der Einwohner im Einflussgebiet aus der VDV-Statistik herangezogen. Mit dieser Vorgehensweise erfolgte eine untere Abschätzung des Potenzials, da davon auszugehen ist, dass das Verkehrsangebot im Stadtgebiet dichter als im Einflussgebiet ist.

Grundsätzlich werden reine Busbetriebe und Betriebe mit Straßenbahn und Bus berücksichtigt. Bei Unternehmen, die neben Bussen auch Straßenbahnen betreiben, können sich Synergien bei der Errichtung und beim Betrieb der Infrastruktur zur Stromversorgung ergeben.

Als Ergebnis wurden 75 Verkehrsunternehmen herausgefiltert (vgl. Tabelle 74 im Anhang, Kapitel 9.2), die potenziell für den HO-Bus-Betrieb geeignet sind. Darunter sind 32 reine Busbetriebe und 43 betreiben Busse und Bahnen. Bezogen auf den Stadtverkehr erbringen die 75 Unternehmen eine Betriebsleistung von jährlich 567 Mio. Bus-km und betreiben rund 11.000 Busse.

	Anzahl Unternehmen	Betriebsleistung in Mio. Bus-km/Jahr
alle Unternehmen mit Busbetrieb aus VDV-Statitstik	198	1.654
alle potenziell für HO-Bus-Betrieb geeignete Unternehmen	75	567
davon mit Steigung > 4%	21	89
davon mit Steigung > 6%	13	48

Tabelle 69: Anzahl Unternehmen und Betriebsleistung

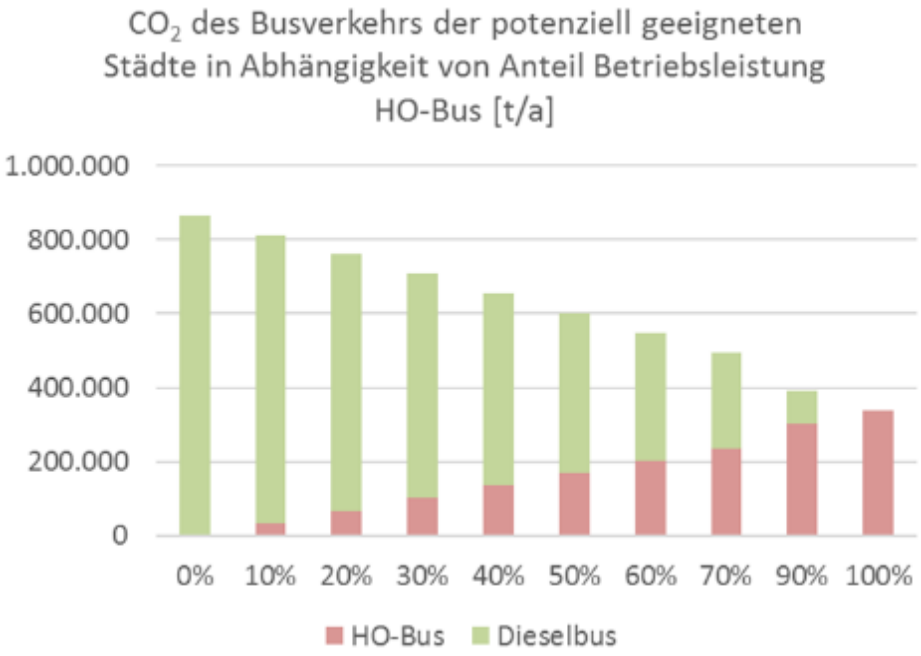
Die mittlere Steigung in den Städten der betrachteten Unternehmen liegt bei rund 2 % (gewichtet über die Betriebsleistung der Unternehmen im Stadtverkehr). Dies gilt für alle Unternehmen aus der VDV-Statistik und für die 75 potenziell für einen HO-Bus geeigneten.

Die Tabelle 69 zeigt, dass von den 75 Unternehmen nur 21 in überdurchschnittlich topografisch bewegten Städten mit einer mittleren Steigung > 4 % ihren Sitz haben. Eine mittlere Steigung über 6 % gibt es in nur 13 für den HO-Bus-Betrieb geeigneten Städte. Marburg weist mit 8,0% sogar noch deutlich höhere mittlere Steigungen auf.

Die Topografie ist kein Kriterium für die Potenzialabschätzung, da HO-Busse in topografisch bewegten Gebieten und in der Ebene eingesetzt werden können. Ein Fazit aus der Detailuntersuchung (Kapitel 3.3) ist aber, dass eine anspruchsvolle Topographie vor allem bei nachfragestarken Linien den Einsatz von HO-Bussen begünstigt.

6.3.2 CO_2-Einsparung aus HO-Bus-Betrieb in Deutschland

Auf Basis der Potenzialbetrachtung für HO-Bus-Verkehr in Deutschland, den Erkenntnissen aus den Detailbetrachtungen zu den Stadtverkehren in Marburg und Trier sowie den Ergebnissen aus der ökologischen Bewertung lassen sich Aussagen zu einer möglichen CO_2-Einsparung aus einem Ausbau des HO-Bus-Betriebs in Deutschland ableiten.



Grundlage: Betriebsleistung der potenziell geeigneten Unternehmen 567 Mio. Bus-km/Jahr; Referenzfahrzeug Gelenkbus HO-Klein wie bei Pilotlinien

Abbildung 88: Bandbreite CO_2eq des Busverkehrs aller potenziell für den HO-Bus-Betrieb geeigneten Unternehmen

Abbildung 88 zeigt exemplarisch auf Grundlage der Betriebsleistung der potenziell geeigneten Unternehmen (567 Mio. Bus-km/a) und des Referenzfahrzeuges Gelenkbus HO-Klein (analog zum Fahrzeugeinsatz auf den geplanten Pilotlinien in Marburg) die Auswirkungen einer Umstellung auf einen HO-Bus-Betrieb.

Die Ableitungen von HO-Bus-Netzen für die Stadt Marburg zeigen, dass eine Umstellung von 40 % bis 60 % bzw. maximal 70 % der Betriebsleistung realistisch ist. Überträgt man diese Anteile auf ganz Deutschland so ergibt sich daraus (bei 567 Mio. Bus-km/a und Gelenkbus HO-Klein) gegenüber dem Dieselbus ein CO_2-Einsparpotenzial von 210 bis maximal 370 Tsd. t/Jahr. Die Ableitung des CO_2-Einsparpotenzials des HO-Busses stellt eine stark vereinfachte Abschätzung dar. Im Detail gibt es zahlreiche Faktoren, die das CO_2-Einsparpotenzial beeinflussen, für die aber keine deutschlandweite Datenbasis vorliegt. Zu den wichtigen Einflussfaktoren zählen beispielsweise die eingesetzten Fahrzeugtypen und die erforderlichen Batteriegrößen. Darüber hinaus haben die Steigungsverhältnisse einen Einfluss auf den Energieverbrauch und damit auf das CO2-Einsparpotenzial.

Bei einer Umstellung der Linien auf einen sonstigen Elektrobusbetrieb mit Gelegenheitslader und Übernachtladern ist von etwas geringeren CO2-Einsparung auszugehen, da diese Fahrzeuge einen größeren Batteriebedarf aufweisen, die bei der Herstellung zu zusätzlichen Emissionen führen. Für den Gelenkbus resultieren beim Typ HO-Klein rund 25 % der Fahrzeugherstellungsemissionen aus der Batterie (bei 100 kWh). Werden größere Batterien benötigt, dann sind die Fahrzeugherstellungsemissionen höher (Beispiel: beim Übernachtlader bei einer Batterie von 390 kWh stammen rund 60% der Fahrzeugherstellungsemissionen aus der Batterie).

Darüber hinaus können sich größere Batterien auf Grund des zusätzlichen Gewichtes ungünstig auf die erlaubte Fahrgastzahl auswirken. Beim Einsatz von Übernachtladern ist es darüber hinaus möglich, dass aufgrund der Reichweite zusätzliche Fahrzeuge benötigt werden, deren Herstellung zu zusätzlichen Emissionen führt.

6.3.3 Vermeidungskostenansatz CO_{2eq}

Will man die im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie analysierten Maßnahmen miteinander vergleichen, so bietet sich der Kostensatz einer vermiedenen Tonne CO_2eq an.

Aus den Berechnungsergebnissen der techno-ökonomischen und ökologischen Bewertung lässt sich ein Vermeidungskostensatz von 852 €/t CO_2eq ableiten. Die Abschätzung des Vermeidungskostenansatzes (Horizont 2030) basiert auf folgende Grundlagen:

Kosten HO-Bus (Gelenkbus, HO-Klein)

- 4,10 €/Bus-km Betriebskosten inkl. Fahrzeugbeschaffung

- 0,47 €/Bus-km Infrastrukturkosten (bei 5-min-Takt und 60 % unter Oberleitung oder 10-min-Takt 30 % unter Oberleitung).

Kosten Vergleichsfahrzeug (Gelenkbus, Diesel)

- 3,78 €/Bus-km Betriebskosten inkl. Fahrzeugbeschaffung.

Der Vermeidungskostensatz kann je nach örtlichen Rahmenbedingungen stark variieren, insbesondere aufgrund des Fahrzeugeinsatzes, dem Ausbaugrad der Elektrifizierung und der Anzahl der Fahrten unter der Oberleitung.

7 Fazit

Aus den Ergebnissen bzgl. Machbarkeit von HO-Bussen in Deutschland ergibt sich folgendes Fazit:

- **HO-Busse sind machbar in deutschen Städten.** Für Marburg wurden Detailanalysen durchgeführt und Empfehlungen für konkrete Linien ausgesprochen. Die ausgewählten topographisch anspruchsvollen Linien sind mit minimalen Anpassungen technisch durch HO-Busse durchführbar.
- **Es eignen sich vor allem Strecken mit hohem Energiebedarf und hoher Auslastung.** Darüber hinaus zeigt die Analyse, dass linienreine Umläufe besonders gut geeignet sind. Für derartige Linien müssten 30 – 50 % der Fahrstrecke mit Oberleitung ausgestattet werden. Zwischenladen an Wendepunkten reduziert den Bedarf an Oberleitung.
- **Anspruchsvolle Stecken sind nur schwer mit anderen elektrischen Bussen zu bewältigen.** Linien mit hohem Fahrgastaufkommen und schwerer Topographie können technisch nur schwer mit reinen Batteriebussen gefahren werden. Beim Laden nur über Nacht oder Zwischenladen an Haltestellen ist ein rein elektrischer Betrieb nicht möglich, es ist eine Dieselzusatzheizung notwendig um sehr große Energiespeicher zu vermeiden. Letztere würden die Möglichkeit Passagiere zu befördern einschränken. Zudem sprechen die Betriebszuverlässigkeit und eine spätere Kapazitätsausweitung für den HO-Bus. Ein Umstieg auf größere Doppelgelenkfahrzeuge ist nach gegenwärtigem Stand der Technik nur mit einem HO-Bus-System realisierbar.
- Im **wirtschaftlichen Vergleich** weisen alle Elektrobusse einen nennenswerten Investitionsbedarf auf. Für einen ökonomischen Betrieb der Elektrobusse ist eine Förderung notwendig. Im Vergleich liegen die anfallenden Investitionen und die langfristigen Betriebskosten des Gelegenheitsladers unter denen des HO-Busses, was insbesondere auf die Errichtung des Oberleitungssystems zurückzuführen ist. Unter Einbezug der aktuellen Förderkulisse mit einem sehr hohen Kofinanzierungsanteil der Oberleitung kann der HO-Bus jedoch eine interessante Option sein. Hinzu kommt, dass zunächst nur die initiale Umstellung einer oder zwei Linien der städtischen Busnetze untersucht worden ist. Weitere wirtschaftliche Vorteile ergeben sich für den HO-Bus durch einen weiteren Ausbau des Systems auf weitere Linien. Die Infrastruktur einer ersten Ausbaustufe kann in weiteren Ausbaustufen mitgenutzt werden und senkt die Investitionen pro km um 25-30%. Ähnliches gilt nicht für den Gelegenheitslader, da mit jeder Linie zusätzliche Schnellladepunkte errichtet werden müssen.
- **Die Übertragung auf Deutschland zeigt sinnvolle Optionen und Entwicklungsbedarf.** Da nur stark ausgelastete Strecken ökonomisch sinnvoll sind und der Fuhrpark eine Mindestgröße haben sollte, eignen sich HO-Busse nicht für alle Linien und Städte Deutschlands. Je nach Auslegung der Busse und Ihrer Batteriegrößen müssen bis zu 50% der Strecke mit Oberleitung ausgestattet sein. In Marburg reicht allerdings die Elektrifizierung von nur vier Linien aus, um ca. 45 % des Passagieraufkommens zu elektrifizieren. Damit würden gleichzeitig ca. 25% CO_2-Emissionen eingespart. Ein weiterer Ausbau auf vier zusätzliche Linien sorgt für eine Elektrifizierung von zwei Drittel in Marburg.

- **Weitere technische Entwicklungen können HO-Busse attraktiver machen.** Heizung und Klimatisierung sind starke Nebenverbraucher, eine erhebliche Senkung des Verbrauchs durch evtl. neue Konzepte könnte HO-Busse attraktiver machen. Einfache Lademöglichkeiten an Wendepunkten stellen eine interessante Ergänzung zur Oberleitung dar. Automatisches An- und Abdrahten ist noch in der Entwicklung.
- **Mittlere Batteriegrößen sind ein sinnvoller Kompromiss zwischen Reichweite und Anschaffungskosten**. Mit der Batteriegröße in HO-Bussen steigt die Reichweite und Autonomie der Busse und es wird weniger Infrastruktur benötigt. Allerdings brauchen gerade große Busse sehr große Batterien, die erhebliche Mehrkosten in der Anschaffung bedeuten und auch den Platz für Passagiere reduzieren können.

8 Quellen

ABB (2010), “Die Bahnstromversorgung: ABB Bahn-Gleichrichter ABB Bahn-Gleichrichter Diodengleichrichter für Gleichstrom-Unterwerke,” https://library.e.abb.com/public/1ac197048172bc81c12577a00048a9bc/ABB %20traction %20rectifiers_4128PL219-W1-de_09-2010.pdf.

Bauer, C. (2010). Ökobilanz von Lithium-Ionen Batterien. Analyse der Herstellung von Energiespeichern für den Einsatz in Batteriefahrzeugen. Eine Studie im Auftrag der Volkswagen AG. Paul Scherrer Institut, Villigen (CH).

Bergk, F.; Lambrecht, U.; Pütz, R.; Landinger, H. (2017): Analyse der Lebenszykluskosten von Hybrid-Oberleitungsbussen. Fokuspapier Kostenrechnung Hybrid-Oberleitungsbus. IFEU, belicon, LBST. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/MKS/mks-fachworkshop-hybrid-oberleitungsbusse-diskussionsgrundlage.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 03.08.2017

Bergk, Lambrecht, Pütz et.al. (2015a). Potenziale des Hybrid-Oberleitungsbusses als effiziente Möglichkeit für die Nutzung erneuerbarer Energien im ÖPNV (Fachworkshop Hybrid-Oberleitungsbus zur wissenschaftlichen Begleitforschung der MKS), Berlin, 11.03.2015 http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/MKS/Archiv/mks-fachworkshop-hybrid-oberleitungsbusse.html

Bergk, Lambrecht, Pütz et.al. (2015b). 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.html

Bergk, Pütz, Landinger (2016). Analyse der lebenszykluskosten von Hybrid-Oberleitungsbussen, IFEU, belicon, LBST.

Biesenack, H.; George, G.; Hofmann, G.; Schmieder, A. (2006): Energieversorgung elektrischer Bahnen: Mit 96 Tabellen. 1st ed. Wiesbaden: Teubner.

BMVI (2017a): Potentiale des Hybrid-Oberleitungsbusses als effiziente Möglichkeit für die Nutzung erneuerbarer Energien im ÖPNV. Online verfügbar unter http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/MKS/hybrid-oberleitungsbus.html?nn=214206, zuletzt geprüft am 17.05. 2017.

BMVI (2017b): BMVI übergibt 15-Mio.-Euro-Förderung für Hybrid-Oberleitungsbusse. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2017/054-barthle-foerderbescheid-oberleitungsbusse.html, zuletzt geprüft am 17.05.2017.

Bülow, H. (2017): Die O-Bus-Stadt Eberswalde. Online verfügbar unter http://www.O-Bus-ew.de/d2302.htm, zuletzt geprüft am 22.06.2017.

CARB (2016): Advanced Clean Transit. Battery Cost for Heavy-Duty Electric Vehicles (Discussion Draft). https://www.arb.ca.gov/msprog/bus/battery_cost.pdf

Cutsem,. T. und C. Vournas (2008), Voltage Stability of Electric Power Systems. Berlin: Springer US, 2008.

Destatis (2016): Gemeindeverzeichnis. Statistisches Bundesamt. Online verfügbar: https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/LaenderRegionen/Regionales/Gemeindeverzeichnis/Gemeindeverzeichnis.html

Destatis (2017), Statistisches Bundesamt. Erzeugerpreisindizes gewerblicher Produkte: GP09-27 Elektrische Ausrüstungen, 2017

DIgSILENT GmbH (ohne Jahr): “Technical Reference Rectifier / Inverter,”

EC (2018): Rahmen für die Klima- und Energiepolitik bis 2030. Europäische Kommission. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_de. Zuletzt geprüft am 15.06.2018.

Ellingsen, L. A. W., Majeau-Bettez, G., Singh, B., Srivastava, A. K., Valøen, L. O., & Strømman, A. H. (2014). Life cycle assessment of a lithium-ion battery vehicle pack. Journal of Industrial Ecology, 18(1), 113-124.

Filipovic, Z. Elektrische Bahnen: Grundlagen, Triebfahrzeuge, Stromversorgung, 3rd ed. Berlin u.a.: Springer, 1995.

Funke, S. Á., Plötz, P. (2014). A Comparison of Different Means to Increase Daily Range of Electric Vehicles – The Potential of Battery Sizing, Increased Vehicle Efficiency and Charging Infrastructure. Paper presented at Vehicle Power and Propulsion Conference 2014 (IEEE-VPPC 2014), Coimbra, Portugal, Oktober 2014.

Gauger, J. F., Funke, S. Á. (2015). Elektrische Linienbusse: Vom Generalisten zum Spezialisten - Entwicklung eines Leitfadens zur Integration elektrischer Linienbusse in den öffentlichen Nahverkehr. DER NAHVERKEHR, 33. Jahrgang, 3/2015

Goehlich, D., Kunith, A., & Ly, T. (2014). Technology assessment of an electric urban bus system for Berlin. Urban Transport XX, 138, 137.

Götze, U. (2008): Investitionsrechnung. Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben. 6. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.

HBEFA (Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs) (2017): http://www.hbefa.net/d/

Helms, H., Jöhrens, J., Hanusch, J., Höpfner, U., Lambrecht, U. & Pehnt, M. (2011). UMBReLA Umweltbilanzen Elektromobilität. Ergebnisbericht. Heidelberg.

Hoffmann, F. (2017): Zweiter Frühling für Solinger Auslaufmodell. online verfügbar unter http://www1.wdr.de/nachrichten/rheinland/solingen-pilotprojekt-bob-100.html, zuletzt geprüft am 17.05.17.

Icha, Kuhs (2017): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1190 – 2016, im Auftrag des Umweltbundesamtes, Dessau-Roßlau, 2017

INFRAS (2017). Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA), Online-Version, http://www.hbefa.net/d/

ITP (2017). Standardisierten Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen des ÖPNV Version 2016, München

ITP, VWI (2006). Standardisierten Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen des ÖPNV Version 2016, München/Stuttgart

Ketterer, B., Karl, U., Möst, D., Ulrich, S. (2009). Lithium-Ion Batteries: State of the Art and Application Potential in Hybrid-, Plug-In Hybrid-and Electric Vehicles. Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe

KFW (2017): Finanzierung kommunaler Infrastrukturvorhaben, https://www.kfw-formularsammlung.de/KonditionenanzeigerINet/KonditionenAnzeiger?ProgrammNameNr=148, Stand 30.06.2017

Kiebler, R. (2017): Speisebereiche. Online verfügbar unter http://www.O-Bus-es.de/speiseber.htm, zuletzt geprüft am 22.06.2017.

Kießling, F.; Puschmann, R.; Schmieder, A. (2014): Fahrleitungen elektrischer Bahnen: Planung ; Berechnung ; Ausführung ; Betrieb, 3rd ed. Erlangen: Publicis Publ.

Kim, H. C., Wallington, T. J., Arsenault, R., Bae, C., Ahn, S., & Lee, J. Kley, F. (2011). Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge: Entwicklung und Bewertung einer Ausbaustrategie auf Basis des Fahrverhaltens. Fraunhofer.

Lajunen, A. (2014). Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 38, 1-15.

MWV (2018): Zusammensetzung des Verbraucherpreises für Dieselkraftstoff [€-cent/Liter]. Mineralölwirtschaftsverband e.V. Online https://www.mwv.de/statistiken/preiszusammensetzung/. Zuletzt geprüft am 15.06.2018.

Notter, D. A., M. Gauch, R. Widmer, P. Wäger, A. Stamp, R. Zah und H.-J. Althaus (2010). Contribution of Li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles (Supporting Information). In: Environmental Science & Technology. Vol. 44 (2010). Washington D.C.

NOW (2016). Statusbericht 2015 / 16 Hybrid- und ElektrO-Bus-Projekte in Deutschland. https://www.now-gmbh.de/content/5-service/4-publikationen/1-begleitforschung/now_abschlussbericht_bus_web.pdf

Oberschmidt, J. (2010): Multikriterielle Bewertung von Technologien zur Bereitstellung von Strom und Wärme. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.

Olsson, O., Grauers, A., & Pettersson, S. (2016) Method to analyze cost effectiveness of different electric bus systems.

Pihlatie, M., Kukkonen, S., Halmeaho, T., Karvonen, V. & Nylund, N. O. (2014). Fully electric city buses-The viable option. In Electric Vehicle Conference (IEVC), 2014 IEEE International (pp. 1-8). IEEE.

Plötz, P., T. Gnann, A. Kühn, M. Wietschel (2013), Markthochlaufszenarien für Elektrofahrzeuge. Studie im Auftrag der acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und der Arbeitsgruppe 7 der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE). 2013

Rogge, M., Wollny, S., & Sauer, D. U. (2015). Fast charging battery buses for the electrification of urban public transport—a feasibility study focusing on charging infrastructure and energy storage requirements. Energies, 8(5), 4587-4606.

Siemens AG (2017): Fahrleitungsmaterial für den Nah- und Fernverkehr. Produktkatalog. Nr. A6Z00041165734 / 03/2017, München: Siemens AG.

TUHH und Fraunhofer ISI (2018): Teilstudie „Import von Stromkraftstof-fen für den Verkehr – Lkw, Binnen-/Seeschiffe, Flugzeuge“. Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie. Autorinnen und Autoren:Sebastian Timmerberg, Nils Bullerdiek, Prof. Dr.-Ing. Martin Kaltschmitt (TU Hamburg – IUE), Dr. Till Gnann, Fabian Neumann, Prof. Dr. Martin Wietschel (Fraunhofer ISI).

VDV (1992). Herausgeber Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), VDV Schriften 10/92 – Linienoptimierung. Köln, 2016

VDV (2016). Herausgeber Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), 2015 Statistik, Köln, 2016

Verkehr-bs (2014). Braunschweiger Verkehrs-GmbH. E-Gelenkbus - Abmessungen und technische Daten.

Wikipedia (2017a): Straßenbahn Marburg. Online verfügbar unter https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=162350544, zuletzt geprüft am 31.05.2017.

Wikipedia (2017b): Oberleitungsbus Marburg. Online verfügbar unter https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=152994105, zuletzt geprüft am 31.05.2017.

Wikipedia (2017c): Oberleitungsbus Esslingen am Neckar. Online verfügbar unter https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=165562985, zuletzt geprüft am 16.06.2017.

Wikipedia (2017d): Oberleitungsbus. Online verfügbar unter https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=166333898, zuletzt geprüft am 14.06.2017

Wikipedia (2017e): Swisstrolley 3. Online verfügbar unter https://de.wikipedia.org/wiki/Hess_Swisstrolley#Swisstrolley_3, zuletzt geprüft am 17.06.2017.

Wikipedia (2017f): Solaris Trollino 18. Online verfügbar unter https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=156852307, zuletzt geprüft am 22.06.2017.

Wikipedia (2017g): Oberleitungsbus Eberswalde. Online verfügbar unter https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=164139897, zuletzt geprüft am 16.06.2017.

Wikipedia (2017h): Oberleitungsbus Solingen. Online verfügbar unter https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=164175879, zuletzt geprüft am 16.06.2017.

Zackrisson, M., Avellán, L. & Orlenius, J. (2010): Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles–Critical issues. Journal of Cleaner Production, 18(15), 1519-1529.

Zhang, K., Kluck, C., Achari, G. (2009): A comparative approach for ranking contaminated sites based on the risk assessment paradigm using fuzzy PROMETHEE. In: Environmental management 44 (5), S. 952–967.

Zimmermann, H.-J., Gutsche, L. (1991): Multi-criteria Analyse. Einführung in die Theorie der Entscheidungen bei Mehrfachzielsetzungen. Berlin: Springer.

9 Anhang

9.1 Annahmen zur techno-ökonomischen Analyse

Busgröße	HO-Klein	HO-Mittel	HO-Groß	HO-Max
Solo-Bus (12 m)	1,4	1,5	1,6	1,7
Gelenkbus (18 m)	2,0	2,1	2,2	2,3
Doppelgelenkbus (24 m)	2,9	3,0	3,2	3,3

Tabelle 70: Durchschnittliche Fahrenergiebedarfe Sommer [kWh/km]

α	β	Quelle
1.331	-1,825	Wietschel et al. 2008
2.677	-1,665	Scott 2010
5.000	-1,825	Saft 2014
1.500	-1,825	Wang et al. 2011
4.500	-1,825	Eigene Annahmen

Tabelle 71: Batterieparameter: Ergebnisse Literaturrecherche

Busgröße	HO-Klein	HO-Mittel	HO-Groß	HO-Max
Gelenkbus (18 m)	52,5 kW	55 kW	57,5 kW	60 kW

Tabelle 72: Durchschnittliche Leistungsbedarfe Gelenkbus bei Fahrt in Ebene

Der durchschnittliche Leistungsbedarf berechnet sich als Quotient aus dem jeweiligen durchschnittlichen Energiebedarf [kWh/km] und der jeweiligen Durchschnittsgeschwindigkeit, die in dieser Analyse mit 18 km/h angesetzt ist.

Die Analysen wurden mit Fokus auf Gelenkbussen (18 m) durchgeführt. Für die Buslängen SolO-Bus (12 m) sowie Doppelgelenkbus (24 m) sind die Bedarfe an benötigter Oberleitungsausstattung für durchschnittliche Fahrleistungsbedarfe dargestellt. Durchschnittliche Fahrleistungsbedarfe unterscheiden sich aufgrund der unterschiedlichen Energiebedarfe der Buslängen. Es wurden folgende Fahrleistungen unterstellt:

Busgröße	HO-Klein	HO-Mittel	HO-Groß	HO-Max
SolO-Bus (12 m)	35 kW	35 kW	37,5 kW	40 kW
Doppelgelenkbus (24 m)	70 kW	72,5 kW	75 kW	80 kW

Tabelle 73: Durchschnittliche Leistungsbedarfe Gelenkbus bei Fahrt in Ebene

Es ergeben sich folgende Oberleitungsausstattungen für Solo- und Doppelgelenkbusse.

