

Techno-ökonomische Auslegungsmethodik für die Elektrifizierung urbaner Busnetze

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Wi.-Ing. Kilian Berthold

Tag der mündlichen Prüfung: 13.12.2018

Referenten: Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld

Prof. Dr.-Ing. Dietmar Göhlich

Vorwort

Mit der Absicht, den Stadtverkehr emissionsfrei und damit ökologischer zu gestalten, forcieren weltweit Städte und Verkehrsbetriebe die Transformation ihres Stadtbusverkehrs vom Dieselantrieb zum elektrischen Antrieb. Dieser Transformationsprozess betrifft das Gesamtsystem Bus und schließt damit neben der Fahrzeugtechnik auch den Betrieb und die Infrastruktur mit ein. Entsprechend handelt es sich um ein Querschnittsthema, welches alle Unternehmensbereiche eines Verkehrsunternehmens vor neue große Herausforderungen stellt. Die zentrale Fragestellung hierbei lautet, wie das städtische Busnetz strategisch auf einen reinen E-Busbetrieb umgestellt werden kann und welche Parameter hierbei zu wählen sind, um eine langfristig technologisch und betriebswirtschaftlich optimale Konfiguration zu erreichen.

Die vorliegende Arbeit möchte dazu beitragen, Verkehrsunternehmen, Städte, Politik und Bushersteller bei der Planung und Einführung sowie technischen Konfiguration von E-Buslinien und stadtweiten E-Bus-(Teil-) Netzen zu unterstützen. Hierzu sollen die vorhandenen Auslegungs-Zielkonflikte durch die Entwicklung einer techno-ökonomischen Methodik aufgelöst werden. Diese bestimmt für zu elektrifizierende Buslinien die technischen Parameter und gewährleistet hierbei über die Lebenszeit der Fahrzeuge und ihrer Infrastruktur die günstigsten Lebenszykluskosten (TCO, Total Cost of Ownership). Die Methodik fußt auf zwei Säulen: Die erste Säule bildet das technische System. Hier werden die Energieflüsse im Gesamtsystem auf Basis eines detaillierten technologischen, validierten Modells in Abhängigkeit der betrieblichen Anforderungen simuliert. Die zweite Säule besteht aus einer umfassenden Analyse der Lebenszykluskosten für E-Bussysteme, auch unter Berücksichtigung von externen Kosten. Die Berechnungen aus beiden Bereichen liefern die Eingangswerte zur anschließenden techno-ökonomischen Optimierung. Anhand deren Ergebnisse können die Konfiguration einzelner

EBuslinien unter verschiedenen Rahmenbedingungen analysiert, Synergieeffekte zu anderen Linien im Hinblick auf eine Busnetzauslegung ermittelt und entsprechend die geeigneten kostenoptimalen technischen Parameter gewählt werden. Der zugrundeliegende Optimierungsalgorithmus ist der Disziplin der Standortplanung aus dem Operations Research (OR) entnommen und findet das globale Optimum.

Die realitätsnahe, detaillierte und validierte Fahrzeugsimulation der ersten Säule ermöglicht es, beliebige Bestandteile des Energieflusses genauer auf ihre langfristigen Auswirkungen hin zu untersuchen sowie zu verbessern. Der modulare Aufbau der Softwareumgebung, die zentrale Dateneingabe über eine intuitive Benutzerschnittstelle (GUI) sowie die dreidimensionale Visualisierungsmöglichkeit der Fahrzeugsimulation stellen die Anwendungsorientierung der Arbeit sicher und bilden die Grundlage für einen Praxiseinsatz der Methodik.

Durch die mehrperiodische Betrachtungsweise bei der Optimierung können die damit zusammenhängenden Effekte wie Batteriealterung sowie Preis- und Technologieentwicklungen zur Ermittlung langfristig realistischer und die Zukunft berücksichtigender TCO in die Optimierung integriert werden. Zudem können die ökologischen Auswirkungen des optimierten E-Busbetriebs durch die Kalkulation seiner externen Kosten ermittelt werden („Wahre TCO“).

Anhand einer Vielzahl analysierter Szenarien wird das Potenzial der Optimierungsmethodik unter Beweis gestellt. Mithilfe der hierbei generierten Ergebnisse lassen sich Sensitivitätsanalysen erstellen. Diese ermöglichen die Identifikation von Kostentreibern im Auslegungsprozess neuer E-Buslinien. Auf diese Weise leistet die vorliegende Arbeit einen Beitrag zu einer Verbesserung der ökologischen Bilanz einer Stadt und trägt zur Erfüllung zukünftiger regulatorischer Anforderungen bei.

Kurzfassung

Aufgrund verstärkter politischer, juristischer und gesellschaftlicher Tendenzen nach einer umweltverträglicheren Mobilität forcieren Städte die Transformation ihres Stadtbusverkehrs vom Diesel- zum elektrischen Antrieb. Diese Entwicklung stellt aufgrund umfangreicher ökonomischer und technologischer Aufwände sowie Unsicherheiten die Busbetreiber vor neue, große Herausforderungen. Es ergibt sich die Frage nach der langfristig technologisch und betriebswirtschaftlich optimalen Konfiguration einzelner E-Bus-Linien sowie eines stadtweiten E-Bus-Netzes. Diese Arbeit soll ihren Beitrag dazu leisten, die vorhandenen Auslegungs-Zielkonflikte aufzulösen, indem sie eine techno-ökonomische Methodik einführt, wie für zu elektrifizierende Buslinien die technischen Parameter zu wählen sind. Hierbei sind über die Lebenszeit der Fahrzeuge und ihrer Infrastruktur die günstigsten Total Cost of Ownership (Lebenszykluskosten) zu gewährleisten.

Die Methodik fußt auf zwei Säulen: Einerseits auf einer detaillierten technologischen Simulation des Gesamtsystems E-Bus zur Ermittlung validierter Energiebedarfe in Abhängigkeit der betrieblichen Anforderungen. Andererseits auf einer umfassenden Analyse der Lebenszykluskosten für E-Bus-Systeme, auch unter Berücksichtigung von externen Kosten. Die Berechnungen aus beiden Bereichen liefern die Eingangswerte zur anschließenden techno-ökonomische Optimierung. Anhand deren Ergebnisse können die Konfiguration einzelner E-Buslinien unter verschiedenen Rahmenbedingungen analysiert, Synergieeffekte zu anderen Linien in Hinblick auf eine Busnetzauslegung ermittelt und entsprechend die geeigneten kostenoptimalen technischen Parameter gewählt werden.

Abstract

As a result of increased political, legal and societal trends toward more environmentally sustainable mobility and transportation solutions cities are speeding up the transformation of their bus fleets from combustion engines to an electrical drivetrain. Due to wide ranging economic as well as technological challenges and uncertainties this development poses new hurdles for the bus operating companies. Therefore the question arises how to optimally configure individual electrical bus routes along with a city-wide electric bus network, with long-term technological and operational considerations in mind. This thesis is intended to contribute to solving the conflict of objectives in the electric bus system configuration by introducing a methodology based on technological combined with economical deliberations. Using this methodology the technical parameters of the electrical bus routes are carefully chosen. These parameters are selected to ensure the lowest Total Cost of Ownership (life cycle costs) over the lifetime of the electrical vehicle and the associated infrastructure.

The methodology is centered on two pillars: firstly a detailed technological simulation of the entire system (electric bus) to determine the validated energy demand in dependence of the operational requirements; secondly, a comprehensive analysis of the life cycle costs for electric bus systems, taking into consideration external costs. The findings from both areas provide the input variables to the subsequent technological-economical optimization. With the help of these results the configuration of individual electric bus routes can be analyzed under various conditions. Further, synergy effects to other routes with regard to the bus network layout can be utilized. Finally, the corresponding appropriate technical parameters based on cost optimization can be determined.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am Teilinstitut für Bahnsystemtechnik des Instituts für Fahrzeugsystemtechnik (FAST) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Die Gelegenheit am Institut für fünfzehn Jahre zum Thema der E-Busse zu forschen, verdanke ich einer Vielzahl von Personen.

An erster Stelle möchte ich meine Eltern nennen und mich bei ihnen für ihre immerwährende bedingungslose Unterstützung bedanken, die mir meinen gesamten Lebens- und Bildungsweg so überhaupt erst ermöglicht hat. Ebenso danke ich Franziska für ihre Geduld und Unterstützung.

Die Möglichkeit, sich im Rahmen einer vollen Stelle derart intensiv mit einem Thema auseinandersetzen zu dürfen, dabei vielfältige Freiheiten nutzen zu können und dadurch sehr viel zu lernen, erachte ich als ein großes Privileg. Hierfür und für alle Unterstützung danke ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld. Ebenso hat Ivana Kramer einen großen Anteil an den vorzüglichen Rahmenbedingungen des Teilinstituts, wofür ich ihr auch sehr verbunden bin. Mein Dank gilt weiterhin allen meinen ehemaligen Kollegen am Lehrstuhl für die jederzeitige Hilfsbereitschaft und das freundliche Miteinander. Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietmar Göhlich von der TU Berlin möchte ich für die Übernahme des Koreferats meiner Arbeit herzlich danken.

Ich bedanke mich bei allen Studenten, die durch ihre Abschlussarbeiten maßgeblich zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen haben. Gleiches gilt für meine Hiwis. Hier möchte ich insbesondere Markus Tesar, Jan-Pascal Gruhler, Rüdiger Fehrenbacher, Peter Förster, Felix Hettich, Johanna Beer, Johanna Mengelkoch sowie Jan Maier nennen.

Für meine Arbeiten und Erkenntnisse im Zuge des Projektes PRIMOVE Mannheim möchte ich mich besonders bei Sebastian Menges (rnv GmbH),

und Robert Schimke (ehemals Bombardier Transportation GmbH) für sämtliche Hilfestellungen und Ratschläge bedanken. Dem BMVI, der rnv GmbH, der Bombardier Transportation GmbH und der Stadt Mannheim danke ich für die gute Zusammenarbeit und jedwede Unterstützung.

Brita Rohrbeck (ehemals IOR, KIT), Alexander Kunith (ehemals MPM, TU Berlin), Professorin Natalia Kliewer (Professur für Wirtschaftsinformatik, FU Berlin) danke ich für sämtliche Ratschläge, Zusammenarbeiten und den Erfahrungsaustausch.

Karlsruhe, im Mai 2018

Kilian Berthold

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-------------|
| Kurzfassung | i |
| Abstract | iii |
| Danksagung | v |
| Inhaltsverzeichnis | vii |
| Abbildungsverzeichnis | xi |
| Tabellenverzeichnis | xvii |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Motivation E-Busse | 1 |
| 1.2 Ziel der Arbeit | 2 |
| 1.3 Grundlegende Annahmen | 6 |
| 1.4 Aufbau der Arbeit | 8 |
| 1.5 Einordnung in den Stand der Wissenschaft..... | 11 |
| 2 Grundlagen | 19 |
| 2.1 Stadtbusbetrieb | 19 |
| 2.1.1 Städtischer Linienbusbetrieb und seine Rolle im ÖPNV | 20 |
| 2.1.2 Elektrifizierung von Stadtbussen | 25 |
| 2.1.3 Busliniennetz Mannheim und Projekt PRIMOVE | 29 |
| 2.2 Technik..... | 34 |
| 2.2.1 Gesamtfahrzeug, Energieflüsse und Wirkungsgrade | 34 |
| 2.2.2 E-Motor, Rekuperation und Getriebe..... | 39 |
| 2.2.3 Batterie | 43 |
| 2.2.4 Netzanbindung, Ladetechnologie und Ladeverhalten..... | 49 |
| 2.2.5 Nebenverbraucher | 53 |
| 2.3 System, Modell und Simulation | 56 |
| 2.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Emissionen | 58 |
| 2.4.1 Total Cost of Ownership (TCO) | 59 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 2.4.2 | Emissionen und externe Kosten | 63 |
| 2.5 | Optimierung: Operations Research und Standortplanung | 66 |
| 3 | Technologisches Modell | 70 |
| 3.1 | Strukturierung E-Bus-Gesamtsystem und Softwareeinsatz..... | 70 |
| 3.2 | Modellbildung der Teilsysteme Betrieb und Infrastruktur | 73 |
| 3.2.1 | GPS-Datenerfassung, Auswertung und Statistik | 75 |
| 3.2.2 | Verkehrssimulation | 80 |
| 3.2.3 | GUI zur Inputdatenerfassung und Datenmanagement | 82 |
| 3.3 | Modellbildung des Teilsystems Fahrzeug | 84 |
| 3.3.1 | Vorstellung Fahrzeugsimulationssoftware | 84 |
| 3.3.2 | E-Maschine, Getriebe, Bremsstrategie, Rekuperation | 87 |
| 3.3.3 | Batteriemodell und Batteriealterung | 89 |
| 3.3.4 | Ladetechnik | 96 |
| 3.3.5 | Nebenverbraucher | 97 |
| 3.4 | Validierung technologisches Modell..... | 100 |
| 3.4.1 | Charakterisierung Betriebstag, Messaufbauten und Messergebnisse | 101 |
| 3.4.2 | Validierung | 105 |
| 3.5 | Simulation und Ergebnisse | 109 |
| 3.5.1 | Nachweis der Zielkonflikte bei der Systemauslegung | 110 |
| 3.5.2 | Simulationsstudien im Hinblick auf Gesamtsystemoptimierung | 117 |
| 3.5.3 | E-Bus-Systemauslegung anhand technischer Daten | 125 |
| 4 | Ökonomisches Modell | 128 |
| 4.1 | Struktur der TCO-Modellierung und Softwareeinsatz | 128 |
| 4.2 | Szenarienbildung und Generierung von Inputdaten | 130 |
| 4.2.1 | Kostenentwicklungen | 131 |
| 4.2.2 | Emissionen und Emissionskosten | 134 |
| 4.3 | TCO Elektrobus | 136 |
| 4.3.1 | Klassische TCO | 137 |
| 4.3.2 | Wahre TCO E-Bus und Vergleich mit TCO Dieselbus | 146 |
| 4.4 | Validierung und Diskussion..... | 151 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5 | Techno-ökonomische Optimierung | 154 |
| 5.1 | Struktur der Optimierungsmethodik und Softwareeinsatz | 154 |
| 5.2 | Einführung der Inputdaten | 157 |
| 5.2.1 | Linienwahl | 158 |
| 5.2.2 | Inputdaten für Linie 63 | 158 |
| 5.3 | Optimierungsmodell | 165 |
| 5.3.1 | Mengen und Parameter | 165 |
| 5.3.2 | Entscheidungsvariablen..... | 169 |
| 5.3.3 | Zielfunktion..... | 170 |
| 5.3.4 | Nebenbedingungen | 171 |
| 6 | Berechnungen und Ergebnisanalyse..... | 178 |
| 6.1 | E-Bus-Linienoptimierung | 178 |
| 6.1.1 | Basisszenarien Linie 63 | 178 |
| 6.1.2 | Validierung der Linienoptimierung..... | 184 |
| 6.1.3 | Parametervariationen bei der Linienauslegung | 186 |
| 6.1.4 | Auslegung Buslinien 53 und 60..... | 202 |
| 6.1.5 | Schrittweise Auslegung von E-Busnetzen..... | 208 |
| 6.2 | Ergebnisdiskussion..... | 215 |
| 6.2.1 | Empfehlungen für die Auslegung von E-Buslinien..... | 215 |
| 6.2.2 | Stufenplan zur Einführung des E-Busbetriebs | 221 |
| 6.2.3 | Kritische Würdigung | 223 |
| 7 | Zusammenfassung und Ausblick | 229 |
| 7.1 | Zusammenfassung | 229 |
| 7.2 | Ausblick..... | 231 |
| A | Anhang | 233 |
| B | Abkürzungsverzeichnis..... | 260 |
| C | Symbolverzeichnis | 262 |
| D | Literaturverzeichnis | 267 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-------|---|----|
| 1-1: | Qualitative Darstellung Zielkonflikt E-Buslinien-Konfiguration..... | 4 |
| 1-2: | Abhängigkeiten der Zielkonflikte und deren Parameter | 5 |
| 1-3: | Grundlegende Strukturierung der Arbeit | 9 |
| 1-4: | Kapitelstruktur der Arbeit | 10 |
| 1-5: | Aktueller Stand der Entwicklung bei E-Bus-Systemen | 12 |
| 2-1: | Planungsprozesse der Betriebsplanung im ÖPNV | 21 |
| 2-2: | Äußere Einflussfaktoren auf den Busbetrieb | 22 |
| 2-3: | Zeitanteile im Busbetrieb | 24 |
| 2-4: | Antriebskonzepte für Stadtbusse | 25 |
| 2-5: | Betriebliche Auslegungsproblematik bei E-Bussen | 27 |
| 2-6: | Ladetechnologien für Batteriebusse | 28 |
| 2-7: | Restriktionen bei Auswahl und Bau von Ladeinfrastruktur | 29 |
| 2-8: | Schematische Darstellung Linienvverlauf der Buslinie 63 | 32 |
| 2-9: | Leistungs- und Signalflüsse im E-Bus-System..... | 36 |
| 2-10: | Fahrwiderstände am Linienbus | 37 |
| 2-11: | Ersatzschaltbild Asynchronmaschine | 40 |
| 2-12: | Beispielhaftes Wirkungsgradkennfeld einer E-Maschine..... | 41 |
| 2-13: | Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Batteriezelle | 44 |
| 2-14: | Ersatzschaltbild einer Batterie | 45 |
| 2-15: | Einflussfaktoren zyklische Alterung von Batteriezellen | 47 |
| 2-16: | Vereinfachte Darstellung äquivalenter Vollzyklen | 49 |
| 2-17: | Anschlussmöglichkeiten an das Energieversorgungsnetz | 50 |
| 2-18: | Vereinfachte Darstellung IU-Ladeverfahren | 52 |
| 2-19: | Nebenverbraucher beim E-Bus | 54 |

| | |
|---|-----|
| 2-20: Übersicht HVAC-System beim E-Bus | 55 |
| 2-21: Ablaufschema Modellbildung und Simulation | 57 |
| 2-22: Kostenstruktur im Busbetrieb | 59 |
| 2-23: Lebenszykluskosten für einen Linienbus..... | 60 |
| 2-24: Methodik des Life Cycle Assessments..... | 64 |
| 2-25: Lösungsraum zweidimensionales lineares Optimierungsproblem | 67 |
| 3-1: Modellierungsstruktur und Inputdatensets..... | 71 |
| 3-2: Überblick Softwaretools zur Modellierung | 72 |
| 3-3: Dimensionen bei der Umweltabbildung der Realität..... | 73 |
| 3-4: Darstellung des Vorgangs der Haltestellenerkennung..... | 76 |
| 3-5: Programmablauf GPS-Haltestellenerkennung | 77 |
| 3-6: Linienverlauf, Haltedauern, Haltewahrscheinlichkeiten | 78 |
| 3-7: Box-Plot-Darstellung der Haltedauern | 79 |
| 3-8: Fahrzyklus einer L63-Servicefahrt | 79 |
| 3-9: Ausschnitt der Verkehrsmodellierung mit PTV Vissim..... | 82 |
| 3-10: Umlaufplaner-GUI zur Betriebstagsplanung | 83 |
| 3-11: Signalflüsse zwischen TruckMaker und Matlab/Simulink | 87 |
| 3-12: IPG Movie zur Visualisierung der Fahrzeugsimulation..... | 87 |
| 3-13: Bremsstrategie für rekuperatives Bremsen | 89 |
| 3-14: Shepherd-Modell nach Tremblay..... | 90 |
| 3-15: Daten und Entladekurven zur Batterie 46 NANO NMC..... | 91 |
| 3-16: Prognostizierung der erwarteten Batterielebensdauer | 96 |
| 3-17: Veranschaulichung der Ladesteuerung..... | 97 |
| 3-18: Nebenverbraucher-Leistung | 100 |
| 3-19: Messaufbau Hess Swiss Primove Bus..... | 103 |
| 3-20: Sankey-Diagramm zur Bilanzierung der Energieflüsse..... | 104 |
| 3-21: Vergleich Geschwindigkeit und Motorleistung | 106 |

| | |
|--|-----|
| 3-22: Messwerten zur Innenraumtemperatur | 107 |
| 3-23: SOC-Verlauf der 10. Servicefahrt | 108 |
| 3-24: SOC-Verlauf verschiedener Batteriegrößen für Unterwegsladen | 111 |
| 3-25: Korrelationsanalyse und Regressionsgerade Batterielebensdauer . | 111 |
| 3-26: Korrelationsanalyse Batteriekapazität mit Energiebedarf | 113 |
| 3-27: SOC-Verlauf einer 90 kWh-Batterie mit Nachladung bei unterschiedlichen Ladeleistungen | 114 |
| 3-28: Korrelation Ladeleistung zu Batterielebensdauer | 115 |
| 3-29: SOC-Verlauf mit 3 bzw. 6 Ladehaltstellen | 116 |
| 3-30: Korrelation Batterielebensdauer und täglicher Ladeanteil | 117 |
| 3-31: Klimakurven als Inputdaten für die Simulationen | 118 |
| 3-32: Sensitivitätsanalyse Energiebedarf | 124 |
| 3-33: Sensitivitätsanalyse Batteriealterung..... | 125 |
| 3-34: Pareto-Optimierung der technologischen Auslegung | 126 |
| 4-1: Zusammensetzung der klassischen und der wahren TCO | 129 |
| 4-2: TCO-Vergleich E-Bus zu zwei parallel angeschafften Dieselnbussen . | 140 |
| 4-3: TCO-Vergleich verschiedener Ladetechnologien | 140 |
| 4-4: TCO induktives 200 kW-Gelegenheitsladen | 142 |
| 4-5: TCO konduktives 500 kW-Gelegenheitsladen | 143 |
| 4-6: TCO 100 kW Stecker-Übernachtladen | 143 |
| 4-7: Sensitivitätsanalyse TCO E-Bus | 144 |
| 4-8: Wahre TCO E-Bus- ggü. Dieselbus | 150 |
| 4-9: Bandbreite von TCO/km-Werten | 152 |
| 5-1: Zeitliche Struktur des Optimierungsansatzes | 155 |
| 5-2: Struktur der techno-ökonomischen Optimierungsmethodik..... | 156 |
| 5-3: Kosten- und Technologieentwicklungskurve | 164 |
| 5-4: Visualisierung des Ablaufs eines Betriebstags | 165 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 6-1: | Optimierungsergebnisse der Basisszenarien | 179 |
| 6-2: | Optimale Ladehaltestellen- und Batteriekonfigurationen Basisszenarien | 180 |
| 6-3: | Validierung der SOC-Verläufe der CPLEX-Basisszenarien..... | 184 |
| 6-4: | Optimierungsergebnisse Variation der Endhaltestellen-Standzeit.. | 187 |
| 6-5: | Optimale Ladehaltestellen- und Batteriekonfigurationen für Variation der Endhaltestelle-Haltedauer | 188 |
| 6-6: | Optimierungsergebnisse Variation Anzahl eingesetzter Fahrzeuge | 189 |
| 6-7: | Optimale Ladehaltestellen- und Batteriekonfigurationen für Variation Anzahl eingesetzter Busse | 190 |
| 6-8: | Optimierungsergebnisse der Variation der Servicefahrten-Anzahl . | 191 |
| 6-9: | Optimale Ladehaltestellen- und Batteriekonfiguration für unterschiedliche Anzahlen an Servicefahrten..... | 192 |
| 6-10: | Optimierungsergebnis Variation zugrundeliegender Betriebstag ... | 193 |
| 6-11: | Optimale Ladehaltestellen- und Batteriekonfigurationen für unterschiedliche Betriebstage | 194 |
| 6-12: | Optimierungsergebnisse für unterschiedliche infrastrukturelle Rahmenbedingungen | 196 |
| 6-13: | Optimale Ladehaltestellen- und Batteriekonfiguration für unterschiedliche Infrastrukture restriktionen | 197 |
| 6-14: | Optimierungsergebnisse der Variation technischer Parameter | 199 |
| 6-15: | Optimale Ladehaltestellen- und Batteriekonfiguration für verschiedene technische Betrachtungsfälle | 199 |
| 6-16: | Optimierungsergebnis Variation Ladestations- und Batteriekosten | 201 |
| 6-17: | Optimale Ladehaltestellen- und Batteriekonfigurationen bei Variation der Kostenstruktur | 201 |
| 6-18: | Optimierungsergebnisse für die Linien 53 und 60 | 203 |

| | |
|---|-----|
| 6-19: Optimale Haltestellen- und Ladestationenkonfiguration Linien 53 und 60 | 203 |
| 6-20: Gemeinsamer Linienverlauf der Linien 60 und 63 | 209 |
| 6-21: Optimierungsergebnisse Synergieeffekte Linie 63 mit Linie 60 | 210 |
| 6-22: Optimale Ladehaltestellen- und Batteriekonfigurationen Linie 63 bei Nutzung von Synergien mit Linie 60 | 211 |
| 6-23: Optimierungsergebnisse Synergieeffekte Linien 60 mit Linie 63 | 213 |
| 6-24: Optimale Ladehaltestellen- und Batteriekonfigurationen Linie 60 bei Nutzung von Synergien mit Linie 63 | 214 |
| 6-25: Sensitivitätsanalyse verschiedener Optimierungen (Herbst-Fall) | 216 |
| 6-26: Schema zur schrittweisen Umsetzung stadtweiter E-Busverkehr.... | 222 |
| A-1: Linien- und Netzgrundformen urbaner ÖPNV-Netze | 233 |
| A-2: Liniennetzplan Mannheim | 234 |
| A-3: GUI zur Eingabe der geographischen Haltestellendaten | 236 |
| A-4: GUI zur Eingabe der Fahrzeugdatensätze | 237 |
| A-5: Antriebstrangsmodell in Matlab/Simulink | 239 |
| A-6: Batteriemodell in Matlab/Simulink..... | 240 |
| A-7: Klimamodell in Matlab/Simulink | 241 |
| A-8: Zusammensetzung verschiedener Strommixe | 242 |
| A-9: Umweltemissionen und ihre Folgen | 243 |
| A-10: Histogramm Rechenzeiten der Szenarien | 246 |
| A-11: Histogramm zur Verteilung der Optimalitätsgaps | 246 |
| A-12: Ladestrategien für das E-Busdepot | 249 |
| A-13: AnyLogic-Modell des Mannheimer Busdepots | 251 |
| A-14: Übersicht der Parametervariationen bei der Depot-Optimierung... | 251 |
| A-15: Netzbelastung beim ungesteuerten Laden | 255 |
| A-16: Zeitliche Verläufe der Netzbelastung bei ungesteuertem Laden..... | 255 |
| A-17: Zeitliche Verläufe Netzbelastung bei gesteuertem Laden | 257 |

A-18: Rainflow-Zählung angewendet auf einen SOC-Verlauf 259

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-------|--|-----|
| 1-1: | Grundlegende Annahmen im Kontext der Arbeit | 7 |
| 1-2: | Forschungsaktivitäten zum Themenkomplex der E-Busse..... | 14 |
| 1-3: | Ladepunktoptimierung in der Forschung..... | 16 |
| 1-4: | Techno-ökonomische Ansätze | 17 |
| 2-1: | Vielfalt verschiedener Städte und ihres ÖPNV..... | 20 |
| 2-2: | Gegenüberstellung Antriebs- und Ladekonzepte | 26 |
| 2-3: | Leistungsdaten der Rhein-Neckar-Verkehr GmbH | 31 |
| 2-4: | Charakteristische Daten zur Linie 63..... | 33 |
| 3-1: | Charakteristische Daten zu den betrachteten Buslinien..... | 78 |
| 3-2: | Parameter Batteriemodell | 92 |
| 3-3: | Technologieentwicklungsprognose von Li-Ion-Batteriezellen | 93 |
| 3-4: | Äquivalente Vollzyklen und Korrekturfaktoren..... | 94 |
| 3-5: | Charakteristische Daten zum Betriebstag 28.01.2016 | 102 |
| 3-6: | Messdatenanalyse Betriebstagsmessung vom 28.01.2016 | 104 |
| 3-7: | Ergebnisse der SORT1-Messungen vom 27.01.2016..... | 105 |
| 3-8: | Vergleich zwischen Messwerten und Simulation..... | 108 |
| 3-9: | Vorausberechnete Batterie-Lebensdauern..... | 110 |
| 3-10: | Energiebedarf und Batterie-Lebensdauer..... | 112 |
| 3-11: | Zusammenhang Batteriekapazität, Ladeleistung, Lebensdauer | 113 |
| 3-12: | Zusammenhang Anzahl/Leistung Ladestationen und Batteriealterung | 115 |
| 3-13: | Simulationsergebnisse zu Testinstanz 1..... | 119 |
| 3-14: | Auswirkungen Verkehrseinfluss | 120 |
| 3-15: | Simulationsergebnisse für einen 18-m-Bus | 121 |

| | |
|--|-----|
| 3-16: Simulationsresultate Weiterentwicklung Batterietechnologie | 122 |
| 3-17: Simulationsergebnisse zur Buslinie 53 | 122 |
| 3-18: Simulationsergebnisse zur Buslinie 60 | 123 |
| 3-19: Datenpunkte Paretooptimierung | 127 |
| 4-1: Basisszenario Neuzulassungen von Stadtbussen | 131 |
| 4-2: Extrapolierte Energiekostenentwicklung | 132 |
| 4-3: Prognostizierte Batteriepreisentwicklung..... | 132 |
| 4-4: Anschaffungskosten E-Buskomponenten | 133 |
| 4-5: Anschaffungs- und Installationskosten je Ladestationstyp | 133 |
| 4-6: Daten zur Errechnung der Investitionskosten..... | 134 |
| 4-7: Kostenparameter TCO-Berechnung Diesel-Stadtbuse | 134 |
| 4-8: Treibhausgas- und Luftschadstoff-Emissionsquellen | 135 |
| 4-9: Umweltfolgekosten je Emission..... | 136 |
| 4-10: Externe Kosten der Rohstoffverknappung | 136 |
| 4-11: Lärmemissionskosten von Diesel-Bussen | 136 |
| 4-12: Investitionskosten nach klassischen TCO | 145 |
| 4-13: Emissionsvermeidungspotenzial E-Bus ggü. Dieselbus | 149 |
| 5-1: Haltestelleninformationen | 159 |
| 5-2: Wählbare Batteriekapazitäten und Ladeleistungen/-technologien. | 160 |
| 5-3: Energiebedarf zwischen potenziellen Ladehaltestellen | 161 |
| 5-4: Alterungsparameter je Batteriekapazität | 162 |
| 5-5: Alterungseffekte in Abhängigkeit der Ladeleistung | 162 |
| 5-6: Zeitliche Verfügbarkeit Batterie- und Ladetechnik | 162 |
| 5-7: Verschiedene Ladewirkungsgrade je Ladetechnologie | 163 |
| 5-8: Ladbare Energie je potenzieller Ladehaltestelle | 164 |
| 6-1: Klassische und wahre TCO für die E-Bus-Linienoptimierung | 182 |
| 6-2: Kennzahlen zur Basisszenarien-Linienauslegung | 183 |

| | | |
|------|---|-----|
| 6-3: | Vergleich der Batteriealterungsdaten..... | 185 |
| 6-4: | Klassische und wahre TCO für die Linien 53 und 60 | 205 |
| 6-5: | Kennzahlenvergleich Basisszenarien der Linien 53 und 60 | 206 |
| A-1: | Übersicht aller Mannheimer Buslinien | 235 |
| A-2: | Fahrzeugparameter für den 12 und den 18 Meter-Stadtbus..... | 238 |
| A-3: | Leistungsdaten | 246 |
| A-4: | Szenarien aus Kapitel 6.1 mit einem Optimalitätsgap > 1%..... | 247 |
| A-5: | Simulationsergebnisse für minimale Zwischenankunftszeit | 252 |
| A-6: | Simulationsergebnisse des ungesteuerten Ladens | 254 |
| A-7: | Simulationsergebnisse des gesteuerten Ladens | 256 |

1 Einleitung

1.1 Motivation E-Busse

Getrieben durch den gesellschaftlichen sowie politischen Trend zu mehr Ökologie und lebenswerteren Städten, verbunden mit dem Ziel einer Reduzierung von gesundheitsgefährdenden Emissionen und einer Umstellung von importierten fossilen auf vorwiegend national selbst erzeugte regenerative Energien, vollzieht sich aktuell im gesamten Verkehrssektor ein Wandel von verbrennungsmotorischen Antrieben hin zur Elektrifizierung des Antriebsstrangs [1–5]. Mit seiner hohen Fahrleistung, seiner öffentlichkeitswirksamen Präsenz im Stadtverkehr sowie aufgrund der relativ genau planbaren Routen und täglich zu fahrenden Streckenlängen eignet sich der Stadtlinienbus nach heutigem technologischen Stand besonders gut zur Transformation seines Antriebsstrangs in das Zeitalter der E-Mobilität [6]. So sind beispielsweise 11.000 elektrische Busse in der Lage, eine einer Million E-Autos entsprechende CO₂-Einsparung zu erreichen [7]. Vor allem motiviert durch gezielte politische Fördermaßnahmen, testen seit dem Jahr 2012 in verschiedenen Förderprojekten deutschlandweit zahlreiche Nahverkehrsunternehmen rein batterieelektrisch angetriebene Stadtbusse im Praxiseinsatz [8, 9]. Hier sei beispielhaft das Leuchtturmprojekt PRIMOVE Mannheim genannt. In dessen Rahmen wurden ab 2015, gefördert durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), die auf der Buslinie 63 eingesetzten Dieselmotoren durch E-Busse ersetzt [10]. Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen der Begleitforschung zu diesem Förderprojekt und basiert in Teilen auf Erkenntnissen und Daten, die im Zuge dessen Durchführung gewonnen wurden. Über Deutschland hinaus gibt es auch europa- und weltweit eine Vielzahl von politischen Bestrebungen, Strategien und Förderungen sowie Busbetreiber, die die Transformation des straßengebundenen ÖPNV hin zu einer lokal emissionsfreien Mobilität vorantreiben [11–15].

Bereits zwischen 1898 und 1909 fuhren erste Batteriebusse im ÖPNV Berlins - der Oberleitungsbus hat sich ab 1882 bis heute etabliert - von 1975 bis 1982 befanden sich E-Busse mit Batterieanhänger in Düsseldorf und Mönchengladbach im Regeleinsatz und seit 1969 wird mit hybriden Antriebskonzepten experimentiert. Auch wenn letztere heute relativ verbreitet sind, so steht die Forschung und Entwicklung der aktuellen Generation von E-Bussen vor großen technischen wie betrieblichen Herausforderungen [16, 17]. Dies führt zu deutlich höheren Anschaffungskosten der batterieelektrischen gegenüber den etablierten verbrennungsmotorisch fahrenden Stadtbussen. In der Folge beschränken sich Stand heute Forschungsprojekte zur Einführung von E-Bussen auf die Inbetriebnahme weniger elektrischer Busse auf meist einer ausgewählten einzelnen Linie einer Stadt bzw. eines Verkehrsbetriebes. Im Rahmen derartiger Forschungsprojekte werden unterschiedliche Ladetechnologien, Ladestrategien, Fahrzeugkonfigurationen sowie betriebliche Anpassungen getestet. Die Einführung von E-Bussen auf einer Linie wird hierbei in der Regel als erster Schritt zur Elektrifizierung des gesamten städtischen Busnetzes durchgeführt und dient dem initialen Erfahrungsgewinn.

1.2 Ziel der Arbeit

Die vorliegende Arbeit möchte dazu beitragen, Verkehrsunternehmen, Städte, Politik und Bushersteller bei der Planung und Einführung sowie technischen Konfiguration von E-Buslinien und stadtweiten E-Bus-(Teil-)Netzen zu unterstützen. Diese Transformation und Innovation stellt sich als vielschichtiger und komplexer systemischer Planungsprozess dar [18–21], der einer strategischen sowie operativen Entscheidungsunterstützung bedarf [22]. Da der ÖPNV in Deutschland der Daseinsfürsorge dient, ist er auf Zuschüsse aus öffentlichen Geldern angewiesen. Diese Gelder sind wiederum aufgrund schwieriger kommunaler Haushaltslagen knapp. Daher bestehen für die Transformation von Diesel- in E-Busnetze kaum zusätzliche finanzielle Spielräume, trotz teilweise vorhandener Bundes- oder Landes-Förderprogramme [23–25]. Aus diesem Grund zielt die vorliegende Arbeit darauf ab,

neben der technisch optimalen Konfiguration im Sinne maximaler Energieeffizienz, auch die ökonomisch optimale Konfiguration im Sinne einer gesamt-haften Kosteneffizienz zu ermitteln. Beide Hauptziele tragen schlussendlich zu einer Verbesserung der ökologischen Bilanz einer Stadt und zur Erfüllung regulatorischer Anforderungen bei.

Wie im Weiteren noch genauer ausgeführt und durch eigene Simulationen überprüft werden wird (Kap. 3.5.1), stehen sich bei der Erreichung der genannten technologischen und ökonomischen Ziele verschiedene konkurrierende Auslegungsansätze gegenüber [19]. Diese sollen anhand von Abbildung 1-1 qualitativ aufgezeigt und eingeführt werden. Die konkurrierenden Auslegungsansätze finden sich an den Ecken des gezeigten Spinnennetz-Diagramms wieder. Die grüne Linie symbolisiert hierbei einen E-Bus, der mit einer Batterie mit einer vielfach größeren Kapazität ausgerüstet ist als der durch die blaue Linie symbolisierte E-Bus. Aufgrund seiner großen und dadurch schwergewichtigen Batterie wird der E-Bus der grünen Linie eine schlechtere Energieeffizienz haben, was sich in weniger gefahrenen Kilometern pro eingesetzter Kilowattstunde elektrischer Energie bemerkbar macht [26]. Im Uhrzeigersinn betrachtet wird deutlich, dass das Fahrzeug mit der großen Batterie deutlich teurer ist, da die Batteriekosten einen wesentlichen Teil der Fahrzeuggesamtkosten ausmachen. Naturgemäß unterliegen Akkumulatoren durch ihre Verwendung Alterungsprozessen und müssen aufgrund dessen nach einer gewissen Nutzungsperiode ausgetauscht werden. Aufgrund dessen wird ein langsamer Alterungsprozess für diese hochpreisige Komponente angestrebt. Da ein Akkumulator mit einer großen Kapazität langsamer altert als einer mit einer geringen Kapazität, ist bei dem Ziel der Maximierung des Gesundheitsgrades der Batterie¹ der E-Bus der grünen Linie im Vorteil. Ist das Fahrzeug mit einer Batterie großer Kapazität ausgerüstet, so kann es längere Strecken ohne Nachladen bewältigen. Entsprechend wird

¹ Der State of Health (SOH) beschreibt den Alterungszustand der Batterie.

bei einer derartigen Fahrzeugkonfiguration gegenseitig weniger Ladeinfrastruktur benötigt. Bei einem Fahrzeug mit kleiner Batterie verlagern sich demnach die Kosten vom Fahrzeug auf ein Mehr an Ladeinfrastruktur [27].

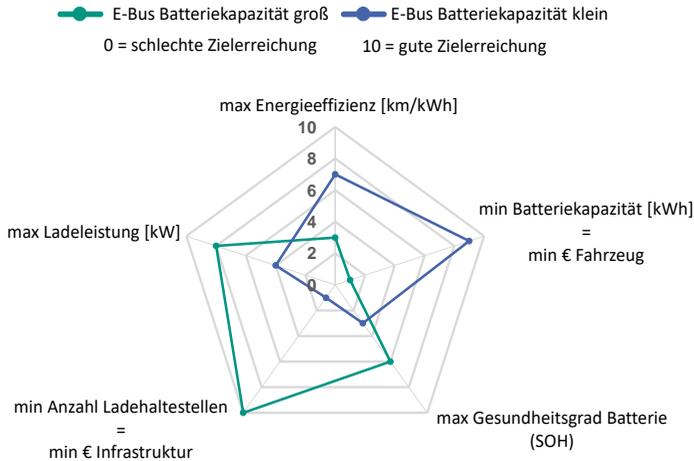


Abbildung 1-1: Qualitative Darstellung Zielkonflikt E-Buslinien-Konfiguration

Als letzten der fünf dargestellten Optimierungsparameter wird die Wahl der Höhe der Ladeleistung betrachtet. Hohe Ladeleistungen ermöglichen ein schnelles Laden von Akkumulatoren, also sind weniger Ladestationen von Nöten. Allerdings lassen hohe Ladeleistungen kleine Batterien schneller altern, da diese höhere Ströme und damit größere thermische Belastungen nach sich ziehen. Weiterhin gestaltet sich die Anbindung einer Ladestation mit geringerer Leistung an das Energieversorgungsnetz in der Regel einfacher sowie kostengünstiger [27].

Die in Abbildung 1-1 erläuterten Zielkonflikte bei der Auslegung von E-Bus-Betrieben werden nachfolgend nochmals in Abbildung 1-2 in Beziehung zueinander gesetzt. Zusätzlich wird aufgezeigt, dass die Optimierungsziele nicht nur voneinander abhängen, sondern dass sie jeweils durch eine Vielzahl

weiterer Parameter beeinflusst werden. Die Berücksichtigung dieser Parameter zeigt die Vielschichtigkeit und Komplexität der gestellten Optimierungsaufgabe auf, da diese beim Aufbau eines realitätsnahen Optimierungsmodells alle Einfluss finden müssen.



Abbildung 1-2: Abhängigkeiten der Zielkonflikte und deren Parameter bei der Auslegung des E Bus-Betriebs

Die sich aus dem Optimierungsproblem ergebenden Ziele finden sich im Titel der Arbeit wieder. Hierbei steht *techno-ökonomisch* für die interdisziplinäre Berücksichtigung ingenieurwissenschaftlicher/technologischer sowie wirtschafts- und sozialwissenschaftlicher/betriebswirtschaftlicher Größen bei der Optimierung und Konfiguration [28]. Diverse technisch mögliche Optionen sollen analysiert, ökonomisch bewertet und hierüber vergleichbar gemacht werden. *Auslegung* bezieht sich auf das Ziel, die Optimierungsergebnisse direkt für die Umsetzung von E-Bus-Linien oder -Netzen verwenden zu können. Für die strukturierte sowie transparente Vorgehensweise auf dem Weg hin zur Optimierung wird eine für den Anwendungszweck allgemeingültige *Methodik* entwickelt. *Elektrifizierung* impliziert den Fokus der Arbeit auf rein batterieelektrische Antriebstechnologien für Stadtbusse im Kontext der E-Mobilität. Die Systemgrenze der Betrachtung von städtischen Busverkehren wird hierbei durch das Adjektiv *urban* vorgegeben. Nicht nur die Auslegung für einzelne, diskrete Linien ist Untersuchungsgegenstand, sondern es sollen Lösungen für städtische *Busnetze* gefunden werden, was die Betrachtung von

gesamten Busflotten mit einschließt. Die dargelegten Ziele der Arbeit münden in der folgenden Forschungsfrage:

Wie lässt sich ein städtisches Buslinien(teil)netz und die dazugehörige Busflotte technologisch so auslegen, dass sich, unter gegebenen Nebenbedingungen, ein gesamthaft energieeffizienter sowie kostenminimaler, rein elektrifizierter Busbetrieb realisieren lässt?

Zur Beantwortung dieser Frage wird eine iterative Methodik entwickelt, die generisch die techno-ökonomische Optimierung beliebiger Buslinien bzw. Busnetze erlaubt. Zur Durchführung der gewünschten Optimierung soll eine modulare Softwareumgebung aufgebaut werden, die sich flexibel an variierende Input-Datensets anpasst und dabei möglichst realitätsnah auf jede mögliche Buslinie anwendbar bleibt. Um die Einsetzbarkeit in der Praxis zu erleichtern, soll die Bedienbarkeit der Software von einer zentralen Benutzerschnittstelle aus ermöglicht werden. Zur intuitiven Nachvollziehbarkeit des Simulationsprozesses besteht die Möglichkeit, diesen visualisiert auszugeben [29]. Am Beispiel des Mannheimer Busliniennetzes und unter Einbeziehung der Daten und Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt PRIMITIVE Mannheim wird die Übertragbarkeit in die Praxis sichergestellt.

1.3 Grundlegende Annahmen

Die in Kapitel 1.2 vorgestellten Ziele sowie die im Weiteren gewählten und ausgearbeiteten thematischen Schwerpunkte basieren auf verschiedenen grundlegenden Annahmen, welche anhand Tabelle 1-1 eingeführt, erläutert und belegt werden. Hierdurch werden auch die Systemgrenzen definiert.

Tabelle 1-1: Grundlegende Annahmen im Kontext der Arbeit

| Nr. | Annahme | Thesen | Quelle |
|-----|--------------------------------|--|-----------------|
| 1 | E-Mobilität ökologisch | Die ökologischen Nachteile des Verbrennungsmotors durch umwelt- und gesundheitsschädliche Emissionen bleiben langfristig bestehen. Technologische Verbesserungen werden den Verbrennungsmotor nicht insoweit optimieren können, dass sie die bestehenden Vorteile des Elektroantriebs marginalisieren. | [30–34] |
| 2 | E-Mobilität ökonomisch | Betriebswirtschaftlich wird die Verbrennung fossiler wie biologischer Brennstoffe mittelfristig noch die kostengünstigste Antriebsvariante darstellen. Langfristig wird aber, aufgrund der Verknappung der Rohstoffe bzw. ihrer Konkurrenz zu anderen Nutzungsformen, die aus regenerativer Energie produzierte Elektrizität die Hauptantriebsquelle der urbanen Mobilität darstellen. Einen wesentlichen Grund hierfür stellen die durch steigende Stückzahlen eintretenden Skaleneffekte der elektrischen Antriebskomponenten dar, aber auch die durch einen geringeren Verschleiß verursachten niedrigeren Instandhaltungskosten gegenüber der Verbrennungsmotorenteknik. Dies impliziert auch einen wachsenden E-Bus-Markt. Zusätzlich wird die Erzeugung regenerativer Energien deutlich kostengünstiger werden als die weitere Nutzung fossiler Brennstoffe. | [26, 35–41] |
| 3 | Batterietechnologie | In den nächsten beiden Jahrzehnten werden keine bedeutenden Technologiesprünge erwartet. Auch in Zukunft wird es im Fokus der Entwicklung stehen, möglichst kleine Batteriegrößen anzustreben. Gründe hierfür sind die relativ hohen Rohstoff- und Fertigungskosten, die knappe bzw. schwierige Verfügbarkeit der Herstellungsmaterialien, Alterungsmechanismen, komplexe Sicherheitsfragen sowie der zur Fahrzeugstruktur und damit zur maximalen Passagieranzahl in Konkurrenz stehende Gewichtsanteil. | [27, 36, 42] |
| 4 | gesellschaftliche Dimension | Es besteht ein breiter gesellschaftlicher Konsens darüber, die Mobilität in der Stadt zu mehr Ökologie und Nachhaltigkeit weiterzuentwickeln. Hierzu zählen neben Emissionsreduzierung (Lärm, Schadstoffe) auch regulatorische Maßnahmen zur Steigerung der Attraktivität des Stadtlebens, wie bspw. der Einführung von Mautzonen (London, Paris, Reutlingen) oder der aktiven Reduzierung des motorisch betriebenen Individualverkehrs. Politische Entscheidungsprozesse werden hierdurch geleitet sein. Dies zieht steigende Nutzerzahlen des ÖPNV nach sich. | [23, 39, 43–46] |

| | | | |
|---|-----------------|--|----------------|
| 5 | ÖPNV | Ökologische Kriterien werden verstärkt in Regularien, Gesetzen und Ausschreibungsverfahren für den ÖPNV wiederzufinden sein. Hier werden strenge ökonomische Restriktionen zum Ausdruck kommen, z. B. Zufahrtsrechte in Innenstadtbereiche. Dies verlangt von Verkehrsbetreibern eine nachhaltige Minimierung der Kosten unter Berücksichtigung der Total Cost of Ownership (TCO). Private Betreiber treten verstärkt in den Wettbewerb mit kommunalen Betreibern, was den Preisdruck weiter erhöht. Die Kapazitäten der Betreiber werden sich steigenden Fahrgastzahlen kontinuierlich anpassen müssen. | [23–25, 47–53] |
| 6 | Digitalisierung | Die Digitalisierung bis hin zum (teil-)autonomen Fahren wird sich mittelfristig im Stadtverkehr in allen Fahrzeugkategorien durchsetzen. Hierzu zählt auch die Vernetzung von Fahrzeugen untereinander und mit der sie umgebenden Umwelt. Verkehrsbetreiber müssen sich frühzeitig auf den Megatrend einstellen, um dem Verlust von Marktanteilen entgegenzuwirken und die Vorteile der neuen Technologien für sich zu nutzen. | [47, 54–56] |

Die aufgezählten Nachteile der Verbrennungsmotoren stellen zahlreiche Argumente gegen den Einsatz hybrider Antriebe dar. Wasserstoffbetriebene Busse und neue Projekte mit Oberleitungsbussen sind trotz aktueller Forschungsaktivitäten und Erprobungen bezüglich der Marktreife und Stückzahl noch weit entfernt von rein batterieelektrischen Stadtbussen [16, 36, 57, 58]. Gleiches gilt für E-Bussysteme mit Batteriewechsel, zumal hier nur Erprobungen aus dem asiatischen Raum bekannt sind [59]. Gemäß Analysen von Knotte [60], Kunith [59] und Rogge [27] ist der E-Bus mit Zwischenladung als besonders zukunftsfähig zu erachten. In der Konsequenz wird im Rahmen dieser Arbeit nur der rein batterieelektrisch angetriebene Stadtbus mit Unterwegs- und/oder Depotladung untersucht².

1.4 Aufbau der Arbeit

Der genannte techno-ökonomische Ansatz ist für die Grundstruktur der Arbeit maßgeblich. Die schwerpunktmäßige Betrachtung der technologischen

² Im Weiteren ist mit der Bezeichnung E-Bus immer der batterieelektrische Stadtbus gemeint.

Fragestellungen stellt die erste Säule des zu erarbeitenden Gesamtkonzeptes dar. Diese wird um eine zweite, die ökonomische Säule, ergänzt. Die Ergebnisse sowohl des technologischen als auch des ökonomischen Modells fließen in die sich anschließende Optimierung ein. Das zu untersuchende Gesamtsystem E-Bus gliedert sich in die Subsysteme Fahrzeug, Infrastruktur und Betrieb auf. Nur wenn diese drei Teilsysteme als ineinander verzahnt und jeweils voneinander abhängig betrachtet werden, gelingt es, ein möglichst realitätsnahes Modell aufzustellen. Der *Betrieb*, im Sinne der betrieblichen Erfordernisse und Anforderungen zum Betreiben eines ÖPNV-Stadtbussystems, wird hierbei im ersten Schritt als zentrale Nebenbedingung betrachtet und ist nicht direkt Gegenstand der Optimierung. Die entsprechend dem konventionellen Dieselbusbetrieb ausgelegten Betriebsparameter werden als konstant vorgegeben betrachtet und basierend hierauf die Konfiguration der Infrastruktur und das Fahrzeug optimiert. Als zu optimierende *Infrastruktur* werden die gegenseitigen und ortsfesten Ladeeinrichtungen aufgefasst, das *Fahrzeug* stellt den E-Bus mit all seinen Komponenten und Eigenschaften dar. Abbildung 1-3 visualisiert einerseits die genannten Säulen in der Vertikalen und andererseits die Optimierungsziele in der Horizontalen sowie die gegenseitigen Abhängigkeiten. Die *Gesamtsystem*-Sichtweise umfasst alle geeigneten Teilaspekte und bildet das Grundgerüst, in welchem sich alle Kapitel der Arbeit wiederfinden.

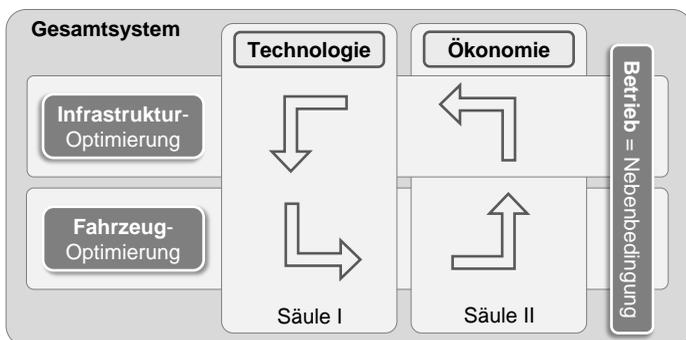


Abbildung 1-3: Grundlegende Strukturierung der Arbeit und Überblick über die Subsysteme des Gesamtsystems E-Bus

Die Kapitelstruktur der Arbeit wird durch Abbildung 1-4 dargestellt und im Folgenden erläutert.

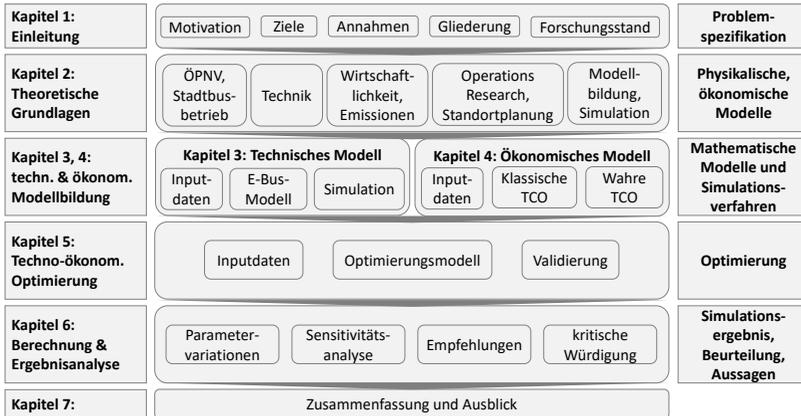


Abbildung 1-4: Kapitelstruktur der Arbeit

Aus den fünf Auslegungsgegensätzen gemäß Kapitel 1.2 - Maximierung der Energieeffizienz, Minimierung der Batteriekapazität, Maximierung des SOH, Minimierung der Ladeinfrastruktur und Maximierung der Ladeleistung - leitet sich die Strukturierung des Grundlagenkapitels 2 der Arbeit ab. Hier werden alle theoretischen, technologischen wie ökonomischen Grundlagen zum Verständnis der Optimierungsziele eingeführt. Im Kapitel 3 wird die in Abbildung 1-3 eingeführte erste Säule *Technologie* erarbeitet. Hierzu gehören die Unterthemen Inputdatengenerierung, Fahrzeugmodellierung sowie Validierung. Anhand des validierten Softwaremodells werden die Funktionalitäten des Technologie-Modells durch die Präsentation ausgewählter Simulationsergebnisse veranschaulicht. Die zweite Säule *Ökonomie* steht im Fokus des 4. Kapitels. Analog zum Kapitel 3 geht es hier zuerst um den Aufbau von Eingabe-Datensätzen. Basierend hierauf, folgen die Berechnungen der TCO und die mit ihnen in Zusammenhang gesetzten externen Kosten. Abschließend findet auch hier eine Validierung und Einordnung der ermittelten

Ergebnisse statt. Kapitel 5 stellt den methodischen Kern der Arbeit dar, da hier die Modelle aus Kapitel 3 (Technologie) und 4 (Ökonomie) im techno-ökonomischen Gesamtoptimierungsmodell zusammengeführt werden. Mit dem nun aufgebauten Gesamtmodell werden in Kapitel 6 unter Variation der Eingabedaten im Rahmen verschiedener Optimierungsszenarien Ergebnisse generiert, diese analysiert und einander gegenübergestellt. Hierauf aufbauend erfolgt eine umfassende Einordnung der erzielten Ergebnisse sowie die Diskussion der daraus ableitbaren Empfehlungen für die Praxis der E-Bus-Auslegung. Abschließend werden in Kapitel 7 die zentralen Ergebnisse zusammengefasst und im Ausblick ein Überblick über diverse Weiterentwicklungsmöglichkeiten auf Basis des Erarbeiteten gegeben.

1.5 Einordnung in den Stand der Wissenschaft

Während seit mehreren Jahren im Themenfeld der E-Mobilität, vor allem im Pkw-Sektor und den damit zusammenhängenden Komponenten, Infrastrukturen und Prozessen, vielfältige und umfangreiche Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten diverser Akteure stattfinden [32, 61], ist im Vergleich hierzu das Feld der E-Bus-Forschung als Nische anzusehen [62]. Dies lässt sich zurückführen auf die gegenüber der Automobilbranche deutlich geringen (zu erwartenden) Stückzahlen und die Nutzfahrzeug-typischen Haupt-Charakteristika wie Funktionalität, grundsätzlich andere Kundenansprüche sowie längere Produktlebenszyklen, einhergehend mit einer geringeren Marktdynamik. Einen ersten Überblick über den aktuellen Stand der Forschung und Entwicklung im Themenfeld der E-Stadtbusse spiegelt Abbildung 1-5 wieder.

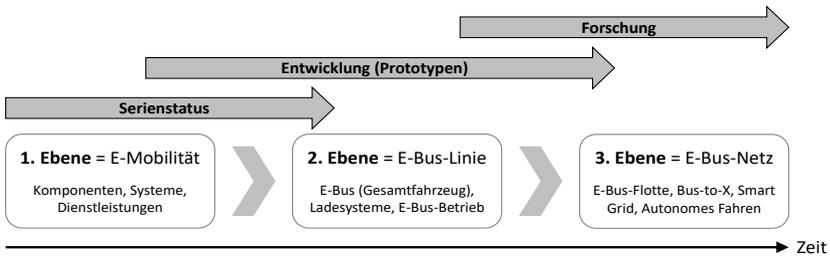


Abbildung 1-5: Aktueller Stand der Entwicklung bei E-Bus-Systemen

Auf der ersten Ebene sind die zur Elektrifizierung von Bussystemen notwendigen technologischen Teilsysteme dargestellt, deren fortgeschrittener Entwicklungsstand die Grundlage für die Elektrifizierung von Stadtbussen ermöglicht. Auf dieser Stufe, die zum Beispiel die Batterien, fahrzeug- und wegseitige Leistungselektronik oder die Ladetechnik umfasst, ist der Technologiereifegrad dergestalt, dass die Schwelle vom Prototypen zum Serienprodukt größtenteils schon überschritten wurde [8, 32]. In der zweiten Ebene geht es um die Herausforderung, die Teilkomponenten der ersten Ebene in einen elektrifizierten Bus zusammenzufügen. Ziel ist es hier, den E-Bus samt Ladeinfrastruktur auf einer Linie zum regulären und, im Vergleich mit dem etablierten Dieselbus, gleichwertigen Einsatz zu bringen. Der Erfüllungsgrad dieses Ziels lässt sich über die planmäßige Verfügbarkeit³ des Busses für den Linienbetrieb messen. Anhand verschiedener nationaler wie internationaler Projekte kann festgehalten werden, dass Stand heute nur wenige reguläre Linieneinsätze von Elektrobussen die zuvor eingesetzten Dieselbusse ohne Einschränkungen oder deutliche monetäre wie betriebliche

³ Definition Verfügbarkeit: Gemäß DIN EN 15341:2007-06 „Instandhaltung – Wesentliche Leistungskennzahlen für die Instandhaltung“ stellt die Verfügbarkeit das Verhältnis der Gesamtbetriebszeit gegenüber der Summe aus der Gesamt-Betriebszeit und der durch Instandhaltungstätigkeiten bedingten nicht funktionsfähigen Zeit dar [63].

Zusatzaufwendungen ersetzen⁴. Zusammengefasst liegt Stand heute die Verfügbarkeit von E-Bussen hinter der von Dieselnissen als Benchmark [8]. Entsprechend ist der aktuelle Stand der Forschung und Entwicklung die Inbetriebnahme einzelner E-Bus-Linien und deren Optimierung im Hinblick auf eine dem Dieselniss äquivalente flexible, kostengünstige sowie zuverlässige Verfügbarkeit [64–66]. Die auf der zweiten Ebene (gemäß Abbildung 1-5) getätigten Optimierungen und gesammelten Erfahrungen tragen im nächsten Schritt dazu bei, auf der dritten Ebene den Markthochlauf zu bewerkstelligen und die Einführung stadtweiter E-Busnetze vorzubereiten. Die Phase des Markthochlaufs ist das Ziel der Förderpolitik in Deutschland [66]. Aus der Praxis sind aktuell nur wenige Projekte zur konkreten Inbetriebnahme bzw. zielgerichteten Planung von E-Bus-(Teil-) Netzen bekannt [67, 68].

Die E-Bus-Vorgänger- bzw. Brückentechnologie der neueren Generation an Hybridbussen wurde bereits in verschiedenen Forschungsarbeiten analysiert. Es wurden entsprechende Fahrzeugmodelle aufgebaut und simuliert, siehe beispielsweise [69–73]. Auch bezüglich Dieselniss- [74], Oberleitungs- [75, 76], Brennstoffzellenbussen [77] sowie zu Buskonzepten mit Batteriewechseln [78–80] liegen Forschungsarbeiten vor. Gleiches gilt für den Bereich des Kosten- und Emissionsvergleichs alternativer Kraftstoffe für Stadtbusse [81, 82]. Speziell zum Themenkomplex der E-Busse wird aktuell national wie international an Forschungseinrichtungen gearbeitet, teilweise mit Bezug zu praktischen Einführungsprojekten. Tabelle 1-2 gibt einen Überblick über das Spektrum der unterschiedlichen Aktivitäten und teilt diese gemäß ihren Schwerpunkten ein.

⁴ Bspw. durch die Vorhaltung von Dieselnissen für Ersatzfahrten, falls der E-Bus nicht ausreichend Ladezeit erhält, durch Anpassungen im Fahrplan oder durch die Inbetriebnahme eines zusätzlichen Fahrzeugs auf der Linie.

Tabelle 1-2: Forschungsaktivitäten zum Themenkomplex der E-Busse

| Forschungseinrichtung/Autor | Forschungsschwerpunkt bzw. Projekt | Quelle |
|--|---|------------------------|
| Begleitforschung E-Bus-Einführungsprojekt | | |
| TU Berlin: MPM | Projekt E-Bus (Berlin); Systemsimulation, TCO, Liniennetz- auslegung mit Ladepunktoptimierung, Klimatisierungskon- zepte, Entscheidungsunterstützung bei Innovationspro- zessen | [22, 59, 83, 84] |
| TU Braunschweig: IMAB/elenia/IVA | Projekt emil (Braunschweig); Linienauslegung, Verkehrs- simulation zur Analyse der Mitnutzungsmöglichkeiten von Bus-Ladeinfrastruktur durch andere Verkehrsteilnehmer, Ladepunktoptimierung, E-Bus-Konzept für den Regional- verkehr, Entwicklung induktiver Ladekomponenten, Ener- gieversorgungsnetz-Integration | [85– 89] |
| RWTH Aachen, ISEA | Projekte eLIPTIC, ZeEUS, SEB (Münster); Linienauslegung, Ladepunktoptimierung, Life-Cycle-Costs, Batterieforschung (Auslegung, Alterung, Design, Sicherheit), Entwicklung Lade- technologie, Planung, Fahrzeugmodellierung | [27, 90– 92] |
| TU Dresden, IAD | Projekt EKE ÖPNV (Dresden); Planung und Dimensionierung von E-Bus-Systemen (Batteriekapazitäten und Ladeinfra- struktur), Analyse der Batteriealterung in Stadtbussen, Energiebedarfsbestimmungen | [93, 94] |
| Fraunhofer IVI | Projekt EDDA-Bus (Dresden); Entwicklung von Kerntechno- logien schnellladefähiger Batteriebusse, Softwaretool IVision zur Gesamtsystemauslegung umfasst Betriebsdaten- analyse, Fahrzeugmodelle und Ladepunktoptimierung kombiniert mit einer graphischen Benutzeroberfläche, E- Bus-Netzauslegung | [29, 95, 96] |
| VTT (Finnland) | Projekt eBUS (Espoo): Simulation, HVAC, Messungen, Ladestellenfindung; Planung und Auslegung von E-Stadtbus- Systemen, TCO-Optimierung, praktische Umsetzungs- unterstützung | [97, 98] |
| Choi, U.-D. et al. (Südkorea) | Projekt "e-Primus" (Seoul): Simulation, Messungen, Leichtbau, Emissions- und Kostenanalyse | [99] |
| E-Bus-Systemforschung (projektunabhängig) | | |
| Lajunen, A. | Simulation, Antriebsstrangauslegung, vergleichende Kosten- und Emissionsanalyse | [62, 100] |
| FH Flensburg | Energieberechnungen, Kostenanalysen (TCO), System- auslegung, Beratung und Realisierung von E-Bus-Projekten | [101] |

| | | |
|--|---|------------|
| Fraunhofer IML, ifak Magdeburg, Silesian Univ. of Technology | Projekt CACTUS: Planungswerkzeug zur Entscheidungsfindung bei der Umstellung von Busflotten auf E-Antrieb, unter Berücksichtigung ökonomischer, ökologischer und betrieblicher Aspekte; Planung der Ladeinfrastruktur | [102, 103] |
| The Ohio State University, CAR | E-Bus-Simulationsmodell zur Ermittlung des Energiebedarfs und zur Lokalisierung von Ladepunkten | [104] |
| Betriebsoptimierung für den E-Buseinsatz | | |
| FU Berlin | optimale Ressourceneinsatz- und Ladeinfrastrukturplanung | [105, 106] |
| Wirtschaftlichkeits- und Emissionsbetrachtungen | | |
| Eckart, J. et al. | Kostenvergleich verschiedener E-Bussysteme | [107] |
| Pütz, R. et al. | vergleichende Emissions- und Kostenuntersuchungen unterschiedlicher Antriebssysteme | [48, 108] |
| Cooney, G. et al. | Life Cycle Assessment-Vergleich zwischen Diesel- und E-Bus | [109] |
| Nurhadi, L. et al. | Sensitivität der TCO unterschiedlicher E-Bus-Einsatzprofile | [110] |
| Olsson, O. | Kostenanalyse für verschiedene E-Bus- und Ladesysteme | [111] |
| Teilsystem- bzw. Komponentenforschung | | |
| Qin, N., et al. | Einfluss von Ladestrategien auf die Stromnetzbelastung | [112] |
| Mapelli, F. et al. | Energieflussanalyse hybrides Speichersystem (Supercaps) | [113] |
| Yu, Z., et al. | Fahrzeugsimulation und Messungen zur Untersuchung eines hybriden Speichersystems (Batterie mit Supercap) | [114] |

Weitere europäische Universitäten, die im Kontext der EU-geförderten Forschungs- und Demonstrationsprojekte ZeEUS und eLIPTIC die Einführung von E-Bussen begleiten, nennt [115, 116]. Für die rechnergestützte Systemauslegung von E-Busbetrieben, Kostenkalkulationen auf TCO-Basis, Beratungsdienstleistungen zur praktischen Einführung oder beispielsweise Fördermittelbeantragung, sind Dienstleister mit eigenen Softwarelösungen bekannt. Hierzu zählen neben Forschungseinrichtungen [117] und Ausgründungen aus ebendiesen [118], auch Beratungsunternehmen der freien Wirtschaft [119, 120]. Weiterhin bieten Ladeinfrastruktur- [121] wie Bushersteller [122–124] über den Verkauf ihrer Produkte hinaus eine Systemauslegung und TCO-Aufschlüsselung an.

Die in dieser Arbeit zu entwickelnde Methodik der Ladepunktoptimierung ist bereits Gegenstand der Forschung im Kontext der E-Mobilität. Tabelle 1-3

listet hierzu auszugsweise verschiedene Autoren auf. Eine detaillierte Auseinandersetzung mit weiteren Modellen findet sich in [125]. Während sich ein Großteil der genannten Forschungsarbeiten mit der Ladepunktoptimierung für E-Pkw auseinandersetzt, wird die Thematik vereinzelt auch auf den Stadtbus-Fall angewendet. Ein umfassender Optimierungsansatz, der neben der Ladeort-, Ladeleistung- und Batteriekapazitätsbestimmung, Mehrperiodizität und dadurch Batteriealterung sowie Preis- und Technologieentwicklung integriert, konnte nicht identifiziert werden.

Tabelle 1-3: Ladepunktoptimierung in der Forschung, Abkürzungen in () siehe Kap. 2.5

| Autor | Fragestellung/Inhalt | Quelle |
|----------------------|---|-----------|
| Stadtbusse | | |
| Kunith et al. | Lokalisierung der netzweiten Ladeinfrastruktur und Festlegung der optimalen Batteriekapazität der Linien zur Kalkulation der TCO für eine E-Bus-Flotte (MILP) | [59, 126] |
| Wang et al. | Standortsuche und Minimierung Installationskosten Ladestationen an Haltestellen in Abhängigkeit der Batteriekapazität (ILP) | [127] |
| Naumann et al. | Ladepunkt- und Ladeleistungbestimmung für stationäres wie dynamisches Laden, stationäres Laden erfolgt an Bushaltestellen oder durch Batteriewechsel (LP) | [102] |
| Pkw | | |
| Cruz-Zambrano et al. | Kostenoptimale Platzierung von Schnellladeinfrastruktur basierend auf Verkehrsflussanalysen einer Stadt (ILP) | [128] |
| Chen et al. | Ladepunktoptimierung in Bezug auf Parkvorgänge (Ort, Dauer) auf öffentlichen Parkplätzen unter Budgetrestriktionen (MIP) | [129] |
| González et al. | Lokalisierung von Ladeinfrastruktur unter Berücksichtigung der täglichen Aktivitäten der Pkw-Nutzer bzw. der Aufenthaltsorte ihrer Pkw unter Minimierung der Ladeenergiekosten (LP) | [130] |
| Taxi | | |
| Kameda et al. | Ladepunktbestimmung für Ruftaxiservice basierend auf Messdaten zum Taxibetrieb mit dem Ziel, die Akzeptanzrate und unproduktive Zeit zu optimieren (Vehicle Routing Problem) | [131] |
| Barco et al. | Optimierung Ladeplanung zur Reduktion der Batteriealterung in Verbindung mit optimalem Routing für einen Shuttle-Service | [132] |
| Asamer et al. | Lokalisierung von Regionen, anstelle exakter Orte für den Aufbau von Schnellladepunkten unter Berücksichtigung existierender Schnelllader als Entscheidungsunterstützung (MILP) | [133] |

Weiterhin ist festzustellen, dass die längsdynamische (E-)Fahrzeugsimulation mit unterschiedlichen Softwaretools und in unterschiedlichen Detaillierungsgraden sowohl in der Forschung als auch in der Industrie Stand der Technik ist. Beispiele hierzu finden sich in [134–136].

Techno-ökonomische Forschungsansätze nach Definition in Kapitel 1.2 finden sich schwerpunktmäßig im erweiterten Bereich der Energietechnik [137, 138]. Tabelle 1-4 listet exemplarisch verschiedene Arbeiten des Forschungsgebiets der techno-ökonomischen Analyse auf. Es fällt auf, dass bei einem Großteil der recherchierten Arbeiten auf dem techno-ökonomischen Themenfeld keine tiefergreifende, systemische technische Modellierung zugrunde liegt, die eine iterative Kopplung zwischen der technischen Auslegung und einer betriebswirtschaftlichen Optimierung ermöglicht.

Tabelle 1-4: Techno-ökonomische Ansätze aus der Literatur

| Autor | Thematischer Hintergrund | Quelle |
|----------------------|---|---------------|
| Kanngießer, A. | Bewertung stationärer Speicheranwendungen | [139] |
| Kunith, A. | Technologiebewertung zur Elektrifizierung des Busverkehrs | [59] |
| Schraven, S. et al. | Bewertung des induktiven Ladens für Pkw | [140] |
| Sakti, A. et al. | Analyse von Li-Ion NMC-G-Batterien für E-Fahrzeuge | [141] |
| Dimitrova, Z. et al. | Antriebsstrangauslegung für hybrid-elektrische Fahrzeuge | [142] |
| Hurtig, O. | Untersuchung von Waldrestholz als Kraftstoff für Pkw | [143] |

Es wurde verdeutlicht, dass die Inhalte der vorliegenden Arbeit zugrundeliegenden Säulen, der technologischen Fahrzeugsimulation zur Leistungsflussberechnung sowie der TCO-Ermittlung von E-Bus-Betrieben, unter Berücksichtigung ökologischer Aspekte, bereits Gegenstand der Forschung sind. Gleiches gilt für die hierauf aufbauende Optimierung der Nachladung mit Methoden des Operations Research OR. Aus der Wissenschaft (Tabelle 1-2) integrieren vor allen Dingen Kunith (TU Berlin), die Arbeiten des Fraunhofer IVI, des ISEA respektive das Portfolio von EBusPlan [118] sowie die im Rahmen des Projektes CACTUS entwickelten Ergebnisse bereits technische und betriebswirtschaftliche Methoden zur Auslegung und

Optimierung von E-Bus-Betrieben. Kunith, das Fraunhofer IVI sowie das ISEA bzw. EBusPlan profitieren bei ihren Arbeiten vom Praxisbezug aus E-Bus-Einführungsprojekten. Einschränkend ist anzumerken, dass, aufgrund des kommerziellen Einsatzes, zu den Methoden des Fraunhofer IVI, von EBusPlan sowie zu dem Angebotsportfolio der genannten Ingenieurdienstleister keine detaillierten Veröffentlichungen vorliegen.

Demnach umfasst der in der vorliegenden Arbeit zu entwickelnde Forschungsansatz verschiedene Aspekte vorhandener Forschungsarbeiten. Sein wissenschaftlicher Mehr- und Neuigkeitswert liegt in der Entwicklung einer Methodik, die durch eine Verknüpfung des technologischen mit dem ökonomischen Subsystem die Optimierung des Gesamtsystems herausarbeitet. Hierbei ist insbesondere die realitätsnahe und detaillierte Abbildung des zugrundeliegenden technischen Systems, der mehrperiodische Optimierungsansatz und die Integration der damit zusammenhängenden Effekte wie Batteriealterung, Preis- und Technologieentwicklungen zur Ermittlung möglichst realistischer und die Zukunft berücksichtigender TCO hervorzuheben. Dies wird als notwendig erachtet, damit sich Ungenauigkeiten bzw. Vereinfachungen bei den langjährigen Betrachtungszeiträumen nicht verstärken. Weiterhin bietet der hohe Detaillierungsgrad auch die Möglichkeit, in der quasistationären Betrachtung ausgewählte Bestandteile des Energieflusses genauer auf ihre langfristigen Auswirkungen hin zu untersuchen sowie zu verbessern. Praxismessungen der Energieflüsse des Fahrzeugs als Validierungsgrundlage sind ein wichtiger Bestandteil zur Sicherstellung der Realitätsnähe. Der modulare Aufbau der Softwareumwelt, die zentrale Dateneingabe über eine intuitive Benutzerschnittstelle sowie die dreidimensionale Visualisierungsmöglichkeit der Fahrzeugsimulation stellen die Anwendungsorientierung der Arbeit sicher und bieten eine Grundlage für einen Praxiseinsatz der Methodik. Die Methodik ist neben dem Busanwendungsfall auch auf andere Auslegungsprobleme der Elektrifizierung von (Nutz-)Fahrzeugverkehren übertragbar.

2 Grundlagen

Das Grundlagenkapitel führt in die den Hauptzielen der Arbeit zugrundeliegenden Theorien ein und bildet somit das theoretische Fundament für die darauffolgenden Kapitel. Hierzu werden zuerst die Rolle des Stadtbusses im ÖPNV sowie die Herausforderungen bei dessen beginnender Elektrifizierung erläutert. Anhand des Forschungsprojektes PRIMOVE Mannheim wird der Praxisbezug der Thematik veranschaulicht. Daraufhin werden die wesentlichen technischen Grundlagen von E-Stadtbussen erklärt, in die Modellbildung und Simulation eingeführt und hergeleitet, auf welchen theoretischen Konzepten die Wirtschaftlichkeitsbewertung sowie die Optimierung fußen.

2.1 Stadtbusbetrieb

Bezogen auf Deutschland befinden sich, nach Stand 2015, von 36.599 Nahverkehrsbussen 19.104 Busse bei landesweit 286 verschiedenen Verkehrsunternehmen im Stadtbereich in Betrieb. Von allen Nahverkehrsbussen fahren rund 2 % mit alternativen Antrieben, d. h. nicht ausschließlich verbrennungsmotorisch. 2015 wurden im Stadtverkehr 3.224 Mio. Fahrgäste transportiert, die 16.743 Mio. Personenkilometer zurücklegten [45]. Tabelle 2-1 listet exemplarisch charakteristische Kennzahlen zu Busbetrieben verschiedener nationaler sowie internationaler Städte auf. Die gezeigten Zahlen verdeutlichen, dass der Linienbusbetrieb sich individuell von Stadt zu Stadt und den damit zusammenhängenden historisch gewachsenen, städtebaulichen, verkehrspolitischen und bevölkerungsabhängigen sowie durch die durch ergänzende Nahverkehrssysteme (S-/U-Bahn, Straßenbahn) gegebenen Rahmenbedingungen deutlich unterscheidet und nach individuellen Systemlösungen (u. a. unterschiedliche Gefäßgrößen) verlangt. Daher gilt es im Folgenden, die grundsätzlichen Strategien und die Struktur des

Linienbusbetriebs herauszuarbeiten, wobei sich auf den Betrachtungsfall Deutschland beschränkt wird.

Tabelle 2-1: Vielfalt verschiedener Städte und ihres ÖPNV

| Stadt | Einwohner, Tsd. | Busnetz [km] | Linien | Haltestellen | Busse | Schienennetz [km] | | Quelle |
|--------------------|-----------------|--------------|--------|--------------|--------|-------------------|--------|--------|
| | | | | | | Tram | U-Bahn | |
| Deutschland | | | | | | | | |
| Berlin | 3.520 | 1.675 | 151 | 6.452 | 1.392 | 300 | 146,3 | [144] |
| Hamburg | 1.787 | 928 | 111 | 1.321 | 803 | - | 104 | [145] |
| Aachen | 246 | 1.264 | 69 | 2.200 | 213 | - | - | [146] |
| Frankfurt (O) | 58 | 196,1 | 11 | 199 | 26 | 37,9 | - | [147] |
| Halberstadt | 44 | 53,3 | 5 | 71 | 11 | 11,7 | - | [148] |
| Ausland | | | | | | | | |
| Peking | 21.705 | 20.186 | 876 | - | 23.287 | - | 554 | [149] |
| Shanghai | 24.260 | 23.897 | 1.377 | - | 16.155 | 10 | 578 | [150] |
| London | 13.614 | - | 675 | 19.000 | 9.300 | 28 | 402 | [151] |

2.1.1 Städtischer Linienbusbetrieb und seine Rolle im ÖPNV

Laut dem deutschen Grundgesetz sind öffentliche Lebensräume für jedermann offen und zugänglich zu halten [152]. Der öffentlichen Hand erwächst daraus die gesetzliche Pflicht, den Öffentlichen Nahverkehr zu gewährleisten (Daseinsfürsorge). Die Rechtsgrundlage hierfür bildet das Gesetz zur Regionalisierung des öffentlichen Personennahverkehrs - Regionalisierungsgesetz (RegG) [153]. Der Straßenpersonennahverkehr (ÖSPV) als eine Säule des ÖPNV wird durch das Personenbeförderungsgesetz (PBefG) geregelt [154], welches vier Pflichten definiert:

| | |
|--------------------|---|
| Betrieb | Aufrechterhaltung auch eines betriebswirtschaftlich nicht sinnvollen Angebots |
| Beförderung | Verweigerung der Fahrgastbeförderung nur aufgrund bestimmter Kriterien |
| Tarif | Behördlich festgelegte Tarife müssen ausnahmslos angewendet werden |
| Fahrplan | Erstellung, Veröffentlichung und Einhaltung eines Fahrplans |

Gemäß RegG und PBefG werden für den ÖSPV auf kommunaler Ebene Behörden als Aufgabenträger definiert, die für die Sicherstellung des ÖPNV-Angebots im Sinne der Daseinsfürsorge verantwortlich sind. Der Aufgabenträger (i. d. R. die Stadtverwaltung) hat die Aufgabe, zu dieser Sicherstellung das Fahrplanangebot, Tarife, Fahrzeuge, Gestaltung der Infrastruktur oder auch die Umweltverträglichkeit im Rahmen eines Nahverkehrsplans vorzugeben⁵. Weiterhin schreibt er die entsprechenden Verkehrsleistungen aus und beauftragt ein Verkehrsunternehmen zur Leistungserstellung. Der Aufgabenträger hat auch die Finanzierung zu gewährleisten [155]. Die aktuellen, anspruchsvollen, von Kostenminimierungen getriebenen Ausschreibungsverfahren beschreibt [25]. Vorrangig, in Abhängigkeit der auf einer Linie zu erwartenden Fahrgastzahlen, wird über den Einsatz eines Schienen- oder Straßenfahrzeugs zur Erbringung der Personenbeförderung entschieden. Da der Neubau von Schieneninfrastruktur mit sehr hohen Investitionen, langen Planungs- sowie Genehmigungszeiträumen und einer geringen Flexibilität verbunden ist, werden heutzutage Linienbusverkehre häufig bevorzugt [17]. Auf Basis der vorgenannten Aspekte findet die Betriebsplanung im Verkehrsunternehmen als „kybernetischer Prozess“ [24] statt. Abbildung 2-1 visualisiert diesen Planungsprozess mit seinen unterschiedlichen Zeithorizonten und Regelkreisen.