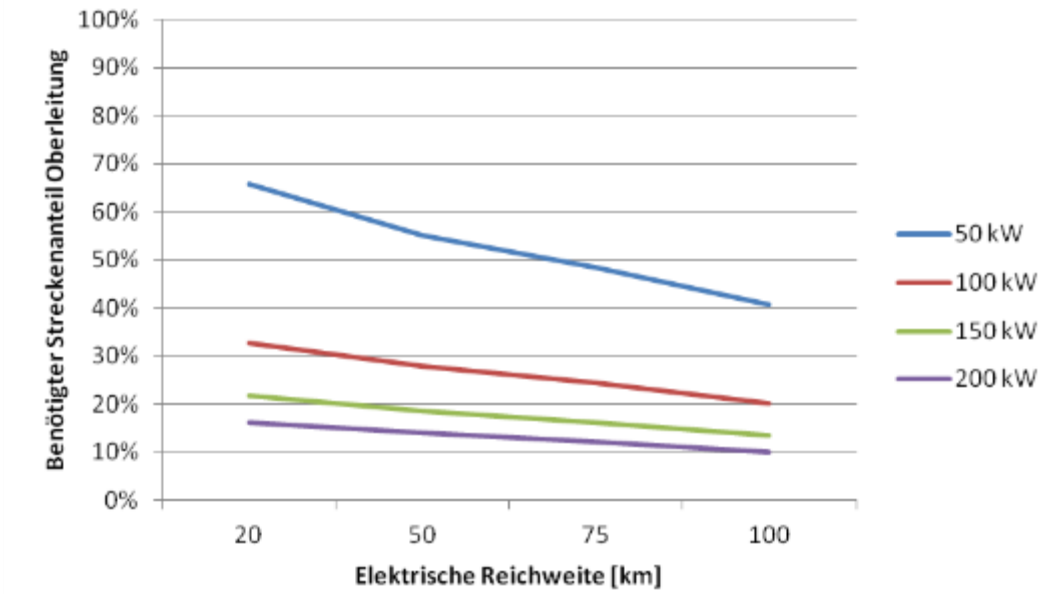


Abbildung 89: Benötigte Oberleitungsausstattung je nach Elektrische Reichweite und Ladeleistung der Oberleitung bei durchschnittlicher Fahrleistung (Solo-Bus)

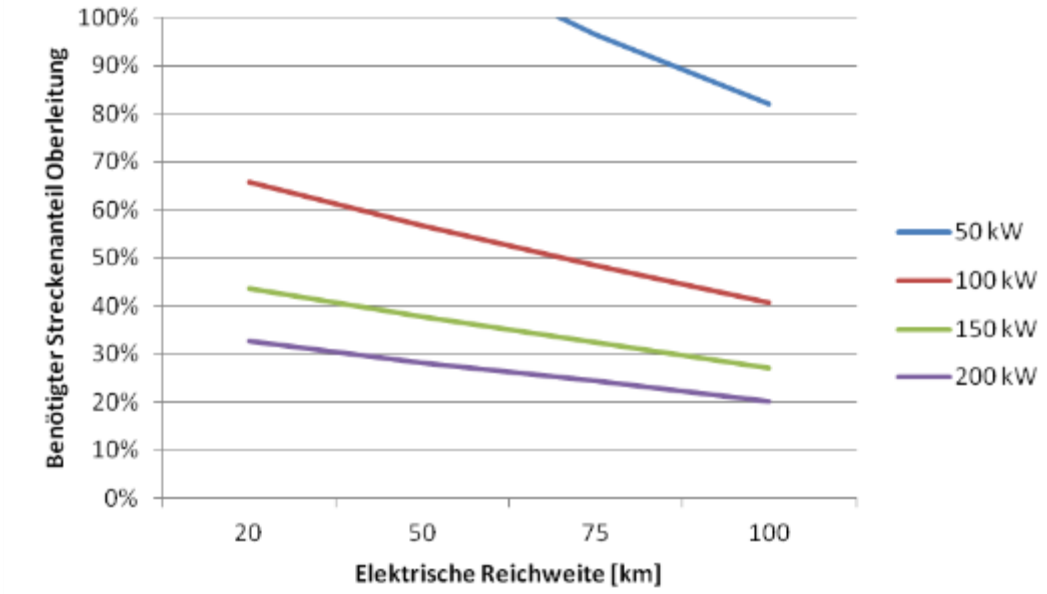


Abbildung 90: Benötigte Oberleitungsausstattung je nach Elektrische Reichweite und Ladeleistung der Oberleitung bei durchschnittlicher Fahrleistung (Doppelgelenkbus)

9.2 Anhang Übertragbarkeit auf Deutschland

Betriebssitz, Unternehmen	Bestand Busse gesamt (inkl. angemietet)	Nutzwagen-km Bus gesamt	nur Bus 1/ sonst 0	VDV-Statistik: Einwohner			Statitistische Bundesamt (2015)		durchschnittliche Steigung Stadt
				Einfluss-gebiet	Stadt-gebiet	Anteil EW Stadt	Einwohner (Gemeinde)	Grad der Verstädterung	
Aachen (ASEAG)	356	15.266	1	557.762	253.945	46%	245.885	dicht besiedelt	3,9%
Augsburg (SWA)	94	5.376	0	409.957	288.631	70%	286.374	dicht besiedelt	0,9%
Bamberg (STVP)	66	2.623	1	107.146	73.352	68%	73.331	dicht besiedelt	2,9%
Berlin (BVG)	1379	95.943	0	3.484.995	3.484.995	100%	3.520.031	dicht besiedelt	0,9%
Bielefeld (moBiel)	131	10.178	0	383.998	333.998	87%	333.090	dicht besiedelt	3,1%
Bochum (BOGESTR A)	304	18.270	0	882.626	632.148	72%	364.742	dicht besiedelt	3,1%
Bonn (SWB)	358	17.064	0	320.820	320.820	100%	318.809	dicht besiedelt	3,0%
Braunschweig (BSVG)	146	7.482	0	300.506	249.485	83%	251.364	dicht besiedelt	1,0%
Bremen (BSAG)	214	13.892	0	614.103	552.273	90%	557.464	dicht besiedelt	0,5%
Bremerhaven (VGB)	74	3.568	1	327.462	118.258	36%	114.025	dicht besiedelt	0,4%
Chemnitz (CVAG)	81	6.309	0	248.878	248.878	100%	248.645	dicht besiedelt	4,7%
Cottbus (CV)	105	3.462	0	136.300	99.800	73%	99.687	dicht besiedelt	0,7%
Dortmund (DSW)	262	13.974	0	676.011	596.575	88%	586.181	dicht besiedelt	2,5%
Dresden (DVB)	178	13.397	0	606.108	536.911	89%	543.825	dicht besiedelt	3,3%
Duisburg (DVG)	176	8.728	0	565.931	494.445	87%	491.231	dicht besiedelt	0,9%
Düsseldorf(Rheinbahn)	429	29.226	0	1.015.000	603.210	59%	612.178	dicht besiedelt	1,1%
Erfurt (EVAG)	70	3.352	0	232.427	210.271	90%	210.118	dicht besiedelt	3,0%
Essen (EVAG)	186	13.120	0	623.707	584.782	94%	582.624	dicht besiedelt	4,2%
Frankfurt / Main (HLB)	578	9.260	0	939.200	235.300	25%	732.688	dicht besiedelt	1,5%
Frankfurt / Main (ICB)	113	2.952	0	880.721	716.227	81%	732.688	dicht besiedelt	1,5%
Freiburg (VAG)	99	3.977	0	253.921	222.323	88%	226.393	dicht besiedelt	8,8%
Fürth (Infra Fürth Verkehr)	74	3.523	1	126.146	126.146	100%	124.171	dicht besiedelt	1,9%
Gießen (SWG)	62	2.511	1	97.796	84.922	87%	84.455	dicht besiedelt	3,1%
Göttingen (GöVB)	93	3.636	1	144.580	131.168	91%	118.914	dicht besiedelt	5,2%
Halle (Saale) (HAVAG)	67	3.313	0	293.930	238.321	81%	236.991	dicht besiedelt	1,5%
Hamburg (HOCHBAHN)	808	49.320	0	1.946.476	1.746.342	90%	1.787.408	dicht besiedelt	1,0%
Hamburg (VHH)	587	31.692	0	2.800.299	1.814.597	65%	1.787.408	dicht besiedelt	1,0%
Hannover (REGIOBUS)	924	20.535	0	1.128.336	528.879	47%	532.163	dicht besiedelt	0,8%
Hannover (üstra)	228	11.714	0	801.535	551.914	69%	532.163	dicht besiedelt	0,8%
Heilbronn (SWH)	71	3.793	0	127.719	120.919	95%	122.567	dicht besiedelt	4,0%
Herne (HCR)	66	3.798	1	235.728	160.150	68%	155.851	dicht besiedelt	1,5%
Ingolstadt (SBI)	118	5.844	1	208.175	131.002	63%	132.438	dicht besiedelt	0,6%
Kaiserslautern (SWK)	63	3.174	1	152.359	101.432	67%	98.520	dicht besiedelt	7,3%
Karlsruhe (AVG)	103	2.249	0	3.810.766	300.051	8%	307.755	dicht besiedelt	1,6%
Karlsruhe (VBK)	82	4.312	0	318.733	296.033	93%	307.755	dicht besiedelt	1,6%
Kassel (KVG)	79	4.077	0	280.657	206.197	73%	197.984	dicht besiedelt	5,6%
Kiel (KVG)	169	9.546	1	325.554	244.549	75%	246.306	dicht besiedelt	1,9%
Kiel (VKP)	189	4.732	1	127.225	8.753	7%	246.306	dicht besiedelt	1,9%
Koblenz (evm)	79	4.689	1	150.898	110.643	73%	112.586	dicht besiedelt	7,4%
Köln (KVB)	343	19.440	0	1.358.849	1.069.192	79%	1.060.582	dicht besiedelt	0,7%
Krefeld (SWK)	150	6.126	0	518.818	222.834	43%	225.144	dicht besiedelt	0,5%
Leipzig (LVB)	180	10.268	0	658.106	550.608	84%	560.472	dicht besiedelt	0,9%
Leverkusen (Wupsi)	178	9.317	1	515	165	32%	163.487	dicht besiedelt	2,3%
Lübeck (SL)	146	6.952	1	235.116	214.420	91%	216.253	dicht besiedelt	1,0%
Ludwigsburg (LVL)	198	3.244	1	153.000	85.000	56%	92.973	dicht besiedelt	4,3%
Mainz (MVG)	147	9.001	0	526.166	209.637	40%	209.779	dicht besiedelt	2,8%
Mannheim (rnv)	182	10.998	0	942.248	331.907	35%	305.780	dicht besiedelt	0,5%
Marburg (SWM)	79	3.178	1	81.500	78.600	96%	73.836	dicht besiedelt	8,0%
Moers (NIAG)	323	12.645	0	1.489.058	105.934	7%	104.529	dicht besiedelt	0,9%
Mönchengladbach (NEW MöBu	230	11.751	1	656.853	256.853	39%	259.996	dicht besiedelt	0,9%
München (MVG)	509	32.432	0	1.581.633	1.442.465	91%	1.450.381	dicht besiedelt	0,7%
Münster (RVM)	581	16.423	1	1.049.781	50.665	5%	310.039	dicht besiedelt	0,6%
Münster (SWMS)	179	8.571	1	305.235	305.235	100%	310.039	dicht besiedelt	0,6%
Neuss (SWN)	83	3.980	1	203.419	159.672	78%	155.414	dicht besiedelt	0,7%
Nürnberg (VAG)	216	12.707	0	836.491	501.072	60%	509.975	dicht besiedelt	1,2%
Oberhausen (STOAG)	137	8.620	0	210.326	210.326	100%	210.934	dicht besiedelt	1,2%
Oldenburg (V WG)	97	6.870	1	220.907	160.907	73%	163.830	dicht besiedelt	0,4%
Osnabrück (SWO)	155	8.073	1	192.607	162.554	84%	162.403	dicht besiedelt	2,5%
Paderborn (PaderSprinter)	104	4.574	1	149.608	149.608	100%	148.126	dicht besiedelt	2,4%
Plauen (PSB)	782	328	0	64.290	64.290	100%	65.201	dicht besiedelt	5,3%
Regensburg(RVB)	147	5.492	1	203.178	160.080	79%	145.465	dicht besiedelt	3,0%
Remscheid (SR)	90	4.082	1	218.272	111.766	51%	109.499	dicht besiedelt	7,3%
Reutlingen (RSV)	67	435	1	157.503	114.224	73%	114.310	dicht besiedelt	6,4%
Rostock (RSAG)	70	4.999	0	206.033	206.033	100%	206.011	dicht besiedelt	0,7%
Saarbrücken (Stadtbahn)	192	7.709	0	309.876	176.867	57%	178.151	dicht besiedelt	8,0%
Salzgitter (KVG)	200	8.672	1	470.000	110.000	23%	101.079	dicht besiedelt	2,4%
Solingen (SWS)	97	4.743	1	1.259.453	156.771	12%	158.726	dicht besiedelt	6,3%
Stuttgart (SSB)	343	15.078	0	993.541	602.304	61%	623.738	dicht besiedelt	6,5%
Trier (SWT)	81	4.333	1	133.988	113.988	85%	114.914	dicht besiedelt	9,8%
Tübingen (SVT)	67	3.266	1	85.871	85.871	100%	87.464	dicht besiedelt	7,8%
Ulm (SWU)	70	4.456	0	181.499	120.714	67%	122.636	dicht besiedelt	4,2%
Wiesbaden (ESWE)	240	12.369	1	330.567	286.524	87%	276.218	dicht besiedelt	5,6%
Wolfsburg (W VG)	90	5.966	1	205.251	125.500	61%	124.045	dicht besiedelt	1,3%
Wuppertal (WSW)	277	12.198	0	429.668	347.280	81%	350.046	dicht besiedelt	7,9%
Würzburg (WSB)	90	2.921	0	127.243	127.243	100%	124.873	dicht besiedelt	7,1%

Tabelle 74: Daten zu Verkehrsverbünden in Deutschland

9.3 Detailauswertungen Marburg

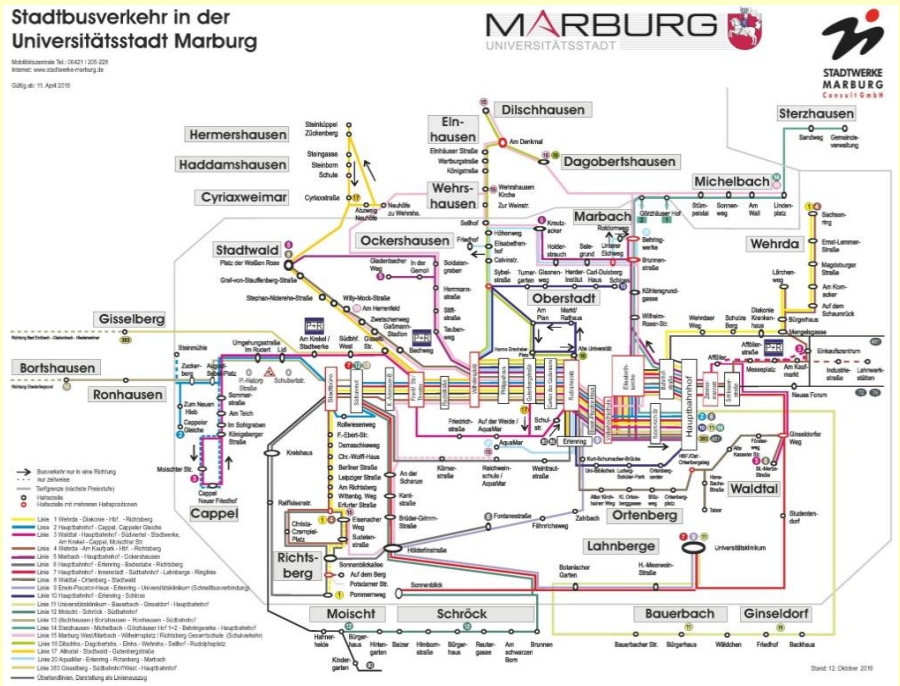
Auf den folgenden Seiten sind die Detailauswertungen für Marburg fortlaufend dargestellt.

I.1 Liniendaten Linie 7/2

Liniendaten		
Linienverlauf:	HBF - WIPL - SBF - KLIN - GINS - HBF (L. 7), HBF - CGLE (L. 2)	
Linienlänge:	16,3 km (L. 7)	16,8 km (L. 2)
Fahrzeit:	00:50:00 (L. 7)	00:33:00 (L. 2)
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	19 km/h	
Betrachtete Umläufe:	Mo-Fr: 7/2-U11, U13, U14, U17, U18, U21, U29-75, U34, U37, U38, U43, U44, U45, U53, U57, U58, U62-91, U63-55	
Jahreslaufleistung:	1.028.130 km/Jahr	
Jahresbetriebsdauer:	77.924 h/Jahr	
Fahrzeugeinsatz:	IST	PLAN
Fahrzeuganzahl:	19	19
Fahrzeugtyp:	Gelenkbus	Gelenkbus
Fahrzeugklasse:	18 m	18 m
Antriebsart:	Diesel	elektrisch

Kurzbeschreibung

Die Linien 2 und 7 sind hoch ausgelastete Linien im Stadtverkehr Marburg. Linie 2 verkehrt vom Hauptbahnhof über die Innenstadt mit den dortigen Universitäts-Instituten und den Südbahnhof zum Stadtteil Cappel, ca. 4 km südlich des Stadtzentrums. Linie 7 verkehrt als Ringlinie im Zweirichtungsverkehr und verbindet u. a. den Hauptbahnhof mit der Innenstadt, dem Südbahnhof und dem Campus Lahnberge mit dem Universitätsklinikum. Linie 7 ist topographisch anspruchsvoll, da sie auf ihrem Linienweg zwei An- bzw. Abstiege vom Lahntal hinauf auf die Höhenlage der Lahnberge zu bewältigen hat.
Die Umläufe umfassen Kurse beider Linien im Wechsel, wobei in der Regel auf einen Kurs der Linie 2 drei bis vier Kurse auf der Ringlinie 7 folgen.
Die Linien 2 und 7 werden gegenwärtig mit 18-m-Niederflurbussen bedient. Zur Kapazitätssteigerung wird der Einsatz von 24-m-Doppelgelenkbussen diskutiert, weshalb hier auch die Überprüfung dieser Fahrzeugklasse erfolgen soll.



Endpunkte	
A-SWM	SWM Einfahrt
BOTG	Botanischer Garten
CGLE	Cappeler Gleiche
EIWG	Pommernweg
ERLB	Erlenring
ERPH	Erwin-Piscator-Haus
E-SWM	SWM Ausfahrt
FONTA	Fontanestraße
FSTR	Frankfurter Straße
GINB	Backhaus (Ginseldorf)
GUT	Gutenbergstraße
HBF	Hauptbahnhof
HOEL	Hölderlinstraße
KLIN	Klinikum
POM	Pommernweg
RADE	Radestraße
SAR	Sachsenring
SAVI	Savignystraße
SBF	Südbahnhof
SCR	Brunnen (Schröck)
STBO	Stadtbüro
WIPL	Wilhelmsplatz
GINS	Ginseldorfer Weg

I.2 Liniencharakteristik Linie 7/2

I.2.1 Linienklassifizierung nach SORT und TOPO

SORT		
Verkehrsablauf:		
Stopps je Kilometer:	3 Stopps/km	SORT 2
Haltezeitanteil:	37 %	SORT 2
Durchschnittsgeschwindigkeit (GPS):	19,0 km/h	SORT 2
SORT-Einstufung:		**SORT 2**

Aufgrund der Worst-Case Betrachtung wird die energetisch anspruchsvollste SORT Einstufung als maßgebend definiert.

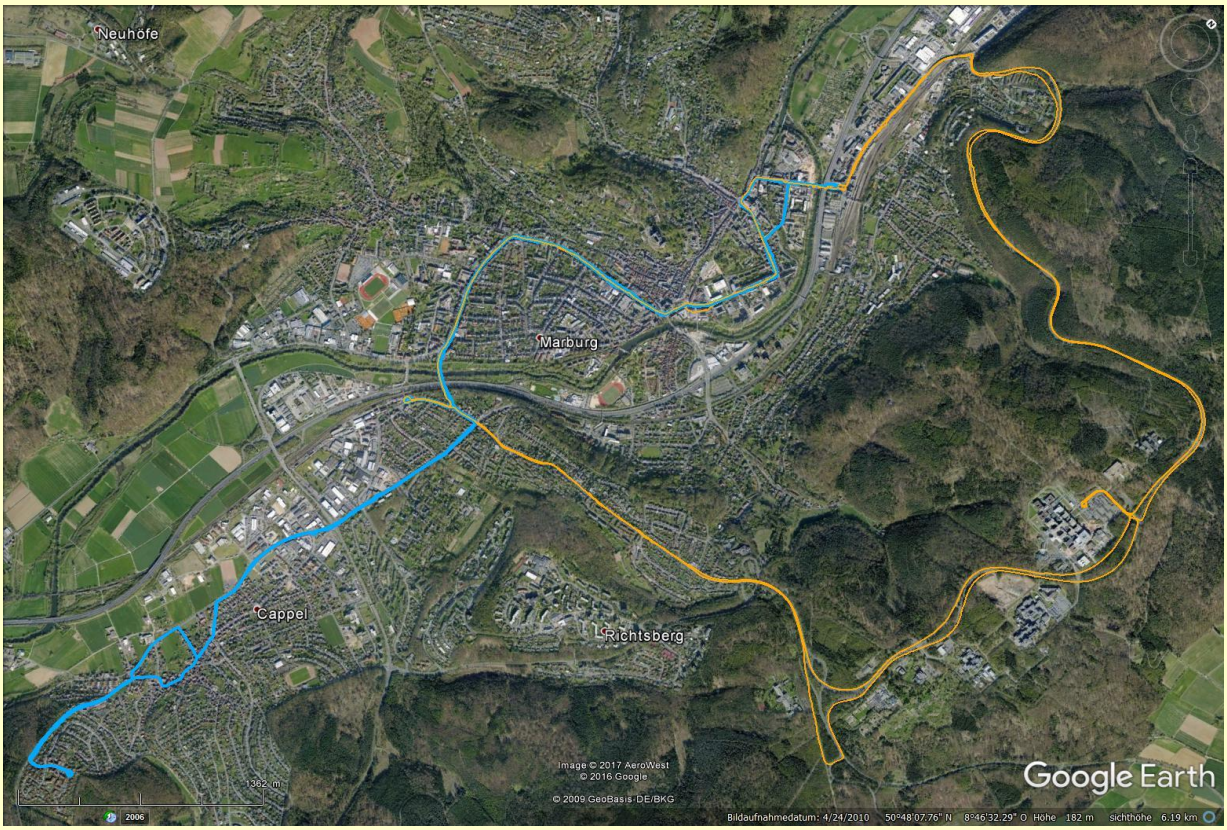
TOPO		
Höhenprofil:		
Höhendifferenz der Strecke:	220 m	
minimale Höhe:	160 m	
maximale Höhe:	380 m	TOPO 1
Steigung und Gefälle:		
maximale Steigung:	8 %	
maximales Gefälle:	-8 %	
Maximum aus Steigung und Gefälle:	+/- 8 %	TOPO 1
TOPO-Einstufung:		**TOPO 1**

Aufgrund der Worst-Case Betrachtung wird die energetisch anspruchsvollste TOPO Einstufung als maßgebend definiert.

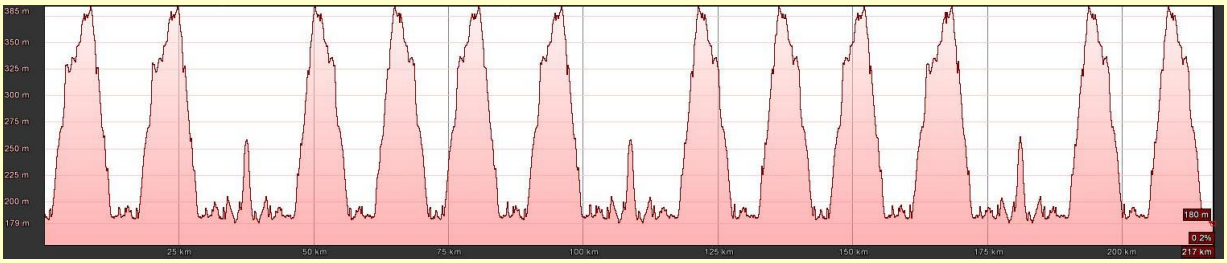
I.2 Liniencharakteristik Linie 7/2

I.2.2 Linienverlauf

Linienverlauf Linie 7/2



Höhenprofil Umlauf 7/2-U37/L2-7-Mo-Fr



I.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

I.4.1 Simulation Energieverbrauch

Eingangsparameter

Umlauf:	7/2-U 11 / L1-2-4-7-Mo-Fr	
Szenario:	Soll-Fahrplan	
Fahrzeug:	Gelenkbus	18 m
Fahrzeugdaten:		
Leistung ab Batterie für Antrieb:	133 kW	
ausgewählte Antriebsart:	Zentralmotor	
Anlagenwirkungsgrad elektr./mechan. des Antriebs inkl. Rekuperation:	0,75	
Antriebsleistung für leeres Fahrzeug:	100 kW	
Leistungsabforderung durch Beschleunigung:	100%	
Leergewicht Fahrzeug:	18.000 kg	
zulässiges Gesamtgewicht Fahrzeug:	28.000 kg	
Betriebsdaten:		
Ø Besetzungsgrad:	3 /4	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	15,9 km/h	
Ø Geschwindigkeit gemessen:	19,0 km/h	

Berechnung Energiebedarf

	Verbrauch Strecke
Energiebedarf leeres Fahrzeug:	
Energiebedarf leeres Fahrzeug mit 18.000 kg:	0,425 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,090 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,081 kWh/km
Gesamtenergiebedarf leeres Fahrzeug:	**0,596 kWh/km**
Energiebedarf Fahrgastbeförderung:	
Energiebedarf Fahrgastbeförderung bei Ø Auslastung 3/4 bzw. 7.083 kg:	0,167 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,035 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,032 kWh/km
Gesamtenergiebedarf Fahrgastbeförderung:	**0,235 kWh/km**

Energiebedarf sonstige Verbraucher:

	Leistung	Nutzung je Tag	Verbrauch Strecke	Verbrauch Wendepunkt
Nebenverbraucher:	10 kW	100%	0,574 kWh/km	5,00 kWh/h
Klimaanlage (E-Bus Klimaanlage):	9 kW	50%	0,258 kWh/km	2,25 kWh/h
Leistung Heizung Heizungsanlage HO-Bus ohne OL:	19 kW	50%	0,548 kWh/km	4,78 kWh/h

Hinweis: Da Klimaanlage und Heizung nie zeitgleich in Betrieb genommen werden, wird der energetisch intensivere Verbraucher für die Berechnung des Energiebedarfs herangezogen. Maßgebend im betrachtenten Fall ist die Heizung.

Gesamtenergiebedarf sonstige Verbraucher:	**1,12 kWh/km**	**9,78 kWh/h**
Gesamtenergiebedarf Elektrobus elektrischer Heizung (Worst Case Betrachtung):	**1,95 kWh/km**	**9,78 kWh/h**

I.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

I.4.1 Simulation Energieverbrauch

Eingangsparameter

Umlauf:	7/2-U 13 / L2-7-19-Mo-Fr	
Szenario:	Soll-Fahrplan	
Fahrzeug:	Gelenkbus	18 m
Fahrzeugdaten:		
Leistung ab Batterie für Antrieb:	133 kW	
ausgewählte Antriebsart:	Zentralmotor	
Anlagenwirkungsgrad elektr./mechan. des Antriebs inkl. Rekuperation:	0,75	
Antriebsleistung für leeres Fahrzeug:	100 kW	
Leistungsabforderung durch Beschleunigung:	100%	
Leergewicht Fahrzeug:	18.000 kg	
zulässiges Gesamtgewicht Fahrzeug:	28.000 kg	
Betriebsdaten:		
Ø Besetzungsgrad:	3 /4	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	22,5 km/h	
Ø Geschwindigkeit gemessen:	19,0 km/h	

Berechnung Energiebedarf

	Verbrauch Strecke
Energiebedarf leeres Fahrzeug:	
Energiebedarf leeres Fahrzeug mit 18.000 kg:	0,358 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,090 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,081 kWh/km
Gesamtenergiebedarf leeres Fahrzeug:	**0,529 kWh/km**
Energiebedarf Fahrgastbeförderung:	
Energiebedarf Fahrgastbeförderung bei Ø Auslastung 3/4 bzw. 7.083 kg:	0,141 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,035 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,032 kWh/km
Gesamtenergiebedarf Fahrgastbeförderung:	**0,208 kWh/km**

Energiebedarf sonstige Verbraucher:

	Leistung	Nutzung je Tag	Verbrauch Strecke	Verbrauch Wendepunkt
Nebenverbraucher:	10 kW	100%	0,500 kWh/km	5,00 kWh/h
Klimaanlage (E-Bus Klimaanlage):	9 kW	50%	0,225 kWh/km	2,25 kWh/h
Leistung Heizung Heizungsanlage HO-Bus ohne OL:	19 kW	50%	0,478 kWh/km	4,78 kWh/h

Hinweis: Da Klimaanlage und Heizung nie zeitgleich in Betrieb genommen werden, wird der energetisch intensivere Verbraucher für die Berechnung des Energiebedarfs herangezogen. Maßgebend im betrachtenten Fall ist die Heizung.

Gesamtenergiebedarf sonstige Verbraucher:	**0,98 kWh/km**	**9,78 kWh/h**
Gesamtenergiebedarf Elektrobus elektrischer Heizung (Worst Case Betrachtung):	**1,71 kWh/km**	**9,78 kWh/h**

I.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

I.4.1 Simulation Energieverbrauch

Eingangsparameter

Umlauf:	7/2-U 14 / L1-2-4-7-Mo-Fr	
Szenario:	Soll-Fahrplan	
Fahrzeug:	Gelenkbus	18 m
Fahrzeugdaten:		
Leistung ab Batterie für Antrieb:	133 kW	
ausgewählte Antriebsart:	Zentralmotor	
Anlagenwirkungsgrad elektr./mechan. des Antriebs inkl. Rekuperation:	0,75	
Antriebsleistung für leeres Fahrzeug:	100 kW	
Leistungsabforderung durch Beschleunigung:	100%	
Leergewicht Fahrzeug:	18.000 kg	
zulässiges Gesamtgewicht Fahrzeug:	28.000 kg	
Betriebsdaten:		
Ø Besetzungsgrad:	3 /4	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	16,1 km/h	
Ø Geschwindigkeit gemessen:	19,0 km/h	

Berechnung Energiebedarf

	Verbrauch Strecke
Energiebedarf leeres Fahrzeug:	
Energiebedarf leeres Fahrzeug mit 18.000 kg:	0,422 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,090 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,081 kWh/km
Gesamtenergiebedarf leeres Fahrzeug:	**0,593 kWh/km**
Energiebedarf Fahrgastbeförderung:	
Energiebedarf Fahrgastbeförderung bei Ø Auslastung 3/4 bzw. 7.083 kg:	0,166 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,035 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,032 kWh/km
Gesamtenergiebedarf Fahrgastbeförderung:	**0,233 kWh/km**

Energiebedarf sonstige Verbraucher:

	Leistung	Nutzung je Tag	Verbrauch Strecke	Verbrauch Wendepunkt
Nebenverbraucher:	10 kW	100%	0,570 kWh/km	5,00 kWh/h
Klimaanlage (E-Bus Klimaanlage):	9 kW	50%	0,256 kWh/km	2,25 kWh/h
Leistung Heizung Heizungsanlage HO-Bus ohne OL:	19 kW	50%	0,544 kWh/km	4,78 kWh/h

Hinweis: Da Klimaanlage und Heizung nie zeitgleich in Betrieb genommen werden, wird der energetisch intensivere Verbraucher für die Berechnung des Energiebedarfs herangezogen. Maßgebend im betrachtenten Fall ist die Heizung.

Gesamtenergiebedarf sonstige Verbraucher:	**1,11 kWh/km**	**9,78 kWh/h**
Gesamtenergiebedarf Elektrobus elektrischer Heizung (Worst Case Betrachtung):	**1,94 kWh/km**	**9,78 kWh/h**

I.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

I.4.1 Simulation Energieverbrauch

Eingangsparameter

Umlauf:	7/2-U 17 / L1-2-4-7-Mo-Fr	
Szenario:	Soll-Fahrplan	
Fahrzeug:	Gelenkbus	18 m
Fahrzeugdaten:		
Leistung ab Batterie für Antrieb:	133 kW	
ausgewählte Antriebsart:	Zentralmotor	
Anlagenwirkungsgrad elektr./mechan. des Antriebs inkl. Rekuperation:	0,75	
Antriebsleistung für leeres Fahrzeug:	100 kW	
Leistungsabforderung durch Beschleunigung:	100%	
Leergewicht Fahrzeug:	18.000 kg	
zulässiges Gesamtgewicht Fahrzeug:	28.000 kg	
Betriebsdaten:		
Ø Besetzungsgrad:	3 /4	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	16,4 km/h	
Ø Geschwindigkeit gemessen:	19,0 km/h	

Berechnung Energiebedarf

	Verbrauch Strecke
Energiebedarf leeres Fahrzeug:	
Energiebedarf leeres Fahrzeug mit 18.000 kg:	0,419 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,090 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,081 kWh/km
Gesamtenergiebedarf leeres Fahrzeug:	**0,590 kWh/km**

Energiebedarf Fahrgastbeförderung:	
Energiebedarf Fahrgastbeförderung bei Ø Auslastung 3/4 bzw. 7.083 kg:	0,165 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,035 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,032 kWh/km
Gesamtenergiebedarf Fahrgastbeförderung:	**0,232 kWh/km**

Energiebedarf sonstige Verbraucher:

	Leistung	Nutzung je Tag	Verbrauch Strecke	Verbrauch Wendepunkt
Nebenverbraucher:	10 kW	100%	0,566 kWh/km	5,00 kWh/h
Klimaanlage (E-Bus Klimaanlage):	9 kW	50%	0,255 kWh/km	2,25 kWh/h
Leistung Heizung Heizungsanlage HO-Bus ohne OL:	19 kW	50%	0,541 kWh/km	4,78 kWh/h
Gesamtenergiebedarf sonstige Verbraucher:			**1,11 kWh/km**	**9,78 kWh/h**

Hinweis: Da Klimaanlage und Heizung nie zeitgleich in Betrieb genommen werden, wird der energetisch intensivere Verbraucher für die Berechnung des Energiebedarfs herangezogen. Maßgebend im betrachtenten Fall ist die Heizung.

Gesamtenergiebedarf Elektrobus elektrischer Heizung (Worst Case Betrachtung):	**1,93 kWh/km**	**9,78 kWh/h**

I.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

I.4.1 Simulation Energieverbrauch

Eingangsparameter

Umlauf:	7/2-U 18 / L2-7-19-Mo-Fr	
Szenario:	Soll-Fahrplan	
Fahrzeug:	Gelenkbus	18 m
Fahrzeugdaten:		
Leistung ab Batterie für Antrieb:	133 kW	
ausgewählte Antriebsart:	Zentralmotor	
Anlagenwirkungsgrad elektr./mechan. des Antriebs inkl. Rekuperation:	0,75	
Antriebsleistung für leeres Fahrzeug:	100 kW	
Leistungsabforderung durch Beschleunigung:	100%	
Leergewicht Fahrzeug:	18.000 kg	
zulässiges Gesamtgewicht Fahrzeug:	28.000 kg	
Betriebsdaten:		
Ø Besetzungsgrad:	3 /4	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	19,7 km/h	
Ø Geschwindigkeit gemessen:	19,0 km/h	

Berechnung Energiebedarf

	Verbrauch Strecke
Energiebedarf leeres Fahrzeug:	
Energiebedarf leeres Fahrzeug mit 18.000 kg:	0,383 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,090 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,081 kWh/km
Gesamtenergiebedarf leeres Fahrzeug:	**0,554 kWh/km**

Energiebedarf Fahrgastbeförderung:	
Energiebedarf Fahrgastbeförderung bei Ø Auslastung 3/4 bzw. 7.083 kg:	0,151 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,035 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,032 kWh/km
Gesamtenergiebedarf Fahrgastbeförderung:	**0,218 kWh/km**

Energiebedarf sonstige Verbraucher:

	Leistung	Nutzung je Tag	Verbrauch Strecke	Verbrauch Wendepunkt
Nebenverbraucher:	10 kW	100%	0,517 kWh/km	5,00 kWh/h
Klimaanlage (E-Bus Klimaanlage):	9 kW	50%	0,233 kWh/km	2,25 kWh/h
Leistung Heizung Heizungsanlage HO-Bus ohne OL:	19 kW	50%	0,494 kWh/km	4,78 kWh/h
Gesamtenergiebedarf sonstige Verbraucher:			**1,01 kWh/km**	**9,78 kWh/h**

Hinweis: Da Klimaanlage und Heizung nie zeitgleich in Betrieb genommen werden, wird der energetisch intensivere Verbraucher für die Berechnung des Energiebedarfs herangezogen. Maßgebend im betrachteten Fall ist die Heizung.