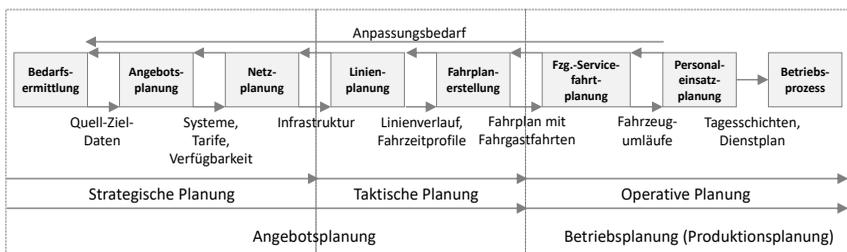


Abbildung 2-1: Planungsprozesse der Betriebsplanung im ÖPNV, i. A. a. [24], [156]

⁵ Bei der Erfüllung seiner Aufgaben wird der Aufgabenträger von einer Genehmigungsbehörde unterstützt sowie kontrolliert.

Die Komplexität des gezeigten Prozesses wird durch eine Vielzahl zu berücksichtigender vielschichtiger äußerer Einflussfaktoren weiter vergrößert. Abbildung 2-2 versucht, die wesentlichen Einflussgrößen in Bezug auf den Stadtbusbetrieb geclustert zusammenzufassen.

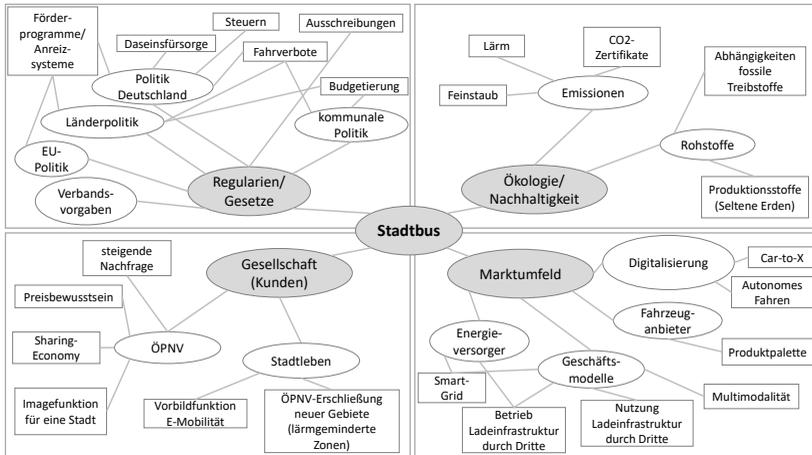


Abbildung 2-2: Äußere Einflussfaktoren auf den Busbetrieb eines Verkehrsunternehmens

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind diejenigen Planungsprozesse von Bedeutung, die durch die Elektrifizierung im besonderen Maße tangiert werden bzw. diese maßgeblich beeinflussen. So legen die Netz- und Liniengrundform im Zusammenhang mit der Fahrlagen- und Kapazitätsplanung den optimalen Fahrzeugeinsatz fest. Bei der Konfiguration der Elektrifizierung ganzer Bus(teil)netze spielen daher der einer Stadt zugrunde liegende Netzplan sowie der jeweilige Linienplan eine entscheidende Rolle. Die dem Anhang zu entnehmende Abbildung A-1 zeigt die Grundformen von ÖPNV-Linien und –Netzen, detaillierte Beschreibungen finden sich bei [24]. Die zum Einsatz kommenden Busse sind dabei in der Regel nicht auf eine spezielle Liniencharakteristik festgelegt, sondern müssen flexibel für diverse Einsatzzwecke zur Verfügung stehen. So wechseln die Fahrzeuge zwischen unterschiedlichen Linien, wenn keine linienreinen Umlaufpläne vorliegen oder sie ersetzen in

der Wartung befindliche Fahrzeuge auf unterschiedlichen Routen [24]. Zudem verlangt der Fahrzeugeinsatz im Schienenersatzverkehr oder bei Sonderveranstaltungen ein über den normalen Linienbetrieb hinausgehendes Einsatzspektrum. Im klassischen Linienverkehr variieren die Anforderungen an das Fahrzeug in Abhängigkeit der Liniengrundform, des Vorhandenseins eines ergänzenden höher oder geringer priorisierten schienengebundenen ÖPNV-Systems, der Anzahl der zu befördernden Fahrgäste, der Topographie, der Klimazone sowie der Durchschnittsgeschwindigkeit (Innenstadt vs. Expresslinie, Tag vs. Nacht, Werktag vs. Sonn- und Feiertag). Speziellen Anforderungen unterliegen sogenannte Bus Rapid Transit (BRT) oder Bus with High Level of Service (BHLS)-Systeme, welche durch infrastrukturelle sowie fahrplantechnische Anpassungen einen höheren Qualitätsstandard gegenüber klassischen Linienbussystemen erreichen [157]. Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher sowie stadt spezifischer Anforderungs- und Auslegungskriterien und der damit einhergehenden erschwerten Vergleichbarkeit, v. a. bei der Fahrzeugbeschaffung, existieren für Diesel- und Hybridbusse die standardisierten Vergleichszyklen SORT [158]⁶. Wesentliche Ziele bei der operativen Fahrzeugeinsatzplanung sowie der strategischen Flottenplanung sind das bereits genannte flexible Einsatzspektrum, in Verbindung mit einer maximalen Verfügbarkeit⁷ bei minimalen Gesamtkosten [24, 160]. Der Zeitplan (Umlaufplan) für den regulären täglichen Fahrzeugeinsatz eines konventionellen Dieselbusses, der mit der Fahrereinsatzplanung im direkten Zusammenhang steht, gestaltet sich auf der oberflächlichen Betrachtungsebene wie folgt:

-
1. Ausrückfahrt aus dem Busdepot (Abstellplatz) zur Starthaltestelle
 2. Schleife aus Fahrgastbetrieb auf einer Linie, gemäß dem der Linie zugrundeliegenden Takt, Wende- und Pausenzeiten, Fahrzeiten zu anderen Linien (Leerfahrten), etc.
 3. Einrückfahrt von der Endhaltestelle ins Depot und Abstellen durch den Fahrer
 4. Betankung und Kontrolle auf sichtbare Mängel, ggf. Behebung dieser
 5. Parken auf fest zugewiesenem Abstellplatz (im Freien, überdacht oder in einer Halle)
-

⁶ Für E-Busse ist ein eigener E-SORT aktuell in der Entwicklung [159].

⁷ Definition Verfügbarkeit siehe Kapitel 1.5.

Die verschiedenen in der Auflistung enthaltenen Zeitintervalle werden in Abbildung 2-3 entsprechend gruppiert und feiner granuliert dargestellt.

| | | | | | |
|-------------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| Unproduktive Zeiten | | Werkstatt-Standzeiten | | | |
| | | Abstellzeiten | | | |
| Fahrzeugservicefahrzeit | Linienbezogene Servicefahrzeit | Beförderungszeit | Fahrzeit | Notwendige Fahrzeit | |
| | | | | Slow & Go | |
| | | | Standzeit | Haltestellen-aufenthaltszeit | Wartezeit zum Einfahren |
| | | | | | Fahrgastwechselzeit |
| | | Sonstige Standzeiten | | Anschlussicherungszeit | |
| | | | | Pufferzeit an Unterwegshaltestellen | |
| | | Wendezeit | Pausenzeit | | |
| | | | Pufferzeit an Endhaltestellen | | |
| | | | Synchronisationszeit | | |
| | | Leerfahrzeit | Übergangsfahrzeit | | |
| Ausfahrzeit | | | | | |
| Einfahrzeit | | | | | |
| | | | Wartezeit zum Verlassen | | |
| | | | Wartezeit an Lichtsignalanlagen | | |
| | | | Halt am Ort | | |
| | | | Halt auf Strecke | | |

Abbildung 2-3: Zeitanteile im Busbetrieb, i. A. a. [24] (grau markiert sind potenzielle Zeitintervalle, die zum Nachladen genutzt werden können)

Es wird deutlich, dass das Betätigungsfeld eines Verkehrsunternehmens insgesamt sowie der konventionelle Stadtbusbetrieb im Speziellen, im heutigen Marktumfeld einen hohen Komplexitätsgrad und Facettenreichtum aufweist. Entsprechend stellt die Einführung und Umsetzung von Innovationen sowie Veränderungen hierbei eine große Herausforderung dar, vor allem, da sie weder gesetzliche Vorgaben noch anspruchsvolle Kundenerwartungen negativ beeinflussen darf.

2.1.2 Elektrifizierung von Stadtbussen

Für einen einführenden Überblick über die diversen Antriebstechnologien für Stadtbusse werden die unterschiedlichen Ausprägungen in Abbildung 2-4 gegenübergestellt.

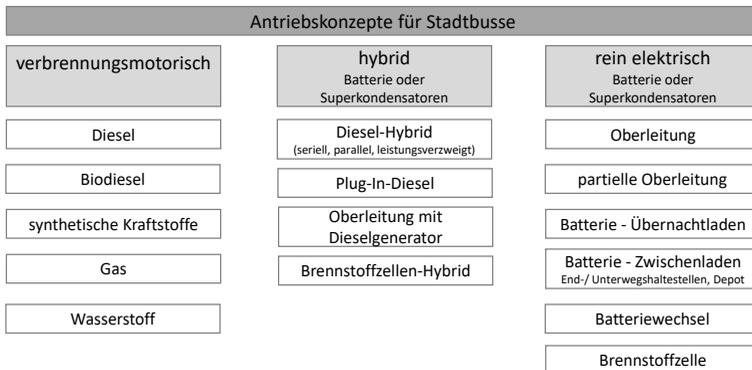


Abbildung 2-4: Antriebskonzepte für Stadtbusse

Wie bereits dargelegt wurde, werden nach Zahlen aus dem Jahr 2013 rund 93 % der europäischen Stadtbusse mit einem Verbrennungsmotor angetrieben, 79 % haben einen konventionellen Dieselantrieb. Elektrische Antriebsformen stellen mit 1,2 % Marktanteil aktuell eine Nische dar [159]. Der Grund für die vorherrschende Dominanz der Dieselmotoren liegt, wie im Bereich der Pkw auch, im unerreicht hohen Energieinhalt sowie in den niedrigen Kosten des Kraftstoffs. Die Etabliertheit der Technologie und die damit einhergehenden hohen Stückzahlen stellen sich als klarer Vorteil dar. Um einen aggregierten und detaillierteren Einblick in die Vor- und Nachteile der verschiedenen möglichen Antriebskonfigurationen für Stadtbusse zu geben, fasst Tabelle 2-2, qualitativ bewertet, verschiedene Kriterien in Größenordnungen zusammen.

Tabelle 2-2: Gegenüberstellung Antriebs- und Ladekonzepte für Linienbusse zum aktuellen technologischen Stand

| Kriterium / Antriebsstrang-Technologie | | Batteriebus | | | | | | | | | |
|--|---------------------------------|---|-----------|---------|-----------------|-------------------------|------------------------------|----|----|----|----|
| | | Gelegenheitsladen | | | Batteriewechsel | O-Leitung (partiell) | Übernachtladung (Plug-In) | | | | |
| | | Pantograph | Induktion | Plug-In | | | | | | | |
| Kosten | Fahrzeug | - | - | - | - | = | - | + | - | - | + |
| | Infrastruktur | + | - | ++ | -- | - | + | -- | + | -- | + |
| | Wartung | + | + | + | - | = | + | - | - | + | - |
| | Energie | | | | + | | | + | = | - | + |
| | Projektierung | - | - | = | - | - | + | -- | + | - | + |
| Technologie | Reifegrad | + | + | ++ | - | + | + | ++ | + | - | ++ |
| | Wirkungsgrad Energieübertragung | + | - | + | + | + | + | + | - | - | - |
| | Rekuperationsfähigkeit | | | | + | | | = | + | -- | -- |
| | Verschleiß | + | + | + | = | - | = | - | - | - | - |
| | Komplexität | + | - | + | - | - | + | - | - | -- | + |
| | Sicherheit | + | + | + | + | = | + | = | + | | + |
| Betrieb | Flexibilität | - | - | - | = | + | + | - | ++ | + | ++ |
| | Einführungsaufwand | - | - | - | - | - | + | -- | + | -- | ++ |
| | Aufwand Depotgestaltung | - | - | + | -- | - | = | -- | + | -- | + |
| Emissionen | Lärm | | | | + | | | - | = | + | -- |
| | lokales CO ₂ | | | | + | | | + | - | + | -- |
| | globales CO ₂ | | | | = | | | = | - | - | -- |
| | sonst. Schadstoffe | | | | = | | | = | - | + | -- |
| Komfort | Fahrgäste | | | | + | | | + | = | + | - |
| | Fahrer (Fahren) | | | | + | | | = | + | + | - |
| | Fahrer (Tanken/Laden) | + | + | + | = | = | - | = | - | - | - |
| Energieträger | kurzfristige Verfügbarkeit | | | | + | | | + | ++ | - | ++ |
| | langfristige Verfügbarkeit | | | | ++ | | | ++ | - | + | - |
| | Erzeugungsaufwand | | | | + | | | + | - | -- | - |
| | Speicherfähigkeit | | | | - | | | - | + | + | ++ |
| | Importabhängigkeit | | | | ++ | | | ++ | -- | = | -- |
| Sonstiges | Imageförderung | | | | ++ | | | - | + | ++ | -- |
| | polit. Fördermöglichkeiten | + | = | + | -- | = | + | - | + | ++ | -- |
| | optischer Einfluss Stadtbild | = | + | + | + | - | + | -- | + | + | + |
| | Ladeinfrastruktur | | | | + | | + | | + | + | + |
| | Synergiepotenzial Infrastruktur | + | + | ++ | + | = | + | = | + | + | + |
| Bewertungsmaßstab Erfüllungsgrad | | ++ sehr positiv, + positiv, = neutral, - negativ, -- sehr negativ | | | | | | | | | |
| Quellenangaben | | [16, 19, 26, 57, 107, 108, 159, 161–165] | | | | | | | | | |

Es wird deutlich, dass sich die Bewertungen der konventionellen verbrennungsmotorischen Antriebstechnik diametral zu denen der alternativen Antriebe verhalten. Deutliche Nachteile hat der Verbrennungsmotor bei den Emissionskriterien. Hier liegt aktuell (förder-) politisch auch die Hauptmotivation in der Auseinandersetzung mit dem Thema Elektrobus seitens der Betreiber und Kommunen.

Müller-Hellmann fasst die zentralen Einflussgrößen bei der Parameterwahl eines batterieelektrischen Antriebssystems gemäß Abbildung 2-5 zusammen. Die Grafik verdeutlicht die Herausforderung bei der Konfiguration eines E-Bus-Systems, indem sie in Abhängigkeit der betrieblichen und infrastrukturellen Anforderungen einer Buslinie (tägliche Fahrstrecke, Energiebedarf pro km, verfügbare Ladeleistung) den technologisch abbildbaren Rahmen samt Batteriekostenabschätzung gegenüberstellt.

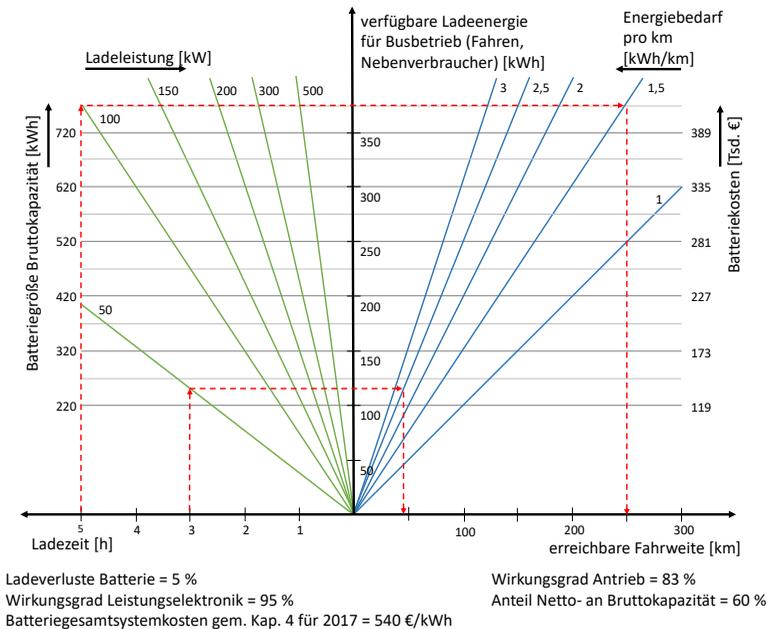


Abbildung 2-5: Betriebliche Auslegungproblematik bei E-Bussen, i. A. a. [20]

Mit Hilfe der roten gestrichelten Linien wird beispielhaft verdeutlicht, wie stark sich unterschiedliche Ladeleistungen bei verschiedenen Ladedauern und Energiebedarfen pro Kilometer des Busses auf dessen tägliche Reichweite auswirken. Zur Erfüllung der in Kapitel 2.1.1 gemäß PBefG definierten Pflichten des ÖPNV - Wirtschaftlichkeit, Stabilität, Sicherheit, Angebotsqualität - ist durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs nun zusätzlich die Pflicht der Sicherstellung der Energieversorgung unabdingbar. Unter Berücksichtigung der Zeitanteile im Busbetrieb gemäß Abbildung 2-3, stellt sich bei der Auswahl der Ladestrategie für die Elektrifizierung einer Buslinie oder eines Busnetzes vorrangig die Frage, welche Zeitscheiben für die Nachladung genutzt werden sollen. Die beiden verfügbaren Ladestrategien teilen sich im Wesentlichen in die Fragestellung auf, ob während des täglichen (Fahrgast-) Betriebs (Gelegenheits-/Zwischenladen/Opportunity Charging) oder ausschließlich im Depot, außerhalb des täglichen (Fahrgast-) Betriebs (Übernachtladen/Over-Night-Charging) die Fahrzeugbatterie zu laden ist. Für die genaue technologische Ausgestaltung der Ladeschnittstelle, weitestgehend unabhängig von der gewählten Ladestrategie, sind verschiedene Konzepte verfügbar, die in Abbildung 2-6 gegenübergestellt werden. Die Wahl der Ladetechnologie wird infrastruktureitig und in Abhängigkeit zu den gewählten Standorten durch verschiedene Einflussfaktoren beeinflusst, die sich gemäß Abbildung 2-7 darstellen.

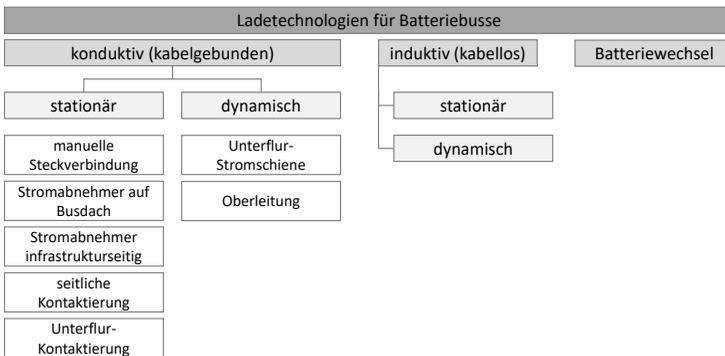


Abbildung 2-6: Ladetechnologien für Batteriebusse

| bauliche Herausforderungen, Restriktionen und infrastrukturelle Auswirkungen von Ladeinfrastruktur im Stadtbereich | | |
|---|---|--|
| allgemein | oberirdisch | unterirdisch |
| <ul style="list-style-type: none"> ➤ Flächen-, Raumbedarf (Ladestation, Peripherie: Transformator, Leistungselektronik, Kühlaggregate) ➤ Verkehrseinschränkungen während Bau / Wartung ➤ Sicherheit ➤ Netzanbindung (Last, Spannungsebene, Stabilität) ➤ Konkurrenzsituation mit (Park-) Flächenbedarf anderer Fahrzeuge ➤ Verkabelung mit Netzanschluss ➤ Positionierungshilfe Fahrer ➤ Funkeinrichtung zur Ladesteuerung ➤ Planungs-, Abstimmungs- und Genehmigungsaufwand | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Rodung, Abrissarbeiten ➤ Denkmalschutz ➤ Landschafts- und Stadtbild ➤ Beeinträchtigung von Grünflächen ➤ Vandalismus ➤ Witterung | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Schürfgrabungen zur Identifikation tatsächlicher Leitungsverläufe ➤ Platz- und Sperrbedarf für Grabungsarbeiten ➤ Umgehung kreuzender Leitungen ➤ Gewährleistung der Zugänglichkeit überbauter Leitungen (Umrohrung) ➤ Überschwemmungsschutz |

Abbildung 2-7: Restriktionen bei Auswahl und Bau von Ladeinfrastruktur

Durch die hier eingeführten vielfältigen Parameter und Einflussfaktoren wird deutlich, dass sich Verkehrsunternehmen, die sich den globalen sowie lokalen politischen und gesellschaftlichen Gegebenheiten (Endlichkeit Ressource Erdöl, Reduktion von CO₂-, Feinstaub-, Ruß- und Lärmemissionen) anpassen, im Speziellen durch die Einführung batterieelektrischer E-Stadtbusse einer herausfordernden sowie facettenreichen Projektaufgabe stellen.

2.1.3 Busliniennetz Mannheim und Projekt PRIMOVE

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, entstand ein Teil der vorliegenden Arbeit im Kontext der Beteiligung des Autors im Rahmen des BMVI-geförderten Leuchtturmprojekts PRIMOVE Mannheim. Die Projektbeteiligung stellt den Bezug zwischen Theorie und Praxis sicher und geht konsequenterweise einher mit der Wahl des ÖPNV-Netzes und Busbetriebs Mannheims als Referenz bzw. als Anwendungsfall für die folgenden Kapitel.

2.1.3.1 Busliniennetz Mannheim

Der ÖPNV Mannheims⁸ sowie der Metropolregion Rhein-Neckar wird durch die Rhein-Neckar-Verkehrs GmbH (rnv) betrieben. Da sich im Mannheimer Stadtgebiet nur vier Haltestellen der S-Bahn Rhein-Neckar befinden, kommt neben der Straßenbahn den Bussen eine wichtige Bedeutung bei der Erschließung des Stadtgebiets zu. Das Busliniennetz der rnv in Mannheim enthält keine Verbindungen außerhalb des Stadtbereichs. Tabelle 2-3 listet die wesentlichen Leistungsdaten der rnv für das Mannheimer Stadtgebiet auf. Wie aus dem Netzplan des Mannheimer ÖPNV in Abbildung A-2 (Anhang) hervorgeht, bilden die Straßenbahnlinien ein Radialnetz, da sie alle entweder das Stadtzentrum als Durchmesserlinien durchfahren oder dort als Halbmesserlinien ihren Anfang haben. Während die Straßenbahnlinien im Zentrum gemeinsame Fahrwege nutzen, spalten sich ihre Linienverläufe in der Peripherie auf und binden die äußeren Stadtbezirke an das Zentrum an. Den Buslinien kommt daher vorrangig die Aufgabe zu, die Streckenäste der Straßenbahnen zu verbinden und die dazwischen liegenden Gebiete zu erschließen. Wie in der Abbildung des Busliniennetzes gekennzeichnet, clustern sich die Mannheimer Buslinien in drei Linienfamilien, deren Liniennummern jeweils aus dem Intervall der 40er- (Südosten), 50er- (Norden) oder 60er-Zahlen (Westen) stammen. Die jeweiligen Linienfamilien sind dabei bis auf wenige Überschneidungen als nahezu unabhängige Teilnetze zu betrachten. Eine detaillierte Auflistung der Mannheimer Buslinien Stand 2014 findet sich, geclustert nach Linienlängen, im Anhang A.3. Das Busdepot für sämtliche in Mannheim eingesetzte Busse befindet sich samt Werkstatt innenstadtnah in der Möhlstraße, siehe Markierung in Abbildung A-2.

⁸ Die Stadt Mannheim dehnt sich über 144 km² aus, ihr tiefster Punkt liegt bei 90 m ü. N.N., ihr höchster bei 112 m ü. N.N. In der in sechs innere und elf äußere Bezirke untergliederten Stadt leben 317.744 Einwohner. Mannheim ist nach Einwohnern die drittgrößte Stadt Baden-Württembergs und die 22. größte Deutschlands. Sie befindet sich in der Metropolregion Rhein-Neckar, die in Summe rund 2,35 Mio. Einwohner zählt [166]. In der Stadt herrscht ein mildes Klima mit einer Jahresdurchschnittstemperatur von 10,9 °C [167].

Tabelle 2-3: Leistungsdaten der Rhein-Neckar-Verkehr GmbH für das Stadtgebiet Mannheims
Stand 2015 (Datenquelle siehe A.3 und rnv-Angaben)

| Kennzahl | Einheit | Wert |
|---------------------------------------|---------|-------------|
| Streckenlänge Straßenbahnnetz | km | 55,4 |
| Anzahl Straßenbahnhaltestellen | | 127 |
| Streckenlänge Busnetz | km | 207 |
| Anzahl Bushaltestellen | | 407 |
| mittlerer Haltestellenabstand (Bus) | m | 602 |
| Mittelwert Anzahl eingesetzter Busse | | 40 |
| durchschnittliche Linienlänge | km | 8,7 |
| Fahrgäste (Bus & Straßenbahn) p. a. | | 70.200.000 |
| Personenkilometer (Bus & Straßenbahn) | pkm | 192.000.000 |
| Ø Besetzungsgrad (Bus & Straßenbahn) | % | 18,0 |

2.1.3.2 Projekt PRIMOVE Mannheim

Mit dem Ziel des Nachweises der Praktikabilität des Einsatzes rein batterieelektrischer Stadtbusse mit Zwischenladung wurde im Zeitraum Januar 2013 bis Juni 2016 das Forschungsprojekt „PRIMOVE Mannheim“ durchgeführt⁹. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde die vollständige Umstellung des Dieselseinsatzes der Mannheimer Innenstadt-Linie 63 auf einen gleichwertigen E-Busbetrieb beabsichtigt. Dies sollte ohne Eingriffe in die bisherigen Fahrplanvorgaben umgesetzt werden. Die zum Einsatz kommenden E-Busse wurden von dem Hersteller Carrosserie Hess AG gefertigt. Im Vorfeld des Projektstarts wurden durch Bombardier, in Zusammenarbeit mit der rnv, auf Basis von GPS-Messungen (zur Ermittlung der durchschnittlichen Haltedauer und Haltewahrscheinlichkeit) und Experteneinschätzungen sechs Haltestellen identifiziert, die zu Ladepunkten umgebaut wurden. Zusätzlich wurde im Depot eine Ladestation errichtet. Die induktive Ladetechnologie PRIMOVE überträgt kontaktlos fahrzeugseitig eine Ladeleistung von 200 kW. Der Netzanschluss kann entweder an das 750 V-Gleichstromnetz (DC) der

⁹ Das Projektkonsortium setzte sich zusammen aus der rnv als Betreiber, Bombardier Transportation GmbH als Technologielieferant für das Antriebssystem und die induktive Ladeschnittstelle mit dem Markennamen PRIMOVE, der Stadt Mannheim und dem Teilinstitut für Bahnsystemtechnik am KIT für die wissenschaftliche Begleitforschung.

Straßenbahn oder an das 400 V-Niederspannungsnetz (AC) erfolgen. Abbildung 2-8 veranschaulicht den Linienverlauf und die Orte der Ladehaltestellen. Bezugnehmend auf die in Kapitel 2.1.1 vorgestellten Liniengrundformen bildet die Linie 63 eine Mischform, da sie das Zentrum als Halbmesserlinie durchfährt und außerhalb des Zentrums als Tangentiallinie zu betrachten ist.

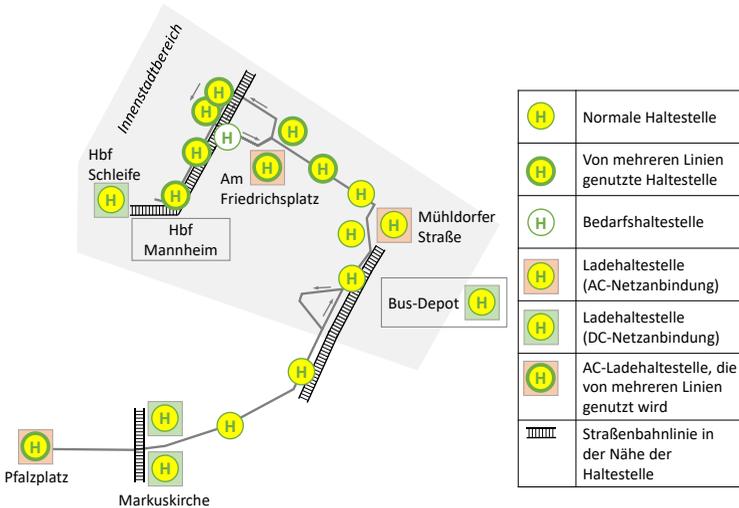


Abbildung 2-8: Schematische Darstellung Linienverlauf der Buslinie 63

Der Zeitraum des Projektes umfasste neben der Technologieentwicklung die Planung und den Bau der Fahrzeuge und der Ladehaltestellen, die Schulung der betroffenen Mitarbeiter, die Inbetriebnahme sowie den einjährigen regulären Einsatz im Fahrgastbetrieb. Dieser begann im Juni 2015 und endete am 30. Juni 2016. Das Projekt wurde neben einer intensiven Öffentlichkeitsarbeit auch durch eine Anwohner- und Fahrgastbefragung begleitet. An seinem Ende hatten beide Busse zusammen eine Laufleistung von rund 80.000 Kilometern absolviert und wiesen eine durchschnittliche Verfügbarkeit von 80,3 % auf. Tabelle 2-4 listet die wesentlichen Kenngrößen zum

Betrieb der Linie 63, zur Ladetechnologie und zu den eingesetzten E-Bussen auf.

Tabelle 2-4: Charakteristische Daten zur Linie 63, i. A. a. [168] und eigene Daten

| Kenngröße | Einheit | Wert |
|--|---------|--|
| Buslinie 63 | | |
| maximale Linienlänge | km | 9,5 |
| Anzahl Haltestellen/Ladehaltestellen auf Linie/Depot | | 24/6/1 |
| Anzahl eingesetzter Fahrzeuge | | 2 - 3 |
| hauptsächlich eingesetzter Bustypus | | 12-m-Bus |
| Taktzeit | min | 20 |
| Betriebszeiten Mo-Fr | hh:mm | 05:32 – 20:32 |
| Durchschnittsgeschwindigkeit | km/h | 12 |
| Pufferzeit Wende- und Endhaltestelle (regulär) | s | 420 |
| durchschnittliches Fahrgastaufkommen | | ≈ Ø 10 Fahrgäste/Servicefahrt |
| E-Bus | | |
| Hersteller und Typenbezeichnung E-Bus ¹⁰ | | Hess Carosserie, Swiss Primove |
| Hersteller und Typenbezeichnung Batterie | | AKASOL, 30 M 46 NANO NMC |
| Hersteller und Typenbezeichnung E-Motor | | ZF, AVE 130, Portalachse mit 2 radnahen Asynchronmotoren |
| Fahrzeuglänge ¹¹ | m | 12 |
| Brutto-/Nettokapazität Batterie | kWh | 60/30 (Nennspannung: 660 V) |
| Nenn-/maximale Antriebsleistung | kW | 2 x 60/2 x 140 |
| elektr. Leistung Fahrgastheizung | kW | 20 |
| maximale Anzahl Fahrgäste | | 80 |
| PRIMOVE Ladeeinrichtung | | |
| Leistung Netzentnahme | kW | ≈ 220 (400 V AC oder 750 V DC) |
| Übertragungsverluste | % | ≈ 10 |
| maximale Ladeleistung fahrzeugseitig | kW | 200 |

Vor allem aufgrund des großen Energiebedarfs für die Beheizung des Innenraums, in Kombination mit der regelmäßigen Nichteinhaltung des Fahrplans wegen einer hohen Verkehrsdichte sowie einer teilweise suboptimalen Ausnutzung der Ladeinfrastruktur, konnten bei entsprechend nachteiligen klimatischen Rahmenbedingungen nicht alle Fahrten elektrisch betrieben

¹⁰ Der genannte Bus samt seiner Komponenten dient als Referenzfahrzeug für diese Arbeit.

¹¹ Wird im Folgenden als 12-m-Bus geschrieben.

werden. Nichtsdestotrotz wurde durch die Durchführung des Projektes der Beweis erbracht, dass die Elektrifizierung von innerstädtischen Buslinien mit Zwischenladung Stand heute mit einer hohen Verfügbarkeit möglich ist. Zudem wurden bei allen Schritten zur Umsetzung des Forschungsprojektes vielfältige Praxiserfahrungen gesammelt, die nachfolgenden E-Bus-Einführungen zugutekommen werden. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass aus strategischer Sicht der Stadt Mannheim die Einführung der E-Busse auf der Linie 63 als Startpunkt für die Elektrifizierung der gesamten Busflotte zu verstehen ist [10].

2.2 Technik

Das Teilkapitel *Technik* gibt eine Einführung in die Grundlagen der Linienbus- bzw. Fahrzeugtechnik. Gemäß dem Schwerpunkt der E-Busse werden insbesondere die für die Elektrifizierung relevanten elektrotechnischen Stadtbus-Komponenten samt Ladetechnik in Unterkapiteln behandelt. Da die Energieflusssimulation im Fokus der Arbeit steht, beschränkt sich die Betrachtung auf die Längsdynamik.

2.2.1 Gesamtfahrzeug, Energieflüsse und Wirkungsgrade

Die im Stadtverkehr eingesetzten Bustypen unterscheiden sich vorrangig durch die Fahrzeuglänge. Wie in Kapitel 2.1.1 dargelegt, ergibt sich die auf einer Linie zu einer bestimmten Tageszeit eingesetzte Fahrzeuglänge optimalerweise durch die Kapazitätsplanung. Dies ist gleichbedeutend mit der zu erwartenden Zahl an Fahrgästen. Mit der Fahrzeuglänge steht über die Anzahl der Achsen und die erlaubten Achslasten das zulässige Gesamtgewicht (zGG) des Busses im Zusammenhang, siehe EU-Richtlinie 96/53/EG bzw. Straßenverkehrszulassungs-Ordnung (StVZO) §32 und §34. Je geringer das Fahrzeugleergewicht, desto mehr Passagiere können transportiert werden. In Abhängigkeit der maximalen Passagierzahl erfolgt das Design des Innenraums. Dieses berücksichtigt bei Stadtbussen in der Regel die

Niederflurtechnik für einen erleichterten Einstieg und variiert von Hersteller zu Hersteller in seiner genauen Ausgestaltung (siehe hierzu [169] und [170]). Auf der obersten Detaillierungsebene untergliedern sich die einzelnen Komponenten des Fahrzeugs in das Grundfahrzeug (Chassis, Innenraumausstattung, konventionelle Bedien- und Steuergeräte), den Antriebsstrang (Antriebsachse mit E-Motor und Getriebe samt Energiespeicher) und die Nebenverbraucher. Die genauen technischen Spezifikationen der Fahrzeugbestandteile hängen im Weiteren von länderspezifischen regulatorischen Vorgaben bzw. Verbands-Empfehlungen, kulturkreisspezifischen Fahrgasterwartungen, der Topographie und den Anforderungen des geographischen Einsatzgebiets sowie von den Ausschreibungskriterien des Verkehrsbetreibers ab.

Da der Fokus der Arbeit auf der Konfiguration eines E-Busses liegt, wird dessen Topologie im Rahmen dieses Kapitels eingehender analysiert. Die physikalischen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Fahrzeugkomponenten inklusive der Ladeschnittstelle, drücken sich durch die zwischen ihnen stattfindenden Leistungs- bzw. Energieflüsse aus. Diese lassen sich einerseits in elektrische und in mechanische Energieflüsse unterscheiden, andererseits kann man sie in unidirektionale und bidirektionale Flussrichtungen unterteilen. Hinzu kommen Signalflüsse zwischen den Fahrzeugkomponenten sowie zwischen dem Fahrzeug und dessen Fahrer. Dieser ist in Bezug auf die Vorgabe und Einhaltung einer Soll-Geschwindigkeit und durch Einstellung diverser Parameter der Nebenverbraucher als Regler anzusehen [171]. Abbildung 2-9 veranschaulicht die Leistungs- und Signalflüsse im E-Bus¹². Der als „Wegseite“ gekennzeichnete Bereich stellt die Varianten möglicher Netzanbindungen der Ladeinfrastruktur dar.

¹² Hierbei wurde eine etwaige Steuerung des Ladevorgangs durch den Fahrer ebenso vernachlässigt, wie die CAN-Bus-Steuersignale zwischen den einzelnen Komponenten zu deren Kommunikation.

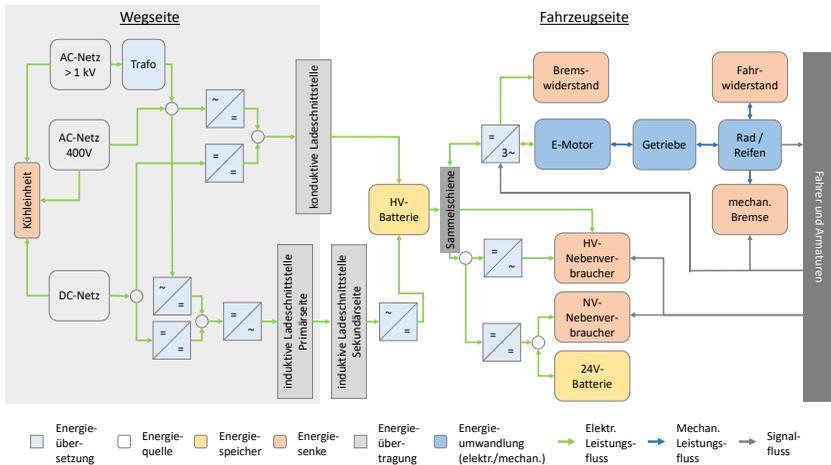


Abbildung 2-9: Leistungs- und Signalflüsse im E-Bus-System¹³

Der in diesem Teilkapitel vorgestellte Hauptleistungsfluss für den Antrieb des Busses beginnt mit der Betätigung von Brems- und Gaspedal. Mit dem Ziel der Einhaltung der Fahrplanvorgaben und in Abhängigkeit der äußeren Verkehrseinflüsse, passt der Busfahrer hierüber die Ist-Geschwindigkeit seines Fahrzeugs an die von ihm gewünschte Soll-Geschwindigkeit an. Die Ist-Geschwindigkeit des Busses resultiert hierbei aus der Momentenrelation zwischen Antriebskraft und den auf das Fahrzeug wirkenden Fahrwiderständen, die in Abbildung 2-10 gezeigt werden. Der gesamte Fahrwiderstand F_W in N ergibt sich als Summe aller auf das Fahrzeug einwirkenden Widerstände,

$$F_W = F_{WR} + F_{WL} + F_{WSt} + F_{WB} \quad (2-1)$$

mit F_{WR} als Rollwiderstand, F_{WL} als Luftwiderstand, F_{WSt} als Steigungswiderstand und F_{WB} als Beschleunigungswiderstand. Letzterer wird aufgeteilt in

¹³ Automobilbereich: NV = Niederspannung (≤ 60 V DC), HV = Hochspannung (> 60 V DC) [172]

einen Anteil aus rotatorischer und aus translatorischer Massenträgheit [173]. Die Antriebskraft F_Z muss diesen Fahrwiderstand F_W überwinden. F_Z , multipliziert mit dem dynamischen Rollradius r_{dyn} des Rades, ergibt das Antriebsmoment M_R . Brems das Fahrzeug oder übersteigen die Fahrwiderstände die Antriebskraft, so wirkt hingegen das Bremsmoment M_B .

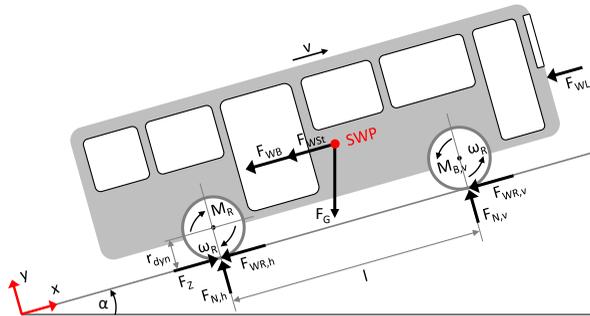


Abbildung 2-10: Fahrwiderstände am Linienbus (SWP = Schwerpunkt, F_N = Normalkraft, l = Radstand, α = Steigungswinkel)

Antriebs- sowie Bremsmoment haben eine Änderung der Winkelgeschwindigkeit des Rades ω_R in rad/s zur Folge. Aus der Multiplikation der Winkelgeschwindigkeit ω_R mit dem dynamischen Rollradius r_{dyn} in m resultiert die Radgeschwindigkeit v_{Rad} in m/s und in Abhängigkeit vom Schlupf s in % die Ist-Fahrgeschwindigkeit v_{Fzg} in m/s des Fahrzeugs [169, 174].

$$s = \frac{v_{Rad} - v_{Fzg}}{v_{Rad}} \quad \text{mit} \quad v_{Rad} = r_{dyn} \cdot \omega_R \quad (2-2)$$

Die Betätigung von Gas- oder Bremspedal entspricht dem mechanischen Wunschmoment der E-Maschine $M_{Mot, Soll}$ in Nm. Wie aus Abbildung 2-9 hervorgeht, bildet der E-Motor die Schnittstelle zwischen der elektrischen und der mechanischen Leistungsflussseite des Antriebstrangs. Das tatsächliche mechanische Motormoment $M_{Mot, Ist}$ steht, gemäß Motorkennlinie (siehe Kap. 2.2.2), in Zusammenhang mit der Motordrehzahl n_{Mot} . Diese

wiederum hängt von der Fahrzeuggeschwindigkeit v_{FZG} und damit von der Raddrehzahl $n_R = \frac{\omega_R}{2\pi}$ in 1/s ab. Die mechanische Motorleistung $P_{Mot, mech}$ in W lässt sich hiermit folgendermaßen berechnen:

$$P_{Mot, mech} = M_{Mot, Ist} \cdot \omega_{Mot} \quad (2-3)$$

Aus dem Motormoment $M_{Mot, Ist}$ resultiert unter Berücksichtigung des Übersetzungsverhältnisses des Getriebes i und dessen Wirkungsgrad η_G die mechanische Antriebsleistung P_R in W am Rad:

$$P_R = M_{Mot, Ist} \cdot i \cdot \eta_G \cdot \omega_R \quad (2-4)$$

Wesentlich für die Leistungsflussberechnung und Energiebilanzierung sind die auftretenden mechanischen und elektrischen Verluste bei der Energieübertragung. Die mechanischen Verluste entstehen gemäß den Grundsätzen der Tribologie durch Reibungseffekte zwischen sich relativ zueinander bewegendenden mechanischen Komponenten [175]. Beim Stadtbus ist dies außer im Getriebe noch in den Lagern der E-Maschine, der Wellen, der Radaufhängungen und zwischen Reifen und Straße (Schlupf) der Fall. Elektrische Verluste kommen physikalisch betrachtet ebenfalls durch Reibung zustande, da sich auf atomarer Ebene die durch ein elektrisches Feld beschleunigten freien Elektronen an anderen Elektronen stoßen und sich dabei gegenseitig abbremsen. Elektrotechnisch ist hier vom Widerstand die Rede, der einen Abfall der Spannung in Leitungen und Schaltern¹⁴ zur Folge hat und so die Leistungsübertragung verringert [176]. Mechanische wie auch elektrische Verluste resultieren in einer Wärmeabgabe, die in Abhängigkeit ihrer Größenordnung aktiv, d. h. unter Aufwendung von Energie, abgeführt werden muss. Die Verlustleistung $P_{Verlust}$ in W bezeichnet entsprechend das

¹⁴ Schaltverluste entstehen in leistungselektronischen Bauteilen (Gleich-/Wechselrichter).

Delta zwischen der einem System zugeführten Leistung P_{an} und von diesem abgegebenen Leistung P_{ab} .

$$P_{Verlust} = P_{an} - P_{ab} \quad (2-5)$$

Der Quotient aus abgegebener und zugeführter Leistung definiert den Wirkungsgrad η in %.

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{an}} \quad (2-6)$$

Der Gesamtsystemwirkungsgrad verketteter mechanischer sowie elektrischer Teilsysteme ergibt sich wie folgt:

$$\eta_{ges} = \prod_1^n \eta_{mech,n} \cdot \prod_1^m \eta_{elekt,m} \quad (2-7)$$

Aufgabe des Energiemanagements ist es, alle Energieflüsse im Fahrzeug maximal effizient auszulegen, um einen möglichst geringen Gesamtenergiebedarf zu erreichen. Stellgrößen hierfür sind eine Optimierung der Wirkungsgrade der technischen Komponenten sowie deren intelligenter Einsatz durch geeignete Steuerungs- und Regelungsverfahren.

2.2.2 E-Motor, Rekuperation und Getriebe

Der E-Motor samt Getriebe verbindet den elektrischen mit dem mechanischen Teil des Antriebsstrangs. Hierzu muss der E-Maschine die mechanisch benötigte Leistung $P_{Mot, mech}$ (zuzüglich der mechanischen Verlustleistung) elektrisch zur Verfügung gestellt werden. Für einen 12-m-Stadtbuss liegt die benötigte elektrische Antriebsleistung in einer Größenordnung von 200 bis

300 kW [177]. Mittels Leistungskopplung können im Motormodell mechanischer und elektrischer Leistungsfluss gekoppelt werden [178]. Entsprechend wird, in Abhängigkeit der Richtung des Leistungsflusses, elektrische Energie aus der Batterie entnommen oder zurückgespeist (Rekuperation).

2.2.2.1 E-Motor und Rekuperation

Wie einleitend beschrieben, wandelt der E-Motor elektrische Leistung in mechanische Leistung, welche im Getriebe eine Übersetzung erfährt und in der Folge den Vortrieb oder die Verzögerung des Busses umsetzt. Da die Asynchronmaschine als Standardantrieb angesehen werden kann und der im Rahmen dieser Arbeit betrachtete E-Bus als Referenzfahrzeug mit einer Asynchronmaschine (ASM) ausgerüstet ist, wird hier und im Folgenden ausschließlich diese Maschinenform betrachtet [179]. Die ASM besteht aus einem Stator und einem Rotor, welcher die mechanische Verbindung zu den Rädern herstellt. Das ESB veranschaulicht den Leistungsfluss von der elektrischen Eingangsseite (P_{el} als eingespeiste elektrische Wirkleistung) bis zur mechanischen Ausgangsseite (P_{mech}).

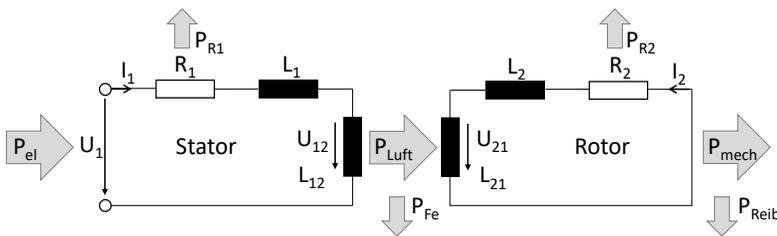


Abbildung 2-11: Ersatzschaltbild Asynchronmaschine mit Leistungsflüssen, i. A. a. [179]

P_{R1} repräsentiert die ohmschen Verluste der Ständerwicklung, P_{R2} die der Rotorwicklung. P_{Luft} beschreibt die Luftspaltleistung, P_{Fe} die Ummagnetisierungs- und Wirbelstromverluste im Eisen und P_{Reib} die Reibungsverluste. R_1 ist der ohmsche Widerstand des Stators, L_1 seine Selbstinduktivität, L_{12} seine Gegeninduktivität und U_{12} die sich in deren und in Abhängigkeit von U_1

einstellende Spannung. Gleiches gilt für R_2 , L_2 , L_{21} und U_{21} jeweils entsprechend für den Rotor. Für eine realitätsnahe Modellierung ist das Kennfeld eines E-Motors von Bedeutung. Abbildung 2-12 zeigt ein solches exemplarisches, experimentell ermitteltes Kennfeld mit dem Wirkungsgrad des Motors in jedem Betriebspunkt. Dieser Wirkungsgrad wird beeinflusst durch die bereits beschriebenen und im ESB in Abbildung 2-11 gekennzeichneten Leistungsverluste [173].

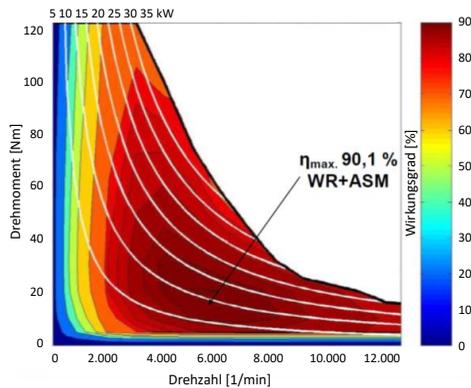


Abbildung 2-12: Beispielhaftes Wirkungsgradkennfeld einer E-Maschine, i. A. a. [180]

Ein entscheidender Vorteil des elektrischen Antriebsstrangs besteht in der Möglichkeit, die kinetische Energie des Fahrzeugs beim Bremsvorgang teilweise zurückzugewinnen. Bei der Rekuperation wechselt der Motor in den Generatorbetrieb. Die kinetische Energie des Fahrzeugs wird beim Verzögerungsvorgang, abzüglich des Fahrwiderstandsanteils und der Reibverluste, mechanisch von den Rädern bis zur Rotorwelle des Motors übertragen. Hier findet eine Umkehrung der Lorentzkraft zwischen Rotor und Stator statt, wodurch ein Stromfluss im Stator erzeugt wird. Dieser kann mit Wirkungsgradverlusten gemäß Generatorenkennfeld in die Batterie gespeist werden, wenn die Ladeleistung nicht zu hoch ist, der maximale Ladezustand nicht überschritten wird und die E-Maschine aufgrund niedriger Geschwindigkeiten

nicht im Gegenstrombetrieb läuft. Die nicht elektrisch speicherbare Energie wird mechanisch durch die Reibbremsen an den Rädern abgebaut oder dem elektrischen Bremswiderstand zugeführt [181, 182]. In Anlehnung an [182] stellt Formel (2-8) die theoretisch rekuperierbare Bremsenergie E_b in Wh dar.

$$E_b = \int v(F_{WB} - F_{WR} - F_{WL} + F_{WSt})dt \quad (2-8)$$

Hierbei ist v in m/s die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit. Die Terme in der Klammer beschreiben den Verzögerungswiderstand der translatorischen und rotatorischen Trägheitskräfte F_{WB} sowie die weiteren aus Kapitel 2.2.1 bekannten Fahrwiderstände F_{WR} , F_{WL} , F_{WSt} in N.

2.2.2.2 Getriebe

Mit dem Begriff „Getriebe“ sind alle mechanischen Maschinenelemente beschrieben, mit denen Bewegungsgrößen geändert und mechanische Kräfte übertragen werden können [183]. Das Übersetzungsverhältnis i eines Getriebes wird als Verhältnis des Antriebsmoments M_{an} bzw. der Antriebsdrehzahl n_{an} und des Abtriebsmoments M_{ab} bzw. der Abtriebsdrehzahl n_{ab} beschrieben. Das Abtriebsmoment ist hierbei in Abhängigkeit des Gesamtwirkungsgrades η_G des Getriebes zu sehen:

$$i = \frac{n_{ab}}{n_{an}} = \frac{M_{ab}}{\eta_G M_{an}} \quad (2-9)$$

In der Leistungsflussbetrachtung ergibt sich entsprechend:

$$P_{ab} = \omega_{ab} M_{ab} = \eta_G P_{an} \quad (2-10)$$

Die Wirkungsgrade ergeben sich durch Leistungsverluste in Form von Verzahnungs-, Lager-, Dichtungs- und Plantschverlusten [184]. Prozentuale Größenordnungen hierfür nennt [185]. Technische Details zur Auslegung und

zum Einsatz von Getrieben finden sich bei [185]. Beim E-Bus umfasst das Getriebesystem im Wesentlichen den Drehmomentwandler zwischen dem Ausgang der E-Maschine und der Radnabe, beispielsweise als Planetengetriebe. Je nach Motoranordnung sind hier noch Achsdifferenziale (Mittelantrieb), Summiergetriebe (mehrere E-Maschinen) oder Stirnradgetriebe (Portalachse bei Niederflurtechnik) zwischengeschaltet. Nur bei Radnabenmotoren wirkt das Getriebe direkt auf die Radnabe.

2.2.3 Batterie

Zur Einführung der technischen Grundlagen von Batterien werden zuerst deren allgemeiner Aufbau und ihre Eigenschaften vorgestellt. Anschließend wird das Thema der Batteriealterung vertieft.

2.2.3.1 Aufbau und Eigenschaften

Um den Aufbau einer Fahrzeugbatterie grundlegend zu verstehen, ist die Betrachtung einer Batteriezelle von zentraler Bedeutung, die das Grundbauteil einer Batterie darstellt¹⁵. Der Aufbau einer Li-Ion-Zelle wird in Abbildung 2-13 dargestellt. Getrennt durch einen Separator, befindet sich in einem Elektrolyten auf der einen Seite die negativ geladene Anode, auf der anderen die positiv geladene Kathode. Da die Metalle der beiden Elektroden gemäß der Spannungsreihe ein unterschiedliches Elektronenpotenzial besitzen, liegt zwischen ihnen eine Spannung vor. Verbindet man beide Elektroden über einen äußeren Stromkreis miteinander, so stellt sich durch einen Elektronenfluss ein Potenzialausgleich zwischen ihnen ein. Zum Ausgleich des externen Stromflusses fließen die Lithium-Ionen durch den

¹⁵ Hier und im Fortgang der Arbeit wird sich auf die Betrachtung von Lithium-Ionen-Zellen (Li-Ion-Zelle) beschränkt, da diese, unter Abwägung von Leistungs- mit Energiedichte (Stichwort „Ragone-Diagramm“ [186], die für den E-Bus-Einsatz gängige Zellchemie darstellen [187]. Das Wort „Batterie“ wird daher synonym für Lithium-Ionen-Akkumulatoren verwendet. Die Beschreibung der elektrochemischen Zusammenhänge ist grundlegend auch für Batterien mit einer alternativen Zell-Chemie gültig [188].

Separator zur gegenüberliegenden Elektrode, wodurch der Batterietyp seinen Namen erhalten hat. Im Ladefall drehen sich die beschriebenen Vorgänge um. Durch die Reihenschaltung identisch aufgebauter Zellen erreicht man eine Erhöhung der Spannung. Mit der Parallelschaltung mehrerer Zellen wird die Kapazität erhöht. Diesen beiden Prinzipien der Verschaltung folgend, werden mehrere Zellen in sogenannte Module zusammengefasst. Zur Überwachung der einzelnen Zellen eines Moduls bezüglich Temperatur, Ladezustand und ggf. Schädigung, ist für ein Modul ein Batteriemanagementsystem (BMS) von Nöten [187, 189]. Da die Zellen durch Lade- und Entladevorgänge sowie durch Umweltumgebungen thermischen Einflüssen unterliegen, ist die Integration eines Kühl- und Heizsystems in das Batteriemodul wichtig. Durch das wiederholte In-Reihe- und Parallelschalten von Modulen ergibt sich der sogenannte Batterietrog. Durch die Parallelschaltung mehrerer Batterietröge ist die Gesamtkapazität nochmals skalierbar. Für weiterführende Erläuterungen zum Aufbau von Batterien und Li-Ion-Zellen sei verwiesen auf [188].

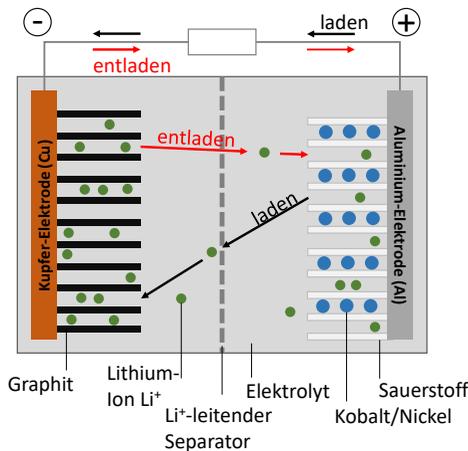


Abbildung 2-13: Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Batteriezelle, i. A. a. [188]

Im ESB einer Batterie nach Abbildung 2-14 ist der Innenwiderstand R_i in Ω und die nach Gleichung (2-11) von diesem abhängige Klemmenspannung U_K in V erkennbar. Die Leerlaufspannung steht im Zusammenhang mit dem Ladezustand der Batterie (SOC), der Innenwiderstand wird durch die Temperatur und die nachfolgend beschriebenen Alterungsprozesse beeinflusst. Die Leerlaufspannung U_0 in V entspricht der Differenz aus Kathoden- und Anodenpotenzial, wenn kein Lade-/Entladestromfluss stattfindet. I in A bezeichnet den stationären Stromfluss. Weiterhin ist im ESB ein sogenanntes RC-Glied enthalten. Dieses beschreibt das dynamische Verhalten der Klemmenspannung bei Änderungen des Batteriestroms.

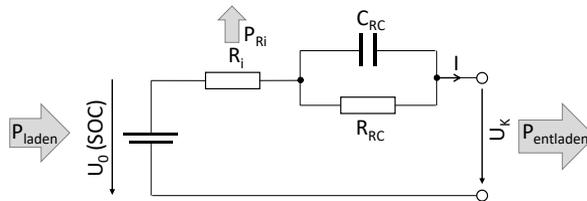


Abbildung 2-14: Ersatzschaltbild einer Batterie für den Entladefall mit Leistungsflüssen

$$U_K = U_0 - R_i \cdot I \quad (2-11)$$

In Abhängigkeit des positiven bzw. negativen Stromflusses I in A über der Zeit vergrößert bzw. verkleinert sich die elektrische Ladung Q in Ah.

$$Q = \int_0^t I dt \quad (2-12)$$

Der Nennenergieinhalt bzw. die Nennkapazität C_N in Wh eines Akkumulators ist das Produkt aus Nennladung Q_N in Ah (Ladungsspeichervermögen der Batterie) und Nennspannung U_N in V (während des Gebrauchs gemittelte Spannung unter Normalbedingungen).

$$C_N = Q_N \cdot U_N \quad (2-13)$$

Wird als Bezugsgröße zum Energieinhalt die Masse gewählt, so spricht man von der gravimetrischen Energiedichte in Wh/kg. Der State of Charge (SOC) in % als wichtige Kenngröße ist das Verhältnis der Ladeenergie zur Nennkapazität. Der Depth of Discharge (DOD) in % beschreibt hingegen das Verhältnis aus entnommener Ladung und der Nennkapazität.

$$SOC = \frac{C_N - Q}{C_N} = SOC(t_0) + \frac{1}{C_N} \int_{t=0}^t (I_{Batterie} - I_{Verlust}) dt \quad (2-14)$$

$$DOD = \frac{Q}{C_N} \quad (2-15)$$

Das Laden (L) bzw. Entladen (E) einer Batterie geht mit Wirkungsgradverlusten einher. Vom Klemmenstrom $I_{Batterie}$ sind Stromanteile durch Nebenreaktionen $I_{Verlust}$ zu subtrahieren. Im ESB sind diese durch das Verhältnis von P_{Laden} zu $P_{Entladen}$ und die Verlustleistung am Innenwiderstand P_{Ri} gekennzeichnet. Der energetische Wirkungsgrad η_{Wh} in % errechnet sich wie folgt:

$$\eta_{Wh} = \frac{\int_0^{t_E} U_E(t) I_E(t) dt}{\int_0^{t_L} U_L(t) I_L(t) dt} \approx \frac{U_E I_E t_E}{U_L I_L t_L} = \frac{\text{entnehmbare Energie}}{\text{zugeführte Energie}} \quad (2-16)$$

Das Lade- und Entladeverhalten von Li-Ion-Batterien wird stark durch die Temperatur (Auswirkung auf die Zusammensetzung des Elektrolyten) und die Höhe des Lade- bzw. Entladestroms, ausgedrückt in der sogenannten C-Rate, beeinflusst. Diese beschreibt das Verhältnis des Lade- bzw. Entladestroms in Bezug auf die Nennladung der Batterie, da bei größeren Batteriekapazitäten höhere Ströme weniger schädigend wirken [188].

2.2.3.2 Batteriealterung

Batteriezellen unterliegen durch ihre Nutzung einem Verschleiß, genannt „Alterung“, der durch chemische und mechanische Veränderungsprozesse hervorgerufen wird [190–192]. Hier ist zu unterscheiden zwischen der kalendarischen Alterung, die betriebsunabhängig über die Zeit durch Lagerung auftritt und stark temperaturabhängig ist, und der zyklischen Alterung, die vorrangig durch die Zyklisierung im Betrieb verursacht wird¹⁶. Für einen Überblick über die Einflussfaktoren der zyklischen Alterung dient Abbildung 2-15.

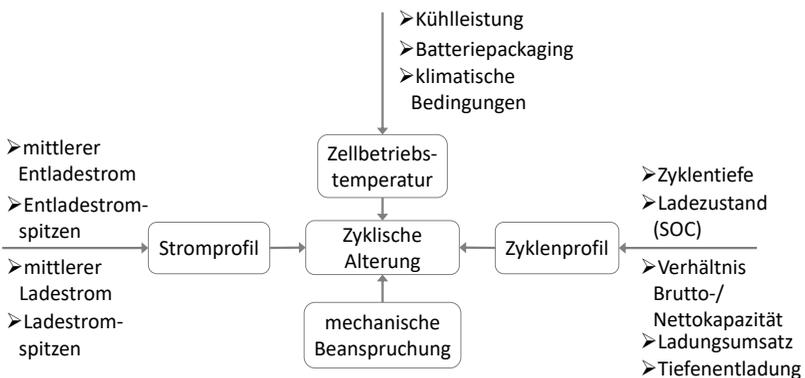


Abbildung 2-15: Einflussfaktoren zyklische Alterung von Batteriezellen

Die Alterung macht sich über den Zeitstrahl in Form einer sinkenden Batteriekapazität bemerkbar. Elektrotechnisch äußert sie sich auch in einer Erhöhung des Innenwiderstands. In der Literatur wird das Lebensende (engl. End of Life, EOL) einer Li-Ion-Batterie mit 80 % der Nennkapazität (x_C) oder mit einer Verdopplung des Innenwiderstands (x_R) angegeben, je nachdem

¹⁶ Unter der Annahme von konstanten Rahmenbedingungen (v. a. Außentemperaturen), die ein Stadtbus im Still- bzw. Parkzustand erfährt, z. B. durch Abstellen in einer Halle oder externes Beheizen der Batterie, kann davon ausgegangen werden, dass sich der Kapazitätsverlust durch die kalendarische Alterung als konstanter Wert behandeln lässt.

welcher Effekt zuerst auftritt [191]. Der sogenannte State of Health (SOH) der Batterie berechnet sich wie folgt aus dem SOH_C der Batteriekapazität und dem SOH_R des Innenwiderstands, in Abhängigkeit zur Nennkapazität Q_N und dem Innenwiderstand R_{i0} des Neuzustands. Q_{NH} und R_{i0H} sind hierbei die aktuellen Zustandsgrößen für Kapazität und Innenwiderstand.

$$SOH = \underbrace{\left(\frac{Q_{NH}}{Q_N(1-x_C)} - \frac{x_C}{1-x_C} \right)}_{SOH_C} \cdot \underbrace{\left(\frac{R_{i0H}}{R_{i0}(1-x_R)} - \frac{x_R}{1-x_R} \right)}_{SOH_R} \quad (2-17)$$

Für eine kostenoptimale E-Fahrzeugauslegung sind, in Bezug auf die Maximierung der Lebens- bzw. Nutzungsdauer einer Batterie, verschiedene Lösungswege üblich: Einerseits wird die Batteriekapazität mit einer Kapazitätsreserve überdimensioniert. Hier wird von der Bruttokapazität als Gesamtkapazität gesprochen und von der Nettokapazität als effektiv für Lade- und Entladevorgänge nutzbare Kapazität. Durch ein Aufweiten des Nettokapazitätsintervalls, bzw. durch Reduktion des Puffers in Abhängigkeit der Alterung, lässt sich die effektive Kapazitätsabnahme zeitlich verzögern [193]. Andererseits ist die Minimierung der Alterungseffekte während der Nutzung der Batterien von besonderer Bedeutung. Hierzu zählt die in Abbildung 2-16 dargestellte Abhängigkeit der Anzahl der mit einer Batterie möglichen äquivalenten Vollzyklen¹⁷ zur Entladetiefe (DOD). Demnach korreliert die gewählte maximale Entladetiefe mit der Dauer, bis die Batterie ihr EOL erreicht [194].

¹⁷ Entspricht dem Ladungsumsatz der zweifachen Nennladung in Ah [190].

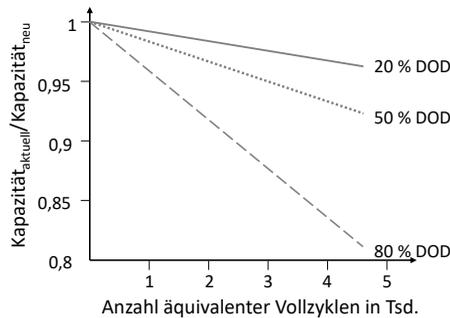


Abbildung 2-16: Vereinfachte Darstellung äquivalenter Vollzyklen über den DOD, i. A. a. [187]

Neben der Beschränkung der Entladetiefen wirkt sich ein optimiertes Thermomanagement positiv auf die Lebensdauer der Batterien aus [27, 187, 190]. Weiterhin erweisen sich in Abhängigkeit der Batteriekapazität hohe Ladeleistungen als alterungsschädlich [27]. Insgesamt gilt es, das Batteriedesign sowie die Zellchemie auf die gewählte Ladestrategie abzustimmen [187]. Zur analytischen Beschreibung sowie zur Voraussage des Alterungsprozesses können einerseits Gleichungen für die Kapazitäts- wie auch Widerstandsalterung verwendet werden [190, 195–197]. Andererseits lässt sich, in Anlehnung an die Materialwissenschaften, über Verfahren zum Zählen der Zyklenzahl und -tiefe [198, 199] bzw. durch Integration des Batteriestrommengendurchsatzes der Zustand der Alterung bestimmen [200, 201].

2.2.4 Netzanbindung, Ladetechnologie und Ladeverhalten

Wie bereits im vorhergehenden Kapitel 2.1.2 aufgezeigt wurde, bestehen für die Elektrifizierung von Buslinien verschiedene Strategien, wann und wo dem Fahrzeug die Ladeenergie zugeführt wird. Dargestellt wurde auch bereits die Position der Energieübertragung im gesamten Energiefluss, siehe Kapitel 2.2.1. In diesem Kapitel soll das technische Wie der Energiezuführung diskutiert werden. Hierfür ist die linke Seite der Abbildung 2-9, im

Zusammenhang mit den in Abbildung 2-17 gezeigten möglichen Ausprägungen des Ladeenergieflusses, zu betrachten.

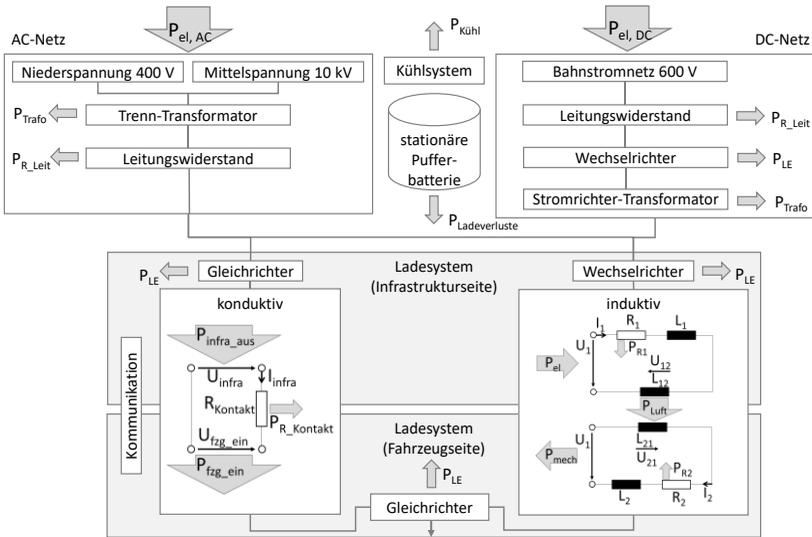


Abbildung 2-17: Anschlussmöglichkeiten an das Energieversorgungsnetz mit Leistungsflüssen¹⁸

Der Wirkungsgrad des gesamten Energieflusses zwischen dem Anschluss an das Energieversorgungsnetz und bis zu den Batterieklemmen $\eta_{\text{vorFzk-Akkw.ges}}$ in % setzt sich demnach, in Abhängigkeit der Wahl von Ladetechnologie und Netzanschluss, aus der Multiplikation mehrerer Wirkungsgrade von Ladesystemkomponenten zusammen, siehe Formel (2-18).

$$\eta_{\text{vorFzk-Akkw.ges}} = \prod_{i=1}^n \eta_{\text{KomponenteLadesystem } i} \quad (2-18)$$

¹⁸ $P_{\text{Trafo}}, P_{\text{Kühl}}, P_{\text{R_Leit}}, P_{\text{Ladeverluste}}, P_{\text{R_Kontakt}}, P_{\text{R}}, P_{\text{LE}}$ in W stehen für die je Komponente auftretenden Verlustleistungen.

Die verschiedenen Ladetechnologien untergliedern sich gemäß den physikalischen Prinzipien der induktiven, respektive der konduktiven Energieübertragung, siehe hierzu auch Abbildung 2-6. Die konduktive Ladeschnittstelle stellt einen mechanischen, elektrisch leitenden Kontakt zwischen infrastrukturseitigem Stromabgeber und dem fahrzeugseitigen Stromabnehmer her. Durch den mechanischen Kontakt ergibt sich unter Berücksichtigung eines Kontaktwiderstandes ein Wirkungsgrad von nahezu 100 %. Ausführungsbeispiele hierfür sind die Systeme von Schunk [202] bzw. Siemens [203] bzw. das klassische Laden über eine Kabelsteckverbindung [121]. Bei der induktiven Energieübertragung erfolgt diese über einen Luftspalt zwischen der sogenannten Primär- und Sekundärseite des Ladesystems, wie zum Beispiel das PRIMOVE-System von Bombardier [10]. Der Luftspalt verursacht sogenannte Streufelder, die einen Wirkungsgrad von etwa 95 % zur Folge haben. Ebenso erfordert diese Ladetechnologie Aufwände für die Kontrolle der elektromagnetischen Felder zur Einhaltung der ICNIRP-Richtlinie [204], welche entsprechende Grenzwerte vorgibt. Die bei beiden Ladetechnologien zum Einsatz kommende infrastruktur- bzw. fahrzeugseitig eingesetzte Leistungselektronik verursacht weitere Wirkungsgradverluste von rund 5 % [8]¹⁹. Eine ausführliche Übersicht über alle gängigen am Markt verfügbaren Ladesysteme liefert [205].

Bei der Auswahl des Ortes für eine Ladestation spielt, im Zusammenhang mit der vorgesehenen Ladeleistung, eine vorausgehende Analyse des örtlichen Energieversorgungsnetzes eine entscheidende Rolle [89]. Sowohl die Spontanität des Ladevorgangs als auch die maximale Ladeleistung (v. a. im Falle des mehrfachen gleichzeitigen Ladens bspw. in einem Busdepot) stellen sich als Engpassfaktoren im lokalen Stromnetz dar [27, 206, 207]. Um eine Überlastung des Energieversorgungsnetzes über die stochastisch verteilten örtlichen Leistungsanforderungen hinaus [208] während der Ladevorgänge zu

¹⁹ Die für die induktive Energieübertragung notwendigen elektromagnetischen Felder bedürfen eines Wechselstroms. Die Steuerbarkeit dieses Ladeverfahrens und die Gleichspannung der Batterie erfordern den Einsatz von stromnetz- und fahrzeugseitiger Leistungselektronik [204].

verhindern, kann eine Pufferbatterie zum Einsatz kommen (vergl. Abbildung 2-17). Weiterhin sind sowohl durch intelligente Stromnetze (Stichwort „Smart Grid“) wie auch durch intelligente Verkehrssysteme Optimierungspotenziale beim Lastmanagement gegeben [209]. Grundsätzlich resultieren aus Netzanschlüssen mit moderaten Lastanforderungen geringere Investitionskosten in die Infrastruktur [209] sowie geringere laufende Netzanschlusskosten [210]. Beim Stromanschluss an das Straßenbahnnetz lassen sich Synergien vorhandener Infrastrukturen nutzen [211]. Abschließend ist noch auf das Batterieladeverfahren einzugehen, da dieses sowohl die Dauer des Ladevorgangs beeinflussen kann als auch im Kontext der Batteriealterung eine wichtige Bedeutung erfährt. Der Standard ist hier das Konstantstrom-Konstantspannungs- bzw. das IU-Ladeverfahren (engl. Constant Current Constant Voltage, CCCV), wie in Abbildung 2-18 dargestellt. Hierbei wird zunächst mit einem konstanten Ladestrom geladen. Mit steigendem SOC nimmt nach Kapitel 2.2.3.1 auch die Batterieklemmenspannung U_K zu. Erreicht diese die sogenannte Ladeschlussspannung, nach welcher sich irreversible Schäden in den Batteriezellen einstellen würden, wird die Ladespannung konstant gehalten, was aufgrund des kleiner werdenden Deltas zwischen Ladespannung und Batteriespannung eine schrittweise Absenkung des Ladestroms zur Folge hat [212].

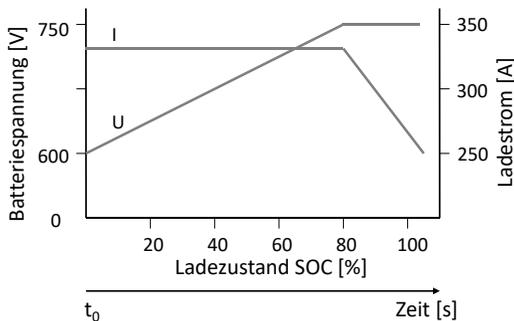


Abbildung 2-18: Vereinfachte Darstellung IU-Ladeverfahren mit exemplarischen Zahlenwerten

Die praktischen Auswirkungen der Charakteristik des IU-Ladeverfahrens, dass sich die Ladegeschwindigkeit ab einem gewissen SOC durch Umschalten von Konstantstrom auf Konstantspannung verlangsamt, macht sich bei fortgeschrittener Batteriealterung stärker bemerkbar. Der Grund hierfür liegt im durch die Alterung verursachten Anstieg des Innenwiderstands, der wiederum einer höheren Ladespannung bedarf.

2.2.5 Nebenverbraucher

Wird die Elektrifizierung des Stadtbusverkehrs konsequent umgesetzt, so hat auch der Betrieb aller Nebenverbraucher batterieelektrisch zu erfolgen. Während dies für herkömmliche automobiler Nebenverbraucher keine spezielle Herausforderung darstellt bzw. bereits dem Standard entspricht, verhält sich dies bei der Klimatisierung bzw. dem Heizen²⁰ des großvolumigen Fahrgastraums eines E-Busses anders. Dies gilt insbesondere dann, wenn den entsprechenden VDV-Vorgaben Folge geleistet wird [213], [214]. Je nach Linienkonfiguration und klimatischen Verhältnissen kann der Energiebedarf für die Klimatisierung den für den Antrieb des Fahrzeugs deutlich übersteigen [215]. Da dementsprechend die Klimatisierung einen prominenten Stellenwert bei der Gesamtauslegung des Fahrzeugs und damit des Gesamtsystems E-Bus einnimmt, soll im Umfang dieses Kapitels vor allem der Fokus auf die grundlegenden Zusammenhänge der Fahrzeugklimatisierung gelegt werden. Alle weiteren Nebenverbraucher werden in Abbildung 2-19 entsprechend ihrer Leistungsklasse und der Dauer ihres Betriebs einsortiert.

²⁰ Im Fortgang der Arbeit wird unter dem Ausdruck „Klimatisierung“ sowohl das Kühlen wie auch das Heizen als Temperierung des Fahrzeuginnenraums zusammengefasst. Für die Gesamtheit der technischen Komponenten zur Erfüllung dieser Aufgabe wird im Folgenden auch die Abkürzung HVAC verwendet (Heating, Ventilation and Air Conditioning).