Gesamtenergiebedarf Elektrobus elektrischer Heizung (Worst Case Betrachtung):	**1,78 kWh/km**	**9,78 kWh/h**

I.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

I.4.1 Simulation Energieverbrauch

Eingangsparameter

Umlauf:	7/2-U 21 / L1-2-4-7-Mo-Fr	
Szenario:	Soll-Fahrplan	
Fahrzeug:	Gelenkbus	18 m
Fahrzeugdaten:		
Leistung ab Batterie für Antrieb:	133 kW	
ausgewählte Antriebsart:	Zentralmotor	
Anlagenwirkungsgrad elektr./mechan. des Antriebs inkl. Rekuperation:	0,75	
Antriebsleistung für leeres Fahrzeug:	100 kW	
Leistungsabforderung durch Beschleunigung:	100%	
Leergewicht Fahrzeug:	18.000 kg	
zulässiges Gesamtgewicht Fahrzeug:	28.000 kg	
Betriebsdaten:		
Ø Besetzungsgrad:	3 /4	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	16,1 km/h	
Ø Geschwindigkeit gemessen:	19,0 km/h	

Berechnung Energiebedarf

	Verbrauch Strecke
Energiebedarf leeres Fahrzeug:	
Energiebedarf leeres Fahrzeug mit 18.000 kg:	0,423 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,090 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,081 kWh/km
Gesamtenergiebedarf leeres Fahrzeug:	**0,594 kWh/km**

Energiebedarf Fahrgastbeförderung:	
Energiebedarf Fahrgastbeförderung bei Ø Auslastung 3/4 bzw. 7.083 kg:	0,166 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,035 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,032 kWh/km
Gesamtenergiebedarf Fahrgastbeförderung:	**0,234 kWh/km**

Energiebedarf sonstige Verbraucher:

	Leistung	Nutzung je Tag	Verbrauch Strecke	Verbrauch Wendepunkt
Nebenverbraucher:	10 kW	100%	0,570 kWh/km	5,00 kWh/h
Klimaanlage (E-Bus Klimaanlage):	9 kW	50%	0,257 kWh/km	2,25 kWh/h
Leistung Heizung Heizungsanlage HO-Bus ohne OL:	19 kW	50%	0,545 kWh/km	4,78 kWh/h

Hinweis: Da Klimaanlage und Heizung nie zeitgleich in Betrieb genommen werden, wird der energetisch intensivere Verbraucher für die Berechnung des Energiebedarfs herangezogen. Maßgebend im betrachtenten Fall ist die Heizung.

Gesamtenergiebedarf sonstige Verbraucher:	**1,12 kWh/km**	**9,78 kWh/h**
Gesamtenergiebedarf Elektrobus elektrischer Heizung (Worst Case Betrachtung):	**1,94 kWh/km**	**9,78 kWh/h**

I.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

I.4.1 Simulation Energieverbrauch

Eingangsparameter

Umlauf:	7/2-U 29 -75/ L1-7-Mo-Fr	
Szenario:	Soll-Fahrplan	
Fahrzeug:	Gelenkbus	18 m
Fahrzeugdaten:		
Leistung ab Batterie für Antrieb:	133 kW	
ausgewählte Antriebsart:	Zentralmotor	
Anlagenwirkungsgrad elektr./mechan. des Antriebs inkl. Rekuperation:	0,75	
Antriebsleistung für leeres Fahrzeug:	100 kW	
Leistungsabforderung durch Beschleunigung:	100%	
Leergewicht Fahrzeug:	18.000 kg	
zulässiges Gesamtgewicht Fahrzeug:	28.000 kg	
Betriebsdaten:		
Ø Besetzungsgrad:	3 /4	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	19,8 km/h	
Ø Geschwindigkeit gemessen:	19,0 km/h	

Berechnung Energiebedarf

	Verbrauch Strecke
Energiebedarf leeres Fahrzeug:	
Energiebedarf leeres Fahrzeug mit 18.000 kg:	0,382 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,090 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,081 kWh/km
Gesamtenergiebedarf leeres Fahrzeug:	**0,553 kWh/km**

Energiebedarf Fahrgastbeförderung:	
Energiebedarf Fahrgastbeförderung bei Ø Auslastung 3/4 bzw. 7.083 kg:	0,150 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,035 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,032 kWh/km
Gesamtenergiebedarf Fahrgastbeförderung:	**0,218 kWh/km**

Energiebedarf sonstige Verbraucher:

	Leistung	Nutzung je Tag	Verbrauch Strecke	Verbrauch Wendepunkt
Nebenverbraucher:	10 kW	100%	0,516 kWh/km	5,00 kWh/h
Klimaanlage (E-Bus Klimaanlage):	9 kW	50%	0,232 kWh/km	2,25 kWh/h
Leistung Heizung Heizungsanlage HO-Bus ohne OL:	19 kW	50%	0,492 kWh/km	4,78 kWh/h
Gesamtenergiebedarf sonstige Verbraucher:			**1,01 kWh/km**	**9,78 kWh/h**

Hinweis: Da Klimaanlage und Heizung nie zeitgleich in Betrieb genommen werden, wird der energetisch intensivere Verbraucher für die Berechnung des Energiebedarfs herangezogen. Maßgebend im betrachteten Fall ist die Heizung.

Gesamtenergiebedarf Elektrobus elektrischer Heizung (Worst Case Betrachtung):	**1,78 kWh/km**	**9,78 kWh/h**

I.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

I.4.1 Simulation Energieverbrauch

Eingangsparameter

Umlauf:	7/2-U 34 / L1-2-4-7-Mo-Fr	
Szenario:	Soll-Fahrplan	
Fahrzeug:	Gelenkbus	18 m
Fahrzeugdaten:		
Leistung ab Batterie für Antrieb:	133 kW	
ausgewählte Antriebsart:	Zentralmotor	
Anlagenwirkungsgrad elektr./mechan. des Antriebs inkl. Rekuperation:	0,75	
Antriebsleistung für leeres Fahrzeug:	100 kW	
Leistungsabforderung durch Beschleunigung:	100%	
Leergewicht Fahrzeug:	18.000 kg	
zulässiges Gesamtgewicht Fahrzeug:	28.000 kg	
Betriebsdaten:		
Ø Besetzungsgrad:	3 /4	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	18,9 km/h	
Ø Geschwindigkeit gemessen:	19,0 km/h	

Berechnung Energiebedarf

	Verbrauch Strecke
Energiebedarf leeres Fahrzeug:	
Energiebedarf leeres Fahrzeug mit 18.000 kg:	0,391 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,090 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,081 kWh/km
Gesamtenergiebedarf leeres Fahrzeug:	**0,562 kWh/km**

Energiebedarf Fahrgastbeförderung:	
Energiebedarf Fahrgastbeförderung bei Ø Auslastung 3/4 bzw. 7.083 kg:	0,154 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,035 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,032 kWh/km
Gesamtenergiebedarf Fahrgastbeförderung:	**0,221 kWh/km**

Energiebedarf sonstige Verbraucher:

	Leistung	Nutzung je Tag	Verbrauch Strecke	Verbrauch Wendepunkt
Nebenverbraucher:	10 kW	100%	0,528 kWh/km	5,00 kWh/h
Klimaanlage (E-Bus Klimaanlage):	9 kW	50%	0,238 kWh/km	2,25 kWh/h
Leistung Heizung Heizungsanlage HO-Bus ohne OL:	19 kW	50%	0,505 kWh/km	4,78 kWh/h

Hinweis: Da Klimaanlage und Heizung nie zeitgleich in Betrieb genommen werden, wird der energetisch intensivere Verbraucher für die Berechnung des Energiebedarfs herangezogen. Maßgebend im betrachteten Fall ist die Heizung.

Gesamtenergiebedarf sonstige Verbraucher:	**1,03 kWh/km**	**9,78 kWh/h**
Gesamtenergiebedarf Elektrobus elektrischer Heizung (Worst Case Betrachtung):	**1,82 kWh/km**	**9,78 kWh/h**

I.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

I.4.1 Simulation Energieverbrauch

Eingangsparameter

Umlauf:	7/2-U 37 / L2-7-Mo-Fr	
Szenario:	Soll-Fahrplan	
Fahrzeug:	Gelenkbus	18 m
Fahrzeugdaten:		
Leistung ab Batterie für Antrieb:	133 kW	
ausgewählte Antriebsart:	Zentralmotor	
Anlagenwirkungsgrad elektr./mechan. des Antriebs inkl. Rekuperation:	0,75	
Antriebsleistung für leeres Fahrzeug:	100 kW	
Leistungsabforderung durch Beschleunigung:	100%	
Leergewicht Fahrzeug:	18.000 kg	
zulässiges Gesamtgewicht Fahrzeug:	28.000 kg	
Betriebsdaten:		
Ø Besetzungsgrad:	3 /4	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	19,4 km/h	
Ø Geschwindigkeit gemessen:	19,0 km/h	

Berechnung Energiebedarf

	Verbrauch Strecke
Energiebedarf leeres Fahrzeug:	
Energiebedarf leeres Fahrzeug mit 18.000 kg:	0,386 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,090 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,081 kWh/km
Gesamtenergiebedarf leeres Fahrzeug:	**0,557 kWh/km**

Energiebedarf Fahrgastbeförderung:	
Energiebedarf Fahrgastbeförderung bei Ø Auslastung 3/4 bzw. 7.083 kg:	0,152 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,035 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,032 kWh/km
Gesamtenergiebedarf Fahrgastbeförderung:	**0,219 kWh/km**

Energiebedarf sonstige Verbraucher:

	Leistung	Nutzung je Tag	Verbrauch Strecke	Verbrauch Wendepunkt
Nebenverbraucher:	10 kW	100%	0,521 kWh/km	5,00 kWh/h
Klimaanlage (E-Bus Klimaanlage):	9 kW	50%	0,234 kWh/km	2,25 kWh/h
Leistung Heizung Heizungsanlage HO-Bus ohne OL:	19 kW	50%	0,497 kWh/km	4,78 kWh/h

Hinweis: Da Klimaanlage und Heizung nie zeitgleich in Betrieb genommen werden, wird der energetisch intensivere Verbraucher für die Berechnung des Energiebedarfs herangezogen. Maßgebend im betrachteten Fall ist die Heizung.

Gesamtenergiebedarf sonstige Verbraucher:	**1,02 kWh/km**	**9,78 kWh/h**
Gesamtenergiebedarf Elektrobus elektrischer Heizung (Worst Case Betrachtung):	**1,79 kWh/km**	**9,78 kWh/h**

I.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

I.4.1 Simulation Energieverbrauch

Eingangsparameter

Umlauf:	7/2-U 38 / L2-7-Mo-Fr	
Szenario:	Soll-Fahrplan	
Fahrzeug:	Gelenkbus	18 m
Fahrzeugdaten:		
Leistung ab Batterie für Antrieb:	133 kW	
ausgewählte Antriebsart:	Zentralmotor	
Anlagenwirkungsgrad elektr./mechan. des Antriebs inkl. Rekuperation:	0,75	
Antriebsleistung für leeres Fahrzeug:	100 kW	
Leistungsabforderung durch Beschleunigung:	100%	
Leergewicht Fahrzeug:	18.000 kg	
zulässiges Gesamtgewicht Fahrzeug:	28.000 kg	
Betriebsdaten:		
Ø Besetzungsgrad:	3 /4	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	19,1 km/h	
Ø Geschwindigkeit gemessen:	19,0 km/h	

Berechnung Energiebedarf

	Verbrauch Strecke
Energiebedarf leeres Fahrzeug:	
Energiebedarf leeres Fahrzeug mit 18.000 kg:	0,390 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,090 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,081 kWh/km
Gesamtenergiebedarf leeres Fahrzeug:	**0,561 kWh/km**
Energiebedarf Fahrgastbeförderung:	
Energiebedarf Fahrgastbeförderung bei Ø Auslastung 3/4 bzw. 7.083 kg:	0,153 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,035 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,032 kWh/km
Gesamtenergiebedarf Fahrgastbeförderung:	**0,221 kWh/km**

Energiebedarf sonstige Verbraucher:

	Leistung	Nutzung je Tag	Verbrauch Strecke	Verbrauch Wendepunkt
Nebenverbraucher:	10 kW	100%	0,526 kWh/km	5,00 kWh/h
Klimaanlage (E-Bus Klimaanlage):	9 kW	50%	0,237 kWh/km	2,25 kWh/h
Leistung Heizung Heizungsanlage HO-Bus ohne OL:	19 kW	50%	0,502 kWh/km	4,78 kWh/h

Hinweis: Da Klimaanlage und Heizung nie zeitgleich in Betrieb genommen werden, wird der energetisch intensivere Verbraucher für die Berechnung des Energiebedarfs herangezogen. Maßgebend im betrachteten Fall ist die Heizung.

Gesamtenergiebedarf sonstige Verbraucher:	**1,03 kWh/km**	**9,78 kWh/h**
Gesamtenergiebedarf Elektrobus elektrischer Heizung (Worst Case Betrachtung):	**1,81 kWh/km**	**9,78 kWh/h**

I.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

I.4.1 Simulation Energieverbrauch

Eingangsparameter

Umlauf:	7/2-U 43 / L1-4-7-Mo-Fr	
Szenario:	Soll-Fahrplan	
Fahrzeug:	Gelenkbus	18 m
Fahrzeugdaten:		
Leistung ab Batterie für Antrieb:	133 kW	
ausgewählte Antriebsart:	Zentralmotor	
Anlagenwirkungsgrad elektr./mechan. des Antriebs inkl. Rekuperation:	0,75	
Antriebsleistung für leeres Fahrzeug:	100 kW	
Leistungsabforderung durch Beschleunigung:	100%	
Leergewicht Fahrzeug:	18.000 kg	
zulässiges Gesamtgewicht Fahrzeug:	28.000 kg	
Betriebsdaten:		
Ø Besetzungsgrad:	3 /4	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	15,8 km/h	
Ø Geschwindigkeit gemessen:	19,0 km/h	

Berechnung Energiebedarf

	Verbrauch Strecke
Energiebedarf leeres Fahrzeug:	
Energiebedarf leeres Fahrzeug mit 18.000 kg:	0,426 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,090 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,081 kWh/km
Gesamtenergiebedarf leeres Fahrzeug:	**0,597 kWh/km**
Energiebedarf Fahrgastbeförderung:	
Energiebedarf Fahrgastbeförderung bei Ø Auslastung 3/4 bzw. 7.083 kg:	0,168 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,035 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,032 kWh/km
Gesamtenergiebedarf Fahrgastbeförderung:	**0,235 kWh/km**

Energiebedarf sonstige Verbraucher:

	Leistung	Nutzung je Tag	Verbrauch Strecke	Verbrauch Wendepunkt
Nebenverbraucher:	10 kW	100%	0,575 kWh/km	5,00 kWh/h
Klimaanlage (E-Bus Klimaanlage):	9 kW	50%	0,259 kWh/km	2,25 kWh/h
Leistung Heizung Heizungsanlage HO-Bus ohne OL:	19 kW	50%	0,549 kWh/km	4,78 kWh/h

Hinweis: Da Klimaanlage und Heizung nie zeitgleich in Betrieb genommen werden, wird der energetisch intensivere Verbraucher für die Berechnung des Energiebedarfs herangezogen. Maßgebend im betrachtenten Fall ist die Heizung.

Gesamtenergiebedarf sonstige Verbraucher:	**1,12 kWh/km**	**9,78 kWh/h**
Gesamtenergiebedarf Elektrobus elektrischer Heizung (Worst Case Betrachtung):	**1,96 kWh/km**	**9,78 kWh/h**

I.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

I.4.1 Simulation Energieverbrauch

Eingangsparameter

Umlauf:	7/2-U 44 / L6-7-Mo-Fr	
Szenario:	Soll-Fahrplan	
Fahrzeug:	Gelenkbus	18 m
Fahrzeugdaten:		
Leistung ab Batterie für Antrieb:	133 kW	
ausgewählte Antriebsart:	Zentralmotor	
Anlagenwirkungsgrad elektr./mechan. des Antriebs inkl. Rekuperation:	0,75	
Antriebsleistung für leeres Fahrzeug:	100 kW	
Leistungsabforderung durch Beschleunigung:	100%	
Leergewicht Fahrzeug:	18.000 kg	
zulässiges Gesamtgewicht Fahrzeug:	28.000 kg	
Betriebsdaten:		
Ø Besetzungsgrad:	3 /4	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	17,9 km/h	
Ø Geschwindigkeit gemessen:	19,0 km/h	

Berechnung Energiebedarf

	Verbrauch Strecke
Energiebedarf leeres Fahrzeug:	
Energiebedarf leeres Fahrzeug mit 18.000 kg:	0,402 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,090 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,081 kWh/km
Gesamtenergiebedarf leeres Fahrzeug:	**0,573 kWh/km**

Energiebedarf Fahrgastbeförderung:	
Energiebedarf Fahrgastbeförderung bei Ø Auslastung 3/4 bzw. 7.083 kg:	0,158 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,035 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,032 kWh/km
Gesamtenergiebedarf Fahrgastbeförderung:	**0,226 kWh/km**

Energiebedarf sonstige Verbraucher:

	Leistung	Nutzung je Tag	Verbrauch Strecke	Verbrauch Wendepunkt
Nebenverbraucher:	10 kW	100%	0,543 kWh/km	5,00 kWh/h
Klimaanlage (E-Bus Klimaanlage):	9 kW	50%	0,244 kWh/km	2,25 kWh/h
Leistung Heizung Heizungsanlage HO-Bus ohne OL:	19 kW	50%	0,518 kWh/km	4,78 kWh/h

Hinweis: Da Klimaanlage und Heizung nie zeitgleich in Betrieb genommen werden, wird der energetisch intensivere Verbraucher für die Berechnung des Energiebedarfs herangezogen. Maßgebend im betrachtenten Fall ist die Heizung.

Gesamtenergiebedarf sonstige Verbraucher:	**1,06 kWh/km**	**9,78 kWh/h**
Gesamtenergiebedarf Elektrobus elektrischer Heizung (Worst Case Betrachtung):	**1,86 kWh/km**	**9,78 kWh/h**

I.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

I.4.1 Simulation Energieverbrauch

Eingangsparameter

Umlauf:	7/2-U 45 / L2-7-Mo-Fr	
Szenario:	Soll-Fahrplan	
Fahrzeug:	Gelenkbus	18 m
Fahrzeugdaten:		
Leistung ab Batterie für Antrieb:	133 kW	
ausgewählte Antriebsart:	Zentralmotor	
Anlagenwirkungsgrad elektr./mechan. des Antriebs inkl. Rekuperation:	0,75	
Antriebsleistung für leeres Fahrzeug:	100 kW	
Leistungsabforderung durch Beschleunigung:	100%	
Leergewicht Fahrzeug:	18.000 kg	
zulässiges Gesamtgewicht Fahrzeug:	28.000 kg	
Betriebsdaten:		
Ø Besetzungsgrad:	3 /4	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	19,4 km/h	
Ø Geschwindigkeit gemessen:	19,0 km/h	

Berechnung Energiebedarf

	Verbrauch Strecke
Energiebedarf leeres Fahrzeug:	
Energiebedarf leeres Fahrzeug mit 18.000 kg:	0,386 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,090 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,081 kWh/km
Gesamtenergiebedarf leeres Fahrzeug:	**0,557 kWh/km**
Energiebedarf Fahrgastbeförderung:	
Energiebedarf Fahrgastbeförderung bei Ø Auslastung 3/4 bzw. 7.083 kg:	0,152 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,035 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,032 kWh/km
Gesamtenergiebedarf Fahrgastbeförderung:	**0,219 kWh/km**

Energiebedarf sonstige Verbraucher:

	Leistung	Nutzung je Tag	Verbrauch Strecke	Verbrauch Wendepunkt
Nebenverbraucher:	10 kW	100%	0,522 kWh/km	5,00 kWh/h
Klimaanlage (E-Bus Klimaanlage):	9 kW	50%	0,235 kWh/km	2,25 kWh/h
Leistung Heizung Heizungsanlage HO-Bus ohne OL:	19 kW	50%	0,498 kWh/km	4,78 kWh/h

Hinweis: Da Klimaanlage und Heizung nie zeitgleich in Betrieb genommen werden, wird der energetisch intensivere Verbraucher für die Berechnung des Energiebedarfs herangezogen. Maßgebend im betrachteten Fall ist die Heizung.

Gesamtenergiebedarf sonstige Verbraucher:	**1,02 kWh/km**	**9,78 kWh/h**
Gesamtenergiebedarf Elektrobus elektrischer Heizung (Worst Case Betrachtung):	**1,80 kWh/km**	**9,78 kWh/h**

I.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

I.4.1 Simulation Energieverbrauch

Eingangsparameter

Umlauf:	7/2-U 53 / L1-2-4-7-Mo-Fr	
Szenario:	Soll-Fahrplan	
Fahrzeug:	Gelenkbus	18 m
Fahrzeugdaten:		
Leistung ab Batterie für Antrieb:	133 kW	
ausgewählte Antriebsart:	Zentralmotor	
Anlagenwirkungsgrad elektr./mechan. des Antriebs inkl. Rekuperation:	0,75	
Antriebsleistung für leeres Fahrzeug:	100 kW	
Leistungsabforderung durch Beschleunigung:	100%	
Leergewicht Fahrzeug:	18.000 kg	
zulässiges Gesamtgewicht Fahrzeug:	28.000 kg	
Betriebsdaten:		
Ø Besetzungsgrad:	3 /4	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	18,6 km/h	
Ø Geschwindigkeit gemessen:	19,0 km/h	

Berechnung Energiebedarf

	Verbrauch Strecke
Energiebedarf leeres Fahrzeug:	
Energiebedarf leeres Fahrzeug mit 18.000 kg:	0,394 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,090 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,081 kWh/km
Gesamtenergiebedarf leeres Fahrzeug:	**0,565 kWh/km**

Energiebedarf Fahrgastbeförderung:	
Energiebedarf Fahrgastbeförderung bei Ø Auslastung 3/4 bzw. 7.083 kg:	0,155 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,035 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,032 kWh/km
Gesamtenergiebedarf Fahrgastbeförderung:	**0,222 kWh/km**

Energiebedarf sonstige Verbraucher:

	Leistung	Nutzung je Tag	Verbrauch Strecke	Verbrauch Wendepunkt
Nebenverbraucher:	10 kW	100%	0,532 kWh/km	5,00 kWh/h
Klimaanlage (E-Bus Klimaanlage):	9 kW	50%	0,239 kWh/km	2,25 kWh/h
Leistung Heizung Heizungsanlage HO-Bus ohne OL:	19 kW	50%	0,508 kWh/km	4,78 kWh/h

Hinweis: Da Klimaanlage und Heizung nie zeitgleich in Betrieb genommen werden, wird der energetisch intensivere Verbraucher für die Berechnung des Energiebedarfs herangezogen. Maßgebend im betrachteten Fall ist die Heizung.

Gesamtenergiebedarf sonstige Verbraucher:	**1,04 kWh/km**	**9,78 kWh/h**
Gesamtenergiebedarf Elektrobus elektrischer Heizung (Worst Case Betrachtung):	**1,83 kWh/km**	**9,78 kWh/h**

I.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

I.4.1 Simulation Energieverbrauch

Eingangsparameter

Umlauf:	7/2-U 57 / L7-Mo-Fr	
Szenario:	Soll-Fahrplan	
Fahrzeug:	Gelenkbus	18 m
Fahrzeugdaten:		
Leistung ab Batterie für Antrieb:	133 kW	
ausgewählte Antriebsart:	Zentralmotor	
Anlagenwirkungsgrad elektr./mechan. des Antriebs inkl. Rekuperation:	0,75	
Antriebsleistung für leeres Fahrzeug:	100 kW	
Leistungsabforderung durch Beschleunigung:	100%	
Leergewicht Fahrzeug:	18.000 kg	
zulässiges Gesamtgewicht Fahrzeug:	28.000 kg	
Betriebsdaten:		
Ø Besetzungsgrad:	3 /4	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	21,8 km/h	
Ø Geschwindigkeit gemessen:	19,0 km/h	

Berechnung Energiebedarf

	Verbrauch Strecke
Energiebedarf leeres Fahrzeug:	
Energiebedarf leeres Fahrzeug mit 18.000 kg:	0,363 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,090 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,081 kWh/km
Gesamtenergiebedarf leeres Fahrzeug:	**0,534 kWh/km**

Energiebedarf Fahrgastbeförderung:	
Energiebedarf Fahrgastbeförderung bei Ø Auslastung 3/4 bzw. 7.083 kg:	0,143 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,035 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,032 kWh/km
Gesamtenergiebedarf Fahrgastbeförderung:	**0,210 kWh/km**

Energiebedarf sonstige Verbraucher:

	Leistung	Nutzung je Tag	Verbrauch Strecke	Verbrauch Wendepunkt
Nebenverbraucher:	10 kW	100%	0,500 kWh/km	5,00 kWh/h
Klimaanlage (E-Bus Klimaanlage):	9 kW	50%	0,225 kWh/km	2,25 kWh/h
Leistung Heizung Heizungsanlage HO-Bus ohne OL:	19 kW	50%	0,478 kWh/km	4,78 kWh/h

Hinweis: Da Klimaanlage und Heizung nie zeitgleich in Betrieb genommen werden, wird der energetisch intensivere Verbraucher für die Berechnung des Energiebedarfs herangezogen. Maßgebend im betrachtenten Fall ist die Heizung.

Gesamtenergiebedarf sonstige Verbraucher:	**0,98 kWh/km**	**9,78 kWh/h**
Gesamtenergiebedarf Elektrobus elektrischer Heizung (Worst Case Betrachtung):	**1,72 kWh/km**	**9,78 kWh/h**

I.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

I.4.1 Simulation Energieverbrauch

Eingangsparameter

Umlauf:	7/2-U 58 / L7-11-Mo-Fr	
Szenario:	Soll-Fahrplan	
Fahrzeug:	Gelenkbus	18 m
Fahrzeugdaten:		
Leistung ab Batterie für Antrieb:	133 kW	
ausgewählte Antriebsart:	Zentralmotor	
Anlagenwirkungsgrad elektr./mechan. des Antriebs inkl. Rekuperation:	0,75	
Antriebsleistung für leeres Fahrzeug:	100 kW	
Leistungsabforderung durch Beschleunigung:	100%	
Leergewicht Fahrzeug:	18.000 kg	
zulässiges Gesamtgewicht Fahrzeug:	28.000 kg	
Betriebsdaten:		
Ø Besetzungsgrad:	3 /4	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	23,2 km/h	
Ø Geschwindigkeit gemessen:	19,0 km/h	

Berechnung Energiebedarf

	Verbrauch Strecke
Energiebedarf leeres Fahrzeug:	
Energiebedarf leeres Fahrzeug mit 18.000 kg:	0,351 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,090 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,081 kWh/km
Gesamtenergiebedarf leeres Fahrzeug:	**0,522 kWh/km**
Energiebedarf Fahrgastbeförderung:	
Energiebedarf Fahrgastbeförderung bei Ø Auslastung 3/4 bzw. 7.083 kg:	0,138 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,035 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,032 kWh/km
Gesamtenergiebedarf Fahrgastbeförderung:	**0,205 kWh/km**

Energiebedarf sonstige Verbraucher:

	Leistung	Nutzung je Tag	Verbrauch Strecke	Verbrauch Wendepunkt
Nebenverbraucher:	10 kW	100%	0,500 kWh/km	5,00 kWh/h
Klimaanlage (E-Bus Klimaanlage):	9 kW	50%	0,225 kWh/km	2,25 kWh/h
Leistung Heizung Heizungsanlage HO-Bus ohne OL:	19 kW	50%	0,478 kWh/km	4,78 kWh/h

Hinweis: Da Klimaanlage und Heizung nie zeitgleich in Betrieb genommen werden, wird der energetisch intensivere Verbraucher für die Berechnung des Energiebedarfs herangezogen. Maßgebend im betrachtenten Fall ist die Heizung.

Gesamtenergiebedarf sonstige Verbraucher:	**0,98 kWh/km**	**9,78 kWh/h**
Gesamtenergiebedarf Elektrobus elektrischer Heizung (Worst Case Betrachtung):	**1,70 kWh/km**	**9,78 kWh/h**

I.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

I.4.1 Simulation Energieverbrauch

Eingangsparameter

Umlauf:	7/2-U 62-91/ L2-7-Mo-Fr	
Szenario:	Soll-Fahrplan	
Fahrzeug:	Gelenkbus	18 m
Fahrzeugdaten:		
Leistung ab Batterie für Antrieb:	133 kW	
ausgewählte Antriebsart:	Zentralmotor	
Anlagenwirkungsgrad elektr./mechan. des Antriebs inkl. Rekuperation:	0,75	
Antriebsleistung für leeres Fahrzeug:	100 kW	
Leistungsabforderung durch Beschleunigung:	100%	
Leergewicht Fahrzeug:	18.000 kg	
zulässiges Gesamtgewicht Fahrzeug:	28.000 kg	
Betriebsdaten:		
Ø Besetzungsgrad:	3 /4	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	19,6 km/h	
Ø Geschwindigkeit gemessen:	19,0 km/h	

Berechnung Energiebedarf

	Verbrauch Strecke
Energiebedarf leeres Fahrzeug:	
Energiebedarf leeres Fahrzeug mit 18.000 kg:	0,385 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,090 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,081 kWh/km
Gesamtenergiebedarf leeres Fahrzeug:	**0,556 kWh/km**

Energiebedarf Fahrgastbeförderung:	
Energiebedarf Fahrgastbeförderung bei Ø Auslastung 3/4 bzw. 7.083 kg:	0,151 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,035 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,032 kWh/km
Gesamtenergiebedarf Fahrgastbeförderung:	**0,219 kWh/km**

Energiebedarf sonstige Verbraucher:

	Leistung	Nutzung je Tag	Verbrauch Strecke	Verbrauch Wendepunkt
Nebenverbraucher:	10 kW	100%	0,519 kWh/km	5,00 kWh/h
Klimaanlage (E-Bus Klimaanlage):	9 kW	50%	0,234 kWh/km	2,25 kWh/h
Leistung Heizung Heizungsanlage HO-Bus ohne OL:	19 kW	50%	0,496 kWh/km	4,78 kWh/h

Hinweis: Da Klimaanlage und Heizung nie zeitgleich in Betrieb genommen werden, wird der energetisch intensivere Verbraucher für die Berechnung des Energiebedarfs herangezogen. Maßgebend im betrachteten Fall ist die Heizung.

Gesamtenergiebedarf sonstige Verbraucher:	**1,02 kWh/km**	**9,78 kWh/h**
Gesamtenergiebedarf Elektrobus elektrischer Heizung (Worst Case Betrachtung):	**1,79 kWh/km**	**9,78 kWh/h**

II.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

II.4.1 Simulation Energieverbrauch

Eingangsparameter

Umlauf:	7/2-U 63-55 / L2-7-1-Mo-Fr
Szenario:	Soll-Fahrplan
Fahrzeug:	Doppelgelenkbus 24 m
Fahrzeugdaten:	
Leistung ab Batterie für Antrieb:	167 kW
ausgewählte Antriebsart:	Zentralmotor
Anlagenwirkungsgrad elektr./mechan. des Antriebs inkl. Rekuperation:	0,75
Antriebsleistung für leeres Fahrzeug:	125 kW
Leistungsabforderung durch Beschleunigung:	100%
Leergewicht Fahrzeug:	24.000 kg
zulässiges Gesamtgewicht Fahrzeug:	39.000 kg
Betriebsdaten:	
Ø Besetzungsgrad:	3 /4
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	20,9 km/h
Ø Geschwindigkeit gemessen:	19,0 km/h

Berechnung Energiebedarf

	Verbrauch Strecke
Energiebedarf leeres Fahrzeug:	
Energiebedarf leeres Fahrzeug mit 24.000 kg:	0,348 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,120 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,108 kWh/km
Gesamtenergiebedarf leeres Fahrzeug:	**0,576 kWh/km**

Energiebedarf Fahrgastbeförderung:	
Energiebedarf Fahrgastbeförderung bei Ø Auslastung 3/4 bzw. 10.625 kg:	0,154 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,053 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,048 kWh/km
Gesamtenergiebedarf Fahrgastbeförderung:	**0,255 kWh/km**

Energiebedarf sonstige Verbraucher:

	Leistung	Nutzung je Tag	Verbrauch Strecke	Verbrauch Wendepunkt
Nebenverbraucher:	15 kW	100%	0,753 kWh/km	7,50 kWh/h
Klimaanlage (E-Bus Klimaanlage):	9 kW	50%	0,226 kWh/km	2,25 kWh/h
Leistung Heizung Heizungsanlage HO-Bus ohne OL:	29 kW	50%	0,720 kWh/km	7,18 kWh/h

Hinweis: Da Klimaanlage und Heizung nie zeitgleich in Betrieb genommen werden, wird der energetisch intensivere Verbraucher für die Berechnung des Energiebedarfs herangezogen. Maßgebend im betrachtenten Fall ist die Heizung.

Gesamtenergiebedarf sonstige Verbraucher:	**1,47 kWh/km**	**14,68 kWh/h**

Gesamtenergiebedarf Elektrobus elektrischer Heizung (Worst Case Betrachtung):	**2,30 kWh/km**	**14,68 kWh/h**

II.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

II.4.1 Simulation Energieverbrauch

Eingangsparameter

Umlauf:	7/2-U 67 / L2-7-9-12-Mo-Fr
Szenario:	Soll-Fahrplan
Fahrzeug:	Doppelgelenkbus 24 m
Fahrzeugdaten:	
Leistung ab Batterie für Antrieb:	167 kW
ausgewählte Antriebsart:	Zentralmotor
Anlagenwirkungsgrad elektr./mechan. des Antriebs inkl. Rekuperation:	0,75
Antriebsleistung für leeres Fahrzeug:	125 kW
Leistungsabforderung durch Beschleunigung:	100%
Leergewicht Fahrzeug:	24.000 kg
zulässiges Gesamtgewicht Fahrzeug:	39.000 kg
Betriebsdaten:	
Ø Besetzungsgrad:	3 /4
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	19,4 km/h
Ø Geschwindigkeit gemessen:	19,0 km/h

Berechnung Energiebedarf

	Verbrauch Strecke
Energiebedarf leeres Fahrzeug:	
Energiebedarf leeres Fahrzeug mit 24.000 kg:	0,362 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,120 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,108 kWh/km
Gesamtenergiebedarf leeres Fahrzeug:	**0,590 kWh/km**

Energiebedarf Fahrgastbeförderung:	
Energiebedarf Fahrgastbeförderung bei Ø Auslastung 3/4 bzw. 10.625 kg:	0,160 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,053 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,048 kWh/km
Gesamtenergiebedarf Fahrgastbeförderung:	**0,261 kWh/km**

Energiebedarf sonstige Verbraucher:

	Leistung	Nutzung je Tag	Verbrauch Strecke	Verbrauch Wendepunkt
Nebenverbraucher:	15 kW	100%	0,781 kWh/km	7,50 kWh/h
Klimaanlage (E-Bus Klimaanlage):	9 kW	50%	0,234 kWh/km	2,25 kWh/h
Leistung Heizung Heizungsanlage HO-Bus ohne OL:	29 kW	50%	0,747 kWh/km	7,18 kWh/h
Gesamtenergiebedarf sonstige Verbraucher:			**1,53 kWh/km**	**14,68 kWh/h**

Hinweis: Da Klimaanlage und Heizung nie zeitgleich in Betrieb genommen werden, wird der energetisch intensivere Verbraucher für die Berechnung des Energiebedarfs herangezogen. Maßgebend im betrachtenten Fall ist die Heizung.

Gesamtenergiebedarf Elektrobus elektrischer Heizung (Worst Case Betrachtung):	**2,38 kWh/km**	**14,68 kWh/h**

II.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

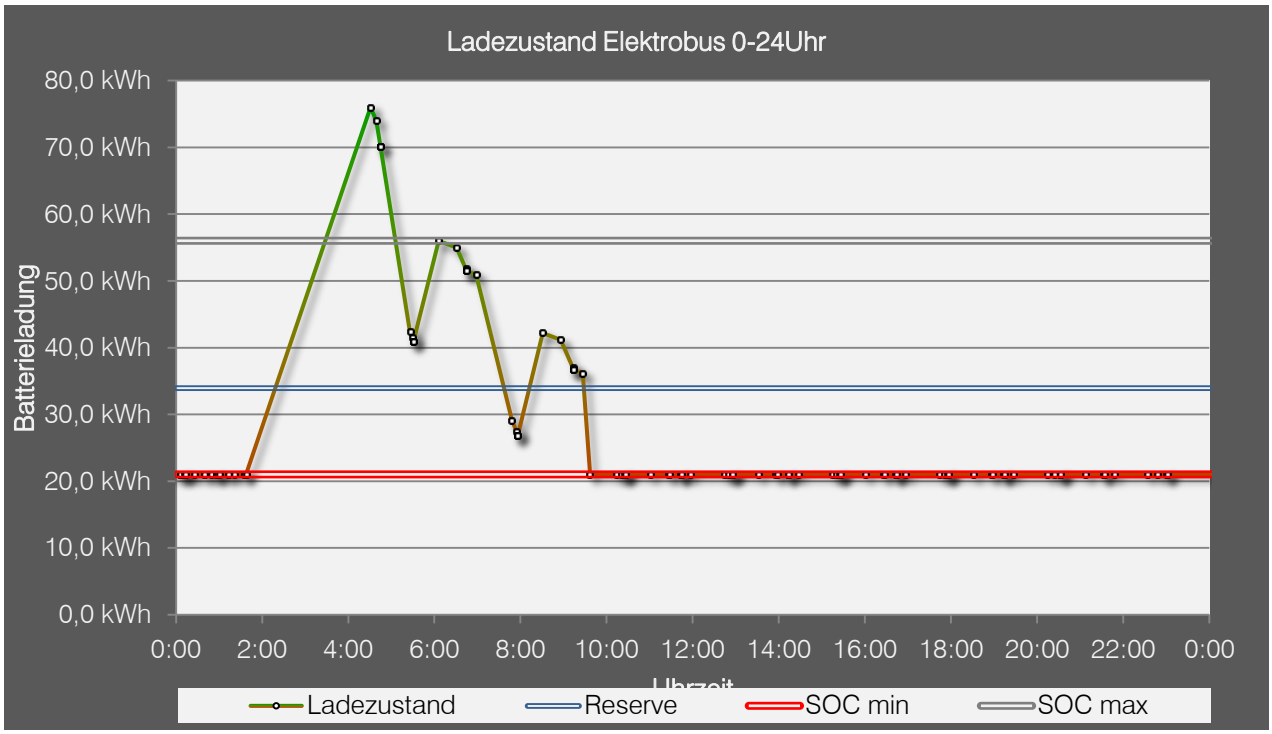
II.4.2 Auslegung Speicher

Betrachtungsgrundlage	
Umlauf:	**7/2-U 11 / L1-2-4-7-Mo-Fr**
Szenario:	Soll-Fahrplan
Fahrzeugkonfiguration:	HybridObus - Partielle Oberleitung + Endpunkt; Heizungsanlage HO-Bus ohne OL

Speicher		
Konfiguration Energiespeicher:	Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie	
Auslegung Energiespeicher (brutto):	**70 kWh**	
Nutzbare Energiemenge:		
SOC max:	56 kWh	80%
SOC min:	21 kWh	30%
Auslegung Energiespeicher (netto):	35 kWh	

Ladung auf der Strecke - Endpunkt (elektrisch):	0 kWh
Ladung auf der Strecke - partielle Oberleitung (elektrisch)*:	459 kWh
Ladung im Betriebshof (elektrisch):	55 kWh
Gesamt:	**523 kWh**

Simulation SOC-Verlauf im Umlauf



II.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

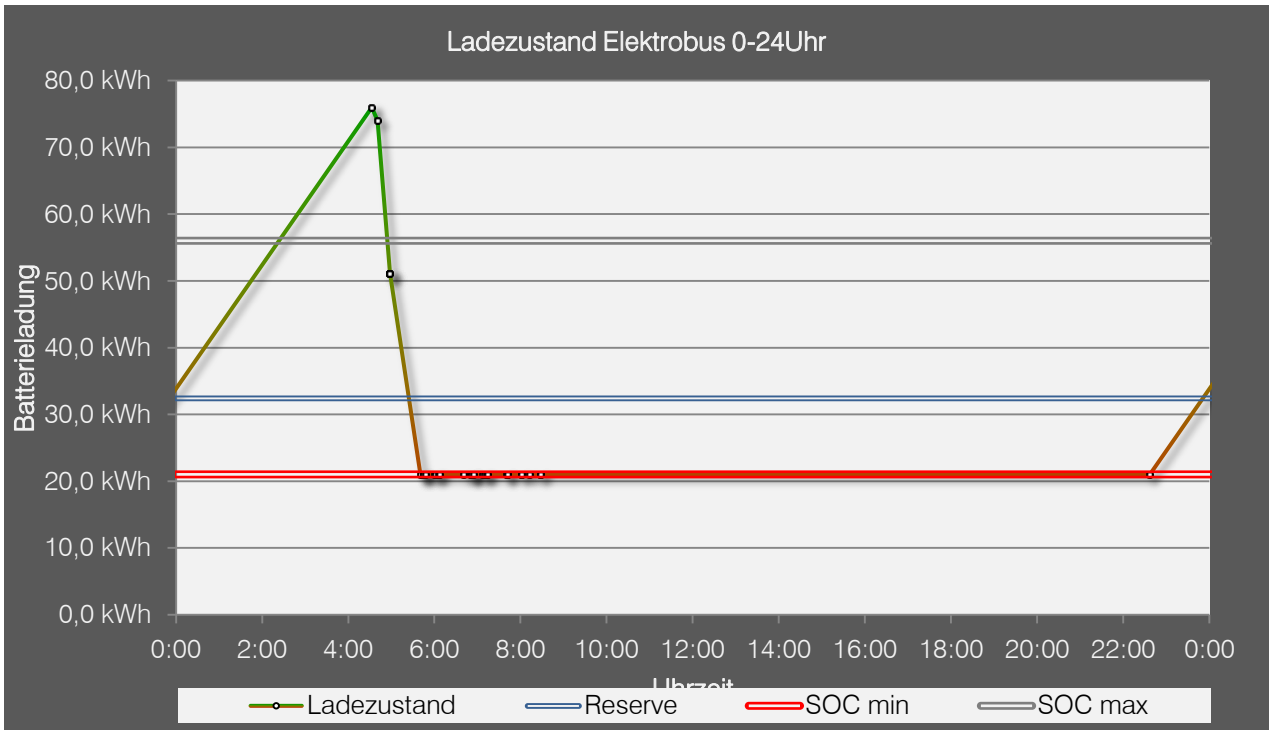
II.4.2 Auslegung Speicher

Betrachtungsgrundlage	
Umlauf:	**7/2-U 13 / L2-7-19-Mo-Fr**
Szenario:	Soll-Fahrplan
Fahrzeugkonfiguration:	HybridObus - Partielle Oberleitung + Endpunkt; Heizungsanlage HO-Bus ohne OL

Speicher		
Konfiguration Energiespeicher:	Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie	
Auslegung Energiespeicher (brutto):	**70 kWh**	
Nutzbare Energiemenge:		
SOC max:	56 kWh	80%
SOC min:	21 kWh	30%
Auslegung Energiespeicher (netto):	35 kWh	

Ladung auf der Strecke - Endpunkt (elektrisch):	0 kWh
Ladung auf der Strecke - partielle Oberleitung (elektrisch)*:	27 kWh
Ladung im Betriebshof (elektrisch):	55 kWh
Gesamt:	**99 kWh**

Simulation SOC-Verlauf im Umlauf



II.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

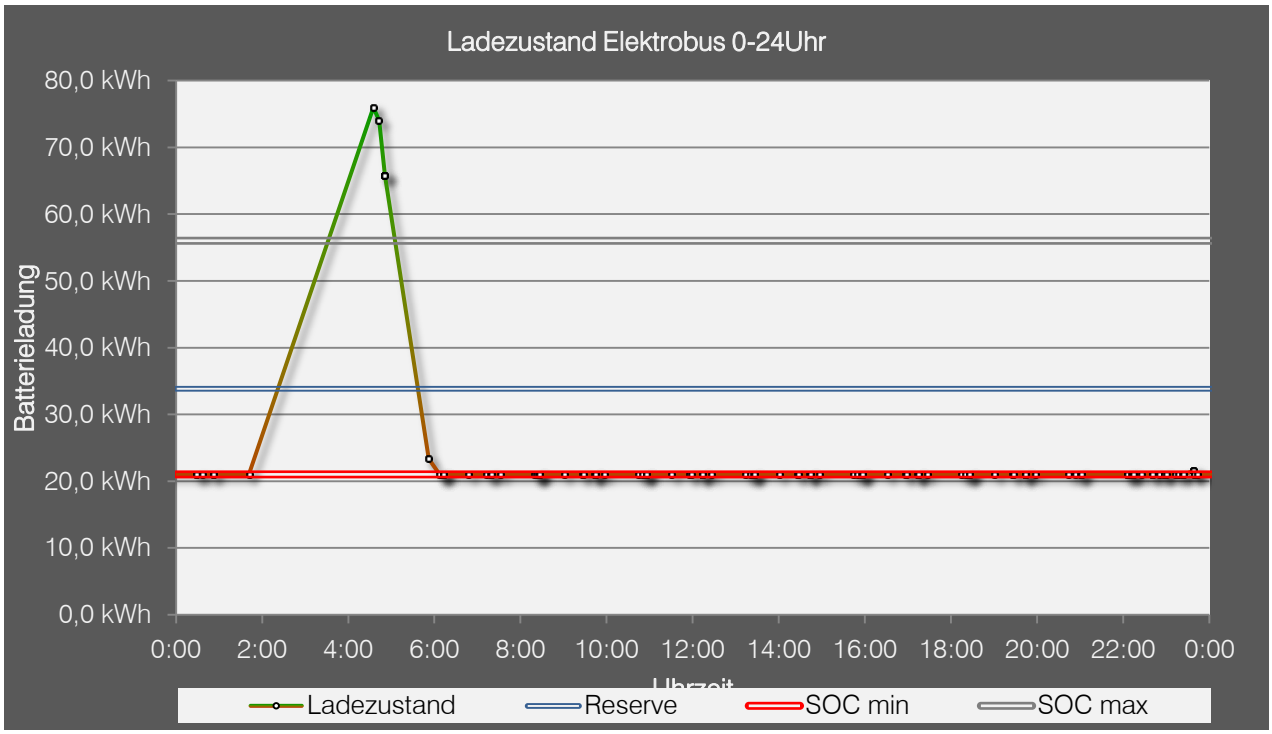
II.4.2 Auslegung Speicher

Betrachtungsgrundlage	
Umlauf:	**7/2-U 14 / L1-2-4-7-Mo-Fr**
Szenario:	Soll-Fahrplan
Fahrzeugkonfiguration:	HybridObus - Partielle Oberleitung + Endpunkt; Heizungsanlage HO-Bus ohne OL

Speicher		
Konfiguration Energiespeicher:	Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie	
Auslegung Energiespeicher (brutto):	**70 kWh**	
Nutzbare Energiemenge:		
SOC max:	56 kWh	80%
SOC min:	21 kWh	30%
Auslegung Energiespeicher (netto):	35 kWh	

Ladung auf der Strecke - Endpunkt (elektrisch):	0 kWh
Ladung auf der Strecke - partielle Oberleitung (elektrisch)*:	374 kWh
Ladung im Betriebshof (elektrisch):	55 kWh
Gesamt:	**434 kWh**

Simulation SOC-Verlauf im Umlauf



II.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

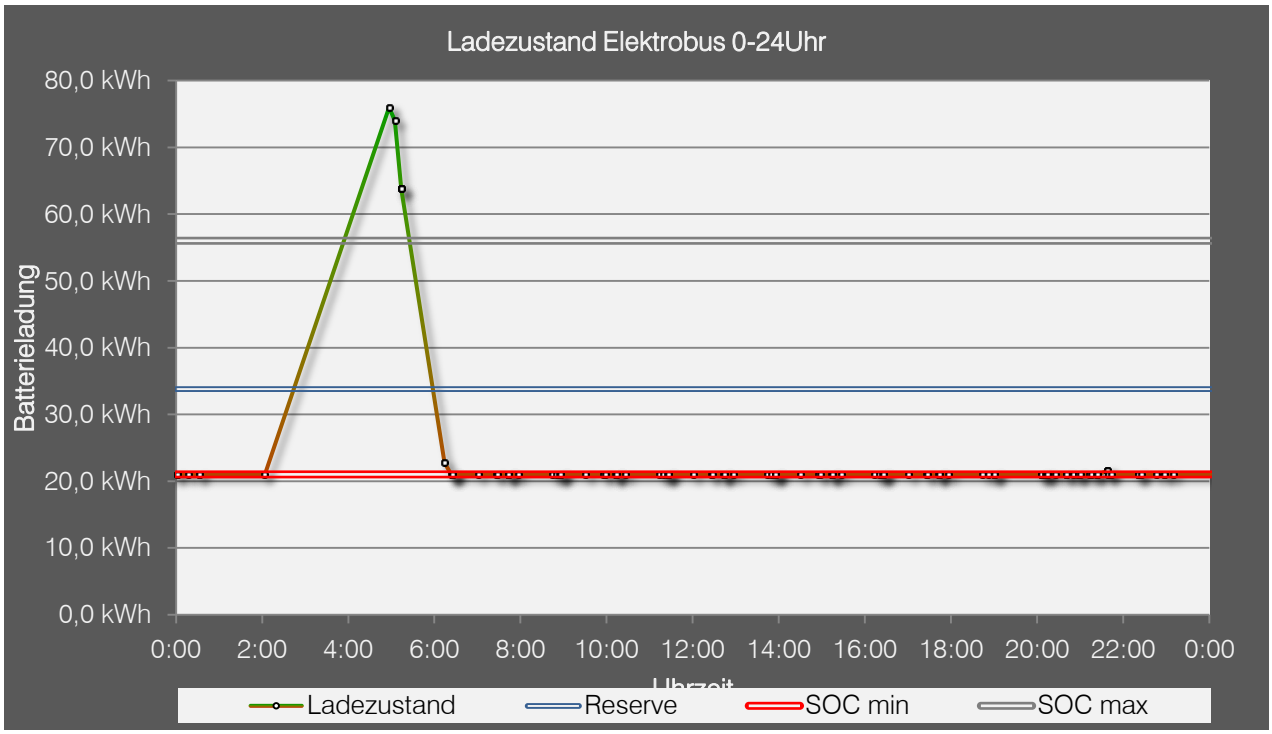
II.4.2 Auslegung Speicher

Betrachtungsgrundlage	
Umlauf:	**7/2-U 17 / L1-2-4-7-Mo-Fr**
Szenario:	Soll-Fahrplan
Fahrzeugkonfiguration:	HybridObus - Partielle Oberleitung + Endpunkt; Heizungsanlage HO-Bus ohne OL

Speicher		
Konfiguration Energiespeicher:	Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie	
Auslegung Energiespeicher (brutto):	**70 kWh**	
Nutzbare Energiemenge:		
SOC max:	56 kWh	80%
SOC min:	21 kWh	30%
Auslegung Energiespeicher (netto):	35 kWh	

Ladung auf der Strecke - Endpunkt (elektrisch):	0 kWh
Ladung auf der Strecke - partielle Oberleitung (elektrisch)*:	339 kWh
Ladung im Betriebshof (elektrisch):	55 kWh
Gesamt:	**421 kWh**

Simulation SOC-Verlauf im Umlauf



II.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

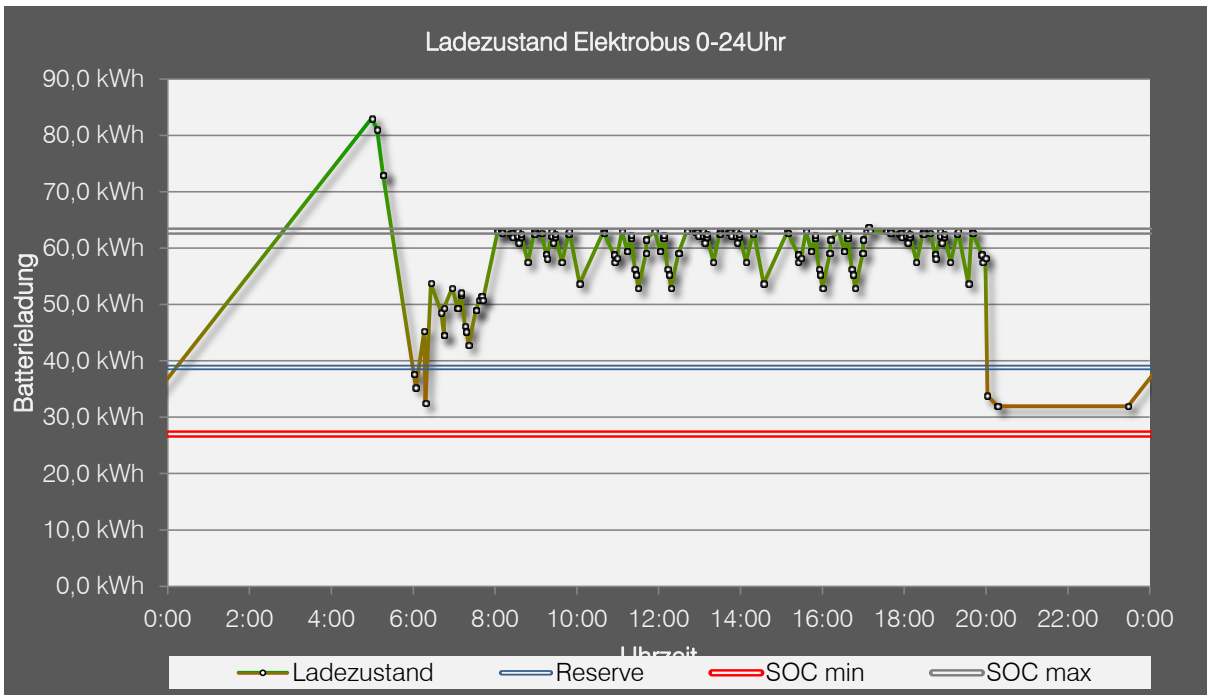
II.4.2 Auslegung Speicher

Betrachtungsgrundlage	
Umlauf:	**7/2-U 18 / L2-7-19-Mo-Fr**
Szenario:	Soll-Fahrplan
Fahrzeugkonfiguration:	HybridObus - Partielle Oberleitung + Endpunkt; Heizungsanlage HO-Bus ohne OL

Speicher		
Konfiguration Energiespeicher:	Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie	
Auslegung Energiespeicher (brutto):	**90 kWh**	
Nutzbare Energiemenge:		
SOC max:	63 kWh	70%
SOC min:	27 kWh	30%
Auslegung Energiespeicher (netto):	36 kWh	

Ladung auf der Strecke - Endpunkt (elektrisch):	112 kWh
Ladung auf der Strecke - partielle Oberleitung (elektrisch)*:	477 kWh
Ladung im Betriebshof (elektrisch):	51 kWh
Gesamt:	**640 kWh**

Simulation SOC-Verlauf im Umlauf



II.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

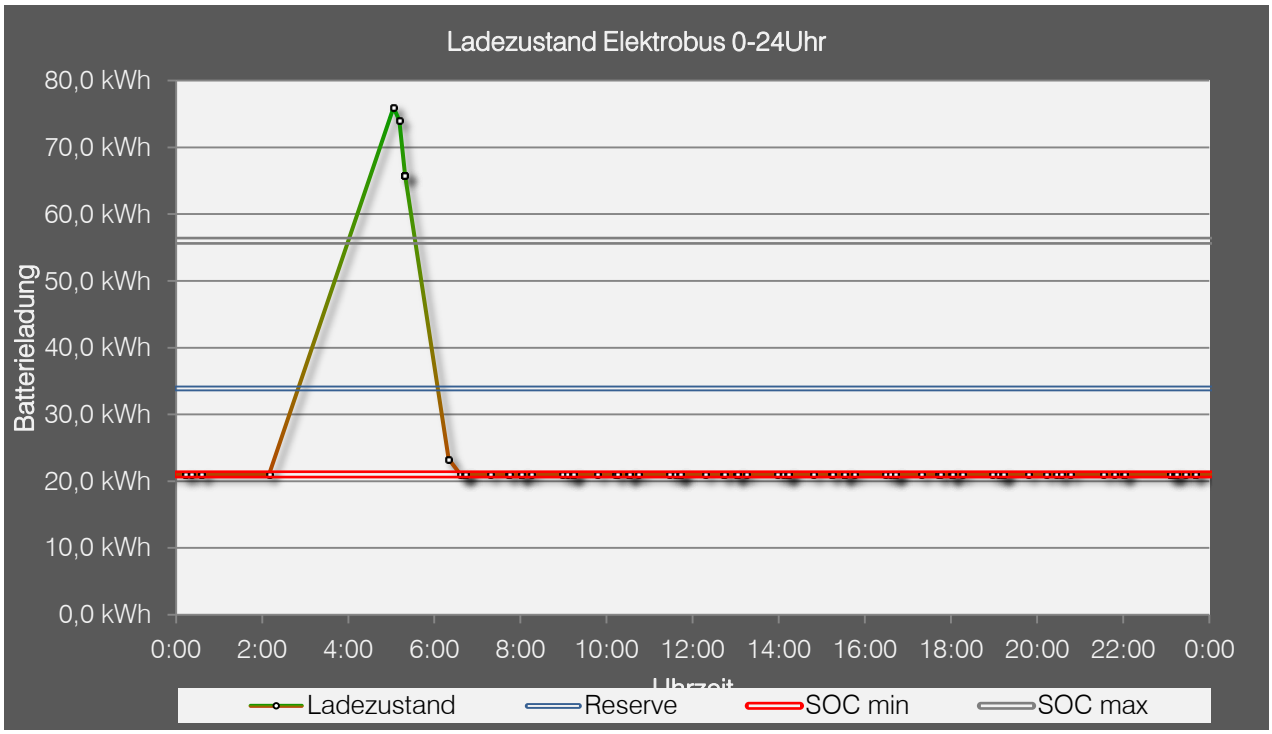
II.4.2 Auslegung Speicher

Betrachtungsgrundlage	
Umlauf:	**7/2-U 21 / L1-2-4-7-Mo-Fr**
Szenario:	Soll-Fahrplan
Fahrzeugkonfiguration:	HybridObus - Partielle Oberleitung + Endpunkt; Heizungsanlage HO-Bus ohne OL

Speicher		
Konfiguration Energiespeicher:	Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie	
Auslegung Energiespeicher (brutto):	**70 kWh**	
Nutzbare Energiemenge:		
SOC max:	56 kWh	80%
SOC min:	21 kWh	30%
Auslegung Energiespeicher (netto):	35 kWh	

Ladung auf der Strecke - Endpunkt (elektrisch):	0 kWh
Ladung auf der Strecke - partielle Oberleitung (elektrisch)*:	361 kWh
Ladung im Betriebshof (elektrisch):	55 kWh
Gesamt:	**425 kWh**

Simulation SOC-Verlauf im Umlauf



II.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

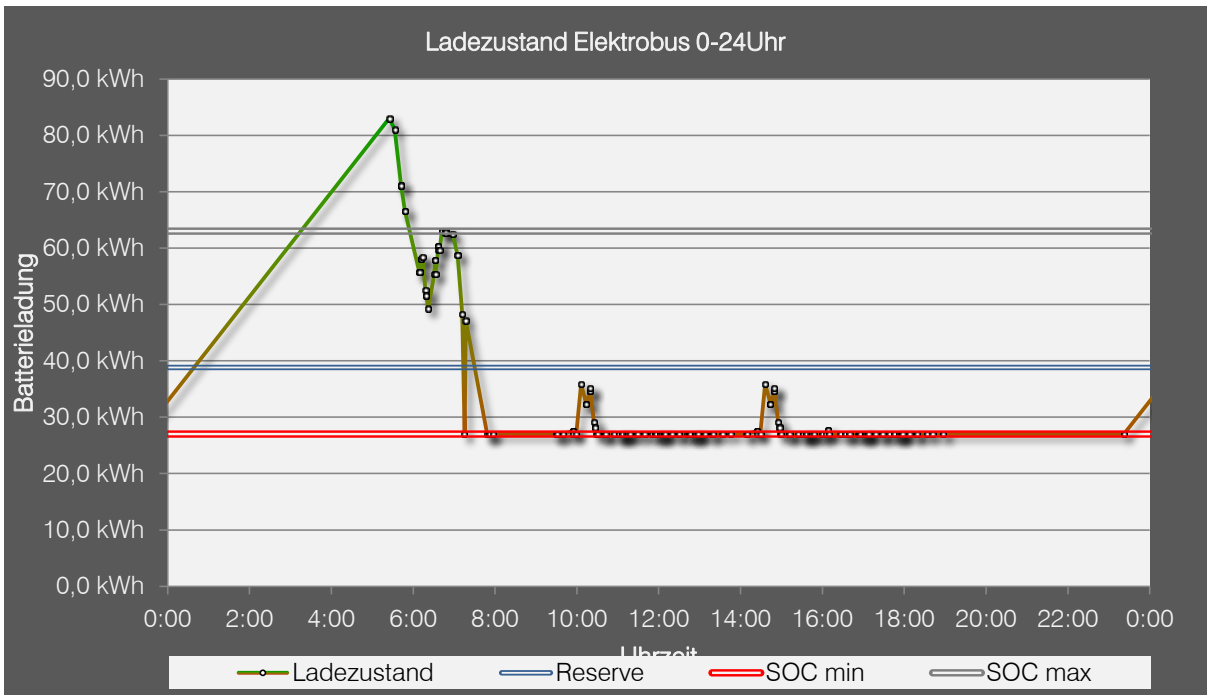
II.4.2 Auslegung Speicher

Betrachtungsgrundlage	
Umlauf:	**7/2-U 29 -75/ L1-7-Mo-Fr**
Szenario:	Soll-Fahrplan
Fahrzeugkonfiguration:	HybridObus - Partielle Oberleitung + Endpunkt; Heizungsanlage HO-Bus ohne OL

Speicher		
Konfiguration Energiespeicher:	Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie	
Auslegung Energiespeicher (brutto):	**90 kWh**	
Nutzbare Energiemenge:		
SOC max:	63 kWh	70%
SOC min:	27 kWh	30%
Auslegung Energiespeicher (netto):	36 kWh	

Ladung auf der Strecke - Endpunkt (elektrisch):	7 kWh
Ladung auf der Strecke - partielle Oberleitung (elektrisch)*:	314 kWh
Ladung im Betriebshof (elektrisch):	56 kWh
Gesamt:	**385 kWh**