Es wird deutlich, dass eine Vielzahl von Nebenverbrauchern n mit geringer Leistung P_{Aux} in W nahezu dauerhaft betrieben wird und in Summe eine Grundlast in der Größenordnung von 3 bis 6 kW verursacht²¹.

$$\sum_{i=1}^n P_{Aux} = P_{Aux,Heizung} + P_{Aux,Luftpresser} + \dots + P_{Aux,n} \quad (2-19)$$

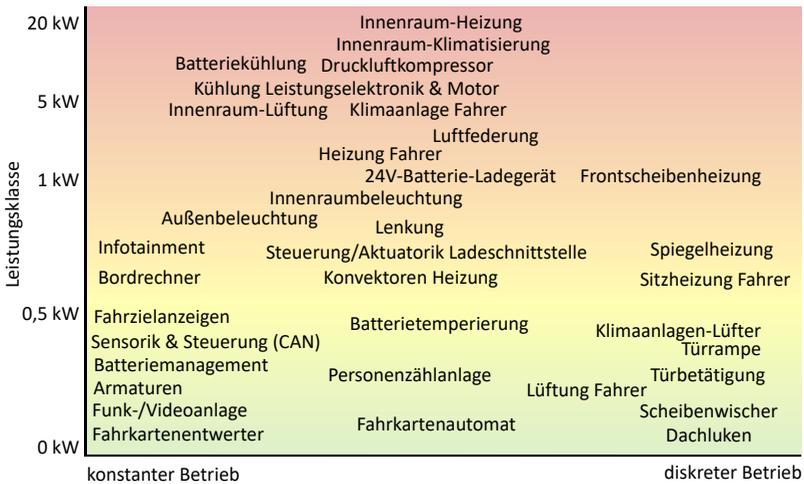


Abbildung 2-19: Nebenverbraucher beim E-Bus und ihre Leistungsklasse

Abbildung 2-20 zeigt das Kühl- und Heizsystem eines E-Busses. Neben dem Fahrgastinnenraum und dem klimatisch getrennt zu behandelnden Fahrerarbeitsplatz gibt es noch weitere Temperierungsbedarfe im Antriebsstrang. Im Vergleich zur vereinfachten Darstellung, gemäß Abbildung 2-20, haben in der Praxis die Batterie²² und die übrigen Komponenten eigene Klimatisierungskreisläufe. Die dazugehörigen thermodynamischen Grundlagen können

²¹ Die Zahlen entstammen Messungen aus dem Projekt PRIMOVE Mannheim, siehe Kap. 3.3.5.2.

²² Ein Temperaturbereich von 20 - 30 °C ist für Li-Ion-Batterien als optimal anzustreben.

bspw. [216] entnommen werden. Mit der Klimatisierung speziell von Fahrzeugen beschäftigt sich [217]. Wesentlich ist der Transformationsprozess von elektrischer Leistung in einen Wärmestrom, der an die Umwelt abgegeben wird.

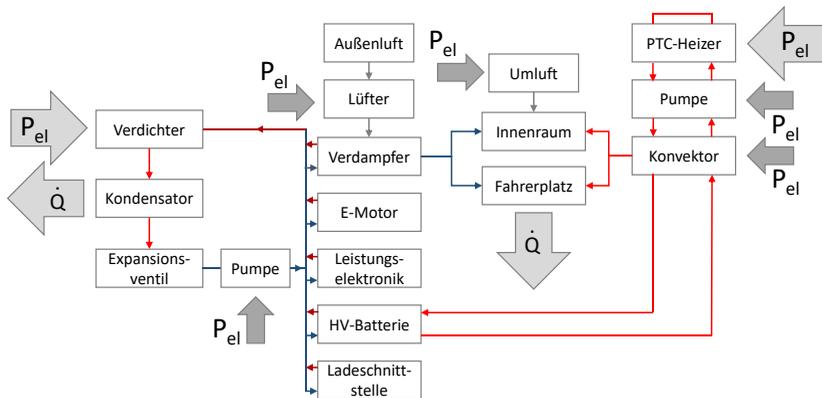


Abbildung 2-20: Übersicht HVAC-System beim E-Bus (rot: warme Seite, blau: kalte Seite)

Für die Leistungsflussanalyse ist das Verhältnis der erzeugten Klimatisierungsleistung zu dem dafür notwendigen elektrischen Leistungsaufwand von Interesse. Dieses Verhältnis wird durch den sogenannten Coefficient of Performance (COP) zum Ausdruck gebracht. \dot{Q} in W ist hierbei der Parameter für den Wärmestrom.

$$COP_{\text{Kühlen}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Kälte}}}{P_{\text{Verdampfer}}} \quad (2-20)$$

$$COP_{\text{Heizen}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Heizung}}}{P_{\text{PTC}}} \quad (2-21)$$

Energieeffizientere HVAC-Systeme sind aktuell in der Entwicklung und werden in Zukunft vermehrt zum Einsatz kommen. Darüber hinaus können

durch eine Optimierung der Betriebsstrategie des HVAC-Systems weitere Effizienzpotenziale gehoben werden. Verschiedene passive und aktive Maßnahmen finden sich in [218]. Hieraus ist bspw. das lastsynchrone Thermomanagement [219] oder die Vorkonditionierung [220] zu nennen.

2.3 System, Modell und Simulation

Da das Experimentieren mit unterschiedlichen Systemkonfigurationen und -einstellungen anhand von Praxisobjekten oder -verfahren in der Regel zu aufwendig ist, behilft man sich durch die Abbildung der wesentlichen physikalischen Zusammenhänge des realen Untersuchungsobjektes in Form mathematischer Gleichungen in einem (virtuellen Software-) Modell. Durch Simulation dieses Modells gelangt man zu Ergebnissen, auf deren Basis vergleichende Analysen und Auslegungsentscheidungen möglich werden [221]. Simulation ist demnach die Durchführung von Experimenten an einem Modell [222]. Die drei hier eingeführten Begrifflichkeiten - System, Modell und Simulation - strukturieren den grundlegenden Aufbau der vorliegenden Arbeit und bedürfen daher einer Definition. Eine Menge von sich gegenseitig durch physikalische Gesetze und Funktionszusammenhänge beeinflussender Elemente (Komponenten) wird als ein System bezeichnet. Auf diese Elemente wirken einerseits äußere Einflüsse (Eingänge), andererseits geben sie auch Wirkungen nach außen (Ausgänge). Je nach Wahl der Eingangsgrößen (Inputs) lässt sich das System beeinflussen und steuern. Den Zusammenhang zwischen den Inputs und den in Änderungen des Systemzustands resultierenden Ausgangsgrößen (Outputs) bezeichnet man als Systemdynamik [223]. Die Abgrenzung eines zu betrachtenden Systems erfolgt durch die Definition von Systemgrenzen. Gemäß VDI-Richtlinie 3633 ist eine Simulation „ein Verfahren zur Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. Im weiteren Sinne wird unter Simulation das Vorbereiten, Durchführen und Auswerten gezielter Experimente mit einem Simulationsmodell verstanden. Mit Hilfe der Simulation

kann das zeitliche Ablaufverhalten komplexer Systeme untersucht werden.“ [224]. Das Modell stellt den Kern des Simulationsverfahrens dar. Es liefert ein abstrahiertes, auf die wesentlichen Eigenschaften und Beziehungen reduziertes Abbild der zu untersuchenden Realität bzw. Problemstellung, in der Regel in Form einer mathematisch-analytischen Beschreibung. In der dieser Arbeit zugrundeliegenden theoretischen Modellbildung werden mathematische Modelle aus physikalischen Gesetzen abgeleitet. Diese werden mit einem oder mehreren, interagierenden und ggf. fachspezifischen Computerprogrammen in Softwaremodelle übersetzt und in der Folge mittels numerischer Algorithmen gelöst. Das Ausführen entsprechender Rechnerprogramme ist daher gleichbedeutend damit, eine Simulation durchzuführen [223]. Das Ablaufschema einer Simulationsstudie fasst Abbildung 2-21 zusammen. Unterschiedliche Klassifikationen und Merkmale von Modellen und Instrumentarien sowie Einsatzgebiete der Simulation finden sich in [225] und [226].

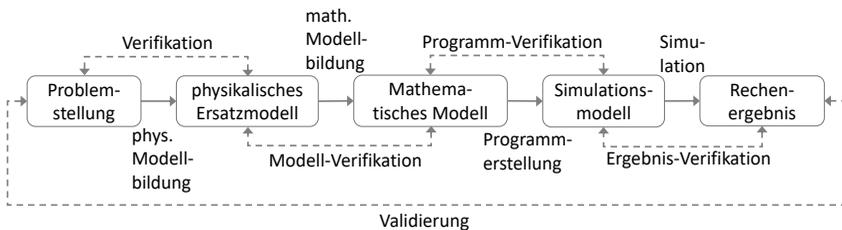


Abbildung 2-21: Ablaufschema Modellbildung und Simulation, i. A. a. [227]

Bei der signalflussbasierten Modellierung müssen physikalische Gleichungen in entsprechende Übertragungsfunktionen überführt und sowohl alle Signalflüsse, -eingänge und -ausgänge vor der Simulation bekannt sein sowie explizit ausformuliert werden. Bei der vorwärtsgerichteten Simulation wird durch eine Gas- bzw. Bremspedalbetätigung ein Antriebs- oder Bremsmoment gemäß einer durch einen Fahrzyklus vorgegebenen Soll-Geschwindigkeit angefordert. Hier ist ein (Fahrer-) Regler von Nöten, der diese Wunschgeschwindigkeit an die sich entsprechend dem Fahrzeugmodell ergebende

Ist-Geschwindigkeit anpasst. Der Signalfluss wirkt also, wie in der Realität, vom Fahrer in Richtung Rad. Bei der Rückwärtssimulation wird Ursache und Wirkung umgedreht. Hier wird gemäß eines Fahrzyklus dem Fahrzeugmodell eine Bewegung vorgegeben, ohne dass ein Fahrerregler Geschwindigkeitsanpassungen vornehmen muss [228].

Abschließend erklärt sich der Unterschied zwischen Verifikation und Validierung dadurch, dass die Verifikation prüft, ob die Algorithmik das gegebene Modell korrekt löst, während im Zuge der Validierung die Frage beantwortet wird, ob das erstellte Modell bzw. dessen Ergebnisse die ursächliche Realität richtig widerspiegelt [229].

2.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Emissionen

Die beschriebene zweite Säule des zu entwickelnden Gesamtmodells bildet eine umfassende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Systems Elektrobus. Wie in Kapitel 1.3 herausgestellt wurde, ist der ÖPNV in der Regel als Zuschussbetrieb aufzufassen. Da die öffentliche Hand strengen Budgetrestriktionen unterliegt, hat das wirtschaftliche Agieren oberste Priorität in Verkehrsunternehmen. Ebenso wird das umweltbewusste Handeln auch als eine tendenziell immer wichtiger werdende Zielgröße aufgefasst, siehe ebenso Kapitel 1.3. Es wurde bereits dargestellt, dass langfristig ökologische Handlungsgrundsätze zu betriebswirtschaftlichen Vorteilen führen werden. Entsprechend werden beide Zielgrößen – Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit (gemessen in Emissionen) – in diesem Kapitel zusammen betrachtet. Hierfür wird in Abschnitt 2.4.1 die betriebswirtschaftliche und in 2.4.2 die volkswirtschaftliche Sichtweise eingenommen. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung eröffnet die Möglichkeit, die in Abbildung 2-2 aufgeführten äußeren Einflussfaktoren auf den Busbetrieb quantitativ zu fassen und in der Auslegungsmethodik insgesamt mit zu berücksichtigen. Die aktuelle Kostenstruktur des Busbetriebs wird anhand von Abbildung 2-22 dargestellt. Es wird

deutlich, dass die Kosten rund zur Hälfte durch die Aufwendungen für das Fahrpersonal geprägt werden. An dieser Stelle sei ergänzt, dass sich die Verhältnismäßigkeiten durch das zukünftige (teil-)autonome Fahren deutlich zu Lasten der Fahrzeugbetriebskosten verschieben können, was wiederum als Argument für eine kostensensible Systemauslegung gewertet werden muss.

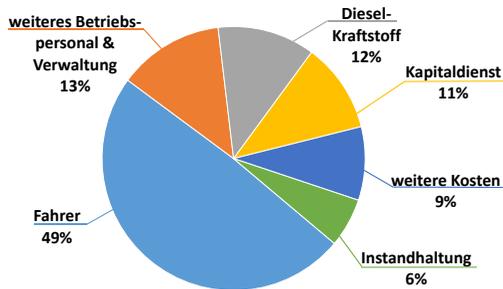


Abbildung 2-22: Kostenstruktur im Busbetrieb, i. A. a. [230]

2.4.1 Total Cost of Ownership (TCO)

Für unternehmerisch nachhaltige Investitionsentscheidungen und -vergleiche empfiehlt sich nicht nur die Betrachtung der Anschaffungskosten einer Investition, sondern die möglichst realitätsnahe Berücksichtigung aller Kostenpositionen über den gesamten Produktlebenszyklus. Dies gilt insbesondere für langlebige Güter, bei denen nach der Anschaffung anfallende Folgekosten einen Großteil der über den gesamten Produktlebenszyklus entstehenden Kosten verursachen. Wie aus Abbildung 2-22 deutlich wird, trifft dies für den Busbetrieb zu. Das methodische Konzept zur Erfassung dieser Lebenszykluskosten liefert das Konzept der Total Cost of Ownership (TCO), zu Deutsch Lebenszykluskosten. Diese nehmen die Kundenperspektive ein und schlüsseln daher, im Vergleich zum Konzept des Life Cycle Costing (LCC), Entwicklungskosten nicht separat auf [231–233]. Die TCO²³ für einen

²³ Im Weiteren wird ausschließlich das TCO-Lebenszykluskostenkonzept betrachtet.

Linienbus aus Betreibersicht sind, unter Berücksichtigung der Vorgehensweise zur Erstellung eines Lebenszykluskostenmodells nach [234] und unter Berücksichtigung der Richtlinien des Verbands Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) [49, 235], in nachfolgender Abbildung 2-23 aufgeführt.

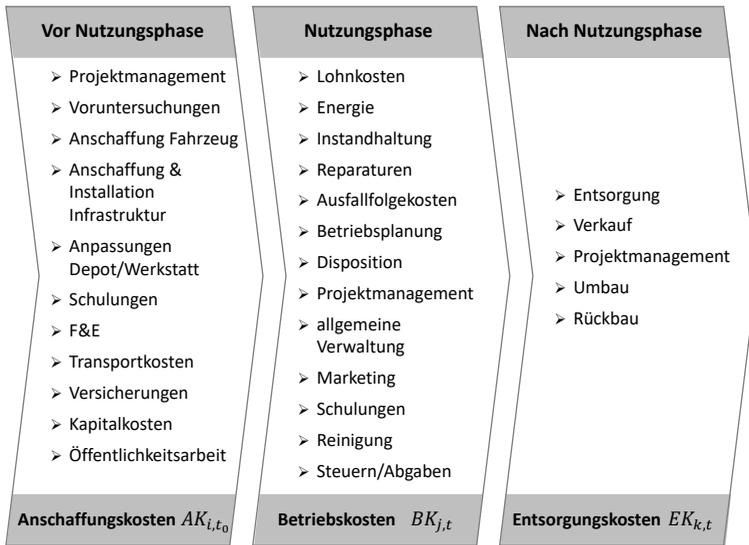


Abbildung 2-23: Lebenszykluskosten für einen Linienbus, i. A. a. [234]

Abgeleitet aus Abbildung 2-23 lassen sich die TCO zum Zeitpunkt t_0 für einen Linienbus nach folgender Formel, in Abhängigkeit des jeweiligen Beschaffungszeitpunktes t , berechnen:

$$TCO_{t_0} = \sum_{i=1}^i AK_{i,t_0} + \sum_{j=1}^j BK_{j,t} + \sum_{k=1}^k EK_{k,t} \quad (2-22)$$

Bei mehrperiodischen, langfristigen Zeiträumen und unterschiedlichen Beschaffungszeitpunkten ist eine Dynamik der Betrachtungsgrößen zu berücksichtigen. Im Falle des E-Busses ist gemäß Kapitel 1.3 im besonderen

Maße zu beachten, dass sich die Batterietechnologie in einer fortlaufenden technologischen Weiterentwicklung befindet. Weiterhin unterliegen sämtliche Märkte Preisschwankungen, in Abhängigkeit von Angebot und Nachfrage sowie im Zusammenhang mit Effizienzsteigerungen. Ausgehend von einem Käufermarkt [236] gilt es daher, die Nachfrageentwicklung und die Effizienzsteigerungen zu untersuchen, um zukünftige Kosten prognostizieren zu können. Zur Beschreibung der Effizienzsteigerung dient die Theorie des Erfahrungskurvenmodells. Es besagt, dass durch Lerneffekte, Skaleneffekte und durch Technologiedegression ein Zusammenhang zwischen Stückkosten und der kumulierten Produktionsmenge besteht. Weiterhin eignet sich seine Anwendung besonders für Produkte, welche sich in der Einführungs- und Wachstumsphase ihres Produktlebenszyklus wiederfinden [236]. Die mathematische Beschreibung der sich aus den genannten Einflussfaktoren ergebenden Erfahrungskurve lautet nach Henderson wie folgt [237]:

$$K(X_t) = K(X_0) \cdot \left(\frac{X_t}{X_0}\right)^{-E} \quad (2-23)$$

K bezeichnet den Produktpreis, in Abhängigkeit der kumulierten Produktionsmenge X im Jahr t bzw. zur kumulierten Produktionsmenge zu Beginn des Betrachtungszeitraums X_0 . E entspricht dem Degressionsfaktor der Erfahrungskurve. Dieser geht wiederum in die Kostendegressionsrate PR (Progress Ratio) ein, welche die relative Kostenänderung durch jede Verdopplung der kumulierten Produktionsmenge beschreibt:

$$PR = 2^{-E} \quad (2-24)$$

Demnach reduzieren sich mit jeder Verdopplung der kumulierten Produktionsmengen die Kosten auf das 2^{-E} -fache des ursprünglichen Kostenniveaus, was auch durch die Lernrate LR zum Ausdruck gebracht werden kann:

$$LR = 1 - PR = 1 - 2^{-E} \quad (2-25)$$

Der Wert der Kostendegressionsrate PR bzw. der Lernrate LR variiert stark in Abhängigkeit der betrachteten Technologie oder Branche. Bei seiner Wahl kann bspw. auf einen Referenzwert, mithilfe empirischer Daten nach [238], zurückgegriffen werden. Für Produkte, deren Lebenszyklus sich in einer fortgeschrittenen, technologisch ausgereiften Phase befindet und bei welchen keine exponentiellen Kostenreduktionen mehr zu erwarten sind, wird das lineare Konzept einer jährlich konstant bleibenden Kostenänderungs- bzw. Lernrate angesetzt [239].

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass zukünftige Investitionskosten bei der TCO-Berechnung bereits zum Betrachtungszeitpunkt der Investitionsentscheidung erfasst und entsprechend bewertet werden müssen. Das für die hierdurch verursachten zukünftigen Zahlungsströme aufzubringende Geld muss bereits zum Zeitpunkt der TCO-Erstellung mitberücksichtigt und bewertet werden. Zur Bewertung dieser zukünftigen Finanzbedarfe ist das Kapitalwertverfahren Standard. Hierbei werden alle zukünftigen Zahlungsströme auf den Betrachtungszeitpunkt, unter Zuhilfenahme eines Opportunitätszinssatzes, abgezinst. Die Idee dahinter ist, dass das zum Zeitpunkt $t + x$ mit $x > 1$ benötigte Kapital, zum Beispiel zur bilanziellen Berücksichtigung von jährlich anfallenden Abschreibungsbeträgen oder von Instandhaltungskosten, bis zum tatsächlichen Zahlungsvorgang zum genannten Opportunitätszinssatz einer alternativen Anlageform investiert und dadurch gemehrt werden kann [240]. Dies kommt durch die Formel (2-26) zum Ausdruck, in welcher der Kapitalwert KW_{t_0} über die Parameter I_0 als Investitionsausgabe zum Zeitpunkt t_0 , n als Anzahl der Jahre des Betrachtungszeitraums, i als Opportunitätszinssatz und Z als abzuzinsender Zahlungsstrom bestimmt wird.

$$KW_{t_0} = -I_0 + \sum_{t=1}^{t=n} \frac{Z_t}{(1+i)^t} \quad (2-26)$$

2.4.2 Emissionen und externe Kosten

Aus volks- sowie betriebswirtschaftlicher, sozial und ökologisch nachhaltiger Sicht müssen bei einer umfassenden Kostenberechnung und Investitionsentscheidung auch externe Kosten ihre Berücksichtigung finden. Ist Stand heute die Bepreisung externer Kosten in der Praxis noch vornehmlich als theoretischer Ansatz anzusehen, so wird dieser Aspekt, wie in Kapitel 1.3 beschrieben, in Zukunft Bestandteil von Ausschreibungsanforderungen. Ein Indiz hierfür liefert bspw. die EU-Richtlinie 2009/33/EG266 [53]. Hier wird gefordert, dass die bei der Beschaffung von Straßenfahrzeugen durch Unternehmen des öffentlichen Personenverkehrs anfallende Energie und die Umweltauswirkungen aus dem Betrieb bereits bei der Beschaffungsentscheidung berücksichtigt werden. Bezogen auf Elektrobusse wurde mit den gleichen Intentionen bereits eine sogenannte „True Value“-Studie von KPMG, zusammen mit der Volvo Group, erstellt [241]. Bevor externe Kosten für ein System monetarisiert werden können, müssen zuerst dessen Emissionen erfasst und ermittelt werden.

2.4.2.1 Emissionen

Für ein strukturiertes Erfassen aller im Busbetrieb auftretenden Emissionen eignet sich die Methodik des Life Cycle Assessments (LCA), siehe Abbildung 2-24. Im Sinne der umfassenden Lebenszyklusbetrachtung gilt es auch beim Thema der Emissionen, den kompletten Lebenszyklus zu analysieren, wodurch zudem die Vergleichbarkeit zu anderen Antriebskonzepten erhöht wird. Im Falle des E-Busses treten zwar lokal keine Treibhausgase auf, allerdings trifft dies bei globaler Sichtweise nicht zu. Diese rühren einerseits aus der Produktion und dem Recycling von Fahrzeug, technischen Betriebsmitteln und Infrastruktur; andererseits werden globale Emissionen durch eine Stromproduktion auf Basis fossiler Rohstoffe verursacht. Zur Veranschaulichung der Tragweite des negativen Einflusses von Umwelt-emissionen dient Abbildung A-9 im Anhang.

Die vielfältigen negativen Auswirkungen der Umweltemissionen sind der Auslöser der bereits beschriebenen politischen Motivation zur Förderung der E-Mobilität. Weiterhin bilden sie die Berechnungsgrundlage für die Bepreisung. Die Quantifizierung der Emissionen erfolgt über deren Massenangabe im Verhältnis zur zurückgelegten Strecke oder zur eingesetzten Masse, zum Beispiel im Falle der Produktionsressourcen.

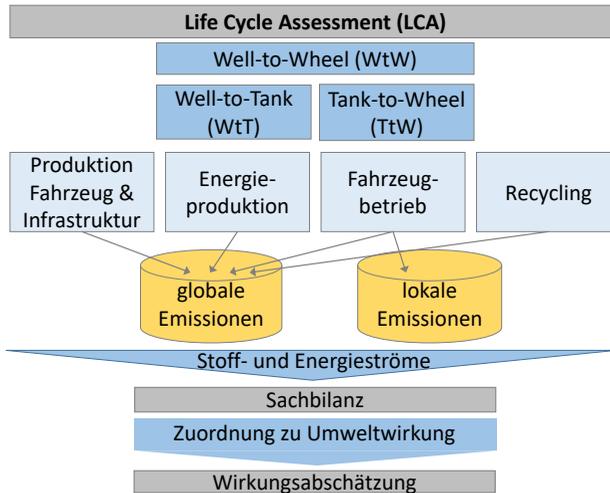


Abbildung 2-24: Methodik des Life Cycle Assessments (LCA)

2.4.2.2 Externe Kosten

Brenck definiert „Externe Effekte“ als negative Auswirkungen des Handelns eines Wirtschaftssubjekts auf die Wohlfahrt eines anderen Wirtschaftssubjekts, ohne dass diese Auswirkungen durch einen Markt- und Preismechanismus erfasst, bewertet und durch den Verursacher getragen werden [242]. Werden externe Effekte monetär bewertet, so spricht man von externen Kosten [243]. Im Verkehrssektor werden die durch Umweltemissionen,

gemäß Abbildung A-9, entstehenden Folgen nicht vollumfänglich und verursachungsgerecht den Verkehrsteilnehmern in Rechnung gestellt²⁴. Der im vorhergehenden Kapitel eingeführte klassische, betriebswirtschaftliche TCO-Ansatz wird daher als unvollständig betrachtet und soll um umwelt- sowie sozio-ökonomische Effekte erweitert werden. Sowohl die Internalisierung (Zurechnung auf den Verursacher) als auch die Monetarisierung der externen Effekte gestalten sich als schwierig und sind mit Informationsverlusten verbunden, da eine direkte Zurechenbarkeit zwischen Verursacher und Umwelteffekten oftmals nicht gegeben ist [244]. Methodische Lösungsansätze für beide Problemstellungen finden sich bei [245] oder [246]. Im Rahmen der Grundlagen soll anhand der Formel (2-27) die monetäre Bewertung von Klimafolgeschäden durch das Treibhausgas CO₂ betrachtet werden²⁵.

$$K_{ExtCO_2} = m_{CO_2} \cdot p_{CO_2} \quad (2-27)$$

K_{ExtCO_2} sind hierbei die externen Kosten des emittierten Treibhausgases, m_{CO_2} in t die ermittelte Emissionsmasse und p_{CO_2} in €/t dessen Emissionskosten. Die Bepreisung der Emissionskosten erfolgt anhand von Tabellen zu entnehmender Kosten je Gewichtseinheit. Auch wenn die Bandbreite der CO₂-Emissionskosten je Tonne in Abhängigkeit des Bewertungsverfahrens zwischen 25 bis 500 €/t CO₂ variiert [247], so wird nachfolgend mit den Werten gemäß der Methodenkonvention des Umweltbundesamtes [246] gerechnet, siehe Kapitel 4.2.2. Bei der Emissionsgruppe der Luftschadstoffe ist zu berücksichtigen, dass diese vor allem lokal zu schwerwiegenden gesundheitlichen und wirtschaftlichen Konsequenzen führen, die besonders im urbanen Umfeld ihre negativen Auswirkungen entfalten [248]. Die Bepreisung

²⁴ Externe Kosten entstehen im Verkehrsbereich auch durch Staus, Unfälle oder gesamtwirtschaftliche Effekte (Wachstums- und Beschäftigungswirkung, Steuern, Abgaben). Da diese von der Antriebsart eines Busses unabhängig bzw. zu allgemeiner Natur sind oder sich deren Entwicklungen schwer längerfristig prognostizieren lassen, werden sie hier nicht berücksichtigt.

²⁵ Gemäß Anhang werden CO₂, CH₄ und NO_x zu den Treibhausgasen gezählt. Hierbei ist CH₄ 21-mal und NO_x 310-mal klimaschädlicher als CO₂ [239].

externer Kosten findet im Rahmen dieser Arbeit weiterhin für die Ressourcenverknappung und die Lärmemission Anwendung, siehe hierzu A.8 im Anhang.

2.5 Optimierung: Operations Research und Standortplanung

Die in Kapitel 5 und 6 durchzuführende techno-ökonomische Optimierung eines E-Bus-Gesamtsystems fußt methodisch auf der Wissenschaft des Operations Research (OR) und deren Teilgebiet der Standortplanung. OR verbindet die Wirtschaftswissenschaften mit der Angewandten Mathematik und der Informatik mit dem Ziel, quantitative Modelle und Methoden zur Unterstützung von optimalen Entscheidungen zu generieren. Hierbei wird durch mathematische Optimierung die optimale Lösung aus einer Menge von zulässigen möglichen Lösungen ermittelt [249]. Insgesamt haben alle mathematischen Verfahren der Optimierung darum „mit minimalem Aufwand neue Suchschritte in Richtung der minimalen oder maximalen Lösung eines vorgegebenen analytischen Ziels mit Nebenbedingungen [zu] ermitteln“ [222] und so möglichst effizient das globale Optimum zu finden. Bei der simulationsgestützten Optimierung sind geschlossene analytische Lösungen nicht möglich, da rechnergestützte Optimierungsverfahren verbesserte Zielwerte in der Regel nur näherungsweise ermitteln [222]. Die Grundform eines mathematischen Modells mit ausschließlich linearer Zielfunktion und linearen Restriktionen nennt man lineares Optimierungsproblem/-programm (engl: linear program, LP) [249].

| | | |
|------------------------------|--|--------|
| Zielfunktion | $\min z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$ | (2-28) |
| Nebenbedingungen | $a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1$ | |
| | \vdots | |
| | $a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m$ | |
| Nichtnegativitätsbedingungen | $x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0$ | |
| | $x_n, c_n, a_{mn}, b_m \in \mathbb{R}, b \geq 0$ | |

Die Variable x ist hier die sogenannte eine Entscheidungsvariable, deren Werte im Zuge der Optimierung bestimmt werden. Sie kann reelle Werte annehmen. Der Lösungsraum (LP) wird durch die Neben- und Nichtnegativitätsbedingungen eindeutig festgelegt. Er bildet einen abgeschlossenen, konvexen Polyeder. Abbildung 2-25 stellt die graphische Lösung für ein zweidimensionales LP dar. Durch ein schrittweises Verschieben der Zielfunktion in die Ecken des LP-Lösungsbereichs wird das Optimum gefunden. Zur exakten und optimalen Lösung von LPs existieren effiziente Algorithmen, vor allem sind hier die Simplex-Methoden verbreitet, vgl. [250].

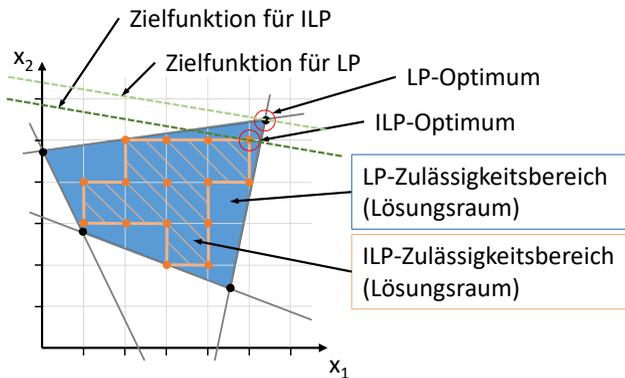


Abbildung 2-25: Lösungsraum zweidimensionales lineares Optimierungsproblem

Eine Abwandlung des LP stellt das ganzzahlige lineare Optimierungsproblem (engl. integer linear program, ILP) dar. Das ILP ist ebenfalls in Abbildung 2-25 eingezeichnet. Hierbei dürfen alle Entscheidungsvariablen nur ganzzahlige Wertausprägungen annehmen. In Formel (2-29) ändert sich die Mengendefinition folgendermaßen:

$$x_n \in \mathbb{N}, \quad c_n, a_{mn}, b_m \in \mathbb{R}, b \geq 0 \quad (2-29)$$

Eine Kreuzung des LP mit dem ILP bildet das gemischt-ganzzahlige lineare Optimierungsproblem (engl. mixed integer linear program, MILP). Hier darf ein Teil der Entscheidungsvariablen nur ganzzahlige Wertausprägungen annehmen. ILPs und MILPs gehören zu der Klasse der NP-schweren Probleme²⁶. Lösungsverfahren für diese Problemklasse basieren auf Branch & Bound- (B&B) oder auf Branch & Cut-Algorithmen (B&C). Diese unterteilen die Lösungsmenge des Optimierungsproblems in Teilmengen, in Form einer Baumstruktur (Branch). Durch Relaxierungstechniken²⁷ werden diese Teilmengen auf die Optimallösung hin untersucht. Die Lösung der relaxierten Teilprobleme ergibt sogenannte untere Schranken (Bound) für den ILP-Zielfunktionswert. Ist der optimale Zielfunktionswert größer als die ermittelte Schranke, so wird die betrachtete Teilmenge in weitere Teilmengen aufgespalten. Hingegen wird die Teilmenge, bei der die LP-Relaxierung einen höheren Wert liefert als der Zielfunktionswert, nicht weiter untersucht, da sie die Optimallösung nicht enthalten kann. Das B&C-Verfahren ist eine Erweiterung des B&B. Hier wird mit dem sogenannten Schnittebenenverfahren (Cut) versucht, zusätzliche Nebenbedingungen hinzuzufügen und so den Lösungsraum der LP-Relaxierung zu verkleinern, was wiederum den Lösungsraum des ILP besser approximiert. Für genauere Ausführungen zu den B&B- sowie B&C-Verfahren siehe [251, 252].

Die Standortplanung als Teilgebiet des OR beschäftigt sich mit der Findung eines optimalen Standortes für ein Objekt, was eine klassische Frage der Logistikplanung darstellt. Bei der Standortplanung in Netzwerken ist der Suchraum für Standorte dadurch eingeschränkt, dass diese nur in den Knoten eines (Straßen-) Netzwerkes, d. h. an fest vorbestimmten Standorten zugelassen sind. Man spricht hier von einer diskreten Modellierung [253]. Die

²⁶ Bei NP-schweren Problemen kann gemäß der Komplexitätstheorie, welche sich mit dem Rechenaufwand von Algorithmen beschäftigt, die am schwierigsten zu lösende Instanz des Problems nicht mit polynomialen Aufwand gelöst werden [251].

²⁷ Eine Relaxation ist ein leichter zu lösendes Ersatzproblem. Im Falle der ILP wird hierbei die Ganzzahligkeitsanforderung zuerst vernachlässigt. Aus $x_n \in \{0,1\}$ wird so im Falle von Binärvariablen $0 \leq x_n \leq 1$.

Kanten des Netzwerks (z. B. Straßen) und dessen Knoten sind mit Kenngrößen hinterlegt. Zudem wird die Suche nach einem Standort durch verschiedene, das Entscheidungsfeld limitierende Nebenbedingungen eingeschränkt. Als optimal ist ein Standort in der Regel dann zu bezeichnen, wenn seine Wahl die Gesamtkosten minimiert und maximalen Nutzen stiftet. Praxisbeispiele für die Anwendung der Standortplanung sind beispielsweise die Lokalisierung von Lagerhallen, Briefkästen, Notfalleinrichtungen, Kindergärten [253] oder Depots [252]. Auch das Liniennetz des ÖPNV in einer Stadt kann als gerichtetes Netzwerk aus durch Geo-Koordinatensysteme bestimmten Knoten (Haltestellen, Depot, sonstige Haltepunkte) und diese verbindenden Kanten (Straßen- bzw. Routenverläufe) aufgefasst werden [253, 254]. Die Suche nach optimalen Orten für den Bau von Ladestationen in diesem Buslinien-Netzwerk ähnelt der Optimierungsaufgabe des kapazitiven Warehouse Location Problem (cWLP). Das cWLP ist ein MILP. Es wählt aus einer Menge gegebener Standorte die Lokalisierung eines in seiner Kapazität beschränkten Lagerhauses aus, das die Kundenbedürfnisse am besten und vollständig versorgt. Hierbei ist es das Ziel, die fixen Lagerhaltungskosten und die Transportkosten vom Lager zum Kunden zu minimieren [251].

3 Technologisches Modell

Aufbauend auf den in Kapitel 2.2 eingeführten technischen und den in Kapitel 2.3 dargestellten methodischen Grundlagen, wird in diesem Kapitel die Modellierung der technologischen Säule des Gesamtsystems gemäß Abbildung 1-3 vorgestellt. Weiterhin werden anhand von Simulationen die Möglichkeiten der Ergebnisgenerierung des technischen Modells aufgezeigt und dieses abschließend validiert. Die Outputdaten der Simulation des technologischen Modells dienen der sich in Kapitel 5 und 6 anschließenden Gesamtsystemoptimierung als wesentliche Inputgrößen.

3.1 Strukturierung E-Bus-Gesamtsystem und Softwareeinsatz

Das aus den Teilsystemen Fahrzeug, Infrastruktur und Betrieb bestehende Gesamtsystem E-Bus bedarf, mit dem Ziel einer optimalen und zudem mehrperiodischen Auslegung, einer möglichst realitätsnahen Modellierung. Bei der angestrebten Betrachtung des Gesamtlebenszyklus haben Ungenauigkeiten oder zu große Vereinfachungen bei der Realitätsabbildung einen entsprechend weitreichenden Effekt auf die Optimierung und damit auf das zu ermittelnde Endergebnis. Aus diesem Grund wird sich dafür entschieden, bei der Modellierung der Systembestandteile möglichst viele Parameter zu berücksichtigen. Dies hat zudem den Vorteil, dass sich das Verhalten und der Einfluss einzelner Komponenten im bzw. auf das Gesamtsystem bei Bedarf auch detaillierter analysieren lassen. Gemäß dem modularen Modellansatz und im Sinne eines optimierbaren Energiemanagements lassen sich so an diversen Modellbestandteilen (Parameter-) Variationen vornehmen. Die Strukturierung der Herangehensweise an die Modellierung des Gesamtsystems lässt sich aus Abbildung 3-1 entnehmen. Hierbei werden unter der Überschrift des jeweiligen Teilsystems die benötigten Parametersets betitelt und in den Ebenen darunter gemeinsam mit ihren Abhängigkeiten feiner

granuliert aufgelistet. Die unterste Ebene eines jeden Teilsystems stellt dessen zentralen Modellierungsoutput dar.

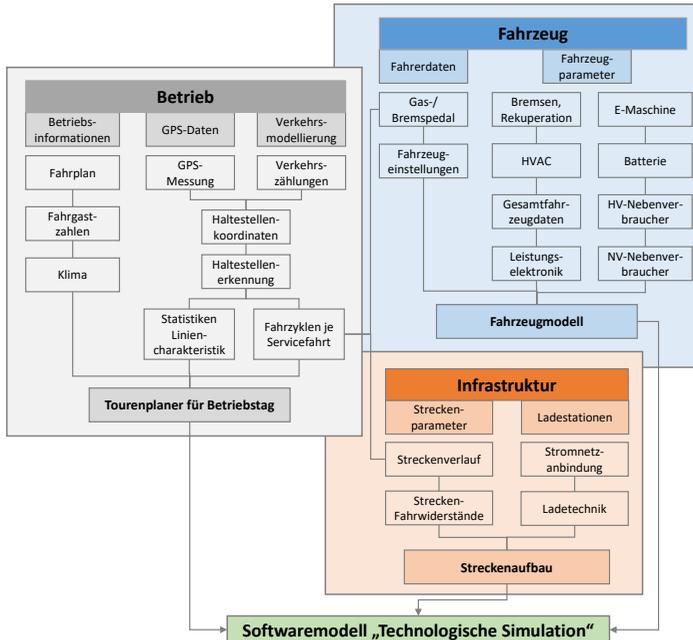


Abbildung 3-1: Modellierungsstruktur und Inputdatensets des technologischen Gesamtsystems

Gemäß Abbildung 2-21 aus Kapitel 2.3 ist es im Rahmen der Modellbildung die Aufgabe, die reale Problemstellung durch physikalische bzw. mathematische Modellierung in ein Softwaremodell zu überführen. Bei der Programmwahl zur Erstellung der erforderlichen Softwaremodelle wurde, mit dem Ziel einer hohen Effizienz, auf weit verbreitete und gut dokumentierte Softwarelösungen gesetzt. Entsprechend den Anforderungen eines jeden abzubildenden Teilsystems wurde jeweils eine spezialisierte Software ausgewählt. Abbildung 3-2 gibt hierüber einen Überblick.

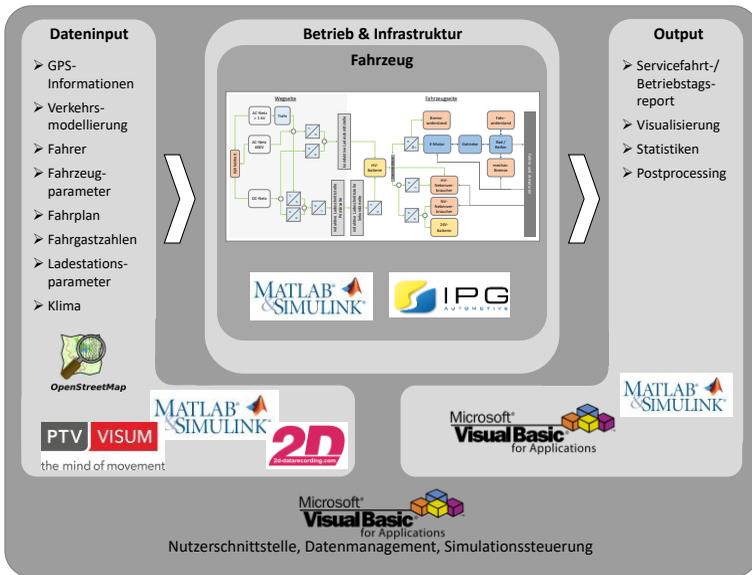


Abbildung 3-2: Überblick Softwaretools zur Modellierung des technologischen Gesamtsystems

Zur vereinfachten und fehlervermeidenden Handhabung der Vielzahl von benötigten Daten sowie der unterschiedlichen interagierenden Softwareprogramme wird eine Benutzeroberfläche (engl. Graphic User Interface, GUI) als oberste Ebene der Softwareumwelt entwickelt. Diese hat zum Ziel, Daten über fest vorgegebene Masken einheitlich erfassen zu können und das Pre-processing der Inputdaten, deren weiteres Management, die Simulationdurchführung sowie das Postprocessing, Analysieren und Speichern des Simulationsoutputs im Hintergrund automatisiert vorzunehmen. Die GUI führt den Nutzer auch durch die Gesamtstruktur des Modells, da sie ihm nacheinander alle notwendigen Schritte vorgibt, von der Datenerfassung, über den Simulationsstart, bis zur Outputdatenanalyse.

3.2 Modellbildung der Teilsysteme Betrieb und Infrastruktur

Gemäß Abbildung 3-2 wird deutlich, dass sich das Fahrzeugmodell, als zentrales Betrachtungsobjekt im Rahmen der Darstellung des technologischen Gesamtmodells, in einer Umwelt aus Betriebs- und Infrastrukturmodell bewegt. Da diese beiden Umweltmodelle stark voneinander abhängen, werden sie in diesem Teilkapitel gemeinsam behandelt. Wie bereits aus den Grundlagenkapiteln zum Busbetrieb (2.1) und zur Energienetzanbindung und Ladetechnik (2.2.4) deutlich wurde, ist die den Stadtbuss umgebende Umwelt komplex und vielschichtig. Die Dimensionen dieser Vielschichtigkeit werden durch Abbildung 3-3 aufgezeigt.

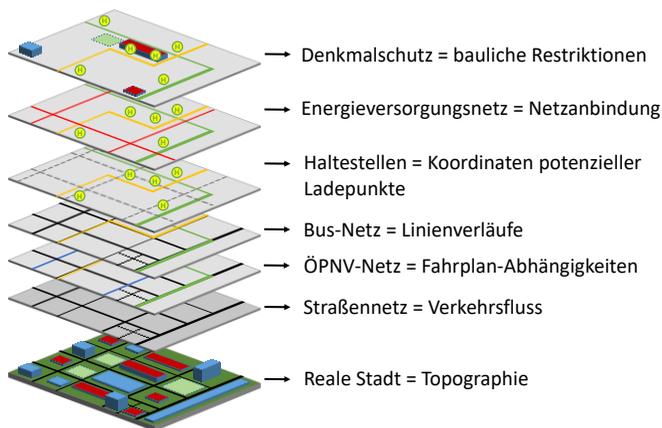


Abbildung 3-3: Dimensionen bei der Umweltabbildung der Realität im E-Bus-System

Im Vergleich zum Individualverkehr muss sich der Stadtbuss, in der Realität wie im Modell, bei seinen Fahrten im Stadtgebiet viel stärker an die ihm vorgegebenen Rahmenbedingungen anpassen. Dies ergibt sich in erster Linie durch die Fahrplanvorgaben und den fest vorgegebenen Streckenverlauf gemäß dem Busliniennetz. Hieran muss sich auch die Auslegung der Elektrifizierung

einer Buslinie orientieren. Zum einen gibt es Rahmenbedingungen, die als ortsfest kategorisiert werden können. Hierzu zählen: Straßenverläufe und deren Topographie²⁸, Linienverläufe des ÖPNV, Haltestellenorte und -formen, Energieversorgungsnetze (DC-Straßenbahn-Stromnetz, AC-Nieder- und Mittelspannungsnetz, Telekommunikations-, Wasser- und Gasleitungen) sowie Gebäude, die unter Denkmalschutz stehen, oder anderweitige aus stadtbildperspektivischer Sicht schützenswerte Anlagen. Zum anderen lassen sich folgende Rahmenbedingungen als dynamisch bzw. zeitabhängig clustern: Fahrgastanzahl, Verkehrsaufkommen, Klima sowie Tageslicht. Die ortsfesten sowie die dynamischen Bedingungen gelten entweder für den Haltestellenbereich oder für die Linienteilabschnitte zwischen den einzelnen Haltestellen bzw. für die im Rahmen des Umlaufplans anzufahrenden Orte.

In unterschiedlicher Abhängigkeit all dieser Einflussfaktoren ergibt sich der Fahrzyklus des Busses als Geschwindigkeit in km/h über der Zeit in s. Je nach gewähltem Betrachtungshorizont gilt ein Fahrzyklus für einzelne Servicefahrten (SF) oder durch Hintereinanderreichung aller Servicefahrten und ggf. weiteren Fahrten für den gesamten Betriebstag. Die zu jeder Sekunde des Fahrzyklus gefahrene Geschwindigkeit ergibt sich vorrangig gemäß Fahrplangangaben, Fahrgastaufkommen und äußerem Verkehrseinfluss bzw. vorgegebenen Höchstgeschwindigkeiten. Hierzu zählen auch die Stillstandzeiten während des täglichen Betriebs an Haltestellen, Ampeln, im Stopp-and-Go-Verkehr oder bei Pausen. Mit Blick auf die Simulation gehören zu jeder Sekunde zusätzlich die Informationen über die aktuelle Position des Fahrzeugs (Haltestelle oder auf der Zwischenstrecke), die Außentemperatur, die Sonneneinstrahlung, die Lichtverhältnisse sowie die Anzahl der Fahrgäste im Fahrzeug. Der Fahrzyklus dient also dazu, die vorgenannten dynamischen Daten zu integrieren und bildet gemäß Abbildung 3-1 das alle Teilsysteme

²⁸ In dieser Arbeit wird die Topographie vernachlässigt und bei der Streckenmodellierung von einer perfekten Ebene ausgegangen. Dies liegt zum einen darin begründet, dass gemäß Kapitel 2.1.3.1 das in der Rheinebene liegende Mannheim als nahezu eben bezeichnet werden kann. Andererseits ist die Ermittlung exakter Höhendaten aufwändig. Da sich GPS-Daten als hierfür zu ungenau darstellen, muss auf digitale Geländemodelle zurückgegriffen werden [255].

verbindende Inputdatenset. In Verbindung mit haltestellenbezogenen, ortsfesten Daten ist der Fahrzyklus der grundlegende Dateninput, um den Busbetrieb zu simulieren. Hierzu ist es im ersten Schritt von Nöten, den Fahrzyklus einer Buslinie zu ermitteln und entsprechend aufzubereiten. Dies ist Thema der folgenden beiden Teilkapitel.

3.2.1 GPS-Datenerfassung, Auswertung und Statistik

Wie in Kapitel 2.1 verdeutlicht, ist der Busbetrieb von Stadt zu Stadt und von Linie zu Linie sehr unterschiedlich ausgeprägt. Mit dem Ziel der Simulation eines E-Bus-Systems für dessen optimale Auslegung ist es daher von besonderer Bedeutung, diesen individuellen Rahmenbedingungen umfassend gerecht zu werden. Da die Rekuperationsquote von Elektrostadtbussen, wie in Kapitel 3.4.1 beschrieben, sich in einer Größenordnung von 30 Prozent bewegt und neben dem Energiebedarf über die Ladezyklenanzahl das Alterungsverhalten der Batterie beeinflusst, ist die genaue Abbildung des täglichen Geschwindigkeitsverlaufs von besonderer Bedeutung. Dies gilt vor allem im Hinblick auf den im Rahmen dieser Arbeit betrachteten langfristigen Auslegungsansatz. Eine genaue Geschwindigkeits- und Fahrverhaltensanalyse eines Stadtbusses gibt zudem in einer hohen Auflösung Aufschluss über vielfältige Charakteristika des täglichen Busbetriebs. Zur Beantwortung der Frage, ob sich Haltestellen für die Ausrüstung als Ladehaltestellen eignen und wenn ja, in welcher technischen Konfiguration, ist die statistische Ermittlung von Haltezeiten und Haltewahrscheinlichkeiten von grundlegender Wichtigkeit. Neben der Fahrgeschwindigkeit lassen sich aus der Ermittlung der Positionsdaten eines Busses empirische Erkenntnisse gewinnen über den genauen Fahrweg des Busses zwischen den Haltestellen, auf Leerfahrten, mögliche Umwegfahrten, über den Tagesverlauf alternierende Fahrwege, die Abhängigkeiten vom Verkehrsfluss sowie die Genauigkeit der zeitlichen Einhaltung der Fahrplanvorgaben. Durch das Messen von GPS-Daten, zum Beispiel mit einer auf dem Bus installierten Antenne samt Aufzeichnungsgeräten, lassen sich die benötigten Positionsdaten in Form von geographischen Koordinaten in Verbindung mit einem Zeitstempel mitschreiben. Die

im Rahmen dieser Arbeit hierzu eingesetzte Mess-Hardware und -Software der Firma 2D dient zur Aufnahme und zum ersten Aufbereiten der GPS-Rohdaten [256]. Mithilfe von Kartendiensten wie OpenStreetMap [257] oder durch von Verkehrsunternehmen zur Verfügung gestellte Open Data-Datensätze [258], zum Beispiel im General Transit Feed Specification (GTFS)-Format [259], lassen sich die Koordinaten von Haltestellen feststellen. Die eigens entwickelte Haltestellenerkennungs-Algorithmik legt einen definierten Radius um die jeweiligen Haltestellen-Koordinaten und vergleicht, ob die Positionskoordinaten des Busses einer gemessenen Vorbeifahrt diesen Radius durchkreuzen, siehe Abbildung 3-4. Ist dies der Fall, wird ermittelt, ob der Bus an der Haltestelle zum Stehen kam und wie lange er stand. Nach dem gleichen Vorgehen können beispielsweise auch Ampelstand- oder Pausenzeiten festgestellt werden.

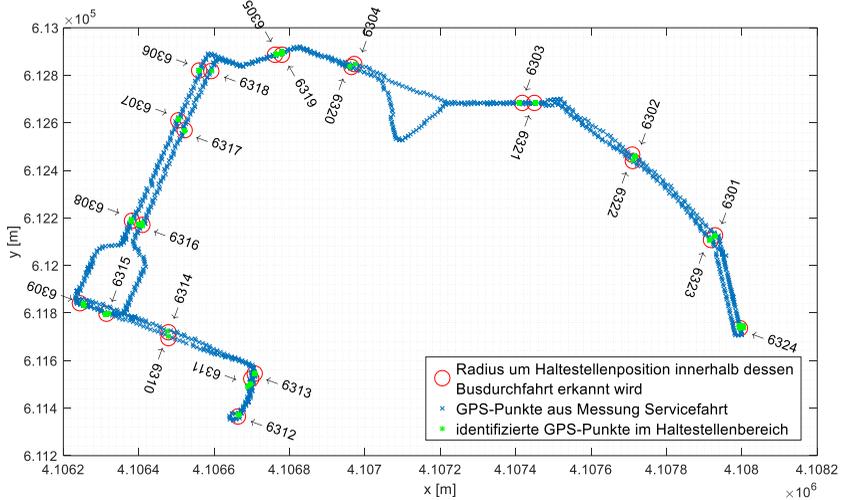


Abbildung 3-4: Darstellung des Vorgangs der Haltestellenerkennung aus GPS-Daten

Durch statistische Analysen lassen sich in der Folge die Charakteristika einer Servicefahrt automatisiert bestimmen. Über den Vergleich aller Servicefahrten eines Betriebstages sowie mehrerer Betriebstage liefert die entwickelte Software eine wichtige Datengrundlage für sämtliche folgende Auslegungsentscheidungen. Den Umfang der Software und die Herausforderungen bei der Programmierung der Haltestellenerkennung sowie Fahrzyklenauswertung zeigt Abbildung 3-5.



Abbildung 3-5: Programmablauf GPS-Haltestellenerkennung

Tabelle 3-1 listet die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen und untersuchten GPS-Datensätze zu den Mannheimer Linie 53, 60 und 63 auf und nennt wesentliche Kennwerte. Exemplarisch für die mit dem beschriebenen Werkzeug zur Haltestellenerkennung generierbaren statistischen Aussagen, dokumentiert Abbildung 3-6 die Verteilung der Haltedauern und Haltewahrscheinlichkeiten auf dem Verlauf der Linie 63. Es wird deutlich, dass vor allem an der End- bzw. an der Wendehaltestelle des Linienverlaufs aufgrund von in den Fahrplan eingeplanten Pufferzeiten die längsten Haltedauern zustande kommen. Die Box-Plot-Darstellungsform in Abbildung 3-7 verdeutlicht dies nochmals. Sie zeigt darüber hinaus auch auf, dass die Mediane der Haltedauern an den Unterwegshaltestellen im Intervall von sechs bis 35 Sekunden liegen. Weiterhin stellt Abbildung 3-8 den Fahrzyklus einer Servicefahrt als wesentliche Inputgröße der Simulation dar. Die auf der Servicefahrt erreichten Zeiten an den Haltestellen, an welchen der Bus zum Stehen kam, sind jeweils markiert.

Tabelle 3-1: Charakteristische Daten zu den betrachteten Buslinien in dieser Arbeit

| Linien-Nr. | 53 | 60 | 63 |
|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------|---|
| Länge [km] | 35 | 21 | 9,5 |
| Rang Länge Mannheim ²⁹ | 23. | 17. | 6. |
| Anzahl Haltestellen | 72 | 46 | 25 |
| Ø Haltestellenabstand [m] | 463 | 466 | 412 |
| Ø Anzahl eingesetzter Busse | 5 | 4 | 2 |
| Verknüpfung zu anderen Linien | 54, 55, 56, 58, 62 | 53, 61, 62, 63, 64 | 60, 64 |
| Messtage Daten | 16., 17., 23.-25., 27.02.2015 | 16.-20.02.2015 | 04., 05.06.2015, 28.01., 04., 07.03.2016 |
| Dauer Servicefahrt [Min] | 100 - 120 | 80 | 40 |
| Anzahl Servicefahrten/Bus/Tag | 8 | 10 | 19 |
| Ø-Geschwindigkeit [km/h] | 21 | 16 | 12 |
| Ø Anzahl Zwischenstopps/km | 2,0 | 3,2 | 4,1 |
| tägl. Stillstandszeit [%] | 32 | 41 | 49 |

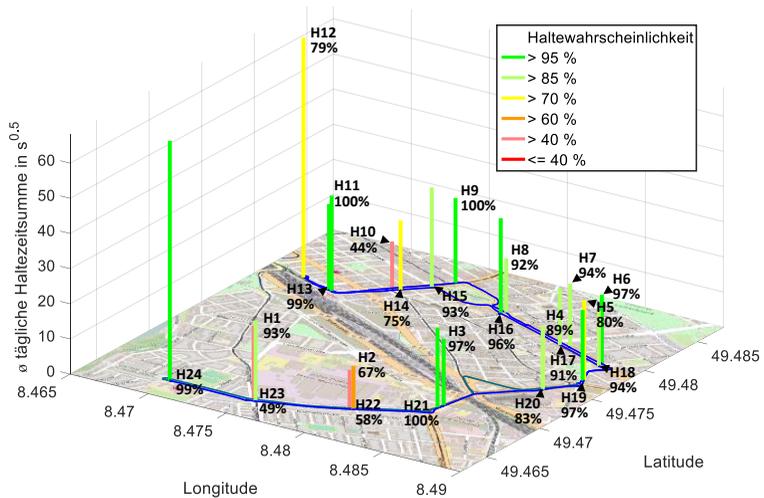


Abbildung 3-6: Linienverlauf, Haltezeiten, Haltewahrscheinlichkeiten der Linie 63 auf Basis der Messtage aus Tabelle 3-1 (ohne den 28.01.2016)

²⁹ In Mannheim gibt es 24 Buslinien. Die kürzeste ist 1,5 km (3 Haltestellen), die längste 44 km (39 Haltestellen) und die durchschnittliche einfache Linienlänge beträgt 8,7 km (17 Haltestellen, 602 m Haltestellenabstand, Bedienung mit 1,6 Bussen). Siehe hierzu auch Anhang A.3.

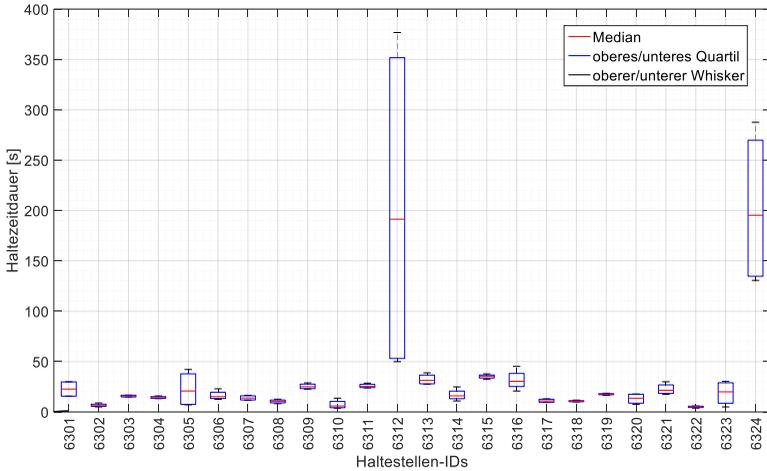


Abbildung 3-7: Box-Plot-Darstellung der Haltezeiten an vier Messtagen auf der Linie 63³⁰

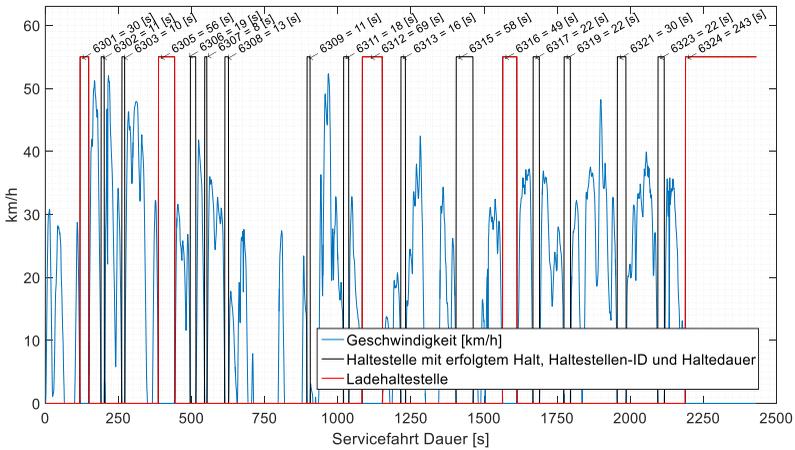


Abbildung 3-8: Fahrzyklus einer L63-Servicefahrt mit Haltestellenbereichen und Haltezeiten

³⁰ Die Nummern 63xx (Haltestellen-IDs) in den Abbildung 3-7 und 3-8 kodieren die Haltestellen der Reihenfolge nach: 6301 = Markuskirche (Hbf), 6312 = Hbf Schleife, 6324 = Pfalzplatz.

Anhand von Videoaufnahmen des Verkehrsgeschehens aus der Frontscheibe des Busses, welche während der Durchführung der hier gezeigten GPS-Messungen aufgezeichnet wurden, lassen sich die vorgestellten Ergebnisse der Auswertelgorithmen validieren [256].

Zum Abschluss sei noch darauf hingewiesen, dass, anstelle aufwendiger Datengewinnung und Analyse realer Fahrzyklen, auch die Möglichkeit besteht, die Fahrspiele einer Buslinie anhand der standardisierten SORT-Zyklen zu generieren (siehe Kap. 2.1.1). Hierzu muss die zu analysierende Buslinie in einem ersten Schritt auf die Durchschnittsgeschwindigkeiten einzelner Streckenabschnitte hin untersucht werden, um entsprechend die Zusammensetzung des SORT-Zyklus zu gewichten [260]. Gruhler hat in seiner Arbeit für die Linie 63 die Unterschiede der Simulationsergebnisse untersucht, auf Basis einer Fahrzykluserstellung aus GPS-Messdaten, im Vergleich zur Erstellung aus generischen, gewichteten SORT-Fahrspielen [261]. Es lässt sich zeigen, dass in beiden Fällen, mit Abweichungen von rund sechs Prozent, ein annähernd identischer Energiebedarf errechnet wird. Die regelmäßigen starken Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge der SORT-Zyklen beeinflussen über die Zyklentiefe, neben der Rekuperationsleistung, auch die Vorausberechnung der Batterielevensdauer im betrachteten Fall um bis zu elf Prozent Abweichung. Insgesamt ist zu berücksichtigen, dass anhand des SORT grundsätzlich keine Abbildung von Höhenmetern im Fahrprofil möglich ist. Da sich die durch die Vereinfachungen bei der Nutzung generischer Fahrprofile ergebenden Abweichungen, trotz ihres geringen Umfangs, bei Lebensdauerbetrachtungen, vor allem bezogen auf eine Fahrzeugflotte, negativ auf die Genauigkeit der TCO-Ermittlung auswirken würden, werden nachfolgende Simulationen nur auf Basis von Realdaten durchgeführt.

3.2.2 Verkehrssimulation

Die im vorhergehenden Teilkapitel beschriebene Durchführung von GPS-Messungen auf Buslinien, zur Ermittlung von Kennwerten im Hinblick auf deren Auslegung als E-Buslinien, setzt existierende Linienverläufe voraus. Für

Linien mit einem zukünftig veränderten Verlauf bzw. für noch nicht bestehende, aber beispielsweise bereits projektierte Linien besteht keine Möglichkeit, mithilfe von GPS-Messungen empirische Erkenntnisse zu gewinnen. Um auch in derartigen Fällen die Systemauslegung für die Elektrifizierung realitätsnah und zukunftsgerichtet planen zu können, kommt die Verkehrssimulation zum Einsatz. Mit Hilfe der Standardsoftware PTV Vissim als mikroskopischem Simulationsprogramm, lässt sich das Verhalten der einzelnen Verkehrsteilnehmer vorausberechnen [262]. Diese nutzt als zentralen Inputdatensatz vorhandene Verkehrszählungen an Kreuzungen, die den in einen jeweiligen Straßenabschnitt ein- und ausfließenden Verkehr repräsentieren. In das entsprechend einem zukünftigen Buslinienverlauf modellierte Verkehrsnetz werden, auf Grundlage der durch die Verkehrszählungen ermittelten Verkehrsstärken, stochastisch verteilt Verkehrsobjekte eingesetzt. Das Verhalten der individuellen Verkehrsteilnehmer wird, entsprechend dem Fahrzeugfolgmodell nach Wiedemann, realitätsnah simuliert [263]. Dabei versucht jedes Fahrzeug eine Wunschgeschwindigkeit zu erreichen, die in der Regel der Höchstgeschwindigkeit des Streckenabschnitts entspricht. Auch das mit der Vissim-Software in diesen virtuellen Verkehrsfluss implementierte Busmodell reagiert auf den ihn umgebenden Verkehr, die Straßenverläufe, Kreuzungen und Lichtsignalanlagen. Weiterhin werden für den Busverkehr Haltestellen berücksichtigt. Die an ihnen entstehende Haltezeit ergibt sich, stochastisch verteilt, in Abhängigkeit einer für verschiedene Zeiträume vorgegebenen Fahrgastbelastung. Der aus diesen modellierten Rahmenbedingungen resultierende Fahrzyklus wird mitgeschrieben und steht, gemeinsam mit den der Verkehrssimulation vorgegebenen Haltestellendaten, für die anschließende Fahrzeugsimulation zur Verfügung. Abbildung 3-9 stellt exemplarisch den Ausschnitt einer in Vissim modellierten Kreuzungssituation für eine Umleitung bzw. Umplanung des Linienverlaufs der Linie 63 dar [264]. Hierbei wird von einer Sperrung der Mühldorfer Straße ausgegangen, mit Entfall der gleichnamigen Haltestellen. Erkennbar ist die über die zugrundeliegende Karte modellierte Straßeninfrastruktur mit Lichtsignalanlagen (rot/grün) an den Kreuzungen sowie den einzelnen farbig markierten Verkehrsobjekten.



Abbildung 3-9: Ausschnitt der Verkehrsmodellierung mit PTV Vissim [264]

3.2.3 GUI zur Inputdatenerfassung und Datenmanagement

Wie beschrieben, wird wegen der Vielschichtigkeit und Menge der Inputdaten sowie zur nutzerfreundlichen, fehlervermeidenden und automatisierbaren Simulationsdurchführung, die Daten- und Befehlseingabe über eine GUI zur Verfügung gestellt. Da sich für die Speicherung der In- und der Outputdaten das Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel als Standardsoftware anbietet, wird die damit einhergehende Skriptsprache Visual Basic for Applications (VBA) zur Steuerung der Abläufe der zugrundeliegenden Excel-Tabellendaten eingesetzt. Der Aufbau der GUI orientiert sich in seiner programmtechnischen Struktur an der Systematik nach Abbildung 3-1. Für die initiale Anlage eines Datensatzes einer zu untersuchenden Buslinie legt der Nutzer mithilfe von Formularen die benötigten einheitlichen Datentabellen an und speichert sie ab. Im Anhang A.4 finden sich beispielhaft die Formulare zur Anlage der geographischen Haltestelleninformationen. Nachdem die in Kapitel 3.2.1 vorgestellte Haltestellenerkennung mithilfe der GUI

durchgeführt wurde und im Ergebnis Fahrzyklen einzelner Linienumläufe sowie die dazugehörigen Betriebs- und Infrastrukturinformationen in Excel-Tabellen vorliegen, lässt sich mit der GUI im Anschluss das Betriebstags-Datenset aufbauen. Hierzu dient die Maske Umlaufplaner, die in Abbildung 3-10 gezeigt und im Anschluss erläutert wird.

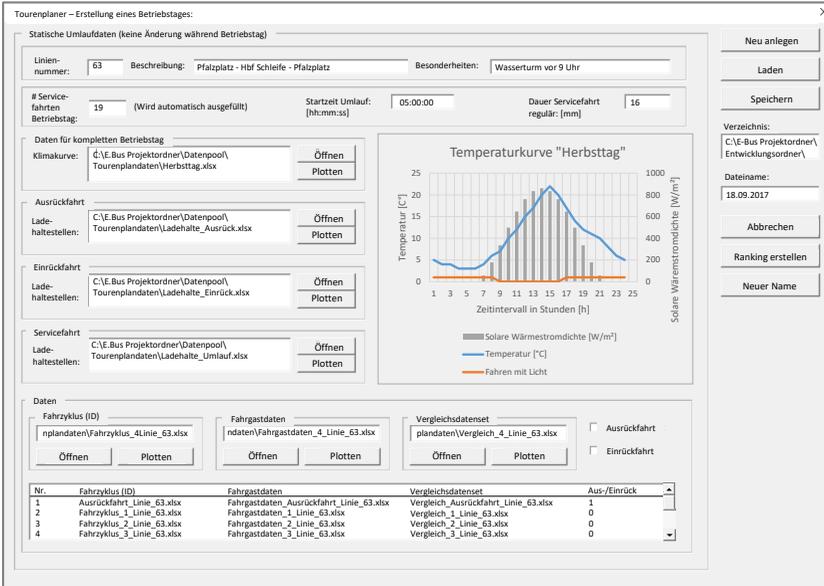


Abbildung 3-10: Umlaufplaner-GUI zur Betriebstagsplanung mit Beispieldaten der Linie 63

Der sogenannte Umlaufplaner fasst alle betrieblichen und infrastrukturellen Daten für einen Buslauf und einen Betriebstag zusammen. Im oberen Bereich werden dafür die den ganzen Tag über geltenden Rahmenbedingungen bzgl. Klimaverlauf, ortsfeste Daten zu allen angefahrenen Haltestellen sowie im Hinblick auf spätere Kostenbetrachtungen die je Haltestelle zu erwartenden Umbaukosten für einen etwaigen Ladehaltestellenumbau in Form von Pfaden zu bereits zuvor angelegten Tabellen hinterlegt. Im unteren Bereich folgt dann für die Ausrück- und Einrückfahrt sowie je Servicefahrt die individuelle

Fahrzyklusvorgabe. Diese repräsentiert den Fahrverlauf und damit einhergehend die Zeitachse des Betriebstags. Für die Servicefahrten werden jeweils noch die dazugehörigen Fahrgastzahlen verknüpft. Weiterhin besteht die Möglichkeit, für Validierungsuntersuchungen Messdaten aus Vergleichsdatensets hinzuzuladen. Nach der Auswahl der verschiedenen Datensets durch den Nutzer, werden diese mit VBA in einen Datensatz zusammengeführt, der als Vorlage abgespeichert wird und als Input für anschließende Simulationen dient. Hierbei werden unter anderem auch die zu jeder Servicefahrt gehörigen Temperaturen und Zeitdauern automatisch ermittelt und ausgegeben. Ein Vorteil dieser modularen Herangehensweise über die GUI liegt in der Möglichkeit, einen für einen Betriebstag vorhandenen Datensatz durch zum Beispiel den Austausch nur einzelner Inputdaten zu variieren. Hierdurch können in den täglichen Fahrtenplan eines Busses alternative Routenverläufe mit aufgenommen werden, wodurch sich Fahrten auf zusätzlichen Linien, Umwegfahrten oder über den Betriebstag alternierende Fahrplangabgaben abbilden lassen. Durch das Anlegen einer Bibliothek mit unterschiedlichen Inputdatensätzen mithilfe des Einsatzes der Masken zur Dateieneingabe, kann der Nutzer übersichtlich und schnell veränderte Parameter für einen Simulationslauf laden.

3.3 Modellbildung des Teilsystems Fahrzeug

Das Teilkapitel erläutert zuerst die für die Fahrzeugsimulation verwendete Softwareumgebung und geht im Anschluss detailliert auf die Modellbildung der wesentlichen technischen Komponenten des E-Bus-Systems ein.

3.3.1 Vorstellung Fahrzeugsimulationssoftware

Die grundsätzlich identische modulare Logik des im vorhergehenden Kapitel vorgestellten GUI-Einsatzes liegt auch bei dem Aufbau der Parametersets für das Fahrzeugmodell zugrunde. Hier werden über Eingabeformulare, wie in

Abbildung A-3 zeigt, den einzelnen Fahrzeugkomponenten (Batterie, Ladetechnik, E-Motor, Bremsen/Rekuperationssteuerung, Nebenverbraucher, HVAC) jeweils Parameter zugeordnet und abgespeichert. So lassen sich wieder einfach verschieden parametrisierte Fahrzeugbestandteile erstellen und in eine Bibliothek ablegen. Entsprechend eines Baukastensystems kann, basierend auf den einzelnen Komponenten-Datensätzen, der Parametersatz für das Gesamtfahrzeug zusammengefügt werden. Hierzu dient die Maske „Fahrzeug-Baukasten“ aus Abbildung A-4 im Anhang³¹. Startet der Nutzer den Simulationslauf, so werden in einem vorausgehenden Schritt alle in Excel vorliegenden Fahrzeugparameter dem in Matlab/Simulink implementierten Fahrzeugmodell übergeben, das im Folgenden eingehend beschrieben wird. Außerdem werden auch der Software IPG TruckMaker (Version 4.5) sowohl ausgewählte Fahrzeugparameter wie auch die zum virtuellen Streckenaufbau benötigten Daten durch das Datenmanagementsystem der GUI übergeben. IPG TruckMaker ist ein Programm für den virtuellen Fahrversuch für Nutzfahrzeuge [265]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden das durch die Software bereitgestellte Fahrermodell, ausgewählte Bestandteile des mechanischen Teils des Antriebsstrangs (Fahrwerkdyamik, Trägheiten, Lenkung, mechanisches Bremssystem, Fahrzeuggewicht in Abhängigkeit der Anzahl der Fahrgäste, Fahrzeugmaße, Reifen) und der virtuelle Streckenaufbau genutzt, siehe Abbildung 3-2. Der Streckenaufbau erfolgt in allen Dimensionen durch Übergabe der Geo-Koordinaten des Streckenverlaufs. Zu ihm gehört auch die Parametrisierung der Umweltbedingungen wie Außentemperatur, Windgeschwindigkeit oder des Haftreibungskoeffizienten μ des Straßenbelags. TruckMaker errechnet aus allen aufgezählten Einflussfaktoren und den Daten des Reifenmodells den auf den Bus wirkenden Fahrwiderstand. Wesentliche Parameter des Beispielfahrzeugs Hess Swiss Primove liefert, in Ergänzung zu den in Tabelle 2-4 genannten Werten, der Anhang A.5. Die hinterlegten Massenträgheiten und Fahrwerkseinstellungen wurden, aufgrund fehlender

³¹ Da bei Parametervariationen für E-Bus-Systeme vorrangig die Daten der Batterie und der Ladetechnik verändert werden, findet die Hinzufügung dieser Datensets über eine gesonderte Maske im Kontext der Simulationssteuerung statt.

Herstellerangaben, größenordnungsmäßig durch Ahlert bestimmt [173] oder aus einem im TruckMaker hinterlegten Linienbusmodell übernommen. Das integrierte TruckMaker-Fahrermodell liest den ihm übergebenen, gemäß Kapitel 3.2 erstellten Fahrzyklus als Soll-Geschwindigkeit aus und regelt die Fahrzeug-Ist-Geschwindigkeit über Betätigung von Gas- und Bremspedal, wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben. Einerseits ist die Schnittstelle zwischen dem in Simulink aufgebauten Teil des Antriebsstrangs und TruckMaker eben diese Pedalbetätigung. Sie ruft entsprechend ihrer Stellung 0 bis 100 Prozent des maximalen Motormoments ab. Auf der anderen Seite gibt das Simulink-Modell an TruckMaker das auf die Radnabe wirkende Antriebs- und Bremsmoment zurück. Dieses übersetzt TruckMaker, in Abhängigkeit von Schlupf und Fahrwiderständen, in die Fahrzeug-Ist-Geschwindigkeit. Weiterhin wird das von Haltestelle zu Haltestelle variierende Fahrzeuggewicht, in Abhängigkeit der Anzahl an Fahrgästen (siehe Abbildung 3-10 „Fahrgastdaten“), an TruckMaker übergeben und bei jedem Haltestellenhalt angepasst. Abbildung 3-11 stellt die genannten Datenflüsse grafisch dar. Die TruckMaker-Funktion Movie visualisiert das Fahrzeug, dessen Umgebung und das Fahrgeschehen während der Simulation realitätsnah dreidimensional (Abbildung 3-12). Hiermit können aus dem Bus heraus aufgenommene Videoaufnahmen des realen Fahrgeschehens der simulierten Fahrt direkt gegenübergestellt werden [256]. Dies erhöht die Nachvollziehbarkeit der Simulation. Für die, gemäß der Zielsetzung der Arbeit, weniger auslegungskritischen E-Bus-Komponenten wird durch die Verwendung von TruckMaker ein vorhandenes und nur noch zu parametrisierendes Softwaremodell genutzt. Alle Bestandteile des elektrischen Antriebsstrangs, denen eine große Bedeutung bei der Systemauslegung zukommt, werden hingegen von Grund auf eigenständig mit Matlab/Simulink modelliert. Die nachfolgenden Kapitel stellen diese Modellierung genauer vor. Es wird sich dabei auf das in Kapitel 2.1.3.2 eingeführte Beispielfahrzeug Hess Swiss Primove bezogen.

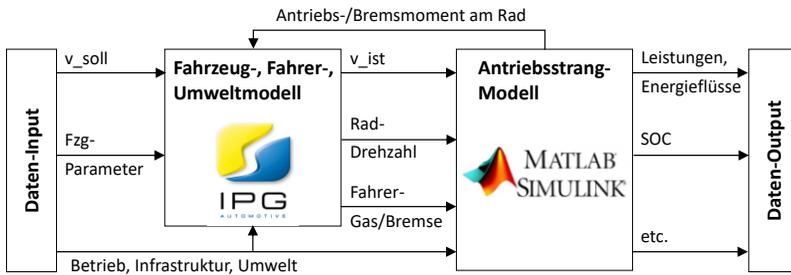


Abbildung 3-11: Signalflüsse zwischen TruckMaker und Matlab/Simulink



Abbildung 3-12: IPG Movie zur Visualisierung der Fahrzeugsimulation

3.3.2 E-Maschine, Getriebe, Bremsstrategie, Rekuperation

Der Hess Swiss Primove Bus ist mit der Heckantriebsachse ZF AVE 130 ausgerüstet [266]. Diese integriert zwei radnahe E-Motoren, deren Drehmoment über ein zweistufiges Getriebe auf die jeweiligen Radnaben wirkt. Hierbei ist die erste, vom E-Motor in Richtung Rad gesehene Antriebsstufe ein

Stirnradgetriebe ($i = 3,9$) und die zweite Stufe ein Planetengetriebe ($i = 5,8$). Entsprechend ergibt sich eine Gesamtübersetzung von $i = 22,66$. Der Zusammenhang zwischen Raddrehzahl und Antriebsmoment, unter Einhaltung der durch Maximal- und Dauerleistung vorgegebenen Grenzen, wird kennfeldbasiert modelliert. Gleiches gilt für den Wirkungsgrad des E-Antriebs, der neben der E-Maschine auch das Getriebe und die Leistungselektronik umfasst³². Da für das Beispielfahrzeug keine Informationen zur Programmierung der Rekuperationssteuerung vorliegen, müssen bei deren Modellierung verschiedene Annahmen getroffen werden. Hierzu zählt einerseits die Vorgabe einer maximalen Bremsverzögerung, von welcher das durch die Bremspedalbetätigung gewünschte Bremsmoment abhängt. Basierend auf einem Gerichtsurteil, liegt die den Fahrgästen maximal zumutbare Verzögerung in einem Stadtbus bei $3,5 \text{ m/s}^2$ [267]. Weiterhin sind unterschiedliche Grenzverzögerungsmomente für Vorder- (VA) und Hinterachse (HA) zu berücksichtigen. Diese leiten sich aus dem Ziel eines stabilen Bremsvorgangs ab, der wiederum durch den Kraftschlussbeiwert μ entsprechend den Straßenverhältnissen und durch die Achslast beeinflusst wird. Die Aufteilung des Bremsmoments zwischen generatorischem bzw. elektrischem und mechanischem Anteil erfolgt durch einen Steuerungsalgorithmus, der die Einhaltung elektrischer Belastungsgrenzwerte überwacht und dabei möglichst energieeffizient handelt. Das Flussdiagramm aus Abbildung 3-13 visualisiert den in Matlab implementierten Programmcode zur Steuerung der Energieflüsse beim Bremsen. Um einen Überblick über das gesamte, in Matlab/Simulink implementierte Antriebsstrangsmodell zu erhalten, insbesondere über die Datenein- und ausgänge, zeigt Abbildung 7-5 im Anhang das entsprechende Simulink-Blockschaltbild.

³² Die hinterlegten Kennfelder sind beispielhaft PRIMOVE-Projekt-internen Daten zu der ZF AVE 130-Antriebsachse entnommen [10].

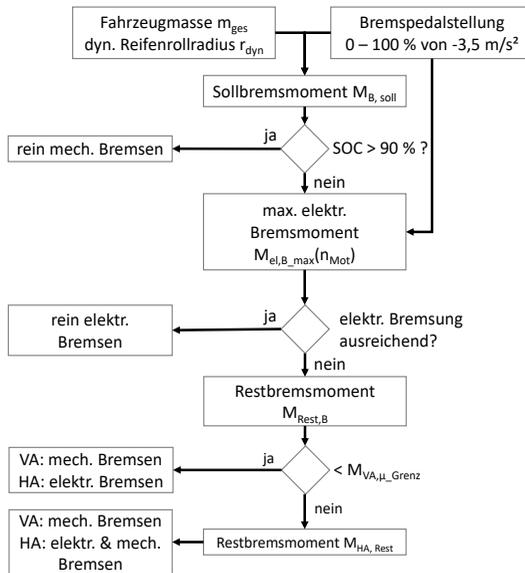


Abbildung 3-13: Bremsstrategie für rekuperatives Bremsen (VA = Vorder-/HA = Hinterachse)

3.3.3 Batteriemodell und Batteriealterung

Sowohl zur Modellierung von Batterien [268] wie auch zur Aufnahme und Bewertung deren Alterung, siehe Kap. 2.2.3.2, steht eine Vielzahl von Herangehensweisen zur Verfügung. Mangels vorliegender detaillierter Messdaten zur Parameterbestimmung sowie aufgrund des zweckorientierten Ansatzes, soll in dieser Arbeit ein empirisches Batteriemodell aufgebaut werden, dessen Alterung mit dem sogenannten Rainflow-Algorithmus bewertet wird.

3.3.3.1 Batteriemodell

Bei dem gewählten empirischen Modellierungsansatz werden nicht die inneren elektrochemischen Strukturen einer Batterie modelliert, sondern die Zusammenhänge zwischen Input- und Outputgrößen durch Formeln dargestellt. Konkret wird im Folgenden die Batteriemodellierung nach Tremblay et

al. herangezogen [269]. Diese basiert auf dem sogenannten Shepherd-Modell. Dessen benötigte Parameter können aus Entladekurven von Herstellerdatenblätter abgelesen werden [270]. Abbildung 3-14, im Zusammenhang mit den Formeln (3-1) und (3-2), veranschaulicht den Aufbau der Modellierung für den Lastfall. U_K und R_i sind die aus Kapitel 2.2.3.1 bekannte Klemmenspannung und der Innenwiderstand. I_B in A stellt den Batteriestrom dar. E in V steht für die Leerlaufspannung, die im ESB in Abbildung 2-14 mit U_0 gekennzeichnet ist.

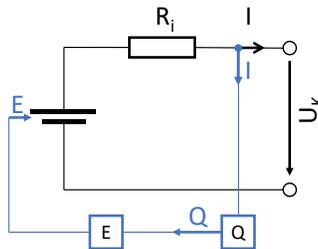


Abbildung 3-14: Shepherd-Modell nach Tremblay et al. [269]

Nachfolgende Gleichung dient der Berechnung der entnommenen Ladung Q in Ah, indem der Laststrom I über die Zeit integriert wird. Die zum Zeitpunkt t_0 bereits entnommene Ladung Q_{Start} wird hinzuaddiert.

$$Q = \int_{t_0}^{t_1} I(t) dt + Q_{Start} \quad (3-1)$$

Ziel der Modellierung ist es, anhand der Entladekurve das Systemverhalten der Batterie zu beschreiben. Diese Entladekurven haben einen dreiteiligen charakteristischen Verlauf: einen exponentiellen Bereich, beginnend bei der Spannung bei voller Ladung E_{full} , einen quasi-linearen Abschnitt zwischen der Spannung am Ende der exponentiellen Zone E_{exp} bis zur Spannung am Ende der nominalen Zone E_{nom} . Hierauf folgt ein Abschnitt mit steilem

Spannungsabfall bis zum Ende des nutzbaren Batteriespannungsintervalls. Anhand der Entladekurve für 1 °C und 25 °C (Abbildung 3-15), die dem Datenblatt des im Hess Swiss Primove-Bus zum Einsatz kommenden Batteriesystems „30M 46 NANO NMC“ der Firma AKASOL entnommen ist, lassen sich die beschriebenen Bereiche zeigen.

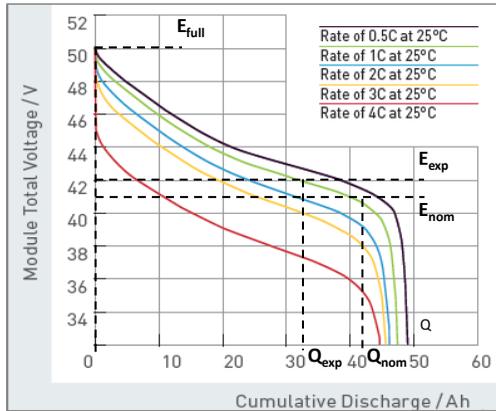


Abbildung 3-15: Daten und Entladekurven zur Batterie 46 NANO NMC mit markierten Spannungsverlaufsintervallen für die grüne Entladekurve [271]

Anhand dieser Entladekurve erfolgt die Parameterbestimmung für die Berechnung der Leerlaufspannung E in Formel (3-2). Hierbei ist nach Formel (3-3), E_0 die konstante Batteriespannung, nach (3-4) K die Polarisationspannung in V und Q_0 in Ah die Nennladung. Berechnet nach den Formeln (3-5) und (3-6) ist A in V die Amplitude und B in 1/Ah die inverse Zeitkonstante der exponentiellen Zone. Der Innenwiderstand R errechnet sich nach [269] in Abhängigkeit des Batteriewirkungsgrades η_{Bat} in %, gemäß (3-7).

$$E = E_0 - K \cdot \frac{Q_0}{Q_0 - Q} + A \cdot e^{-BQ} \quad (3-2)$$

$$E_0 = E_{full} + K - A + R \cdot I \quad (3-3)$$

$$K = \frac{(E_{full} - E_{nom} + A \cdot (e^{-B \cdot Q_{nom}} - 1)) \cdot (Q_0 - Q_{nom})}{Q_{nom}} \quad (3-4)$$

$$A = E_{full} - E_{exp} \quad (3-5)$$

$$B = \frac{3}{Q_{exp}} \quad (3-6)$$

$$R = U_{nom} \frac{1 - \eta_{Bat}}{0,2 \cdot Q_{nom}} \quad (3-7)$$

Es wird ersichtlich, dass das Shephard-Modell den Zusammenhang beschreibt, dass die Batteriespannung bei konstantem Entladestrom von der bereits entnommenen Ladung abhängt und entsprechend eine Funktion des SOC ist. Mithilfe der in Tabelle 3-2, anhand von Abbildung 3-15 identifizierten Parameter, lassen sich nun die Gleichungsgrößen zur Berechnung der Leerlaufspannung E nach Formel (3-2) bestimmen. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Batterie im Mittel mit einer C-Rate von 1 C belastet wird.

Tabelle 3-2: Parameter Batteriemodell für 1 C und 25 °C (grüne Kurve) aus Abbildung 3-15

| Größe | E_{full} | E_{exp} | E_{nom} | U_{nom} | Q_0 | Q_{exp} | Q_{nom} | η_{Bat} |
|-------|------------|-----------|-----------|--------------------|-------|-----------|-----------|---------------------|
| Wert | 50 | 42 | 41 | 44,4 ³³ | 48 | 32 | 42,5 | 0,995 ³⁴ |

An dieser Stelle soll im Vorgriff auf spätere Betrachtungen noch auf die Technologieentwicklung in der Zelltechnologie eingegangen werden. Hierzu listet Tabelle 3-3 diesbezügliche Prognosen auf.

³³ Herstellerangabe gemäß [271]

³⁴ Annahme

Tabelle 3-3: Technologieentwicklungsprognose von Li-Ion-Batteriezellen gemäß [36]

| Energiedichte | 2015 | 2020 | 2030 | > 2030 |
|----------------|---------|----------|---------|----------|
| Zelle [Wh/kg] | 150-160 | >200-250 | 250-300 | 270-300+ |
| System [Wh/kg] | 110-120 | 140-180 | 180-250 | 200-250+ |

Abbildung 7-6 (Anhang) zeigt das in Matlab/Simulink implementierte Batteriemodell und macht die Ein- und Ausgangsgrößen transparent. Hier ist anzumerken, dass auf die Modellierung eines Temperaturmodells verzichtet wurde. Es wird von einer durch das Thermomanagement der Batterie konstant gehaltenen Temperatur von 30 °C ausgegangen. Der Energiebedarf für diese Temperierung wird den sonstigen Nebenverbräuchern als konstanter Mittelwert i. H. v. 6 kW hinzugerechnet, siehe hierzu Abbildung 3-18.

3.3.3.2 Batteriealterung

Die zentrale Grundannahme bei den nachfolgenden Berechnungen der Batteriealterung ist, dass davon ausgegangen wird, dass sämtliche Alterungsvorgänge als linear zu betrachten sind [272]. Zur Quantifizierung des Prozesses der Batteriealterung wird auf die Rainflow-Zyklenzählung zurückgegriffen. Dieses Verfahren stammt aus der mechanischen Festigkeitslehre. Dort wird es angewandt, um durch Dehnungsversuche generierte Beanspruchungskollektive zur Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit von Bauteilen auszuwerten [273]. Die Anwendung des Verfahrens ist auch zur Bestimmung der zyklischen Lebensdauer Ld_{zykl} in der Batterietechnik üblich. Hierbei werden anhand des SOC die Lade- und Entladezyklen gezählt [199, 274]. Genauer liegt die Idee des Verfahrens darin, innerhalb eines gegebenen SOC-Zyklus Teilzyklen identischer Entlade- bzw. Ladetiefe zu identifizieren (siehe hierzu Abbildung A-18 in Anhang A.12). Jeder so gefundene Zyklus wird anschließend mit seinem DOD-abhängigen Korrekturfaktor gewichtet. Dieser leitet sich aus Herstellerangaben zur Anzahl von Vollzyklen in Abhängigkeit des DOD ab, wie Tabelle 3-4 zu entnehmen ist. Wird nicht die vollständige Bruttokapazität der Batterie genutzt, müssen die berechneten Vollzyklen mit dem gewählten Nettokapazitätsintervall gewichtet werden. Modellhaft

umgesetzt wird die Rainflow-Zählung durch die Implementierung der Matlab-Toolbox Rainflow Counting Algorithm [275], die im Postprocessing der Simulationsoutputdaten eines Betriebstags zur Anwendung kommt.

Tabelle 3-4: Äquivalente Vollzyklen und Korrekturfaktoren in Abhängigkeit des DOD nach [261]

| Entladetiefe | 100 % | 75 % | 50 % | 25 % | 15 % | 10 % | 5 % | 1 % |
|----------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Äqu. Vollzykl. | 4.30 | 6.61 | 12.74 | 22.69 | 27.74 | 30.49 | 33.40 | 35.83 |
| | 0 | 4 | 5 | 4 | 2 | 5 | 1 | 6 |
| Korrekturfakt | 1 | 1,54 | 2,96 | 5,28 | 6,45 | 7,09 | 7,77 | 8,33 |

Korrekturfaktoren K für nicht in der Tabelle angegebene Entladetiefen lassen sich nach [261] durch folgende Formel errechnen:

$$K(DOD) = \frac{3,054}{4300} \cdot DOD^2 - \frac{626,94}{4300} \cdot DOD + \frac{36459,7}{4300} \quad (3-8)$$

Im Anwendungsfall für diese Arbeit wird gemäß Kapitel 3.2.1 davon ausgegangen, dass sich ein für die Systemauslegung repräsentativer Betriebstag für eine Linie ermitteln und simulieren lässt. Auf dessen SOC-Verlauf wird der Rainflow-Algorithmus angewendet. Die sich für diesen Tag ergebenden Alterungsfaktoren werden in der Folge für ein Jahr mit der Anzahl der Betriebstage hochgerechnet, um hieraus die jährlichen äquivalenten Vollzyklen $\ddot{a}VZ_{\text{Jahr}}$ zu ermitteln. Die zyklische Lebensdauer Ld_{zyk} ergibt sich dann durch Division der maximalen Vollzyklenzahl gemäß Herstellerangaben $VZ_{\text{Datenblatt}}$ mit ebendiesen und wird benötigt für die Berechnung des jährlichen Schädigungsfaktors aufgrund der zyklischen Alterung SF_{zyk} .

$$SF_{\text{zyk}} = \frac{1}{Ld_{\text{zyk}}} = \frac{\ddot{a}VZ_{\text{Jahr}}}{VZ_{\text{Datenblatt}}} \quad (3-9)$$

An dieser Stelle gilt es zu beachten, dass sich durch eine fortsetzende Batteriealterung die Batteriekapazität kontinuierlich reduziert. Dies führt, in Abhängigkeit des bisherigen Schädigungszustands, zu relativ gesehen größeren SOC-Hüben, was wiederum einer erhöhten DOD-Zahl entspricht. Dieser Effekt wird im Modell dadurch kompensiert, dass das Nettokapazitätsintervall über die Lebensdauer schrittweise geweitet wird.

Weiterhin kommt zur bisher beschriebenen zyklischen Alterung noch die kalendarische hinzu, ausgedrückt durch den kalendarischen Schädigungsfaktor SF_{kal} . Zu deren Berechnung wird auf die Angabe der maximalen kalendarischen Lebensdauer Ld_{kal} aus dem Batteriedatenblatt zurückgegriffen:

$$SF_{kal} = \frac{1}{Ld_{kal}} \quad (3-10)$$

Die gesamte Lebensdauer der Batterie Ld_{Bat} ergibt sich aus der Summe der zyklischen und der kalendarischen Alterung:

$$Ld_{Bat} = \frac{1}{SF_{zyk} + SF_{kal}} \quad (3-11)$$

Abbildung 3-16 fasst das Vorgehen zur Ermittlung der Batterielebensdauer in einem Flussdiagramm zusammen.

Es wird festgelegt, dass die Batterielebensdauer endet, wenn die nutzbare Kapazität auf 80 % des initialen Nennkapazitätswerts gesunken ist. Alternativ ist eine Batterie auszutauschen, wenn sich der Wert des Innenwiderstands verdoppelt hat. Hiermit lässt sich mithilfe von (2-17) der SOH berechnen.

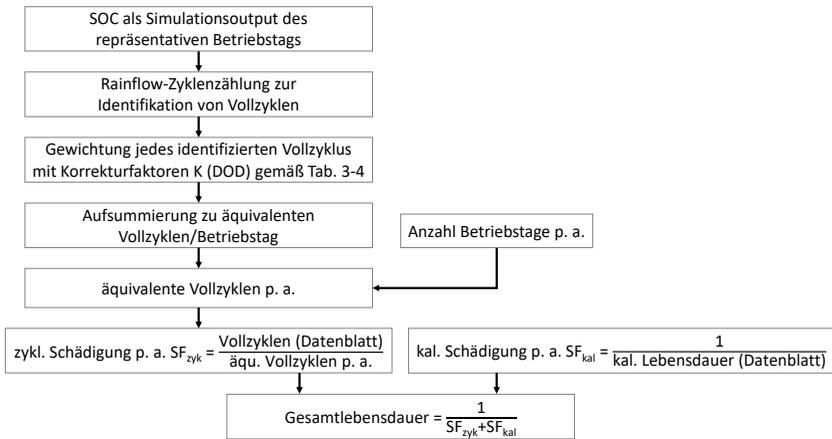


Abbildung 3-16: Prognostizierung der erwarteten Batterielebensdauer

3.3.4 Ladetechnik

In Abhängigkeit der zu einer Haltestelle hinterlegten maximal möglichen Energieversorgungsnetzbelastung werden, unter Berücksichtigung der ausgewählten Ladetechnik und -leistung, die Wirkungsgrade der zwischengeschalteten Leistungselektronik und der Schnittstelle der Energieübertragung bestimmt sowie die elektrische Leistung der Kühlung der wechselseitigen Leistungselektronik berechnet. Im Ergebnis steht, als Delta zwischen der entnommenen Netzleistung und den Verlusten der Energiebereitstellung, die fahrzeugseitig an der Batterie maximal aufnehmbare Leistung. Wie im Kapitel 2.2.4 herausgearbeitet wurde, muss der Ladevorgang der Fahrzeugbatterie innerhalb gewisser Spannungsgrenzen erfolgen, um diese nicht nachhaltig zu beschädigen. Hierfür wurde das IU-Ladeverfahren eingeführt. In der Praxis übernimmt diese Überwachungs- und Steuerungsaufgabe das Batteriemangement. Vor allem mit fortschreitender Alterung und der damit einhergehenden Vergrößerung des Innenwiderstandes bedarf es des Schutzes der Batterie vor Überspannungen während des Ladevorgangs, was mit der Vorgabe eines nutzbaren SOC-Intervalls einhergeht. Die hierfür im Rahmen

der Modellierung umgesetzte Ladeschutzschaltung zeigt das Flussdiagramm in Abbildung 3-17. Überschreitet der Ladezustand (SOC) eine definierte obere Grenze SOC_{oLim} , so wird die Ladeleistung P_{Lade} auf den aktuellen Leistungsbedarf der Nebenverbraucher P_{Aux} reduziert, d. h. die Batterie wird nicht weiter geladen. Solange der SOC sich unterhalb von SOC_{oLim} befindet, wird die aktuelle Batteriespannung U_{Bat} überwacht. Erreicht U_{Bat} die Ladeschlussspannung U_{oLim} , wird auf die begrenzte Ladeleistung P_{Lim} umgeschaltet. Indem P_{Lim} in Abhängigkeit der fortschreitenden Ladedauer t_{Laden} und unter Berücksichtigung des Alterungszustands der Batterie (SOH) schrittweise verringert wird, wird eine konstante Ladespannung eingestellt. P_{Lim} resultiert aus einem experimentell bestimmten SOH- und zeitabhängigem Kennfeld.

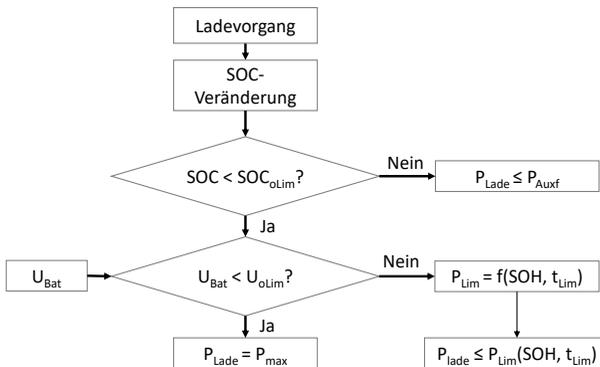


Abbildung 3-17: Veranschaulichung der Ladesteuerung, i. A. a. [261]

3.3.5 Nebenverbraucher

Da die Klimatisierung den mit Abstand größten Energiebedarf aller Nebenverbraucher verursacht und daher gemäß Kapitel 2.2.5 als besonders auslegungskritisch anzusehen ist, wird die Beschreibung ihrer Modellierung im ersten Unterkapitel im Detail erfolgen. Die übrigen Nebenverbraucher werden gemeinsam im zweiten Unterkapitel behandelt.

3.3.5.1 Klimatisierung

Wie im Grundlagenkapitel 2.2.5 dargestellt, bedarf die Klimatisierung aufgrund ihres anteilig hohen Energiebedarfs und Optimierungspotenzials einer ausführlichen Modellierung. Das Gesamtsystem HVAC besteht, gemäß Abbildung A-7 aus dem Anhang, aus den Teilsystemen Heizkreislauf, Klimaanlage und Innenraum³⁵. Wesentliche Inputwerte aus dem umgebenden Gesamtsystemmodell für das Klimamodell sind die Außentemperatur, die Passagieranzahl, die Fahrgeschwindigkeit sowie der Türzustand (offen/geschlossen). Die Solltemperaturvorgabe zur Regelung des Klimatisierungssystems orientiert sich an der Außentemperatur, in Verbindung mit den Vorgaben des VDV³⁶. Sowohl die Heizung als auch das Kühlsystem werden über einen Hystereseschalter aktiviert. Das Modell errechnet einerseits den Wärmestrom \dot{Q}_{Heiz} , der über Konvektoren an den Innenraum abgegeben wird. In deren Leitungen fließt ein durch PTC-Elemente (Positive Temperature Coefficient) in einem Hochvolt-Wasserheizer erwärmtes Heizmedium³⁷. Andererseits errechnet es die Kühlleistung $\dot{Q}_{Kühl}$ des Luftmassenstroms der Klimaanlage, welchem durch einen Verdampfer Wärme entzogen wurde. Der zur Erzeugung der jeweiligen Wärme- bzw. Kühlleistungen aufzubringende elektrische Leistungsbedarf P_{Heizer} bzw. $P_{Kühl}$ errechnet sich über den sogenannten COP, siehe hierzu Kapitel 2.2.5. Die Kalkulation der Innenraumtemperatur unterliegt einer Vielzahl von Einflussfaktoren bzw. Parametern mit jeweils eigenen spezifischen Wärmeströmen und hängt von der Wärmekapazität des Innenraums ab (Parameterliste siehe Anhang A.5). Diese

³⁵ Es wird davon ausgegangen, dass die Batterie bei konstanter Temperatur betrieben wird. Entsprechend wird die Modellierung der Batterieklimatechnik vernachlässigt. Ebenfalls nicht modelliert wird das Thermomodell der E-Maschine und die Klimatisierung des Fahrer Arbeitsplatzes. Die jeweiligen Energiebedarfe werden allerdings durch den konstanten Nebenverbraucherbedarf gemäß Kap. 3.3.5.2 pauschal berücksichtigt. Für alle genannten Bereiche werden konstante Energiebedarfe angenommen.

³⁶ Der VDV gibt Empfehlungen für den Sommer- (3 K unterhalb der Außentemperatur in der Höhe von 1,20 Metern), Winter- (mindestens 18 °C) und Lüftungsbetrieb vor [214].

³⁷ Im Beispielfahrzeug kommt ein solches Heizgerät der Firma Spheros zum Einsatz [276].

werden in einer Gesamtwärmebilanz gemäß Formel (3-12) zusammengefasst und hieraus die Innenraumtemperatur errechnet.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{Bilanz,IR}} = \dot{Q}_{\text{Heiz}} - \dot{Q}_{\text{Kühl}} - \dot{Q}_{\text{Fenster}} - \dot{Q}_{\text{Wand}} + \dot{Q}_{\text{Tür}} + \dot{Q}_{\text{Lüftung}} \\ + \dot{Q}_{\text{Pass}} + \dot{Q}_{\text{Solar}} \end{aligned} \quad (3-12)$$

Zwischen Außenwelt und Innenraum finden durch die Außenverkleidung, in Abhängigkeit von Wärmedurchgangskoeffizienten, die konvektiven Wärmeströme \dot{Q}_{Fenster} und \dot{Q}_{Wand} statt. $\dot{Q}_{\text{Tür}}$ ist der Wärmestrom in bzw. aus dem Bus, in Abhängigkeit des Temperaturgradienten zwischen Innenraum- und Außentemperatur. Nach VDV-Richtlinie 236 [214] ist ein Luftaustausch mit Frischluft verpflichtend. $\dot{Q}_{\text{Lüftung}}$ beschreibt in diesem Kontext die hierdurch in den Innenraum eingebrachte bzw. entnommene Wärmeleistung. Die von der Passagierzahl abhängige trockene Wärmeabgabe durch jeden Fahrgast, gemäß [277] in Form von Konvektion und Strahlung, wird durch \dot{Q}_{Pass} beschrieben. \dot{Q}_{Solar} berücksichtigt die Strahlungsleistung in Abhängigkeit des Sonnenstandes und der Solarkonstante, in Bezug auf die Fläche und Durchlässigkeit der bestrahlten Fahrzeugoberflächen (siehe hierzu Abbildung 3-31). Im Heizbetrieb ergeben sich durch die Umwälzpumpe des Heizmediums sowie durch die Konvektoren weitere elektrische Leistungsbedarfe. Gleiches gilt für die Lüfter des Kühlbetriebs und der Frischluftzufuhr.

3.3.5.2 Weitere Nebenverbraucher

Basierend auf Messdatenanalysen, auf die in Kapitel 3.4 zur Validierung noch genauer eingegangen werden wird, stellt sich heraus, dass die weiteren Nebenverbraucher (Auflistung siehe Abbildung 2-19) über den Betriebstag gesehen einen relativ konstanten Leistungsbedarf i. H. v. 5 – 8 kW aufweisen [278]. Dieses Werteintervall wird anhand des exemplarischen Messdatenverlaufs in Abbildung 3-18 bestätigt. Aus diesem Grund wurde im Rahmen der Modellierung entschieden, den Energiebedarf der übrigen Nebenverbraucher mit einem konstanten Wert vorzugeben. In einer detaillierteren Modellierung

wird, in Bezug auf die Optimierung des Energiemanagements und die Gesamtsystemauslegung, kein bedeutender Mehrwert gesehen.

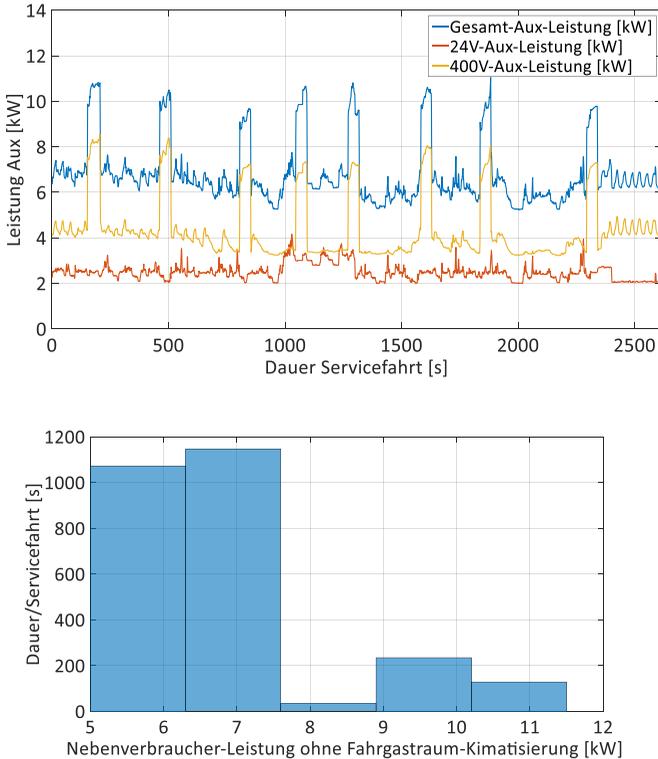


Abbildung 3-18: Nebenverbraucher-Leistung (ohne Fahrgastraum-Klimatisierung) der 4. Servicefahrt des Messtags vom 28.01.2016

3.4 Validierung technologisches Modell

Zur Validierung des Softwaremodells des E-Bus-Gesamtsystems wurden diverse Messungen mit einem der beiden auf der Linie 63 eingesetzten Hess Swiss Primove E-Busse unternommen. Am 27.01.2016 wurde auf einer

nahezu ebenen, circa 600 Meter langen und wenig befahrenen Straße gene-
rische Fahrspiele durchgeführt, hauptsächlich zur Abbildung des SORTZyklus
gemäß [158]³⁸. Schließlich wurde der E-Bus samt Messausrüstung am 28.
Januar einen kompletten, regulären Betriebstag lang im Linienbetrieb der
Linie 63 mit Passagieren eingesetzt. Hierbei konnten Daten zu 19 Servicefah-
ren aufgezeichnet werden³⁹. Teilkapitel 3.4.1 charakterisiert zuerst den
Betriebstag des 28.01.2016, beschreibt dann den eingesetzten Messaufbau
und stellt abschließend überblicksmäßig wesentliche Ergebnisse der Mes-
sungen dar. In Kapitel 3.4.2 folgt die Validierung des eigenen Softwaremodells
anhand der Messergebnisse.

3.4.1 Charakterisierung Betriebstag, Messaufbauten und Messergebnisse

Um ein vereinfachtes Einordnen der Messergebnisse zu ermöglichen, soll in
einem ersten Schritt anhand von Tabelle 3-5 der den Messungen zugrunde
liegende Betriebstag des 28.01.2016 charakterisiert werden. Dieser Tag wird
im weiteren Verlauf der Arbeit als Standardbetriebstag angesehen und bildet,
falls nicht anders beschrieben, die zentrale Input-Datenbasis.

³⁸ Aufgrund der Testfahrten im öffentlichen Verkehr, ungeübter Testfahrer sowie weiteren
Abweichungen von den SORT-Vorgaben [158], welche offiziell nicht für E-Busse vorgesehen
sind (Kapitel 2.1.1), kann hier nur von einem angenäherten SORT-Zyklus gesprochen werden.
Der SORT-Zyklus wurde in einzelnen, voneinander unabhängigen Teilzyklen gefahren und diese
erst im Nachgang softwaremäßig zum vollständigen Zyklus zusammengesetzt.

³⁹ Einschränkend ist anzumerken, dass der reguläre Betriebsablauf durch die Übernahme von
sechs Servicefahrten durch Dieselbusse, eine ausgefallene Ladestation am Hauptbahnhof
sowie eine aufgrund von Verspätung ausgefallene Servicefahrt beeinflusst war. Weiterhin
konnten aufgrund des Winterdatums keine Messwerte der Innenraumkühlung aufgenommen
werden.

Tabelle 3-5: Charakteristische Daten zum Betriebstag 28.01.2016

| Parameter | Einheit | Wert |
|--|---------|-----------|
| Anzahl eingesetzter Busse | | 2 |
| Anzahl SF je Fahrzeug | | 19 |
| Länge je SF | [km] | 9,5 |
| Länge Aus-/Einrückfahrt | [km] | 2,8/2,6 |
| gesamte Fahrstrecke Bus/Tag | [km] | 185,9 |
| Betriebstage/Jahr | | 320 |
| Jahresfahrleistung | [km] | 59.488 |
| Lebensfahrleistung (20 Jahre) | [km] | 1.189.760 |
| Ø-Geschwindigkeit in Bewegung | [km/h] | 24,6 |
| Ø-Geschwindigkeit inkl. Stillstandzeit | [km/h] | 12,4 |
| gesamte Betriebszeit/Tag | [hh:mm] | 14:32 |
| Ø Dauer/SF | [hh:mm] | 00:44 |
| gesamte Haltezeit Endhaltestelle | [hh:mm] | 01:29 |
| gesamte Stillstandszeit Betriebstag | [hh:mm] | 07:11 |
| Ø Anzahl Fahrgäste (Ø 70 kg/Fahrgast) | | 10 |
| Ø Außentemperatur | [°C] | 10,7 |

Für die Messungen kamen verschiedene Messsysteme zum Einsatz. Durch ein mehrkanaliges Leistungsmessgerät (LMG), an das gemäß Abbildung 3-19 acht Stromwandler ($I_1 - I_8$) und zwei Differentialtastköpfe (NV, HV) angeschlossen waren, wurden verschiedene Leistungsflüsse aufgezeichnet. Parallel wurden die CAN-Signale des Fahrzeug-Bus, mit Thermoelementen die Temperaturverteilung im Innenraum gegenüber der Außentemperatur sowie über eine GPS-Antenne samt Beschleunigungssensor die GPS-Koordinaten mitgeschrieben. Ergänzend wurden von ausgewählten Servicefahrten noch Videoaufnahmen aus der Frontscheibe heraus aufgezeichnet.

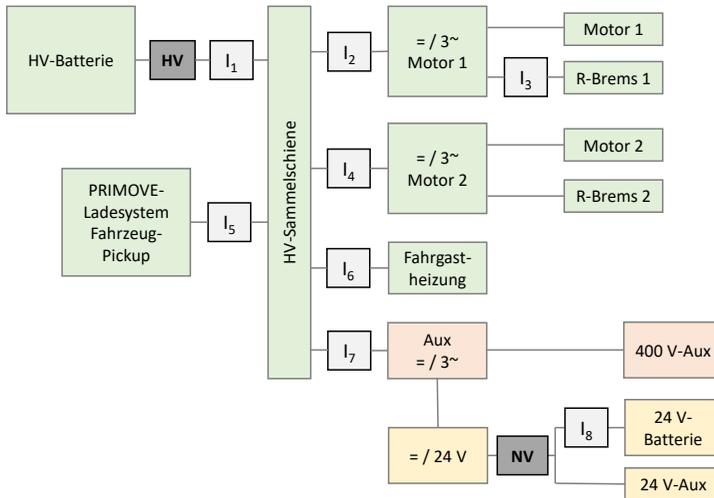


Abbildung 3-19: Messaufbau Hess Swiss Primove Bus samt Auflistung der Messkanäle, Fahrzeugtopologie nach [279]

Bei der Messdatenauswertung wurde im ersten Schritt die Güte der Messdaten ermittelt. Hierzu wurden die Werte der Leistungsmessung denen der CAN-Messung gegenübergestellt. Die Korrektheit der Messwertermittlung wurde durch nahezu deckungsgleiche Messergebnisse bestätigt. Tabelle 3-6 dokumentiert überblicksmäßig die zentralen Resultate der Energieflussmessungen. Die Repräsentativität der genannten Messwerte, in Bezug auf den Energiebedarf in kWh/km, wird bestätigt durch Langzeitmessungen von Bombardier. Diese geben für den Energiebedarf der Busse (ab Batterieklemme) für die Zeit von November 2015 bis Juli 2016 ein Intervall von 1,2 kWh/km bis zu 2,1 kWh/km sowie einen Durchschnittswert von 1,48 kWh/km an [10]. Das Sankey-Diagramm in Abbildung 3-20 schlüsselt die gemessenen Energieflüsse für den Betriebstag nochmals genauer auf.

Tabelle 3-6: Messdatenanalyse Betriebstagsmessung vom 28.01.2016

| Messgröße | Detail | Betriebstag | | Ø Servicefahrt | |
|----------------------------------|--|---------------|--------|----------------|-------|
| | | Dauer [hh:mm] | kWh | Dauer [mm:ss] | kWh |
| Bewegung | Traktionsenergie | 03:54 | 224,3 | 12:20 | 11,81 |
| | + Nebenverbraucher | | + 87,3 | | 4,60 |
| | - Rekuperationsenergie | 03:36 | - 84,8 | 11:21 | -4,46 |
| | = Energiebedarf gesamt | 07:30 | 226,8 | 23:41 | 11,94 |
| Stillstand | Energiebedarf | 05:50 | 63,7 | 18:26 | 3,35 |
| Σ Bewegung und Stillstand | Energiebedarf gesamt | 13:20 | 290,4 | 42:07 | 15,29 |
| | <i>kWh/km</i> | | | <i>1,61</i> | |
| Ladevorgang | Nebenverbraucher | | +25,4 | | 1,34 |
| | Ladeverluste Batterie | | +19,8 | | |
| | geladene Energiemenge | 01:56 | 335,6 | 06:06 | 17,66 |
| Σ Netzenergie | - 10 % Ladeverluste Wegseite ⁴⁰ | | 372,8 | | 19,62 |
| | <i>kWh/km</i> | | | <i>2,07</i> | |

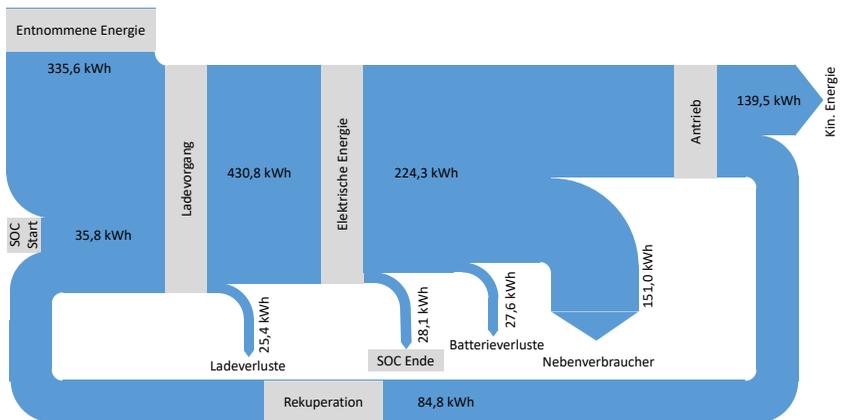


Abbildung 3-20: Sankey-Diagramm zur Bilanzierung der Energieflüsse des kompletten Betriebstags vom 28.01.2016

⁴⁰ Wert gemäß Herstellerdaten der induktiven Ladestation [10]. Da wegseitig keine eigenen Messungen durchgeführt wurden, kann hier kein Messwert zum Vergleich angegeben werden.

Ergänzend zu den Betriebstagsmessungen ergaben die Energieflussmessungen zu dem getesteten SORT1-Zyklus folgende Ergebnisse:

Tabelle 3-7: Ergebnisse der SORT1-Messungen vom 27.01.2016

| Messgröße | eigene Messung | idealer SORT | Abweichung |
|--------------------------------------|----------------|--------------|------------|
| Fahrstrecke [m] | 501 | 520 | - 3,6 % |
| Dauer [s] | 155 | 151 | + 2,6 % |
| Ø-Geschwindigkeit | 11,9 | 12,1 | - 1,7 % |
| Ø-Beschleunigung [m/s ²] | 0,4 | 0,8 | - 50 % |
| Energiebedarf Aux [kW] | 5,0 | k. A. | |
| SORT 1-Energiebedarf Traktion [kWh] | 0,38 | k. A. | |
| SORT 1-Energiebedarf gesamt [kWh] | 0,59 | k. A. | |
| SORT 1-Energiebedarf gesamt [kWh/km] | 1,14 | k. A. | |

Da es, wie oben beschrieben, noch keinen SORT-Referenzzyklus speziell für E-Busse gibt, besteht keine Möglichkeit, für die aufgeführten Werte Vergleichsdaten heranzuziehen.

3.4.2 Validierung

Um die korrekte und hinreichend genaue Abbildung der Realität durch das vorgestellte Softwaremodell zu bestätigen, ist es erforderlich, dass die hiermit generierten Simulationsergebnisse den Messwerten der Praxis für Betriebstag und SORT-Zyklus entsprechen. Dies soll nachfolgend, stellvertretend für das modellierte Gesamtsystem, anhand der Betrachtung des Leistungsbedarfs der beiden wichtigsten Energiesenken Antrieb und Fahrgastheizung sowie anhand des SOC-Verlaufs vorgenommen werden. Hierzu werden zuerst entsprechende Diagramme gezeigt, um daraufhin in Tabellenform zahlenmäßige Vergleiche anzustellen und Abweichungen zu quantifizieren. Abbildung 3-21 zeigt für den SORT1-Zyklus den Vergleich des Geschwindigkeits- und des Motorleistungsverlaufs. Die kleinen Spitzen der Messwerte beim Übergang zwischen Beschleunigungs- und Konstantfahrphase beim Geschwindigkeitsverlauf in den Messdaten erklären sich durch das

Fahrverhalten des Busfahrers beim Versuch die Zielgeschwindigkeit zu erreichen. Da der Fahrregler aus TruckMaker derartige Spitzen glättet, weicht der Geschwindigkeitsverlauf der Simulation marginal von dem der Messung ab. Bei der Motorenleistung treten in den Messwerten höhere positive wie negative Leistungsspitzen auf, was sich auf die defensiveren Eigenschaften des Fahrreglers zurückführen lässt. Auch im Konstantfahrtbereich ergibt sich eine Abweichung. Diese wird durch Unterschiede zwischen dem hinterlegten Wirkungsgradkennfeld der E-Motoren und der Realität begründet. Insgesamt führen zudem Annahmen bei verschiedenen Modellparametern wie beispielsweise Fahrzeugmasse, Straßenverhältnisse oder Reifen zu Abweichungen. Der Energiebedarf des Antriebs beträgt für die Messfahrt 0,364 kWh, die Simulation berechnet 0,386 kWh. Dies entspricht einer Differenz von 5,9 %.

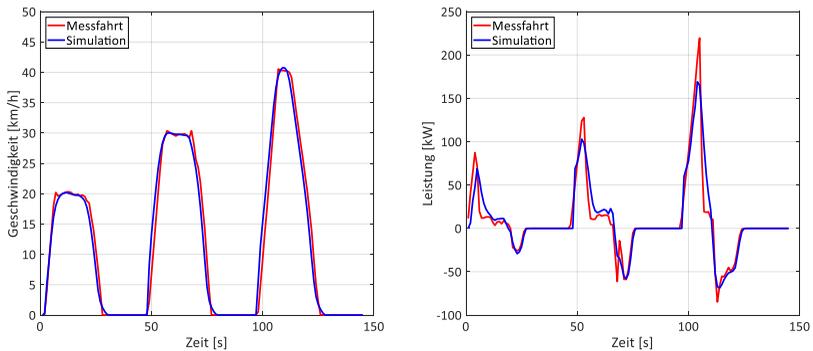


Abbildung 3-21: Vergleich Geschwindigkeit und Motorleistung (links bzw. rechts) zwischen Simulation und Messdaten für den SORT1-Zyklus

Die Validierung des Klimamodells, genauer der Heizung, gestaltet sich schwierig, da dieses Modell auf einer Vielzahl von Parameterannahmen basiert, zu welchen keine Messwerte vorliegen (Kapitel 3.3.5). Hierzu seien die genauen Innenraumdimensionen, Fahrgastzahlen, Strömungsverhältnisse der Luft oder auch äußere Gegebenheiten wie der Sonnenstand genannt. Um eine

größenordnungsmäßige Einordnung der Realitätsabbildung des Softwaremodells zu ermöglichen, werden in Abbildung 3-22 gemessene Temperaturkurven für einen Aufheizvorgang des Busses herangezogen. Es zeigt sich, dass die Soll-Innenraumtemperatur der Simulation nach 320 Sekunden Aufheizvorgang erreicht wird. Demgegenüber steht eine reale Aufheizdauer von rund 600 Sekunden. Unter Berücksichtigung der geschilderten zu treffenden Annahmen kann geschlossen werden, dass das Klimamodell größenordnungsmäßig als validiert angesehen werden kann.

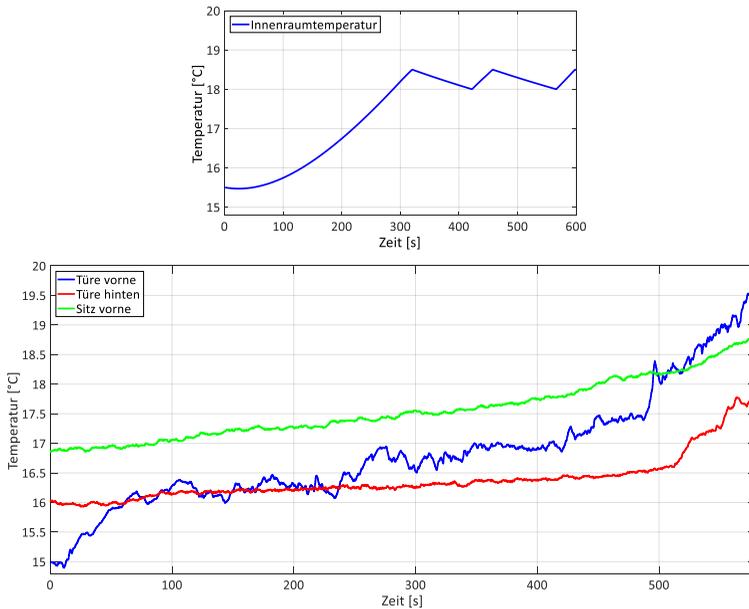


Abbildung 3-22: Simulationsergebnisse mithilfe des Klimamodells für einen Aufheizvorgang (oben) und Messwerten zur Innenraumtemperatur (unten)

Abschließend wird anhand der Servicefahrt 10 der SOC-Verlauf von Messung und Simulation grafisch verglichen, siehe Abbildung 3-23.

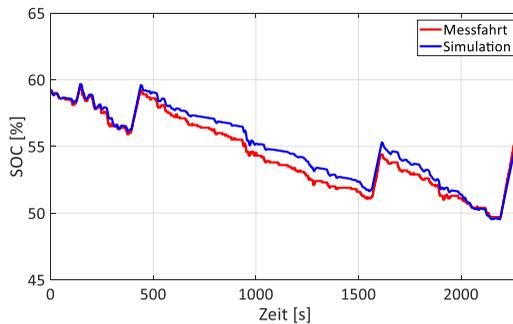


Abbildung 3-23: SOC-Verlauf der 10. Servicefahrt, Messdaten ggü. Simulationsdaten

Zusammenfassend listet die nachfolgende Tabelle die Mess- und Simulationswerte für die Energiesenken der Servicefahrten 6 und 10 nebeneinander auf und ermittelt die jeweiligen prozentualen Abweichungen. Dabei wird deutlich, dass diese sich zum Großteil im niedrigen einstelligen Prozentbereich befinden und die Feststellung rechtfertigen, dass das vorgestellte Softwaremodell als validiert bezeichnet werden kann.

Tabelle 3-8: Vergleich zwischen Messwerten und Simulation für die Servicefahrten 6 und 10

| | Messfahrt [kWh] | Simulation [kWh] | Abweichung |
|----------------------------------|-----------------|------------------|------------|
| Werte für Servicefahrt 6 | | | |
| E-Motoren | 7,53 | 7,27 | -3,4 % |
| Heizung | 5,12 | 5,20 | 1,7 % |
| sonst. Nebenverbraucher | 4,01 | 4,00 | 0,02 % |
| Energiemenge geladen | 8,22 | 8,56 | 4,1 % |
| Energiebedarf gesamt | 16,66 | 16,75 | -1,1 % |
| Energiebedarf kWh/km | 1,78 | 1,76 | -1,1% |
| Werte für Servicefahrt 10 | | | |
| E-Motoren | 7,00 | 7,26 | 3,72 % |
| Heizung | 0 | 0 | - |
| sonst. Nebenverbraucher | 3,34 | 3,80 | 13,67 % |
| Energiemenge geladen | 15,06 | 14,95 | -0,74 % |
| Energiebedarf gesamt | 10,34 | 11,06 | 6,49 % |
| Energiebedarf kWh/km | 1,09 | 1,17 | 6,93 % |

3.5 Simulation und Ergebnisse

Das Kapitel verfolgt zwei Ziele: Es sollen anhand von Simulationen die in Kapitel 1.2 aufgezeigten Zielkonflikte bei der Auslegung von E-Bus-Systemen aufgezeigt werden. Damit einhergehend sollen weiterhin die Ergebnisse von Simulationsstudien unter variierenden Inputparametern vorgestellt werden. Die Parameter- sowie Szenarienauswahl erfolgt im Hinblick auf die sich in Kapitel 5 und 6 anschließende techno-ökonomische Systemauslegung. Dies bedeutet, dass die hier gezeigten Simulationsergebnisse im Rahmen der techno-ökonomischen Optimierung als realitätsgetreue Eingangswerte verwendet werden. Weiterhin soll demonstriert werden, dass mit dem vorliegenden technischen Modell bereits eine E-Bus-Systemauslegung, anhand einer Variation und statistischen Analyse technischer Parameter, durchgeführt werden kann. Zur Ergebnisgenerierung wurden für die Buslinien 53, 60 und 63 insgesamt 700 vollständige Betriebstage unter variierenden Eingangsparametern für Batteriekapazität, Ladeleistung, Ladetechnologie, Anzahl Ladestationen, klimatische Bedingungen, verschiedene Gefäßgrößen und Batteriealterungszustände (SOH) simuliert [280]⁴¹. Dem Großteil der Simulationen liegt, sofern nicht anders gekennzeichnet, der Standardbetriebstag des 28.01.2016 sowie der Hess Swiss Primove Bus zugrunde. Für alle Batterien wurde mit dem Neuzustand simuliert, d. h. es werden überall die Werte der Bruttokapazität angegeben, aber mit deren 50 %-igen Nettokapazität gerechnet.

⁴¹ Die Simulation eines vollständigen Betriebstags der Linie 63 (Ausrückfahrt, 19 Servicefahrten, Einrückfahrt) beträgt rund vier Stunden. Die Simulation einer Servicefahrt (in der Praxis regulär 40 Minuten) rechnet im Schnitt mit etwa vierfacher Echtzeit, d. h. eine Servicefahrt wird in 10 Minuten simuliert. Zusätzlich kann je Servicefahrt mit einem Pre- und Postprocessing von circa 2 Minuten kalkuliert werden.

3.5.1 Nachweis der Zielkonflikte bei der Systemauslegung

Die Zielkonflikte bei der E-Bus-Systemauslegung lassen sich im Wesentlichen darin zusammenfassen, dass eine Konfiguration eines Busses mit einer großen Batteriekapazität weniger Ladeinfrastruktur bedarf. Gleiches gilt bei der Installation hoher Ladeleistungen. Dabei sind jedoch die Batteriealterung und die Energieeffizienz als Nebenbedingungen zu berücksichtigen.

Zielkonflikt 1: Größere Batteriekapazität resultiert in längerer Lebensdauer

Der Zusammenhang zwischen SOH und Batteriegröße wird durch Tabelle 3-9 dargestellt. Sie verdeutlicht, dass eine größere Batteriekapazität bei sonst gleichen Rahmenbedingungen zu einer geringeren Alterung führt. Dies ist zurückzuführen auf geringere DOD-Hübe. Abbildung 3-24 unterstreicht diesen Sachverhalt anhand des SOC-Verlaufs für unterschiedliche Batteriegrößen.

Tabelle 3-9: Vorausberechnete Batterielevensdauern (Linie 63, 300 kW konduktives Ladesystem, 6 Ladehaltestellen, Herbst-Klimabedingungen)⁴²

| Batterie | Alterungsfaktor p. a. | Lebensdauer |
|----------|-----------------------|-------------|
| 60 kWh | 14,3% | 7,0 Jahre |
| 90 kWh | 11,4% | 8,8 Jahre |
| 120 kWh | 9,8% | 10,6 Jahre |
| 240 kWh | 8,1% | 12,3 Jahre |
| 480 kWh | 7,4% | 13,5 Jahre |

⁴² Die Werte ergeben sich durch Mittelwertbildung der Simulationsergebnisse mehrerer Betriebstage.

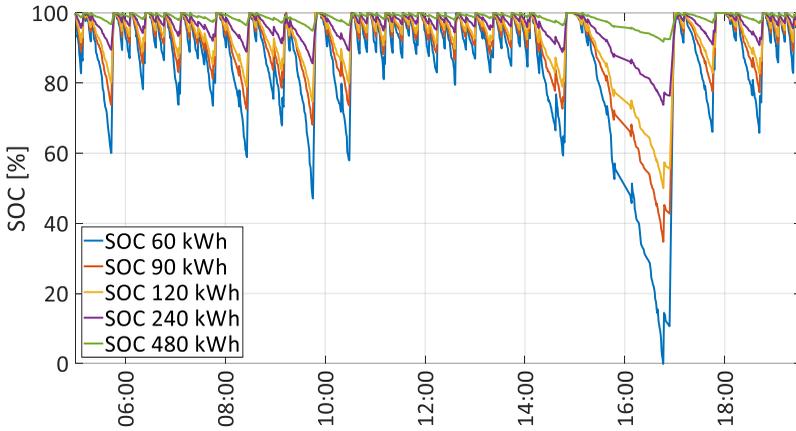


Abbildung 3-24: SOC-Verlauf verschiedener Batteriegrößen für Unterwegsladen eines Betriebstages

Durch die Betrachtung der Simulationsergebnisse mehrerer Betriebstage und mithilfe einer Korrelationsanalyse samt Regressionsgeraden lässt sich der aufgezeigte Zusammenhang allgemein belegen, siehe Abbildung 3-25.

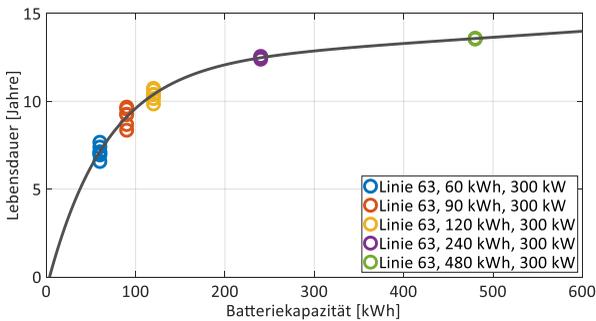


Abbildung 3-25: Korrelationsanalyse und Regressionsgerade zur Batterielevensdauer im Verhältnis zur Bruttokapazität bei Betrachtung unterschiedlicher Betriebstage im Herbst, Korrelationskoeffizient $r = 0,8646$

Zielkonflikt 2: Hoher Energiebedarf verursacht eine schnellere Alterung

Je höher der Energiebedarf für einen gefahrenen Kilometer ist, desto schneller altert die Batterie und desto häufiger muss nachgeladen werden bzw. desto größere Batteriekapazitäten sind zu installieren. Eine möglichst ganzheitlich optimierte Energieeffizienz des E-Busses ist intuitiverweise ein zentraler Bestandteil eines kostenoptimalen Gesamtsystems. Um die Bedeutung der Energieeffizienz zu quantifizieren, analysiert Tabelle 3-10 das Fahrzeuggewicht bei unterschiedlichen Batteriekapazitäten, im Zusammenhang mit dem Energiebedarf pro Kilometer und der Batterie-Lebensdauer.

Tabelle 3-10: Energiebedarf und Batterie-Lebensdauer bei unterschiedlichen Fahrzeuggewichten und Nebenverbraucher-Beanspruchungen (H = Herbst, W = Winter)⁴³

| | Einheit | 90-kWh | | 120-kWh | | 240-kWh | |
|------------------------------|---------|--------|------|---------|------|---------|------|
| | | H | W | H | W | H | W |
| Fahrzeugleergewicht | kg | 12.100 | | | | | |
| Batteriegewicht | kg | 900 | | 1.680 | | 3.120 | |
| Energiebedarf/km | kWh/km | 2,07 | 2,78 | 2,11 | 2,83 | 2,21 | 2,95 |
| Energiebedarf Bus | kWh | 375 | 506 | 384 | 515 | 402 | 537 |
| Alterungsfaktor p. a. | % | 11,4 | 12,1 | 9,8 | 10,9 | 8,1 | 8,6 |
| Batterie-Lebensdauer | a | 8,8 | 8,3 | 10,2 | 9,2 | 12,3 | 11,6 |

Die Ergebnisse bestätigen den diskutierten Zielkonflikt. Durch den aufgezeigten Zusammenhang zwischen Energieeffizienz und Batterie-Lebensdauer wird auch nachvollziehbar, dass ein höherer Energiebedarf der Nebenverbraucher zu einer reduzierten Batterie-Lebensdauer führt. Abbildung 3-26 verdeutlicht nochmals die Korrelation zwischen steigender Batteriekapazität und erhöhtem Energiebedarf für verschiedene Simulationsstudien. Aus der linearen Regression lässt sich für den vorliegenden Betrachtungsfall ableiten, dass eine Erhöhung der Batteriekapazität um 30 kWh zu einer Steigerung des Energiebedarfs um 0,03 kWh/km führt (Abbildung 3-26).

⁴³ Das Fahrzeugleergewicht ist exklusive des Batteriegewichts angegeben.

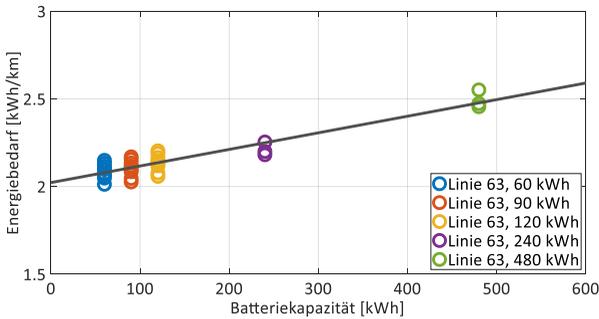


Abbildung 3-26: Korrelationsanalyse Batteriekapazität mit Energiebedarf, $r = 0,9295$

Zielkonflikt 3: Hohe Ladeleistungen fördern geringeren Batterieverschleiß

Anhand von Tabelle 3-11 wird veranschaulicht, dass erhöhte Ladeleistungen ab einer gewissen Batteriekapazität einer geringeren Batteriealterung zuträglich sind. Der Grund hierfür liegt in flacheren Entladungen, weil durch hohe Ladeleistungen je Ladevorgang mehr Energie aufgenommen werden kann, was den durchschnittlichen Ladegrad der Batterie erhöht. Es werden für verschiedene Batteriekapazitäten und Ladeleistungen die erwarteten Lebensdauern angegeben. Abbildung 3-27 veranschaulicht die Ursache für den geringeren Batterieverschleiß anhand der SOC-Verläufe einer 90 kWh-Batterie bei unterschiedlichen Ladeleistungen. Auf Basis der zugrundeliegenden Modellierung gilt demnach, dass je höher die installierte Ladeleistung ist, desto geringer fallen die Entladehübe aus.

Tabelle 3-11: Zusammenhang Batteriekapazität, Ladeleistung, Lebensdauer (Jahre)

| Batterietyp | 60 kWh | | 90 kWh | | 120 kWh | | 240 kWh | | 480 kWh | |
|---------------|--------|------|--------|------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
| Ladel. [kW] | 200 | 500 | 200 | 500 | 200 | 500 | 200 | 500 | 200 | 500 |
| L.-Dauer [J.] | 5,78 | 7,75 | 8,06 | 9,43 | 9,9 | 10,63 | 12,22 | 12,43 | 13,52 | 13,57 |
| Delta [%] | +34,1 | | +17 | | +7,4 | | +1,7 | | +0,01 | |

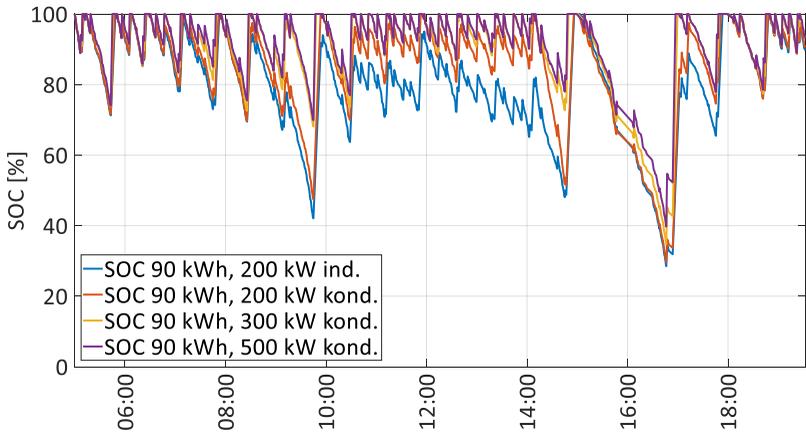


Abbildung 3-27: SOC-Verlauf einer 90 kWh-Batterie mit Nachladung bei unterschiedlichen Ladeleistungen an den sechs Ladestationen der Linie 63 gemäß Kap. 2.1.3.2

Wie im Zielkonflikt 1 beschrieben, ist eine große Batteriekapazität einer geringen Alterung zuträglich. Aufgrund dieses Effekts, tritt gemäß Tabelle 3-11 der Vorteil höherer Ladeleistungen bei größeren Kapazitäten nicht mehr so deutlich auf, wie dies bei geringeren Kapazitäten der Fall ist⁴⁴. Die Korrelationsanalyse in Abbildung 3-28 bestätigt den beschriebenen Zusammenhang durch die Analyse verschiedener Betriebstage. Unter den hier gegebenen Rahmenbedingungen kann mithilfe der linearen Regression festgestellt werden, dass eine Erhöhung der Ladeleistung um 100 kW zu einer Steigerung der Batterie Lebensdauer von 0,36 Jahren führt.

⁴⁴ Es ist zu berücksichtigen, dass bei den hier getätigten Betrachtungen unterstellt wird, dass eine komplette Buslinie mit nur einer Ladetechnologie bzw. -leistung ausgerüstet ist. Da aber an den verschiedenen Ladestationen unterschiedliche maximal installierbare Netzanschlüsse realisierbar sind, kann die 500 kW-Ladetechnik nicht überall ihr volles Potenzial ausschöpfen. Bspw. wurde bei der Simulation unterstellt, dass an der Station Mühlendorfer Straße aufgrund beschränkter lokaler Energienetzkapazitäten nur mit maximal 300 kW geladen werden kann.

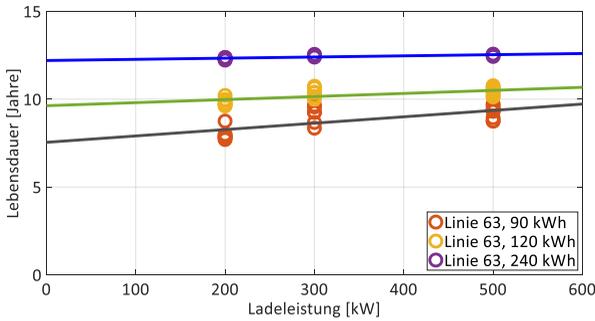


Abbildung 3-28: Korrelation Ladeleistung zu Batterielebensdauer, $r = 0,6987$

Zielkonflikt 4: Je mehr Ladestationen bzw. je länger die Ladedauer, desto geringer ist die Batteriealterung

Tabelle 3-12 legt den Zusammenhang zwischen der Anzahl der Ladestationen an einer Buslinie, deren Ladeleistung und den Alterungsfaktoren in Abhängigkeit der Batteriekapazität dar. Ergänzend wird der SOC-Verlauf für eine unterschiedliche Anzahl an 300 kW-Ladehaltestellen beim Einsatz einer 90 kWh-Batterie in Abbildung 3-29 gezeigt. Dieser legt offen, dass weniger Ladehaltestellen zu tieferen Entladungen führen.

Tabelle 3-12: Zusammenhang Anzahl/Leistung Ladestationen und Batteriealterung

| Anzahl Ladehalte | 3 | | | | 6 | | | |
|----------------------|-----|-----|-----|------|-------|-------|-------|------|
| Ladeleistung [kW] | 300 | | 500 | | 300 | | 500 | |
| Bat.-Kapazität [kWh] | 90 | 120 | 90 | 120 | 90 | 120 | 90 | 120 |
| Lebensdauer [Jahre] | 8,4 | 9,9 | 8,6 | 10,0 | 9,2 | 10,5 | 9,4 | 10,6 |
| %-Veränderung | | | | | +9,5% | +6,1% | +9,3% | +6% |

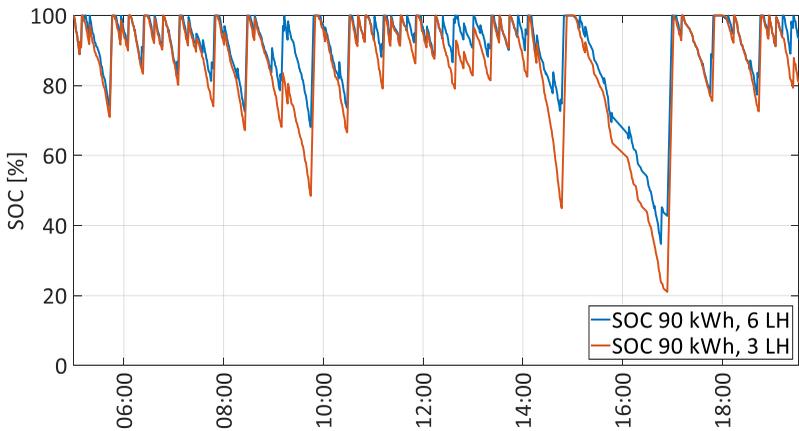


Abbildung 3-29: SOC-Verlauf mit 3 bzw. 6 Ladehaltestellen (90 kWh-Batterie, 300 kW-Ladesystem)

Vergleicht man die Lebensdauer der Batterien bei variierender Anzahl an Ladestationen mit identischer Ladeleistung auf einer Buslinie, so wird offensichtlich, dass mehr Ladestationen zu einer erhöhten Batterielevensdauer führen. In der Praxis müsste allerdings, abhängig von der gewählten Batteriekapazität, bei einer Verringerung der Anzahl an Lademöglichkeiten der damit einhergehende Verlust an potenzieller Ladedauer dadurch ausgeglichen werden, dass Ladestationen mit einer höheren Leistung zum Einsatz kommen. Dies wiederum kann, in Abhängigkeit der Ladeleistungsunterschiede, entgegen der hier angestellten These, dass mehr Ladehaltestellen zu einer steigenden Batteriealterung führen, einer geringen Batteriealterung zuträglich sein [280]. Die nachfolgende Korrelationsanalyse bestätigt linienübergreifend, dass durch eine Steigerung der Ladezeit im Verhältnis zur gesamten Betriebstagsdauer (Ladeanteil) eine steigende Batterielevensdauer bewirkt werden kann. Die Steigerung des Ladeanteils kann sowohl durch mehr Ladestationen auf dem Linienverlauf als auch durch längere Verweildauern auf Ladestationen erreicht werden.

Die lineare Regression ergibt, dass auf Basis der hier getätigten Simulationen eine Erhöhung des täglichen Ladeanteils um fünf Prozent zu einer Verlängerung der prognostizierten Batterielebensdauer um 1,55 Jahren führt. Grundsätzlich ist abschließend noch anzumerken, dass bei der Auswahl von Ladehaltestellen Qualität, im Sinne von langen Haltezeiten und Haltewahrscheinlichkeiten, vor Quantität geht.

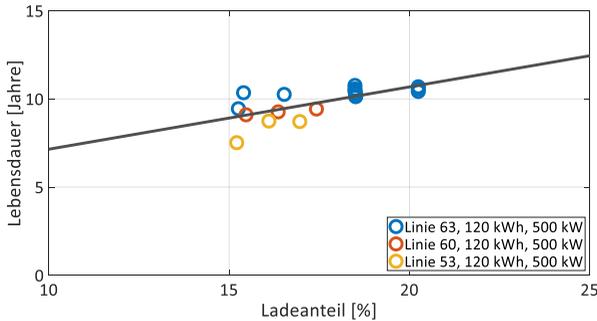


Abbildung 3-30: Korrelation Batterielebensdauer und täglicher Ladeanteil, $r = 0,6997$

3.5.2 Simulationsstudien im Hinblick auf Gesamtsystemoptimierung

Die im Folgenden dargestellten Simulationsstudien dienen, neben dem Nachweis der Möglichkeiten des technischen Gesamtsystemmodells, auch der Datengenerierung für die folgende Gesamtsystemoptimierung. Hierzu werden ausgewählte Szenarien betrachtet, auf deren grundlegendem Aufbau sowie deren Ergebnisse die in Kapitel 6 durchzuführenden techno-ökonomischen Optimierungen basieren.

TestszENARIO 1: Einfluss der klimatischen Bedingungen bzw. Variation des täglichen Energiebedarfs

Verglichen wird der Energiebedarf für den Fahrbetrieb eines Betriebstages unter Winter-/Sommer- und Herbstwetterbedingungen sowie ohne jegliche

Innenraumklimatisierung (*W, S, H, Klima_aus* bzw. *aus*). Die zugrundeliegenden Klimakurven sind Abbildung 3-31 zu entnehmen. Dabei kann die Variation der klimatischen Bedingungen auch stellvertretend für eine Variation der Energiebedarfe bzw. Effizienzgrade im Allgemeinen interpretiert werden.

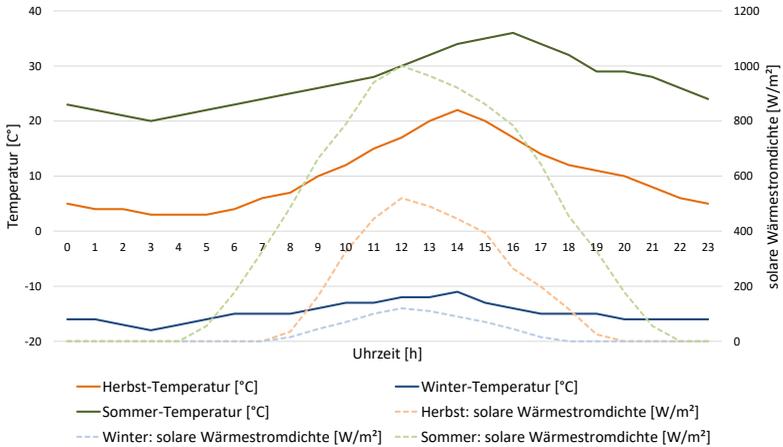


Abbildung 3-31: Klimakurven als Inputdaten für die Simulationen

Anhand Tabelle 3-13 werden die Simulationsresultate auf Basis des Referenzbetriebstags (28.01.2016) für einen Bus mit einer 90 kWh-, 120 kWh- und einer 480 kWh-Batterie (technologischer Stand des Jahres 2017) gezeigt. Weiterhin ist die 300 kW-Ladetechnik an sechs Ladehaltestellen zugrundegelegt.

Tabelle 3-13: Simulationsergebnisse zu Testinstanz 1 (%-Werte ggü. Klima_ aus-Szenario)

| | Bat [kWh] | aus | H | % | S | % | W | % |
|---|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Energie Bus [kWh/km] | 90 | 1,67 | 2,12 | +26,7 | 2,17 | +30,2 | 2,71 | +62,2 |
| | 120 | 1,71 | 2,15 | +25,6 | 2,21 | +29,2 | 2,74 | +60,3 |
| | 480 | 2,10 | 2,49 | +18,6 | 2,57 | +22,4 | 3,10 | +47,6 |
| Energie/Tag Bus [kWh] | 90 | 311 | 393 | | 404 | | 504 | |
| | 120 | 318 | 399 | | 410 | | 509 | |
| | 480 | 391 | 463 | | 478 | | 577 | |
| Klimabedarf/Tag [kWh] (%-Werte ggü. Herbst-Szenario) | 90 | | | | | | | |
| | 120 | 0 | 75 | | 86 | +15 | 191 | +155 |
| | 480 | | | | | | | |
| Lebensdauer [Jahre] | 90 | 9,62 | 8,77 | -8,8 | 8,40 | -12,7 | 8,26 | -14,1 |
| | 120 | 10,87 | 10,20 | -6,1 | 9,43 | -13,2 | 9,17 | -15,6 |
| | 480 | 13,73 | 13,56 | -1,2 | 13,16 | -4,1 | 13,16 | -4,1 |

Die Simulationen bestätigen, dass die Winterbedingungen für den E-Busbetrieb als besonders herausfordernd zu bezeichnen sind. Der Sommer-Fall bildet energetisch einen Mittelweg zwischen Herbst und Winter. Anhand von Korrelationsanalysen wird ein steigender Energiebedarf sowie eine sinkende Batteriebensdauer bei Erhöhung der Klimatisierungsleistung allgemein bestätigt. Für den Betrachtungsfall der Linie 63 ergibt sich im Allgemeinen durch lineare Regression, anhand der Simulationsergebnisse verschiedener Parameterkonfigurationen, dass eine Erhöhung des täglichen Klimatisierungsbedarfs um 50 kWh den Energiebedarf je Kilometer um 0,285 kWh steigert und zu einer Reduktion der Batteriebensdauer von 0,59 Jahren führt. Aus den hier vorgenommenen Simulationen wird anhand der Ergebnisse von Tabelle 3-13 ebenso klar, was die Systemanforderungen für einen E-Busbetrieb ohne Gelegenheitsladen, also mit ausschließlichem Übernachtsladen wären. Eine hierzu unter Herbstklimaverhältnissen beispielhaft durchgeführte Simulation mit einer 540 kWh-Batterie mit 100 %-igem Nettokapazitätsintervall (Gewicht 6.600 kg) ergab einen Energiebedarf von 2,57 kWh/km und eine Lebensdauer von 10,1 Jahren. Es wird ersichtlich, dass für die Linie 63 zu den Standard-Betriebstagsbedingungen, insbesondere bei härteren klimatischen Anforderungen, das Übernachtsladen keine reale Option darstellt.

TestszENARIO 2: Auswirkungen des Verkehrseinflusses

Da bisher nur der sogenannte Standardbetriebstag (28.01.2016) die Datenbasis für Simulationen bildete, sollen vergleichend hierzu weitere Betriebstage, zu denen ebenso GPS-Messungen vorliegen (Tabelle 3-1), simulativ ausgewertet werden. Durch den Vergleich unterschiedlicher Tage lässt sich der Einfluss des Verkehrs und weiterer betrieblicher Rahmenbedingungen veranschaulichen, siehe Tabelle 3-14. Hierdurch ergibt sich die Möglichkeit, anhand einer Vielzahl simulierter Betriebstage, das Szenario, nach welchem eine Buslinie ausgelegt werden soll, einzuordnen oder durch Gewichtung sowie Mittlung der Werte zu erstellen.

Tabelle 3-14: Auswirkungen Verkehrseinfluss unterschiedlicher Betriebstage auf E-Busbetrieb, Batterie: 120 kWh, 300 kW (%-Werte ggü. 28.01.2016)

| Betriebstage | | Herbst (2016) | | | Winter (2016) | | |
|-------------------|--------|---------------|--------|--------|---------------|--------|--------|
| | | 28.01. | 04.03. | 07.03. | 28.01. | 04.03. | 07.03. |
| Energiebedarf | kWh/km | 2,15 | 2,19 | 2,16 | 2,74 | 2,66 | 2,66 |
| Veränderung | % | | +1,9 | +0,5 | | -2,9 | -2,9 |
| Energie/Tag Bus | kWh | 399 | 411 | 406 | 509 | 500 | 500 |
| Lebensdauer | Jahre | 10,20 | 10,15 | 10,20 | 9,17 | 9,16 | 9,17 |
| Veränderung | % | | -0,5 | 0 | | -0,1 | 0 |
| Betriebstagsdauer | hh:mm | 14:32 | 13:57 | 14:20 | 14:32 | 13:57 | 14:20 |
| Ladedauer | hh:mm | 02:41 | 02:50 | 02:39 | 02:41 | 02:50 | 02:39 |
| Ladeanteil | % | 18,5 | 20,2 | 18,5 | 18,5 | 20,2 | 18,5 |

Es stellt sich heraus, dass sich die drei betrachteten Betriebstage sehr ähnlich sind. Zur Bestätigung der genauen Repräsentativität für die Linie 63 bedarf es allerdings einer größeren Stichprobe an Betriebstags-Messdaten.

TestszENARIO 3: Gefäßgrößenvariation – 18-m-Bus

Ähnlich zur Testinstanz 1 und Tabelle 3-13 sollen hier Energiebedarfe und Batteriealterungsfaktoren für einen 18-m-Bus als Fahrzeugvariation vorgestellt werden. Die Fahrzeugparameter des 18-m-Busses finden sich im Anhang A.5.

Tabelle 3-15: Simulationsergebnisse für einen 18-m-Bus (%-Werte beziehen sich auf Veränderung ggü. 12-m-Bus aus Tabelle 3-13)

| | Bat [kWh] | aus | % | H | % | W | % |
|--|-----------|------|-------|------|-------|------|--------|
| Energie Bus [kWh/km] | 90 | 1,85 | 9,7 | 2,36 | 10,4 | 3,19 | 15,1 |
| | 120 | 1,90 | 10,1 | 2,41 | 11,0 | 3,22 | 15,0 |
| | 480 | 2,44 | 13,9 | 2,95 | 15,6 | 3,94 | 21,3 |
| Energie/Tag Bus [kWh] | 90 | 344 | | 439 | | 593 | |
| | 120 | 353 | | 448 | | 599 | |
| | 480 | 454 | | 549 | | 733 | |
| Klimatisierungsbedarf/Tag [kWh] | 90 | | | | | | |
| | 120 | 0 | | 95 | 26,7 | 275 | 44,0 |
| | 480 | | | | | | |
| Lebensdauer [Jahre] | 90 | 6,4 | -51,3 | 5,5 | -58,7 | 3,3 | -147,0 |
| | 120 | 7,6 | -43,8 | 6,9 | -46,9 | 4,4 | -109,1 |
| | 480 | 13,2 | -4,1 | 12,9 | -4,4 | 12,5 | -5,3 |

Beim Vergleich des 12-m- mit dem 18-m-Bus ist festzustellen, dass ein Energiemehrbedarf zwischen 10 und 20 % auftritt. Wie in Kapitel 3.5.1 beschrieben, zeigen die geringeren Batteriekapazitäten deutlich stärkere Alterungserscheinungen durch die steigende Beanspruchung, als dies bei großen Batteriekapazitäten der Fall ist.

Testscenario 4: Weiterentwicklung der Batterietechnologie

Im Rahmen dieser Testinstanz wird die Auswirkung unterschiedlicher Batterieentwicklungsprozesse dargestellt. Tabelle 3-16 zeigt für eine 90 kWh-Batterie, wie sich Energiedichten, Energiebedarfe und Alterungsfaktoren über die Zeit weiterentwickeln. Die Daten für die Jahre 2017 und 2025 basieren auf den in Kapitel 3.3.3.1 recherchierten Entwicklungsprognosen. Die Daten zum sogenannten Technologiestand 2025++ unterstellen einen theoretischen, sehr großen Entwicklungssprung, zum Beispiel durch das Auftauchen neuer Zellchemien. Auch wenn gemäß Kapitel 1.3 in der Praxis hiermit bis ins Jahr 2025 nicht zu rechnen ist, so soll diese Annahme einen Extremfall abbilden.

Tabelle 3-16: Simulationsresultate Weiterentwicklung Batterietechnologie (Energiebedarfe/
Lebensdauerberechnungen mit 90 kWh-Batterie, 300 kW Laden, 6 Ladestationen)

| | Einheit | 2017 | 2025 | % | 2025++ | % |
|--------------------------|---------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Energiedichte | Wh/kg | 100 | 250 | +150% | 500 | +400% |
| Anzahl Vollzyklen | | 4.300 | 6.300 | +46,5% | 6.300 | +46,5% |
| kalendar. Alter | Jahre | 15 | 19 | +26,6% | 19 | +26,6% |
| Energiebedarf | kWh/km | 2,07 | 1,97 | -4,8% | 1,95 | -5,8% |
| Energiebedarf Bus | kWh | 385 | 366 | | 362 | |
| Lebensdauer | Jahre | 8,7 | 11,8 | +34,6% | 12,0 | +37,8% |

Die Auswirkungen des geringeren Batteriegewichts auf den Energiebedarf sowie die Steigerung der Anzahl an Vollzyklen und des kalendarischen Alters auf die Lebensdauer stellen sich im überschaubaren Maße positiv dar.

TestszENARIO 5: Buslinien 53 und 60

Um die Übertragbarkeit der Simulationsumgebung auf andere Linien unter Beweis zu stellen, werden im vorliegenden TestszENARIO die Mannheimer Buslinien 53 und 60 für verschiedene Betriebstage einer Simulation und Analyse unterzogen (Tabellen Tabelle 3-17 und Tabelle 3-18). Da es zur Sicherstellung des Betriebs erforderlich ist, wird für beide Linien ein 500 kW-Ladesystem hinterlegt und die Anzahl an Ladehaltestellen gegenüber der Linie 63 deutlich erhöht.