Simulation SOC-Verlauf im Umlauf



II.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

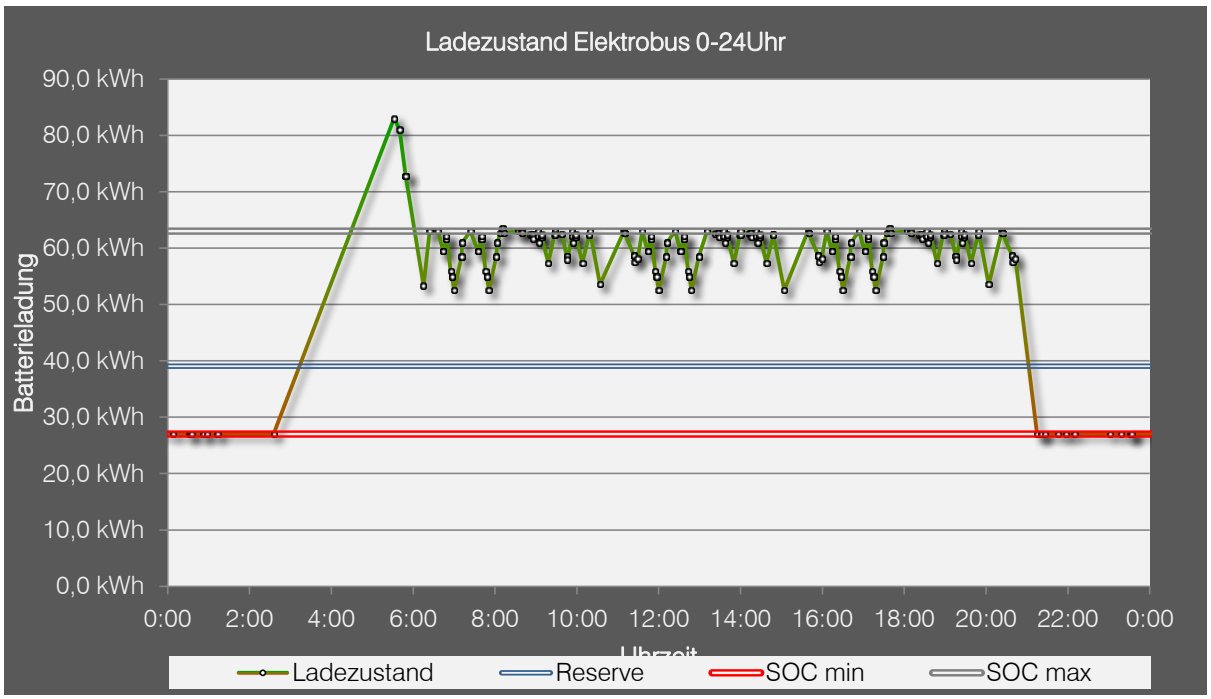
II.4.2 Auslegung Speicher

Betrachtungsgrundlage	
Umlauf:	**7/2-U 34 / L1-2-4-7-Mo-Fr**
Szenario:	Soll-Fahrplan
Fahrzeugkonfiguration:	HybridObus - Partielle Oberleitung + Endpunkt; Heizungsanlage HO-Bus ohne OL

Speicher		
Konfiguration Energiespeicher:	Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie	
Auslegung Energiespeicher (brutto):	**90 kWh**	
Nutzbare Energiemenge:		
SOC max:	63 kWh	70%
SOC min:	27 kWh	30%
Auslegung Energiespeicher (netto):	36 kWh	

Ladung auf der Strecke - Endpunkt (elektrisch):	100 kWh
Ladung auf der Strecke - partielle Oberleitung (elektrisch)*:	544 kWh
Ladung im Betriebshof (elektrisch):	56 kWh
Gesamt:	**709 kWh**

Simulation SOC-Verlauf im Umlauf



II.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

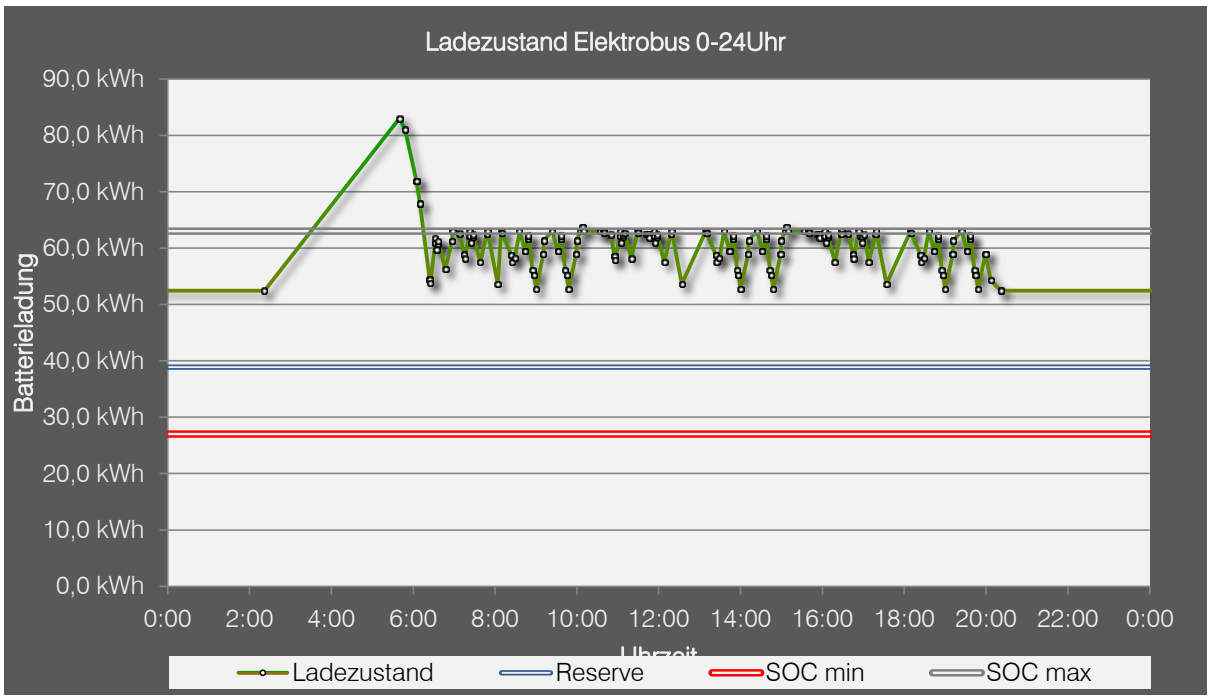
II.4.2 Auslegung Speicher

Betrachtungsgrundlage	
Umlauf:	**7/2-U 37 / L2-7-Mo-Fr**
Szenario:	Soll-Fahrplan
Fahrzeugkonfiguration:	HybridObus - Partielle Oberleitung + Endpunkt; Heizungsanlage HO-Bus ohne OL

Speicher		
Konfiguration Energiespeicher:	Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie	
Auslegung Energiespeicher (brutto):	**90 kWh**	
Nutzbare Energiemenge:		
SOC max:	63 kWh	70%
SOC min:	27 kWh	30%
Auslegung Energiespeicher (netto):	36 kWh	

Ladung auf der Strecke - Endpunkt (elektrisch):	78 kWh
Ladung auf der Strecke - partielle Oberleitung (elektrisch)*:	481 kWh
Ladung im Betriebshof (elektrisch):	31 kWh
Gesamt:	**589 kWh**

Simulation SOC-Verlauf im Umlauf



II.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

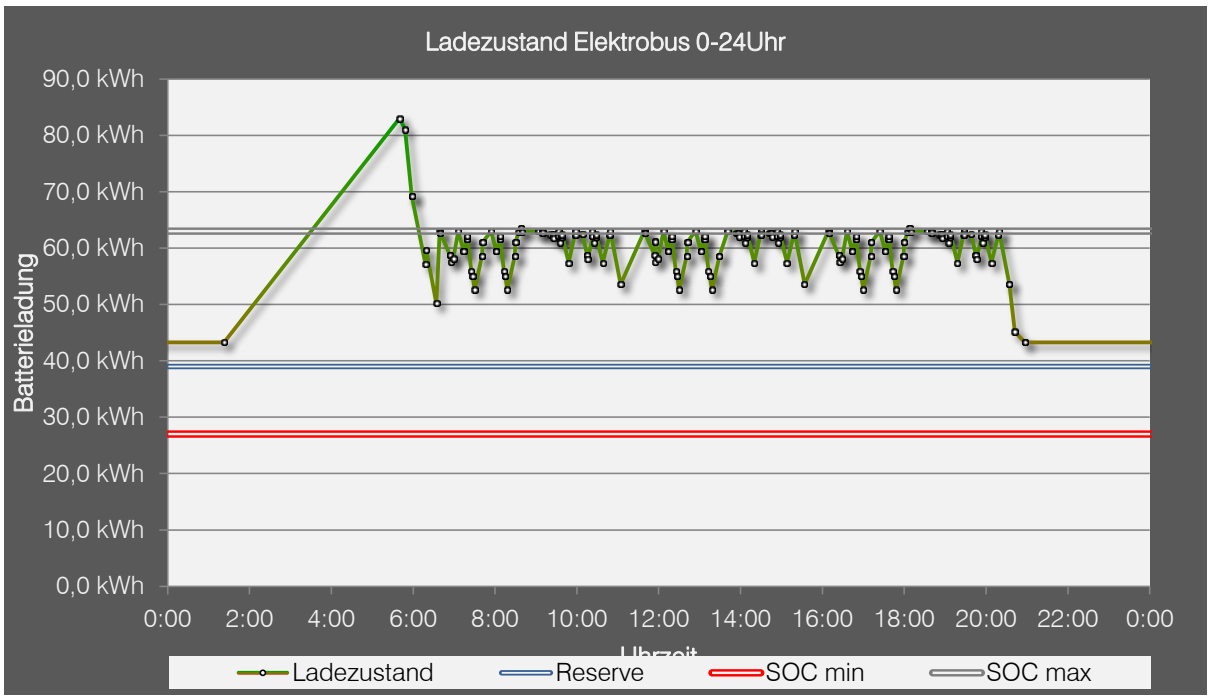
II.4.2 Auslegung Speicher

Betrachtungsgrundlage	
Umlauf:	**7/2-U 38 / L2-7-Mo-Fr**
Szenario:	Soll-Fahrplan
Fahrzeugkonfiguration:	HybridObus - Partielle Oberleitung + Endpunkt; Heizungsanlage HO-Bus ohne OL

Speicher		
Konfiguration Energiespeicher:	Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie	
Auslegung Energiespeicher (brutto):	**90 kWh**	
Nutzbare Energiemenge:		
SOC max:	63 kWh	70%
SOC min:	27 kWh	30%
Auslegung Energiespeicher (netto):	36 kWh	

Ladung auf der Strecke - Endpunkt (elektrisch):	94 kWh
Ladung auf der Strecke - partielle Oberleitung (elektrisch)*:	485 kWh
Ladung im Betriebshof (elektrisch):	40 kWh
Gesamt:	**618 kWh**

Simulation SOC-Verlauf im Umlauf



II.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

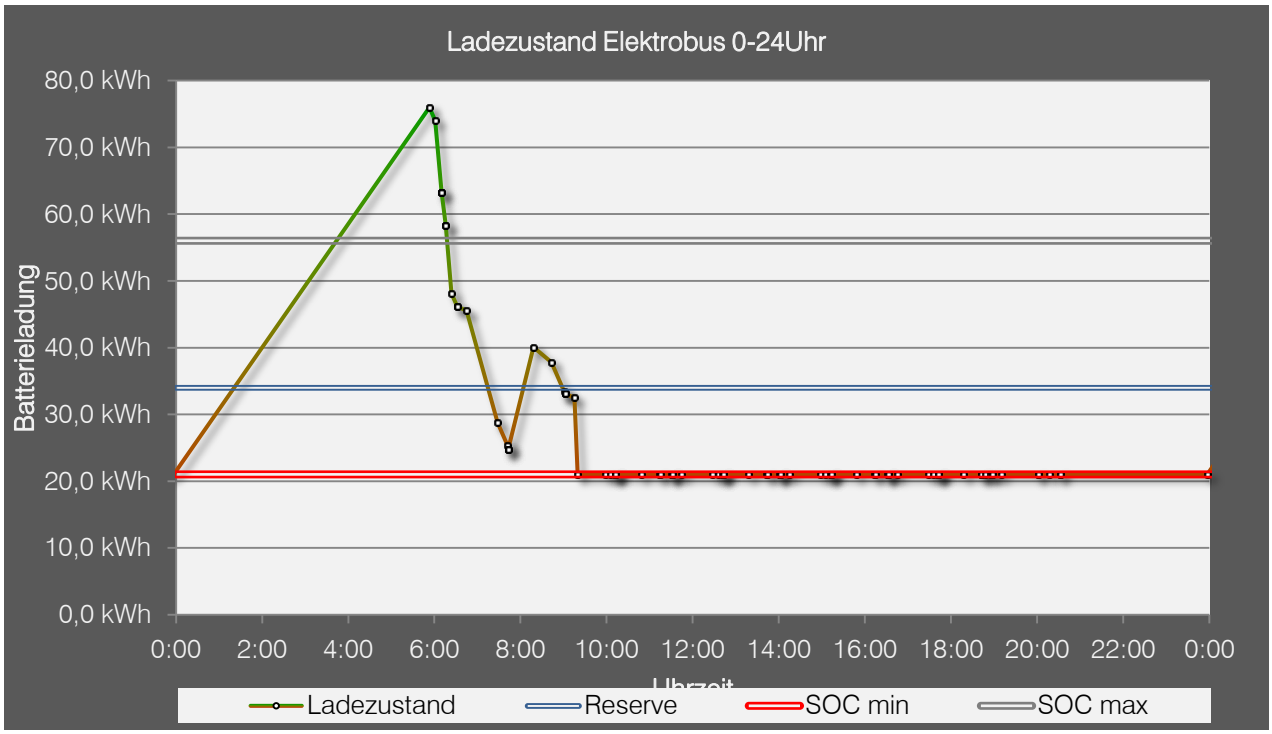
II.4.2 Auslegung Speicher

Betrachtungsgrundlage	
Umlauf:	**7/2-U 43 / L1-4-7-Mo-Fr**
Szenario:	Soll-Fahrplan
Fahrzeugkonfiguration:	HybridObus - Partielle Oberleitung + Endpunkt; Heizungsanlage HO-Bus ohne OL

Speicher		
Konfiguration Energiespeicher:	Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie	
Auslegung Energiespeicher (brutto):	**70 kWh**	
Nutzbare Energiemenge:		
SOC max:	56 kWh	80%
SOC min:	21 kWh	30%
Auslegung Energiespeicher (netto):	35 kWh	

Ladung auf der Strecke - Endpunkt (elektrisch):	0 kWh
Ladung auf der Strecke - partielle Oberleitung (elektrisch)*:	338 kWh
Ladung im Betriebshof (elektrisch):	55 kWh
Gesamt:	**421 kWh**

Simulation SOC-Verlauf im Umlauf



II.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

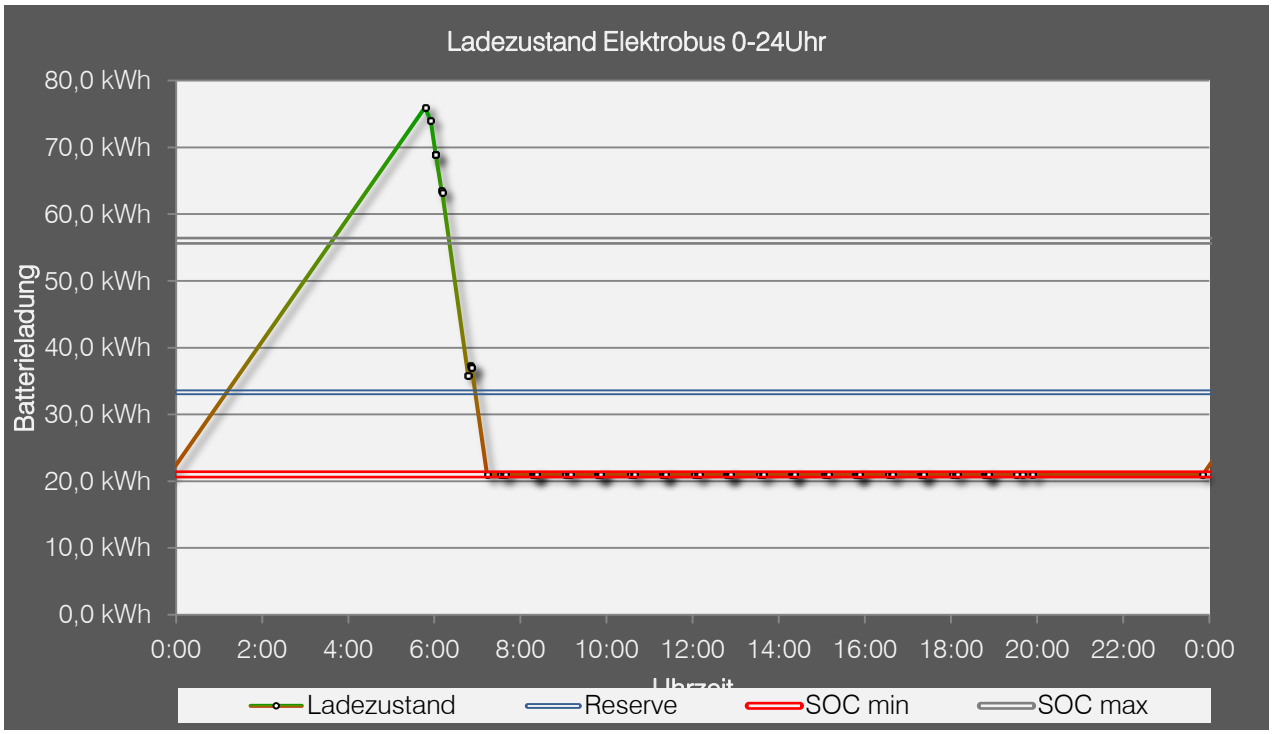
II.4.2 Auslegung Speicher

Betrachtungsgrundlage	
Umlauf:	**7/2-U 44 / L6-7-Mo-Fr**
Szenario:	Soll-Fahrplan
Fahrzeugkonfiguration:	HybridObus - Partielle Oberleitung + Endpunkt; Heizungsanlage HO-Bus ohne OL

Speicher		
Konfiguration Energiespeicher:	Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie	
Auslegung Energiespeicher (brutto):	**70 kWh**	
Nutzbare Energiemenge:		
SOC max:	56 kWh	80%
SOC min:	21 kWh	30%
Auslegung Energiespeicher (netto):	35 kWh	

Ladung auf der Strecke - Endpunkt (elektrisch):	2 kWh
Ladung auf der Strecke - partielle Oberleitung (elektrisch)*:	0 kWh
Ladung im Betriebshof (elektrisch):	55 kWh
Gesamt:	**69 kWh**

Simulation SOC-Verlauf im Umlauf



II.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

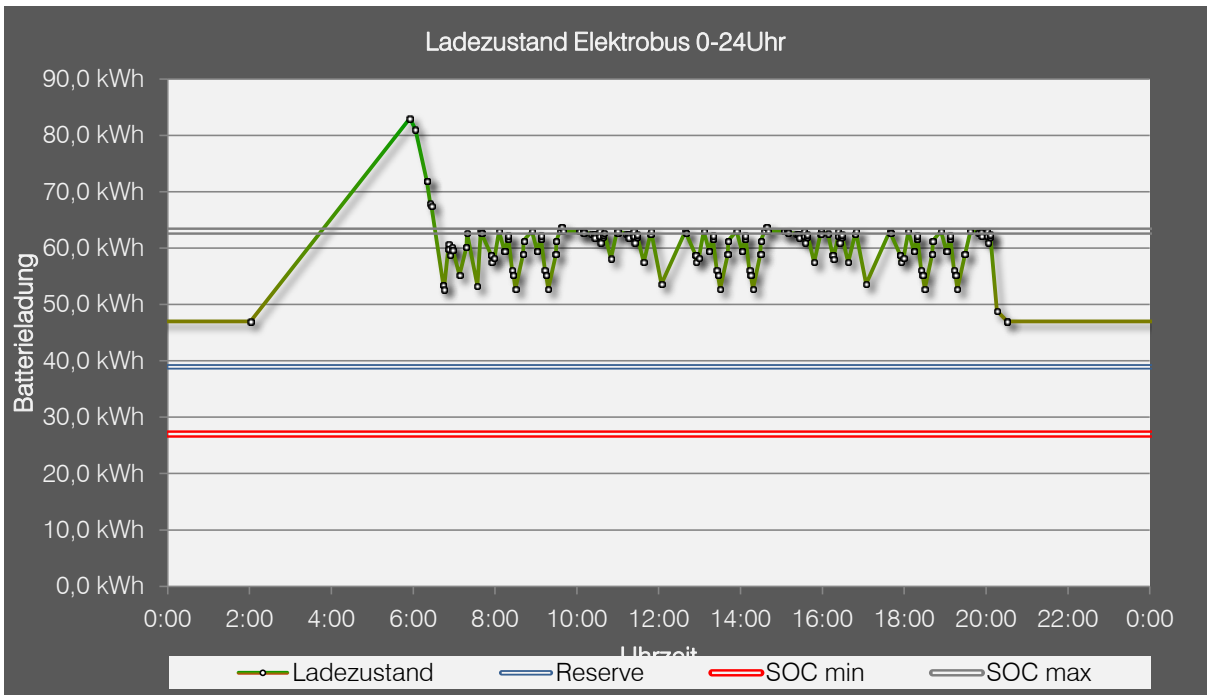
II.4.2 Auslegung Speicher

Betrachtungsgrundlage	
Umlauf:	**7/2-U 45 / L2-7-Mo-Fr**
Szenario:	Soll-Fahrplan
Fahrzeugkonfiguration:	HybridObus - Partielle Oberleitung + Endpunkt; Heizungsanlage HO-Bus ohne OL

Speicher		
Konfiguration Energiespeicher:	Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie	
Auslegung Energiespeicher (brutto):	**90 kWh**	
Nutzbare Energiemenge:		
SOC max:	63 kWh	70%
SOC min:	27 kWh	30%
Auslegung Energiespeicher (netto):	36 kWh	

Ladung auf der Strecke - Endpunkt (elektrisch):	84 kWh
Ladung auf der Strecke - partielle Oberleitung (elektrisch)*:	466 kWh
Ladung im Betriebshof (elektrisch):	36 kWh
Gesamt:	**586 kWh**

Simulation SOC-Verlauf im Umlauf



II.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

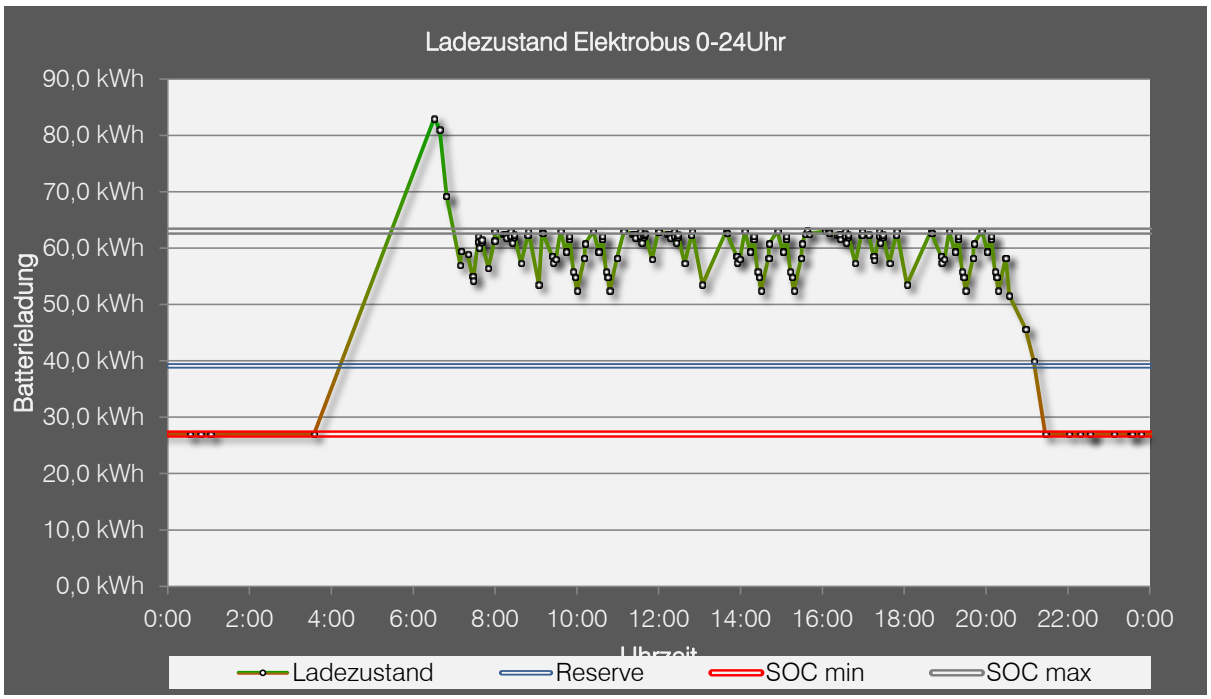
II.4.2 Auslegung Speicher

Betrachtungsgrundlage	
Umlauf:	**7/2-U 53 / L1-2-4-7-Mo-Fr**
Szenario:	Soll-Fahrplan
Fahrzeugkonfiguration:	HybridObus - Partielle Oberleitung + Endpunkt; Heizungsanlage HO-Bus ohne OL

Speicher		
Konfiguration Energiespeicher:	Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie	
Auslegung Energiespeicher (brutto):	**90 kWh**	
Nutzbare Energiemenge:		
SOC max:	63 kWh	70%
SOC min:	27 kWh	30%
Auslegung Energiespeicher (netto):	36 kWh	

Ladung auf der Strecke - Endpunkt (elektrisch):	82 kWh
Ladung auf der Strecke - partielle Oberleitung (elektrisch)*:	557 kWh
Ladung im Betriebshof (elektrisch):	56 kWh
Gesamt:	**720 kWh**

Simulation SOC-Verlauf im Umlauf



II.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

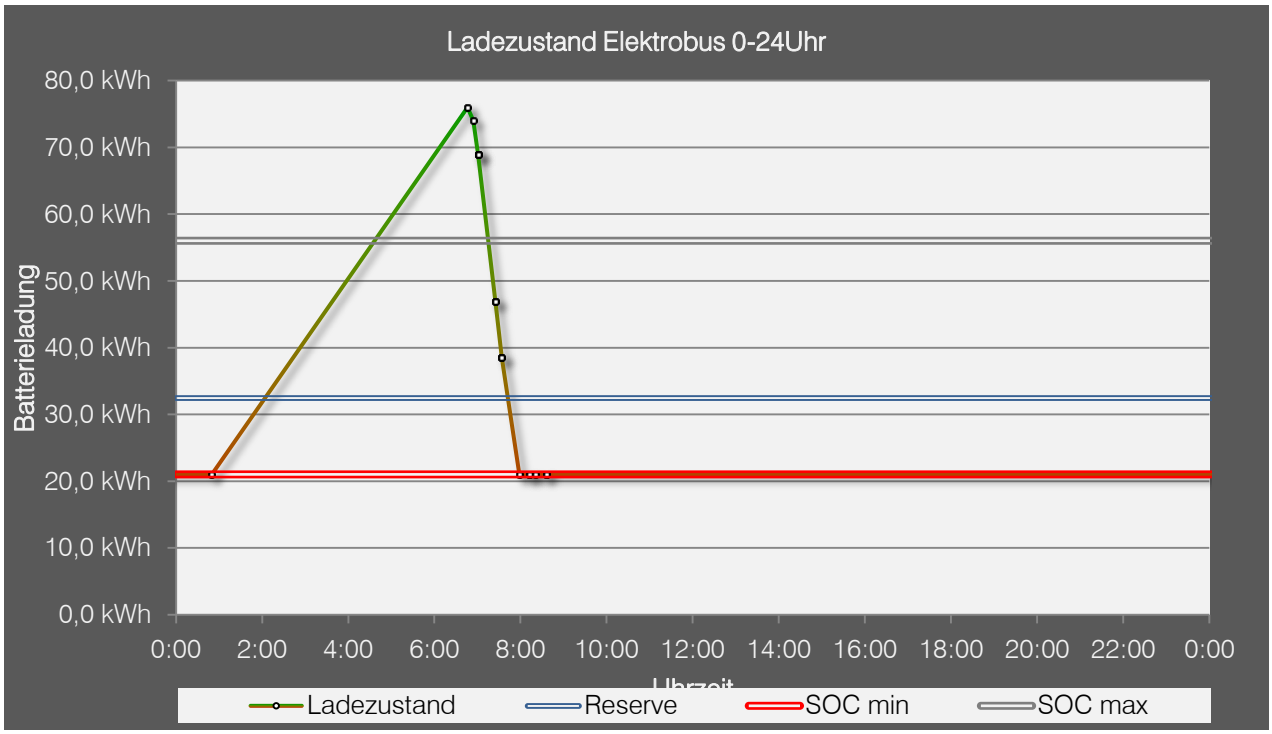
II.4.2 Auslegung Speicher

Betrachtungsgrundlage	
Umlauf:	**7/2-U 57 / L7-Mo-Fr**
Szenario:	Soll-Fahrplan
Fahrzeugkonfiguration:	HybridObus - Partielle Oberleitung + Endpunkt; Heizungsanlage HO-Bus ohne OL

Speicher		
Konfiguration Energiespeicher:	Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie	
Auslegung Energiespeicher (brutto):	**70 kWh**	
Nutzbare Energiemenge:		
SOC max:	56 kWh	80%
SOC min:	21 kWh	30%
Auslegung Energiespeicher (netto):	35 kWh	

Ladung auf der Strecke - Endpunkt (elektrisch):	0 kWh
Ladung auf der Strecke - partielle Oberleitung (elektrisch)*:	0 kWh
Ladung im Betriebshof (elektrisch):	55 kWh
Gesamt:	**69 kWh**

Simulation SOC-Verlauf im Umlauf



II.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

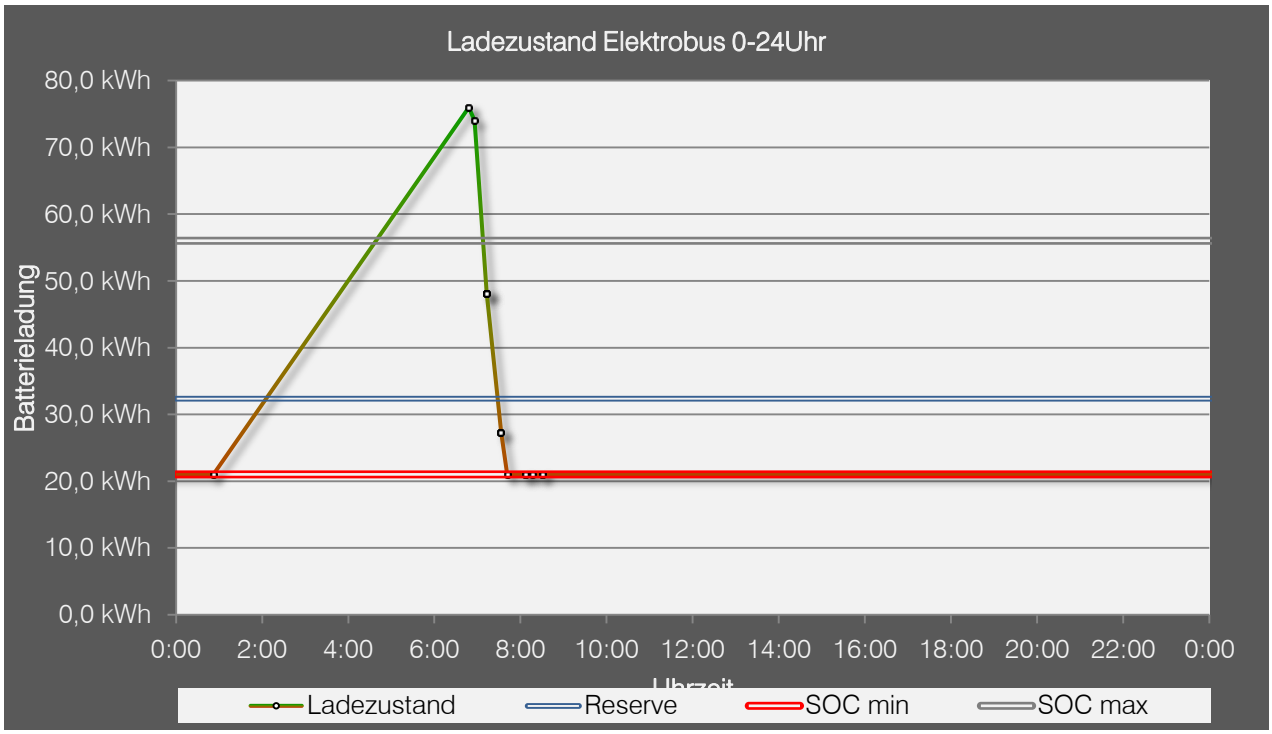
II.4.2 Auslegung Speicher

Betrachtungsgrundlage	
Umlauf:	**7/2-U 58 / L7-11-Mo-Fr**
Szenario:	Soll-Fahrplan
Fahrzeugkonfiguration:	HybridObus - Partielle Oberleitung + Endpunkt; Heizungsanlage HO-Bus ohne OL