Tabelle 3-17: Simulationsergebnisse zur Buslinie 53 (120 kWh-Batterie, 500 kW-Ladesystem an 10 Ladehaltestellen)

| | | Herbst (2015) | | | Winter (2015) | | |
|--------------------------|--------|---------------|--------|--------|---------------|--------|--------|
| | | 16.02. | 17.02. | 27.02. | 16.02. | 17.02. | 27.02. |
| Energie Bus | kWh/km | 1,84 | 1,89 | 1,92 | 2,25 | 2,31 | 2,32 |
| Delta ggü. 16.02. | % | | +2,7 | +4,3 | | +2,7 | +3,1 |
| Energie/Tag Bus | kWh | 542 | 554 | 565 | 663 | 677 | 682 |
| HVAC-Energie/Tag | kWh | 72 | 71 | 77 | 201 | 199 | 204 |
| Lebensdauer | Jahre | 8,6 | 8,6 | 6,4 | 6,7 | 7,2 | 4,6 |
| Betriebstagsdauer | hh:mm | 14:46 | 14:43 | 14:59 | 14:46 | 14:43 | 14:59 |
| Ladedauer | hh:mm | 01:58 | 02:11 | 01:54 | 01:58 | 02:11 | 01:54 |
| Ladeanteil | % | 13,3 | 14,9 | 12,7 | 13,3 | 14,9 | 12,7 |

Tabelle 3-18: Simulationsergebnisse zur Buslinie 60 (120 kWh-Batterie, 500 kW-Ladesystem an 12 Ladehaltestellen)

| | | Herbst (2015) | | | Winter (2015) | | |
|--------------------------|--------|---------------|--------|--------|---------------|--------|--------|
| | | 18.02. | 19.02. | 20.02. | 18.02. | 19.02. | 20.02. |
| Energie Bus | kWh/km | 2,36 | 2,40 | 2,44 | 2,77 | 2,83 | 2,84 |
| Delta ggü. 18.02. | % | | +1,7 | +3,4 | | +2,2 | +2,5 |
| Energie/Tag Bus | kWh | 519 | 501 | 511 | 609 | 591 | 595 |
| HVAC-Energie/Tag | kWh | 82 | 81 | 73 | 189 | 180 | 180 |
| Lebensdauer | Jahre | 8,1 | 8,3 | 8,1 | 5,3 | 5,7 | 5,2 |
| Betriebstagsdauer | hh:mm | 14:06 | 13:26 | 13:27 | 14:06 | 13:26 | 13:27 |
| Ladedauer | hh:mm | 02:18 | 02:20 | 02:05 | 02:18 | 02:20 | 02:18 |
| Ladeanteil | % | 16,4 | 17,4 | 15,5 | 16,4 | 17,4 | 15,5 |

Vergleicht man die mittleren Energiebedarfe der gezeigten kWh/km-Werte der drei Linien 53, 60 und 63 (Tabelle 3-14) jeweils für Herbst und für Winter und für die 120 kWh-Batterie, so stellt sich heraus, dass die Linie 53 28 % (H) bzw. 23 % (W) weniger Energie gegenüber der Linie 60 und 15 % (H) bzw. 17 % (W) weniger im Vergleich zur Linie 63 benötigt. Die Linie 60 benötigt 10 % (H) bzw. 4 % (W) mehr Energie als die Linie 63. Dies verdeutlicht, die durch Tabelle 3-1 bereits dargestellten unterschiedlichen Charakteristika der drei Linien in Bezug auf deren Energiebedarfe und zeigt die Bandbreite der Anforderungen an die Konfiguration von E-Buslinien auf.

Sensitivitätsanalysen

Abschließend werden, um die wesentlichen Erkenntnisse aus den vorgestellten Simulationen zusammenzufassen, zwei Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Abbildung 3-32 analysiert hierbei die Auswirkung variierender Parameter auf den Energiebedarf, Abbildung 3-33 die auf die Batterielebensdauer.

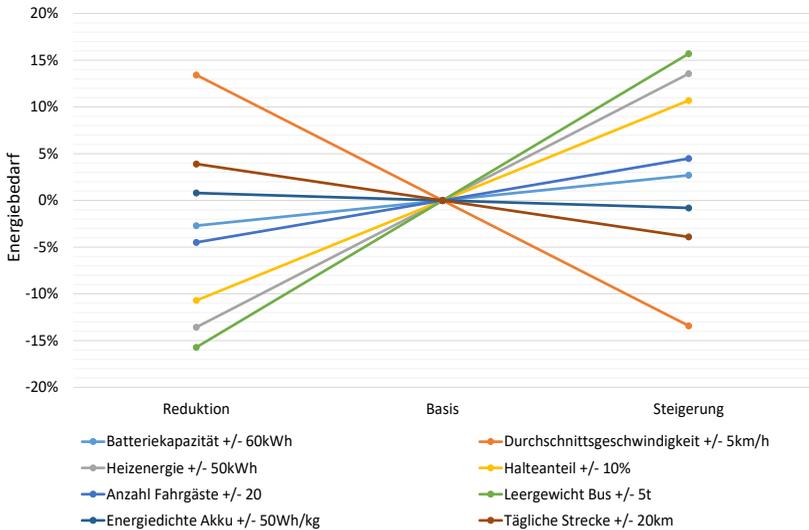


Abbildung 3-32: Sensitivitätsanalyse Energiebedarf (Herbst-Szenario, 90 kWh Batterie, 300 kW Ladeleistung)

Als besondere Treiber des Energiebedarfs stellen sich demnach die Durchschnittsgeschwindigkeit, das Fahrzeuggewicht, die Effizienz der Nebenverbraucher am Beispiel der Heizung sowie der Anteil Standzeit am Betriebstag dar. Das Batteriegewicht, die genaue tägliche Fahrstrecke sowie die Variation der Anzahl durchschnittlicher Fahrgäste haben hingegen nur eine geringe Auswirkung.

Möchte man die Batteriealterung positiv beeinflussen, so empfiehlt sich eine Steigerung der Ladedauer und der Einsatz großer Batteriekapazitäten. Die gewählte Ladeleistung hat hingegen nur einen überschaubaren Einfluss.

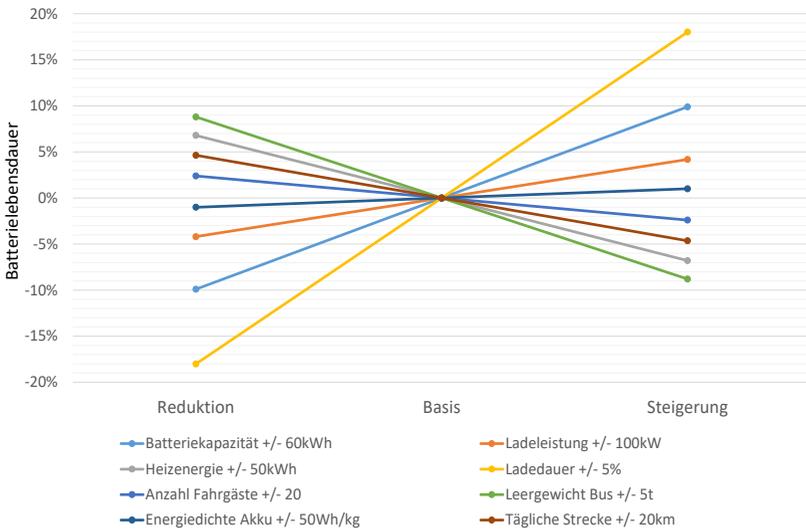


Abbildung 3-33: Sensitivitätsanalyse Batteriealterung (Herbst-Szenario, 90 kWh-Batterie, 300 kW Ladesystem)

3.5.3 E-Bus-Systemauslegung anhand technischer Daten

Wie in den beiden vorhergehenden Kapiteln bereits deutlich wird, erlaubt die vorgestellte Simulationsumgebung eine E-Bus-Linienauslegung durch die Variation rein technischer Parameter. Wesentliches Ziel bei einer derartigen Auslegung ist die Bestimmung der Batteriekapazität, des Ladesystems und die Anzahl zu errichtender Ladestationen. Hierbei soll eine Konfiguration ermittelt werden, die eine möglichst hohe Energieeffizienz bei gleichzeitig geringer Batteriealterung ermöglicht. Um dies methodisch strukturiert und effizient zu gestalten, bieten sich verschiedene Methoden zur Mehrzieloptimierung an. Tesar gibt hierüber einen Überblick und wendet im konkreten Fall die Pareto-Optimierung auf Basis einer Partikelschwarm-Optimierung an [280]. Dem Solver des Optimierungsverfahrens werden als einsetzbare Batteriekapazitäten 60, 90, 120, 240 und 480 kWh mit einer

Energiedichte von 100 Wh/kg (entspricht Stand 2017) angeboten. Weiterhin kann er zwischen einem 200 kW-induktivem oder einem 200, 300 oder 500 kW-konduktivem Ladesystem wählen. Die Auswahl zu bauender Ladestationen reicht von null (entspricht Übernachtladen) bis zehn. Hierbei wird der Bau von Ladestationen mit einem Strafterm hinterlegt, um zu erreichen, dass möglichst wenige davon gebaut werden.

Die im Zuge der Optimierung, unter Variation der genannten Eingangsparameter, getätigten Simulationen beziehen sich auf den bekannten Standardbetriebstag der Linie 63 unter Winterbedingungen, um hierdurch den Worst-Case-Fall abzudecken. Abbildung 3-34 zeigt die Ausbildung einer Pareto-Front durch die grün markierten Punkte. Für diese gilt, dass die Verbesserung eines Optimierungsziels (Energiebedarf oder Batterielebensdauer) nur noch durch die Verschlechterung des anderen erreicht werden kann.

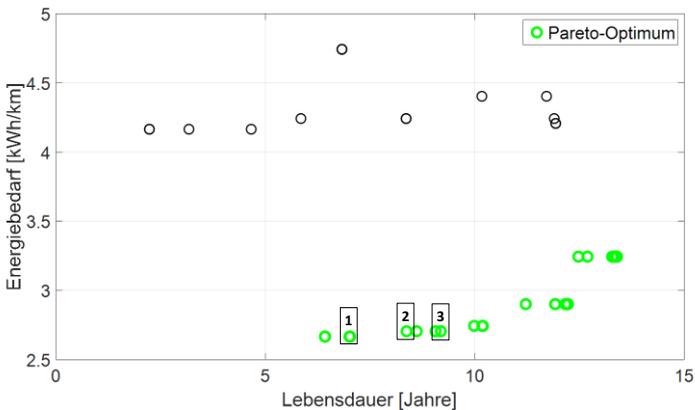


Abbildung 3-34: Pareto-Optimierung der technologischen Auslegung für die Linie 63

Zur genaueren Erklärung von Abbildung 3-34 dient Tabelle 3-19, mit Hilfe derer exemplarisch drei pareto-optimale Punkte näher beschrieben werden. Es obliegt dem individuellen Anwender und seiner genauen Abwägung, für

welche der vorgeschlagenen gleich guten Alternativen der Paretofront er sich bei der praktischen Auslegung entscheiden möchte.

Tabelle 3-19: Datenpunkte Paretooptimierung gemäß Markierungen in Abbildung 3-34

| | | Punkt 1 | Punkt 2 | Punkt 3 |
|--------------------------------|--------|----------------|----------------|----------------|
| Batteriekapazität | kWh | 60 | 90 | 90 |
| Ladeleistung | kW | 300 | 200 | 300 |
| Anzahl Ladehaltestellen | | 10 | 8 | 10 |
| Energiebedarf Bus | kWh/km | 2,67 | 2,71 | 2,71 |
| Lebensdauer | Jahre | 7,0 | 8,4 | 9,2 |

Durch eine Vergrößerung der Batteriekapazität zwischen Punkt 1 und Punkt 2, von 60 auf 90 kWh, steigt der Energiebedarf, aber auch die Batterie-lebensdauer. Wie in Kapitel 3.5.1 herausgearbeitet wurde, führt zwischen Punkt 2 und 3 die Erhöhung der Anzahl an Ladestationen ebenfalls zu einer Verlängerung der Nutzungsdauer der Batterie. Um möglichst optimale Ergebnisse zu erreichen, wählt der Solver eine höhere Anzahl an Ladestationen, als dies gemäß den Ergebnissen aus Kapitel 3.5.1 notwendig ist. Insgesamt kommt zum Ausdruck, dass sich nur auf Basis technischer Parameter eine E-Buslinie methodisch so optimieren lässt, dass der Betrieb gewährleistet werden kann. Um diese Optimierung als praktische Entscheidungshilfe nutzen zu können, muss beim Anwender allerdings viel Wissen vorausgesetzt werden. Die finale Entscheidung zur Konfiguration einer Linie liegt alleine bei ihm. Ohne die Hinzunahme betriebswirtschaftlicher Größen kann die Aussagekraft des Optimierungsergebnisses, im Hinblick auf bestehende monetäre Budgetrestriktionen, als gering eingeschätzt werden, wie das Beispiel der Wahl der Anzahl an Ladestationen zeigt.

4 Ökonomisches Modell

Auf Basis der im Kapitel 2.4 geschaffenen ökonomischen Grundlagen werden nachfolgend konkrete TCO-Berechnungen für den E-Bus-Einsatz durchgeführt. Als zweite Säule des techno-ökonomischen Ansatzes dienen sie der Vorbereitung auf die in Kapitel 5 und 6 durchzuführenden Optimierungen. Zuerst werden unterschiedliche Zukunftsszenarien definiert, mit deren Hilfe eine Bandbreite von Ergebnissen ermittelt und miteinander verglichen werden kann. Daraufhin werden die wesentlichen für die Berechnungen benötigten Inputdaten vorgestellt⁴⁵. Hierbei und bei den sich anschließenden Berechnungen dieses Kapitels ist es nicht die Absicht, exakte Zukunftsprognosen über Preisentwicklungen anzustellen. Vielmehr sollen die Möglichkeiten der TCO-Rechnung anhand von Beispielwerten vorgestellt und so ein Intervall möglicher Tendenzen aufgezeigt sowie Größenordnungen vermittelt werden. Die verwendeten Beispielwerte beschränken sich auf die Betrachtung der Mannheimer Linie 63 und den dazugehörigen Elektrobus-Typus gemäß Tabelle 2-4.

4.1 Struktur der TCO-Modellierung und Softwareeinsatz

Wie in den Grundlagen beschrieben, gestaltet sich die Ermittlung der wahren TCO als zweistufiger Prozess, bei welchem zunächst die klassischen TCO nach Ellram [231] ermittelt und in der Folge die externen Kosten hinzugerechnet

⁴⁵ Kostenfaktoren, die unabhängig vom gewählten Antriebssystem betriebsimmanent auftreten (Fahrer, Verwaltung), werden nicht mit in die Kostenanalyse einbezogen.

werden können.⁴⁶ Abbildung 4-1 veranschaulicht die Gesamtstruktur der Modellierung und die sie aufbauenden Teilkomponenten.

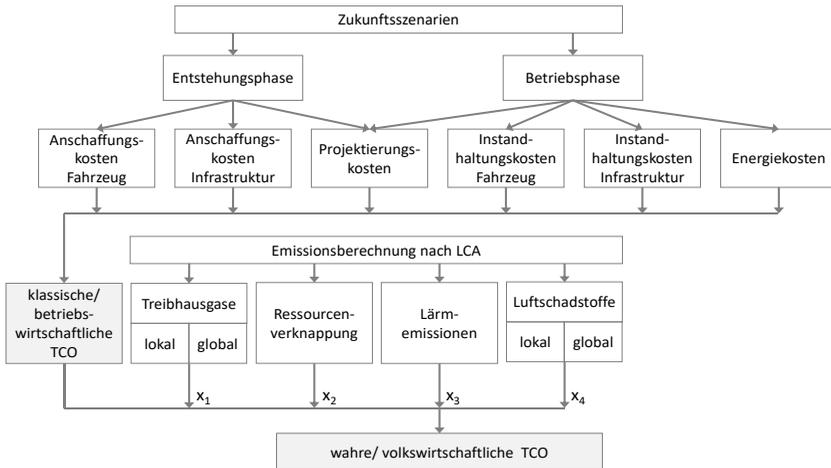


Abbildung 4-1: Zusammensetzung der klassischen und der wahren TCO, i. A. a. [247]⁴⁷

Die Inputdaten der jeweiligen Kostenkomponenten werden über eine wie in Kapitel 3.2.3 eingeführte Excel-GUI durch den Nutzer in einheitliche Tabellen geschrieben und gespeichert. Mittels in VBA implementierter Programmabläufe erfolgt daraufhin eine automatisierte Verrechnung der Inputwerte. Die Rechenergebnisse werden derart aufbereitet, dass sie der sich anschließenden Gesamtsystem-Optimierung als Eingabegrößen zur Verfügung stehen.

⁴⁶ Da keine validen Erkenntnisse über die Weiternutzung gebrauchter Fahrzeuge und Batterien vorliegen, wird die Phase der Entsorgung im Weiteren nicht berücksichtigt.

⁴⁷ Parameter x zur Variation der Tragweite der jeweiligen externen Effekte

4.2 Szenarienbildung und Generierung von Inputdaten

Zur Ermittlung der benötigten Inputdaten bedarf es umfassender Recherchen. Wie im Einleitungskapitel 1.3 dargestellt wurde, befindet sich der E-Bus-Sektor in seiner Gesamtheit noch in einer frühen Phase des Produktlebenszyklus. Dies impliziert, dass für viele Teilkomponenten bzw. Teilsysteme keine Marktpreise verfügbar sind. Zudem handelt es sich beim Stadtbusmarkt um einen sogenannten Business-to-Business-Markt. Daher gestalten sich Kosten- sowie Datenrecherchen auf Komponentenebene entweder als ergebnislos oder sie ergeben nur wenige und damit kaum repräsentative Ergebnisse. Andererseits besteht das grundlegende Problem der Ungenauigkeit von Prognosen. Um diesen unvollständigen bzw. eingeschränkten Informationen auf der Kostenseite zu begegnen, wird die Methodik der Szenariotechnik aus der Strategischen Planung angewandt [281]. Zudem werden Annahmen getroffen, soweit keine Daten vorliegen. Grundlegend wird für alle nachfolgenden Betrachtungen ein zeitlicher Horizont von 20 Jahren festgelegt, mit dem Basisjahr 2017⁴⁸. Insgesamt werden drei Szenarien aufgebaut, da so ein überschaubarer Korridor zur Zukunftsprognose im Verhältnis zum Basisszenario zur Verfügung gestellt werden

⁴⁸ Gemäß VDV wird für Dieselbusse eine Nutzungsdauer von 12 bis 14 Jahren empfohlen, wobei darauf verwiesen wird, dass höhere Instandhaltungskosten längere Nutzungsdauern ermöglichen [49]. In der Praxis ist, nach Erkenntnissen des Autors, von 10-jährigen Nutzungsdauern auszugehen. E-Busse unterliegen, ob ihrer geringeren Anzahl mechanischer Bauteile, einem geringeren Verschleiß als Dieselbusse. Abgeleitet von der Lebensdauer von O-Bussen, die i. d. R. bei 20 Jahren liegt [108], ist davon auszugehen, dass E-Busse eine deutlich längere Nutzungsdauer als Dieselbusse aufweisen. Mangels Praxiserfahrungswerten und um die Vergleichbarkeit zur konventionellen Antriebstechnik zu vereinfachen, wird im Weiteren davon ausgegangen, dass der batterieelektrische Bus (ausgenommen der Batterie) eine dem O-Bus entsprechende Nutzungsdauer von 20 Jahren und der Dieselbus eine von 10 Jahren aufweist. Bei einem Betrachtungszeitraum von 20 Jahren müssen entsprechend zwei Dieselbusse neu angeschafft werden. Für die Ladeinfrastruktur wird von einer 20-jährigen Nutzungsdauer ausgegangen.

kann. Durch dieses Intervall, das sich in einer Bandbreite von plus (sog. Optimistisches Szenario) bzw. minus (sog. Pessimistisches Szenario) 30 % um die Werte des Basisszenarios bewegt, kann der Betrachter eigenständig seine individuelle Zukunftsprognose eingrenzen. Wesentliche Grundlage für die nachfolgende Kostenbetrachtung und die Bestimmung der Szenarien ist der in Kapitel 2.4.1 eingeführte Zusammenhang zwischen der Kostenentwicklung und den zukünftigen Stückzahlen über die Lernkurve.

4.2.1 Kostenentwicklungen

Da aufgrund einheitlicher EU-Vorschriften für Fahrzeugzulassungen [169] und durch hohe Kundenansprüche sowie Zahlungsbereitschaft der europäische Busmarkt (EU-27 inklusive Norwegen und Schweiz) als annähernd homogen angesehen wird, soll dieser als Basis für weitere Stückzahlabschätzungen herangezogen werden. Nach Zahlen aus dem Jahr 2012 werden auf dem genannten Markt pro Jahr rund 12.500 Stadtbusse neu zugelassen [39]. Aufgrund steigender Nachfrage nach dem ÖPNV, siehe Tabelle 1-1, wird davon ausgegangen, dass die Neuzulassungen bis 2030 auf 14.000 Fahrzeuge p. a. steigen werden [39]. Basierend auf Marktanalysen von Kunith [59], wird konservativ mit jährlich 2.000 E-Bus-Neuzulassungen im Jahr 2025 gerechnet. Durch eine lineare Extrapolation ergibt sich, basierend auf den genannten Zulassungszahlen und der Annahme, dass der europäische E-Busmarkt im Jahr 2012 aus 20 Fahrzeugen bestand, die in Tabelle 4-1 prognostizierte Marktentwicklung für alle Stadt- und insbesondere E-Busse. Die Energiepreisprognose für das Basisszenario wird in Anlehnung an [282] durch Tabelle 4-2 vorgestellt.

Tabelle 4-1: Basisszenario Neuzulassungen von Stadtbusen in EU27 p. a.

| | 2017 | 2027 | 2037 |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|
| Gesamtzahl Stadtbusse | 13.100 | 13.850 | 14.440 |
| davon E-Busse | 150 | 2.500 | 4.050 |
| % E-Busse von Gesamtzahl | 1 % | 18 % | 28 % |
| kumulierte produzierte E-Busse | 630 | 13.430 | 47.161 |

Tabelle 4-2: Extrapolierte Energiekostenentwicklung des Basisszenarios (exkl. Mehrwertsteuer)

| Energieträger | | 2017 | 2027 | 2037 |
|---------------|--------|-------|-------|-------|
| Diesel | €/l | 1,02 | 1,13 | 1,21 |
| Strom | ct/kWh | 12,50 | 13,16 | 13,49 |

Die Kostenprognosen zu der betrachteten Li-Ion-Zellchemie beruhen auf [36]. Die Bandbreite der hier genannten und in Tabelle 4-3 aufgelisteten Preisentwicklungen für Batteriezellen werden konservativ bewertet und linear extrapoliert. Die aufgeführten Preise decken sich tendenziell auch mit prognostizierten Kostenentwicklungen von [92] und [282]. Da, wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, die Zellen Teil eines Batteriegesamtsystems (Package) sind, muss, um dessen Kosten zu berücksichtigen, ein Faktor in der Größenordnung von 1,5 auf die Zellpreise aufgeschlagen werden [36, 92].

Tabelle 4-3: Prognostizierte Batteriepreisentwicklung (nicht inflationsbereinigt)

| | Symbol | | 2017 | 2027 | 2037 |
|---------------|----------------------------|-------|------|------|------|
| Zellpreise | $K_{\text{Batteriezelle}}$ | €/kWh | 360 | 230 | 100 |
| Packagepreise | $K_{\text{Batteriepack}}$ | €/kWh | 540 | 345 | 150 |

Für die folgenden Kostenanalysen wird der Bus in die Subsysteme Grundfahrzeug (Fahrzeuggrundpreis ohne Antriebsstrang), Batterie, Antrieb (E-Motor mit Getriebe und Leistungselektronik) sowie HVAC aufgeteilt. Diese Aufteilung rührt daher, dass es sich bei den elektrischen Systemen in der Regel um Zukaufteile handelt, mit jeweils eigenen Reifegraden und eigener Preisdynamik. Ergänzt um einen jährlichen Pauschalbetrag für die Instandhaltung, finden sich recherchierte Kosten zu den jeweiligen Komponenten für einen 12-m-Bus in Tabelle 4-4 als Basisszenario wieder. Entsprechend den Ausführungen zur Bestimmung zukünftiger Preisentwicklungen nach Kapitel 2.4.1, werden in nachfolgenden Tabellen individuelle Erfahrungskoeffizienten (LR für Lernrate) angegeben, welche die zu erwartende Kostendegression der neuen Technologien widerspiegeln sollen.

Tabelle 4-4: Anschaffungskosten E-Buskomponenten zum Stand 2017 (LR: Lernrate)

| Teilsystem | Symbol | AK | | LR [%] | Quelle |
|----------------------------|--------------------|---------|-----|--------|--------|
| Fahrzeug-Grundpreis | $K_{EBuSGrundfzg}$ | 280.000 | € | 5 | [283] |
| Antrieb | $K_{EBuSAntrieb}$ | 105.000 | € | 10 | [108] |
| HVAC | $K_{EBuSHVAC}$ | 20.000 | € | 10 | [283] |
| Instandhaltung | $K_{EBuSInstand}$ | 8.000 | €/a | 10 | [215] |

Weiterhin listet Tabelle 4-5 die Basisszenario-Kosten für die Ladeinfrastruktur verschiedener Ladesysteme auf, wozu auch deren fahrzeugseitige Komponenten (Ladeschnittstelle und Gleichrichter) gehören. Die Kosten der Personalaufwände für Voruntersuchungen, Systemauslegung, Projektmanagement, Schulungen und Verwaltung sowie für die Umrüstungen von Werkstätten sollen zur Vereinfachung durch die genannten Planungskosten pauschal abgegolten sein. Werte für die sich über den Betrachtungszeitraum ändernden Beschaffungspreise (Inflationsatz⁴⁹) sowie einen Zinssatz für alternative Investitionsmöglichkeiten (Opportunitätszinssatz) zur Berechnung des Barwerts führt Tabelle 4-6 auf.

Tabelle 4-5: Anschaffungs- und Installationskosten je Ladestationstyp

| | Teilsystem | Symbol | AK | | LR [%] | Quelle |
|-----------|--------------------------------|---------------------|---------|-----|--------|--------|
| konduktiv | Pantograph (200 kW) | $K_{Panto200}$ | 180.000 | € | 20 | [59] |
| | Pantograph (300 kW) | $K_{Panto300}$ | 280.000 | € | 20 | [59] |
| | Pantograph (500 kW) | $K_{Panto500}$ | 380.000 | € | 20 | [59] |
| | Stecker (100 kW) | $K_{Steck100}$ | 35.000 | € | 5 | [59] |
| | Montage | $K_{kLad_Montage}$ | 20.000 | € | 10 | Ann. |
| | Ladesystem Fzg Pantograph | $K_{kLad_PantoFzg}$ | 15.000 | € | 20 | [59] |
| | Ladesystem Fzg Steck | $K_{kLad_SteckFzg}$ | 5.000 | € | 10 | [59] |
| induktiv | Ladesystem (200 kW) | K_{iLad} | 240.000 | € | 25 | [59] |
| | Montage | $K_{iLad_Montage}$ | 30.000 | € | 15 | Ann. |
| | Ladesystem Fzg | $K_{iLadFzg}$ | 60.000 | € | 20 | [59] |
| allgem. | Ø-Wert Netzanschluss (AC & DC) | $K_{Netzanschluss}$ | 25.000 | € | 5 | Ann. |
| | Planungskosten | $K_{infraPlan}$ | 10.000 | € | 10 | Ann. |
| | Instandhaltung | $K_{infraInstand}$ | 5.000 | €/a | 10 | [215] |

⁴⁹ Ergibt sich aus dem durchschnittlichen Inflationswert der Jahre 2006 bis 2015.

Tabelle 4-6: Daten zur Errechnung der Investitionskosten

| | Symbol | Wert | | Quelle |
|------------------------------|---------------------------|------|-----|--------|
| Inflationssatz | $Z_{\text{Inflation}}$ | 1,47 | %/a | [284] |
| Opportunitätszinssatz | $Z_{\text{Opportunität}}$ | 3,0 | %/a | Ann. |

Um die für den Elektrobus berechneten TCO besser einordnen zu können, sollen auch die TCO für einen Dieselbus errechnet werden. Der Vergleich der Kosten mit dem Dieselbus soll auch dazu dienen, die für eine betriebswirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit beschriebene Notwendigkeit einer Kostenoptimierung des E-Bus-Systems zu untermauern. In diesem Zusammenhang werden in Tabelle 4-7 Kostenwerte für einen Diesel-Stadtbuss aufgelistet⁵⁰.

Tabelle 4-7: Kostenparameter TCO-Berechnung Diesel-Stadtbusse

| Parameter | Symbol | Wert | | Quelle |
|--|----------------------------|--------------------|----------|--------|
| Anschaffungskosten | $K_{\text{Dieselbus}}$ | 240.000 | € | [282] |
| Durchschnittlicher Kraftstoffbedarf | b_{Diesel} | 45 | l/100 km | [282] |
| AdBlue-Verbrauch | b_{AdBlue} | 2,25 | l/100 km | [285] |
| AdBlue-Kosten | K_{AdBlue} | 0,60 ⁵¹ | €/l | [286] |
| anteilige Kosten Depot-Tankstelle | $K_{\text{DieselTank}}$ | 2.000 | €/a | Ann. |
| Instandhaltungskosten | $K_{\text{DieselInstand}}$ | 15.000 | €/a | [187] |

4.2.2 Emissionen und Emissionskosten

Für die Ermittlung der Emissionswerte der Fahrzeug- und Energieproduktion wird auf Zahlen der Ökobilanzdatenbanken Ecolivent [287] und ProBas [288] zurückgegriffen. Sofern keine speziellen Werte für den E-Bus vorliegen, werden diese anhand vorhandener Daten für Diesel- oder Wasserstoffbusse bzw. aus dem Verhältnis zwischen Diesel- und E-Pkw abgeleitet [247, 289].

⁵⁰ Kunith folgend wird davon ausgegangen, dass im Falle der Dieselbus-Technologie keine signifikanten Kostendegressionen mehr zu erwarten sind [59]. Daher wird auf die Berücksichtigung einer Lernrate verzichtet.

⁵¹ exkl. Mehrwertsteuer

Tabelle 4-8 dient dazu, gemäß des LCA (Kapitel 2.4.2.1), die Quellen der Emissionen aufzuschlüsseln und nach Lebenszyklusphase sowie globaler bzw. lokaler Wirkung zu clustern. Die für die weiteren Berechnungen benötigten massen- bzw. energieabhängigen Emissionen an CO₂, NO_x, HC, SO₂, CO, CH₄, PM_{>10}, PM_{>2,5}, PM_{<2,5} je Verursacher werden in Abbildung A-9 im Anhang detailliert einander zugeordnet. Die Erzeugung der elektrischen Energie kann über unterschiedliche Zusammensetzungen erfolgen, wie Abbildung 7-8 aufzeigt. Der Grüne Mix setzt sich ausschließlich aus regenerativen Energien zusammen. Es wird angenommen, dass die in Tabelle 4-2 aufgeführten Energiepreise auch für diesen Grünen Mix gelten.

Tabelle 4-8: Treibhausgas- und Luftschadstoff-Emissionsquellen, Parameternamen (massebezogen in kg) und Auftretungsort

| Lebenszyklus | Emissionsquelle | Symbol | global | lokal |
|--------------|---|--------------------|--------|-------|
| Prod. | E-Bus (ohne Batterie) | $m_{ProdEBus}$ | x | |
| | Li-Ion Batterien | $m_{ProdBatterie}$ | x | |
| | Ladestation | $m_{ProdLade}$ | x | |
| | Dieselbus | $m_{ProdDBus}$ | x | |
| Betrieb | Wartung E-Bus über Lebensdauer | $m_{InstandEBus}$ | x | |
| | Wartung Dieselbus | $m_{InstandDBus}$ | x | |
| | Reifen-, Bremsverschleiß, Straßenabrieb | $m_{PM,i}$ | | x |
| | fossil: Atom, Braun-/Steinkohle, Gas, Heizöl, Abfälle | $m_{P_{fossil,i}}$ | x | |
| | regenerativ: Wasser, Wind, Solar, Biomasse | $m_{P_{reg,i}}$ | x | |
| | Diesel | $m_{PDiesel}$ | | |

Zur Monetarisierung der externen Effekte der Umweltemissionen existieren verschiedene Quellen mit teilweise sehr unterschiedlichen Kostenansätzen, siehe hierzu Kapitel 2.4.2.2. Tabelle 4-9 trifft eine Auswahl aus der Bandbreite der möglichen Bewertungsätze. Für Variationen dieser Größen kann auf die Arbeit von [247] zurückgegriffen werden. Die ebenfalls betrachteten externen Kosten für die Rohstoffverknappung listet Tabelle 4-10 auf, die für Lärmemissionskosten von Diesel-Bussen nach [290] finden sich in Tabelle 4-11.

Anhand der Lärmemissionskosten für Dieselbusse werden im Anhang A.8 auch die der E-Busse errechnet.

Tabelle 4-9: Umweltfolgekosten je Emission [246, 247]

| Emissionen mit jeweiligen Umweltfolgekosten [€/t] | | | | | | | | | |
|---|-----------------|-----------------|-------|-----------------|-----|-----------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | CO ₂ | NO _x | HC | SO ₂ | CO | CH ₄ | PM _{>10} | PM _{>2,5} | PM _{<2,5} |
| global | 157 | 48.670 | 1.800 | 14.300 | 192 | 3.297 | 12.000 | 3.200 | 133.700 |
| | | | | | | | | 87.000 | |
| lokal | - | - | - | - | - | - | 36.700 | 11.000 | 396.500 |

Tabelle 4-10: Externe Kosten der Rohstoffverknappung [291]

| Rohstoff | Fahrzeug [€/kg] | | | | | | | Energie | |
|---------------------------|-----------------|----------------|------------------|--------|--------|------|--------------------|------------------|-----------------|
| | Stahl | Alu- minium | Kunst- stoffe | Kupfer | Nickel | Blei | Li-Ion Batterie | Strom [€/kWh] | Diesel [€/l] |
| Verknappungskosten | 0,16 | 1,25 | 0,70 | 1,52 | 6,44 | 0,27 | 6,14 | 0,02 | 0,85 |

Tabelle 4-11: Lärmemissionskosten von Diesel-Bussen nach [290]

| Tageszeit | Tag | | Nacht | |
|-----------------------------------|-------|---------|-------|---------|
| | dicht | schwach | dicht | schwach |
| Verkehrsdichte | | | | |
| Emissionskosten [€/100 km] | 4,78 | 11,62 | 8,72 | 21,14 |

4.3 TCO Elektrobus

Wie im Grundlagenkapitel 2.4 dargelegt, wird zwischen dem klassischen bzw. betriebswirtschaftlichen TCO-Ansatz und dem sich durch Hinzurechnung von externen Kosten ergebenden wahren bzw. volkswirtschaftlichen TCO-Ansatz unterschieden. Gemäß dieser Logik und gemäß dem Schema nach Abbildung 4-1 werden in einem ersten Schritt die klassischen TCO ermittelt, um diese nachfolgend um die externen Kosten zu den wahren TCO zu erweitern.

4.3.1 Klassische TCO

Die TCO für das Gesamtsystem E-Bus $K_{TCO_{EBus}}$ teilen sich, unter Vernachlässigung der Entsorgung, in die Anschaffungskosten für Fahrzeug $K_{AK_{EBus}}$ und Infrastruktur $K_{AK_{Infra}}$ auf (n ist die Anzahl betrachteter E-Busse). Hinzu kommen noch Betriebskosten für Instandhaltung $K_{BK_{Instand}}$ und Energie $K_{BK_{Energie}}$. Nachfolgende Formeln schlüsseln die genannten Kostenpositionen weiter auf. Die nicht bereits in Kapitel 4.2.1 eingeführten Parameter werden benannt.

$$K_{TCO_{EBus}} = \sum_{i=1}^n K_{AK_{EBus},i} + K_{AK_{Infra}} + K_{BK_{Instand}} + K_{BK_{Energie}} \quad (4-1)$$

$$K_{AK_{EBus}} = K_{EBus_{Grundfzg}} + K_{EBus_{Batterie}} + K_{EBus_{HVAC}} + K_{EBus_{Antrieb}} + K_{EBus_{Ladsys,e}} \quad (4-2)$$

| | | |
|-----------------------|--|---|
| $K_{EBus_{Ladsys,e}}$ | Anschaffungskosten für das fahrzeugseitige Ladesystem | € |
| e | € {konduktiver Pantograph $K_{kLad_Panto_Fzg}$, Stecker $K_{kLad_Steck_Fzg}$, induktiv K_{iLad_Fzg} } | |

$$K_{AK_{Infra}} = \sum_{i,e,f,d} (K_{Ladtech_{i,e}} + K_{Montage_{i,f}} + K_{Peripherie_{i,d}} + K_{Infra_Plan_i}) \quad (4-3)$$

| | | |
|---------------------|---|---|
| $K_{Ladtech_{i,e}}$ | Anschaffungskosten Infrastrukturseite Ladesystem | € |
| i | Anzahl einem Bus (anteilig) zugerechneter Ladestationen | |
| e | € {Pantograph: 200 kW $K_{Panto200}$, 300 kW $K_{Panto300}$, 500 kW $K_{Panto500}$; Stecker $K_{Steck100}$; induktiv K_{iLad} } | |
| $K_{Montage_{i,f}}$ | Montagekosten abhängig von konduktiver oder induktiver Ladetechnik | € |
| f | € {konduktive Ladetechnik $K_{kLad_Montage}$, induktive Ladetechnik $K_{iLad_Montage}$ } | |

| | | | | | |
|------------------------|---|--|------------------|------------------|---|
| $K_{Peripherie_{i,d}}$ | | Anschaffungskosten sorgungsnetz | Anschlusstechnik | Energiever- | € |
| d | € | {AC-Netzanschluss K_{DC_Lader} } | K_{AC_Lader} | DC-Netzanschluss | |
| $K_{Infra_Plan_i}$ | | Planungskosten für Auswahl und Bau einer Ladestation i | | | € |

Für die aufgeführten Kostenpositionen der Fahrzeuge und der Infrastruktur werden für jedes Jahr Inflations- und Lerneffekte⁵² berücksichtigt, was exemplarisch anhand von (4-4) für die Grundfahrzeugkosten $K_{EBusGrundfzg}$ zum Zeitpunkt $t + 1$ gezeigt werden soll.

$$K_{EBusGrundfzg,t+1} = \left(K_{EBusGrundfzg,t_0} \cdot \left(\frac{X_{t+1}}{X_{t_0}} \right)^{-E_{Grundfzg}} \right) \cdot (1 + Z_{Inflation}) \quad (4-4)$$

Im Rückgriff auf Kapitel 2.4.1 steht X hier für die kumulierte Produktionsmenge an E-Bussen und $E_{Grundfzg}$ für den Degressionsfaktor der Erfahrungskurve in der Grundfahrzeug-Fertigung. Die Instandhaltungskosten für Fahrzeug $K_{FzgjInstand}$ und Infrastruktur $K_{InfraInstand}$ setzen sich aus der Summe der jährlichen Instandhaltungskosten über 20 Jahre zusammen und berücksichtigen ebenso die Inflation sowie die Kostensenkungen aufgrund von Lerneffekten (i : Anzahl Busse, j : Anzahl Ladestationen).

$$K_{BKInstand} = \sum_i K_{FzgjInstand,i} + \sum_j K_{InfraInstand,j} \quad (4-5)$$

⁵² Hiervon ausgenommen sind die Batteriepreise, da diese gemäß Tabelle 4-3 einer eigenen Kostenentwicklung unterliegen. Es wird davon ausgegangen, dass es während der 20-jährigen Lebensdauer eines E-Busses alle n Jahre zu Batteriewechseln kommt. Dies wird bei der Zusammensetzung des Batteriepreises dadurch berücksichtigt, dass zum Preis in t_0 der an die Inflation angepasste Batteriepreis des Jahres t_{0+n} addiert wird.

Die TCO für einen Dieselbus setzen sich aus den in Tabelle 4-7 genannten Positionen folgendermaßen zusammen:

$$K_{TCO_{DBus}} = K_{DBusGrundfz} + K_{AKTank} + K_{BK_{DI}Instand} + K_{BK_{Diesel}} + K_{BK_{AdBlue}} \quad (4-6)$$

Mit den nun vorliegenden Inputdaten und Formeln lassen sich die TCO des E-Bus-Systems berechnen und deren Zusammensetzung aufzeigen. Zuerst werden in Abbildung 4-2 für das Basisszenario die Kosten für die Neuanschaffung eines E-Busses mit 60 kWh-Batterie und zwei Batteriewechseln ohne Ladeinfrastruktur gegenüber zweier Dieselbusse während des gleichen 20-jährigen Betrachtungszeitraums gezeigt (siehe Fußnote 48). Es werden die Beschaffungsjahre 2017, 2027 und 2037 aufgeführt, um die Kostenentwicklung der Fahrzeug- und Batteriepreise im Kontext der genannten Lerneffekte zu veranschaulichen. Durch die Annahme, dass der E-Bus eine doppelte Lebensdauer gegenüber dem Dieselbus aufweist, ergibt sich für ihn ein TCO-Vorteil bei der Fahrzeuganschaffung. Deutlich sichtbar wird, dass die zu erwartenden Lerneffekte die E-Bus-Anschaffungskosten des Jahres 2017 i. H. v. 586.696 € bis in zehn Jahren um 26 % und bis in 20 Jahren um 42 % senken werden. Aufgrund ausbleibender Lerneffekte und durch Inflation verteuert sich die gleichzeitige Neuanschaffung zweier Dieselbusse im Vergleich zu 2017 (863.541 €) um 16 % (2027) bzw. 24 % (2037). Da ein E-Bus-System allerdings ebenso der Neuanschaffung einer Ladeinfrastruktur bedarf, werden deren Kostenentwicklungen in Abbildung 4-3 anhand der TCO verschiedener Ladetechnologien zwischen 2017 und 2037 verglichen.

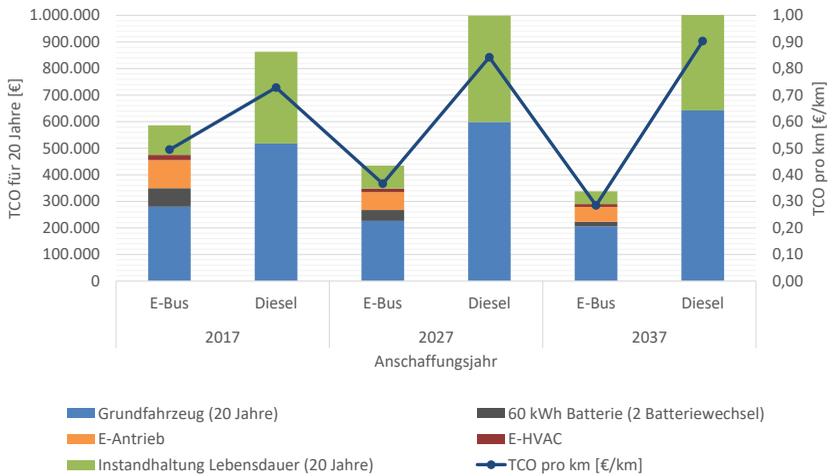


Abbildung 4-2: TCO-Vergleich E-Bus zu zwei parallel angeschafften Dieselmotoren zu unterschiedlichen Anschaffungszeitpunkten für eine 20-jährige Nutzungsdauer (Lebensdauer E-Bus: 20 Jahre, Dieselmotoren: 10 Jahre)

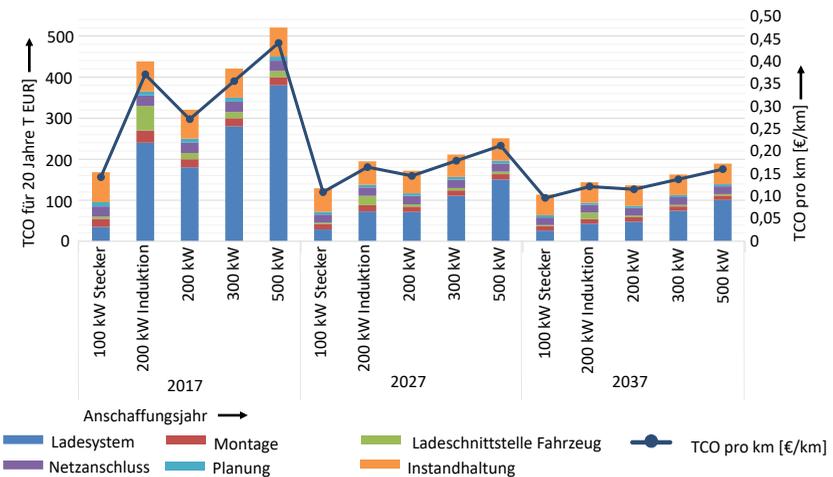


Abbildung 4-3: TCO-Vergleich verschiedener Ladetechnologien

Aufgrund eines deutlich ausgeprägterem Technologiereifegrades beim E-Bus (Grundfahrzeug samt Antrieb und Batterien) als auch bei den Ladetechnologien (siehe Lernraten in Abhängigkeit steigender Stückzahlen, gemäß Tabelle 4-4 und Tabelle 4-5), ergeben sich, insbesondere im Betrachtungszeitraum zwischen 2017 und 2027, deutliche Kostensenkungen. Im Ergebnis stellt sich das Laden über einen Stecker bei 100 kW Ladeleistung immer als am kostengünstigsten dar. Die induktive Ladetechnik ist, in Relation zur übertragbaren Leistung, die teuerste Wahl, da diese Technologie die höchste Komplexität aufweist (siehe Kapitel 2.2.4). Bei den Pantographenlösungen ist ein linearer Anstieg der Kosten im Verhältnis zur Ladeleistung festzustellen.

Mit den nun sowohl für die Fahrzeug- wie auch für die Ladesystemanschaffung vorliegenden TCO, können diese im nächsten Schritt kombiniert werden, um die Gesamtsystem-TCO zu ermitteln. Hierbei müssen Abschätzungen getroffen werden, wie viele Ladestationen im Zusammenhang mit welcher Ladeleistung und welchen Batteriekapazitäten auf einer betrachteten Linie benötigt werden. Dazu kann beispielhaft im Folgenden auf die in Kapitel 3.5.2 berechneten Simulationsergebnisse zur Linie 63 zurückgegriffen werden. Um eine Bandbreite möglicher Gesamtsystemkosten aufzuzeigen, werden drei verschiedene Konfigurationen betrachtet: Abbildung 4-4 orientiert sich am Mannheimer PRIMOVE-Projekt (Kap. 2.1.3.2) und unterstellt pro Bus 1,5 induktive Ladehaltestellen, Steckerladen auf dem Depot⁵³ sowie den Einsatz einer 60 kWh-Batterie. In Abbildung 4-5 wird die Konfiguration dahingehend variiert, dass auf der Linie anstelle des induktiven Ladesystems ein konduktives mit 500 kW Ladeleistung zum Einsatz kommt. Da die Ausrüstung nur einer Haltestelle mit diesem System genügt, wird diese zu je 50 Prozent den beiden Bussen der Linie 63 zugerechnet. Schließlich wird in Abbildung 4-6 der theoretische Fall des Übernachtladens angenommen. Hier ist der Bus mit

⁵³ Gemäß Kapitel 3.5 hat sich gezeigt, dass die Unterwegsladehaltestellen der Linie 63 nur einen geringen Anteil zu der gesamten geladenen Energie beitragen. Aus diesem Grund wird im Sinne aussagefähigerer Ergebnisse hier nur von insgesamt drei Ladehaltestellen auf der Linie ausgegangen und im Depot Steckerladen angenommen.

einer 480 kWh-Batterie ausgerüstet, welche per 100 kW-Steckerladung im Depot geladen wird⁵⁴. Im Sinne der erläuterten Szenarienbetrachtung werden bei allen Abbildungen, zu den von oben bekannten Basisszenarien, ein optimistisches und ein pessimistisches Szenario ergänzt. Bei diesen wird von einer 30 %-igen Reduktion bzw. Steigerung der Stückzahlen (mit Auswirkung auf die Lernraten) und der initialen Anschaffungskosten des Jahres 2017 gegenüber dem Basisszenario ausgegangen.

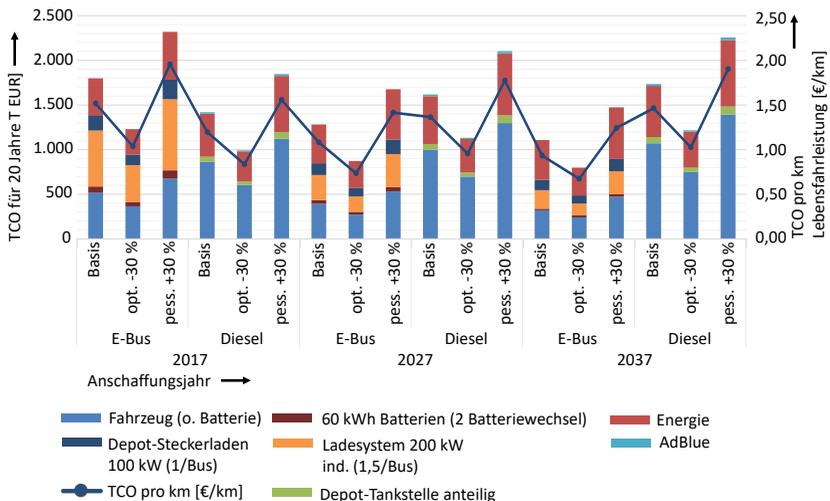


Abbildung 4-4: TCO induktives 200 kW-Gelegenheitsladen zu verschiedenen Anschaffungszeitpunkten (3 Ladehalttestellen, 60 kWh-Batterie), pro E-Bus

⁵⁴ Der verwendete Energiebedarf pro Kilometer errechnet sich anhand der Simulationen aus Kapitel 3.5.2 für die Batterietechnologie des Jahres 2017. Dieser ergibt sich aus der Mittlung des Netzenergiebedarfs für den Herbst- und Winter-Fall.

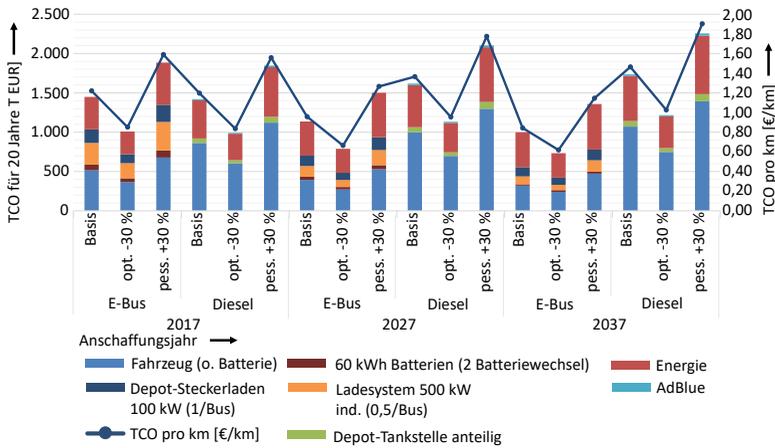


Abbildung 4-5: TCO konduktives 500 kW-Gelegenheitsladen zu verschiedenen Anschaffungszeitpunkten (1 Ladehaltestelle, 60 kWh-Batterie), pro E-Bus

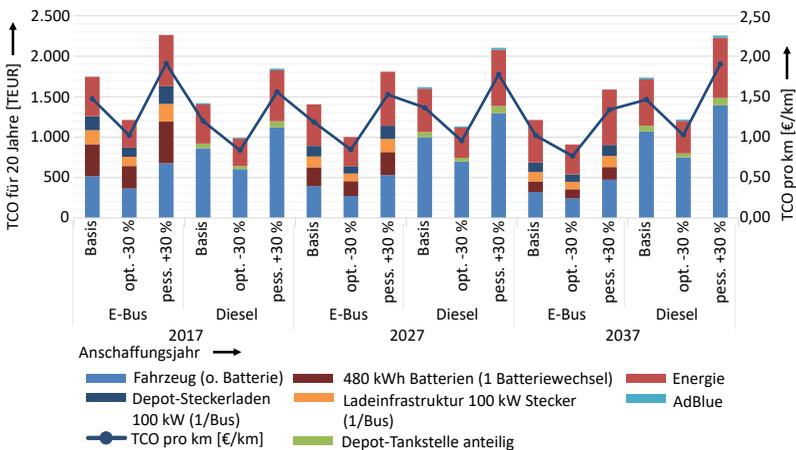


Abbildung 4-6: TCO 100 kW Stecker-Übernachtladen zu verschiedenen Anschaffungszeitpunkten (480 kWh-Batterie), pro E-Bus

Beim hier gewählten Dateninput wird deutlich, dass das Laden im Betrieb mit hohen Ladeleistungen (500 kW) niedrigere TCO verursacht als das Übernachten-laden. Ursächlich sind hierbei v. a. die Kosten der benötigten großen Batteriekapazität, die die geringeren Infrastrukturkosten überkompensieren. Ebenso wird ersichtlich, dass gemäß dem Status quo des Jahres 2017 aus rein betriebswirtschaftlicher Sicht, die Anschaffungskosten einer vergleichbaren E-Buslinie nicht konkurrenzfähig mit dem konventionellen Dieselbusbetrieb sind. Nur das konduktive Hochleistungsladen mit 500 kW kann aktuell als konkurrenzfähig bezeichnet werden. Betrachtet man allerdings die Kostenprognosen ab 2027, so wird deutlich, dass ab diesem Zeitpunkt das E-Bus-System dem Dieselbus in einem Großteil der Szenarienkombinationen überlegen ist.

Um den Einfluss einzelner Kostenfaktoren auf die Gesamtsystem-TCO eingehender analysieren zu können, werden mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse einzelne Kostenfaktoren variiert, während die anderen Parameter konstant gehalten werden. Das Ergebnis für eine Systemauslegung mit einer 60 kWh-Batterie, induktivem Laden (200 kW) und 1,5 Ladestationen je Bus zeigt Abbildung 4-7.

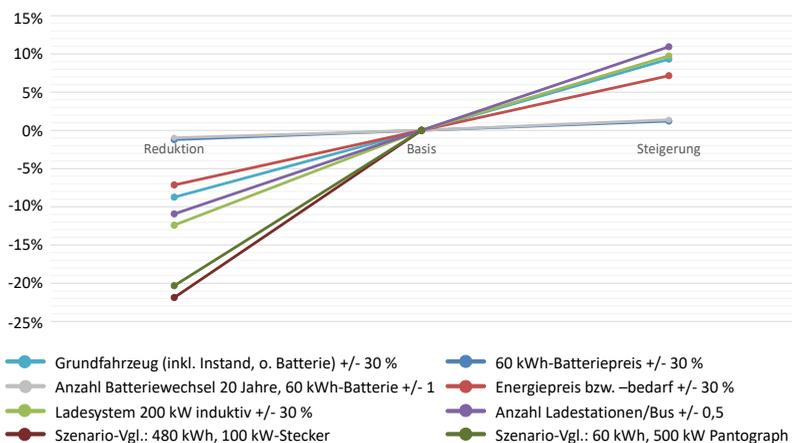


Abbildung 4-7: Sensitivitätsanalyse TCO E-Bus (60 kWh Batterie, induktives 200 kW-Laden)

Durch die Sensitivitätsanalyse wird deutlich, dass alternative Anschaffungskosten beim Grundfahrzeug oder bei den Batterien, genauso wie häufigere/seltenerer Batteriewechsel und teurere/günstigere Energiekosten bzw. eine Steigerung/Reduktion des Energiebedarfs nur geringe, einstellig prozentuale Auswirkungen auf die Gesamt-TCO haben. Große Kostenpotenziale liegen auf Seiten der Ladestationskosten sowie der infrastrukturellen Auslegung. Auch über unterschiedliche Gesamtsystemkonfigurationen (500 kW- oder Übernachten) lassen sich Kostenvorteile erzielen. An dieser Stelle ist es von Bedeutung zu berücksichtigen, dass im Vorhergehenden nur eine singuläre Buslinie betrachtet wurde. Bei der Analyse größerer Busflotten bzw. mehrerer Linien können sich die vorgestellten Kostenrelationen in Abhängigkeit des Betrachtungsfalls signifikant verschieben. Hierzu finden sich genauere TCO-Analysen bei Kunith [59].

Mit dem Ziel der Ermittlung der Investitionssumme für die Einführung eines E-Bus-Systems aus Sicht des Jahres 2017, müssen die TCO des Gesamtsystems auf den Wert des Betrachtungstichtages abgezinst werden. Die Berechnung basiert auf Formel (2-26) des Kapitels 2.4.1. Tabelle 4-12 listet die Investitionskosten für verschiedene Ausprägungen der Neueinführung eines E-Busbetriebs auf der Beispiel-Linie 63 mit zwei E-Bussen auf.

Tabelle 4-12: Investitionskosten nach klassischen TCO für die Linie 63 mit 2 E-Bussen und einem (480 kWh) bzw. zwei (60 kWh) Batteriewechseln⁵⁵

| Systemausprägung für Linienkonfiguration | Investkosten 2017 | Delta ggü. Stuatus quo |
|--|----------------------|---------------------------|
| 7 x 200 kW ind., 60 kWh (2 Wechsel) | 3.019.900 € | Status quo |
| 3 x 200 kW ind., 2 x Stecker 100 kW (Depot), 60 kWh (2 Wechsel) | 2.118.400 € | -29,9 % |
| 1 x 500 kW kond., 2 x Stecker 100 kW (Depot), 60 kWh (2 Wechsel) | 1.555.800 € | -48,5 % |
| 2 x Stecker 100 kW (Depot), 480 kWh (1 Wechsel) | 1.655.600 € | -45,2 % |
| Dieselbus | 1.409.300 € | -53,3 % |

⁵⁵ Abschreibungszeiträume: E-Bus 20 Jahre, Dieselbus 10 Jahre, Infrastruktur 20 Jahre. Die Konfiguration der ersten Zeile soll dem Status quo der realen Linie 63 entsprechen. Finanzierungskosten und etwaige Steuervorteile werden vernachlässigt.

4.3.2 Wahre TCO E-Bus und Vergleich mit TCO Dieselbus

Die Ermittlung der wahren TCO addiert zu den im vorhergehenden Kapitel berechneten klassischen TCO $K_{TCO_{EBus}}$ die sich aus der Kostenbewertung der jeweiligen Emissionen i ergebenden externen Kosten $K_{Ext_{EBus},i}$ hinzu, gewichtet um einen individuellen Faktor χ_i ⁵⁶.

$$K_{TCO_{wahr_{EBus}}} = K_{TCO_{EBus}} + \sum_i \chi_i \cdot K_{Ext_{EBus},i} \quad (4-7)$$

$$K_{Ext_{EBus}} = K_{Ext_{Prod}} + K_{Ext_{Betrieb}} + K_{Ext_{Ressource}} + K_{Ext_{Lärm}} \quad (4-8)$$

Die Berechnung der Emissionen beim Busbetrieb gliedert sich, gemäß Abbildung 4-1, in die Kategorien Treibhausgase/Luftschadstoffe, Ressourcenverknappung und Lärm auf. Im Kontext der Emissionsrechnung muss darauf hingewiesen werden, dass einerseits der Buseinsatz über den Zeitraum seines Lebenszykluses in Abhängigkeit der zu fahrenden Linien stark variiert. Andererseits ändern sich die Betriebsbedingungen einer Buslinie regelmäßig durch Fahrtausfälle, Umleitungen, Linienverlaufsveränderungen, etc. Dies hat zur Folge, dass die ex ante Berechnung der Emissionen mit einer Ungenauigkeit behaftet ist. Die für die folgenden Berechnungen benötigten Parameter zum Buseinsatz auf der Beispiel-Linie 63 werden der Tabelle 3-1 entnommen. Die aus der Entstehungsphase (Produktion von Fahrzeug, Batterien, Ladestationen, Instandhaltung⁵⁷) resultierenden Kosten durch Klimafolgeschäden sowie durch globale Luftschadstoffe, werden in folgender Formel zusammengefasst:

⁵⁶ Dieser Faktor wird im Folgenden mit dem Wert 1 parametrisiert.

⁵⁷ Die Instandhaltung zählt eigentlich auch zur Betriebsphase, wird aber im Sinne einer kompakten analytischen Darstellung bei der Produktions- und Entsorgungsphase mit aufgeführt.

$$K_{ExtProd} = \sum_i K_{ExtProd,i} \cdot m_{Prod,i} \quad (4-9)$$

$m_{Prod,i}$ steht hier für die Masse an Emissionen je Schadstoff i . Die unterschiedlichen Emissionsquellen werden in Tabelle 4-8 aufgelistet, die jeweiligen externen Kosten $K_{ExtProd,i}$ sind Tabelle 4-9 zu entnehmen. Die ebenfalls in der Entstehungsphase anfallenden externen Kosten durch Rohstoffverknappung werden im Folgenden noch ergänzt.

Während der Betriebsphase entstehen globale Emissionen und externe Kosten $K_{ExtBetrieb}$ durch die Energieerzeugung in Abhängigkeit des Strommixes (4-11) sowie lokale Emissionen durch Feinstäube (4-12), bewertet als $K_{ExtEnergie}$ und K_{ExtPM} .

$$K_{ExtBetrieb} = K_{ExtEnergie} + K_{ExtPM} \quad (4-10)$$

$$K_{ExtEnergie} = \sum_{i,j} K_{ExtEnergie,i,j} \cdot m_{Energie,i,j} \cdot \gamma_{Energie,i} \quad (4-11)$$

| $m_{Energie,i,j}$ | Emissionen je Stromerzeugungsart und Ursache | kg |
|----------------------|---|----|
| i | € {Nuklear, Braun-/Steinkohle, Erdgas, Heizöl/Abfälle, Wasser, Wind, Solar, Biomasse} | |
| j | € {CO ₂ , NO _x , HC, SO ₂ , CO, CH ₄ , PM} | |
| $\gamma_{Energie,i}$ | Anteil der Energieerzeugungsform i am Gesamtstrommix in der Relation zum Gesamtenergiebedarf des E-Busses | % |

$$\begin{aligned}
 K_{ExtPM} &= \sum_{i,j} K_{ExtPM,i,j} \cdot m_{PM,i,j} \\
 &= \sum_{i,j} K_{ExtPM,i,j} \cdot \frac{m_{km,i,j}}{1.000.000} \cdot (m_{Fzg} + m_{Zu}) \cdot s_{Betrieb}
 \end{aligned} \quad (4-12)$$

| | | |
|-----------------|--|-----------------------|
| $K_{ExtPM,i,j}$ | Umweltfolgekosten je Ursache (lokal) | €/t |
| $m_{PM,i,j}$ | Feinstaubemissionen je Ursache | t |
| i | € {Reifen-; Bremsverschleiß; Straßenabrieb} | |
| j | € {PM _{>2,5} ; PM _{<2,5} } | |
| $m_{km,i,j}$ | Feinstaubemissionen je km und t Busgewicht | g/t _{Bus} km |
| m_{Fzg} | Fahrzeugleergewicht (inkl. Fahrer) |] |
| m_{Zu} | Zuladung (Fahrgäste) | t |
| $s_{Betrieb}$ | Fahrstrecke | km |

Da der E-Bus durch das generatorische Bremsen weniger mechanisch bremsen muss, verringern sich so die Feinstaubemissionen durch Bremsabrieb gegenüber dem recherchierten Wert um angenommene 20 %.

Die sich durch die Ressourcenverknappung der Bus- und Ladestationsherstellung und seines Betriebs ergebenden externen Kosten $K_{ExtResource}$ stellt Formel (4-13) dar.

$$K_{ExtResource} = \left(\sum_i K_{ExtResource,i} \cdot m_{Resource,i} \right) + K_{ExtkWh} \cdot V_{gesamtkWh} \quad (4-13)$$

| | | |
|---------------------|---|-------|
| $K_{ExtResource,i}$ | Externe Kosten der Verknappung pro Rohstoff | €/kg |
| $m_{Resource,i}$ | Masse des jeweiligen Rohstoffs zur Bus- bzw. Ladestationsproduktion | kg |
| i | € {Stahl, Aluminium, Kunststoffe, Kupfer, Nickel, Blei, Li-Ion-Batterie, Zement} | |
| K_{ExtkWh} | Externe Kosten der Rohstoffverknappung durch die Stromproduktion (pauschaler Wert), gilt nicht für Grünen Mix | €/kWh |
| $V_{gesamtkWh}$ | Gesamtenergiebedarf für einen E-Bus | kWh |

Zur Ermittlung der externen Kosten durch den städtischen Verkehrslärm wird davon ausgegangen, dass sich für einen Referenzpunkt am Straßenrand ein Gesamtgeräuschpegel von 66,3 dB(A) beim Dieselseinsatz und von 60,2

dB(A) beim E-Buseinsatz ergibt [292]. Das sich ergebende Delta der Bewertung der dadurch verursachten externen Kosten erfolgt mithilfe der Verkehrslärbewertung in Deutschland nach [293]. Demzufolge ergibt sich ein Lärmemissionskostenfaktor $\beta_{Lärm_{EBus}}$ zwischen Diesel- und E-Bus i. H. v. 0,62 [247], mit welchem sich die Lärmemissionskosten $K_{ExtLärm}$, in Abhängigkeit der Tageszeit i und der Verkehrsdichte j gemäß Tabelle 4-11, wie folgt errechnen lassen.

$$K_{ExtLärm} = \sum_{i,j} K_{ExtLärm,i,j} \cdot s_{Betrieb,i} \cdot \beta_{Lärm_{EBus}} \quad (4-14)$$

Im Unterschied zum E-Bus emittiert der Dieselbus lokale Emissionen durch die Kraftstoffverbrennung im Betrieb. Für deren Bestimmung wird die gesetzlich verpflichtende Euro VI-Abgasnachbehandlung als Maßstab herangezogen⁵⁸ [294]. Die Formeln zur Berechnung der Dieselbusemissionen und der mit ihnen einhergehenden externen Kosten finden sich im Anhang A.9.

Mit den nun vorliegenden Formeln können die klassischen TCO-Berechnungen aus dem vorherigen Kapitel um die externen Kosten zu den wahren TCO erweitert werden. Bezogen auf den Anwendungsfall der Linie 63, wird das Delta zwischen den externen Kosten des Dieselantriebs und denen des elektrischen Antriebs, in Abhängigkeit vom gewählten Strommix, als sogenanntes Emissionsvermeidungspotenzial für einen Linienbus ermittelt, siehe Tabelle 4-13.

Tabelle 4-13: Emissionsvermeidungspotenzial E-Bus ggü. Dieselbus Stand 2017 für die Linie 63 und einen Bus, der Dieselbusbetrieb verursacht auf 20 Jahre 1,38 Mio. Euro an externen Kosten

| Strommix | Grün | D-15 | Braun |
|---|---------|---------|---------|
| Vermeidungspotenzial ggü. Dieselbus [€] | 897.000 | 714.000 | 640.000 |

⁵⁸ Entsprechend werden hier nur Dieselbusse bzw. deren Emissionen nach Euro VI-Norm in den Vergleich einbezogen.

Der errechnete Betrag misst den Vorteil des Einsatzes alternativer Antriebe gegenüber dem Dieselbus, unabhängig von den effektiven Anschaffungskosten. Dabei kommt bei den hier zugrundeliegenden Werten zum Ausdruck, dass der Einsatz regenerativer gegenüber fossiler Energiequellen zur Stromerzeugung nur einen überschaubaren monetären Vorteil bei Berücksichtigung der externen Effekte verursacht.

Durch Zusammenfügen der externen Kosten mit den in Kapitel 4.3.1 berechneten TCO, ergeben sich die wahren TCO, wie Abbildung 4-8 zeigt.

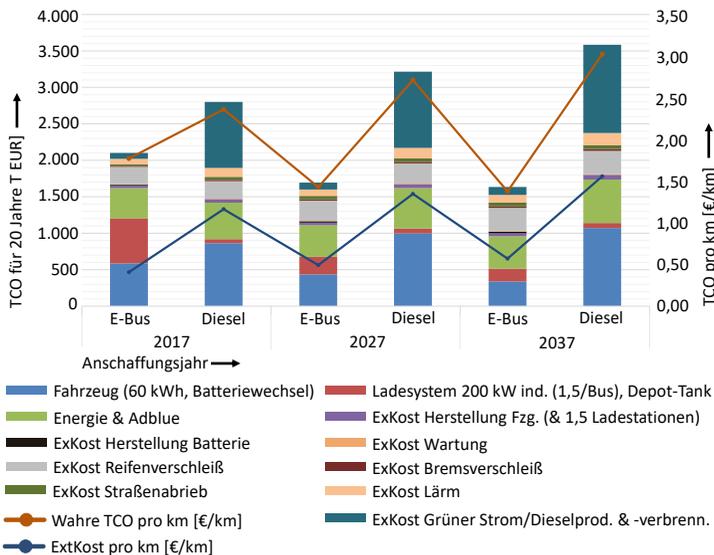


Abbildung 4-8: Wahre TCO E-Bus- ggü. Dieselbus-Systeme (Linie 63, Basisszenario)

Bei den zugrundeliegenden Werten zeigt sich, im Gegensatz zu den in Kapitel 4.3.1 vorgestellten Analysen, dass beim Hinzurechnen der externen Kosten bereits zum Stand 2017 das E-Bus-System dem Dieselbus ökonomisch überlegen ist. Dies ist in erster Linie auf die um den Faktor 2,7 mal höheren externen Kosten für die Herstellung und die Verbrennung von Diesel gegenüber Strom

(im Falle eines grünen Energiemixes) zurückzuführen. Wie Tabelle 4-13 zeigt, bleibt dieser Vorteil auch bei anderen Zusammensetzungen der Stromproduktion deutlich erhalten. Auffallend sind Antriebstechnologie-übergreifend zudem die hohen externen Effekte von Feinstaub (insbesondere Reifenverschleiß) und Lärm. Insgesamt sei hier nochmals grundlegend angemerkt, dass die Höhe der ausgewiesenen externen Kosten sehr stark von den durch den Autor zugrundegelegten Emissionkosten abhängt.

4.4 Validierung und Diskussion

Für die Gewährleistung der Korrektheit der im Rahmen dieses Kapitels ermittelten TCO-Werte, werden diese mit Studienergebnissen verglichen. Da unterschiedliche Autoren auf Basis verschiedener Inputparameter⁵⁹ ihre TCO ermitteln und sich dadurch ein großer Lösungsraum ergibt, fällt ein direkter Vergleich schwer. Um die Größenordnung der eigenen Werte zu bestätigen, werden daher in Abbildung 4-9 ausgewählte Autoren aufgelistet, die als Vergleichsmaßstab interpretiert werden können. Hierbei handelt es sich ausschließlich um klassische TCO, ohne Berücksichtigung externer Kosten. Vergleichbare €/km-Werte liefern auch Lajunen und Pihlatie, die ebenfalls die Abhängigkeit der Kilometerkosten von den gewählten Inputparametern nachweisen [215, 295]. Weiterhin liegen auch die €/km-Ergebnisse und Sensitivitätsanalysen nach Nurhadi in der ermittelten Bandbreite [110]. Insgesamt kann festgehalten werden, dass die eigenen TCO-Werte die Preistendenzen zwischen den unterschiedlichen Systemen gut abbilden. Es wird deutlich, dass sich eine Kostenoptimierung zur Entscheidungsunterstützung allein auf Basis des entwickelten TCO-Modells als schwierig darstellt, da eine pauschale Abschätzung der betrieblichen und der technischen Parameter der Vielfalt an

⁵⁹ Bezogen auf technischen Parameterkombinationen (Batteriegröße, Energiebedarfe, Anzahl Ladestationen, Ladeleistungen, Fahrzeug- und Batterielebensdauer), betriebliche Aspekte (Kilometerleistungen, Linienüberschneidungen, verschiedene Fahrzeugtypen) und variierender (Anschaffungs-)Kostensätze. Weiterhin werden teils auch Personal- und Finanzierungskosten hinzugenommen.

praktischen Wahlmöglichkeiten und betrieblichen Erfordernissen nicht ausreichend Rechnung tragen kann.

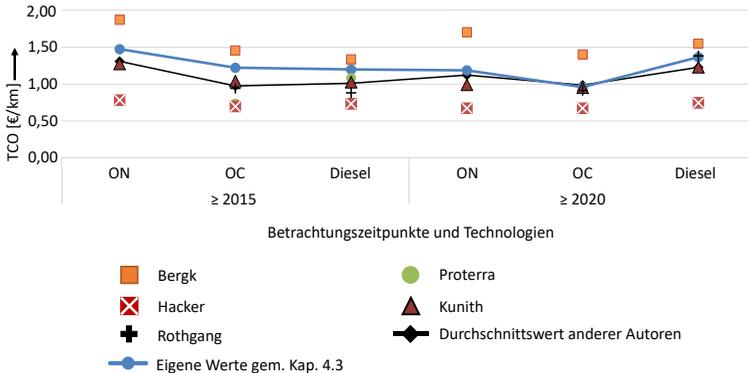


Abbildung 4-9: Bandbreite von TCO/km-Werten unterschiedlicher Autoren⁶⁰

Eine Annäherung an eine realistische Kostenabschätzung ist, wie durch die Sensitivitätsanalysen in Kapitel 4.3.1 gezeigt, über Parametervariationen auf Seiten der Kosten, Betriebs- und Technikparametern grundsätzlich möglich. Allerdings kann hiermit nicht gezielt nach einer auch technisch optimalen Lösung gesucht werden. Darüber hinaus zeigt die Sensitivitätsanalyse, dass die Wirtschaftlichkeit stark von der Anzahl der Nutzer der Ladeinfrastruktur

⁶⁰ Alle TCO setzen sich aus den Kostenpositionen für Fahrzeug, Betrieb, Energie und Infrastruktur zusammen. ON = Overnight Charging, OC = Opportunity Charging. Anpassungen abweichender Werte auf 1.185.920 km Lebenslaufleistung, 20 Jahre Nutzungsdauer und 1,5 Ladestationen/Bus zur Vereinheitlichung. Genauere Erläuterungen zu den Inputdaten:

- Werte gemäß Kap. 4.3: 2017 & 2029, ON = 100 kW Steckerladen & 480 kWh Batterie; OC = 200 kW induktiv & 60 kWh Batterie
- Bergk: 2015 & 2025, 18-m-Bus [296]
- Protterra: 2017, Annahme Laufleistung: 920.000 km [297]
- Hacker: 2017 & 2025, OC = 80 kWh & "Schnellladesäule", ON = 315 kWh & 44 kW [282]
- Kunith: 2015 & 2030, OC = 90 kWh & 200 kW induktiv, ON = 315 kWh & 75 kW Stecker [59]
- Rothgang: 2015 & 2027 [187]

abhängig ist. Etwaige Synergieeffekte bei der Standortplanung von Ladeinfrastrukturen lassen sich durch eine reine TCO-Kalkulation ebenfalls nicht bezüglich der technischen Umsetzbarkeit überprüfen. Durch statistische Verfahren, zum Beispiel mit der PERT-Schätzung oder der Monte-Carlo-Simulation (siehe [59]), lässt sich die Bandbreite der zugrundegelegten Kostenannahmen besser eingrenzen. Hierauf wurde im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, da Kostenprognosen keine Priorität darstellen. Auch bestätigt Olsson, dass rein ökonomische, pauschale Analysen keine zufriedenstellenden Resultate beim Vergleich unterschiedlicher E-Bus-Systemauslegungen liefern [111].

Noch herausfordernder als die Validierung der klassischen TCO gestaltet sich die der ermittelten externen Kosten. Der Hauptgrund hierfür ist, dass neben den Betriebs- und Fahrzeugdaten, vor allem die zu multiplizierenden Emissionskostensätze aus einem sehr breiten Spektrum gewählt werden können [298]. Weiterhin hängen vorliegende Flottenemissionsdaten stark von der Zusammensetzung der Flotten ab und beinhalten aktuell noch keine Daten zu E-Bussen, wodurch die Vergleichbarkeit ebenso erschwert wird [48]. Bei den hier angestellten Berechnungen fällt auf, dass ein wesentlicher Anteil der Emissionskosten – und zwar unabhängig von der Antriebsform - durch Feinstaub verursacht wird. Diesen Sachverhalt stützt [299]. Qualitativ bestätigen sich die in dieser Arbeit ermittelten relativen Unterschiede in den externen Kosten zwischen Diesel- und E-Bus, auch in Abhängigkeit des Strom-Mix, anhand der Studie „True Value Analysis of Electric Buses“ von KPMG [241, 292]. Diese Studie wurde vom Bushersteller Volvo in Auftrag gegeben, was wiederum die praktische Relevanz der Untersuchung der externen Kosten unterstreicht.

5 Techno-ökonomische Optimierung

Kapitel 5 und 6 stellen die zentralen Kapitel der Ausarbeitung dar, da hier alle in den vorhergehenden Kapiteln eingeführten Modelle, Daten und Teilergebnisse zum Aufbau der in der Zieldefinition (Kapitel 1.2) angestrebten Optimierungsmethodik zusammengeführt werden. Hierzu wird in diesem Kapitel zuerst die Gesamtstruktur der Methodik vorgestellt. Daraufhin wird der Optimierungsalgorithmus entwickelt. Zusätzlich werden die zur Optimierung benötigten Eingabedaten, welche sich aus den Outputdaten der Kapitel 3 und 4 ergeben, vorgestellt. Kapitel 6 dient dann der Berechnung und Ergebnisanalyse mit diesem Optimierungsmodell.

5.1 Struktur der Optimierungsmethodik und Softwareeinsatz

Bevor auf die Methodik eingegangen wird, soll die dem Optimierungsansatz zugrundeliegende zeitliche Struktur dargelegt werden. Hierzu dient Abbildung 5-1. Die bisher verwendete maximale Abschreibedauer von 20 Jahren für einen E-Bus und die Ladeinfrastruktur wird auch als zeitlicher Horizont für die Optimierung gewählt. Hierzu wird pro Jahr (ein Jahr entspricht einer „Periode“) ein Betriebstag betrachtet und dieser entsprechend der linienabhängigen durchschnittlichen Anzahl der jährlichen Betriebstage hochskaliert⁶¹. Die kleinste Betrachtungseinheit ist hierbei eine Servicefahrt. Im linientreuen Betrachtungsfall setzt sich ein Betriebstag aus einer festen, einem Fahrzeug zugeordneten Zahl an Servicefahrten auf dieser Linie zusammen. Es wird im Zuge dessen davon ausgegangen, dass sich einerseits über

⁶¹ Wie viel Energie am Ende eines Betriebstags (über Nacht) auf dem Depot nachgeladen wird, obliegt der Entscheidung des Optimierungssolvers. Grundsätzlich wird aber auf dem Depot immer zwingend eine Ladestation installiert, um das Laden zu ermöglichen.

den kompletten Betrachtungszeitraum von 20 Perioden keine Änderungen in den Umläufen eines Betriebstags ergeben. Andererseits werden für den Zeitraum eines Jahres die technischen und ökonomischen Parameter fixiert. Zwischen den einzelnen Perioden erfolgt allerdings eine Anpassung der genannten Parameter, um deren Weiterentwicklung bzw. Degradation Rechnung zu tragen. Dies umfasst gemäß Abbildung 5-1 jährliche Preisänderungen für Fahrzeug, Batterie, Infrastruktur sowie Energie. Außerdem gehört hierzu die sich weiterentwickelnde Energiedichte der Batterie, die wiederum Auswirkung auf das Fahrzeuggewicht und damit den Energiebedarf hat. Weiter wird entsprechend Kapitel 3.3.3.2 die Batteriealterung des zurückliegenden Betriebsjahres berücksichtigt.