Speicher		
Konfiguration Energiespeicher:	Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie	
Auslegung Energiespeicher (brutto):	**70 kWh**	
Nutzbare Energiemenge:		
SOC max:	56 kWh	80%
SOC min:	21 kWh	30%
Auslegung Energiespeicher (netto):	35 kWh	

Ladung auf der Strecke - Endpunkt (elektrisch):	0 kWh
Ladung auf der Strecke - partielle Oberleitung (elektrisch)*:	0 kWh
Ladung im Betriebshof (elektrisch):	55 kWh
Gesamt:	**69 kWh**

Simulation SOC-Verlauf im Umlauf



II.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

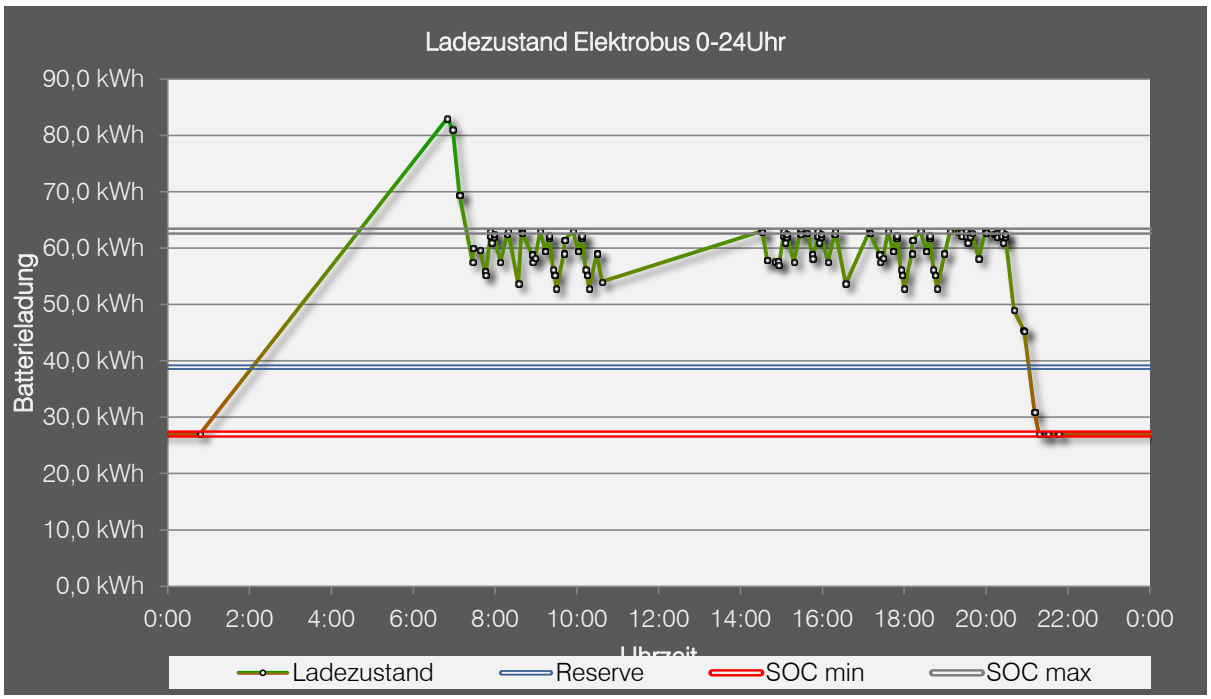
II.4.2 Auslegung Speicher

Betrachtungsgrundlage	
Umlauf:	**7/2-U 62-91/ L2-7-Mo-Fr**
Szenario:	Soll-Fahrplan
Fahrzeugkonfiguration:	HybridObus - Partielle Oberleitung + Endpunkt; Heizungsanlage HO-Bus ohne OL

Speicher		
Konfiguration Energiespeicher:	Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie	
Auslegung Energiespeicher (brutto):	**90 kWh**	
Nutzbare Energiemenge:		
SOC max:	63 kWh	70%
SOC min:	27 kWh	30%
Auslegung Energiespeicher (netto):	36 kWh	

Ladung auf der Strecke - Endpunkt (elektrisch):	112 kWh
Ladung auf der Strecke - partielle Oberleitung (elektrisch)*:	344 kWh
Ladung im Betriebshof (elektrisch):	56 kWh
Gesamt:	**516 kWh**

Simulation SOC-Verlauf im Umlauf



II.4 Ermittlung Energiebedarf Linie 7/2

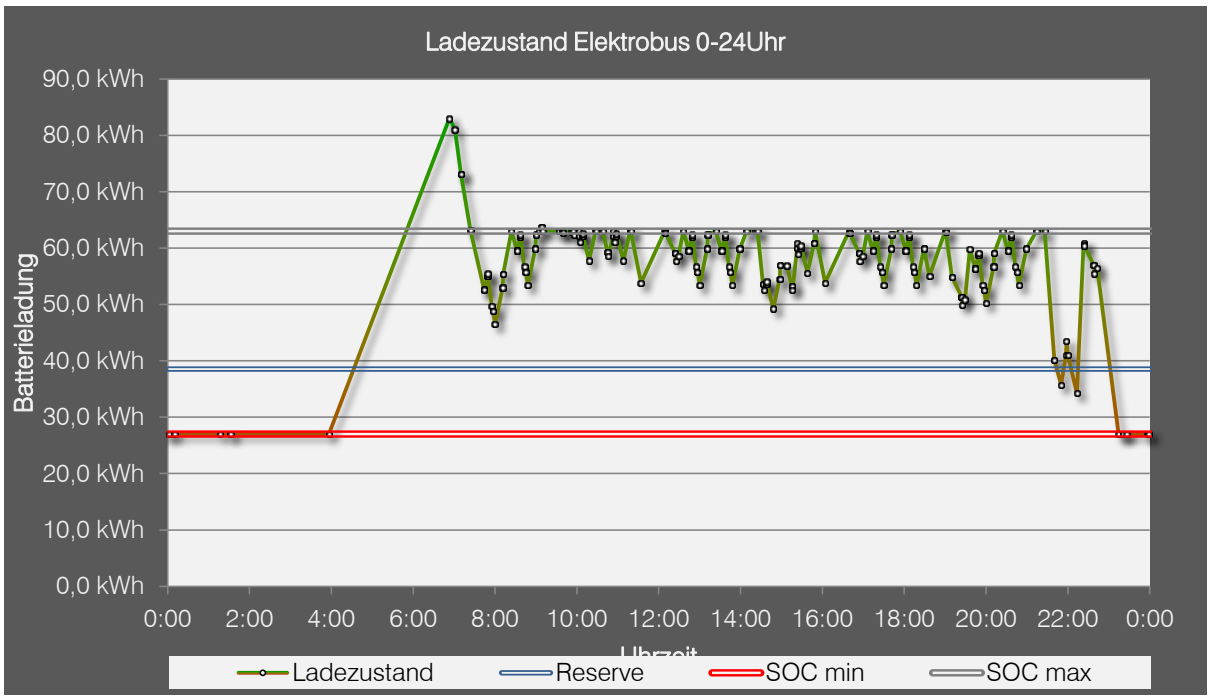
II.4.2 Auslegung Speicher

Betrachtungsgrundlage	
Umlauf:	**7/2-U 63-55 / L2-7-1-Mo-Fr**
Szenario:	Soll-Fahrplan
Fahrzeugkonfiguration:	HybridObus - Partielle Oberleitung + Endpunkt; Heizungsanlage HO-Bus ohne OL

Speicher		
Konfiguration Energiespeicher:	Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie	
Auslegung Energiespeicher (brutto):	**90 kWh**	
Nutzbare Energiemenge:		
SOC max:	63 kWh	70%
SOC min:	27 kWh	30%
Auslegung Energiespeicher (netto):	36 kWh	

Ladung auf der Strecke - Endpunkt (elektrisch):	118 kWh
Ladung auf der Strecke - partielle Oberleitung (elektrisch)*:	506 kWh
Ladung im Betriebshof (elektrisch):	56 kWh
Gesamt:	**704 kWh**

Simulation SOC-Verlauf im Umlauf



7.4 Ermittlung Energiebedarf HO-Bus-System (Reduzierte Oberleitung)

7.4.1 Simulation Energieverbrauch (umlaufbezogen)

Eingangsparameter		
Umlauf:	2/7-L2-38-MO	
Szenario:	SOLL-Fahrplan	
Fahrzeug:	Gelenkbus	18 m
Fahrzeugdaten:		
Leistung ab Batterie für Antrieb:	160 kW	
ausgewählte Antriebsart:	Zentralmotor	
Anlagenwirkungsgrad elektr./mechan. des Antriebs inkl. Rekuperation:	0,75	
Antriebsleistung für leeres Fahrzeug:	120 kW	
Leistungsabforderung durch Beschleunigung:	100%	
Leergewicht Fahrzeug:	17.800 kg	
zulässiges Gesamtgewicht Fahrzeug:	28.000 kg	
Betriebsdaten:		
Ø Besetzungsgrad:	3 /4	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	19,2 km/h	
Ø Geschwindigkeit gemessen:	19,0 km/h	

Berechnung Energiebedarf	Verbrauch Strecke
Energiebedarf leeres Fahrzeug:	
Energiebedarf leeres Fahrzeug mit 17.800 kg:	0,471 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,089 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,080 kWh/km
Gesamtenergiebedarf leeres Fahrzeug:	**0,640 kWh/km**
Energiebedarf Fahrgastbeförderung:	
Energiebedarf Fahrgastbeförderung bei Ø Auslastung 3/4 bzw. 7.225 kg:	0,191 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,036 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,033 kWh/km
Gesamtenergiebedarf Fahrgastbeförderung:	**0,260 kWh/km**

Energiebedarf sonstige Verbraucher:

	Leistung	Nutzung je Tag	Verbrauch Strecke	Verbrauch Wendepunkt
Nebenverbraucher:	10 kW	100%	0,524 kWh/km	5,00 kWh/h
Klimaanlage (E-Bus Klimaanlage):	9 kW	100%	0,471 kWh/km	4,50 kWh/h
Leistung Heizung Heizungsanlage HO-Bus ohne OL:	21 kW	80%	0,863 kWh/km	8,24 kWh/h

Hinweis: Da Klimaanlage und Heizung nie zeitgleich in Betrieb genommen werden, wird der energetisch intensivere Verbraucher für die Berechnung des Energiebedarfs herangezogen. Maßgebend im betrachteten Fall ist die Heizung.

Gesamtenergiebedarf sonstige Verbraucher:	**1,39 kWh/km**	**13,24 kWh/h**
Gesamtenergiebedarf Elektrobus elektrischer Heizung (Worst Case Betrachtung):	**2,29 kWh/km**	**13,24 kWh/h**

7.4 Ermittlung Energiebedarf HO-Bus-System (Reduzierte Oberleitung)

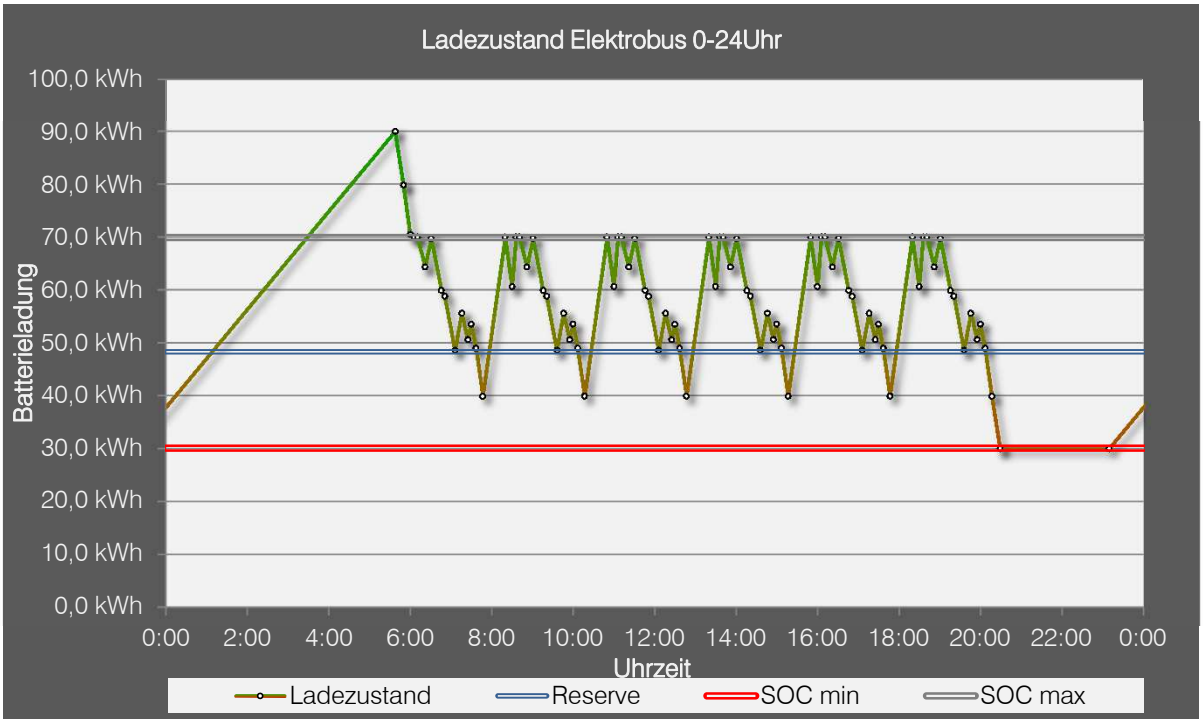
7.4.2 Auslegung Speicher (umlaufbezogen)

Betrachtungsgrundlage	
Umlauf:	**2/7-L2-38-MO**
Szenario:	SOLL-Fahrplan
Fahrzeugkonfiguration:	HybridObus - Partielle Oberleitung + Endpunkt; voll elektrisch

Speicher		
Konfiguration Energiespeicher:	Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie	
Auslegung Energiespeicher (brutto):	**100 kWh**	
Nutzbare Energiemenge:		
SOC max:	70 kWh	70%
SOC min:	30 kWh	30%
Auslegung Energiespeicher (netto):	40 kWh	

Ladung auf der Strecke - Endpunkt (elektrisch):	187 kWh
Ladung auf der Strecke - partielle Oberleitung (elektrisch)*:	111 kWh
Ladung im Betriebshof (elektrisch):	60 kWh
Gesamt:	**370 kWh**

Simulation SOC-Verlauf im Umlauf



7.4 Ermittlung Energiebedarf HO-Bus-System (Reduzierte Oberleitung)

7.4.1 Simulation Energieverbrauch (umlaufbezogen)

Eingangsparameter		
Umlauf:	2/7-L2-52-MO	
Szenario:	SOLL-Fahrplan	
Fahrzeug:	Gelenkbus	18 m
Fahrzeugdaten:		
Leistung ab Batterie für Antrieb:	160 kW	
ausgewählte Antriebsart:	Zentralmotor	
Anlagenwirkungsgrad elektr./mechan. des Antriebs inkl. Rekuperation:	0,75	
Antriebsleistung für leeres Fahrzeug:	120 kW	
Leistungsabforderung durch Beschleunigung:	100%	
Leergewicht Fahrzeug:	17.800 kg	
zulässiges Gesamtgewicht Fahrzeug:	28.000 kg	
Betriebsdaten:		
Ø Besetzungsgrad:	3 /4	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	18,9 km/h	
Ø Geschwindigkeit gemessen:	19,0 km/h	

Berechnung Energiebedarf	Verbrauch Strecke
Energiebedarf leeres Fahrzeug:	
Energiebedarf leeres Fahrzeug mit 17.800 kg:	0,475 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,089 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,080 kWh/km
Gesamtenergiebedarf leeres Fahrzeug:	**0,644 kWh/km**
Energiebedarf Fahrgastbeförderung:	
Energiebedarf Fahrgastbeförderung bei Ø Auslastung 3/4 bzw. 7.225 kg:	0,193 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,036 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,033 kWh/km
Gesamtenergiebedarf Fahrgastbeförderung:	**0,261 kWh/km**

Energiebedarf sonstige Verbraucher:

	Leistung	Nutzung je Tag	Verbrauch Strecke	Verbrauch Wendepunkt
Nebenverbraucher:	10 kW	100%	0,528 kWh/km	5,00 kWh/h
Klimaanlage (E-Bus Klimaanlage):	9 kW	100%	0,475 kWh/km	4,50 kWh/h
Leistung Heizung Heizungsanlage HO-Bus ohne OL:	21 kW	80%	0,870 kWh/km	8,24 kWh/h
Gesamtenergiebedarf sonstige Verbraucher:			**1,40 kWh/km**	**13,24 kWh/h**

Hinweis: Da Klimaanlage und Heizung nie zeitgleich in Betrieb genommen werden, wird der energetisch intensivere Verbraucher für die Berechnung des Energiebedarfs herangezogen. Maßgebend im betrachteten Fall ist die Heizung.

Gesamtenergiebedarf Elektrobus elektrischer Heizung (Worst Case Betrachtung):	**2,30 kWh/km**	**13,24 kWh/h**

7.4 Ermittlung Energiebedarf HO-Bus-System (Reduzierte Oberleitung)

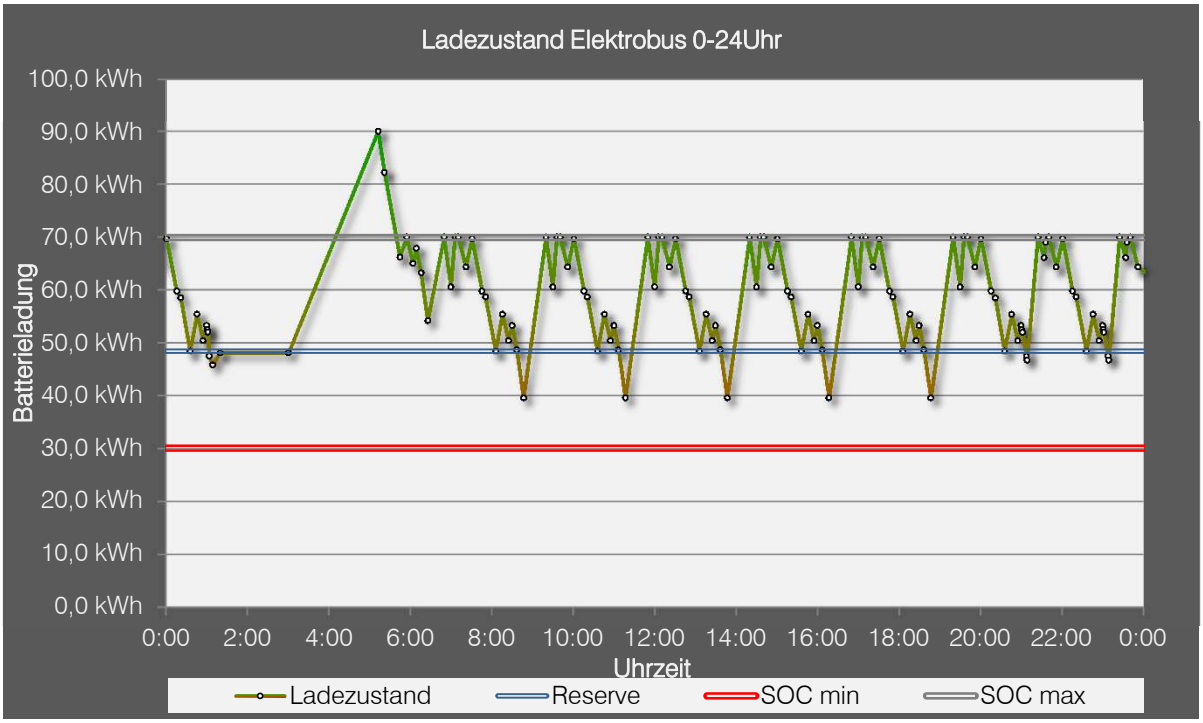
7.4.2 Auslegung Speicher (umlaufbezogen)

Betrachtungsgrundlage	
Umlauf:	**2/7-L2-52-MO**
Szenario:	SOLL-Fahrplan
Fahrzeugkonfiguration:	HybridObus - Partielle Oberleitung + Endpunkt; voll elektrisch

Speicher		
Konfiguration Energiespeicher:	Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie	
Auslegung Energiespeicher (brutto):	**100 kWh**	
Nutzbare Energiemenge:		
SOC max:	70 kWh	70%
SOC min:	30 kWh	30%
Auslegung Energiespeicher (netto):	40 kWh	

Ladung auf der Strecke - Endpunkt (elektrisch):	263 kWh
Ladung auf der Strecke - partielle Oberleitung (elektrisch)*:	153 kWh
Ladung im Betriebshof (elektrisch):	42 kWh
Gesamt:	**458 kWh**

Simulation SOC-Verlauf im Umlauf



7.4 Ermittlung Energiebedarf HO-Bus-System (Reduzierte Oberleitung)

7.4.1 Simulation Energieverbrauch (umlaufbezogen)

Eingangsparameter		
Umlauf:	2/7-L2-54-MO	
Szenario:	SOLL-Fahrplan	
Fahrzeug:	Gelenkbus	18 m
Fahrzeugdaten:		
Leistung ab Batterie für Antrieb:	160 kW	
ausgewählte Antriebsart:	Zentralmotor	
Anlagenwirkungsgrad elektr./mechan. des Antriebs inkl. Rekuperation:	0,75	
Antriebsleistung für leeres Fahrzeug:	120 kW	
Leistungsabforderung durch Beschleunigung:	100%	
Leergewicht Fahrzeug:	17.800 kg	
zulässiges Gesamtgewicht Fahrzeug:	28.000 kg	
Betriebsdaten:		
Ø Besetzungsgrad:	3 /4	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	18,9 km/h	
Ø Geschwindigkeit gemessen:	19,0 km/h	

Berechnung Energiebedarf	Verbrauch Strecke
Energiebedarf leeres Fahrzeug:	
Energiebedarf leeres Fahrzeug mit 17.800 kg:	0,475 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,089 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,080 kWh/km
Gesamtenergiebedarf leeres Fahrzeug:	**0,644 kWh/km**
Energiebedarf Fahrgastbeförderung:	
Energiebedarf Fahrgastbeförderung bei Ø Auslastung 3/4 bzw. 7.225 kg:	0,193 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,036 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,033 kWh/km
Gesamtenergiebedarf Fahrgastbeförderung:	**0,261 kWh/km**

Energiebedarf sonstige Verbraucher:

	Leistung	Nutzung je Tag	Verbrauch Strecke	Verbrauch Wendepunkt
Nebenverbraucher:	10 kW	100%	0,528 kWh/km	5,00 kWh/h
Klimaanlage (E-Bus Klimaanlage):	9 kW	100%	0,476 kWh/km	4,50 kWh/h
Leistung Heizung Heizungsanlage HO-Bus ohne OL:	21 kW	80%	0,871 kWh/km	8,24 kWh/h
Gesamtenergiebedarf sonstige Verbraucher:			**1,40 kWh/km**	**13,24 kWh/h**

Hinweis: Da Klimaanlage und Heizung nie zeitgleich in Betrieb genommen werden, wird der energetisch intensivere Verbraucher für die Berechnung des Energiebedarfs herangezogen. Maßgebend im betrachteten Fall ist die Heizung.

Gesamtenergiebedarf Elektrobus elektrischer Heizung (Worst Case Betrachtung):	**2,30 kWh/km**	**13,24 kWh/h**

7.4 Ermittlung Energiebedarf HO-Bus-System (Reduzierte Oberleitung)

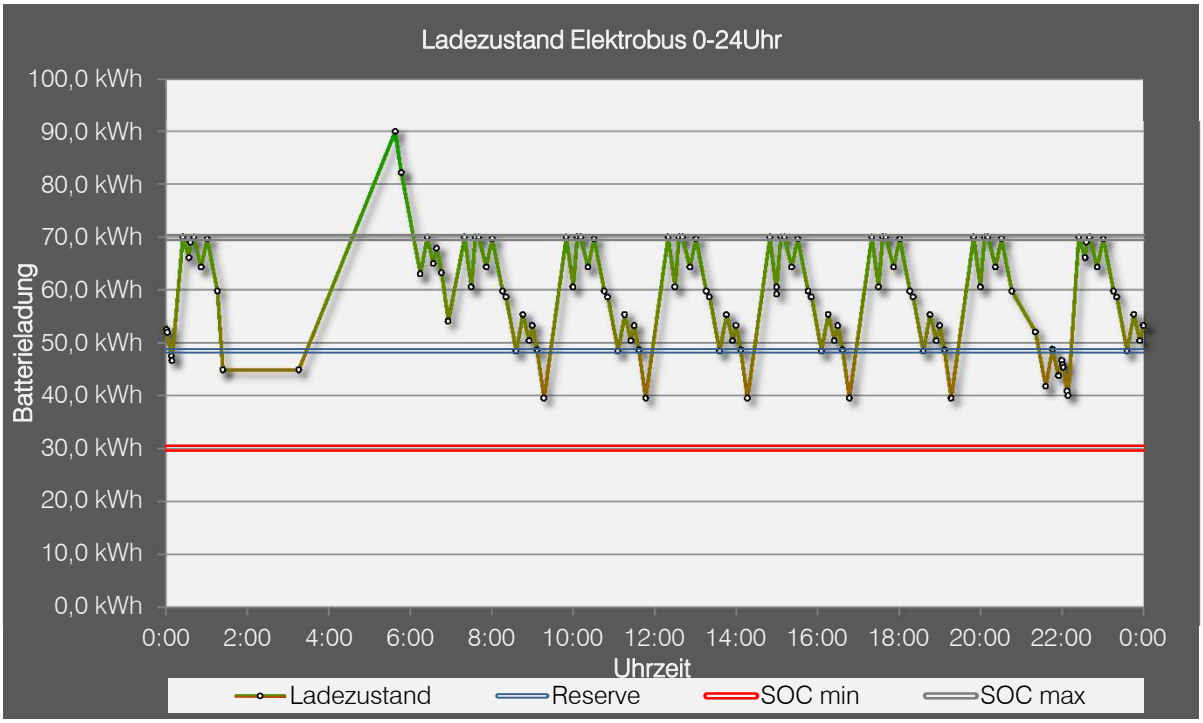
7.4.2 Auslegung Speicher (umlaufbezogen)

Betrachtungsgrundlage	
Umlauf:	**2/7-L2-54-MO**
Szenario:	SOLL-Fahrplan
Fahrzeugkonfiguration:	HybridObus - Partielle Oberleitung + Endpunkt; voll elektrisch

Speicher		
Konfiguration Energiespeicher:	Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie	
Auslegung Energiespeicher (brutto):	**100 kWh**	
Nutzbare Energiemenge:		
SOC max:	70 kWh	70%
SOC min:	30 kWh	30%
Auslegung Energiespeicher (netto):	40 kWh	

Ladung auf der Strecke - Endpunkt (elektrisch):	272 kWh
Ladung auf der Strecke - partielle Oberleitung (elektrisch)*:	152 kWh
Ladung im Betriebshof (elektrisch):	45 kWh
Gesamt:	**469 kWh**

Simulation SOC-Verlauf im Umlauf



7.4 Ermittlung Energiebedarf HO-Bus-System (Reduzierte Oberleitung)

7.4.1 Simulation Energieverbrauch (umlaufbezogen)

Eingangsparameter		
Umlauf:	2/7-L7-13-MO	
Szenario:	SOLL-Fahrplan	
Fahrzeug:	Gelenkbus	18 m
Fahrzeugdaten:		
Leistung ab Batterie für Antrieb:	160 kW	
ausgewählte Antriebsart:	Zentralmotor	
Anlagenwirkungsgrad elektr./mechan. des Antriebs inkl. Rekuperation:	0,75	
Antriebsleistung für leeres Fahrzeug:	120 kW	
Leistungsabforderung durch Beschleunigung:	100%	
Leergewicht Fahrzeug:	17.800 kg	
zulässiges Gesamtgewicht Fahrzeug:	28.000 kg	
Betriebsdaten:		
Ø Besetzungsgrad:	3 /4	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	16,2 km/h	
Ø Geschwindigkeit gemessen:	19,0 km/h	

Berechnung Energiebedarf	Verbrauch Strecke
Energiebedarf leeres Fahrzeug:	
Energiebedarf leeres Fahrzeug mit 17.800 kg:	0,511 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,089 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,080 kWh/km
Gesamtenergiebedarf leeres Fahrzeug:	**0,680 kWh/km**
Energiebedarf Fahrgastbeförderung:	
Energiebedarf Fahrgastbeförderung bei Ø Auslastung 3/4 bzw. 7.225 kg:	0,207 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,036 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,033 kWh/km
Gesamtenergiebedarf Fahrgastbeförderung:	**0,276 kWh/km**

Energiebedarf sonstige Verbraucher:

	Leistung	Nutzung je Tag	Verbrauch Strecke	Verbrauch Wendepunkt
Nebenverbraucher:	10 kW	100%	0,568 kWh/km	5,00 kWh/h
Klimaanlage (E-Bus Klimaanlage):	9 kW	100%	0,511 kWh/km	4,50 kWh/h
Leistung Heizung Heizungsanlage HO-Bus ohne OL:	21 kW	80%	0,936 kWh/km	8,24 kWh/h

Hinweis: Da Klimaanlage und Heizung nie zeitgleich in Betrieb genommen werden, wird der energetisch intensivere Verbraucher für die Berechnung des Energiebedarfs herangezogen. Maßgebend im betrachteten Fall ist die Heizung.