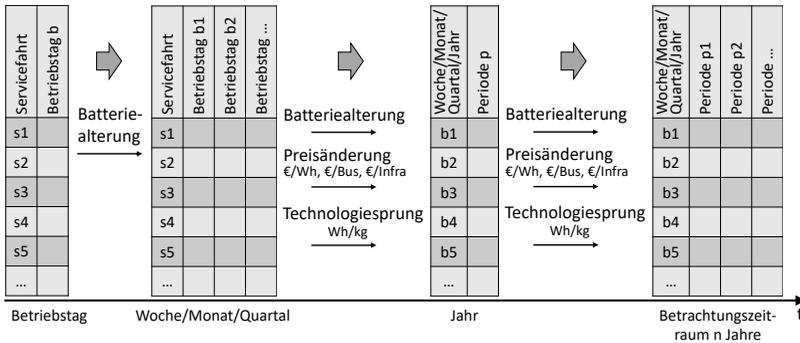


Abbildung 5-1: Zeitliche Struktur des Optimierungsansatzes

Nachdem die zeitliche Struktur vorgestellt wurde, wird im Folgenden die Struktur der Optimierungsmethodik eingeführt [300]. Zu deren Veranschaulichung dient Abbildung 5-2.

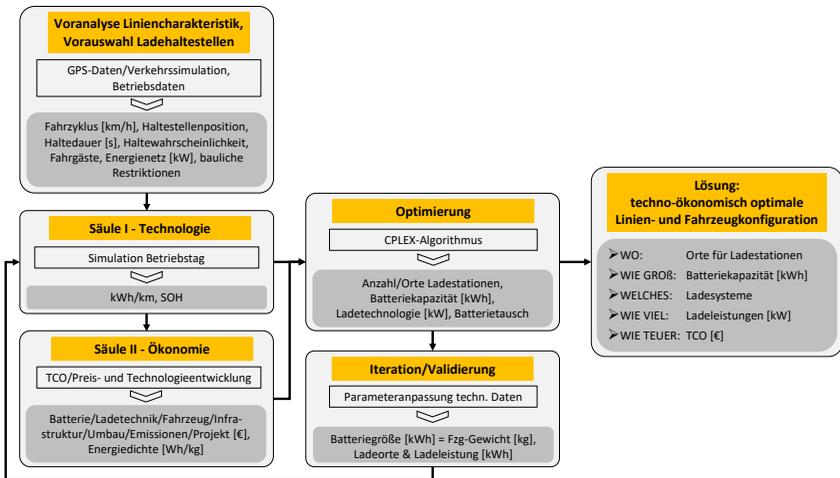


Abbildung 5-2: Struktur der techno-ökonomischen Optimierungsmethodik

Da es grundsätzlich weder in der Praxis noch im Hinblick auf Rechenzeiten sinnvoll ist, alle Möglichkeiten bei der Lösungssuche zuzulassen, sieht der erste Schritt der Methodik eine Reduktion des Lösungsraums bei der Ladepunktsuche vor. Wie mithilfe der in Kapitel 3.2.1 vorgestellten Betriebsdatenanalyse festzustellen ist, eignen sich anhand durch Kennzahlen quantifizierter Kriterien (durchschnittliche Haltedauer und Haltewahrscheinlichkeit) ausgewählte Haltestellen besonders für Ladevorgänge. Diese gilt es, im Rahmen einer Voranalyse zu identifizieren, ggf. bauliche Restriktionen zu berücksichtigen und in die Menge der sogenannten potenziellen Ladehaltestellen aufzunehmen. Um das Optimierungsmodell zu bedaten sind folgende Informationen von Nöten: Simulationsergebnisse aus der Fahrzeugsimulation (Kap. 3), ein mithilfe des Umlaufplaner-Tools (Kap. 3.2.3) konstruierter, für eine Linie oder ein Fahrzeug repräsentativer Betriebstag sowie die Kostenwerte aus Kapitel 4. Die Ergebnisse der Optimierung werden in Form einer Schleife wieder der Fahrzeugsimulation als angepasste Inputdaten zur Verfügung gestellt. Ist das Ergebnis dieser hiermit erneut durchgeführten Simulation, dass der Busbetrieb des initial erstellten Betriebstags unter den als

Ergebnis der Optimierung generierten Parametern nach Plan gefahren werden kann, so gilt das techno-ökonomische Optimierungsergebnis als validiert. Der Mehrperiodizität muss hierbei dadurch Rechnung getragen werden, dass die Fahrzeugsimulation mit den Optimierungsergebnissen zu jeder Periode, also auch mit gealterten Batterien, die Betriebstagsanforderungen erfüllt. Zur Formalisierung des mathematischen Optimierungsmodells wird die Sprache OPL verwendet [301]. Die vorliegende Arbeit hat eine exakte Lösung des Optimierungsproblems zum Ziel⁶². Hierfür wird der Solver CPLEX der Software ILOG CPLEX von IBM eingesetzt [302]⁶³. Der CPLEX-Algorithmus basiert im Wesentlichen auf der Anwendung des Branch-and-Cut-Verfahrens [303], siehe hierzu das Grundlagenkapitel 2.5. Wie auch im Kontext der Fahrzeugsimulation und der TCO-Berechnung, funktioniert die Bedatung, der Simulationsstart und die beschriebene Iteration zur Validierung automatisiert über eine GUI.

5.2 Einführung der Inputdaten

Zum besseren Verständnis der nachfolgenden mathematischen Modelle sowie im Vorgriff auf die durchzuführenden Berechnungen in Kapitel 6, sollen an dieser Stelle die zur Optimierung notwendigen Inputdaten vorgestellt werden. Im Hinblick auf die Funktionsweise des Solvers ist vorab einzuführen, dass er aus mehreren zur Verfügung stehenden Optionen entscheidet.

⁶² Hier gilt die Einschränkung, dass aus Gründen der Rechenzeiterparnis grundsätzlich ein Ergebnis als global optimal akzeptiert wird, wenn die nicht-ganzzahlige Optimallösung mit maximal 1 % Abweichung erreicht wird („Optimalitätsgap“). Von den insgesamt 135 getätigten Optimierungsläufen (entspricht der Anzahl der Szenarien in Kap. 6.1) wurden 106 mit diesem 1 %-igen Optimalitätsgap durchgeführt. Bei 26 Szenarien wurde einem Gap im Bereich von 1-5 % zugelassen und bei drei Szenarien wurde ein Gap mit 10 bzw. 12 % akzeptiert. Der durchschnittliche Optimalitätsgap liegt demnach bei 1,87 %. Siehe hierzu auch Anhang A.10.

⁶³ Informationen zu für die Optimierungen eingesetzten EDV-Systemen bietet Anhang A.10.

Entsprechend umfangreich müssen die Inputdaten der jeweiligen Optionen für verschiedene mögliche technische Ausprägungen aufbereitet werden.

5.2.1 Linienwahl

Für die späteren, praxisnahen Optimierungsszenarien werden drei Mannheimer Buslinien ausgewählt. Hierbei handelt es sich, neben der Linie 63, um die Linien 53 und 60 nach dem Stand des Jahres 2015 bzw. 2016, da für diese Daten aus GPS-Messungen vorliegen. Die Auswahl der Linien 53 und 60 erfolgt, weil diese das Mannheimer Stadtgebiet in weiten Teilen erschließen, siehe Kapitel 2.1.3.1. Weiterhin sind diese Linien mit mehreren Bus- und Straßenbahnlinien verknüpft und bieten sich daher als erste Ausbaustufe einer stadtweiten Elektrifizierung des Busverkehrs im besonderen Maße an. Tabelle 3-1 charakterisiert die betrachteten Linien und nennt deren Schnittmengen zu anderen Linien. Weiterhin werden im zweiten Tabellenabschnitt die Messtage genannt, zu welchen reale Fahrzyklen gemessen wurden. Diese werden durch statistische Werte ergänzt.

5.2.2 Inputdaten für Linie 63

Im Folgenden werden, stellvertretend für alle Linien, beispielhaft Inputdaten für die Optimierung der Linie 63 detailliert eingeführt. Da, wie schon im Zuge von Kapitel 3.4 vorgestellt, für den 28.01.2016 vielfältige Messdaten vorliegen und er sich als betrieblich herausfordernd dargestellt hat, wird dieser Betriebstag im Weiteren als Referenz (Basisszenario) verwendet. Die hinterlegten Daten zum Betrieb entstammen den charakteristischen Werten zum Betriebstag aus Tabelle 3-5. Als Ergebnis der Linienanalyse, gemäß Kapitel 3.2.1, werden aus allen Haltestellen einer Linie diejenigen identifiziert, die aufgrund von Haltewahrscheinlichkeiten und durchschnittlichen Haltedauern für einen Umbau zur Ladehaltestelle infrage kommen. Hettich hat in seiner Arbeit gezeigt, dass der Optimierungsalgorithmus aus der Menge aller Haltestellen einer Linie ausschließlich ebendiese bevorzugt als

Ladehaltestellen auswählt [251]. Im Rahmen dieser Vorselektion werden zudem Haltestellen aus der weiteren Betrachtung eliminiert, die wegen äußerer Gegenheiten (betriebliche Gründe, Denkmalschutzaufgaben, baulich zu große Aufwände, etc.) nicht für eine Umrüstung infrage kommen. Die Haltestellenselektion sowie die komplette Dateneingabe aller für die Optimierung benötigter Daten erfolgt auch hier, wie in Kapitel 3.2.3 eingeführt, mithilfe einer eigens programmierten GUI. Tabelle 5-1 zeigt das Ergebnis dieser Voranalyse⁶⁴.

Tabelle 5-1: Haltestelleninformationen mit baulichen Rahmenbedingungen (abgeleitet aus Daten des Referenzbetriebstags 28.01.2016)⁶⁵

| Nr. | Name | Merkmal | Ø Haltezeitdauer [s] | Haltezeit [%] | umbaubar | | max. kW | Synergien | Kostenfaktor Umbau |
|------|-----------------------|-------------|----------------------|---------------|----------|------|---------|-----------|--------------------|
| | | | | | kond. | ind. | | | |
| 1 | Depot | | | | 1 | 1 | 700 | alle | 0,9 |
| 7/31 | Markuskirche (Hbf) | Ein | 37,7 | 100 | 1 | 1 | 700 | | 1,1 |
| 11 | Mühdorfer (Hbf) | | 50,2 | 95 | 1 | 1 | 300 | 64 | 1 |
| 15 | Wasserturm (Hbf) | | 21,8 | 100 | 1 | 0 | 700 | 60, 64 | 1,2 |
| 18 | Hbf Schleife | W | 42,6 | 53 | 1 | 1 | 700 | 64 | 1 |
| 22 | Friedrichsplatz (Pfp) | | 33,4 | 89 | 1 | 1 | 300 | 60 | 1,1 |
| 25 | Mühdorfer (Pfp) | | 22,9 | 100 | 1 | 1 | 300 | 64 | 1 |
| 4/29 | Markuskirche (Pfp) | Aus | 34,8 | 84 | 1 | 1 | 700 | | 1,1 |
| 5/30 | Pfalzplatz | Aus/ End | 331 | 95 | 1 | 1 | 500 | | 1 |

⁶⁴ Grundsätzlich wurde bei der Angabe aller nachfolgenden Daten versucht, so genau wie möglich die Realität abzubilden. Wo dies nicht möglich war, wurden Annahmen getroffen.

⁶⁵ Stehen bei Nr. zwei Zahlen, so könnte die Haltestelle auch auf der Aus- bzw. Einrückfahrt zum Laden genutzt werden, siehe hierzu auch unter *Merkmal*. *umbaubar* legt fest, ob ein induktives und/oder konduktives Ladesystem installiert werden kann (1 = ja, 0 = nein). *max. kW* beschreibt die maximal an einer Haltestelle installierbare Netzanschlussleistung. *Synergien* markiert die Haltestellen, die von mehreren Linien angefahren werden. Durch den *Kostenfaktor Umbau* kann besonderen bauliche Aufwendungen Rechnung getragen werden.

Im Rahmen dieser Arbeit kann der Solver im Zuge der Optimierung, sofern keine Einschränkungen gelten, aus den in Tabelle 5-2 vorgestellten Batteriekapazitäten und Ladetechnologien bzw. -leistungen frei auswählen.

Tabelle 5-2: Wählbare Batteriekapazitäten und Ladeleistungen/-technologien

| Batteriekapazitäten [kWh] | | Ladetechnik | |
|---------------------------|-----------------------|-------------------|------------------------|
| technolog. Stand 2017 | technolog. Stand 2025 | Ladeleistung [kW] | Ladetechnologie |
| 60_2017 | 60_2025 | 100 | Stecker (konduktiv) |
| 90_2017 | 90_2025 | 200 | PRIMOVE (induktiv) |
| 120_2017 | 120_2025 | 200 | Pantograph (konduktiv) |
| 240_2017 | 240_2025 | 300 | Pantograph (konduktiv) |
| 480_2017 | 480_2025 | 500 | Pantograph (konduktiv) |

Für die Optimierung ist der Energiebedarf des E-Busses zwischen allen möglichen Orten, wo eine Ladeinfrastruktur gebaut werden kann, von Bedeutung, da dieser mit dem SOC korrespondiert. In Abhängigkeit hiervon wird entschieden, wo Ladestationen gebaut werden und wie die Batteriekapazität dimensioniert wird. Durch die in Kapitel 3.5 vorgestellte Simulation verschiedener Fahrzeugkonfigurationen mit unterschiedlichen Batteriegrößen, wird dieser Energiebedarf zwischen den einzelnen potenziellen Ladehaltenstellen ermittelt. Da dem Optimierungsalgorithmus verschiedene Batteriegrößen mit verschiedenen einhergehenden Fahrzeuggewichten zur Auswahl angeboten werden, müssen zu jeder dieser Batteriegrößen und in Abhängigkeit der Batterietechnologie (2017 oder 2025) eigene Datensets für den Energiebedarf erstellt werden. Hieraus ergibt sich die in Tabelle 5-3 gezeigte beispielhafte Datenstruktur. Wie in Kapitel 3.3.3.2 gezeigt, unterliegen unterschiedliche Batteriegrößen bei unterschiedlichen Beanspruchungsmustern individuellen Alterungserscheinungen. Daher muss auch zu jeder je Batteriegröße simulierten Linienfahrt eine Alterungsanalyse durchgeführt und der dazugehörige Alterungsparameter ermittelt werden (Tabelle 5-4).

Um die Möglichkeit zu bieten, die in Abhängigkeit der Ladeleistung stehende Batteriealterung isoliert zu bewerten und in die Optimierung mit einzubinden, wird im Folgenden ein eigener Parameter hierfür eingeführt. Für dessen exemplarische Bedatung wurde aus den Fahrzeugsimulationsdaten der Alterungseinfluss in Abhängigkeit der Ladeleistung gegenüber der 500 kW-Ladeleistung im Vergleich ermittelt und in Tabelle 5-5 aufgeführt.

Um die technologische Entwicklung bei den Batterien sowie den Ladestationen abbilden zu können, wird in Tabelle 5-6 beispielhaft dargestellt, wie deren zeitliche Verfügbarkeit dem Optimierungsalgorithmus übergeben wird. Dieser kann dann nur in Abhängigkeit ihrer Verfügbarkeit neue Technologien bei der Systemauslegung berücksichtigen.

Tabelle 5-3: Energiebedarf zwischen potenziellen Ladehaltestellen der Linie 63 für unterschiedliche Batteriegrößen und Batteriegenerationen für den 28.01.2016⁶⁶

| potenzielle Ladehaltestelle | Energiebedarf/Linie [kWh] | | | | | | | |
|-----------------------------|---------------------------|-------|--------|-------|------------------|-------|--------|-------|
| | 2017 – 100 Wh/kg | | | | 2025 – 250 Wh/kg | | | |
| | Herbst | | Winter | | Herbst | | Winter | |
| | SF1 | SF19 | SF1 | SF19 | SF1 | SF19 | SF1 | SF19 |
| Depot | 5,572 | | 5,577 | | 5,470 | | 5,475 | |
| Markuskirche (Pfp) | 1,477 | | 1,548 | | 1,462 | | 1,533 | |
| Pfalzplatz | 1,345 | 0,576 | 1,437 | 0,699 | 1,333 | 0,563 | 1,425 | 0,619 |
| Markuskirche (Hbf) | 2,899 | 2,943 | 3,290 | 3,883 | 2,835 | 2,872 | 3,224 | 3,878 |
| Mühdorfer (Hbf) | 2,818 | 2,818 | 3,219 | 3,567 | 2,757 | 2,734 | 3,157 | 3,487 |
| Wasserturm (Hbf) | 2,068 | 1,637 | 2,386 | 2,234 | 2,031 | 1,596 | 2,349 | 2,192 |
| Hbf Schleife | 2,202 | 3,183 | 2,675 | 4,512 | 2,150 | 3,114 | 2,622 | 4,453 |
| Friedrichsplatz (Pfp) | 1,953 | 1,911 | 2,250 | 2,433 | 1,917 | 1,859 | 2,213 | 2,335 |
| Mühdorfer (Pfp) | 3,249 | 3,713 | 3,660 | 4,515 | 3,170 | 3,612 | 3,580 | 4,460 |
| Markuskirche (Pfp) | 1,828 | 0,700 | 3,039 | 1,525 | 1,825 | 0,680 | 2,387 | 0,858 |
| Pfalzplatz | | 0,644 | | 0,975 | | 0,628 | | 0,959 |
| Markuskirche (Hbf) | | 3,412 | | 4,477 | | 3,327 | | 4,446 |
| kWh SF (o. Aus/Ein) | 18,4 | 21,5 | 22,0 | 28,8 | 18,0 | 21,0 | 21,0 | 27,7 |
| kWh gesamter Tag | | 351,3 | | 486,2 | | 343,2 | | 465,4 |

⁶⁶ Auszugsweise werden je Batterietechnologie für eine 60 kWh-Batterie jeweils die Energiebedarfe für die erste und letzte Servicefahrt (SF) inklusive der Aus- und Einrückfahrten des Betriebstages sowohl für einen Herbst- wie auch einen Wintertag aufgeführt.

Tabelle 5-4: Alterungsparameter je Batteriekapazität für den durchschnittlichen Busbetrieb der Linie 63⁶⁷

| kWh | 2017 – 100 Wh/kg | | | | 2025 – 250 Wh/kg | | | |
|------------|------------------|----------------|------------|----------------|------------------|----------------|------------|----------------|
| | Herbst | | Winter | | Herbst | | Winter | |
| | - kWh p.a. | Nutz- jahre | - kWh p.a. | Nutz- jahre | - kWh p.a. | Nutz- jahre | - kWh p.a. | Nutz- jahre |
| 60 | 1,72 | 7 | 2,04 | 6 | 1,30 | 10 | 1,85 | 7 |
| 90 | 2,05 | 9 | 2,18 | 9 | 1,53 | 12 | 1,64 | 11 |
| 120 | 2,35 | 11 | 2,62 | 10 | 1,75 | 14 | 1,92 | 13 |
| 240 | 3,89 | 13 | 4,13 | 12 | 2,88 | 17 | 3,17 | 16 |
| 480 | 7,10 | 14 | 7,30 | 14 | 5,38 | 18 | 5,57 | 18 |

Tabelle 5-5: Alterungseffekte in Abhängigkeit der Ladeleistung

| Ladetechnologie | 100 | 200 ind. | 200 kond. | 300 | 500 |
|-----------------|-----|----------|-----------|------|-----|
| - kWh p. a. | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 0,04 | 0 |

Tabelle 5-6: Zeitliche Verfügbarkeit Batterie- und Ladetechnik in Abhängigkeit des Technologiestandes über den Betrachtungszeitraum von 20 Jahren

| Jahr | | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | ... | 2025 | 2026 | ... | 2036 |
|-----------------------------|--|------|------|------|------|-----|------|------|-----|------|
| Batterie 60 kWh [100 Wh/kg] | | 1 | 1 | 1 | 1 | ... | 0 | 0 | ... | 0 |
| Batterie 60 kWh [250 Wh/kg] | | 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 1 | 1 | ... | 1 |
| Ladetechnik 200 kW ind. | | 1 | 1 | 1 | 1 | ... | 0 | 0 | ... | 0 |
| Ladetechnik 200 kW kond. | | 1 | 1 | 1 | 1 | ... | 1 | 1 | ... | 1 |

Die Entscheidung des Solvers, ob er an einer Haltestelle eine Ladestation errichtet und diese in der Folge während einer Servicefahrt nutzt, hängt davon ab, wie viel Ladeenergie sich beim Halt aufnehmen lässt. Die jeweilige

⁶⁷ Ermittelt auf Basis der in Tabelle 3-1 genannten Messtage. – kWh p.a. beschreibt die Bruttokapazitätsabnahme pro Nutzungsjahr. Die durch den Nachladevorgang zwischen den Betriebstagen (über Nacht) verursachten Alterungseffekte bleiben unberücksichtigt. Die Anzahl der Nutzungsjahre (*Nutzjahre*) bis zum Batterietausch ist abhängig von der Parametervorgabe für das End of Life (EOL). Dieses liegt bei 2017 (2025)-Batterien bei 80 (70) % der Nettokapazität.

Haltezeit ergibt sich aus den gemessenen GPS-Daten. Da jede Ladetechnologie einer gewissen Rüstzeit zwischen dem Halt des Busses und dem An- bzw. Abdocken der Ladeschnittstelle am Fahrzeug bedarf, wird von der Haltezeit eine Rüstzeitpauschale i. H. v. sechs Sekunden subtrahiert. Für den Fall des kabelgebundenen Ladens mit 100 kW wird eine Rüstzeit von 60 Sekunden unterstellt, die der Fahrer zum händischen Anstecken benötigt. Für unterschiedliche Ladeleistungen ergeben sich je Haltestelle, in Abhängigkeit der technologieimmanenten Wirkungsgrade (Tabelle 5-7), verschiedene potenziell ladbare Energiemengen (Tabelle 5-8)⁶⁸. Zur Berechnung des Gesamtenergiebedarfs, der dem Energieversorgungsnetz entnommen und vom Energieversorger in Rechnung gestellt wird, werden die genannten Werten für den Energiebedarf pro Kilometer noch mit einem Wirkungsgradfaktor i. H. v. 1,16 multipliziert. Dieser soll die gemäß Abbildung 2-17 auftretenden Verluste des kompletten Ladesystems zwischen Netzanschluss und Fahrzeugbatterie pauschal berücksichtigen.

Tabelle 5-7: Verschiedene Ladewirkungsgrade je Ladetechnologie

| Ladesystem kW | 100-Stecker | 200 ind. | 200 Panto | 300 Panto | 500 Panto |
|--------------------|-------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| kW in Batterie | 94,5 | 178,5 | 196,4 | 294,6 | 490,9 |
| Wirkungsgrad μ | 94,5 % | 89 ,3 % | 98,2 % | 98,2 % | 98,2 % |

⁶⁸ Die ladbare Energiemenge entspricht der in der Batterie durch einen Ladevorgang speicherbare Energiemenge. D. h., sie wird abzüglich von Ladeverlusten bestimmt, siehe hierzu Kap.2.2.3. Weiterhin ist folgende Vereinfachung im CPLEX-Modell zu berücksichtigen: Es wird unterstellt, dass immer mit konstanter Leistung geladen wird. Dies vernachlässigt den Aspekt, dass es ab einem gewissen SOC, aufgrund des IU-Ladeverfahrens (Kap. 2.2.4 und 3.3.4), in der Praxis zu einer Ladeleistungsreduktion kommt.

Tabelle 5-8: Ladbare Energie je potenzieller Ladehaltestelle in Abhängigkeit der Haltedauer (abzgl. Rüstzeit) und effektiver Ladeleistung (200/500 kW Ladesystem, konduktiv)

| | SF1 – geladene kWh | | | SF15 – geladene kWh | | | SF19 – geladene kWh | | |
|-----------------------|--------------------|--------|--------|---------------------|--------|--------|---------------------|--------|--------|
| | Haltzeit [s] | 200 kW | 500 kW | Haltzeit [s] | 200 kW | 500 kW | Haltzeit [s] | 200 kW | 500 kW |
| Markuskirche (Pfp) | 30 | 1,31 | 3,27 | - | - | - | - | - | - |
| Pfalzplatz | 136 | 7,09 | 17,7 | - | - | - | - | - | - |
| Markuskirche (Hbf) | 124 | 6,44 | 16,1 | 30 | 1,31 | 3,27 | 11 | 0,27 | 0,68 |
| Mühdorferstr. (Hbf) | 41 | 1,91 | 2,92 | 24 | 0,98 | 1,50 | 66 | 3,27 | 5,00 |
| Wasserturm (Hbf) | 31 | 1,36 | 3,41 | 18 | 0,65 | 1,64 | 13 | 0,38 | 0,95 |
| Hbf Schleife | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 58 | 2,84 | 7,09 |
| Friedrichsplatz (Pfp) | 0 | 0 | 0 | 15 | 0,49 | 0,75 | 145 | 7,58 | 11,6 |
| Mühdorferstr. (Pfp) | 54 | 2,62 | 4,0 | 13 | 0,38 | 0,58 | 35 | 1,58 | 2,42 |
| Markuskirche (Pfp) | 0 | 0 | 0 | 22 | 0,87 | 2,18 | 66 | 3,27 | 8,18 |
| Pfalzplatz | 352 | 18,9 | 47,2 | 0 | 0 | 0 | 12 | 0,33 | 0,82 |
| Markuskirche (Hbf) | - | - | - | - | - | - | 58 | 2,84 | 7,09 |
| Summen | 768 | 31,2 | 73,6 | 122 | 4,69 | 9,92 | 464 | 19,5 | 36,7 |

Zuletzt werden in Abbildung 5-3 die Kosten- und Technologieentwicklungskurven eingeführt. Für die Ermittlung der Haltestellen-individuellen Kosten des Baus einer Ladestation, wird auf die dem Baujahr und der Ladetechnologie entsprechenden Kosten noch der jeweilige Umbaukostenfaktor aus Tabelle 5-1 hinzuaddiert.

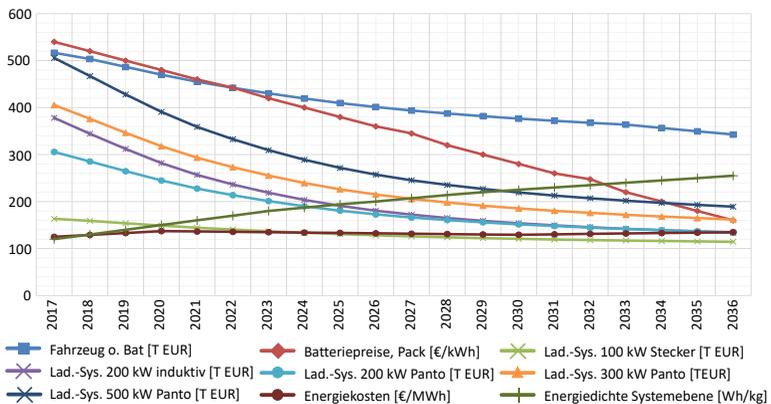


Abbildung 5-3: Kosten- und Technologieentwicklungskurve, bezogen auf einen Bus der Linie 63

Die Daten der zur Vervollständigung der TCO-Berechnung noch fehlenden Anschaffungskosten des E-Bus-Fahrzeugs (ohne Batterien) sowie die externen Kosten entstammen den in Kapitel 4.2 und 4.3 vorgestellten Recherchen und Berechnungen.

5.3 Optimierungsmodell

Das gesamte gemischt-ganzzahlige Optimierungsproblem setzt sich aus verschiedenen zu definierenden Bestandteilen zusammen [251, 304–307]. Diese werden nachfolgend in mathematischer Notation eingeführt und müssen im Rahmen des Softwareeinsatzes in programmierten Quellcode übersetzt werden. Die zugrundeliegende Struktur eines modellierten Betriebstagsablaufs, samt ausgewählter, im Folgenden noch einzuführender Mengen und Parameter, zeigt Abbildung 5-4.

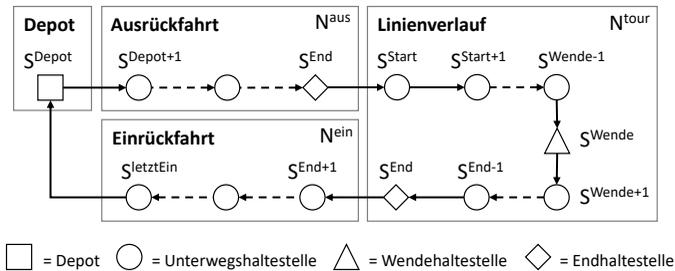


Abbildung 5-4: Visualisierung des Ablaufs eines Betriebstags (die genannten Buchstaben werden in Kapitel 5.3.1 unter *Infrastrukturdaten* erläutert)

5.3.1 Mengen und Parameter

Durch die Definition von Mengen werden zulässige Wertebereiche für Input- sowie für Outputdaten festgelegt. Parameter sind als vor dem Simulationsstart festzulegende Werte aufzufassen, die im Wesentlichen dazu dienen, der Optimierung die technischen und ökonomischen Rahmenbedingungen

vorzugeben. Nachfolgend werden Mengen und Parameter unter ihren Überschriften zusammengefasst eingeführt.

Infrastrukturdaten

$$i \in N = N^{aus} \cup N^{tour} \cup N^{ein} \quad (5-1)$$

Menge aller potenziellen Ladepunkte i auf Ausrück-/Service- und Einrückfahrt.

$$S^{Depot} \in N, S^{Start} \in N, S^{Wende} \in N, S^{End} \in N, S^{letztEin} \in N \quad (5-2)$$

Potenzieller Ladepunkt im Depot, an erster Haltestelle, der Wendehaltestelle und an der Endhaltestelle einer Servicefahrt sowie an der letzten auf dem Weg ins Depot liegenden Haltestelle.

$$i \in N^{aus} = \{S^{Depot}, \dots, S^{Start-1}\}, i \in N^{aus_{oDepot}} = \{2, \dots, S^{Start-1}\} \quad (5-3)$$

Menge potenzieller Ladepunkte auf Ausrückfahrt, inklusive und exklusive des Depots.

$$i \in N^{tour} = \{S^{Start}, \dots, S^{End}\}, i \in N^{tour_{oStart}} = \{S^{Start+1}, \dots, S^{End}\} \quad (5-4)$$

Menge aller sich auf einer Buslinie bzw. einer Servicefahrt befindlichen potenziellen Ladepunkte, mit und ohne der Starthalle.

$$i \in N^{ein} = \{S^{End+1}, \dots, S^{letztEin}\}, i \in N^{ein_{mEnd}} = \{S^{End}, \dots, S^{letztEin}\} \quad (5-5)$$

Menge der auf der Einrückfahrt liegenden potenziellen Ladepunkte, exklusive und inklusive der Endhaltestelle der Linie.

$$a_i \in \mathbb{N} \quad i \in N \quad (5-6)$$

Anzahl potenzieller Ladepunkte, die sich am gleichen Standort des potenziellen Ladepunktes i befinden.

$$id_{i_1, i_2} \in \{0, 1\} \quad i_1, i_2 \in N \quad (5-7)$$

Indikator, ob sich der potenzielle Ladepunkt i_1 am identischen Standort des potenziellen Ladepunktes i_2 befindet.

Betrieb

$$P \in \mathbb{N} \quad (5-8)$$

Anzahl der Perioden des Betrachtungs- bzw. Investitionszeitraums.

$$period \in \mathbf{P} = \{1, \dots, P\} \quad (5-9)$$

Menge der Perioden des Betrachtungszeitraums P .

$$Busse \in \mathbb{N} \quad (5-10)$$

Anzahl der auf der betrachteten Linie eingesetzten und zu elektrifizierenden Busse.

$$SF \in \mathbb{N}, SF^{olezt} \in \mathbb{N} \quad (5-11)$$

Anzahl der täglich auf der betrachteten Linie durchgeführten Servicefahrten je eingesetztem Bus, exklusive der letzten des Tages.

$$sf \in T = \{0, \dots, SF\} \quad (5-12)$$

Menge der täglichen Servicefahrten auf der betrachteten Linie je Bus.

Batterie

$$BT \in \mathbb{N} \quad (5-13)$$

Anzahl an Batterietechnologien BT , die für Fahrzeugauslegung zur Verfügung stehen.

$$bat \in \mathbf{BT} \quad \mathbf{BT} = \{1, \dots, BT\} \quad (5-14)$$

Menge von Batterietechnologien BT .

$$verf_{period,bat}^{Batterie} \in \{0,1\} \quad (5-15)$$

Verfügbarkeiten der einzelnen Batterietechnologien bat in Abhängigkeit der jeweiligen Periode $period$.

$$NB \in \mathbb{N} \quad (5-16)$$

Anzahl der über den gesamten Betrachtungszeitraum einsetzbaren Batterien.

$$nbat \in \mathbf{NB} = \{1, \dots, NB\} \quad (5-17)$$

Menge der einsetzbaren Batterien NB .

$$alt_{bat}^{Batterie} \in \mathbb{R} \quad (5-18)$$

Batteriealterungsparameter in Abhängigkeit von Batterietechnologie bat .

$$E_{bat}^{brutto} \in \mathbb{R} \quad (5-19)$$

Bruttokapazität der einzelnen Batterietechnologien bat .

$$SOH_{nutzbat} \in \mathbb{R} \quad (5-20)$$

SOH der jeweiligen verfügbaren Batterietechnologie $nutzbat$.

$$E_{bat}^{intro} \in \mathbb{R} \quad (5-21)$$

Errechnete Restbruttokapazität der einzelnen Batterietechnologien bat .

$$\underline{E}_{bat}^{UB,rel} \in \mathbb{R}, \underline{E}_{bat}^{UB,abs} \in \mathbb{R} \quad (5-22)$$

Untere Ladeschranke bzw. Intervallgrenze der Nettokapazität: Batterie bat darf nicht auf eine niedrigere Kapazität entladen werden, Prozentangabe bzw. errechneter Absolutwert.

$$\bar{E}_{bat}^{OB,rel} \in \mathbb{R}, \bar{E}_{bat}^{OB,abs} \in \mathbb{R} \quad (5-23)$$

Obere Ladeschranke bzw. Intervallgrenze der Nettokapazität: Batterie bat darf nicht auf eine höhere Kapazität geladen werden, Prozentangabe bzw. errechneter Absolutwert.

$$\bar{E}_{bat}^{tausch,rel} \in \mathbb{R}, \bar{E}_{bat}^{tausch,abs} \in \mathbb{R} \quad (5-24)$$

Spezifische Batteriekapazität der Batterietechnologie bat , bei der die Batterie aufgrund fortgeschrittener Alterung ausgetauscht werden muss, Prozentangabe bzw. errechneter Absolutwert.

$$u_{i,bat}^{aus} \in \mathbb{R}, u_{i,sf,bat}^{tour} \in \mathbb{R}, u_{i,bat}^{ein} \in \mathbb{R} \quad (5-25)$$

Energie, die ein Fahrzeug benötigt, um bei der Ausrückfahrt aus , innerhalb einer Servicefahrt sf des Umlaufs $tour$ und bei der Einrückfahrt ein vom potenziellen Ladepunkt i nach $i + 1$ zu fahren, in Abhängigkeit der verwendeten Batterietechnologie bat .

$$preis_{period,bat}^{Batterie} \in \mathbb{R} \quad (5-26)$$

Anschaffungskosten einer Batterie, in Abhängigkeit der Batterietechnologie bat und des Beschaffungszeitpunkts $period$.

$$preis_{period,bat}^{Energie} \in \mathbb{R} \quad (5-27)$$

Kosten für die Ladeenergie, in Abhängigkeit der Batterietechnologie bat und des Beschaffungszeitpunkts $period$.

Ladetechnik

$$LT \in \mathbb{N} \quad (5-28)$$

Anzahl an Ladetechnologien LT , die für die Infrastrukturauslegung zur Verfügung stehen.

$$ltech \in \mathbf{LT} \quad \mathbf{LT} = \{1, \dots, \mathbf{LT}\} \quad (5-29)$$

Menge an Ladetechnologien \mathbf{LT} .

$$verfüg_{period,ltech}^{Lad} \in \{0,1\} \quad (5-30)$$

Verfügbarkeiten der einzelnen Ladetechnologien $ltech$, in Abhängigkeit der jeweiligen Periode $period$.

$$alt_{ltech}^{Lad} \in \mathbb{R} \quad (5-31)$$

Batteriealterungsparameter in Abhängigkeit von Ladetechnologie $ltech$.

$$I_{i,ltech}^{aus} \in \mathbb{R}, I_{i,sf,ltech}^{tour} \in \mathbb{R}, I_{i,ltech}^{ein} \in \mathbb{R} \quad (5-32)$$

maximal mögliche Ladeenergie an Haltestelle i der Ausrückfahrt aus , innerhalb einer Servicefahrt sf des Umlaufes $tour$ und der Einrückfahrt ein , in Abhängigkeit der verwendeten Ladetechnologie $ltech$.

$$preis_{i,period,ltech}^{Station} \in \mathbb{R} \quad (5-33)$$

Baukosten je Ladestation, in Abhängigkeit des Ortes i , des Installationszeitpunktes $period$ sowie der ausgewählten Ladetechnologie $ltech$.

5.3.2 Entscheidungsvariablen

Die Entscheidungsvariablen erhalten ihre Wertzuweisungen im Zuge des Optimierungsvorgangs. Teilweise sind sie auch Bestandteil der Zielfunktion.

$$y_{i,period,ltech}^{bau}, y_{i,period,ltech}^{nutz} \in \{0,1\} \quad (5-34)$$

Bau bzw. Nutzung (gleichbedeutend mit einem Ladevorgang an) einer Ladestation an einem potenziellen Ladepunkt i der Ladetechnologie $ltech$ in Periode $period$.

$$bat_{nbat,period,bat}^{intro}, bat_{nbat,period,bat}^{nutz}, bat_{nbat,period,bat}^{aus} \in \{0,1\} \quad (5-35)$$

Einbau, Einsatz, Ausbau einer Batterie $nbat$ der Batterietechnologie bat zur Periode $period$ in einen/m Bus.

$$link_{i,nbat,period,ltech,bat} \in \{0,1\} \quad (5-36)$$

$link$ verknüpft eine an einer Haltestelle i gebaute Ladetechnologie $ltech$ mit dem dieser Ladetechnologie bzw. –leistung entsprechendem Alterungsfaktor.

$$\bar{E}_{nbat,period,bat}^{OB,soh} \geq 0 \quad (5-37)$$

Oberer Ladeschranke einer Batterie $nbat$ der Batterietechnologie bat in Periode $period$, die sich aus der fortschreitenden Batteriealterung ergibt.

$$\bar{E}_{nbat,period,bat}^{OB,soh,hilf} \geq 0 \quad (5-38)$$

Hilfsvariable zur Absicherung, dass $\bar{E}_{nbat,period,bat}^{OB,soh,hilf}$ keine negativen Werte annimmt.

$$\bar{E}_{nbat,period}^{OB,lim} \geq 0 \quad (5-39)$$

Aktuelle obere Ladeschranke, welche sich aus dem Minimum der initialen Nettokapazität $\bar{E}_{bat}^{OB,abs}$ und der sich durch die Alterung ergebenden Schranke $\bar{E}_{nbat,period,bat}^{OB,soh}$ der Batterie $nbat$ in Periode $period$ ergibt.

$$e_{i,nbat,period}^{aus}, e_{i,nbat,sf,period}^{tour}, e_{i,nbat,period}^{ein} \geq 0 \quad (5-40)$$

Energieinhalt der Batterie $nbat$ bei Abfahrt vom potenziellen Ladepunkt i in Periode $period$ auf Ausrückfahrt aus , der Servicefahrt sf innerhalb eines Umlaufes $tour$ und der Einrückfahrt ein .

$$x_{i,nbat,period}^{aus}, x_{i,nbat,sf,period}^{tour}, x_{i,nbat,period}^{ein} \geq 0 \quad (5-41)$$

Energie, die der Bus mit Batterie $nbat$ an der Ladestation i in Periode $period$ auf der Ausrückfahrt aus , der Servicefahrt sf innerhalb eines Umlaufes $tour$ und der Einrückfahrt ein lädt.

5.3.3 Zielfunktion

Die Zielfunktion setzt sich aus allen zu minimierenden Kostenbestandteilen des Gesamtsystems zusammen. Im konkreten Fall sind dies die zu optimierenden Kosten für die Ladeinfrastruktur, die Batterien und die Energie. Ziel ist die Minimierung der Gesamtkosten innerhalb des betrachteten Zeitraums für die Elektrifizierung der ausgewählten Buslinien. Die noch fehlenden Kostenbestandteile für das Fahrzeug sowie die optional ergänzbaren externen Kosten werden im Nachgang als konstante Werte hinzuaddiert. Sie sind nicht Teil der Optimierung.

$$\begin{aligned}
 \min \sum_{i \in N} \sum_{\text{period} \in P} \sum_{\text{ltech} \in CT} & \left(\frac{i}{id_i} \cdot \text{preis}_{i,\text{period},\text{ltech}}^{\text{Station}} \cdot y_{i,\text{period},\text{ltech}}^{\text{bau}} \right) \\
 & + \sum_{\text{nbat} \in NB} \sum_{\text{period} \in P} \sum_{\text{bat} \in BT} \left(\text{bat}_{\text{nbat},\text{period},\text{bat}}^{\text{intro}} \right. \\
 & \cdot \text{preis}_{\text{period},\text{bat}}^{\text{Batterie}} + \text{bat}_{\text{nbat},\text{period},\text{bat}}^{\text{use}} \\
 & \left. \cdot \text{preis}_{\text{period},\text{bat}}^{\text{Energie}} \right)
 \end{aligned} \quad (5-42)$$

5.3.4 Nebenbedingungen

Die in den Nebenbedingungen formulierten Gleichungen und Ungleichungen setzen dem Optimierungsalgorithmus bei der Suche nach dem Optimum der Zielfunktion Grenzen. Diese erwachsen aus den betrieblichen sowie energetischen Anforderungen an den gewünschten Busbetrieb. Die Nebenbedingungen lassen sich in Unterkategorien einteilen, die entsprechende Überschriften tragen.

Standortplanung

$$\sum_{\text{ltech} \in LT} y_{1,1,\text{ltech}}^{\text{bau}} = 1 \quad (5-43)$$

Das Depot wird immer, von Beginn des Betrachtungszeitraums an, mit einer Ladestation mit der Ladetechnologie $ltech$ ausgerüstet. Dies steht im Zusammenhang mit der These, dass das System über Nacht immer durch optionales Vollladen der Batterie zurückgesetzt werden kann.

$$\sum_{\text{period} \in P} \sum_{\text{ltech} \in LT} y_{i,\text{period},\text{ltech}}^{\text{bau}} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (5-44)$$

An jeder Haltestelle kann nur einmal während des Betrachtungszeitraums eine Ladestation einer Technologie gebaut werden.

$$\begin{aligned}
 y_{i_1,\text{period},\text{ltech}}^{\text{bau}} &= y_{i_2,\text{period},\text{ltech}}^{\text{bau}} \quad \forall i_1 \in (1, \dots, S^{\text{letztEin}-1}), \\
 & \quad i_2 \in (i_1 + 1, \dots, S^{\text{letztEin}}), \\
 & \quad \text{period} \in P, \text{ltech} \in LT \quad \text{wenn } id_{i_1,i_2} = 1
 \end{aligned} \quad (5-45)$$

An potenziellen Ladepunkten, die sich sowohl auf Ausrück-, Service- und/oder Einrückfahrten befinden, soll die gleiche Entscheidung bezüglich des Ladestationsbaus getroffen werden.

$$y_{i,period,ltech}^{bau} \leq verf_{period,ltech}^{Lad} \forall i \in N, period \in P, ltech \in LT \quad (5-46)$$

An einem potenziellen Ladepunkt kann nur dann eine Ladetechnologie installiert werden, wenn diese auch verfügbar ist.

$$y_{i,period,ltech}^{nutz} \leq \sum_{\tau=1}^{period} y_{i,\tau,ltech}^{bau} \forall i \in N, period \in P, ltech \in LT \quad (5-47)$$

Eine Ladestation kann nur dann genutzt werden, wenn sie vorher auch gebaut wurde.

Batterieeigenschaften

$$\sum_{bat \in BT} \sum_{nbat \in NB} bat_{nbat,1,bat}^{intro} = |Busse| \quad (5-48)$$

In der ersten Periode werden genau so viele Batterien eingesetzt wie es Busse gibt, d. h. in jeden Bus wird eine Batterie eingebaut.

$$bat_{nbat,period,bat}^{intro} \leq verf_{period,bat}^{Batterie} \forall nbat \in NB, period \in P, bat \in BT \quad (5-49)$$

Eine Batterie $nbat$ der Batterietechnologie bat kann nur dann in Periode $period$ eingebaut werden, wenn die Batterietechnologie verfügbar ist.

$$\begin{aligned} \sum_{bat \in BT} \sum_{nbat \in NB} bat_{nbat,period,bat}^{aus} \\ = \sum_{bat \in BT} \sum_{nbat \in NB} bat_{nbat,period,bat}^{intro} \forall period \\ \in [2, |P|] \end{aligned} \quad (5-50)$$

Ab der zweiten Periode gilt, dass immer genau so viele Batterien eingesetzt werden, wie entnommen wurden, d. h. die Anzahl neu eingebauter Batterien muss der der herausgenommenen Batterien entsprechen.

$$\sum_{bat \in BT} \sum_{period \in P} bat_{nbat,period,bat}^{intro} \leq 1 \forall nbat \in NB \quad (5-51)$$

Eine bestimmte Batterie $nbat$ kann nur einmal bzw. nur in einer Periode eingebaut werden und ist von einer bestimmten Batterietechnologie bat .

$$\begin{aligned} bat_{nbat,period,bat}^{nutz} = \sum_{\tau=1}^{period} bat_{nbat,\tau,bat}^{intro} - \sum_{\tau=1}^{period} bat_{nbat,\tau,bat}^{aus} \forall nbat \\ \in NB, period \in P, bat \in BT \end{aligned} \quad (5-52)$$

Eine Batterie wird in einem Bus verwendet, wenn sie vor ihrer Entnahme eingebaut wurde.

$$\sum_{bat \in BT} \sum_{nbat \in NB} bat_{nbat,1,bat}^{aus} = 0 \quad (5-53)$$

In der ersten Periode werden keine Batterien ausgebaut.

$$bat_{nbat,period,bat}^{aus} \leq \sum_{\tau=1}^{period} bat_{nbat,\tau,bat}^{intro} \quad \forall nbat \in NB, period \in P, bat \in BT \quad (5-54)$$

Eine Batterie kann erst ausgebaut werden, wenn sie vorher in einem Bus eingebaut wurde.

$$bat_{nbat,period,bat}^{nutz} \leq 1 - \sum_{\tau=1}^{period} bat_{nbat,\tau,bat}^{aus} \quad \forall nbat \in NB, period \in P, bat \in BT \quad (5-55)$$

Eine Batterie, die aus einem Bus ausgebaut wurde, kann nicht mehr wieder verwendet werden.

$$\bar{E}_{nbat,period,bat}^{OB,soh} \geq bat_{nbat,period,bat}^{nutz} \cdot \bar{E}_{bat}^{tausch,abs} \quad \forall nbat \in NB, period \in P, bat \in BT \quad (5-56)$$

Der SOC einer sich in Verwendung befindlichen Batterie $nbat$ muss über dem spezifischen Austausch-SOH-Wert der entsprechenden Batterietechnologie liegen. Spätestens wenn der SOC unter dieses SOH-Limit fällt, muss die Batterie zum Ende der entsprechenden Periode getauscht werden.

$$\begin{aligned} \bar{E}_{nbat,period,bat}^{OB,soh_{hilf}} &= E_{nbat,bat}^{intro} - alt_{bat}^{Batterie} \\ &\quad \cdot \sum_{\tau=1}^{period} (period - \tau) \cdot bat_{nbat,\tau,bat}^{intro} \\ &\quad - \sum_{i \in N} \sum_{ltech \in CT} alt_{ltech}^{Lad} \\ &\quad \cdot link_{i,nbat,period,ltech,bat} \quad \forall nbat \in NB, period \in P, bat \in BT \end{aligned} \quad (5-57)$$

Anpassung der oberen Ladeschranke $\bar{E}_{nbat,period,bat}^{OB,soh_{hilf}}$ aufgrund der Batteriealterung für jede Periode und jede Batterie. Die Alterung setzt sich zusammen aus dem batterietechnologie- bzw. kapazitätsabhängigen Anteil $alt_{bat}^{Batterie}$ und dem Anteil im Zusammenhang mit der genutzten Ladetechnologie bzw. -leistung alt_{ltech}^{Lad} .

$$\bar{E}_{nbat,period,bat}^{OB,soh} \leq \bar{E}_{nbat,period,bat}^{OB,soh,hilf} + (1 - bat_{nbat,period,bat}^{nutz}) \cdot 2000 \quad \forall nbat \in NB, period \in P, bat \in BT \quad (5-58)$$

Sicherstellung, dass $\bar{E}_{nbat,period,bat}^{OB,soh}$ nur solange den Wert von $\bar{E}_{nbat,period,bat}^{OB,soh,hilf}$ annimmt, solange sich die entsprechende Batterie in Verwendung befindet.

$$\bar{E}_{nbat,period}^{OB,lim} \leq \sum_{bat \in BT} \bar{E}_{bat}^{OB,abs} \cdot bat_{nbat,period,bat}^{nutz} \quad \forall nbat \in NB, period \in P \quad (5-59)$$

Für alle verwendeten Batterien stellt das auf die Bruttokapazität bezogene obere Ladelimit $\bar{E}_{bat}^{OB,abs}$ so lange die maximal ladbare Energiemenge dar, bis das durch die fortschreitende Batteriealterung ergebende Ladelimit diese Schranke unterschreitet.

$$\bar{E}_{nbat,period}^{OB,lim} \leq \bar{E}_{nbat,period,bat}^{OB,soh} \quad \forall nbat \in NB, period \in P, bat \in BT \quad (5-60)$$

Das obere Ladelimit entspricht der sich durch die Alterung ergebenden Kapazität $\bar{E}_{nbat,period,bat}^{OB,soh}$ sobald die Alterung soweit fortgeschritten ist, dass sie die initiale, auf die Bruttokapazität bezogene obere Ladeschranke unterschreitet. Ab diesem Moment macht sich die Alterung durch eine geringere Reichweite bemerkbar.

Ladetechnologie

$$link_{i,nbat,period,ltech,bat} \leq bat_{nbat,period,bat}^{nutz} \quad \forall i \in N, nbat \in NB, period \in P, ltech \in LT, bat \in BT \quad (5-61)$$

Ein Link kann nur stattfinden, wenn eine Batterie auch benutzt wird. $link$ nimmt den Wert 1 an, wenn die Batterie vom Typ bat in Periode $period$ aktiv ist und genutzt wird ($nbat = 1$).

$$link_{i,nbat,period,ltech,bat} \leq y_{i,period,ltech}^{nutz} \quad \forall i \in N, nbat \in NB, period \in P, ltech \in LT, bat \in BT \quad (5-62)$$

Ein Link kann nur stattfinden, wenn eine Ladestation auch genutzt wird. $link$ nimmt den Wert 1 an, wenn die Ladestation an Haltestelle i in Periode $period$ mit Technologie $ltech$ genutzt wird.

$$bat_{nbat,period,bat}^{nutz} + y_{i,period,ltech}^{nutz} \leq 1 + link_{i,nbat,period,ltech,bat} \quad \forall i \in N, nbat \in NB, period \in P, ltech \in LT, bat \in BT \quad (5-63)$$

Ein Link findet statt, wenn Batterie $nbat$ und Ladestation i genutzt werden.

Energiebilanz

$$\begin{aligned}
 e_{i,nbat,period}^{aus} &= e_{i-1,nbat,period}^{aus} - \sum_{bat \in BT} u_{i-1,bat}^{aus} \cdot bat_{nbat,period,bat}^{nutz} \\
 &\quad + x_{i,nbat,period}^{aus} \quad \forall i \in N^{aus_{soDepot}}, nbat \in NB, \\
 &\quad period \in P
 \end{aligned} \tag{5-64}$$

Der SOC in Periode $period$ bei Abfahrt vom potenziellen Ladepunkt i der Ausrückfahrt errechnet sich aus dem SOC am potenziellen Ladepunkt $i - 1$, abzüglich des Energiebedarfs um von $i - 1$ zu i zu gelangen, zuzüglich der in i geladenen Energiemenge x .

$$\begin{aligned}
 e_{i,sf,nbat,period}^{tour} &= e_{i-1,sf,nbat,period}^{tour} \\
 &\quad - \sum_{bat \in BT} u_{i-1,sf,bat}^{tour} \cdot bat_{nbat,period,bat}^{nutz} \\
 &\quad + x_{i,sf,nbat,period}^{tour} \quad \forall i \in N^{tour_{oStart}}, sf \in SF, nbat \\
 &\quad \in NB, \quad period \in P
 \end{aligned} \tag{5-65}$$

Wie zuvor, nur hier für jede Servicefahrt sf .

$$\begin{aligned}
 e_{i,nbat,period}^{ein} &= e_{i-1,nbat,period}^{ein} - \sum_{bat \in BT} u_{i-1,bat}^{ein} \cdot bat_{nbat,period,bat}^{nutz} \\
 &\quad + x_{i,nbat,period}^{ein} \quad \forall i \in N^{in}, nbat \in NB, period \in P
 \end{aligned} \tag{5-66}$$

Wie zuvor, nur hier für jede Einrückfahrt.

$$\begin{aligned}
 e_{Start,1,nbat,period}^{tour} &= e_{Start-1,nbat,period}^{aus} \\
 &\quad - \sum_{bat \in BT} u_{Start-1,bat}^{aus} \cdot bat_{nbat,period,bat}^{nutz} \\
 &\quad + x_{Start,1,nbat,period}^{tour} \quad \forall nbat \in NB, period \in P
 \end{aligned} \tag{5-67}$$

Der Ladezustand der Batterie beim Start einer neuen Servicefahrt entspricht dem am Ende der vorherigen Servicefahrt. Gleichbedeutend mit der Übergabe des Energieinhalts der Batterie zwischen den einzelnen Servicefahrten.

$$\begin{aligned}
 e_{Start,sf+1,nbat,period}^{tour} &= e_{End,sf,nbat,period}^{tour} \quad \forall sf \in SF^{oletzt}, nbat \in NB, \\
 &\quad period \in P
 \end{aligned} \tag{5-68}$$

Der Energieinhalt der Batterie beim Start einer neuen Servicefahrt entspricht dem vom Ende der vorausgegangenen Servicefahrt.

$$e_{End,nbat,period}^{ein} = e_{End,sf,nbat,period}^{tour} \quad \forall nbat \in NB, period \in P \quad (5-69)$$

Der Energieinhalt der Batterie beim Start der Einrückfahrt entspricht dem bei Ende der letzten Servicefahrt. Gleichbedeutend mit der Übergabe des Energieinhalts der Batterie zwischen Servicefahrt und Einrückfahrt.

$$x_{i,nbat,period}^{aus} \leq \sum_{ltech \in LT} l_{i,ltech}^{aus} \cdot y_{i,period,ltech}^{nutz} \quad \forall i \in N^{aus}, nbat \in NB, \quad (5-70) \\ period \in P$$

Am potenziellen Ladepunkt i des Verlaufs der Ausrückfahrt kann eine, der Haltedauer und Ladetechnologie bzw. -leistung entsprechende Energiemenge l geladen werden, sofern hier eine Ladestation errichtet wurde.

$$x_{i,sf,nbat,period}^{tour} \leq \sum_{ltech \in LT} l_{i,sf,ltech}^{tour} \cdot y_{i,period,ltech}^{nutz} \quad \forall i \in N^{tour}, sf \\ \in SF, nbat \in NB, period \in P \quad (5-71)$$

Wie zuvor, nur hier für den Linienverlauf bzw. jede Servicefahrt sf .

$$x_{i,nbat,period}^{in} \leq \sum_{ltech \in LT} l_{i,ltech}^{ein} \cdot y_{i,period,ltech}^{nutz} \quad \forall i \in N^{ein}, nbat \in NB, \quad (5-72) \\ period \in P$$

Wie zuvor, nur hier für jede Einrückfahrt.

$$e_{1,nbat,period}^{aus} \leq \bar{E}_{nbat,period}^{OB,lim} \quad \forall nbat \in NB, period \in P \quad (5-73)$$

Der Energieinhalt einer Batterie $nbat$ beim Verlassen des Depots entspricht maximal der aktuellen oberen Ladeschranke.

$$e_{i,nbat,period}^{aus} \leq \bar{E}_{i,nbat,period}^{OB,lim} \quad \forall i \in N^{aus_{oDepot}}, nbat \in NB, period \in P \quad (5-74)$$

Geladene Energiemenge jeder sich in Betrieb befindlichen Batterie $nbat$ muss zu jedem Zeitpunkt der Ausrückfahrt unter der oberen Ladeschranke liegen.

$$e_{i,sf,nbat,period}^{tour} \leq \bar{E}_{nbat,period}^{OB,lim} \quad \forall i \in N^{tour}, sf \in SF, nbat \in NB, \quad (5-75) \\ period \in P$$

Geladene Energiemenge jeder sich in Betrieb befindlichen Batterie $nbat$ muss zu jedem Zeitpunkt aller Servicefahrten unter der oberen Ladeschranke liegen.

$$e_{i,nbat,period}^{ein} \leq \bar{E}_{nbat,period}^{OB,lim} \quad \forall i \in N^{ein}, nbat \in NB, period \in P \quad (5-76)$$

Geladene Energiemenge jeder sich in Betrieb befindlichen Batterie $nbat$ muss zu jedem Zeitpunkt der Einrückfahrt unter der oberen Ladeschranke liegen.

$$\begin{aligned} e_{i,nbat,period}^{aus} - \sum_{bat \in BT} u_{i,bat}^{aus} \cdot bat_{nbat,period,bat}^{nutz} \\ \geq \sum_{bat \in BT} \underline{E}_{bat}^{UB,abs} \cdot bat_{nbat,period,bat}^{nutz} \quad \forall i \\ \in N^{aus}, nbat \in NB, period \in P \end{aligned} \quad (5-77)$$

Der SOC muss während der Ausrückfahrt jederzeit über der unteren Ladeschranke liegen.

$$\begin{aligned} e_{i,sf,nbat,period}^{tour} - \sum_{bat \in BT} u_{i,sf,bat}^{tour} \cdot bat_{nbat,period,bat}^{nutz} \\ \geq \sum_{bat \in BT} \underline{E}_{bat}^{UB,abs} \cdot bat_{nbat,period,bat}^{nutz} \quad \forall i \\ \in N^{tour \circ End}, sf \in SF, nbat \in NB, period \in P \end{aligned} \quad (5-78)$$

Der SOC muss während der Servicefahrten jederzeit über der unteren Ladeschranke liegen.

$$\begin{aligned} e_{i,nbat,period}^{ein} - \sum_{bat \in BT} u_{i,bat}^{ein} \cdot bat_{nbat,period,bat}^{nutz} \\ \geq \sum_{bat \in BT} \underline{E}_{bat}^{UB,abs} \cdot bat_{nbat,period,bat}^{nutz} \quad \forall i \\ \in N^{ein_{mEnd}}, nbat \in NB, period \in P \end{aligned} \quad (5-79)$$

Der SOC muss während der Einrückfahrt jederzeit über der unteren Ladeschranke liegen.

6 Berechnungen und Ergebnisanalyse

Nachdem im vorhergehenden Kapitel das Optimierungsmodell sowie die benötigten Inputdaten eingeführt wurden, werden in diesem Kapitel hiermit Berechnungen unter variierenden Inputdaten, entsprechend unterschiedlicher Szenarien durchgeführt und die erhaltenen Ergebnisse analysiert. Aus dieser Analyse werden allgemeine Aussagen abgeleitet, die den Mehrwert der entwickelten Methodik veranschaulichen und zur Beantwortung der dieser Arbeit zugrunde liegenden Forschungsfrage dienen.

6.1 E-Bus-Linienoptimierung

Die optimale Auslegung einer singulären Buslinie stellt den Kern der Methodik dar. Um das Spektrum der hiermit generierbaren Ergebnisse aufzuzeigen, wird zweistufig vorgegangen. Im ersten Schritt wird detailliert, anhand von Basisszenarien, die Funktionalität der Methodik aufgezeigt und diese validiert. Diese Basisszenarien stellen im zweiten Schritt die Referenz für eine Vielzahl durchzuführender Parametervariationen dar. Abschließend wird dargelegt, wie sich die Methodik zur schrittweisen Auslegung von stadtweiten E-Busnetzen verwenden lässt.

6.1.1 Basisszenarien Linie 63

Die Basisszenarien repräsentieren die maximal mögliche Entscheidungsbandbreite der Optimierungsmethodik. Der Solver kann aus sämtlichen Konfigurationsmöglichkeiten (gemäß Tabelle 5-2) jede Möglichkeit frei auswählen. Die zugrundeliegenden Parameter entsprechen den in Kapitel 5.2.2 vorgeestellten Daten zum Betriebstag des 28.01.2016 (Referenzbetriebstag). Die Optimierung erfolgt für die in Kapitel 3.5.2 angegebenen klimatischen Rahmenbedingungen Herbst, Winter und Sommer, ergänzt um die

Betrachtung des Busbetriebs ohne (elektrische) Klimatisierung. Hierdurch sollen implizit auch unterschiedliche Energieeffizienz- bzw. Energiebedarfsgrade betrachtet werden. Die anschließende Analyse der Basisszenarien umschließt die Berechnung und Darstellung sämtlicher in den Kapiteln 2.4 und 4 vorgestellter ökonomischer Größen. Dem Optimierungsergebnis, das sich nach Kapitel 5.3.3 aus den optimalen Kosten für Ladeinfrastruktur, Batterien und Energie zusammensetzt, müssen noch die Kosten der Fahrzeuganschaffung (ohne Batterie) und -instandhaltung sowie die externen Kosten hinzuaddiert werden. So lassen sich für die Basisszenarien die klassischen und die wahren TCO sowie die Investitionskosten zum Zeitpunkt 2017 darstellen⁶⁹. Die Ergebnisdarstellung ist so aufgebaut, dass zuerst in einem Balkendiagramm (siehe Abbildung 6-1) die berechneten optimalen bzw. minimalen Kosten je Szenario dargestellt werden.

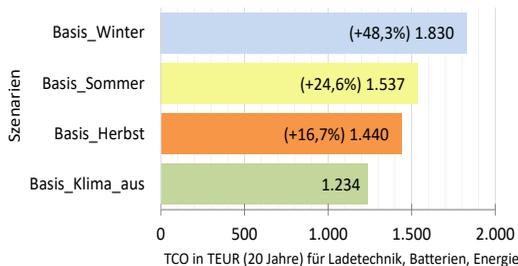


Abbildung 6-1: Optimierungsergebnisse der Basisszenarien in Abhängigkeit der klimatischen Rahmenbedingungen (%-Werte beziehen sich auf *Basis_Klima_aus*)

Daran anschließend wird die Zusammensetzung dieser Kosten aufgeschlüsselt: Hierfür wird einerseits die Ladehaltestellen-Konfiguration und

⁶⁹ Alle weiteren vorgestellten Szenarien beschränken sich auf das Ausweisen des Optimierungsergebnisses, da die genannten hinzuzurechnenden Kostenpositionen als nahezu konstant angesehen werden können.

andererseits der Batterieeinsatz über den Betrachtungszeitraum veranschaulicht. Es lassen sich hieran auch jeweils die Kosten für die Haltestellen- sowie für die Batteriekonfiguration ablesen. Das Delta zu den im Balkendiagramm genannten minimalen Gesamtkosten ergibt sich aus den nicht gesondert ausgewiesenen Energiekosten, die für den Betrieb über den Betrachtungszeitraum anfallen.

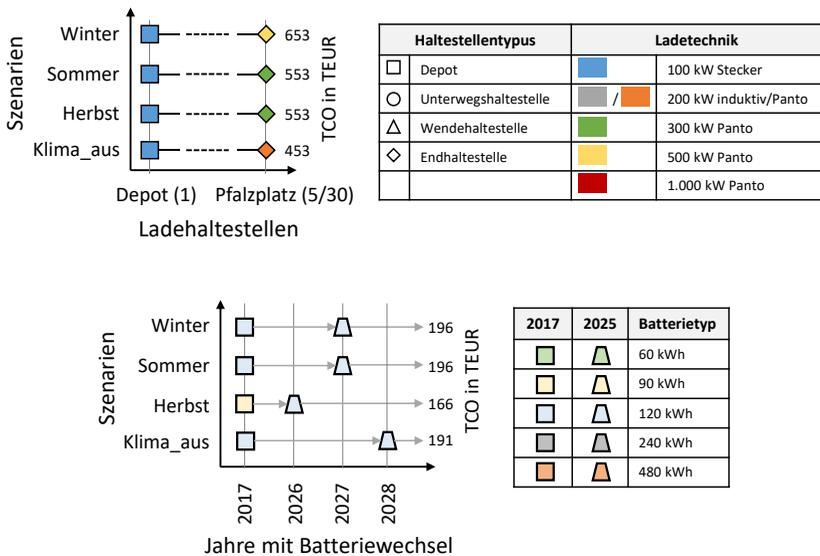


Abbildung 6-2: Optimale Ladehaltestellen- und Batteriekonfigurationen der Basisszenarien⁷⁰

Die kostengünstigste Ausrüstungsvariante stellt das Szenario ohne Klimatisierung Klima_aus dar. Hier entstehen Gesamtsystemkosten von 1,234 Mio.

⁷⁰ Die TCO-Werte jedes Szenarios entsprechen den Installationskosten in TEUR. Die Zahlen in () bei den Haltestellenamen stehen für die fortlaufende Nummerierung aller Haltestellen der Linie. Beim Pfalzplatz sind dies zwei Werte, da dieser auch auf der Ausrückfahrt liegt. Die Achsbeschriftungen werden in den nachfolgenden, identischen Diagrammen zur besseren Darstellbarkeit vernachlässigt.

Euro. Für das Laden über Nacht, für das keine Zeitrestriktion hinterlegt ist, wird das Depot mit einer 100 kW-Stecker-Ladestation (146.962 €) ausgerüstet. Für das Laden während des Betriebs erhält die Endhaltestelle Pfalzplatz eine konduktive 200 kW-Ladestation (305.600 €). Zu Beginn (2017) wird eine 120 kWh-Batterie eingesetzt (64.800 €/Bus). Im Jahr 2028 findet ein Batteriewechsel zu einer neuen 120 kWh-Batterie statt (30.720 €/Bus). Diese entspricht dem technologischen Stand des Jahres 2025. Es ergeben sich zusätzlich über den Gesamtzeitraum Energiekosten i. H. v. 590.207 €. Die techno-ökonomische Optimierung für die Basisszenarien macht deutlich, dass der Optimierungsalgorithmus unter verschiedenen Eingangswerten zu unterschiedlichen Auslegungskonfigurationen kommt. Naheliegenderweise ergeben sich hierbei für das Klima_aus-Szenario die geringsten TCO, da hier der Energiebedarf am niedrigsten ist. Anhand von Abbildung 6-2 wird deutlich, dass das Depot immer mit dem günstigsten Ladesystem ausgerüstet wird, um zu gewährleisten, dass der Bus zwischen jedem Betriebstag Energie nachladen kann. Da der Bau von Ladestationen, zumindest bei einer kleinen Zahl auf der Linie eingesetzter Busse, deutlich teurer ist als eine Batterie mit großer Kapazität, wird nur die Endhaltestelle mit Ladeinfrastruktur ausgerüstet. Weiterhin wird im unteren Teil der Abbildung visualisiert, dass die sich aufgrund eines geringeren Energieumsatzes ergebende langsamere Batteriealterung zu einem späteren Batterietausch führt, wodurch günstigere Anschaffungskosten realisiert werden können.

Wie beschrieben, sollen für die Basisszenarien, exemplarisch für alle weiteren Szenarien, noch die vollständigen TCO für die E-Buslinie errechnet werden. Ergänzt werden diese um die externen Kosten (EK), um so die wahren TCO zu erhalten. Abschließend werden noch die Investitionskosten ausgewiesen, die Stand 2017 für die Elektrifizierung der Buslinie anfallen würden. Die zugrundeliegenden Berechnungsformeln sind den Grundlagen aus Kapitel 2.4.1 sowie den Kostenberechnungen des Kapitels 4 zu entnehmen. Tabelle 6-1 schlüsselt die TCO-Kalkulation auf.

Tabelle 6-1: Klassische und wahre TCO für die E-Bus-Linienuptimierung (Linie 63, Stand 2017, 20 Jahre, 2 Busse, EK = externe Kosten; Zeile 1-3 Werte in kWh, weitere in TEUR)

| TCO-Bestandteil | Klima_aus | | Herbst | | Sommer | | Winter | |
|--|----------------|-------|----------------|-------------|----------------|--------------|----------------|--------------|
| kWh/Tag (Fzg-Bat 2017) | 318 (120_2017) | | 393 (90_2017) | | 410 (120_2017) | | 509 (120_2017) | |
| kWh/Tag (Fzg-Bat 2025) | 301 (120_2025) | | 374 (120_2025) | | 395 (120_2025) | | 491 (120_2025) | |
| kWh Klimatisierung | 0 | | 75 | | 86 | | 191 | |
| Ladestationen | 453 | 19,6% | 553 | 22% | 553 | 21,2% | 653 | 22,5% |
| + Batterien | 191 | 8,3% | 166 | 6,6% | 196 | 7,5% | 196 | 6,7% |
| + Energie | 590 | 25,6% | 721 | 28,7% | 789 | 30,2% | 982 | 33,8% |
| + Fzg (inkl. Ladeschnitt.) | 1.073 | 46,5% | 1.073 | 42,7% | 1.073 | 41,1% | 1.073 | 37% |
| Σ TCO / % ggü. Klima_aus | 2.307 | | 2.513 | 8,2% | 2.611 | 11,6% | 2.903 | 20,5% |
| + EK Fzg (inkl. Instand.) | 66 | | 66 | | 66 | | 66 | |
| + EK Ladestationen | 6 | | 6 | | 6 | | 6 | |
| + EK Batterien | 31 | | 25 | | 31 | | 31 | |
| + EK Energie (Grün. Strom) | 94 | | 115 | | 126 | | 156 | |
| + EK Feinstaub | 590 | | 590 | | 590 | | 590 | |
| + EK Lärm | 153 | | 153 | | 153 | | 153 | |
| Σ wahre TCO, % ggü. K_aus | 3.246 | | 3.468 | 6,4% | 3.581 | 9,4% | 3.905 | 16,9% |
| % Dif. wahre zu klass. TCO | 40,7% | | 38% | | 37,2% | | 34,5% | |
| Investkost (o.EK), % ggü. K_aus | 1.315 | | 1.373 | 4,2% | 1.396 | 5,8% | 1.472 | 10,7% |

Bei Analyse von Tabelle 6-1 wird offensichtlich, welch großen Einfluss der Energiebedarf auf die Kosten der Linienausrüstung hat. Wird das Fahrzeug nicht (aus der Batterie) klimatisiert bzw. genügt ein Energiebedarf von 305 kWh (Energie aus Fahrzeugbatterie) pro Tag, so ermöglicht dies 20,5 % geringere TCO als im Winterszenario mit 500 kWh/Tag. Insgesamt wird auch deutlich, dass der Anteil der Batteriekosten an den Gesamt-TCO sich nur im einstelligen Prozentbereich bewegt. Je mehr Busse pro Linie eingesetzt werden, desto mehr gewinnt dieser Wert an Bedeutung. Für den betrachteten Einsatz von zwei Bussen (Stand 2017) kann allerdings gefolgert werden, dass im Verhältnis die Effekte der Batteriealterung nicht überbewertet werden sollten. Der größte Hebel zur Einsparung von Kosten liegt in der Reduktion der Fahrzeuganschaffungskosten. Dies gilt insbesondere bei der Betrachtung einer Linie mit vielen Bussen. Zur Einordnung ergeben sich als Vergleichsgröße, nach Zahlen aus Kapitel 4.3.1, für den alternativen Dieselseinsatz (20-jährige Betrachtung, vier Busse, Basisszenario) 2,839

Mio. Euro klassische TCO, welche annähernd den TCO für das Winterszenario des E-Busses entsprechen. In Bezug auf die externen Kosten lässt sich festhalten, dass deren Hinzurechnung die TCO um bis zu 40,7 % verteuern würde. Diese Feststellung ist allerdings, gemäß Kapitel 4.3.2, immer im Kontext zu den möglichen externen Kosten der Dieselbusse zu sehen, die als Vergleichsgröße immer höhere Werte aufweisen. Um eine Vergleichbarkeit verschiedener Ausrüstungsoptionen und zwischen zu elektrifizierenden Buslinien zu ermöglichen, werden in Tabelle 6-2 Kennzahlen eingeführt. Diese sind im Kontext mit den Werten aus Tabelle 3-5 zu sehen. Sie werden in Kapitel 6.1.4 den Kennzahlen der Linie 53 und 60 gegenübergestellt und im Vergleich genauer diskutiert.

Tabelle 6-2: Kennzahlen zur Basisszenarien-Linienauslegung für die Linie 63⁷¹

| Kennzahl | Klima_aus | Herbst | Sommer | Winter |
|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| €/Linien_km | 242.832 | 264.499 | 274.797 | 305.623 |
| €/Umlauf_km | 12.450 | 13.560 | 14.088 | 15.669 |
| €/km_Lzykl | 0,97 | 1,06 | 1,10 | 1,22 |
| €/Ø-kmh | 192.242 | 209.395 | 217.547 | 241.952 |
| €_Lad/Haltdauer_Lzykl_Min | 3,50 | 3,81 | 3,96 | 4,40 |
| €/Anzahl_Fzg | 1.153.454 | 1.256.373 | 1.305.285 | 1.451.711 |
| €_Bat/Anzahl_Fzg | 95.520 | 83.160 | 97.920 | 97.920 |
| €_Lad/Anzahl_Fzg | 226.281 | 276.281 | 276.281 | 326.281 |
| €_HVAC_kWh | 0 | 147.441 | 169.065 | 375.482 |
| €_EK/km_Lzykl | 0,40 | 0,40 | 0,41 | 0,42 |
| Emissionsvermeidpotenzial ggü. Diesel | 1.821.793 | 1.806.108 | 1.790.152 | 1.759.152 |

⁷¹ Folgende Kennzahlen sind auf die klassischen Gesamt-TCO bezogen: *Linien_km*: Strecke einer Servicefahrt, *Umlauf_km*: Strecke des Betriebstags (inkl. Aus-/Einrückfahrt), *km_Lzykl*: durch alle eingesetzten Busse gefahrene Gesamtstrecke über den 20-jährigen Betrachtungszeitraum, *Ø-kmh*: Linien-Durchschnittsgeschwindigkeit, *Anzahl_Fzg*: Anzahl eingesetzter Busse. *€_Lade/Haltdauer_Lzykl_Min* stellt die Kosten der Ladestationen der Summe der gesamten Haltdauer (in Minuten) an den ausgewählten Ladehaltestellen des Referenzbetriebstags gegenüber. *€_HVAC_kWh* weist die Kosten für den Betrieb des HVAC-Systems über den Betrachtungszeitraum aus. *€_EK* sind die über die 20 Jahre anfallenden externen Kosten. Das *Emissionvermeid(pungs)potenzial* ggü. dem Dieselbuseinsatz orientiert sich an Kap. 4.3.2 (Grüner Strommix). Der Dieselbusbetrieb der Linie 63 verursacht in 20 Jahren Emissionskosten i. H. v. 2.760.982 Euro, denen ein durchschnittlicher Kraftstoffbedarf von 40 l/100 km zugrundeliegt.

Abschließend muss noch darauf hingewiesen werden, dass hier und auch im Folgenden bei der Untergliederung der Ergebnisse nach klimatischen Bedingungen vereinfachend von deren jeweiliger ganzjähriger Gültigkeit ausgegangen wird. In der praktischen Anwendung müsste je Stadt, entsprechend ihrer individuellen jährlichen Klimakurve, die TCO-Berechnung auf Basis eines gewichteten Wertes aus den Ergebnissen der vier vorgestellten Klimaszenarien erfolgen.

6.1.2 Validierung der Linienoptimierung

Bezug nehmend auf Abbildung 5-2, bietet der entwickelte techno-ökonomische Ansatz die Möglichkeit zur Validierung des Ergebnisses der Linienoptimierung. Hierzu werden die im vorhergehenden Kapitel gezeigten Optimierungsergebnisse der Basisszenarien, in Bezug auf die Ladehaltestellen und Batterienkonfiguration, als Startbedingungen für die Fahrzeugsimulation gemäß Kapitel 3 herangezogen. Dabei ist es das Ziel, das Zusammenspiel der optimierten Parameter Batteriekapazität, Anzahl und Standorte der Ladehaltestellen sowie deren Ladeleistung dahingehend zu überprüfen, ob ein entsprechend konfigurierter E-Bus den zugrundeliegenden Betriebstag uneingeschränkt absolvieren kann. Abbildung 6-3 zeigt die SOC-Verläufe sämtlicher Basisszenarien als Ergebnis der Validierungsschleife.

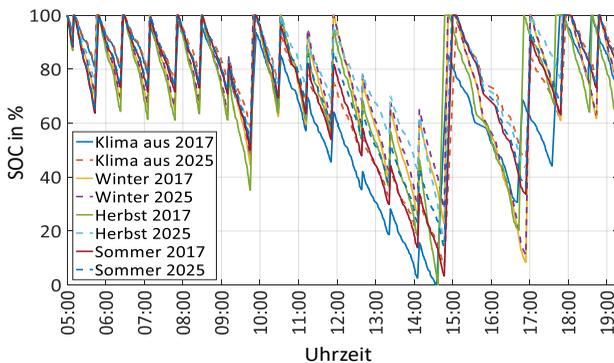


Abbildung 6-3: Validierung der SOC-Verläufe der CPLEX-Basisszenarien (Referenzbetriebstag)

Auch wenn zur Rushhour nachmittags die Batterie bei einigen Szenarien nahezu vollständig entleert wird, so bestätigen die SOC-Verläufe, dass alle Optimierungsergebnisse in der Praxis umsetzbar sind. Da die hier zugrundegelegte nutzbare Batteriekapazität der in Kapitel 3.3.3 beschriebenen 50 %-igen Nettokapazität entspricht, könnte in der Praxis durch eine leichte Weitung dieses Intervalls den Fällen begegnet werden, in denen die Batterie aktuell vollständig entladen wird. Weil bei fortschreitender Batteriealterung das Nettokapazitätsintervall grundsätzlich so lange geweitet wird bis der Tausch-SOH erreicht ist, bleiben die Fahrzeugumläufe über den gesamten Betrachtungszeitraum auch mit alternder Batterie fahrbar. Die Optimierung kann demnach als validiert bezeichnet werden.

Die Simulationsergebnisse auf Basis der Outputdaten der Optimierung erlauben es weiterhin, eine hierauf angepasste Vorausberechnung der Batteriealterung vorzunehmen. Tabelle 6-3 zeigt, dass die Vorhersage der Batterielebensdauer, gegenüber den initialen Simulationsdaten des ersten Optimierungslaufs, deutlich verbessert werden kann.