Gesamtenergiebedarf sonstige Verbraucher:	**1,50 kWh/km**	**13,24 kWh/h**
Gesamtenergiebedarf Elektrobus elektrischer Heizung (Worst Case Betrachtung):	**2,46 kWh/km**	**13,24 kWh/h**

7.4 Ermittlung Energiebedarf HO-Bus-System (Reduzierte Oberleitung)

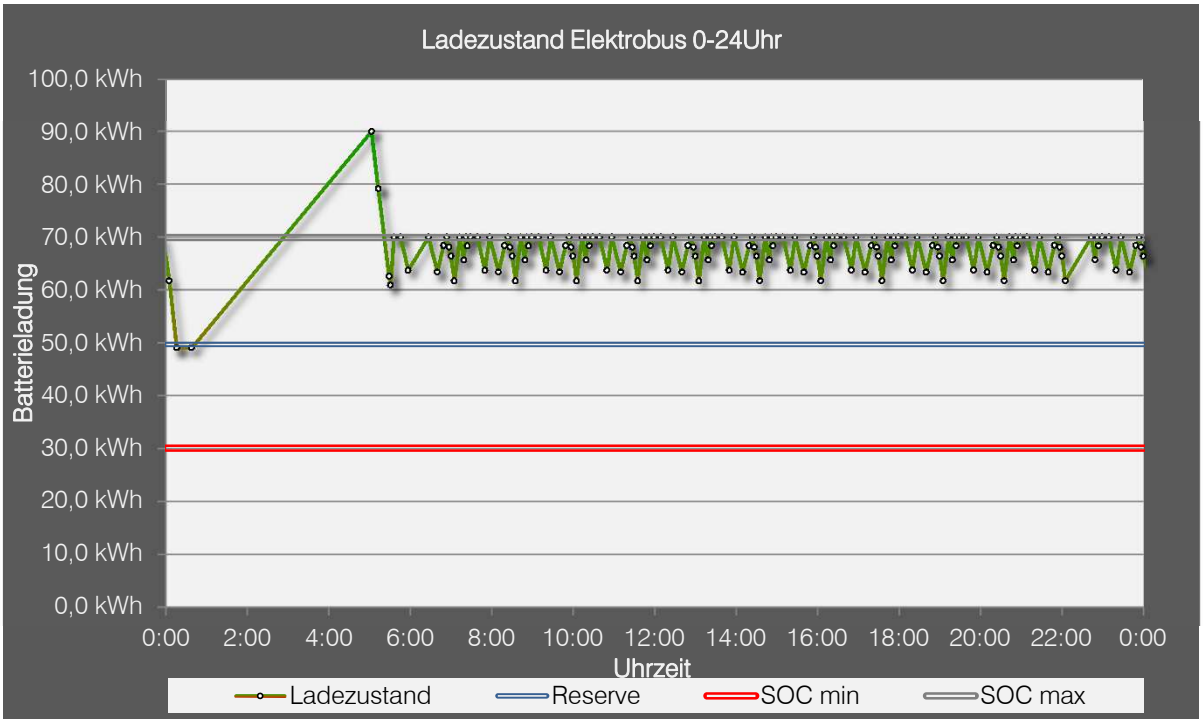
7.4.2 Auslegung Speicher (umlaufbezogen)

Betrachtungsgrundlage	
Umlauf:	**2/7-L7-13-MO**
Szenario:	SOLL-Fahrplan
Fahrzeugkonfiguration:	HybridObus - Partielle Oberleitung + Endpunkt; voll elektrisch

Speicher		
Konfiguration Energiespeicher:	Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie	
Auslegung Energiespeicher (brutto):	**100 kWh**	
Nutzbare Energiemenge:		
SOC max:	70 kWh	70%
SOC min:	30 kWh	30%
Auslegung Energiespeicher (netto):	40 kWh	

Ladung auf der Strecke - Endpunkt (elektrisch):	215 kWh
Ladung auf der Strecke - partielle Oberleitung (elektrisch)*:	133 kWh
Ladung im Betriebshof (elektrisch):	41 kWh
Gesamt:	**389 kWh**

Simulation SOC-Verlauf im Umlauf



7.4 Ermittlung Energiebedarf HO-Bus-System (Reduzierte Oberleitung)

7.4.1 Simulation Energieverbrauch (umlaufbezogen)

Eingangsparameter		
Umlauf:	2/7-L7-31-MO	
Szenario:	SOLL-Fahrplan	
Fahrzeug:	Gelenkbus	18 m
Fahrzeugdaten:		
Leistung ab Batterie für Antrieb:	160 kW	
ausgewählte Antriebsart:	Zentralmotor	
Anlagenwirkungsgrad elektr./mechan. des Antriebs inkl. Rekuperation:	0,75	
Antriebsleistung für leeres Fahrzeug:	120 kW	
Leistungsabforderung durch Beschleunigung:	100%	
Leergewicht Fahrzeug:	17.800 kg	
zulässiges Gesamtgewicht Fahrzeug:	28.000 kg	
Betriebsdaten:		
Ø Besetzungsgrad:	3 /4	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	16,0 km/h	
Ø Geschwindigkeit gemessen:	19,0 km/h	

Berechnung Energiebedarf	Verbrauch Strecke
Energiebedarf leeres Fahrzeug:	
Energiebedarf leeres Fahrzeug mit 17.800 kg:	0,514 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,089 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,080 kWh/km
Gesamtenergiebedarf leeres Fahrzeug:	**0,683 kWh/km**
Energiebedarf Fahrgastbeförderung:	
Energiebedarf Fahrgastbeförderung bei Ø Auslastung 3/4 bzw. 7.225 kg:	0,209 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,036 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,033 kWh/km
Gesamtenergiebedarf Fahrgastbeförderung:	**0,277 kWh/km**

Energiebedarf sonstige Verbraucher:

	Leistung	Nutzung je Tag	Verbrauch Strecke	Verbrauch Wendepunkt
Nebenverbraucher:	10 kW	100%	0,572 kWh/km	5,00 kWh/h
Klimaanlage (E-Bus Klimaanlage):	9 kW	100%	0,515 kWh/km	4,50 kWh/h
Leistung Heizung Heizungsanlage HO-Bus ohne OL:	21 kW	80%	0,942 kWh/km	8,24 kWh/h
Gesamtenergiebedarf sonstige Verbraucher:			**1,51 kWh/km**	**13,24 kWh/h**

Hinweis: Da Klimaanlage und Heizung nie zeitgleich in Betrieb genommen werden, wird der energetisch intensivere Verbraucher für die Berechnung des Energiebedarfs herangezogen. Maßgebend im betrachteten Fall ist die Heizung.

Gesamtenergiebedarf Elektrobus elektrischer Heizung (Worst Case Betrachtung):	**2,47 kWh/km**	**13,24 kWh/h**

7.4 Ermittlung Energiebedarf HO-Bus-System (Reduzierte Oberleitung)

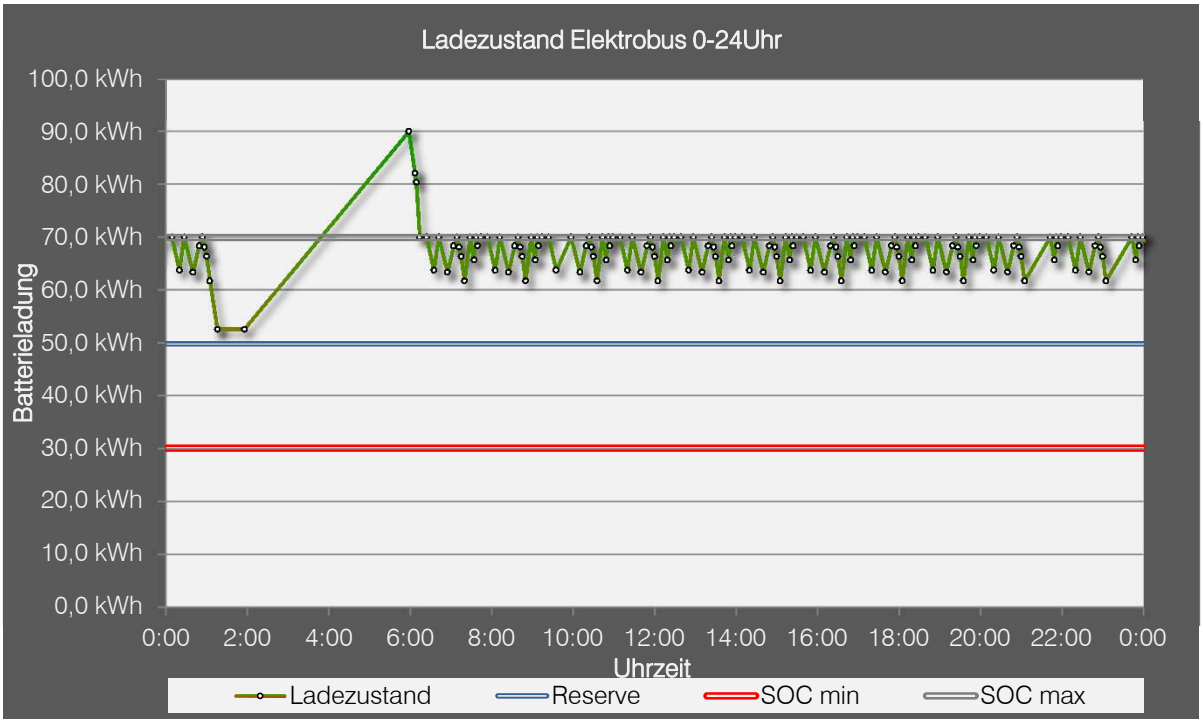
7.4.2 Auslegung Speicher (umlaufbezogen)

Betrachtungsgrundlage	
Umlauf:	**2/7-L7-31-MO**
Szenario:	SOLL-Fahrplan
Fahrzeugkonfiguration:	HybridObus - Partielle Oberleitung + Endpunkt; voll elektrisch

Speicher		
Konfiguration Energiespeicher:	Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie	
Auslegung Energiespeicher (brutto):	**100 kWh**	
Nutzbare Energiemenge:		
SOC max:	70 kWh	70%
SOC min:	30 kWh	30%
Auslegung Energiespeicher (netto):	40 kWh	

Ladung auf der Strecke - Endpunkt (elektrisch):	221 kWh
Ladung auf der Strecke - partielle Oberleitung (elektrisch)*:	114 kWh
Ladung im Betriebshof (elektrisch):	37 kWh
Gesamt:	**372 kWh**

Simulation SOC-Verlauf im Umlauf



7.4 Ermittlung Energiebedarf HO-Bus-System (Reduzierte Oberleitung)

7.4.1 Simulation Energieverbrauch (umlaufbezogen)

Eingangsparameter		
Umlauf:	2/7-L7-34-MO	
Szenario:	SOLL-Fahrplan	
Fahrzeug:	Gelenkbus	18 m
Fahrzeugdaten:		
Leistung ab Batterie für Antrieb:	160 kW	
ausgewählte Antriebsart:	Zentralmotor	
Anlagenwirkungsgrad elektr./mechan. des Antriebs inkl. Rekuperation:	0,75	
Antriebsleistung für leeres Fahrzeug:	120 kW	
Leistungsabforderung durch Beschleunigung:	100%	
Leergewicht Fahrzeug:	17.800 kg	
zulässiges Gesamtgewicht Fahrzeug:	28.000 kg	
Betriebsdaten:		
Ø Besetzungsgrad:	3 /4	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	16,3 km/h	
Ø Geschwindigkeit gemessen:	19,0 km/h	

Berechnung Energiebedarf	Verbrauch Strecke
Energiebedarf leeres Fahrzeug:	
Energiebedarf leeres Fahrzeug mit 17.800 kg:	0,510 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,089 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,080 kWh/km
Gesamtenergiebedarf leeres Fahrzeug:	**0,679 kWh/km**
Energiebedarf Fahrgastbeförderung:	
Energiebedarf Fahrgastbeförderung bei Ø Auslastung 3/4 bzw. 7.225 kg:	0,207 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung SORT 2:	0,036 kWh/km
Zuschlag infolge Einstufung TOPO 1:	0,033 kWh/km
Gesamtenergiebedarf Fahrgastbeförderung:	**0,276 kWh/km**

Energiebedarf sonstige Verbraucher:

	Leistung	Nutzung je Tag	Verbrauch Strecke	Verbrauch Wendepunkt
Nebenverbraucher:	10 kW	100%	0,567 kWh/km	5,00 kWh/h
Klimaanlage (E-Bus Klimaanlage):	9 kW	100%	0,511 kWh/km	4,50 kWh/h
Leistung Heizung Heizungsanlage HO-Bus ohne OL:	21 kW	80%	0,935 kWh/km	8,24 kWh/h

Hinweis: Da Klimaanlage und Heizung nie zeitgleich in Betrieb genommen werden, wird der energetisch intensivere Verbraucher für die Berechnung des Energiebedarfs herangezogen. Maßgebend im betrachteten Fall ist die Heizung.

Gesamtenergiebedarf sonstige Verbraucher:	**1,50 kWh/km**	**13,24 kWh/h**
Gesamtenergiebedarf Elektrobus elektrischer Heizung (Worst Case Betrachtung):	**2,46 kWh/km**	**13,24 kWh/h**

7.4 Ermittlung Energiebedarf HO-Bus-System (Reduzierte Oberleitung)

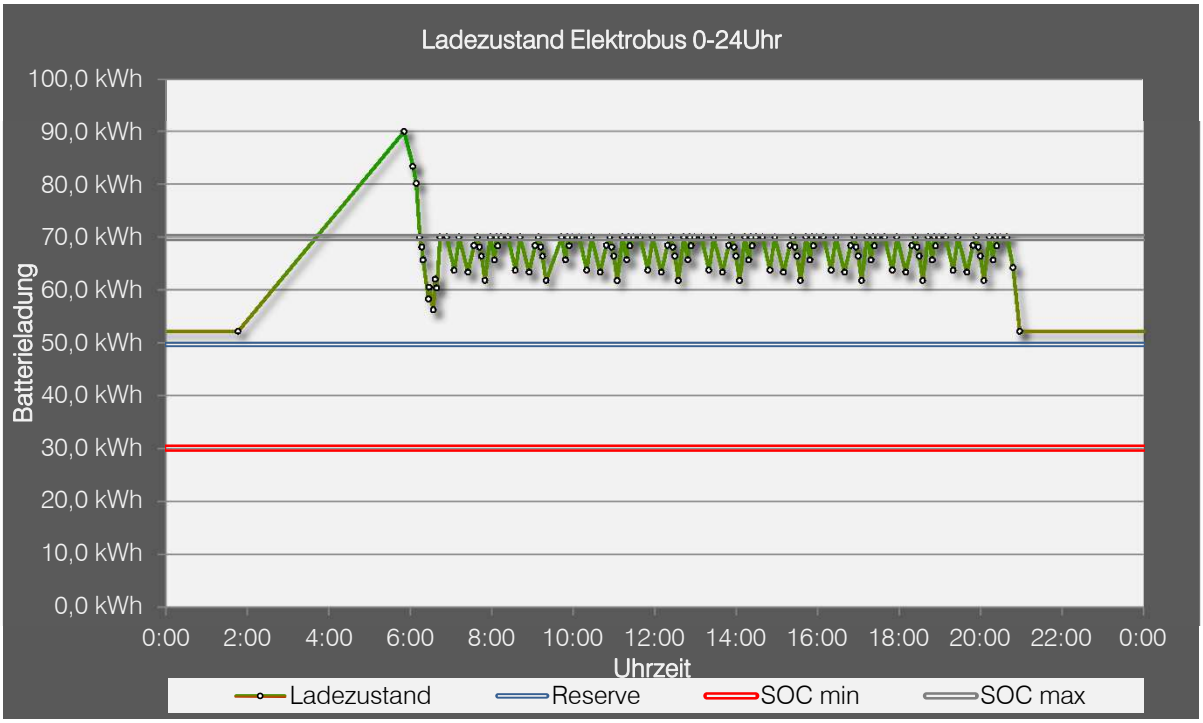
7.4.2 Auslegung Speicher (umlaufbezogen)

Betrachtungsgrundlage		
Umlauf:	**2/7-L7-34-MO**	
Szenario:	SOLL-Fahrplan	
Fahrzeugkonfiguration:	HybridObus - Partielle Oberleitung + Endpunkt; voll elektrisch	

Speicher		
Konfiguration Energiespeicher:	Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie	
Auslegung Energiespeicher (brutto):	**100 kWh**	
Nutzbare Energiemenge:		
SOC max:	70 kWh	70%
SOC min:	30 kWh	30%
Auslegung Energiespeicher (netto):	40 kWh	

Ladung auf der Strecke - Endpunkt (elektrisch):	166 kWh
Ladung auf der Strecke - partielle Oberleitung (elektrisch)*:	103 kWh
Ladung im Betriebshof (elektrisch):	38 kWh
Gesamt:	**306 kWh**

Simulation SOC-Verlauf im Umlauf



7.4 Ermittlung Energiebedarf HO-Bus-System (Reduzierte Oberleitung)

7.4.3 Auslegung reduziertes Oberleitungssystem

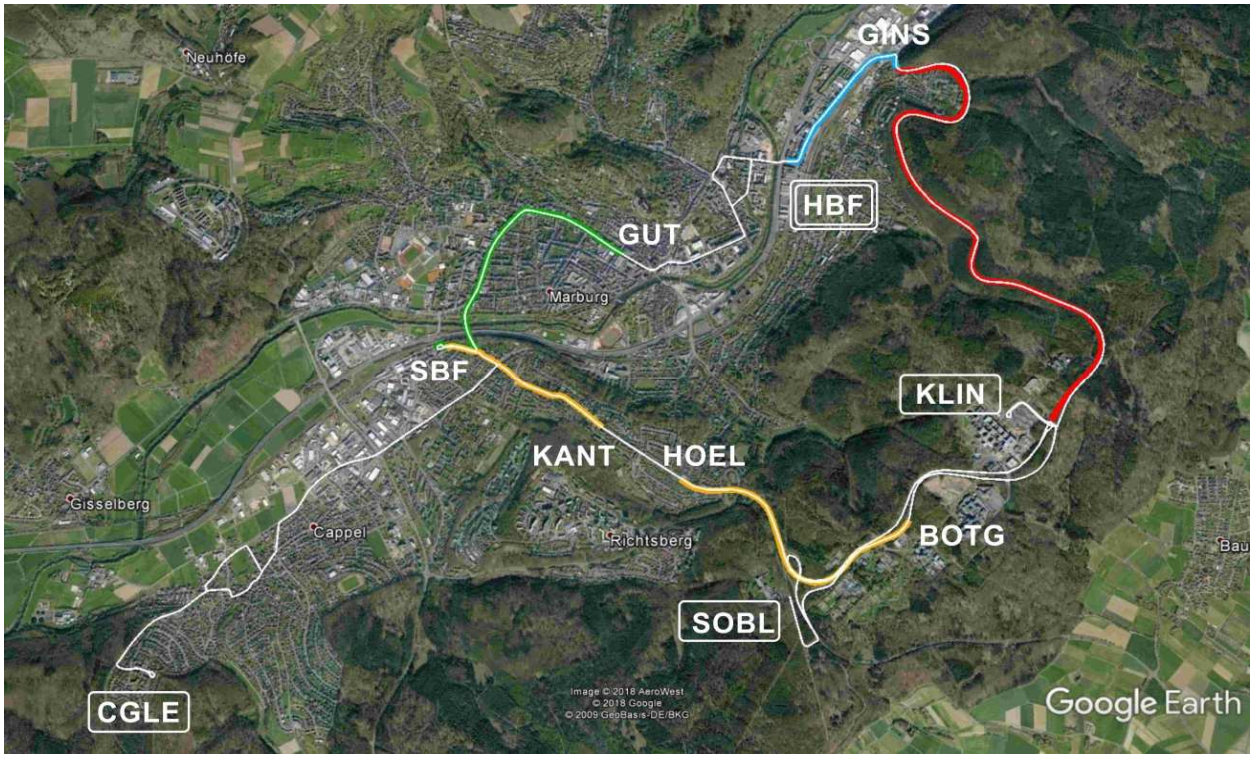
Oberleitung

Übertragungssystem	Standard-OL mit Stangenstromabnehmer mit erhöhter Ladeleistung im Stand				
Oberleitungsanteil Linienweg	30,8% (Linie 2) 41,2 % (Linie 7)	Linie 2: 18,0 km	Oberleitung: 5,5 km	Linie 7: 10,2 km	Oberleitung: 4,2 km

Oberleitungsabschnitte

Strecke		Oberleitung		Oberleitung		Lade-leistung	Lade-leistung (mit Verlusten)
von (Abfahrt)	nach (Ankunft)	von (Distanz)	nach (Distanz)	von (Zeit)	nach (Zeit)		
GINS	HBF	0 m	1.321 m	00:00:00	00:05:00	79 kW	70 kW
HBF	GINS	0 m	1.275 m	00:00:00	00:05:00	79 kW	70 kW
GUT	SBF	0 m	2.211 m	00:00:00	00:09:00	79 kW	70 kW
SBF	GUT	0 m	2.032 m	00:00:00	00:10:00	79 kW	70 kW
GINS	KLIN-ABZ	0 m	4.256 m	00:00:00	00:07:00	50 kW	44 kW
SBF	KANT	0 m	1.352 m	00:00:00	00:05:00	70 kW	62 kW
KANT	SBF	0 m	1.300 m	00:00:00	00:05:00	200 kW	177 kW
HOEL	BOTG	0 m	1.596 m	00:00:00	00:03:00	50 kW	44 kW

Lageplan Oberleitungsabschnitte



GINS>KLIN / HOEL>BOTG — einspurige Oberleitung (nur bergauf)

SBF<>KANT / HBF<>GINS / GUT<>SBF — zweispurige Oberleitung

7.5 Ergebnis Betrieb und Technik HO-Bus-System (Reduzierte Oberleitung)

Fahrzeug- und Infrastrukturdaten		
Fahrzeug:	11 Stück, 18 m Hybrid-Obus, 139 Plätze	
Heizungsanlage:	voll elektrisch	
Klimatisierung:	E-Bus Klimaanlage	
Energiespeicher:	Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie, 100 kWh	
Ladestrategie:	HybridObus - Partielle Oberleitung + Endpunkt	
Strecke		
Stationäre Nachladung:	Ladepunkte mit partieller Oberleitung in - Hauptbahnhof - Klinikum - Sonnenblick	
Dynamische Nachladung	Oberleitungsnetz, ein-/zweispurig, 4 Abschnitte mit insgesamt 12,7 km Länge	
Ladesystem:	Standard-OL mit Stangenstromabnehmer mit erhöhter Ladeleistung im Stand	
Betriebshof		
Ladepunkt:	SWM Einfahrt	Betriebshof SWM
Ladesystem:	Standard-OL mit Stangenstromabnehmer mit erhöhter Ladeleistung im Stand	

Streckendaten		
Jahreslaufleistung:	0 km/Jahr	0 h/Jahr
Montag - Freitag:	582.307 km/Jahr	19.730 h/Jahr
Samstag:	0 km/Jahr	0 h/Jahr
Sonntag/Feiertag:	0 km/Jahr	0 h/Jahr

Einschätzung

Der Einsatz von HO-Bussen ist auf allen dargestellten Umläufen möglich.

Die Gelenkbusse wurden mit einem 100 kWh LTO-Traktionsspeicher konfiguriert und erhalten eine HO-Bus-spezifische Heizung (inkl. Heizung auf oberleitungsfreien Abschnitten) sowie eine E-Bus-spezifische Klimatisierung im Fahrgastraum mit reduzierter Kühlleistung.

Die Auswahl der Oberleitungsstrecken erfolgte in Abstimmung mit den Stadtwerken Marburg. Zwei der drei Bergstrecken (GINS>KLIN / HOEL>BOTG) zu den Lahnbergen wurden nur einspurig, jeweils in Fahrtrichtung Klinikum, elektrifiziert. Das Teilstück vom Südbahnhof bis zur Kantstraße wurde zweipurig vorgesehen. Daneben wurden zwei Streckenabschnitte im Innenstadtbereich zweispurig mit Oberleitungen versehen.

Ergänzend zur partiellen Oberleitung erhalten die HO-Busse eine Zwischennachladung im Stand an den Linienendpunkten Hauptbahnhof, Sonnenblick und Klinikum.

Die Energieübertragung erfolgt hier über die Stangenstromabnehmer, die mit einem speziellen Übertragungssystem ausgestattet wurden, um höhere Ladleistungen im Stand zu ermöglichen. Infrastrukturseitig werden am Klinikum und am Sonnenblick ein Lademast mit zwei Übertragungskontakten (Stromschiene) errichtet. Am Hauptbahnhof erfolgt die Nachladung über die vorhandene Oberleitungsinfrastruktur.

Während der nächtlichen Betriebspause erfolgt die Nachladung im Betriebshof ebenfalls über das Oberleitungssystem. Die Elektrifizierung der Abstellanlage ist hier die Voraussetzung.

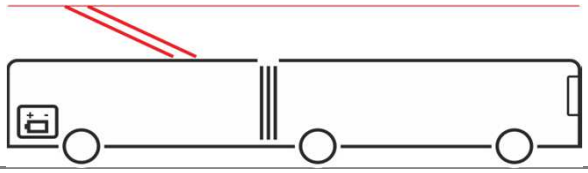
Hinweis

Ein HO-Bus-System auf der Linie 7 könnte aufgrund des hohen Oberleitungsanteils auch mit deutlich kleiner dimensionierten Energiespeichern realisiert werden. Der lange oberleitungsfreie Abschnitt auf der Linie 2 zwischen Südbahnhof und Cappeler Gleiche erfordert jedoch die auf 100 kWh erhöhte Speicherauslegung.

7.6 Investitionskosten HO-Bus-System (Reduzierte Oberleitung)

Gesamtkosten bei Linienumstellung			ohne Förderung	mit Förderung
1. Elektrobus	Gelenkbus	11 Stück	9.759.684 €	4.795.384 €
2. Ladeinfrastruktur			12.656.515 €	2.531.303 €
3. Sonstige Kosten*			1.863.034 €	931.517 €
Gesamtkosten:			**24.279.233 €**	**8.258.204 €**

* Sonstige Kosten fallen als Investitionen bei der Umstellung der Linie an. Kosten sind auf weitere Linien umlegbar.



1. Kosten je Elektrobus	ohne Förderung	mit Förderung	€ / %
Grundfahrzeug	323.119 €	323.119 €	0 €
Fahrzeugausrüstung	424.125 €	84.825 €	80%
Energiespeicher	140.000 €	28.000 €	80%
Gesamtkosten je Fahrzeug	**887.244 €**	**435.944 €**	

2. Kosten Ladeinfrastruktur		ohne Förderung	mit Förderung	€ / %
Ladung über Oberleitung konduktiv-dynamisch	1 Stück	10.910.191 €	2.182.038 €	80%
Oberleitung quick charging	2 Stück	199.500 €	39.900 €	80%
Ladepunkt Oberleitung konduktiv-stationär	1 Stück	353.235 €	70.647 €	80%
Plug-In-System konduktiv-stationär	2 Stück	42.998 €	8.600 €	80%
Leitungswegekosten	1 Stück	1.150.592 €	230.118 €	80%
Gesamtkosten Ladeinfrastruktur		**12.656.515 €**	**2.531.303 €**	

7.6 Investitionskosten HO-Bus-System (Reduzierte Oberleitung)

3. Sonstige Kosten	ohne Förderung	mit Förderung	€ / %
3.1. Kosten Werkstattausrüstung	**392.050 €**	**196.025 €**	50%
Dacharbeitsstand	165.600 €		
Flurfördertechnik - stationär	16.800 €		
Flurfördertechnik - mobil	43.700 €		
HV-Spezialwerkzeug	9.500 €		
Prüf- und Messgeräte	155.250 €		
Persönliche Schutzausrüstung	1.200 €		
3.2. Kosten Schulungen	**100.332 €**	**50.166 €**	50%
3.2.1. Kosten Personalqualifizierung bei Einführung	100.332 €		
Fahrdienstmitarbeiter	20.790 €		
Werkstattpersonal - HV-Qualifizierung	73.302 €		
Werkstattpersonal - Sonstige Qualifizierung	6.240 €		
3.3. Sonstige Projektkosten	**1.370.652 €**	**685.326 €**	50%
Planung und Projektmanagement	1.370.652 €		
Gesamte Sonstige Kosten	**1.863.034 €**	**931.517 €**	

7.6 Investitionskosten HO-Bus-System (Reduzierte Oberleitung)

1. Kosten je Elektrobus

Grundfahrzeug **323.119 €**

*Fahrzeugaufbau mit 3 Türen, Grundheizung Fahrerarbeitsplatz/Fahrgastraum elektrisch, *Minderung: Motor, Anbauteile, Getriebe, Antriebsachse, Nachlaufachse, *Minderung: Klimaanlage Fahrer/Fahrgast und Zusatzheizung, *Neukonstruktion E-Bus, *Leichtbau, *Risikoaufschlag

Traktionsausrüstung **271.675 €**

*Radnabenmotor (Paar) mit Achsgestell (Längs- und Querträger, Achsfederträger, Felgen/Reifen), *Bremswiderstand mit Chopper, *Steuergerät Leistungselektronik inkl. Programmierung, *Traktionsumrichter (Antriebssystem), je Antriebsachse, *Energiespeicherumrichter (Energiespeichersystem), *Bordnetzumrichter (Bordnetzsystem, DC 24 V), *Bordnetzumrichter (Bordnetzsystem, AC 400 V, 50Hz), *Bremsstellerumrichter (Bremsstellersystem), *DC/DC Wandler mit galvanischer Trennung, optional, nur bei Oberleitung bis 200kW, *Monitoring-System zur Überwachung der einzelnen Komponenten, optional

Nebenaggregate **96.500 €**

Hilfskomponenten für Antrieb: , *Kompressoranlage, *Lenkunterstützung/Hydraulikpumpe, *Kühlmittelpumpensystem, *Klimatisierung elektrisch (Fahrerarbeitsplatz): Teilklimatisierung, *Klimatisierung elektrisch (Fahrgastraum): Teilklimatisierung, *Heizung voll elektrisch (Fahrgastraum/ Fahrerarbeitsplatz) über Warmwasseranlage, *Heizung voll elektrisch (Fahrgastraum/ Fahrerarbeitsplatz) über Konvektor

Fahrzeugseitige Ladeinfrastruktur **55.950 €**

*Stromabnehmer Ausrüstung dynamisch andrahten, *Ladeanschluss (CCS-Stecker)

Energiespeicher **140.000 €**

*Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO) inkl. BMS, Hochleistungsbatterie, 100 kWh

GESAMTKOSTEN FAHRZEUG **887.244 €**

7.6 Investitionskosten HO-Bus-System (Reduzierte Oberleitung)

2. Kosten Ladeinfrastruktur

Ladung über Oberleitung konduktiv-dynamisch — **10.910.191 €**

*Errichtung Unterwerk/Trafostation
(festes Gebäude), *Erschließungs-/ Anschlusskosten Unterwerk (Kompaktstation) an Mittelspannungsnetz, Lieferung und Montage Messschrank, Bereitstellung elektrischer Vorhalteleistung, *Anschluss Fahrleitung an Unterwerk (Kompaktstation), *Kabelbau Anschluss Fahrleitung Ausstattung , *Kabelbau Anschluss Fahrleitung Tiefbau , *Fahrleitungsanlage Neubau 2 Richtungen, ohne Weichen, ohne enge Kurven und Kreuzungen mit Eindrahtvorrichtung (optimiert auf Nachladung während der Fahrt), *Einfachfahrleitung 1- spuriger Ausleger mit vermindeter Fahrgeschwindigkeit, *Einbau Auslaufweiche mit Steuerung und Aufhängung , *Einbau Einlaufweiche mit Aufhängung , *Einbau von Kreuzungsanlage Obus/Obus mit

Oberleitung quick charging — **199.500 €**

*Ladestation, (Ladeleistung bis 200 kW), *Lademastanlage, (Docking-Station-OBus), *Baustelleneinrichtung

Ladepunkt Oberleitung konduktiv-stationär — **353.235 €**

*Kabelbau Stromanschluss Ausstattung, *Kabelbau Stromanschluss Tiefbau, *Errichtung Fahrleitung mit Masten (2-polig +/- , 25m), *Lieferung Schnelladevorrichtung für Stangenstromabnehmer, *Baustelleneinrichtung

Plug-In-System konduktiv-stationär — **42.998 €**

*Anschlusskosten an vorhandenes Betriebsnetz (400 V/AC) im Betriebshof bis 63 A, *Nachladegerät bis 63 A (44/38,4 kW) CCS (DC 50kW), *Baustelleneinrichtung und Inbetriebnahme

Leitungswegekosten — **1.150.592 €**

*Fremdleitungsumlegekosten für Baufreiheit, *Oberflächen- und Rekultivierungskosten, *Kosten verkehrslenkender Maßnahmen, *Rodungskosten, Flächenräumungs- und -rückbaukosten, *präventive und begleitende Kampfmittelsondierung, *Lärmschutzmaßnahmen, *Wasserhaltung, offene Wasserhaltung (zeitabhängig), *Ersatzmaßnahmen (z.B. gesperrte Zugänge für Rettungskräfte und Müllabfuhr), *Nachweise über Boden- und Tragfähigkeitsproben, *separate Schadstoffentsorgung belasteter Böden Z 3 - Z 5, *Mieten und Schadensersatzansprüche für benutzte Flächen, *Beweissicherungsverfahren, Versicherungen etc., *Baugenehmigungen, *Dokumentation der Verlegungen in digitalen grafischen Informationssystemen (GIS)