Tabelle 6-3: Vergleich der Batteriealterungsdaten der Eingangsdaten aus der Fahrzeug simulation ggü. denen auf Basis der CPLEX-Optimierungsergebnisse

| Szenario | Batterietyp | Batteriealterung | | |
|----------|-------------|---------------------------------|-------------------------------|--------|
| | | CPLEX-Input (Fzg-Simulation) | CPLEX-Output (Optimierung) | % |
| aus | 120_2017 | 10,9 | 7,6 | - 30,2 |
| | 120_2025 | 14,6 | 10,8 | - 26,0 |
| Herbst | 90_2017 | 8,8 | 5,6 | - 36,4 |
| | 120_2025 | 13,7 | 10,5 | - 23,4 |
| Sommer | 120_2017 | 9,4 | 6,8 | - 27,7 |
| | 120_2025 | 13,3 | 10,1 | - 24,1 |
| Winter | 120_2017 | 9,2 | 6,0 | - 34,8 |
| | 120_2025 | 12,5 | 8,7 | - 30,4 |

6.1.3 Parametervariationen bei der Linienauslegung

Die Parametervariationen unterteilen sich in die Themenbereiche Betrieb, Verkehrseinfluss, Infrastruktur, Technologie/Fahrzeug sowie Kosten. Mit ihrer Hilfe sollen Aussagen zu Optimierungsergebnissen der E-Bus-Auslegung unter verschiedenen Rahmenbedingungen und Restriktionen gefunden werden. Es wird sich auf die Betrachtung des Herbst- und Winterfalls beschränkt. Den Ergebnissen aller Szenarien werden die der Basisszenarien immer gegenübergestellt, um eine Vergleichsgröße zu haben.

6.1.3.1 Betrieb – Fahrplananpassung

Die Untersuchungen unterschiedlicher Eingangsparameter für den Betrieb untergliedern sich weiter, hier in die Anpassung des Fahrplans zur Unterstützung eines vereinfachten E-Busbetriebs. Dies bedeutet, dass durch eine Verlängerung der Standzeit an der Endhaltestelle versucht werden soll, die Ladezeit pro Servicefahrt auszudehnen. Im Falle der Linie 63 ist der Pfalzplatz als Endhaltestelle zu betrachten. Auf die dort am 28.01.2016 gemessenen Standzeiten (in Summe 6.290 Sekunden) werden bei jeder Servicefahrt die zusätzlichen Pufferzeiten (Anzahl Sekunden je Szenario) aufaddiert. Um den gegenteiligen Fall regulär verkürzter Standzeiten ebenso in die Betrachtung mit einzubeziehen, sind ebenfalls zwei Szenarien aufgeführt, bei welchen die Endhaltestellen-Standzeit für jede Servicefahrt um 30 bzw. 60 Sekunden reduziert wird.

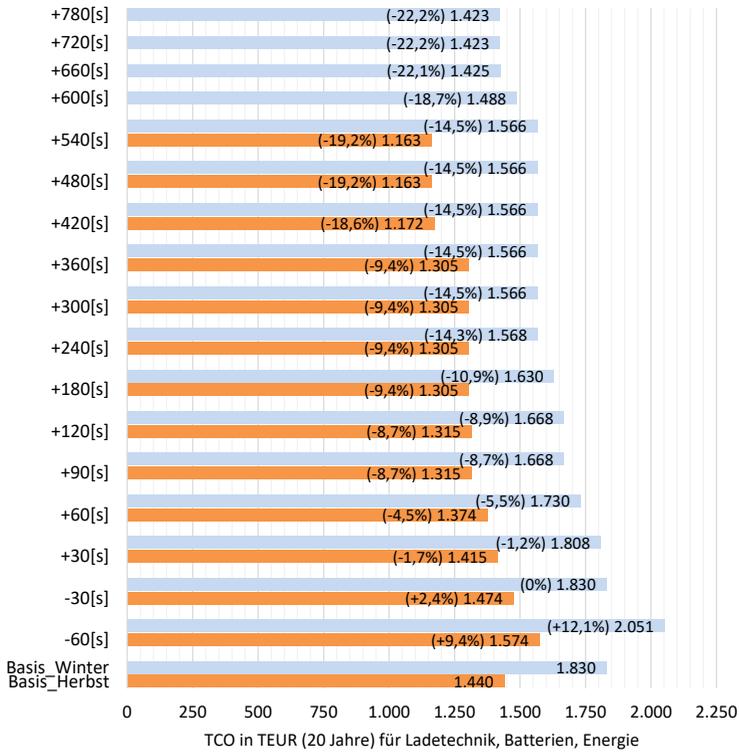


Abbildung 6-4: Optimierungsergebnisse Variation der Endhaltestellen-Standzeit (%-Werte in ()) beziehen sich auf die jeweiligen Basisszenarien)

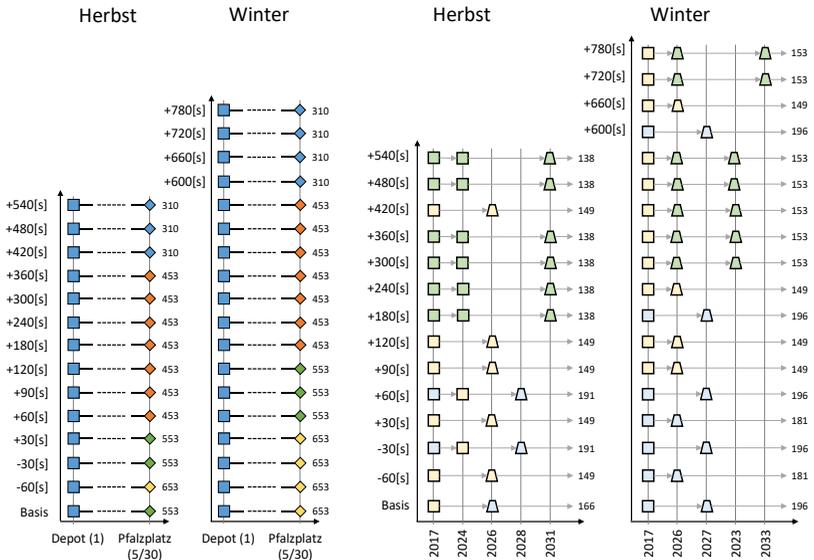


Abbildung 6-5: Optimale Ladehaltestellen- und Batteriekonfigurationen für die Variation der Endhaltestelle-Haltedauer

Es fällt auf, dass für den gewählten Referenzbetriebstag im Herbst-Fall, ab einer Verlängerung der Standzeit um acht Minuten, eine Konfiguration mit global minimalen Kosten gewählt wird. Hier wird nur die kostengünstigste Ladetechnik (100 kW) sowie die kleinste Batteriekapazität (60 kWh) verwendet. Hierdurch ist eine Kostenoptimierung bei der Linienkonfiguration um 19,2 % gegenüber dem Herbst-Basisszenario zu erzielen. Im Winter-Fall treten die global minimalen Kosten erst ab einer zusätzlichen Endhaltestellenstandzeit von zwölf Minuten auf (22,2 % Kostenersparnis gegenüber dem Winter-Basisszenario). Allerdings muss grundsätzlich berücksichtigt werden, dass die zusätzliche Standzeit von Fahrzeug und Fahrer, mit Ausnahme von Pausenzeiten, als unproduktive Zeit zu werten ist, siehe Abbildung 2-3. Entsprechend müssen hierdurch entstehende Mehrkosten noch gegengerechnet werden.

6.1.3.2 Betrieb – Anzahl Fahrzeuge

Um zu untersuchen, inwieweit die optimale Linienkonfiguration von der Zahl der eingesetzten Fahrzeuge abhängt, wird in diesem Teilkapitel zum Betrieb die Anzahl an Fahrzeugen variiert. In der Praxis würde dies einer Taktverdichtung bzw. -reduktion auf der Linie entsprechen. In den Basis-szenarien mit zwei eingesetzten Fahrzeugen liegen die Kosten für die Batterien weit unter denen für die Ladeinfrastruktur (siehe Tabelle 6-1). Im Folgenden soll geprüft werden, zu welchen Veränderungen eine erhöhte Zahl eingesetzter Fahrzeuge und damit ein Übersteigen der Summe der Batterie-kosten gegenüber der Ladeinfrastruktur bei der Gesamtsystemauslegung führt. Es ist zu berücksichtigen, dass sich die durchschnittlichen Kosten je Bus mit steigender Anzahl eingesetzter Fahrzeuge alleine dadurch verringern, dass sich die Kosten der Ladeinfrastruktur auf mehrere Fahrzeuge verteilt.

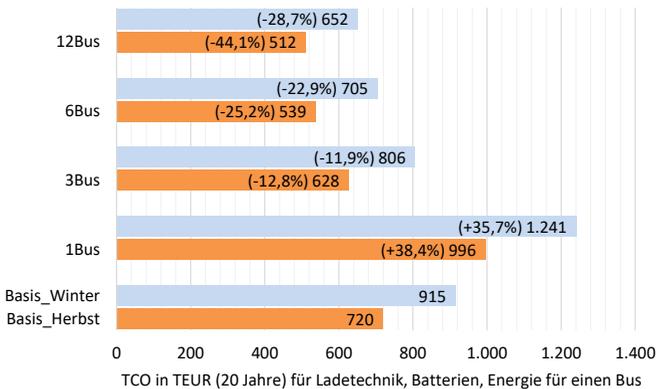


Abbildung 6-6: Optimierungsergebnisse Variation der Anzahl eingesetzter Fahrzeuge auf der Linie 63 (Werte sind auf den Einsatz eines Busses normiert)

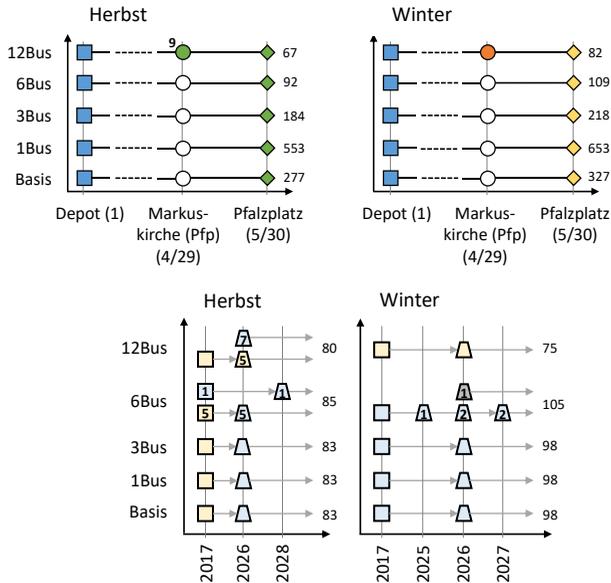


Abbildung 6-7: Optimale Ladehaltestellen- und Batteriekonfigurationen für die Variation der Anzahl eingesetzter Busse⁷²

Von besonderem Interesse ist die Betrachtung des Einsatzes von zwölf Bussen. Im Herbst-Fall tritt der Zustand auf, dass während des Betrachtungszeitraums, ab dem neunten Jahr, eine Ladestation neu in Betrieb genommen wird. Auch im Winter-Fall wird von Beginn an eine gegenüber dem Basisszenario zusätzliche Haltestelle mit Ladetechnik ausgerüstet. In beiden Fällen ist

⁷² Im Herbst-Fall ist an der Haltestelle Markuskirche im Szenario *12Bus* eine „9“ ergänzt. Dies bedeutet, dass die Ladestation an dieser Haltestelle erst zur 9. Periode (zu dann geltenden Preisen) gebaut wird und zur Verfügung steht. Die Zahlen in den Batteriesymbolen (unteres Bild) geben Auskunft darüber, dass parallel in einem Szenario unterschiedliche Batterietypen zum Einsatz kommen und wie sich diese verteilen. Aufgrund langer Rechenzeiten wurden in den Szenarien mit zwölf bzw. sechs Bussen Optimalitätsgaps von 12 (*12Bus*, H), 10 (*12Bus*, W) und 5 % (*6Bus*, H & W) zugelassen (siehe Fußnote 62 sowie Anhang A.10). Es ist davon auszugehen, dass dies (auch im Folgenden) der Grund für den unausgewogenen Batterieeinsatz ist.

dies in der erwarteten Verlagerung des Kostenschwerpunktes von der Ladetechnik zu den Batterien begründet, welche mit der Erhöhung der Zahl der auf der Linie verkehrenden Fahrzeuge einhergeht. Dadurch wird es kostengünstiger, mehr Ladegelegenheiten zu bauen, um kleinere Batteriekapazitäten für die Gesamtflotte zu ermöglichen.

6.1.3.3 Betrieb – Anzahl Servicefahrten

Das letzte Teilkapitel zum Betrieb setzt sich mit einer Variation der Anzahl täglicher Servicefahrten auf einer Buslinie auseinander. Hierdurch soll der Betrachtungsfall abgedeckt werden, dass es zum Beispiel durch Wochenend- oder Ferienfahrpläne zu weniger Fahrten kommt. Ebenso ist denkbar, dass eine Buslinie nur zu gewissen Tageszeiten bedient wird, beispielsweise im Schüler- oder Werksverkehr. Gegenüber den 19 Servicefahrten des Basis-szenarios werden hier fünf, sechs, sieben und neun Fahrten je Tag betrachtet. Im Falle der fünf Fahrten werden diese sowohl mit zwei als auch mit vier Fahrzeugen untersucht. Die Variation der Anzahl an Servicefahrten kann auch so interpretiert werden, dass verschiedene Reichweitenanforderungen im Hinblick auf das ausschließliche Übernachten (Kap. 2.1.2) getestet werden (eine Servicefahrt auf der Linie 63 misst 9,5 km Länge).

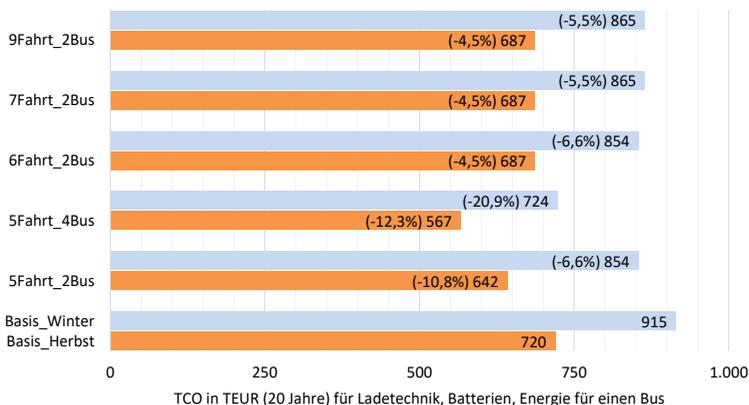


Abbildung 6-8: Optimierungsergebnisse der Variation der Servicefahrten-Anzahl auf der Buslinie 63 (Werte sind auf den Einsatz eines Busses normiert)

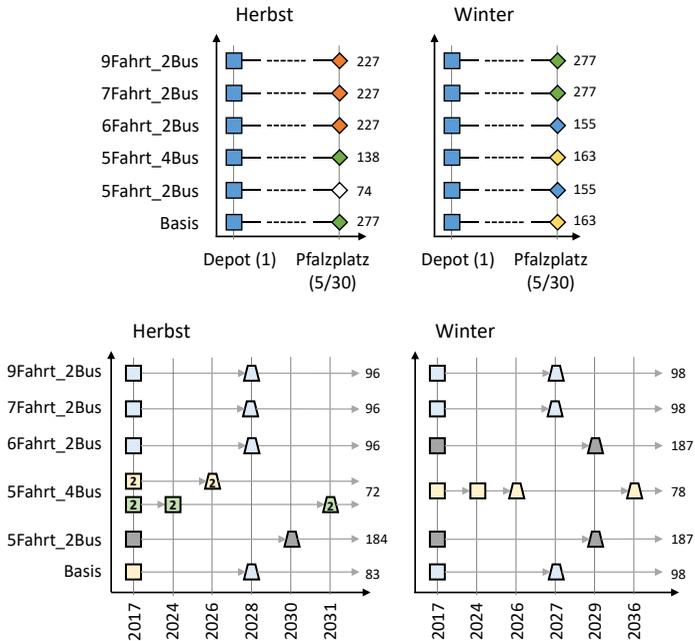


Abbildung 6-9: Optimale Ladehaltestellen- und Batteriekonfiguration für unterschiedliche Anzahlen an Servicefahrten

Interessant ist hier die Feststellung, dass der Solver die Ladehaltestellen- sowie die Batteriekonfiguration in Abhängigkeit der Anzahl eingesetzter Fahrzeuge (zwei oder vier im Falle der fünf Fahrten) variiert. Werden mit zwei Fahrzeugen nur fünf Servicefahrten getätigt – dies entspricht pro Fahrzeug einer Fahrstrecke von 52,9 km (inklusive Aus- und Einrückfahrt) mit in Summe 26 Minuten Standzeit an der Endhaltestelle und einem Gesamtenergiebedarf von 92 kWh – so beschränkt sich die Konfiguration im Herbst-Fall auf das abschließliche Laden im Depot⁷³.

⁷³ Es ist zu berücksichtigen, dass dieses Ergebnis stark davon abhängt, welche Servicefahrten des Referenzbetriebstags ausgewählt werden. Fünf Servicefahrten zur Rushhour ziehen einen

6.1.3.4 Verkehrseinfluss

Im Rahmen dieser Arbeit stützen sich alle Betrachtungen auf den 28.01.2016 (Donnerstag) als Referenz-Betriebstag, siehe Kapitel 3.4.1. Folglich wird auch das Verkehrsgeschehen dieses Tages als repräsentativ für die Linie 63 erachtet. Für vergleichende Betrachtungen sollen nachfolgend Optimierungen für zwei weitere Betriebstage der Linie 63 durchgeführt werden. Diese basieren auf GPS-Messungen, welche am 04. (Freitag) und am 07. (Montag) März 2016 durchgeführt wurden. Weiterhin wird die in Kapitel 3.2.2 vorgestellte, mit Hilfe von Verkehrssimulationssoftware simulierte Umplanung des Linienverlaufs in die Analyse mit aufgenommen⁷⁴.

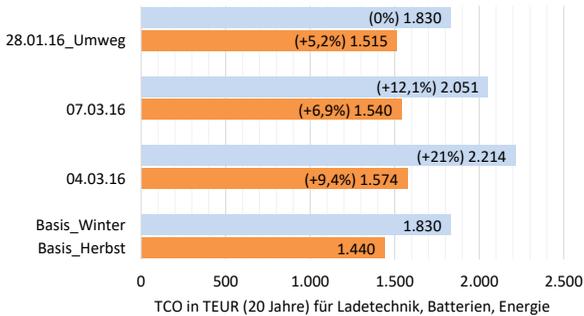


Abbildung 6-10: Optimierungsergebnis der Variation des zugrundeliegenden Betriebstags zur Untersuchung unterschiedlicher verkehrlicher Rahmenbedingungen

deutlich höheren Energiebedarf und geringere Pufferzeiten zum Laden an den Endhaltestellen nach sich. Im Fall hier wurden die fünf Servicefahrten aus gleichmäßig über die Tagesmitte des Referenzbetriebstag verteilten Zeitintervallen (6., 8., 10., 12., 14. SF) entnommen.

⁷⁴ Hierbei ist zu berücksichtigen, dass sich aufgrund des längeren Linienwegs die Fahrstrecke um einen Kilometer und die Fahrzeit um etwa zehn Minuten verlängert. Das Zeitintervall eines Busses zur Durchführung jeder Servicefahrt beträgt nun eine Stunde, wodurch sich eine Erhöhung der Standzeit an der Endhaltestelle ergibt. Weiterhin geht hiermit einher, dass nur 15 Servicefahrten je Tag und Fahrzeug auf der Linie gefahren werden.

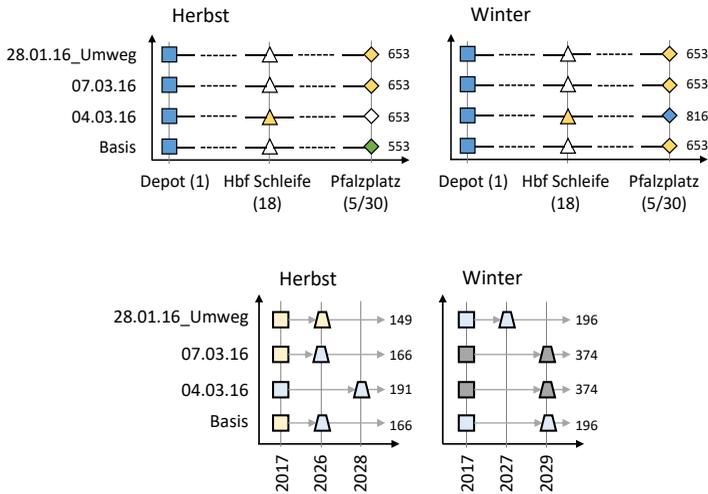


Abbildung 6-11: Optimale Ladehaltestellen- und Batteriekonfigurationen für unterschiedliche Betriebstage bzw. Verkehrseinflüsse

Es zeigt sich, dass sich in Abhängigkeit des zugrundeliegenden Betriebstags, teilweise erhebliche Unterschiede in der Konfiguration sowie in den Kosten ergeben. Besonders auffallend ist, dass für den 04. März die Wendehaltestelle Hauptbahnhof Schleife, gegenüber dem Pfalzplatz, die Bedeutung als wichtigste Ladehaltestelle übernimmt und gleichzeitig größere Batteriekapazitäten zum Einsatz kommen. Dies unterstreicht die Erfordernis, den der Optimierung zugrundeliegenden Referenzbetriebstag anhand umfassender statistischer Erhebungen wohlüberlegt auszuwählen bzw. ein gewichtetes Mittel aus den Ergebnissen unterschiedlicher Betriebstage zu finden.

6.1.3.5 Infrastruktur

Die nachfolgenden Parametervariationen untersuchen den Einfluss verschiedener infrastruktureller Rahmenbedingungen auf die Auslegung für den Referenzbetriebstag. Hierzu wird durch eine Beschränkung der Inputdaten herbeigeführt, dass der Solver gegenüber den Basisszenarien nur eine eingeschränkte Wahlmöglichkeit bei der Systemkonfiguration hat. Der Fall

200kW_ind_60kWh stellt die im Projekt PRIMOVE Mannheim (siehe Kap. 2.1.3.2) zum Einsatz kommenden, fest vorgegebenen Technologien dar: induktive 200 kW-Ladetechnik und 60 kWh-Batterie. Der Solver hat somit keine weiteren Wahlmöglichkeiten. Beim Szenario *o500kW* hat der Solver sämtliche Wahlmöglichkeiten, außer dass die 500 kW-Ladetechnologie nicht zur Verfügung steht. Bei *200kW_ind* steht hingegen nur die induktive Ladetechnologie mit 200 kW zur Verfügung, dafür aber sämtliche Batteriekapazitäten zwischen 60 und 480 kWh. Im Falle von *200kW_ind_o480kWh* steht ebenso ausschließlich die 200 kW induktive Ladetechnik zur Wahl. Zusätzlich wird aber noch die Möglichkeit ausgeschlossen, eine 480 kWh-Batterie einzubauen, da der praktische Einsatz einer 480 kWh-Batterie für einen 12-m-Bus als nicht realistisch anzusehen ist. Bei *keinPfalz* stehen alle Optionen zur Auswahl mit der Einschränkung, dass an der Endhaltestelle Pfalzplatz keine Ladestation errichtet werden darf. Dies ist auch der Fall im Szenario *keinPfalz_o480kWh*, allerdings mit der weiteren Restriktion, dass keine 480 kWh-Batterie zur Verfügung steht. Ausschließlich für den Winterfall wird nochmals das identische Szenario betrachtet, diesmal aber mit der Option, an der Mühldorfer Straße eine Ladestation mit 1000 kW zu Kosten von 756.581 Euro errichten zu können (*keinPfalz_o480kWh_1000kW_-Mühldorf_W*).

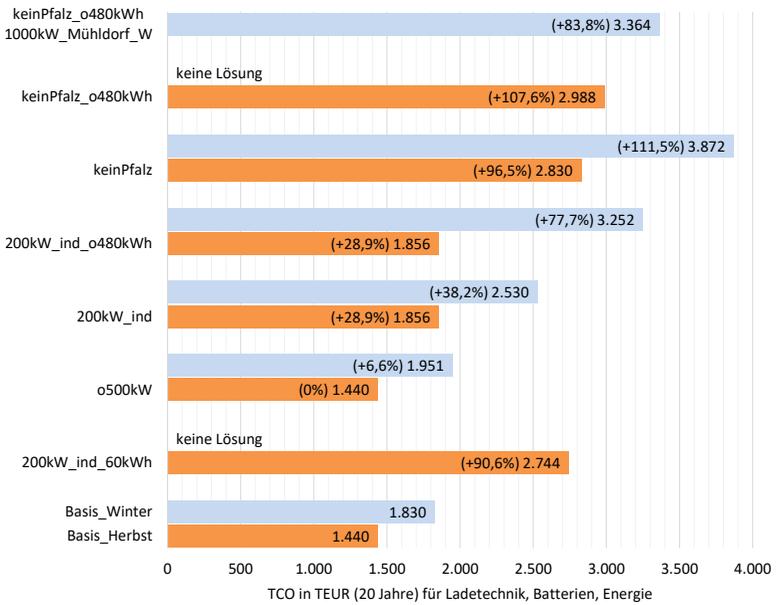
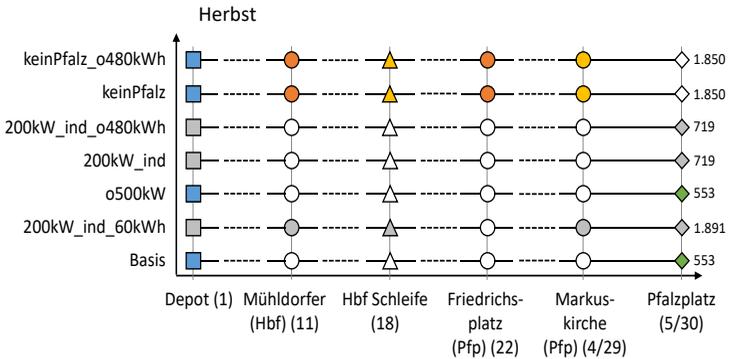


Abbildung 6-12: Optimierungsergebnisse für unterschiedliche infrastrukturelle Rahmenbedingungen auf der Linie 63



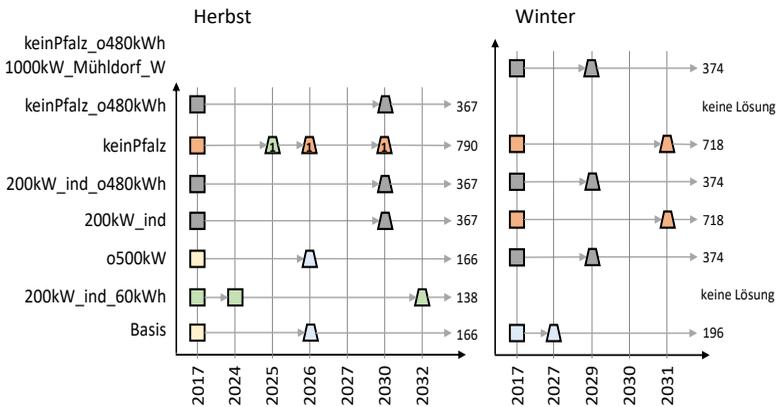
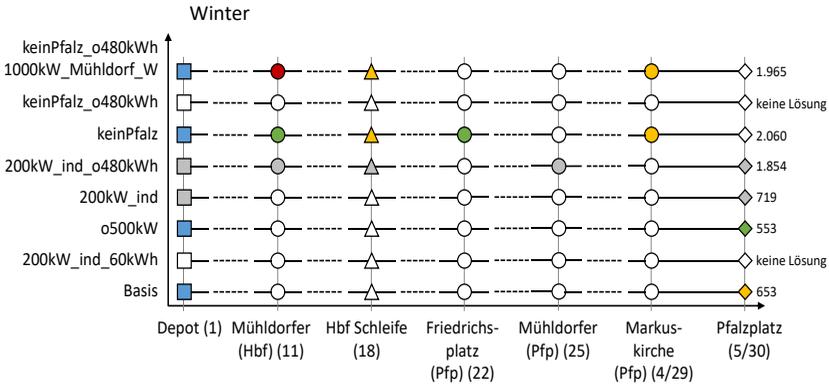


Abbildung 6-13: Optimale Ladehaltestellen- und Batteriekonfiguration für unterschiedliche Infrastrukturrestriktionen

Es wird deutlich, dass, im Falle von Restriktionen bei der Infrastruktur, weitere Haltestellen, außer der Endhaltestelle, mit Ladeeinrichtungen ausgerüstet werden müssen. Die Abbildung des originalen Mannheimer PRIMEVO-Szenarios *200kW_ind_60kWh* findet für den anspruchsvollen Winter-Fall keine Lösung, d. h. der reguläre Betrieb ist mit den gegebenen Technologien nicht möglich. Dies entspricht der Praxiserfahrung gemäß Kapitel 2.1.3.2. Auch wird die Bedeutung der Endhaltestelle Pfalzplatz zum Nachladen und

zur Gewährleistung des Betriebs offensichtlich. Steht dieser nicht zur Verfügung und darf nicht auf eine 480 kWh-Batterie zurückgegriffen werden, so werden im Winter-Fall neue Ladetechnologien mit einer Leistung größer als 500 kW benötigt, wie das Szenario *keinPfalz_o480kWh_1000kW_Mühldorf_W* beweist. Nahezu alle infrastrukturellen Restriktionen ziehen eine deutliche Verteuerung der Linienausrüstung nach sich.

6.1.3.6 Technologie/Fahrzeug

Die Auswirkungen der Variation technischer Parameter auf die Optimierung ist Thema dieses Teilkapitels. Hierfür werden drei Szenarien untersucht, bei welchen unterschiedliche Batterieparameter vorgegeben werden. So wird im Szenario *Bat2025++* von einem großen Technologiesprung in der Batterietechnik ausgegangen (siehe Kap. 3.5.2), die ab dem Jahr 2025 eine Energiedichte von 500 Wh/kg ermöglicht (Batterietechnologie des Jahres 2017: 100 Wh/kg, 2025: 250 Wh/kg). *2xBatalterung* unterstellt, dass alle zur Verfügung stehenden Batterietypen doppelt so schnell altern wie in Kapitel 3.5.1 berechnet (Verdopplung des jährlichen Schädigungsfaktors). Schließlich wird in *SOH-Weitung* die Auswirkung einer Weitung des SOH-Intervalls von regulär 20 % (Batterietechnologie von 2017) bzw. 30 % (Batterietechnologie von 2025) der Bruttokapazität auf 40 bzw. 50 % untersucht. Dies bedeutet, dass der Batterietausch aufgrund von Alterung später erfolgen kann. Die Szenarien *Kleinbus* und *18m-Bus* variieren den Energiebedarf. Dieser beträgt beim Kleinbus nur 25 % des Bedarfs des 12-m-Busses des Basisszenarios. Die Werte für den 18m-Bus entstammen den Untersuchungen aus Kapitel 3.5.2.

6 Berechnungen und Ergebnisanalyse

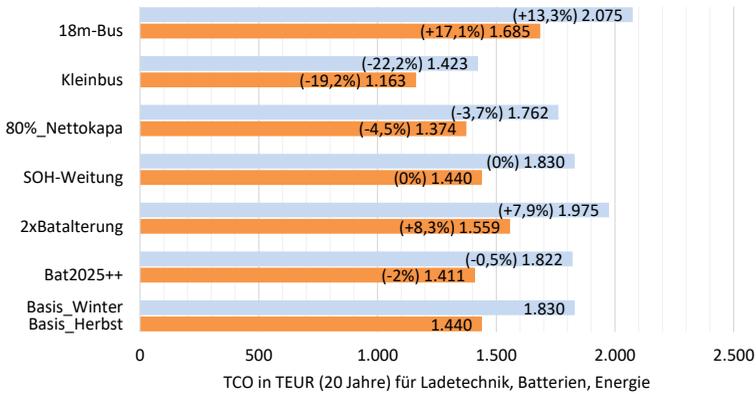


Abbildung 6-14: Optimierungsergebnisse der Variation technischer Parameter

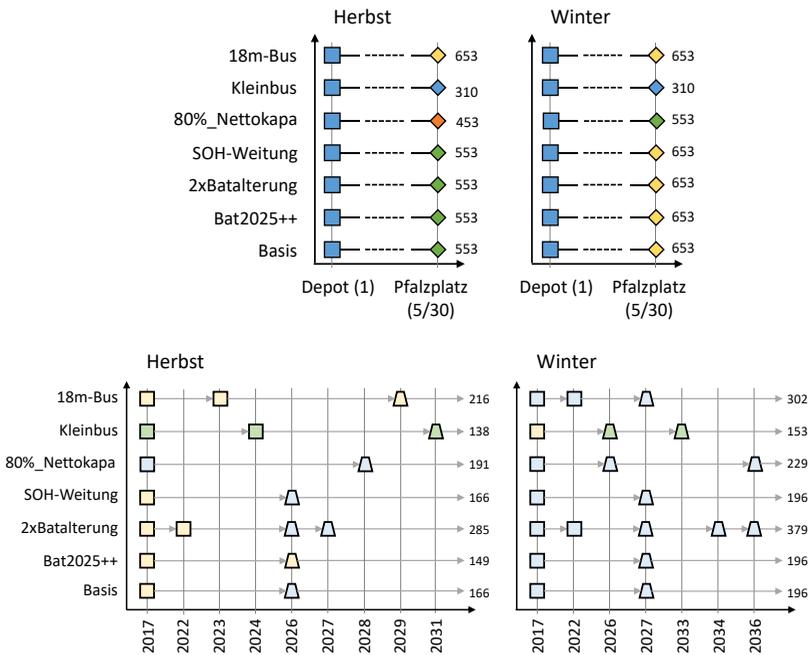


Abbildung 6-15: Optimale Ladehaltestellen- und Batteriekonfiguration für verschiedene technische Betrachtungsfälle

Es stellt sich heraus, dass Parametervariationen bei der Batterietechnologie keine oder nur sehr geringe Auswirkungen auf die optimale Gesamtsystemkonfiguration haben. Deutlich größeren Einfluss auf die Auslegung haben verschiedene Energiebedarfe: Während die Unterschiede zwischen dem Basis- und dem 18-m-Bus-Szenario aufgrund einer verstärkten Alterung vor allem in einer größeren Anzahl benötigter Batterien resultiert, zeigt sich, dass der Betrieb der Linie mit einem Kleinbus grundsätzlich deutlich geringere Aufwände nach sich zieht.

6.1.3.7 Kosten

Die Folgen von Veränderungen auf der Kostenseite sind im Weiteren der Untersuchungsgegenstand. Unter *Syn_Ladnutzung* wird berücksichtigt, dass die Haltestellen Wasserturm (Hbf), Hbf Schleife und Am Friedrichsplatz (Pfp) durch jeweils eine andere E-Buslinie als Ladepunkte mitgenutzt werden können. Dies hat für die genannten Haltestellen nur anteilig der Linie 63 zuzurechnende Infrastrukturkosten zur Folge (Kostenreduktion um 50 %)⁷⁵. Durch den unterstellten elektrischen Betrieb weiterer Buslinien geht auch eine Mehrfachnutzung und somit Kostenreduktion der Ladeinfrastruktur auf dem Depot einher. Das Szenario *gleichKosten_Lad* nimmt an, dass alle Ladetechnologien identische Anschaffungskosten aufweisen. *Batpreis+30%* bzw. *-30%* berücksichtigt höhere bzw. niedrigere Einkaufspreise für alle einsetzbaren Batterien. *Anschaffung2020* und *Anschaffung2025* verschieben das geplante Anschaffungsjahr vom bisher immer zugrundeliegenden Jahr 2017 um drei bzw. acht Jahre nach hinten.

⁷⁵ Hier lassen sich auch andere Kostenaufteilungen der gemeinsam genutzten Infrastruktur diskutieren. Beispielsweise könnte die Aufteilung auch in Abhängigkeit der Anzahl auf einer Linie eingesetzter Fahrzeuge erfolgen. Weiterhin wird hier vorausgesetzt, dass die gleiche Ladestation durch mehrere Linien genutzt werden kann. Fahren z. B. zwei Linien gleichzeitig eine Ladestation an, um eine Umsteigemöglichkeit zu realisieren, so ist mehr als eine Ladestation von Nöten, wobei dennoch für einen Teil der Infrastruktur Synergieeffekte entstehen. In diesem Fall wäre auch eine Anpassung der Kostenaufteilung vorzunehmen.

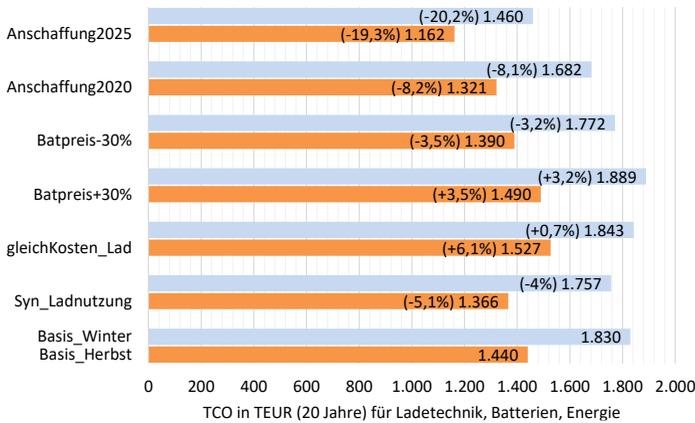


Abbildung 6-16: Optimierungsergebnis der Variation der Ladestations- und Batteriekosten

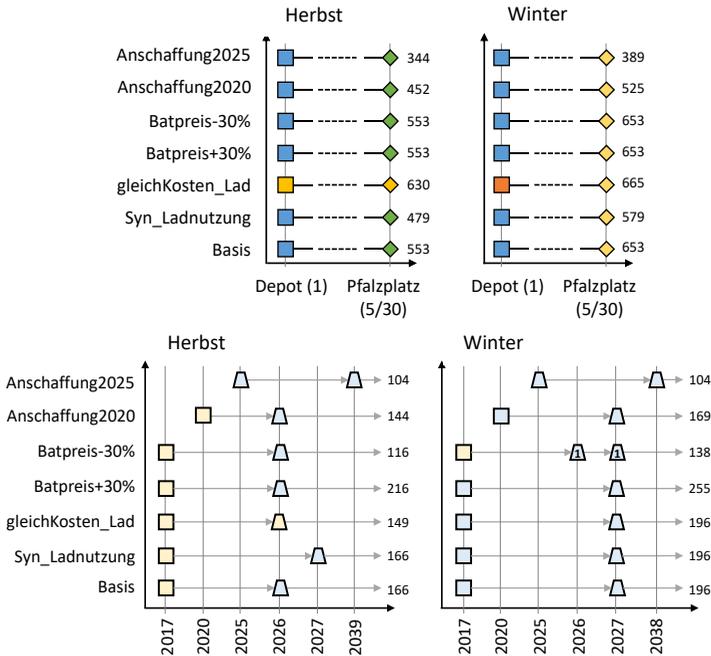


Abbildung 6-17: Optimale Ladehaltestellen- und Batteriekonfigurationen bei Variation der Kostenstruktur

Vergleicht man die Optimierungspotenziale durch die Variation der Kostenstruktur der Anschaffungspreise des Bezugsjahres 2017, so stellt sich heraus, dass diese weitaus geringer ausfallen als dies bei den Szenarien mit infrastrukturellen Maßnahmen oder Ladezeitverlängerungen der Fall ist. Zu berücksichtigen ist, dass die Auswirkung von Preissenkungen bzw. -steigerungen bei den Batterien umso mehr ins Gewicht fallen, je mehr E-Busse im Einsatz sind. Deutliche Auswirkung auf die Gesamt-TCO hat hingegen die Verschiebung des Betrachtungszeitpunkts bzw. des Jahres, in welchem die Anschaffung der E-Buslinie erfolgen soll. Hier machen sich die in Kapitel 2.4.1 beschriebenen Lern- und Skaleneffekte bemerkbar.

6.1.4 Auslegung Buslinien 53 und 60

Um die globale Anwendbarkeit der Methodik zu zeigen und die Bandbreite ihrer Optimierungsergebnisse detaillierter darzustellen, werden nachfolgend Optimierungen für die Linie 53 (fünf Busse im Regelbetrieb) und 60 (vier Busse im Regelbetrieb) durchgeführt (siehe Tabelle 3-1). Die wesentlichen Inputdaten sind den Fahrzeugsimulationen beider Linien aus Kapitel 3.5.2 zu entnehmen (TestszENARIO 5). Zur Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der Basisszenarien der Linie 63 kann der Solver bei den Testinstanzen *L53* und *L60* aus der kompletten Bandbreite an Lade- und Batterietechnologien wählen. Für die Linie 53 wird exemplarisch noch folgende Parametervariation durchgeführt: Der Einsatz einer 480 kWh-Batterie in einem 12-m-Bus ist, wie bereits beschrieben, nur theoretischer Natur. Daher soll diese Möglichkeit im *L53_H&W_o480kWh*-Szenario sowohl unter Herbst- als auch unter Winterbedingungen ausgeschlossen werden. Da es, das Ergebnis vorweggreifend, für das letztgenannte keine Lösung gibt, wird in den Szenarien *L53_H&W_o480kWh_60%* und *L53_H&W_o480kWh_75%* das Nettokapazitätsintervall aller Batterien auf 60 bzw. 75 % geweitet, um hierüber noch eine Lösung für das zugrundeliegende Szenario zu finden.

6 Berechnungen und Ergebnisanalyse

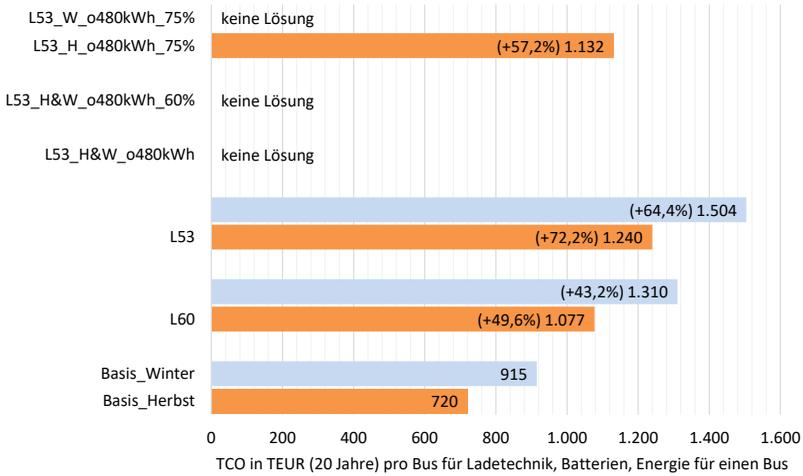


Abbildung 6-18: Optimierungsergebnisse für die Linien 53 und 60

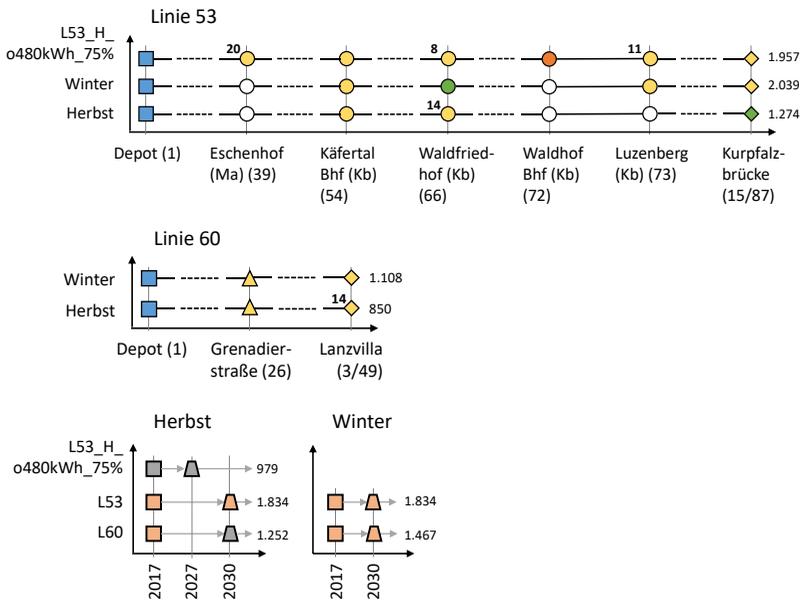


Abbildung 6-19: Optimale Haltestellen- und Ladestationenkonfiguration Linien 53 und 60

Aufgrund der langen Linienverläufe (L53: 35 km, L60: 21 km)⁷⁶, der relativ hohen Durchschnittsgeschwindigkeiten (L53: 21 km/h, L60: 16 km/h) und der geringen täglichen Standzeiten an den ausgewählten (optimalen) Ladehaltestellen (L53: 62 (Herbst) bzw. 68 (Winter), L60: 73 Minuten), gestaltet sich die Elektrifizierung der beiden Linien als aufwändig. Aus diesem Grund entscheidet sich der Solver in den Basisszenarien auf beiden Linien für die größte Batteriekapazität von 480 kWh⁷⁷ und rüstet zusätzlich neben der Endhaltestelle auch noch Unterwegshaltestellen mit Ladestationen aus. Wird die 480 kWh-Batterie nicht zur Auswahl gestellt (*L53_H&W_0480kWh*), führt dies für die Linie 53 dazu, dass das Nettokapazitätsintervall der 240 kWh-Batterie auf 75 % geweitet werden muss, damit zumindest der Herbst-Betriebstag gefahren werden kann. Im Vergleich zur Linie 63 ergeben sich in jedem Szenario deutlich höhere Umrüstungskosten.

In Kapitel 6.1.1 wurden, anhand der Tabelle 6-1 und Tabelle 6-2, bereits detaillierte Gesamtsystem-TCO und Kennzahlen zur Beurteilung und zum Vergleich von E-Buslinien eingeführt. Mit den nun vorliegenden Daten ist es möglich, die Kennzahlen der Basisszenarien der verschiedenen analysierten Linien zu vergleichen. Im ersten Schritt werden hierzu in Tabelle 6-4 die klassischen und wahren TCO aller drei analysierten Buslinien gegenübergestellt. Tabelle 6-5 dient darauf aufbauend dem Kennzahlenvergleich.

⁷⁶ Hieraus ergeben sich für den 20-jährigen Betrachtungszeitraum folgende Fahrleistungen: L63: 1,185 Mio., L53: 1.856 Mio., L60: 1.408 Mio. km je eingesetztem Bus.

⁷⁷ Für Linie 60 erfolgt im Jahr 2030 ein Wechsel auf die 240 kWh-Batterie.

Tabelle 6-4: Klassische und wahre TCO für die Linien 53 und 60 ggü. der Linie 63 (für Ladestationen, Batterien, Energie und Fahrzeuge ist der jeweilige prozentuale Anteil an den klassischen TCO angegeben)

| TCO-Bestandteil | Linie 63 | | Linie 53 | | Linie 60 | |
|-----------------------------------|---------------|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | Herbst | Winter | Herbst | Winter | Herbst | Winter |
| Ladestationen | 553 (22%) | 653 (22,5%) | 1.274 (14,3%) | 2.039 (20%) | 850 (13,2%) | 1.108 (15%) |
| + Batterien | 166 (6,6%) | 196 (6,7%) | 1.834 (20,7%) | 1.834 (18%) | 1.252 (19,4%) | 1.467 (19,9%) |
| + Energie | 721 (28,7%) | 982 (33,8%) | 3.091 (34,8%) | 3.649 (35,8%) | 2.207 (34,2%) | 2.667 (36,1%) |
| + Fzg | 1.073 (42,7%) | 1.073 (37%) | 2.683 (30,2%) | 2.683 (26,3%) | 2.146 (33,2%) | 2.146 (29%) |
| Σ TCO | 2.513 | 2.903 | 8.881 | 10.204 | 6.455 | 7.388 |
| ggü. Linie 63 | | | +253% | +251% | +157% | +154% |
| + EK Fzg | 66 | 66 | 165 | 165 | 132 | 132 |
| + EK Ladestat. | 6 | 6 | 11 | 14 | 8 | 8 |
| + EK Batterien | 25 | 31 | 278 | 278 | 192 | 192 |
| + EK Energie | 115 | 156 | 492 | 581 | 351 | 424 |
| + EK Feinstaub | 590 | 590 | 2.310 | 2.310 | 1.402 | 1.402 |
| + EK Lärm | 153 | 153 | 598 | 598 | 362 | 362 |
| Σ wahre TCO | 3.468 | 3.905 | 12.735 | 14.150 | 8.903 | 9.939 |
| % Dif. wahre zu klass. TCO | 38% | 34,5% | 43,4% | 38,7% | 37,9% | 34,5% |
| Invest.t (o.EK) | 1.373 | 1.472 | 6.393 | 7.407 | 4.946 | 5.660 |

Insbesondere durch die größten wählbaren Batteriekapazitäten, im Zusammenhang mit der erhöhten Anzahl eingesetzter Fahrzeuge auf den Linien 53 und 60, werden die gesamten TCO sowie der Kostenanteil für die Batterien deutlich umfassender, als dies bei der Linie 63 der Fall ist. Im Gegenzug verringern sich die relativen Kosten für die Ladeinfrastruktur. Hierdurch wird die in Kapitel 6.1.1 postulierte Bedeutung der Batterieauslegung in Abhängigkeit der Flottengröße deutlich. Die in Fußnote 76 beschriebenen, vor allem über die Flottengröße stark variierenden Lebensfahrleistungen schlagen sich in erhöhten Gesamtkosten für die Energie sowie für die externen Kosten nieder.

Tabelle 6-5: Kennzahlenvergleich Basisszenarien der Linien 53 und 60 gegenüber der Linie 63 (alle angegebenen Prozentwerte beziehen sich auf die Werte zur Linie 63)⁷⁸

| Kennzahl in [€] | Linie 63 | | Linie 53 | | Linie 60 | |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | Herbst | Winter | Herbst | Winter | Herbst | Winter |
| €/Linien_km | 264.499 | 305.623 | 253.744 | 291.555 | 307.380 | 351.798 |
| | | | -4% | -5% | +16% | +15% |
| €/Umlauf_km | 13.560 | 15.669 | 30.624 | 35.188 | 29.341 | 33.581 |
| | | | +126% | +125% | +116% | +114% |
| €/km_Lzykl | 1,06 | 1,22 | 0,96 | 1,10 | 1,15 | 1,31 |
| | | | -10% | -10% | +8% | +7% |
| €/Ø-kmh | 209.395 | 241.952 | 422.907 | 485.926 | 403.436 | 461.735 |
| | | | +102% | +101% | +93% | +91% |
| €_Lad/Halt-dauer_Lzykl_Min | 3,81 | 4,40 | 22,28 | 23,37 | 13,81 | 15,81 |
| | | | +485% | +431% | +262% | +259% |
| €/Anzahl_Fzg | 1.256.373 | 1.451.711 | 1.776.210 | 2.040.888 | 1.613.746 | 1.846.940 |
| | | | +41% | +41% | +28% | +27% |
| €_Bat/Anzahl_Fzg | 83.160 | 97.920 | 366.720 | 366.720 | 312.960 | 366.720 |
| | | | +341% | +275% | +276% | +275% |
| €_Lad/Anzahl_Fzg | 276.281 | 326.281 | 254.825 | 407.761 | 212.473 | 276.901 |
| | | | -8% | +1% | -23% | -15% |
| €_HVAC_kWh | 147.441 | 375.482 | 396.959 | 1.014.785 | 295.117 | 741.449 |
| | | | +221% | +161% | +138% | +90% |
| €_EK/km_Lzykl | 0,40 | 0,42 | 0,42 | 0,43 | 0,43 | 0,45 |
| | | | +3% | +1% | +8% | +7% |
| Emissionver. ggü. Diesel (Mio. €) | 1,806 | 1,759 | 6,795 | 6,704 | 4,067 | 3,964 |

Die Kennzahlen helfen der Entscheidungsunterstützung bei der Priorisierung der schrittweise zu elektrifizierenden Buslinien einer Stadt, da sie den Aufwand je Linie vergleichbar machen. Der auf die Linienlänge bezogene Wert €/Linien_km zeigt keine große Abweichung zwischen den drei Linien. Werden die Gesamt-TCO hingegen auf die Umlauflänge bezogen (€/Umlauf_km), ergeben sich deutliche Differenzen. Dies liegt darin begründet, dass die Umlauflänge die Anzahl täglicher Servicefahrten enthält. Die beiden Kennzahlen zeigen auf, dass beim Vergleich verschiedener Buslinien genau darauf geachtet werden muss, dass insbesondere unterschiedlichen Linienlängen,

⁷⁸ Die Erläuterungen der Kennzahlen sind in Fußnote 71 zu Tabelle 6-2 enthalten.

der Anzahl an Servicefahrten und Fahrzeugen Rechnung getragen werden muss. €/km_Zykl weist aus, welche Kosten durch jeden auf einer E-Buslinie gefahrenen Kilometer entstehen. Hierauf können die Kosten für Fahrer und weitere Betriebsaufwendungen addiert werden, um so eine Kalkulationsgrundlage für die Planungsprozesse gemäß Abbildung 2-1 zu erhalten. Wird eine Buslinie beschleunigt oder werden Anpassungen am Fahrplan vorgenommen (siehe Kapitel 6.1.3.1), so hat dies Auswirkungen auf die Durchschnittsgeschwindigkeit der Linie. Die Kennzahl $\text{€/}\varnothing\text{-kmh}$ ist in der Lage, die hiermit einhergehenden sinkenden oder steigenden Gesamtkosten im Verhältnis zum Gewinn bzw. Verlust an Durchschnittsgeschwindigkeit zu messen. So kann die Wirksamkeit einer Maßnahme und ihre Rückwirkung auf andere Linien eruiert werden. $\text{€_Lad/Haltdauer_Zykl_Min}$ bringt zum Ausdruck, dass aufgrund kurzer bzw. unregelmäßiger Haltestellenstandzeiten bei den Linien 53 und 60 mehr in Ladeinfrastruktur investiert werden muss, als das bei der Linie 63 der Fall ist. Auch hier besteht die Möglichkeit, durch Fahrplananpassungen die Halte- und somit Ladezeit insgesamt zu erhöhen und auf diesem Wege Infrastrukturaufwendungen zu reduzieren. Die Kennzahl €/Anzahl_Fzg ermöglicht einen von der Anzahl je Linie eingesetzter Busse unabhängigen Vergleich. Die Elektrifizierung der Linie 53 und 60 ist, nach Stand der Fahrzeugpreise des Jahres 2017, aufgrund der höheren Anzahl anzuschaffender, teurer Fahrzeuge deutlich kostenintensiver. Auch sind die Batteriekosten je Bus, ausgedrückt durch €_Bat/Anzahl_Fzg , bedeutend höher als bei der Linie 63. Auf der anderen Seite kommt aber durch die Kennzahl €_Lad/Anzahl_Fzg zum Ausdruck, dass die Ladestationskosten je Bus auf den Linien 53 und 60 gleich bzw. bedeutend kostengünstiger sind. Dies stützt die Erkenntnis der Szenarien $L53_H\&W_o480kWh_60\%$ und $L53_H\&W_o480kWh_75\%$, dass für die Linie 53 der Fokus der Auslegung auf den Batterien liegen sollte. Anhand von €_HVAC_kWh kann der Betreiber entscheiden, ob bspw. ein alternatives, nicht-elektrisches Heizsystem einen kostengünstigeren Betrieb ermöglicht. Es ist zu beachten, dass der Betrieb der Klimatisierung zeitabhängig ist: Je mehr Busse auf einer Linie verkehren und je länger der Umlauf ist, desto höher sind die Klimatisierungskosten im Vergleich. Würden im Falle einer Ausschreibung auch externe Kosten in die

Betrachtung miteinbezogen (siehe Tabelle 1-1), so können diese anhand der Kennzahl $\text{€}_{EK/km_Lzykl}$ pro Kilometer ausgewiesen werden. Da diese zum größten Teil (Energie, Feinstaub, Lärm) von der gefahrenen Strecke abhängen, relativieren sich die Unterschiede zwischen den betrachteten Linien. Anhand des Emissionsvermeidungspotenzials gegenüber dem alternativen Einsatz von Dieselnissen lässt sich festhalten, dass ein E-Busbetrieb auf allen drei Linien mit erheblichen ökologischen Vorteilen einhergeht.

6.1.5 Schrittweise Auslegung von E-Busnetzen

Im Kapitel 6.1.3.7 wurde im Szenario *Syn_Ladnutzung* bereits der Fall analysiert, dass Ladepunkte an Haltestellen durch mehrere (zwei) Linien genutzt werden können. Entsprechend wird für die Errichtung von Ladestationen an den betreffenden Haltestellen nur mit der Hälfte der linienbezogenen Kosten gerechnet. Wenn der Solver sich entscheidet, an diesen Haltestellen eine Ladestation zu lokalisieren, so entstehen für die zu konfigurierende Linie hier Synergieeffekte, da der Linie nur die Hälfte der Ausrüstungskosten zugerechnet wird. Im Rahmen dieses Kapitels sollen diese potenziellen Synergieeffekte bei der Mehrfachnutzung von Ladeinfrastruktur durch unterschiedliche Linien am Beispiel der Linie 63 in Verbindung mit der Linie 60, im Hinblick auf die linienübergreifende Einführung von E-Bussen, gründlicher und konkret bezogen auf den praktischen Anwendungsfall betrachtet werden. Hierdurch wird, anhand eines Beispiels unter Einsatz der Methodik, die Herangehensweise beim schrittweisen Auslegen von E-Busnetzen durchexerziert. Abbildung 6-20 zeigt auf, dass beide Linien in ihren beiden Fahrtrichtungen die Haltestellen Mannheim Hauptbahnhof (Hbf), Kunsthalle, Wasserturm, Am Friedrichsplatz sowie Otto-Beck-Straße anfahren. Für die folgenden Szenarien werden daher bei der Ladepunktlokalisierung, neben den jeweiligen End- und Wendehaltestellen, nur diese theoretisch doppelt nutzbaren Haltestellen in die potenzielle Lösungsmenge miteinbezogen.

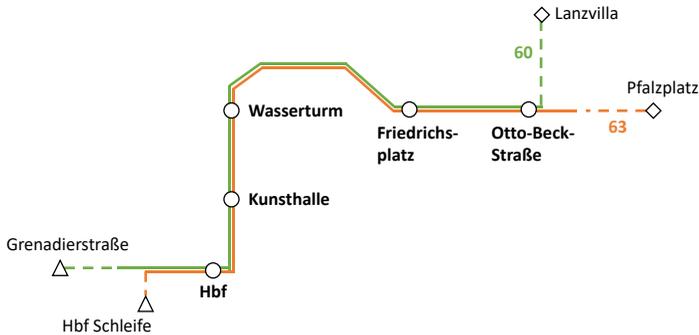


Abbildung 6-20: Gemeinsamer Linienverlauf der Linien 60 und 63

6.1.5.1 Linie 63

Das Szenario *L63+L60&End* stellt hierbei den Fall mit den geringsten Einschränkungen dar, da der Optimierungssolver aus der Menge aller gemeinsamen Haltestellen und den End- und Wendehaltestellen wählen kann. Im Gegensatz hierzu werden beim Szenario *L63+L60_oEnd* die End- und Wendehaltestellen ausgeschlossen: Ladestationen dürfen ausschließlich an den gemeinsam genutzten Haltestellen errichtet werden. *L63+L60&End_+30s* ist identisch zu *L63+L60&End* mit dem Unterschied, dass an jeder gemeinsam genutzten Haltestelle zusätzlich 30 Sekunden Standzeit zum Laden zur Verfügung stehen. Bei *L63+L60_oEnd_1000kW* stehen nur die gemeinsam genutzten Haltestellen zur Auswahl, an diesen ist aber das Laden mit 1.000 kW Leistung (mit 98% Ladewirkungsgrad an der Ladeschnittstelle) möglich⁷⁹. Die Szenarien *L63+L60&End_1/3Kost* und *L63+L60&End_1/4Kost* unterstellen, dass die gemeinsam genutzten Haltestellen von in Summe drei bzw. vier Buslinien zum Laden genutzt werden können und damit eine Drittelung bzw. Viertelung der linienbezogenen Kosten möglich wird.

⁷⁹ Die Anschaffungskosten für eine 1.000 kW-Ladestation liegen bei 756.851 Euro im Jahr 2017.

Im Vorgiff auf die nachfolgenden Analysen zu den Synergieeffekten bei der Linie 60, sind für die Linie 63 weiterhin die Szenarien *LadehalteL60_+30s* und *LadehalteL60&L63* aufgeführt. Diese haben die Ladehaltestellenkonfigurationen der Szenarien *L63+L60&End_+30s* und *L63+L60&End* der Linie 60, gemäß Abbildung 6-24, fix vorgegeben. Das heißt, die Auslegung der Linie 63 hat sich an den optimalen Auslegungsergebnissen der Linie 60 zu orientieren.

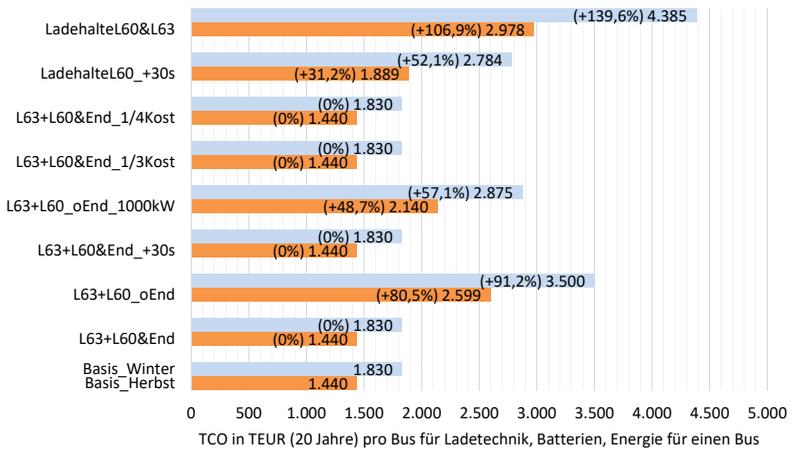


Abbildung 6-21: Optimierungsergebnisse Synergieeffekte der Linie 63 mit der Linie 60

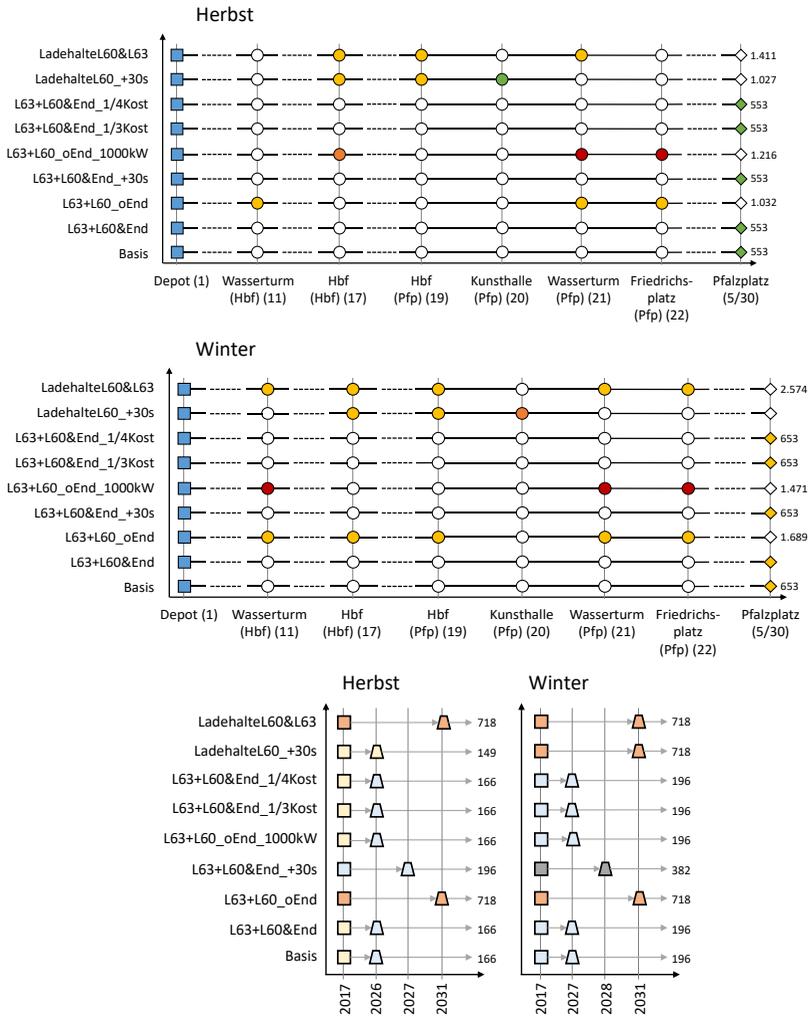


Abbildung 6-22: Optimale Ladehaltestellen- und Batteriekonfigurationen der Linie 63 bei Nutzung von Synergien mit der Linie 60

Solange die Endhaltestellen der Linie 63 zur Auswahl stehen, wird, trotz mehrerer durch weitere Linien nutzbarer Ladehaltestellen, neben dem Depot

nur die Endhaltestelle mit Ladetechnik ausgerüstet. Die Lösung des Basisszenarios bleibt also unverändert. Naheliegenderweise ist dies dadurch begründet, dass die Standzeit und somit die potenzielle Ladezeit an den von einer weiteren Linie mit angefahrenen Haltestellen zu kurz ist, um hier, im Verhältnis zu den entstehenden Mehrkosten gegenüber des Basisszenarios, ausreichend Energie nachzuladen. Muss sich die Konfiguration der Linie 63 der der Linie 60 unterordnen, wie in den Szenarien *LadehalteL60_+30s* und *LadehalteL60&L63* gezeigt, so zieht dies Mehrkosten gegenüber dem Basisszenario von 31,2 bis zu 139,6 % nach sich. Wie nachfolgend noch gezeigt wird (Kap. 6.1.5.2), lassen sich für die Linie 60 bei einer Verlängerung der Standzeit an den gemeinsam nutzbaren Haltestellen um 30 Sekunden Kostenvorteile von 630.335 (Herbst)/611.270 (Winter) Euro gegenüber dem Basisszenario erwirken. Muss sich die Linie 63 nach dieser Auslegung richten (*LadehalteL60_+30s*), so verursacht dies Mehrkosten gegenüber dem Basisszenario i. H. v. 449.733 (Herbst)/953.309 (Winter) Euro. Die Bilanz der Kostenvor- und nachteile fällt bei der Betrachtung beider Linien für den Herbst-Fall positiv aus: Durch die Nutzung der Synergien durch die gemeinsam verwendeten Ladestationen lassen sich in Summe 180.602 Euro einsparen. Im Winter-Fall würde die gemeinsame Nutzung um 342.039 Euro teurer und damit wären keine Synergieeffekte zu erzielen. Im Szenario *LadehalteL60&L63* treten weder im Herbst- noch im Winter-Fall Synergieeffekte auf: Die Linie 60 profitiert zwar durch die mit der Linie 63 gemeinsam genutzte Ladeinfrastruktur i. H. v. 345.648 Euro (Herbst)/ 191.400 Euro (Winter). Für die Linie 63 entstehen allerdings durch die Anpassung ihrer Ladeinfrastruktur an die Linie 60 Mehrkosten von 1.538.498 Euro (Herbst) und 2.554.830 Euro (Winter). Es lässt sich an dieser Stelle festhalten, dass sich, trotz eines teilweise gemeinsamen Linienvverlaufs zwischen den Linien 63 und 60, nur eingeschränkt Synergien bei der Infrastruktur nutzen lassen. Entsprechend kann die Elektrifizierung beider Linien getrennt voneinander geplant und durchgeführt werden.

6.1.5.2 Linie 60

Bei der Analyse möglicher Synergieeffekte zwischen den Linien 60 und 63 werden hier die Effekte auf die Linie 60 eingehend analysiert. Da die Linie 60, wie Tabelle 3-1 zu entnehmen ist, eine deutlich andere Charakteristik als die Linie 63 aufweist, werden im Basisszenario sowohl die Wende-, als auch die Endhaltestelle mit Ladestationen ausgerüstet. Weiterhin kommen die größten verfügbaren Batteriekapazitäten zum Einsatz. Die zur Untersuchung der Synergiepotenziale betrachteten Szenarien entsprechen in ihrem Aufbau und in ihrer Bezeichnung den in Kapitel 6.1.5.1 für die Linie 63 genannten einführenden Erläuterungen.

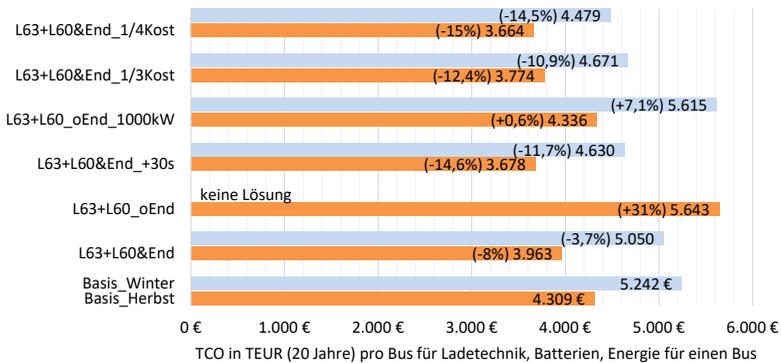


Abbildung 6-23: Optimierungsergebnisse Synergieeffekte der Linien 60 mit der Linie 63

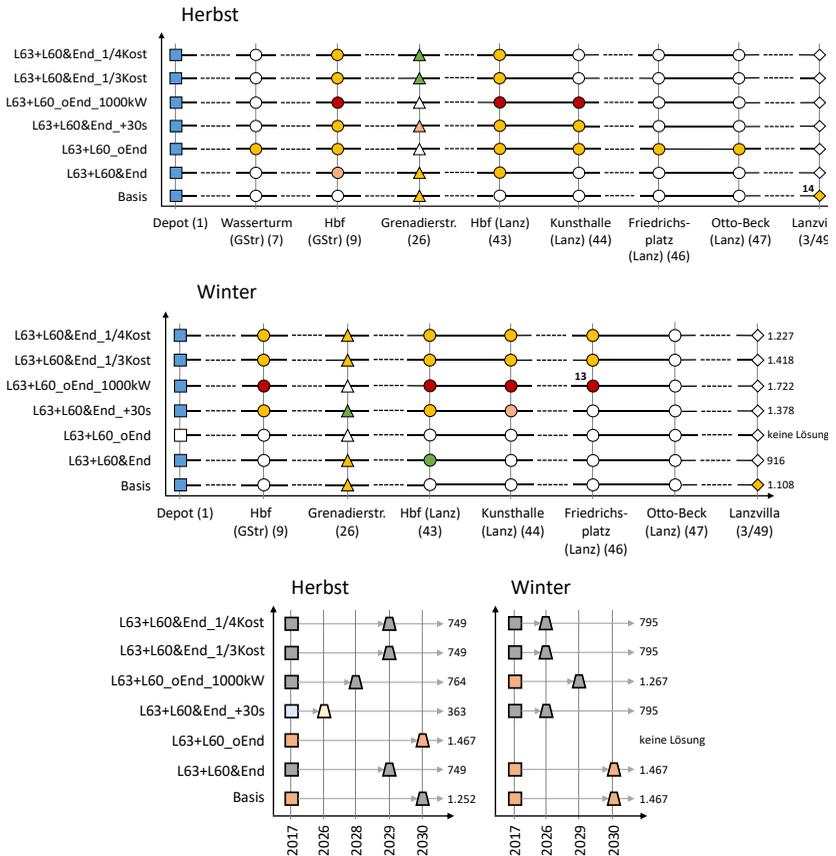


Abbildung 6-24: Optimale Ladehalttestellen- und Batteriekonfigurationen der Linie 60 bei Nutzung von Synergien mit der Linie 63

Bis auf die Szenarien, die einen Ladestationsbau an den Endhalttestellen verbieten, lassen sich aus Sicht der Linie 60 durch das gemeinsame Nutzen von Ladeinfrastruktur mit Haltestellen der Linie 63 Synergieeffekte erzielen. Dies ist zurückzuführen auf die bereits beschriebene Liniencharakteristik mit ihrer langen Wegstrecke und nur vereinzelt, kurzen Haltestellenaufenthalten. Weiterhin kommen bei der Linie 60 regulär vier Busse zum Einsatz,

weswegen vor allem der Einsatz großer Batteriekapazitäten, im Verhältnis zu der Möglichkeit, kostengünstige Ladeinfrastruktur zu errichten, in Summe teurer wird. Halbieren, dritteln oder vierteln sich die Kosten für den Bau von Ladehaltestellen, so wird es günstiger, mehr hiervon zu bauen und gleichzeitig kleinere und damit kostengünstigere Batterien einzusetzen. Bei den genannten Synergievorteilen ist allerdings zu berücksichtigen, dass diese nie für eine Linie isoliert betrachtet werden dürfen. Die Synergien ergeben sich nur dann, wenn sich tatsächlich eine gesamthaft kostenoptimale Nutzung von Ladehaltestellen für mehrere Linien ergibt. Die hierzu gehörigen linienübergreifenden Analysen, welche diesen Sachverhalt stützen, finden sich in den Szenarien *LadehalteL60_+30s* und *LadehalteL60&L63* im vorhergehenden Kapitel 6.1.5.1.

6.2 Ergebnisdiskussion

Dieses Teilkapitel dient der Analyse der im Rahmen des Kapitels 6.1 getätigten Untersuchungen bezüglich der Auslegung zu elektrifizierender Buslinien. Zuerst werden allgemeine Empfehlungen abgeleitet, die auch einen Stufenplan zur Elektrifizierung städtischer Busnetze beinhalten. Abschließend wird die eingeführte Methodik im Hinblick auf ihre Praxistauglichkeit und Aussagekraft kritisch hinterfragt.

6.2.1 Empfehlungen für die Auslegung von E-Buslinien

Ausgewählte Optimierungsergebnisse für den Herbst-Fall der Linie 63 aus den Kapiteln 6.1.1 und 6.1.3 werden in einer Sensitivitätsanalyse zusammengeführt. Hierbei wird das Basisszenario als Referenz herangezogen („Basis“) und im Verhältnis hierzu prozentuale Veränderungen von Parametervariationen aufgezeigt („Reduktion“/„Steigerung“). Dies hat zum Ziel, die wesentlichen Optimierungspotenziale bei der Auslegung von E-Buslinien zu identifizieren, sie gegeneinander abzugrenzen und ihrer Gewichtung nach einzuordnen. Aus den hierbei gewonnenen Erkenntnissen, zusammen mit

den Resultaten der in den Kapitel 6.1.3, 6.1.4 und 6.1.5 getätigten Parametervariationen, werden im Folgenden allgemeine Empfehlungen für die Elektrifizierung von Buslinien abgeleitet.

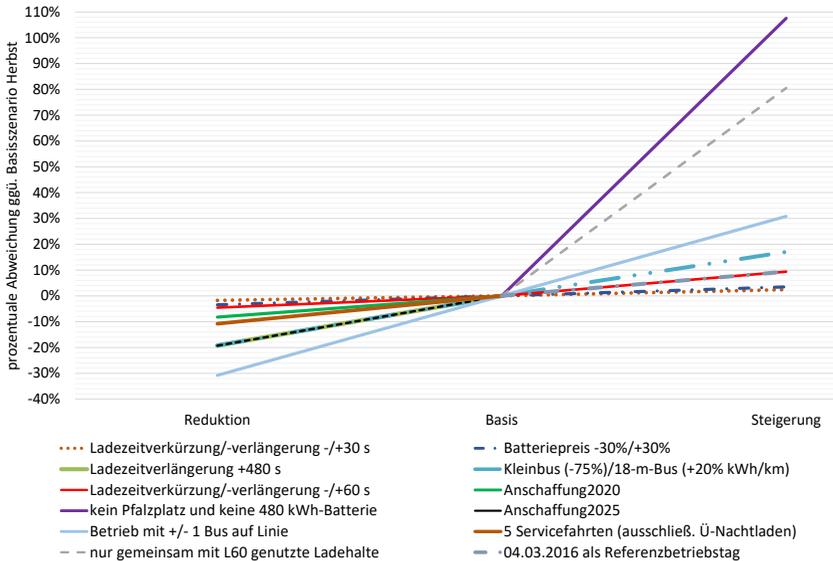


Abbildung 6-25: Sensitivitätsanalyse verschiedener Optimierungen für den Herbst-Fall der Linie 63

Wesentliche Erkenntnisse aus der Sensitivitätsanalyse für die Linie 63 sind, dass infrastrukturelle Einschränkungen, hier das Nichtnutzen der Endhaltestelle zum Laden in Kombination mit einer limitierten Batteriekapazität, zu einer knapp 110 %-igen Kostenerhöhung führt. Je höher die Durchschnittsgeschwindigkeit ist, einhergehend mit wenigen bzw. kurzen Haltestellenstandzeiten einer Linie und je länger gleichzeitig deren Fahrstrecke, desto kostenintensiver wird die Elektrifizierung dieser Linie (siehe Kennzahlenvergleich in Kapitel 6.1.4). Haltestellen ohne lange Standzeiten und mit geringer Haltewahrscheinlichkeit werden bei der Auswahl der Ladehalte-

stellen nicht berücksichtigt. Entsprechend sind die End- und Wendehaltestellen für den Bau von Ladestationen von primärem Interesse. Die Endhaltestellen bieten über alle betrachteten Szenarien und Linien hinweg einen robusten Kern bei der Standortentscheidung für Ladehaltestellen. Sie als Ladepunkte zu konfigurieren bietet zudem den Vorteil, dass hier die Ladevorgänge in die nach Abbildung 2-3 dargestellten unproduktiven Zeitanteile des Busbetriebs integriert werden können. Somit werden die Zeitanteile des produktiven Betriebs nicht bzw. nur in geringerem Ausmaß durch Ladevorgänge beeinflusst. Als weiterer Vorteil des Ladens an Wend- und Endhaltestellen ist zu nennen, dass davon auszugehen ist, dass diese tendenziell weniger von Linienumplanungen betroffen sind. Daher kann hier mit einem längerfristigen Bestand der Ladeinfrastruktur geplant werden. Aus dem Vorgenannten abgeleitet ist es fraglich, ob zum Beispiel das Integrieren von Ladestationen vor Ampeln zum spontanen Laden während dort entstehender Standzeiten, ein zu rechtfertigendes Kosten-Nutzen-Verhältnis aufweist. Die Ladestrategie des Übernachtsladens kann nur für Linien mit einer geringen Tagesfahrleistung (Größenordnung kleiner 100 Kilometer pro Tag beim 12-m-Bus) und bei gleichzeitigem Einsatz nichtelektrischer Zuheizter in Betracht gezogen werden. Bei den üblicherweise geforderten täglichen Reichweiten von 200 bis 300 km [308] ist ein E-Busbetrieb ohne Zwischenladung mit der heutigen Batterietechnologie nicht darstellbar. Aufgrund der aktuell hohen Fahrzeugpreise, vor allem im Verhältnis zu den Batteriekosten und der generell hohen Investitionskosten (siehe bspw. Tabelle 6-1), ist es betriebswirtschaftlich nicht empfehlenswert, zusätzliche E-Busse für eine Linie anzuschaffen, damit Busse zum Nachladen während des Betriebstages geparkt und ersetzt werden können.