GESAMTKOSTEN LADEINFRASTRUKTUR — **12.656.515 €**

7.6 Investitionskosten HO-Bus-System (Reduzierte Oberleitung)

3. Sonstige Kosten

3.1. Kosten Werkstattausrüstung

Dacharbeitsstand	**165.600 €**
*stationärer Dacharbeitsstand (zweiseitig, mit Absturzsicherung) - bis 18 m, * Einbaukosten, *Projektierungs- und Baunebenkosten	
Flurfördertechnik - stationär	**16.800 €**
*Portal-Deckenkran, *Anschlagmittel, *Projektierungs- und Baunebenkosten	
Flurfördertechnik - mobil	**43.700 €**
*Handhubwagen 2,5 t, *Elektro-Gabelstpler 5 t, *Vorbaugerät Kranhaken f. Stapler, *Anschlagmittel	
HV-Spezialwerkzeug	**9.500 €**
*Satz HV-Spezialwerkzeug, *Isolationsmatte, *Satz Absperrmaterial (Pylonen, Flatterband/Gurt, Warnschilder)	
Prüf- und Messgeräte	**155.250 €**
*Spannungsprüfer - 1.000 V, *Isolationsmessgerät, *Fahrzeug-Diagnosesystem (herstellerspezifisch)	
Persönliche Schutzausrüstung	**1.200 €**
*Schutzhandschuhe (Paar) gem. DIN/EN 60903 VDE 0682-311, K.l. 0 (- 1.000 V), *Schutzhelm (für Einsatz Kran/Flurfördergeräte)	
GESAMTKOSTEN WERKSTATTAUSRÜSTUNG	**392.050 €**

7.6 Investitionskosten HO-Bus-System (Reduzierte Oberleitung)

3.2. Kosten Schulungen

3.2.1. Kosten Personalqualifizierung bei Einführung

Fahrdienstmitarbeiter	**20.790 €**
*Unterweisung HV+Fahrzeug-Schulungskosten durch Hersteller, *Unterweisung HV+Fahrzeug - Personalkosten (3 h), *Ausbildung Multiplikator/Fahrlehrer (8 h), *Ausbildung Multiplikator (Fahrlehrer) - Personalkosten (8 h)	
Werkstattpersonal - HV-Qualifizierung	**73.302 €**
*Stufe 1 - Nicht-elektrotechnische Arbeiten, *Stufe 1 - Personalkosten (3 h), *Stufe 2 - Elektrotechnische Arbeiten im spanungsfreien Zustand, *Stufe 2 - Personalkosten (36 h), *Stufe 3 - Elektrotechnische Arbeiten im nicht-spannungsfreien Zustand (ohne Stufe 2), *Stufe 3 - Elektrotechnische Arbeiten im nicht-spannungsfreien Zustand (inkl. Stufe 2), *Stufe 3 - Personalkosten (ohne Stufe 2: 6 h), *Verantwortliche Elektrofachkraft, *Verantwortliche Elektrofachkraft - Personalkosten (15 h), *jährl. Wiederholungsschulung Stufe 2/3	
Werkstattpersonal - Sonstige Qualifizierung	**6.240 €**
*Flurfördermittelschein, *Personalkosten Flurfördermittelschein (16 h), *Befähigte Person zum Führen von (teil-) kraftbetriebenen Kranen, *Personalkosten Bef. Pers. Kran (8 h), *UVV Prüfung, *Jährliche Unterweisung gem. DGUV-V 1 für Kranführer und Stapelfahrer	
Gesamtkosten	**100.332 €**
GESAMTKOSTEN SCHULUNGEN	**100.332 €**

3.3. Sonstige Projektkosten

Projektmanagement	**1.370.652 €**
Projektleiter, Projektmitarbeiter, Sachkosten, Planungskosten Infrastruktur nach HOAI	1.370.652 €
GESAMTE SONSTIGE PROJEKTKOSTEN	**1.370.652 €**
GESAMTE SONSTIGE KOSTEN	**1.863.034 €**

7.7 Kostenvergleich HO-Bus-System (Reduzierte Oberleitung) - Dieselbus

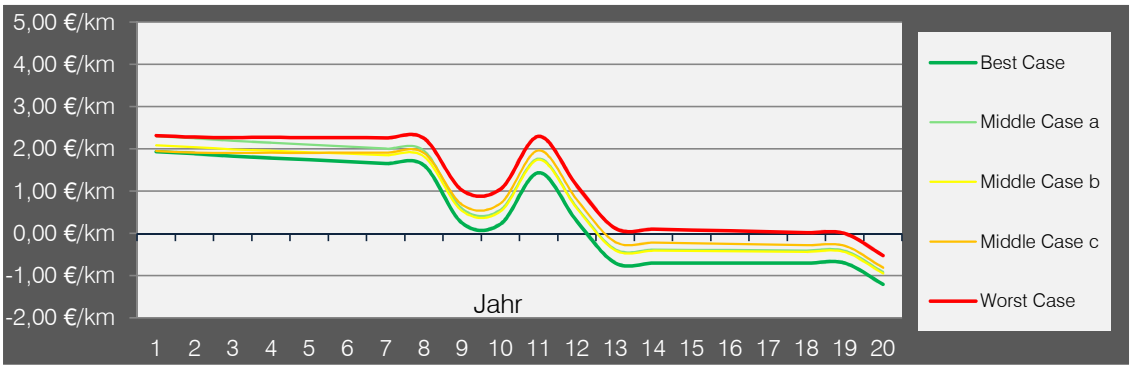
Eingangsparameter			
Fahrzeugeinsatz:	11 Referenzbusse	582.307 km/Jahr	gesamt: 11.646.140 km
	11 Elektrobusse	582.307 km/Jahr	gesamt: 11.646.140 km
Betrachtungszeitraum:	20 Jahre	(Einsatzzeit Elektrobus)	
Betrachtung:	Betrieb, Fahrzeug, Speicher, Ladeinfrastruktur, Betriebshof, Werkstatt		

Betrachtungsfälle	
7.7.1 Best-Case	geringe Kostenentwicklung beim E-Bus & hohe Kostenentwicklung beim Dieselbus
7.7.2 Middle-Case-a	geringe Kostenentwicklung beim E-Bus & geringe Kostenentwicklung beim Dieselbus
7.7.3 Middle-Case-b	mittlere Kostenentwicklung beim E-Bus & mittlere Kostenentwicklung beim Dieselbus
7.7.4 Middle-Case-c	hohe Kostenentwicklung beim E-Bus & hohe Kostenentwicklung beim Dieselbus
7.7.5 Worst-Case	hohe Kostenentwicklung beim E-Bus & geringe Kostenentwicklung beim Dieselbus

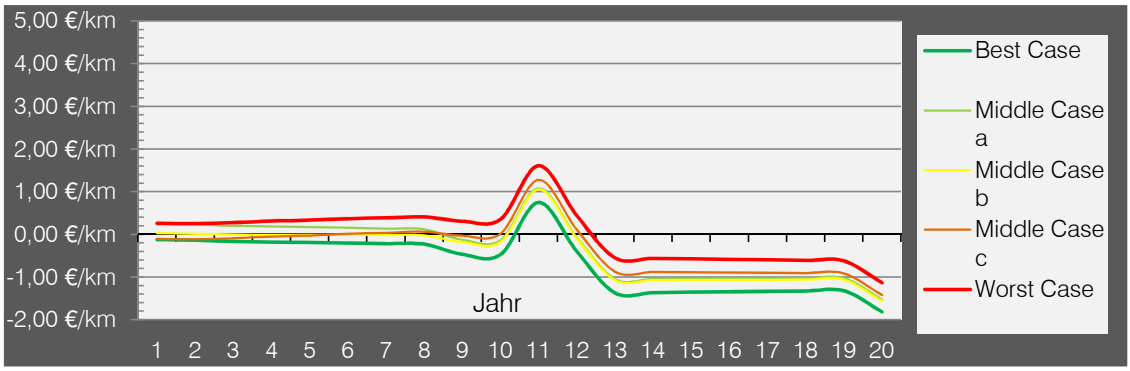
Kostenvergleich Elektrobus - Dieselbus (exkl. Kapitalverzinsung)	ohne Förderung	mit Förderung
7.7.1 Best-Case		
durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten Elektrobus:	4,17 €/km	3,29 €/km
durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten Dieselbus:	4,00 €/km	4,00 €/km
Mehr- (+) / Minder- (-) kosten Elektrobus:	0,17 €/km	-0,71 €/km
7.7.2 Middle-Case-a		
durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten Elektrobus:	4,17 €/km	3,29 €/km
durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten Dieselbus:	3,67 €/km	3,67 €/km
Mehr- (+) / Minder- (-) kosten Elektrobus:	0,50 €/km	-0,38 €/km
7.7.3 Middle-Case-b		
durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten Elektrobus:	4,31 €/km	3,43 €/km
durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten Dieselbus:	3,90 €/km	3,90 €/km
Mehr- (+) / Minder- (-) kosten Elektrobus:	0,41 €/km	-0,47 €/km
7.7.4 Middle-Case-c		
durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten Elektrobus:	4,50 €/km	3,62 €/km
durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten Dieselbus:	4,00 €/km	4,00 €/km
Mehr- (+) / Minder- (-) kosten Elektrobus:	0,50 €/km	-0,38 €/km
7.7.5 Worst-Case		
durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten Elektrobus:	4,50 €/km	3,62 €/km
durchschnittliche Betriebs- und Investitionskosten Dieselbus:	3,67 €/km	3,67 €/km
Mehr- (+) / Minder- (-) kosten Elektrobus:	0,83 €/km	-0,05 €/km

Mehr-/ Minderkosten Elektrobus im Vergleich zum Dieselbus pro km, über 16 Jahre

Jahresmehr-/ -minderkosten Elektrobus ohne Förderung (inkl. Kapitalverzinsung)



Jahresmehr-/ -minderkosten Elektrobus mit Förderung (inkl. Kapitalverzinsung)



Die Kostenansätze für Fahrzeug, Energiespeicher, Ladeinfrastruktur, Werkstattausrüstung und Personalqualifizierung basieren auf Marktpreisanalysen. Die Verifizierung der ermittelten Kosten erfolgte mit Hilfe der Standardisierten Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen des öffentlichen Personennahverkehrs.

Die Szenarien der Kostenentwicklung für die Speichertechnologie wurden auf Basis von Kostenprognosen des Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), des Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), der McKinsey & Company, der Roland Berger Holding GmbH, den Kostenschätzungen des Verkehrsbetriebes und der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung gebildet.

Die angesetzten Kosten für Dieselkraftstoffe basieren auf Kostenprognosen der Statista GmbH, des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWI) sowie auf Schätzungen des Verkehrsbetriebes und der VCDB. Die Kostenprognose für Gaskraftstoffe basiert auf Angaben des EWI Energiewirtschaftliches Institut an der Universität Köln, der Zukunft ERDGAS Service GmbH sowie auf Schätzungen des Verkehrsbetriebes und der VCDB. Die Annahmen der Energiepreisentwicklung (Strom) basieren auf Prognosen der Boston Consulting Group GmbH, des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWI) sowie auf Schätzungen des Verkehrsbetriebes und der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung.

Die angesetzten Instandhaltungskosten basieren auf den Angaben der VDV-Mitteilung 8802 "Instandhaltungssysteme in Omnibus-Betrieben des ÖPNV". Die angegebenen Kosten wurden auf den Elektrobus übertragen.

Die für das Fahrpersonal angesetzten Kosten basieren auf Angaben des Verkehrsbetriebes. Die Personalkosten beinhalten den Arbeitnehmer- und Arbeitgeberanteil.

7.8 Folgekostenrechnung HO-Bus-System (Reduzierte Oberleitung)

Eingangsparameter			
Fahrzeugeinsatz:	11 Referenzbusse	582.307 km/Jahr	gesamt: 23.292.280 km
	11 Elektrobusse	582.307 km/Jahr	gesamt: 23.292.280 km
Betrachtungszeitraum:	40 Jahre		
Betrachtung:	Betrieb, Fahrzeug, Speicher, Ladeinfrastruktur, Betriebshof, Werkstatt		

Betrachtungsfälle	
7.8.1 Best-Case	geringe Kostenentwicklung beim E-Bus & hohe Kostenentwicklung beim Dieselbus
7.8.2 Middle-Case-a	geringe Kostenentwicklung beim E-Bus & geringe Kostenentwicklung beim Dieselbus
7.8.3 Middle-Case-b	mittlere Kostenentwicklung beim E-Bus & mittlere Kostenentwicklung beim Dieselbus
7.8.4 Middle-Case-c	hohe Kostenentwicklung beim E-Bus & hohe Kostenentwicklung beim Dieselbus
7.8.5 Worst-Case	hohe Kostenentwicklung beim E-Bus & geringe Kostenentwicklung beim Dieselbus

Barwert für Betrachtungszeitraum (exponentielle Diskontierung mit 2%)	ohne Förderung	mit Förderung
7.8.1 Best-Case		
System mit 11 Dieselbussen:	-73.489.345 €	-73.489.345 €
System mit Elektrobussen:	-78.676.245 €	-63.397.946 €
Mehr- (+) / Minder- (-) kosten Elektrobussystem:	5.186.900 €	-10.091.399 €
7.8.2 Middle-Case-a		
System mit 11 Dieselbussen:	-68.716.803 €	-68.716.803 €
System mit Elektrobussen:	-79.036.974 €	-63.758.674 €
Mehr- (+) / Minder- (-) kosten Elektrobussystem:	10.320.170 €	-4.958.129 €
7.8.3 Middle-Case-b		
System mit 11 Dieselbussen:	-72.483.082 €	-72.483.082 €
System mit Elektrobussen:	-81.560.728 €	-66.282.429 €
Mehr- (+) / Minder- (-) kosten Elektrobussystem:	9.077.646 €	-6.200.653 €
7.8.4 Middle-Case-c		
System mit 11 Dieselbussen:	-73.489.345 €	-73.489.345 €
System mit Elektrobussen:	-84.925.026 €	-69.646.727 €
Mehr- (+) / Minder- (-) kosten Elektrobussystem:	11.435.681 €	-3.842.618 €
7.8.5 Worst-Case		
System mit 11 Dieselbussen:	-68.716.803 €	-68.716.803 €
System mit Elektrobussen:	-84.925.026 €	-69.646.727 €
Mehr- (+) / Minder- (-) kosten Elektrobussystem:	16.208.223 €	929.924 €

MARBURG
UNIVERSITÄTSSTADT

Fraktionsantrag	Vorlagen-Nr.:	**VO/6267/2018**
	Status:	öffentlich
	Datum:	28.05.2018
Antragstellende Fraktion/en:	B90/Die Grünen	

Beratungsfolge:

Gremium	**Zuständigkeit**	**Sitzung ist**
Magistrat	Stellungnahme	Nichtöffentlich
Bau- und Planungsausschuss, Liegenschaften	Vorberatung	Öffentlich
Stadtverordnetenversammlung	Entscheidung	Öffentlich

Antrag der Fraktion B90/Die Grünen betr. Milieus erhalten und stärken – Gentrifizierung entgegenwirken

Beschlussvorschlag:

Die Stadtverordnetenversammlung möge beschließen:

Der Magistrat wird beauftragt, im Sinne des Milieuschutzes nach § 172 bis 174 BauGB Erhaltungssatzungen für die Ortsbezirke Altstadt, Campusviertel, Südviertel und Weidenhausen zu erarbeiten.

Begründung:

Gentrifizierung ist nicht nur in Großstädten, sondern auch in Marburg ein zunehmendes Problem. Auf der Suche nach Anlagemöglichkeiten werden seit einigen Jahren vermehrt Immobilien zu lukrativen Renditeobjekten für Spekulant*innen. Einkommensschwache Mieter*innen aber auch Einzelhändler*innen und Gastronom*innen werden dadurch und im Zuge häufiger Eigentümer*innenwechsel aus den Kernstadtbereichen verdrängt. Oftmals geht dieser Prozess mit unverhältnismäßigen Mietsteigerungen einher. Durch diese Entwicklung geraten gewachsene Strukturen in Quartieren ins Wanken, Wohnraum verteuert sich massiv und auch für Gewerbetreibende ist ein Einzelhandelsgeschäft oder Gastronomiebetrieb in manchen Stadtvierteln aufgrund steigender Mieten oder Pachten nicht mehr zu finanzieren.
Zur Unterbindung von Immobilienspekulationen, zum Schutz von Mieter*innen und Gewerbetreibenden vor Mietsteigerungen aufgrund dessen und zur Erhaltung der städtebaulichen Besonderheiten der oben genannten Ortsbezirke benötigen wir auch in Marburg eine Erhaltungssatzung zum Zweck des Milieuschutzes in der Kernstadt. Die Stadt Frankfurt am Main und die dortigen satzungsmäßigen Regelungen können und sollten als Vorbild für Marburg dienen.

Christian Schmidt **Marco Nezi**

Fachdienst 09 - Kommunale Gremien Büro der Stadtverordnetenversammlung	

Auszug
aus der Niederschrift der Sitzung des Ortsbeirates Altstadt am 29. August 2018

Zu 5 Beratung und Stellungnahme – Antrag VO/6267/2018

Herr Christian Schmidt stellt als Antragsteller den Antrag ausführlich vor. Daraus entwickelt sich eine rege und kontroverse Diskussion, z. B. ob es sich hier um eine klassische Gentrifizierung (wie z. B. Prenzlauer Berg) handelt oder ob es sich um eine Verdrängung von Familien zugunsten von Studierenden handelt. Es wird darauf hingewiesen, dass es verschiedene Arten von Gentrifizierung gibt und dass es für die verschiedenen Wohnquartiere in der Innenstadt verschiedene Lösungen gibt, weswegen der Antrag was die Art der Satzung angeht, offen gehalten ist. Herrn Klenner ist das nicht konkret genug, er würde gerne genau wissen, was in der Satzung geregelt werden soll. Es wird eingeworfen, dass dies den Beteiligungsprozessen widerspricht.

Beschluss:
Der Ortsbeirat stimmt dem o.g. Antrag zu.

Abstimmungsergebnis:

Ja:	3
Nein:	1
Enthaltung	4

Im Anschluss an die Abstimmung gibt Herr Moss eine persönliche Erklärung ab: Die Problematik der Wohnraumveränderung wird erkannt, jedoch ist das Instrument der Satzung nicht ausreichend präzisiert.

Daraufhin wird ein zweiter Antrag gestellt.

Der Ortsbeirat wendet sich gegen Spekulationen mit Wohnraum, ist sich allerdings nicht einig, welche Instrumente die richtigen sind.

Abstimmungsergebnis: einstimmig

Marburg, 29.08.2018

gez.

Goharik Gareyan-Petrosyan
Ortsvorsteherin

gez.

Sandra Laaz
Schriftführerin

Fachdienst 09 - Kommunale Gremien Büro der Stadtverordnetenversammlung	

Auszug
aus der Niederschrift der Sitzung des Ortsbeirates Campusviertel am 11.09.2018

Zu 3 Antrag der Grünen Fraktion betr. Erhaltungssatzung

Die Argumente für und wider einer Erhaltungssatzung werden erneut ausgetauscht.

Herr Kulle von der Stadtplanung erläutert: Die Stadt hat viel Wohnraum durch Innenverdichtung geschaffen. Es gibt klare Vorgaben für den preislichen Rahmen neuer Wohnraumankäufe. 800 bis 1000 Käufe gibt es im Jahr. Es gibt Sanierungs- und Gestaltungssatzungen schon lange in verschiedenen Großstädten. Die Millieuschutzsatzung müsste gut rechtlich verankert sein und mit Zahlen und Analysen belegt. Sie ist vor allem ein Signal und wird als Warnung im Kaufprozess genutzt. Sie gilt nicht für Lokale etc.. Dadurch wird aber auch ein Prüfungsaufwand geschaffen. Bei Anwendung müsste die Stadt die Immobilien direkt ankaufen können, dies ist finanziell risikoreich für die Stadt. Der Oberbürgermeister würde gern Häuser ankaufen um niederpreislichen Wohnraum zu schaffen, das ist aber noch nicht beschlossen. Wenn die Gewobau (für die Stadt) ein Vorkaufsrecht haben soll, müsste sie auch das Geld haben, Wohnungen anzukaufen und zu sanieren. Das Campusviertel ist eher nicht betroffen. Die Altstadt ist stärker betroffen, da gibt es mehr Käufe. Es würde auch mehr Personal bedeuten. Es können unterschiedlich große Bezirke in die Erhaltungssatzung aufgenommen werden. Aber die Miete kann dadurch nicht direkt beeinflusst werden.

Wir diskutieren sehr kontrovers, ob wir überhaupt abstimmen können oder nicht. Die Ortsvorsteherin stellt folgenden Antrag: Der Ortsbeirat steht dem Antrag der Frak-tion B90/die Grünen positiv gegenüber. Stefan Oberhansl, Ulrike Ristau und Hans-Jürgen Schäfer stellen fest, dass sie das formale Vorgehen für rechtswidrig halten. Sie betonen, dass der Ortsbeirat keinen Antrag gestellt hat. Es gäbe nur einen Antrag der Grünen

Wir stimmen den Antrag der Ortsvorsteherin ab:

Abstimmungsergebnis:
Ja: 4
Nein: 3
Enthaltung: 1

Der Antrag wird positiv abgestimmt.

Stefan Oberhansl möchte nicht mit abstimmen, findet es nicht abstimmungsfähig, seine Stimme ist aber mitgezählt.

Marburg, 11.09.2018

gez.
Dr. Sabine Schock
Ortsvorsteherin

gez.
Kati Hesselmann
Schriftführerin

Fachdienst 09 - Kommunale Gremien Büro der Stadtverordnetenversammlung	

Auszug
aus der Niederschrift der Sitzung des Ortsbeirates Campusviertel am 16.10.2018

Zu 3 Antrag der Grünen Fraktion betr. Erhaltungssatzung

Die Ortsvorsteherin stellt ihren Antrag vor. Wir stimmen über die Stellungnahme des Ortsbeirates ab:

Abstimmungsergebnis:
Ja: 4
Nein: 1
Enthaltung: 1

Der Antrag wird positiv abgestimmt.

Marburg, 16.10.2018

gez.
Dr. Sabine Schock
Ortsvorsteherin

gez.
Kati Hesselmann
Schriftführerin

Anlage
Stellungnahme zum TOP 3 – Antrag der Grünen-Fraktion betr. Milieus erhalten und stärken – Gentrifizierung entgegenwirken

O R T S B E I R A T	Sitzung am	Tagesordnungspunkt
Campusviertel	16.10.2018	3

Betrifft: Stellungnahme zum Antrag „Milieus erhalten und stärken - Gentrifizierung entgegenwirken.“

Beschlusstext: Der Ortsbeirat Campusviertel befürwortet die Erarbeitung einer Erhaltungssatzung für die Innenstadtbezirke, einschließlich Campusviertel.

Begründung: Eine Erhaltungssatzung nach §172 bis 174 BauGB ermöglicht die Unterbindung von Mietspekulationen. Sie ist ein eigenständiges städtebauliches Instrument, das die städtebauliche Eigenart eines Gebiets auf Grund seiner städtebaulichen Gestalt erhalten und bewahren oder wieder herstellen soll.

Abstimmung:

Stimmenzahl		
4	1	1
Ja	Nein	Enthaltung

x	Zustimmung
	Ablehnung

Kopie
an den Magistrat

Fachdienst _____zur Kenntnisnahme und weiteren Bearbeitung

S. Schade

_____ _____

Ortsvorsteher/in Schriftführer/in

Fachdienst 09 - Kommunale Gremien Büro der Stadtverordnetenversammlung	

Stellungnahme
des Ortsbeirates Weidenhausen
(beschlossen in der Ortsbeiratssitzung am 20.09.2018)

Stellungnahme des Ortsbeirates Weidenhausen zum Antrag von B'90/DIE GRÜNEN betr. Milieus erhalten und stärken – Gentrifizierung entgegenwirken

Der Bau- und Planungsausschuss, Liegenschaften hat den o.g. Antrag in seiner Sitzung am 14.06.2018 zunächst zur Beratung und Stellungnahme u.a. an den Ortsbeirat Weidenhausen verwiesen. Der Ortsbeirat hat in seiner Sitzung am 20.09.2018 darüber beraten und abgestimmt (Meinungsbild). Die Stellungnahme lautet wie folgt:

Der Ortsbeirat stimmt dem Ansinnen des Antrages zu und sieht ebenfalls die Notwendigkeit unsere städtischen Milieus in ihrem Bestand zu schützen und der gerade auch in Weidenhauen ansteigenden Mietspekulation Einhalt zu gebieten.

Der Ortsbeirat erkennt dabei den Milieuschutz bzw. eine Erhaltungssatzung als ein Mittel an, um der Wohnungsnot im innerstädtischen Bereich entgegen zu wirken. Dabei stellt sich der Ortsbeirat die Frage über die Wirksamkeit der vorhandenen Mittel (Mietspiegel etc.) gegen Gentrifizierung und Wohnungsnot in Marburg und stellt fest, dass diese wohl nicht ausreichen.

In Bezug auf § 174 Abs. 2 BauG fragt sich der Ortsbeirat, wie eine Erhaltungssatzung bzw. die Voraussetzung für Marburg aussehen könnten und welche Wirkung zu erwarten wäre.

In einer abschließenden Abstimmung ergab sich folgendes Meinungsbild: 6 Ja-Stimmen und 1 Nein-Stimme. Aus dem Plenum gab es keinen Widerspruch.

gez.:
Wolfgang Grundmann
für den Ortsbeirat Weidenhausen

Marburg,
den 25.09.2018

Fachdienst 09 - Kommunale Gremien Büro der Stadtverordnetenversammlung	

Auszug
aus der Niederschrift der Sitzung des Ortsbeirates Südviertel am 21.11.2018

Zu 4 Antrag „Milieuschutzsatzung

Der Antrag wird im Ortsbeirat diskutiert und abgestimmt:

Abstimmungsergebnis:
Ja: 5
Nein: 1
Enthaltung: 2

Marburg, 21.11.2018

gez.

Antje Tietz
Ortsvorsteherin

MARBURG
UNIVERSITÄTSSTADT

Fraktionsantrag	Vorlagen-Nr.:	**VO/6527/2018**
	Status:	öffentlich
	Datum:	08.11.2018
Antragstellende Fraktion/en:	CDU SPD BfM	

Beratungsfolge:

Gremium	**Zuständigkeit**	**Sitzung ist**
Magistrat	Stellungnahme	Nichtöffentlich
Bau- und Planungsausschuss, Liegenschaften	Vorberatung	Öffentlich
Stadtverordnetenversammlung	Entscheidung	Öffentlich

Antrag der Fraktionen von CDU, SPD und BfM betr. Micro-Apartments

Beschlussvorschlag:

Die Stadtverordnetenversammlung wird gebeten folgenden Beschluss zu fassen:

Der Magistrat wird beauftragt zu prüfen ob und in welcher Form Micro-Apartments als neue und innovative Wohnform den Wohnungsmarkt in Marburg nachfragegerecht ergänzen und entlasten könnten. Da das Wohnraumversorgungskonzept der Stadt vom November 2015 in dieser Tiefenschärfe keine Aussagen trifft, ist mit dem Studentenwerk und den Wohnungsbaugesellschaften – insbesondere der GeWoBau- die konkrete Nachfrage nach solchen Angeboten zu klären.

Begründung:

Micro-Apartments bis 20 Quadratmeter Wohnfläche werden als neue Wohnform zunehmend an Bedeutung gewinnen. In vielen Großstädten, wo innerstädtisches Bauland knapp und teuer ist, sind Micro-Apartments besonders bei jungen Leuten und Singles beliebt. Nicht nur, weil sie in der Regel deutlich preisgünstiger sind als übliche Wohnungsgrößen angeboten werden, sondern weil sie zunehmend auch dem Lebensstil der Leute entgegenkommen. Gewohnt wird zentral, gearbeitet oder studiert um die Ecke, im Viertel wird eingekauft und per Fahrrad ist man mobil.

Statt sich mit Unnötigem zu belasten, werden Dinge getauscht oder nur bei Bedarf ausgeliehen. Wirklich wichtiges wird digitalisiert und in der „Datenwolke“ verstaut, die immer und überall verfügbar ist. Das Bett verschwindet im Wandschrank, die Herdplatte in der Schublade und das Bügelbrett klappt im Bad zu Seite.

Die Adressaten in bereits verwirklichten Projekten sind bevorzugt Studierende, aber auch Geschäftsreisende. Inwieweit diese zweite Gruppe in Marburg von Belang ist, wäre auch mit

den Hotelbetreibern zu klären. Hier böten sich Lösungen im Bestand bzw. am Lokschuppen oder in der Gutenbergstraße in den neu entstehenden Hotels an.

Auch in Deutschland sind Micro-Apartments auf dem Vormarsch. Berlin, Hamburg und München sind nur einige Beispiele der Etablierung neuer Wohnformen. Auch in Marburg könnte diese Art des modernen Wohnens eine der vielen möglichen Antworten auf die Fragen der Wohnungsknappheit sein.

Jens Seipp **Sonja Sell** **Roland Frese**
Roger Pfalz

MARBURG
UNIVERSITÄTSSTADT

Fraktionsantrag	Vorlagen-Nr.: Status: Datum:	**VO/6557/2018** öffentlich 23.11.2018
Antragstellende Fraktion/en:	SPD Marburger Linke BfM CDU	

Beratungsfolge:

Gremium	**Zuständigkeit**	**Sitzung ist**
Magistrat	Stellungnahme	Nichtöffentlich
Bau- und Planungsausschuss, Liegenschaften	Vorberatung	Öffentlich
Stadtverordnetenversammlung	Entscheidung	Öffentlich

Antrag der Fraktionen SPD, Linke, BfM, CDU, betr.: Verwendung von Polystyrol bei Sanierungen und Neubauten

Beschlussvorschlag:

Die Stadtverordnetenversammlung möge beschließen:

Der Magistrat wird gebeten zu prüfen, inwieweit bei Sanierungen und Neubauten von Gebäuden durch die Stadt und seine Gesellschaften auf Polystyrol als Dämmstoff verzichtet werden und stattdessen ökologisch unbedenklichere Materialien eingesetzt werden können. Die Stadtverordnetenversammlung möchte auf Polystyrol möglichst verzichten.

Begründung:

Die Verwendung von Dämmstoffen aus Polystyrol ist unter anderem wegen des Brandverhaltens in die öffentliche Kritik geraten.

Auch die Verwendung des Brandhemmers HBCD (Hexabromcyclododecan) in Polystyrol-Dämmstoffen wird kritisch gesehen, da dieser Stoff zwar die Entzündung von Kunststoffen und die Ausbreitung von Flammen verzögert, diese aber bei vollentwickelten Bränden doch auch brennen.

Dem gegenüber stehen gesundheitsschädliche Effekte wie Störungen der Embryonal- und Säuglingsentwicklung, die laut Umweltbundesamt dokumentiert sind. HBCD steht im Verdacht, die Fortpflanzung zu beeinträchtigen.

Zudem ist HBCD schlecht zu entsorgen und schwer abbaubar. Er kann in das Grundwasser eindringen, sich dort anreichern und bei Wasserorganismen schwere Schäden hervorrufen, die sich über die Nahrungskette bis zum Menschen fortsetzen.

Eine Alternative bieten laut Umweltbundesamt mineralische Dämmstoffe wie Mineralwolle oder Blähton. Diese tragen z. B. den "Blauen Engel".

Gerald Weidemann Tanja Bauder-Wöhr Roland Frese HermannHeck
Matthias Range