Insbesondere anhand von Kapitel 6.1.3.6 wird deutlich, dass sich die vorgeschlagenen Auslegungen als robust gegenüber geringfügigen Optimierungspotenzialen zeigen. Dies bedeutet, dass beispielsweise eine sparsame Fahrweise oder anderweitige technische Energieeffizienzverbesserungen, zumindest in Bezug auf die Betrachtung singulärer E-Buslinien, keine deutlich wahrnehmbaren Effekte auf die TCO haben. Nichtsdestotrotz ist vor allem bei

der Flottenbetrachtung die Summe diverser kleiner Energieeinspareffekte von einer nicht zu vernachlässigenden Relevanz. Anhand der Analysen unter verschiedenen klimatischen Rahmenbedingungen wird hingegen sehr deutlich, dass große Potenziale für Energieeinsparungen und damit Reichweitenverlängerungen in der Temperierung des Innenraums liegen. In diesem Kontext können zum Beispiel durch ein Heizgerät auf Ethanolbasis oder eine anderweitige Optimierung des Klimatisierungssystems (siehe Kap. 2.2.5) deutliche Einsparungseffekte erzielt werden.

Beim konventionellen Betrieb mit Dieselnissen sind verschiedene Reichweitemauslegungen nur durch die Variation des Tankvolumens kostengünstig umsetzbar. Bei der Konfiguration einer E-Busflotte stellt sich die Frage, wie die eingesetzten Batteriekapazitäten im Zusammenspiel mit der jeweiligen Ladehaltestellenkonfiguration einer Linie kostenoptimal in der Lage sind, den vom Dieselbus gewohnten, stadtweiten, flexiblen Betrieb zu gewährleisten. Anhand der getätigten Berechnungen wird deutlich, dass ein für die Linie 63 konfigurierter Bus nicht in der Lage wäre, die für die Linie 53 bzw. 60 optimierte Ladehaltestellenkonfiguration zu fahren. Weiterhin ist zu bedenken, dass eine rein aus E-Bussen bestehende Flotte auch in der Lage sein muss, Sonderverkehre (z. B. bei Großveranstaltungen oder im Schienenersatzverkehr) abzubilden. Hier sind besonders die in Kapitel 2.1.1 eingeführten Anforderungen der Daseinsfürsorge und der Aufrechterhaltung des Betriebs zwingend zu beachten. Um dieser Herausforderung zu begegnen, wird vorgeschlagen, die Buslinien einer Stadt in Cluster entsprechend ihrer Linienlänge zu unterteilen. Für Mannheim ist dies beispielhaft der Tabelle A-1 im Anhang zu entnehmen. Für jedes Cluster wird eine Teilflotte mit entsprechender, einheitlicher, maximaler Batteriekapazität gebildet, die im Stande ist, jede im Cluster enthaltene Buslinie zu fahren. Mithilfe der eingeführten Methodik kann unter freier Parameterwahl herausgefunden werden, welche Batteriekonfiguration die längste im Cluster enthaltene Buslinie benötigt. Durch geeignete Parametervorgaben kann die sich ergebende Batteriegröße bei der Optimierung aller weiteren im Cluster befindlichen Linien festgelegt und deren Ladeinfrastruktur danach optimiert werden. Die Zuteilung von

Buslinien in Cluster kann mithilfe von statistischen Auswertungen auf Basis von GPS-Messungen, wie in Kapitel 3.2.1 dargestellt, unterstützt werden. Der genannten Tabelle im Anhang ist zu entnehmen, dass Busse der Linie 63, im Cluster 0 – 5 km, auch alle anderen Linien fahren könnten. Somit stellt die Fahrzeugkonfiguration der Linie 63 den Benchmark ihres Clusters dar.

Anhand der drei untersuchten Linien 53, 60 und 63 lassen sich grundlegende Aussagen zur Elektrifizierung von Innenstadtverkehren (SORT 1) gegenüber Vorstadtverkehren (SORT 2) ableiten. Je länger der Linienvorlauf ist, je weiter er aus der Innenstadt herausführt und je geringer die Fahrgastfrequenz ist, desto bedeutsamer werden große Batteriekapazitäten und hohe Ladeleistungen bzw. lange Standzeiten an den Wende- bzw. Endhaltestellen. Beurteilt man davon abgeleitet die Betriebswirtschaftlichkeit der Elektrifizierung verschiedener Linien (z. B. anhand der Kennzahlen aus Tabelle 6-5), so sind, nach Stand des Jahres 2017, Linien mit vielen Bussen auf langen Linienvorläufen und dem Bedarf nach großen Batteriekapazitäten nachrangig zu elektrifizieren gegenüber Linien mit kürzeren Routen, wenigen Fahrzeugen und langen Ladezeiten an den Endhaltestellen.

Auf Seiten der Variation der Kostenparameter stellt sich heraus, dass die Elektrifizierung umso wirtschaftlicher wird, je mehr Busse auf der Linie eingesetzt werden und je später der Zeitpunkt für die Umrüstung der Linie festgelegt wird. Letzteres ermöglicht das Wahrnehmen von sinkenden Kosten durch Lern- und Skaleneffekte im noch neuen Technologiefeld, welches sich gemäß Kapitel 1.5 in weiten Teilen noch im Prototypenstatus befindet. Die für einen Betreiber am einfachsten umzusetzende Möglichkeit, die Gesamtsystem-TCO zu reduzieren, besteht demnach darin, einen sich weiterentwickelten Stand der Technik abzuwarten. Alternativ kann dieses Resultat auch derart interpretiert werden, dass es zum Anschub des hierfür benötigten Markthochlaufs öffentlicher Förderprojekte bedarf, um aktuelle Kostennachteile für sogenannte „Early Adopter“ [309] zu reduzieren. Unterschiedliche Batteriebeschaffungspreise haben nur geringe Auswirkungen auf die Gesamtsystemkosten. Diese Aussage hängt allerdings stark von der betrachteten

Flottengröße ab. In diesem Kontext kann auch festgehalten werden, dass, wenn auf einer Linie nur wenige Busse verkehren, bei der Auslegung eine Tendenz zu größeren Batteriekapazitäten anstelle mehrerer Ladestationen festzustellen ist. Solange sich die Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturkosten auf dem Niveau des Jahres 2017 bewegen (siehe Kapitel 4.3.1), spielen bei der Betrachtung einer Linie mit wenigen eingesetzten Bussen aus Kostensicht die Batteriealterung, die gewählte Batteriekapazität und auch die Wahl der Austauschzeitpunkte eine nur untergeordnete Rolle.

Um einen kosteneffizienten E-Busbetrieb zu gestalten, lohnt es sich, etablierte Planungsmuster und Betriebsabläufe kritisch zu hinterfragen und in Bezug auf die Anforderungen der neuen Antriebstechnologie anzupassen. Zentrales Ziel hierbei sollte eine Steigerung der Halte- und somit Ladezeit an Wende- und vor allem Endhaltestellen darstellen. Ebenso kann die gezielte Herbeiführung von Synergieeffekten, gemäß Kapitel 6.1.5, vorteilhaft sein. Hierzu kann eine Umstrukturierung von Fahrplänen, Busumläufen oder auch das Einführen gezielter Bus-Beschleunigungssysteme sowie die punktuelle Zusammenlegung von Linienverläufen beitragen. Die bevorzugte Errichtung von Ladestationen an Haltestellen, die von mehreren Linien gemeinsam genutzt werden, bietet grundsätzlich die Möglichkeit, Kostensynergien zu realisieren. Es zeigt sich allerdings, dass diese Strategie nur dann sinnvoll ist, wenn an gemeinsam genutzten Unterwegshaltestellen, im Verhältnis zu den Wende- und Endhaltestellen, nennenswerte und regelmäßige Haltezeiten auftreten. Je mehr Busse auf entsprechenden Linien im Einsatz sind und je höher damit die Batteriekosten im Vergleich zu den Infrastrukturkosten ausfallen, desto ratsamer wird es, gemeinsam genutzte Haltestellen für den Umbau zu Ladepunkten in Betracht zu ziehen. Kapitel 2.1 und Anhang A.1 machen deutlich, dass, in Abhängigkeit jeder Stadt und ihres ÖPNV-Netzes, individuelle Untersuchungen und Lösungen von Nöten sind.

Um im Sinne einer gesamthaften und nachhaltigen TCO-Betrachtung eine ökologisch verantwortungsvolle Abwägung zwischen verschiedenen

Antriebstechnologien zu ermöglichen, wurden die externen Kosten als Vergleichsmaßstab eingeführt. Einerseits wird hierüber die Möglichkeit geboten, die Umweltauswirkungen jedes gefahrenen Kilometers auszuweisen. Andererseits kann hierüber ein exemplarischer Vergleich mit Hilfe des Emissionsvermeidungspotenzials gegenüber dem alternativen Dieselbuseinsatz angestellt werden (Kennzahltabellen Tabelle 6-2 und Tabelle 6-5). Dieser hat zum Ergebnis, dass aus ökologischer Sicht der E-Bus- dem Dieselbuseinsatz gegenüber klar überlegen ist.

6.2.2 Stufenplan zur Einführung des E-Busbetriebs

Aus den Ergebnissen und Erkenntnissen bei der Entwicklung und Anwendung der Auslegungsmethodik wird im Folgenden ein Schema zur schrittweisen Elektrifizierung eines stadtweiten E-Busverkehrs abgeleitet (Abbildung 6-26). Dieses basiert auch auf den praktischen Erkenntnissen aus dem Forschungsprojekt PRIMOVE Mannheim (Kap. 2.1.3.2). Hierbei muss man sich grundsätzlich vergegenwärtigen, dass eine Stadt bzw. ein Betreiber unter normalen Umständen nicht in der Lage sein kann, sein Busnetz auf einmal auf E-Busbetrieb umzustellen. Aufgrund von beschränkten Budgets und Fördermöglichkeiten, Beschaffungszyklen, Ausschreibungsphasen, baulichen Planungen und Umsetzungen, notwendigen Mitarbeiterschulungen, Werkstattumrüstungen sowie Erprobungsphasen kann eine Einführung von E-Bussen nur schrittweise und nicht vollkommen frei gestaltbar erfolgen.

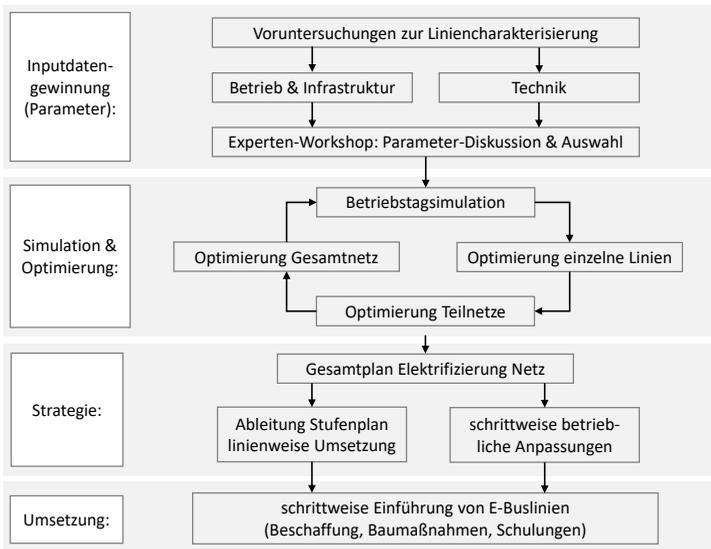


Abbildung 6-26: Schema zur schrittweisen Umsetzung stadtweiter E-Busverkehr

Für die Gewinnung, Einschätzung und Beurteilung der zur Fahrzeugsimulation und anschließenden Optimierung benötigten Eingabedaten wird empfohlen, einen Experten-Workshop abzuhalten. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden zahlreiche Werte recherchiert, gemessen und berechnet, auf deren Basis dann exemplarische Auslegungen für die Mannheimer Buslinien 53, 60 und 63 erfolgten. Die Güte dieser Daten und ihre Allgemeingültigkeit bedarf allerdings einer Qualitätsprüfung durch erfahrene Experten verschiedener Disziplinen und mit praktischem Erfahrungswissen. So hat sich anhand des Forschungsprojekts PRIMOVE Mannheim gezeigt, dass eine frühzeitige Einbindung aller betroffenen Parteien (Verkehrsbetreiber, Busfahrer, Stadtverwaltung, insbesondere Tiefbau- sowie Grünbauamt, Denkmalschutz, Politik, lokale Presse, Bürgerschaft, Energieversorger für Strom, Gas, Wasser und Fernwärme, Telekommunikationsunternehmen, Bus- und Ladetechnikhersteller, Bauunternehmen, Planungsbüros) für eine zügige und erfolgreiche Projektumsetzung sehr empfehlenswert ist. Ergebnisse eines solchen

Experten-Workshops sollten im Wesentlichen folgende Informationen zur Bedatung der Softwaremodelle liefern: Auswahl eines geeigneten Referenzbetriebstags bzw. Erstellung eines repräsentativen Umlaufplans, Worst-Case-Erfordernisse, klimatische Rahmenbedingungen, zukünftige Linienverläufe und Fahrplangestaltung, bauliche Einschränkungen an Haltestellen, Energienetzanbindungsmöglichkeiten sowie Fahrzeug- und Ladetechnikparameter. Unter Einsatz der beschriebenen grafischen Nutzeroberfläche können die genannten Daten direkt erfasst werden (siehe z. B. Kap. 3.2.3). Im Anschluss können sowohl die Fahrzeugsimulationen als auch die Optimierungen der jeweiligen analysierten Linien, gemäß den Kapiteln 3.5 und 6.1.3, unter variierenden Inputdaten durchgeführt werden. Auf Grundlage deren Ergebnisse können nacheinander die Synergiepotenziale gemeinsamer Ladeinfrastrukturen auf parallel verlaufenden Linien untersucht werden, wie dies beispielhaft in Kapitel 6.1.5 gezeigt wurde. Hieraus entsteht nach und nach ein Gesamtbild der Konfiguration eines stadtweiten E-Busnetzes. Mithilfe von Kennzahlen zum Elektrifizierungsaufwand der einzelnen Linien (siehe Tabelle 6-5), unter Berücksichtigung des ÖPNV-Netzplans und unter Hinzunahme der beschriebenen Clusteranalyse zur Flottenauslegung (siehe Kap. 6.2.1 und Anhang A.3), gelangt man zu einer Rangfolge („Stufenplan“), welche Buslinien priorisiert in einen E-Busbetrieb umzurüsten sind. Anhand dieses Stufenplans kann einerseits die schrittweise praktische Umrüstung einzelner Linien beginnen, andererseits können parallel dazu betriebliche Anpassungen vorgenommen werden, um den E-Busbetrieb, beispielsweise durch Fahrplananpassungen, zu unterstützen.

6.2.3 Kritische Würdigung

Dieses Kapitel dient dazu, die praktische Anwendbarkeit der entwickelten Methodik zur Auslegung von E-Busbetrieben zu diskutieren und ihre Weiterentwicklungspotenziale aufzuzeigen.

Die Methodik kann vor allem durch ihre realitätsnahe Modellierung, ihre umfassende Parametrierbarkeit und ihren modularen Aufbau eine Vielzahl

direkter und indirekter Bestandteile des Gesamtsystems E-Bus nach Kapitel 2 miteinbeziehen. Dies bietet den Vorteil einer detaillierten Abbildung der Realität. Auf der anderen Seite ist damit einhergehend der initiale Aufwand der Parametrierung verhältnismäßig hoch. Durch die modulare Struktur bei der Eingabe und Nutzung von Datensets sowie durch die vereinfachte Anlage dieser mithilfe der Benutzeroberfläche (siehe Kapitel 3.2.3), wird der Parametrisierungsaufwand vor der Simulationsdurchführung reduziert. Bereits angelegte Input-Datensätze aus vorangegangenen Simulationen können für Folgeuntersuchungen übernommen und punktuell bei Bedarf angepasst werden.

Die in den Kapiteln 3.2.1 und 3.2.2 beschriebene Gewinnung von Fahrzyklen und Linieninformationen auf Basis von GPS-Messungen oder Verkehrssimulationen stellt ebenfalls einen aufwendigen Weg der Datengenerierung dar. Anstelle dessen können auch mithilfe generischer Fahrzyklen Simulationen durchgeführt werden, beispielsweise mit den beschriebenen SORT-Zyklen, wie dies bei Kunith [59] oder Bunzel [93] der Fall ist. Die Begründung, weshalb sich im Rahmen dieser Arbeit gegen generische Fahrzyklen entschieden wurde, liefert ebenfalls Kapitel 3.2.1.

Während die Ergebnisse der Fahrzeugsimulation zum Energiefluss (technologische Säule) aus Kapitel 3 durch Messdaten validiert sind, basieren insbesondere die in Kapitel 4 berechneten Daten zu Kostenentwicklungen (ökonomische Säule) in weiten Teilen auf Zukunftsprognosen sowie auf einem breiten Spektrum wählbarer Größenordnungen (v. a. bei den Emissionskosten). Hierdurch wird die Genauigkeit der Ergebnisse und deren Aussagekraft stark beeinflusst. Auch der Ansatz, einen repräsentativen Betriebstag auszuwählen und diesen für 20 Jahre als Auslegungsreferenz anzusehen, ist eine sehr theoretische Herangehensweise. Allerdings ist hierbei grundlegend zu berücksichtigen, dass das Ziel der Arbeit die Entwicklung der Auslegungsmethodik ist und nicht die konkrete Linienkonfiguration für den Anwendungsfall Mannheim. Sämtliche zugrundegelegten Kostenabschätzungen dienen vorrangig der Veranschaulichung der Funktionsweise der

Methodik. Den mit der Wahl der Inputdaten einhergehenden genannten Einschränkungen bzw. Nachteilen kann im Falle einer praktischen Anwendung dadurch begegnet werden, dass eine möglichst große Anzahl unterschiedlicher Szenarien durchgerechnet wird, wie dies in Kapitel 6.1 gezeigt wird. Hieran anschließend sollte eine statistische Auswertung der Ergebnisse erfolgen, welche wiederum die Basis für langfristige Entscheidungen bildet. Bei der praktischen Verwendung der Methodik ist weiterhin zu bedenken, dass sich gewonnene Ergebnisse nicht ohne weiteres verallgemeinern lassen. Gemäß Kapitel 2.1 hat jede Stadt ihr individuelles Nahverkehrssystem, welches entscheidenden Einfluss auf die Auslegung nimmt. Gleiches gilt insbesondere für die Integration der E-Buslinien und Ladehaltestellen in das stadt- und ortsindividuelle Energieversorgungsnetz. Um dem zu begegnen, wird in Kapitel 6.2.2 die Einbindung von Experten-Know-how bei der praktischen Anwendung empfohlen. Darüber hinaus wäre eine Verknüpfung bzw. Erweiterung der Standortplanung für die Ladehaltestellen mit einer Optimierung der damit einhergehenden Energienetzbelastung ratsam. Weiterhin wäre es von Vorteil, die beschriebene schrittweise Netzauslegung nicht nur auf Basis der in Kapitel 6.1.5 gezeigten Synergie-Untersuchung zweier paralleler Linien durchzuführen. Ergänzend wäre ein Optimierungsmodell von Vorteil, welches die bisherige Ein-Linien-Betrachtung zu einer integrierten (Teil-)Netz-Optimierung erweitert. Hiermit würden die Standortplanung von Ladehaltestellen sowie die Dimensionierung der Batteriekapazitäten unter Berücksichtigung der Anforderungen aller städtischen Buslinien global optimal erfolgen, wie dies grundlegend bei Kunith der Fall ist [59]. Durch eine weitere Verknüpfung mit dem Themengebiet der Fahrzeugeinsatzplanung könnten auch Ladestationen auf Leerfahrtstrecken der Busse in die potenzielle Lösungsmenge mit einbezogen werden. Dieser Ansatz hätte den Vorteil, linienunabhängige Ladepunkte zu ermöglichen. Auch das Einbeziehen einer ausgewogenen, gesamthaften E-Bus-Flottenplanung sowie die gleichzeitige Optimierung des Fahrplans, zur möglichen Ausweitung der Ladezeiten während des Betriebs, wären Bestandteile eines noch umfassenderen, globalen Optimierungsmodells. Insgesamt kann für die Auslegungsmethodik zum Status quo geschlussfolgert

werden, dass sie, basierend auf den getätigten Parametervariationen, im Verhältnis zu den Ergebnissen (Kap. 6.1) sowie durch die Sensitivitätsanalysen in Abbildung 6-25, als robust bezeichnet werden kann. Nichtsdestotrotz würde eine Erweiterung des Optimierungsmodells um stochastische Robustheitsuntersuchungen dessen allgemeine Aussagekraft weiter erhöhen. Erste Untersuchungen in diese Richtung wurden durch die Arbeiten von Bluhm [310] und Zimmermann [311] angestellt.

In Bezug auf die Resultate der technologischen Säule sei noch auf einen Weiterentwicklungsbedarf bei der Berechnung der Batteriealterung hingewiesen. Die in dieser Arbeit mithilfe des Rainflow-Algorithmus ermittelten Werte (bspw. in Kapitel 3.5.1 und 5.2.2) basieren auf einer relativ geringen Stichprobe ausgewerteter SOC-Verläufe. Um hier noch aussagekräftigere Werte zu erhalten, sollten umfangreiche Studien zu verschiedenen Betriebs-tagen, auf diversen Linien, mit unterschiedlichen Batterie- und Ladehalte-stellenkonfigurationen sowie Belastungskollektiven durchgeführt werden. Die hierdurch ermittelten Ergebnisse sollten anhand von Messdaten validiert werden, siehe hierzu beispielsweise [94]. Weiterhin sind am Fahrzeugmodell insbesondere Weiterentwicklungen, zum Beispiel am Klimamodell möglich, um die Temperierung der Batterien nicht nur als konstanten Wert abzubilden (siehe Kapitel 3.3.5). Ebenso könnte auch die Verlustwärme von Leistungselektronik und E-Maschinen in das Modell mit einbezogen werden. Hiermit und auch mit der Simulation innovativer Betriebsstrategien ließen sich Effizienzsteigerungsmaßnahmen des HVAC-Systems stärker in den Fokus nehmen. Grundlegende Ansätze hierzu finden sich bereits bei Sigle [312] und Gruhler [261].

Weiterhin gilt es im Rahmen einer gesamthaft kostenoptimalen Linien- und Netzauslegung, ebenso die Konfiguration des Depots für den E-Busbetrieb zu untersuchen und in die Optimierung mit einzubeziehen. In der vorliegenden Arbeit wurde das Vorhandensein von ausreichenden Lademöglichkeiten sowie Ladezeiten auf dem Depot vorausgesetzt. Diese Annahme wurde im Zuge der Optimierung berücksichtigt, ohne allerdings der Frage nachzugehen,

inwieweit das Depot zum Laden einer kompletten E-Busflotte genau ausgestaltet sein muss und welche zusätzlichen Aufwendungen und Kosten aus TCO-Sicht hiermit einhergehen [313]. Ein erster Ansatz zur Untersuchung dieser Fragestellung finden sich in Anhang A.11.

Abschließend stellt sich die grundlegende Frage, welche Zukunftsträchtigkeit das batterieelektrische Fahren und damit die grundlegende Motivation der Arbeit aufweist. Gibt es, im Gegensatz zu den in Kapitel 1.3 postulierten Annahmen, langfristig große Entwicklungssprünge bei der Energiedichte von Batterien, lassen sich diese durch das Betanken von Fluiden einfach und schneller nachladen oder setzen sich andere Antriebstechnologien durch, die nicht (nur) auf die Batterie als Energiespeicher angewiesen sind (Hybrid-, Oberleitungs-, Wasserstoffbusse, synthetische Kraftstoffe), so behält die vorgelegte Methodik dennoch ihre Daseinsberechtigung. Mit ihr lassen sich nämlich genauso Streckenabschnitte für die Hybrid-O-Bus-Technik finden, Ladehubs für die elektrisch betriebene Citylogistik oder autonome Serviceagenten im städtischen Personennahverkehr lokalisieren [314] sowie Tankstellen oder Batteriewechselstationen in einem städtischen ÖPNV-Netz festlegen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In den beiden folgenden Teilkapiteln werden zuerst die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst. Daran anschließend werden, in Ergänzung zu Kapitel 6.2.3, Themenfelder benannt, die aufzeigen, wie die vorgestellte Methodik bzw. die aufgebaute Modellwelt noch erweitert und für zukünftige Forschungsfragen genutzt werden kann.

7.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Methodik entwickelt, die die techno-ökonomisch optimale Konfiguration elektrischer Stadtbuslinien ermöglicht. Für die realitätsnahe Abbildung der technologischen Aspekte wurde eine umfassende Fahrzeugsimulation aufgebaut. Diese basiert auf Voranalysen von Buslinien anhand von GPS- sowie Verkehrssimulationsdaten und wurde mithilfe von Messdaten aus dem Praxisbetrieb des E-Bus-Forschungsprojektes PRIMOVE Mannheim validiert. Für den ökonomischen Modellteil wurde ein TCO-Modell für den E-Busbetrieb erstellt und bedatet, welches auch externe Kosten beinhaltet. Die durch die Fahrzeugsimulation und das TCO-Modell gewonnenen Ergebnisse fließen als Eingabewerte in das Optimierungsmodell zur Auslegung von E-Buslinien ein. Ziel der Optimierung ist die Lokalisierung von Ladepunkten auf Buslinien bzw. Fahrzeugumläufen, die Auswahl von Ladetechnologien und Ladeleistungen für diese und ebenso die Festlegung der Batteriekapazität der Fahrzeuge. Durch die dabei stattfindende mehrperiodische Betrachtung, werden neben Batteriealterungseffekten auch Preis- und Technologieentwicklungen über mehrjährige Investitionszeiträume berücksichtigt und entsprechend die gesamthaften TCO sowie Investitionskosten errechnet. Die Methodik wurde, unter Einbindung von Parametervariationen, für die Auslegung von drei verschiedenen Mannheimer Buslinien angewendet. Hierbei wurden Ergebnisse

für verschiedene klimatische, betriebliche, verkehrliche, infrastrukturelle, technologische sowie ökonomische Rahmenbedingungen und Restriktionen generiert. Anhand von Kennzahlen wurde exemplarisch der Elektrifizierungsaufwand verschiedener Buslinien quantifiziert und verglichen. Weiterhin wurden, im Hinblick auf eine stadtweite Elektrifizierung des Busverkehrs, die Synergiepotenziale bei der gemeinsamen Auslegung parallel verlaufender Buslinien untersucht. Indem sich die technische Umsetzbarkeit der Optimierungsergebnisse durch die Fahrzeugsimulation überprüfen und bestätigen lässt, kann die gesamte techno-ökonomische Methodik als validiert angesehen werden. Als Ergänzung wurden neben den klassischen, betriebswirtschaftlichen TCO auch die sogenannten wahren TCO ermittelt. Diese beinhalten zusätzlich die über die Lebensdauer entstehenden externen Kosten des E-Busbetriebs und helfen dabei, dessen ökologische Auswirkungen in Abhängigkeit der Rahmenbedingungen zu quantifizieren. Auf Basis der getätigten Untersuchungen wurden allgemeine Empfehlungen zur Lösung von Problemstellungen bei der Elektrifizierung von Stadtbuslinien formuliert. Diese münden in der Ausarbeitung eines Stufenplans, der die schrittweise Elektrifizierung stadtweiter E-Busnetze strukturieren soll.

Die entwickelte Methodik ermöglicht eine praxisnahe Verknüpfung technischer und ökonomischer Fragestellungen, die sich bei der Einführung von elektrischen Busbetrieben stellen. Durch Variation von Inputparametern lassen sich Systemvergleiche durchführen und die Auswirkungen vielfältiger Zukunftsprognosen untersuchen. Ein hoher Anwendungsbezug ist durch den modularen Aufbau der Softwaremodelle, die flexible Anwendungsmöglichkeit für verschiedene Fahrzeugtypen und für jegliche Buslinien bzw. -netze, eine grafische Nutzerschnittstelle und das automatisierte Input- und Output-Datenmanagement gewährleistet. Betreibern, Städten, Fahrzeug- und Komponentenherstellern sowie der (Förder-)Politik gibt die Methodik ein Werkzeug für ihre Entscheidungsprozesse im Hinblick auf die neue Technologie E-Bus an die Hand.

7.2 Ausblick

Aufgrund des Facettenreichtums der Systembetrachtung des Themenfelds E-Bus ergeben sich, aufbauend auf der in der vorliegenden Arbeit entwickelten Methodik, eine Vielzahl weiterer Untersuchungsaspekte. Diese knüpfen größtenteils an die in Kapitel 6.2.3 bereits genannten Aspekte an und sind als Ergänzungen allgemeinerer Natur hierzu zu sehen.

- **Energieversorgungsnetz:** Weiterführende Untersuchungen können sich auf die Energieversorgungsnetzintegration der Ladestationen konzentrieren. Hierbei wäre insbesondere eine Glättung der Netzbelastung erstrebenswert, die sich beispielsweise über die Integration von Pufferbatterien an den Ladehaltestellen abbilden lassen würde. Im Sinne des „Smart-Grid“-Ansatzes kann darüber hinaus untersucht werden, inwieweit elektrische Energie bidirektional zwischen Fahrzeugen und Energieversorgungsnetz transferiert werden kann. Weiterhin wären im Kontext der Energieversorgung Untersuchungen ratsam, inwieweit sich die Ladeinfrastruktur der E-Busse in ein vorhandenes Straßenbahnenergienetz integrieren lässt. Beispielsweise könnte sich Bremsenergie von Straßenbahnen zum Laden von E-Bussen zwischenspeichern lassen.
- **Digitalisierung:** Die Integration von Daten der Verkehrsleittechnik in die Betriebsplanung der E-Busse sowie deren Kommunikation mit ihrer direkten Umgebung (Stichwort „Bus-to-X“) könnte, unter Kenntnis des aktuellen Verkehrsflusses sowie der Ampelschaltzustände, einerseits dazu beitragen, die Busfahrt energieeffizienter zu gestalten und andererseits die Halte- und somit Ladezeit an Ladepunkten zu optimieren. Ergänzend hierzu könnte ein gezieltes Fahrercoaching, in Form von Schulungen, Telematik sowie durch optische und haptische elektronische Unterstützung, den Busfahrer beim energieeffizienten Fahren und bei der Umsetzung einer optimalen Ladestrategie, auch im Hinblick auf eine schonende Batteriealterung, unterstützen.

- Fahrplan- und Betriebsoptimierung: In zukünftigen Arbeiten könnte das vorgestellte Linien-Optimierungsmodell um eine integrierte E-Bus-Fahrplan-, Flotten- und Fahrzeugeinsatzoptimierung ergänzt werden. Hiermit wäre ein global optimaler stadtweiter E-Busbetrieb zu ermitteln, der das Zusammenspiel des gesamten städtischen ÖPNV berücksichtigt.
- Interoperabilität: Im Hinblick auf zukünftige Entwicklungen im urbanen Logistikverkehr und im Themenfeld des autonomen Fahrens sowie im Kontext des Car-Sharings behält die entwickelte Methodik ihre Relevanz. Zukünftige Analysen könnten beispielsweise darauf abzielen, Orte für zentrale Ladehubs zu bestimmen und diese technologisch so auszulegen, dass sie neben E-Bussen auch für anderweitige E-Fahrzeuge genutzt werden können.
- Überlandbusse: Die bisher aufgrund technischer und finanzieller Restriktionen nur für den Stadtverkehr untersuchte Elektrifizierung von Stadtbussen ließe sich in einem nächsten Schritt für Analysen zur Elektrifizierung von Überlandbusverkehren verwenden.
- Fahrzeugsimulation: Eine detaillierte Modellierung einzelner Fahrzeugkomponenten bzw. auch reale Hardwarekomponenten lassen sich einfach in das existierende modulare Fahrzeugmodell über definierte Schnittstellen einbinden. Die bestehende Softwareumgebung bietet eine Grundlage für vertiefende technologische Untersuchungen einzelner technischer Bauteile, um diese unter Betriebsanforderungen virtuell zu testen und weiterzuentwickeln (Stichworte „Hardware-“ bzw. „Software-in-the-Loop“).
- Depotgestaltung: Unter Einsatz der entwickelten Methodik lassen sich Ladestrategien untersuchen, die die Anzahl nächtlicher Ladevorgänge bzw. deren Gesamtenergiemenge auf dem Depot reduzieren können, indem sie Ladehaltestellen für Busse auf Ausrück- bzw. Einrückfahrten mit einplanen. Das Themengebiet der Depotgestaltung für E-Bus-Flotten stellt ein eigenes, umfassendes zukünftiges Forschungsthema dar.

A Anhang

A.1 Netzformen

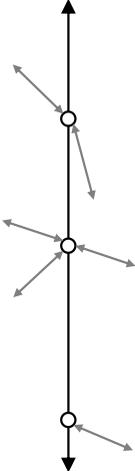
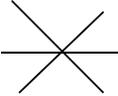
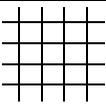
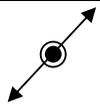
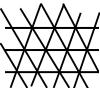
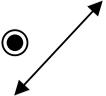
| Netzgrundform | Liniengrundformen (räumlich-geometrische Anordnung) | Hierarchische Netzformen |
|--|--|--|
|  |  |  |
| Ringnetz | Ringlinie | |
|  |  | |
| Radialnetz | Radiallinie | |
|  |  | |
| Rasternetz (rechteckig) | Durchmesserlinie | |
|  |  | Linie mit Verbindungsfunktion:  Linie mit Erschließungsfunktion:  |
| Rasternetz (dreieckig) | Tangentiallinie | |

Abbildung A-1: Liniens- und Netzgrundformen urbaner ÖPNV-Netze, i. A. a. [24]

A.2 ÖPNV-Netzplan Mannheim

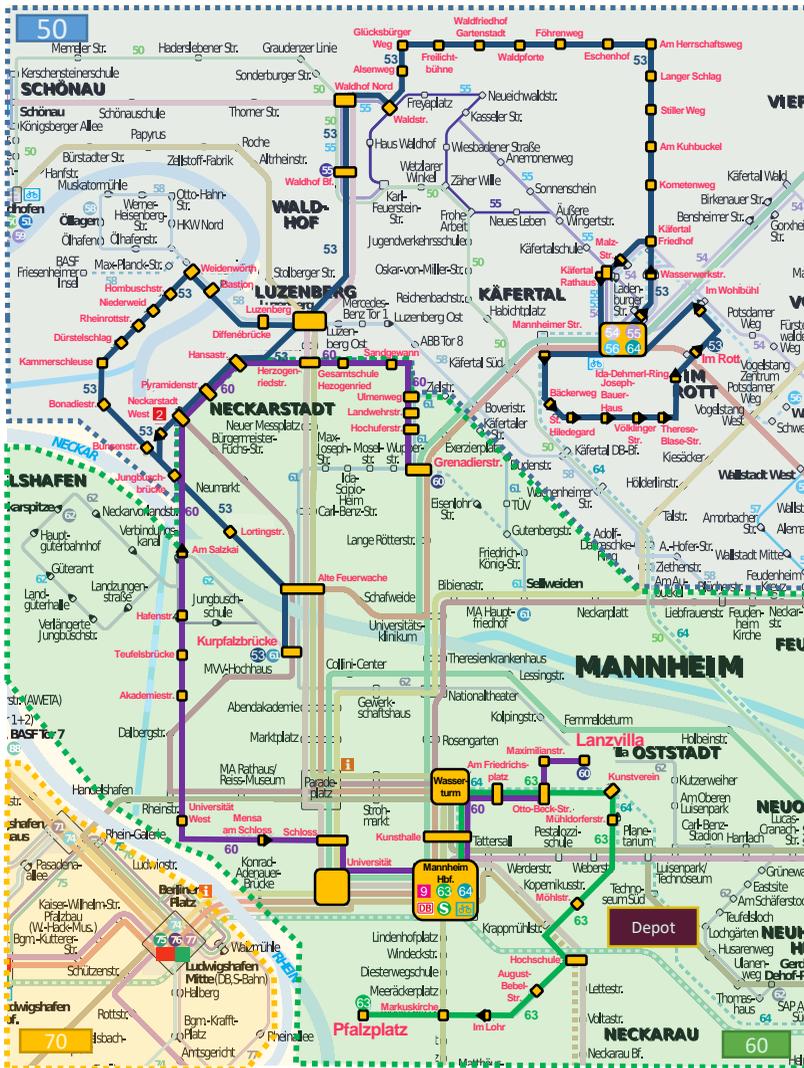


Abbildung A-2: Liniennetzplan Mannheim, die Linien 53, 60 und 63 sind hervorgehoben (nach Stand 2015, Quelle: rnv GmbH)

A.3 Clustering Buslinien Mannheim

Tabelle A-1: Übersicht aller Mannheimer Buslinien (nach Stand 2014, Quelle: rnv GmbH)

| Cluster | Linien- nummer | Linien- länge | Anzahl Haltestellen | mittlerer Halte- stellenabstand | eingesetzte Busse | |
|---------------------------------|---|------------------|------------------------|------------------------------------|-------------------|----------|
| [km] | | [km] | | [m] | Ø 5-20 Uhr | max. |
| 0 - 5 | 49 | 1,5 | 3 | 768 | 0,5 | 1 |
| | 56 | 2,6 | 11 | 442 | 0,1 | 1 |
| | 47 | 3,1 | 10 | 487 | 1,1 | 2 |
| | 59 | 3,1 | 6 | 616 | 0,4 | 1 |
| | 41 | 4,6 | 8 | 759 | 0,4 | 2 |
| | 63 | 4,7 | 13 | 412 | 2,2 | 3 |
| 5 - 10 | 40 | 5,0 | 10 | 559 | 1,9 | 5 |
| | 52 | 5,5 | 9 | 791 | 1,5 | 3 |
| | 48 | 5,6 | 18 | 526 | 1,0 | 2 |
| | 55 | 5,9 | 18 | 470 | 4,6 | 6 |
| | 45 | 6,0 | 9 | 672 | 1,3 | 2 |
| | 42 | 6,5 | 11 | 658 | 0,7 | 1 |
| | 51 | 6,6 | 15 | 538 | 1,2 | 2 |
| | 57 | 7,0 | 16 | 533 | 1,1 | 3 |
| | 61 | 7,2 | 19 | 397 | 2,2 | 4 |
| | 62 | 9,5 | 30 | 404 | 0,9 | 2 |
| > 10 | 60 | 10,4 | 25 | 466 | 3,7 | 6 |
| | 54 | 12,8 | 19 | 803 | 1,0 | 2 |
| | 64 | 13,7 | 15 | 1019 | 0,3 | 2 |
| | 46 | 15,2 | 14 | 780 | 0,6 | 2 |
| | 43 | 15,8 | 16 | 640 | 1,1 | 4 |
| | 58 | 16,1 | 30 | 595 | 1,1 | 5 |
| | 53 | 17,5 | 43 | 463 | 5,0 | 7 |
| | 50 | 21,8 | 39 | 658 | 5,3 | 7 |
| ergänzende Informationen | | | | | | |
| Zahl der Linien | konzessionierte Linien nach §42 PBefG („Regellinien“) und betriebliche Linien (E-Linien, Nachtlinien, Schnellbusse, Schulbuslinien nach §43 PBefG) | | | | | |
| Linienlänge | Linien mit identischem Hin- und Rückweg = einfache Länge, reine Ringlinien = Ringlänge, Linien mit Schleifenfahrten = je nach Größe der Schleife die einfache Länge oder die Ringlänge, Linien mit unterschiedlichen Fahrwegen (Flügelinien) = der längste regulär bediente Fahrweg | | | | | |
| Haltestellenanzahl | gemäß Normalfahrplan | | | | | |
| mittl. Halteabstand | Abstände nach Bedienungshäufigkeit gewichtet | | | | | |
| Zahl der Busse | rnv-eigene Busse und Busse von Sub-Unternehmen ergeben die pro Tag maximal gleichzeitig eingesetzte Anzahl | | | | | |

A.4 GUI zur Dateneingabe

Hairstelleneingabe
X

Liniennummer:

Verzeichnis:

Platzplatz - Hbf Schiefe - Platzplatz

Wasserturm mit unterschiedl. Haltestellen vor/nach 9 Uhr

Bezeichnungen / Zusatzinformationen:

Speichern

Laden

Neu anlegen

Dateiname:

Hochschule:

ID:

lat:

long:

Höhe (m ü. NN):

Kurs []:

End-/Wendhaltestelle

Daten Haltestellen

| Nr. | Name | ID | lat | long | Höhe (m ü. NN) | Kurs [] | Entf./Wendhaltestelle |
|-----|-------------------|------|-----------|----------|----------------|----------|-----------------------|
| 1 | Platzplatz | 6301 | 49.468845 | 8.483278 | 97 | 75 | 1 |
| 2 | August-Bebel-Str. | 6303 | 49.466777 | 8.489217 | 97 | 76 | 0 |
| 3 | Waldstr. | 6304 | 49.468845 | 8.483278 | 98 | 27 | 0 |
| 4 | Waldstr. | 6305 | 49.474790 | 8.487133 | 97 | 27 | 0 |

Selektierte Haltestelle ändern

Selektierte Haltestelle löschen

Leertzeile einfügen

Abbrechen

Übersicht

Weiter >

Abbildung A-3: GUI zur Eingabe der geographischen Haltestellendaten (ausgefüllt mit Beispieldaten zur Linie 63)

Fahrzeug-Baukasten

Angaben zum Fahrzeug bzw. zum anzulegenden Komplettfahrzeug-Datensatz

Hersteller: Hess Fabrikat: Primove Typ 8-, 12-, 18-Meter: 12 m

Beschreibung: Bus aus PRIMOVE Mannheim Projekt, Baujahr 2015

Fahrzeug-Datensets bilden das Komplettfahrzeug

| | | | |
|--------------------------------------|--|-----------|-------------|
| Fahrzeugtyp-abhängige Parameter: | hrzeuge\Abhängige Parameter\Parameter_Hess_Primove_12_m.xlsx | Wählen... | Neu anlegen |
| Antriebsstrang (Motor und Getriebe): | e\Motoren und Getriebe\Motor_Getriebe_Hess_Primove_12_m.xlsx | Wählen... | Neu anlegen |
| Bremsen/Rekuperationssteuerung: | uge\Bremsen und Rekuperation\Bremsen_Hess_Primove_12_m.xlsx | Wählen... | Neu anlegen |
| HVAC: | E-Bus Projektordner\Datenpool\Fahrzeuge\HVAC\Hess_Primove.xlsx | Wählen... | Neu anlegen |

Verzeichnis:

C:\E-Bus Projektordner
\Datenpool\Fahrzeuge

Dateiname:

Hess_12m

| | |
|-------------|----------------------|
| Neu anlegen | Abbrechen |
| Laden | Übersicht |
| Speichern | < Zurück Weiter > |

Abbildung A-4: GUI zur Eingabe der Fahrzeugdatensätze („Fahrzeugbaukasten“)

A.5 Fahrzeugparameter

Tabelle A-2: Fahrzeugparameter für den 12 und den 18 Meter-Stadtbus⁸⁰

| Parameter | Einheit | 12-m-Bus | 18-m-Bus |
|--|-------------------|-----------------------|----------|
| Leergewicht | kg | 13.000 | 17.000 |
| Fahrgastkapazität | | 80 | 130 |
| Stirnfläche | m ² | | 8,9 |
| Fläche Dach | m ² | 30,6 | 45,9 |
| Fläche Fenster | m ² | 36,6 | 51,76 |
| Fläche Längsseite ohne Fenster | m ² | 15,1 | 22,68 |
| Fläche Außenwand ges. | m ² | 67,2 | 97,66 |
| Masse Außenwand | kg | 1.000 | 1.453 |
| Masse Einbauten | kg | 350 | 525 |
| Therm. Kapazität Fenster | J/K | 317.688 | 449.277 |
| Wärmekapazität Raum | J/K | 508.805 | 763.408 |
| Wärmekapazität Wand | J/K | 480.000 | 697.440 |
| Volumen Innenraumluft | m ³ | 55 | 82,5 |
| Massenstrom Heizkreis | kg/s | 0,5944 | 0,8916 |
| Max. Luftmassenstrom Klimaanlage | m ³ /s | 1,5 | 2,25 |
| Max. Heizleistung | W | 18.000 | 27.000 |
| Max. Gesamtkühlleistung Klimaanlage | W | 15.000 | 22.500 |
| Min. Leistung Klimaanlage | W | 5.000 | 7.500 |
| Wärmeübertragungsvermögen Konvektor | W/K | 200 | 300 |
| Leistung Heizpumpe und Konvektor | W | 500 | 750 |
| Leistung Heizkonvektor | W | 200 | 300 |
| Leistung Heizpumpe | W | 300 | 450 |
| Nennleistung E-Maschinen | kW | | 120 |
| Reifen | | 315/70 R22,5 | |
| Reifenmodell | | „RealTime Tire“ [315] | |

⁸⁰ Die Daten entstammen Datenblättern zum Referenzfahrzeug Hess Swiss Primove und der Arbeit von [312]. Teilweise wurden Annahmen getroffen.

A.6 Simulink

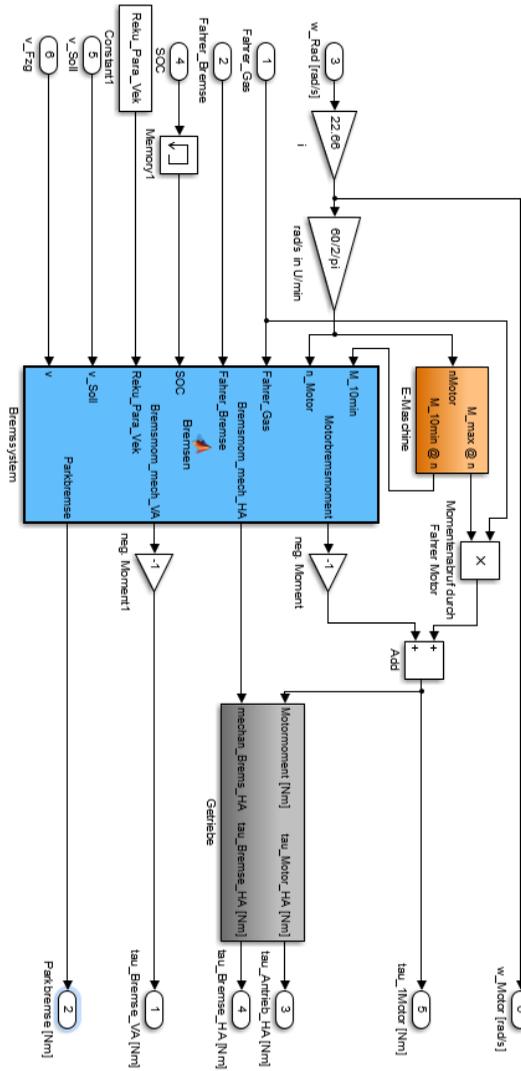


Abbildung A-5: Antriebsstrangmodell in Matlab/Simulink

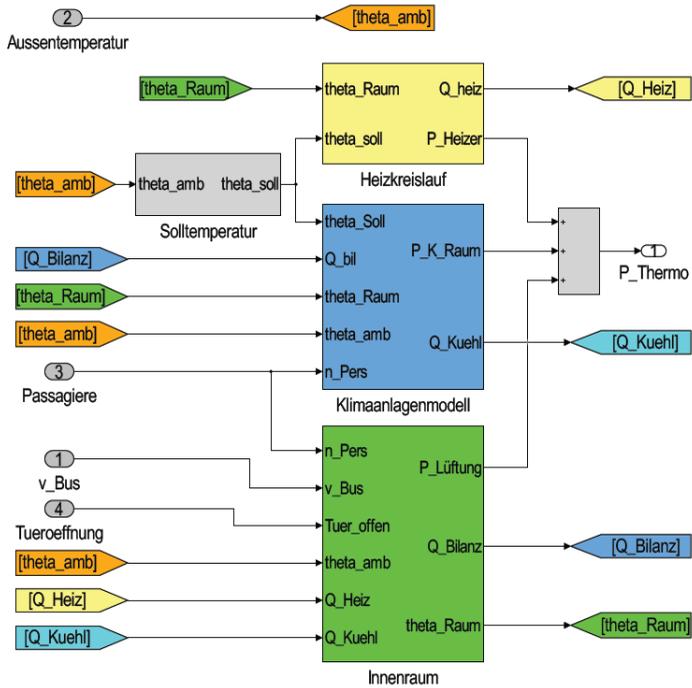


Abbildung 3.8: Aufbau des integrierten Klimamodells

Abbildung A-7: Klimamodell in Matlab/Simulink

A.7 Zusammensetzungen der Strommixe

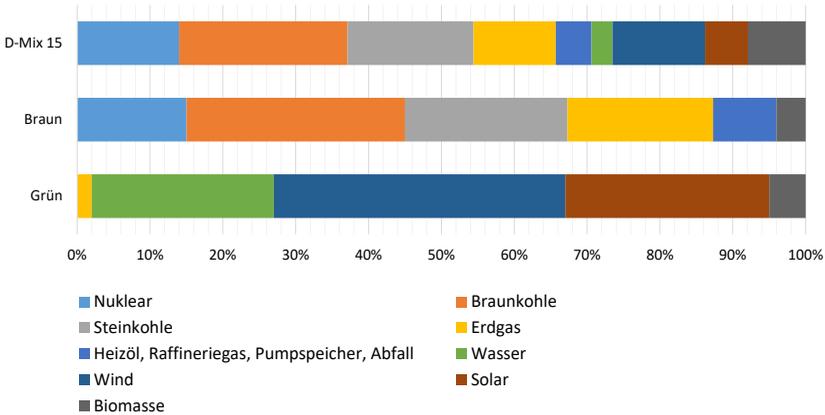


Abbildung A-8: Zusammensetzung verschiedener Strommixe („Grün“, „Braun“, „D-Mix 15“ – letzterer entspricht dem Strommix Deutschlands des Jahres 2015 [316])

A.8 Umweltemissionen und deren Monetarisierung

Anhand Abbildung A-9 werden die der Berechnung der externen Kosten zugrundeliegenden Umweltemissionen und ihre Folgen dargestellt und Zusammenhänge erklärt. Hiermit soll die Bedeutung und Tragweite der Thematik untermauert werden. Aufbauend darauf wird die Monetarisierung der sogenannten externen Effekte, ausgelöst durch die Umweltemissionen, vorgestellt.

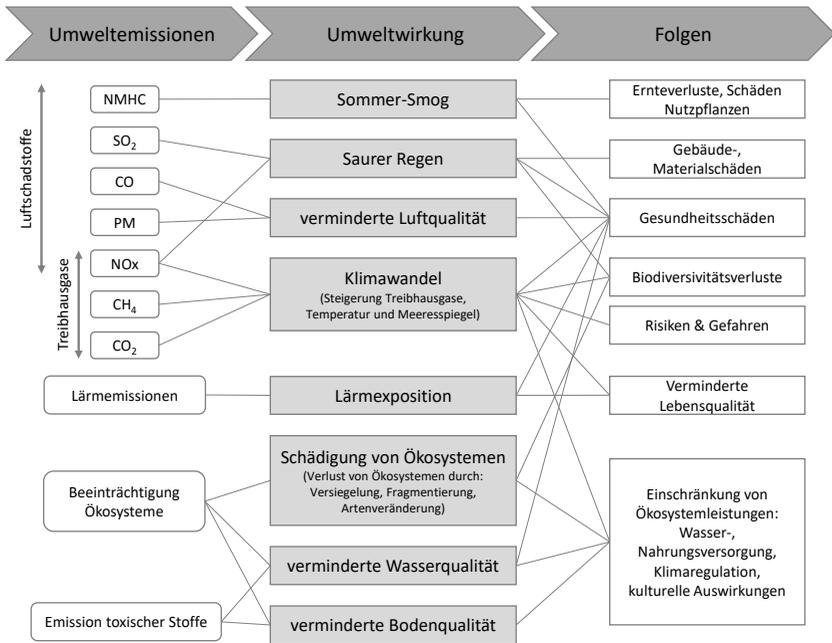


Abbildung A-9: Umweltemissionen und ihre Folgen, i. A. a. [317]

Mit recherchierten Umweltkosten für Luftschadstoffe in €/t aus dem deutschen und dem EU-Straßenverkehr nach [247] lässt sich die Luftverschmutzung wie folgt monetarisieren:

$$\text{Luftschadstoffe} = \sum_L m_{L,l} \cdot p_{L,l} + \sum_L m_{L,g} \cdot p_{L,g} \quad (\text{A-1})$$

Hierbei steht der Index L für den emittierten Luftschadstoff gemäß Abbildung A-9 und m_L in t für dessen Masse. l bzw. g bestimmen, ob es sich um eine lokale oder globale Emission handelt. p_L in €/t ist der Parameter für die Emissionskosten des betrachteten Luftschadstoffes.

Im Falle der Lärmemissionen ist gemäß [242] zu berücksichtigen, dass eine zunehmende Schallintensität die empfundene Ruhestörung degressiv anwachsen lässt. Ergo führt auf stark mit konventionellen Fahrzeugen befahrenen Straßen der Einsatz eines leiseren E-Fahrzeugs nur zu einer geringen Reduktion der Gesamtlärmbelastung. Anhand von Daten von [290] und Berechnungen nach [247] lassen sich Lärmemissionskosten für Stadtbusse wie folgt kalkulieren:

$$\text{Lärmemissionen} = p_{\text{Lärm}} \cdot s_{\text{Betriebsdauer}} \cdot \beta_{\text{Lärm}} \quad (\text{A-2})$$

Die sich auf Dieselbusse beziehenden Lärmemissionskosten $p_{\text{Lärm}}$ in €/km werden dabei mit der Gesamtfahrstrecke über die Betriebsdauer $s_{\text{Betriebsdauer}}$ in km multipliziert und mit einem Lärmemissionsfaktor $\beta_{\text{Lärm}}$ zur Berücksichtigung unterschiedlicher Antriebsstränge gewichtet.

Mit Werten für die externen Kosten der Ressourcenverknappung gemäß [291], wird den Materialkosten der Produktion sowie der Verknappung fossiler Brennstoffe während der Betriebsphase Rechnung getragen.

$$\text{Ressourcenverknappung} = \sum_R (m_R \cdot p_R) + e_{ges} \cdot p_{R_e} \quad (\text{A-3})$$

R beschreibt die bei der Herstellung verknappte Ressource, m_R in t deren Masse, p_R in €/kg ihre Kosten der Verknappung, e_{ges} in l oder in kWh steht für die über die Produktnutzungsdauer benötigte Energiemenge und p_{R_e} in €/l oder in €/kWh für den Preis der mit ihr einhergehenden Verknappung.

A.9 Formeln zur Berechnung der externer Kosten für den Dieselbus

Erläuterungen zu den nachfolgend genutzten Parametern und deren Indizes für den Dieselbus leiten sich aus den vergleichbaren Angaben zum E-Bus gemäß Kapitel 4.2.2 ab.

$$K_{TCO_{wahrDBus}} = K_{TCO_{DBus}} + \sum_i x_i \cdot K_{Ext_{DBus,i}} \quad (A-4)$$

$$K_{Ext_{DBus}} = K_{Ext_{DProd}} + K_{Ext_{DBetrieb}} + K_{Ext_{DRessource}} + K_{Ext_{DLärm}} \quad (A-5)$$

$$K_{Ext_{DProd}} = \sum_i K_{Ext_{Prod,i}} \cdot m_{DProd,i} \quad (A-6)$$

$$K_{Ext_{DBetrieb}} = K_{Ext_{Diesel}} + K_{Ext_{DPM}} \quad (A-7)$$

$$K_{Ext_{Diesel}} = \sum_j K_{Ext_{Diesel,j}} \cdot (m_{Prod_{Diesel,j}} + m_{EmissionBetrieb_{Diesel,j}}) \quad (A-8)$$

$$\begin{aligned} K_{Ext_{DPM}} &= \sum_{i,j} K_{Ext_{PM,i,j}} \cdot m_{PM,i,j} \\ &= \sum_{i,j} K_{Ext_{PM,i,j}} \cdot \frac{m_{km,i,j}}{1.000.000} \cdot (m_{Fzg} + m_{Zu}) \\ &\quad \cdot S_{DBetrieb} \end{aligned} \quad (A-9)$$

$$K_{Ext_{DRessource}} = \left(\sum_i K_{Ext_{Ressource,i}} \cdot m_{Ressource,i} \right) + K_{Ext_l} \cdot V_{gesamt_l} \quad (A-10)$$

$$K_{Ext_{Lärm}} = \sum_{i,j} K_{Ext_{DLärm,i,j}} \cdot S_{DBetrieb,i} \quad (A-11)$$

A.10 Leistungsdaten der EDV-Systeme

Tabelle A-3: Leistungsdaten der zur Optimierung mit CPLEX sowie zur Fahrzeugsimulation mit IPG TruckMaker und Matlab/Simulink eingesetzten Computer

| Rechnername | Prozessor | RAM | CPLEX | IPG/Matlab |
|-------------|-----------|-------|-------|------------|
| 1 – 5 | 3,40 GHz | 8 GB | x | |
| 6 | 2,70 GHz | 24 GB | x | |
| 7 - 8 | 2,50 GHz | | x | x |

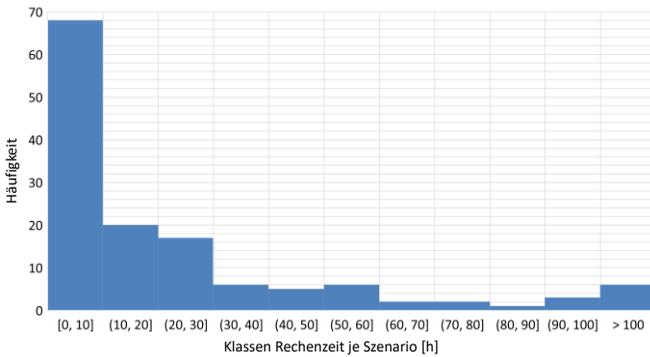


Abbildung A-10: Histogramm Rechenzeiten der Szenarien mit CPLEX

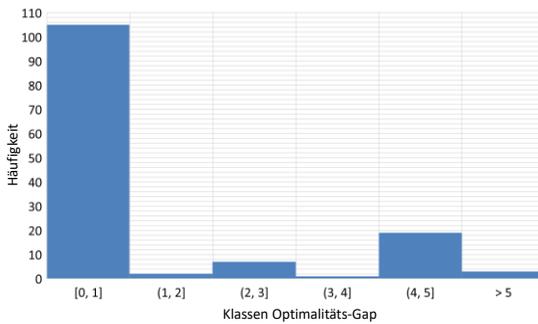


Abbildung A-11: Histogramm zur Verteilung der Optimalitätsgaps

Tabelle A-4: Szenarien aus Kapitel 6.1 mit einem Optimalitätsgap > 1%

| Szenario | Herbst/Winter | Gap |
|----------------------------|---------------|-----|
| 5Fahrt_4Bus | H | 2 |
| 80%_Nettokapa | W | 2 |
| Batpreis+30% | W | 2,5 |
| L60 | W | 3 |
| L53 | H | 3 |
| L53 | W | 3 |
| 9Fahrt_2Bus | H | 3 |
| 18m-Bus | H | 3 |
| o500kW | W | 3,5 |
| L60 | H | 5 |
| L53_H&W_o480kWh | H | 5 |
| L53_H&W_o480kWh | W | 5 |
| L53_H&W_o480kWh_60% | H | 5 |
| L53_H&W_o480kWh_60% | W | 5 |
| L53_H_o480kWh_75% | H | 5 |
| L53_W_o480kWh_75% | W | 5 |
| 04.03.17 | W | 5 |
| +120[s] | W | 5 |
| 6Bus | H | 5 |
| 6Bus | W | 5 |
| 5Fahrt_2Bus | W | 5 |
| 5Fahrt_4Bus | W | 5 |
| 6Fahrt_2Bus | W | 5 |
| 2xBatalterung | H | 5 |
| keinPfalz | W | 5 |
| keinPfalz_o480kWh | H | 5 |
| keinPfalz_o480kWh | W | 5 |
| keinPfalz_o480kWh_1000kW_M | W | 5 |
| 12Bus | W | 10 |
| keinPfalz | H | 10 |
| 12Bus | H | 12 |

A.11 Exkurs: Depotgestaltung für E-Bus-Flotte

Die bisherigen Betrachtungen fokussieren sich ausschließlich auf den täglichen Linienbetrieb und das städtische Liniennetz. Die Umrüstung von Busflotten auf Elektroantrieb bedarf aber auch einer grundlegenden Anpassung der baulichen sowie organisatorischen Abläufe im Busdepot [318]. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Abbildung des nächtlichen Ladevorgangs um sicherzustellen, dass die Busse mit ausreichend Energiereserven den kommenden Betriebstag beginnen können. Um allen Aspekten des Themas der E-Bus-Einführung umfassend zu begegnen, sollen im Rahmen dieses Exkurses die zentralen Herausforderungen bei der Depotkonfiguration thematisiert werden. Zudem soll ein Ansatz aufgezeigt werden, wie diesen mithilfe von Softwaresimulationen begegnet werden kann [319]. Hierbei dient das Mannheimer Busdepot (siehe Kapitel 2.1.3.1) als Grundlage. Dessen Aufbau wird mithilfe der Software AnyLogic [320] modelliert. Anhand verschiedener Szenarien werden Umrüstungsvarianten verglichen. AnyLogic nutzt zur Optimierung die Multimethodenmodellierung. Eine wirtschaftliche Bewertung wird nicht vorgenommen.

Für die Depotgestaltung zukünftiger E-Bus-Flotten ergeben sich, wie auch bei der Linienauslegung, vielfältige Herausforderungen. Es stellen sich verschiedene Strategien zu deren Lösung zur Auswahl. In Verbindung mit den in Kapitel 2.1.2 eingeführten Grundlagen gibt Abbildung A-12 einen Überblick hierüber. Grundsätzlich kann der E-Busbetrieb so konfiguriert werden, dass die Standzeiten im Depot (unproduktive Zeit gemäß Abbildung 2-3) für das Laden der Fahrzeuge oder einen Batteriewechsel genutzt werden. Theoretisch denkbar ist auch die Variante auf ein Laden im Depot zu verzichten und stattdessen die Ladeinfrastruktur des Liniennetzes intelligent auf der Ausrück- bzw. der Einrückfahrt mit einzubinden. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass der Fahrer während der Ladezeit Kosten verursacht. Dieser Ansatz weist tendenziell eine geringe praktische Relevanz auf und wenn, dann nur für einen Teil der Flotte. Der Batteriewechsel wird aus den in Kapitel 2.1.2 dargelegten Gründen nicht weiter berücksichtigt.

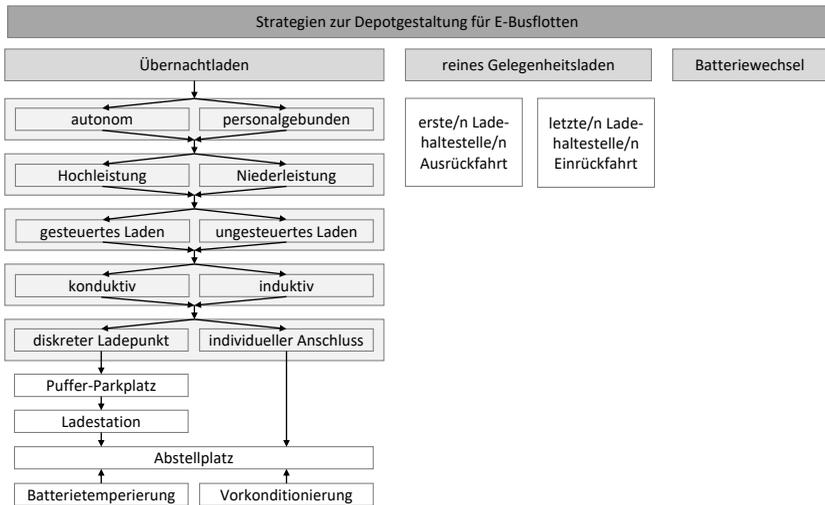


Abbildung A-12: Ladestrategien für das E-Busdepot

Gemäß Kapitel 2.1.1 beginnt und endet ein Betriebstag auf dem Busdepot. Nach Beendigung der Linienfahrten, wird der Bus in das Depot gefahren und dort abgestellt. Der Nachladevorgang kann dabei entweder vor oder auf dem Parkplatz erfolgen, auf welchem der Bus die Nacht verbringt. Beide Alternativen soll im Folgenden Betrachtung finden.

Nachladen an diskreter Ladestation mit einem Pufferparkplatz

Zuerst wird das Nachladen an einer diskreten Ladestation, die sich vor der Einfahrt in die Abstellhalle befindet, analysiert. Zur Pufferung der nach Ende des Betriebstags ankommenden Busse, wird vor dieser Ladestation ein Parkplatz geschaffen, auf welchem die Busse kurzfristig auf ihren Ladevorgang warten können, solange der vorausgehende Bus die Ladestation noch

blockiert⁸¹. Die Modellierung dieses Szenarios ist, angelehnt an das Mannheimer Busdepot, der Abbildung A-13 zu entnehmen. Wenn ein Bus seine Batterie auf der Ladestation vollständig geladen hat, so kann er in die Bushalle einfahren und seinen finalen Stellplatz einnehmen. Die beschriebene Ladestation muss in der Lage sein mit hohen Leistungen (Schnellladung) zu laden, um den Betriebsablauf nicht durch lange Ladezeiten zu behindern. In Erwartung zukünftiger Entwicklungen (siehe Tabelle 1-1), wird für die beschriebenen Umparkvorgänge die Möglichkeit autonomer Busbewegungen mitbetrachtet. Alternativ dazu besteht auch die Möglichkeit, dass die Betriebsabläufe weiterhin durch eine Person umgesetzt werden. Der Unterschied zwischen beiden Varianten liegt in der reduzierte Rüstzeit im Falle der automatisierten Fahrzeugbewegungen. Der personengebundene Fall unterstellt, dass ein Mitarbeiter der Verkehrsbetriebe die Busse zwischen den Ladevorgängen umparken muss. Ziel der Untersuchung ist es herauszufinden, welche minimalen Zwischenankunftszeiten auf dem Depot am Ende eines Betriebstages für die gesamte, einem Depot zugeordnete E-Busflotte umsetzbar sind. Mithilfe von Abbildung A-14 wird veranschaulicht, welche Parameter im Rahmen der Analyse variiert werden können.

⁸¹ Hierbei wird unterstellt, dass aufgrund räumlicher sowie betrieblicher Restriktionen keine weiteren kurzzeitigen Parkmöglichkeiten für neu ankommende Busse auf dem Depot darstellbar sind.

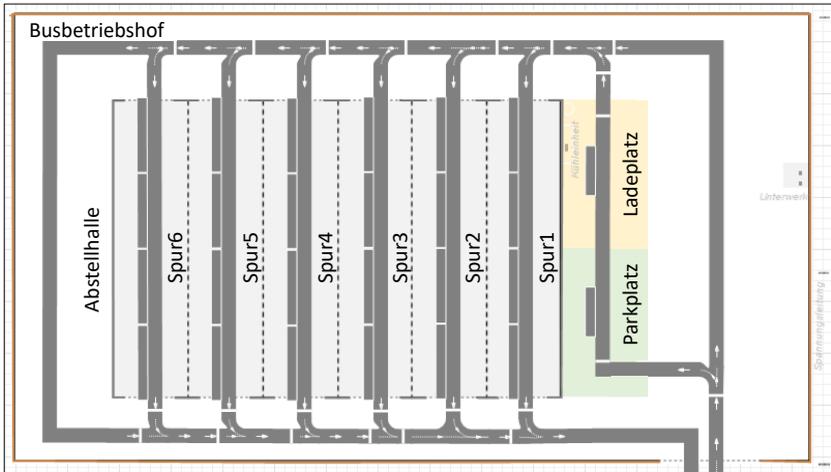


Abbildung A-13: AnyLogic-Modell des Mannheimer Busdepots für das Basisszenario
(1 Parkplatz, 1 Ladeplatz)

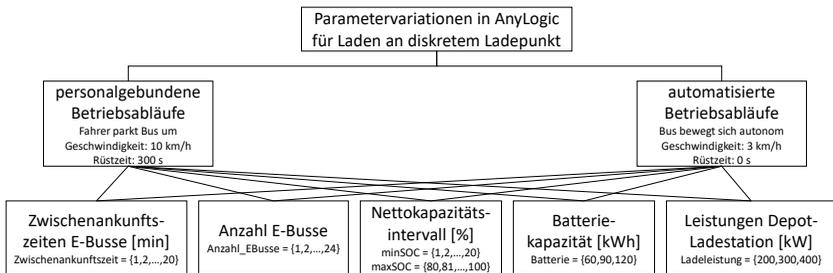


Abbildung A-14: Übersicht der Parametervariationen bei der Depot-Optimierung für einen diskreten Ladepunkt

Für das beschriebene Szenario mit einem fixen Ladepunkt und einem Puffer-Parkplatz wird die Flottengröße auf 24 Busse festgelegt. Weiterhin beträgt das Nettokapazitätsintervall 60 Prozent (minSOC: 20 %, maxSOC: 80 %). Der SOC der im Depot ankommenden Busse liegt, einer Gleichverteilung folgend,

innerhalb dieses Wertebereichs. Hieraus ergibt sich die je Bus, je gewählter Batterie-Bruttokapazität (60, 90, 120 kWh) und je Ladeleistung (200, 300, 400 kW) die benötigte Ladezeit auf dem dafür vorgesehenen Ladeparkplatz. Tabelle A-5 zeigt die Ergebnisse für die minimal möglichen Zwischenankunftszeiten der E-Busflotte auf dem Depot unter variierenden Rahmenbedingungen.

Tabelle A-5: Simulationsergebnisse für minimale Zwischenankunftszeit jedes Busses einer E-Busflotte auf dem Depot unter variierenden Parametern

| Ladeleistung [kW] | | 200 | 300 | 400 |
|----------------------------|----------------------------|------------------------|-----|-----|
| Zwischenankunftszeit [Min] | Batteriekapazität 60 kWh | | | |
| | automat./autonomer Betrieb | 10 | 7 | 6 |
| | personalgebundener Betrieb | 12 | 8 | 6 |
| | Batteriekapazität 90 kWh | | | |
| | automat./autonomer Betrieb | 14 | 10 | 7 |
| | personalgebundener Betrieb | 17 | 12 | 9 |
| | Batteriekapazität 120 kWh | | | |
| | automat./autonomer Betrieb | 19 | 12 | 10 |
| | personalgebundener Betrieb | unzulässig, da > 20 | 15 | 12 |

Es lässt sich festhalten, dass naheliegenderweise eine Erhöhung der Batteriekapazität einen größeren Zeitabstand zwischen den ankommenden Bussen verlangt. Jedoch kann dieser Effekt durch eine Verdoppelung der Ladeleistung nahezu egalisiert werden. Aus dem personenungebundenen Betrieb resultiert eine Verkürzung der minimalen Zwischenankunftszeiten. Anhand einer zukünftigen, noch zu ergänzenden betriebswirtschaftlichen Untersuchung ist zu überprüfen, ob bzw. ab welcher Flottengröße der automatisierte Betrieb wirtschaftlicher wird. Zusammenfassend kann anhand des gezeigten Szenarios und seiner Rahmenbedingungen beispielhaft ermittelt werden, dass bei einer aus 24 Bussen bestehenden E-Busflotte, bei der jeder Bus mit einer 60 kWh-Batterie ausgerüstet ist, bei einer 300 kW-Ladestation auf dem Depot und mit automatisierten Umparkvorgängen, im Durchschnitt sechs Stunden benötigt werden, bis jeder E-Bus eine

vollgeladene Batterie hat. Durch das Laden an nur einer Ladestation ist davon auszugehen, dass der Anschluss und die Leistungsbereitstellung durch das Energieversorgungsnetz unproblematisch sind. Weitere untersuchte Szenarien mit einer Variation der zur Verfügung stehenden Anzahl an Lade- und Puffer-Parkplätzen ist der Arbeit von Weber zu entnehmen [319].

Bus-individuelle Langsamladung (ungesteuert/gesteuert)

Der zweite Betrachtungsfall geht davon aus, dass jeder Bus, nach seiner Ankunft im Busdepot, direkt von seinem Fahrer auf seinem finalen Abstellplatz in der Halle geparkt wird. Dort wird er an seine individuelle Ladeschnittstelle angeschlossen. Da der Bus in diesem Szenario nahezu die komplette Verweildauer auf dem Depot für das Laden nutzen kann, sind keine hohen Ladeleistungen von Nöten. Allerdings ist in diesem Fall die Herausforderung, dass der gleichzeitige Nachladevorgang der kompletten Flotte im Extremfall das Energieversorgungsnetz des Depots überlasten kann und baulich schwer abbildbar ist. Daher liegt hier der Schwerpunkt der Analyse auf der Thematik des ungesteuerten gegenüber des gesteuerten Ladens. Gegenüber den Parametervariationen für das Schnellladen an einer Ladestation, gemäß Abbildung A-14, erfolgt hier eine Anpassung der wählbaren Ladeleistungen auf 10, 20, 40 und 80 kW. Weiterhin können die Unterscheidung in automatisierte und personalgebundene Umparkvorgänge und die damit einhergehenden unterschiedlichen Rüstzeiten vernachlässigt werden. Stattdessen wird je Bus mit einer pauschalen Rüstzeit von 300 Sekunden gerechnet, die durch das Verbinden des Busses mit seiner Ladestation durch seinen Fahrer entstehen.

Im Falle des ungesteuerten Ladens startet der Ladevorgang eines Busses unmittelbar nach dessen Erreichen seines Abstellplatzes. Tabelle A-6 zeigt für eine Flotte aus 24 Bussen mit einer Batteriekapazität von 60 kWh bei unterschiedlichen Ladeleistungen die Dauer an, wann der letzte Bus vollständig geladen ist. Die Werte werden in Abhängigkeit der Zwischenankunftszeit der einzelnen Busse auf ihren Parkplätzen ermittelt.

Tabelle A-6: Simulationsergebnisse des ungesteuerten Ladens einer Busflotte für verschiedene Ladeleistungen und Batteriekapazitäten (auszugsweise)

| | | Ladeleistungen | | | |
|-------------------------------|----|----------------------------|-------|-------|-------|
| | | 10 kW | 20 kW | 40 kW | 80 kW |
| 60 kWh-Batterie | | | | | |
| | | Dauer bis alle geladen [h] | | | |
| Zwischen-ankunftszeiten [Min] | 1 | 3,64 | 1,97 | 1,32 | 0,77 |
| | 5 | 5,43 | 3,39 | 2,76 | 2,29 |
| | 10 | 6,71 | 4,65 | 4,71 | 4,12 |
| | 15 | 8,21 | 6,70 | 6,22 | 5,99 |
| 90 kWh-Batterie | | | | | |
| | | Dauer bis alle geladen [h] | | | |
| Zwischen-ankunftszeiten [Min] | 1 | 5,63 | 2,86 | 1,74 | 0,99 |
| | 5 | 6,56 | 3,41 | 2,80 | 2,47 |
| | 10 | 8,31 | 5,65 | 4,64 | 4,22 |
| | 15 | 9,81 | 7,55 | 7,09 | 6,04 |

Anhand der Tabelle lässt sich in Abhängigkeit der Batteriegröße diejenige Konfiguration wählen, die gewährleistet, dass zu Beginn des nächsten Betriebstags, in Abhängigkeit der nächtlichen Betriebspause und der Zwischenankunftszeiten, alle Busse der Flotte vollständig geladen sind. Die Problematik der Überlastung des Energieversorgungsnetzes beim ungesteuerten Laden wird anhand der Abbildung 7-15 und Abbildung 7-16 deutlich: Kurze Zwischenankunftszeiten in Kombination mit hohen Ladeleistungen führen dazu, dass das Energieversorgungsnetz mit bis zu 1,4 MW Leistung beansprucht wird. Soll die Netzbelastung reduziert werden, so ist dies beim ungesteuerten Laden durch verlängerte Zwischenankunftszeiten und niedrigere Ladeleistungen abbildbar.

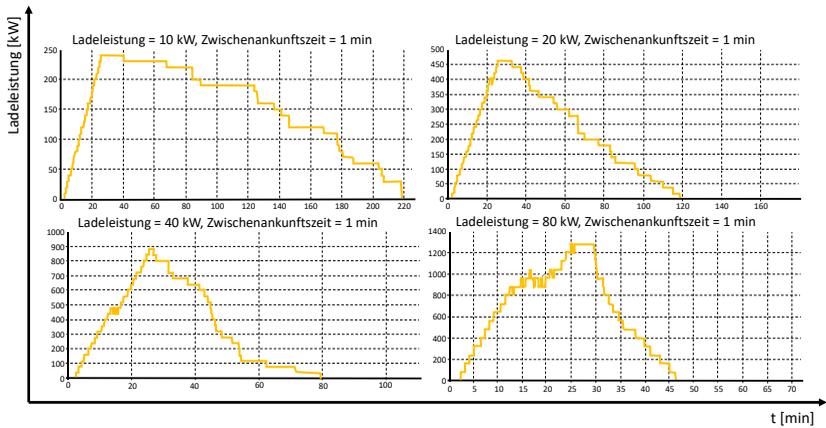


Abbildung A-15: Netzbelastung beim ungesteuerten Laden bei unterschiedlichen Ladeleistungen und einer Zwischenankunftszeit von 1 Minute

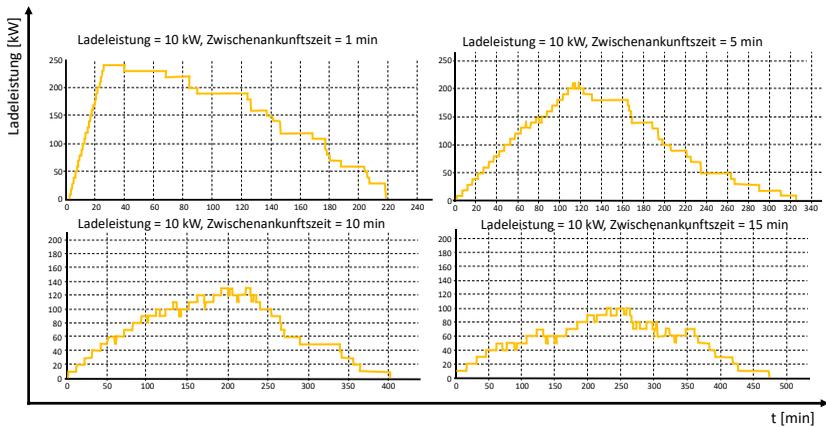


Abbildung A-16: Zeitliche Verläufe der Netzbelastung bei ungesteuertem Laden für unterschiedliche Zwischenankunftszeiten

Im Szenario mit gesteuertem Laden startet der Ladevorgang nicht unmittelbar bei Erreichen des Abstellplatzes, sondern zu späteren, um 10 bzw. 15 Minuten zeitversetzte Zeitpunkte. Das Ergebnis für die 60 kWh- und die 90 kWh-Batterie bei Ladeleistungen von 40 und 80 kW zeigt Tabelle A-7 im Vergleich mit Tabelle A-6: Die Dauer bis alle Busse der Flotte vollgeladen sind, verlängert sich beim ungesteuerten Laden deutlich. Nichtsdestotrotz ist die gesamte Busflotte nach maximal 6,8 Stunden wieder einsatzbereit. Der Vorteil des gesteuerten Ladens zeigt sich anhand Abbildung 7-17 gegenüber Abbildung 7-16: Auch bei kurzen Zwischenankunftszeiten liegt die maximale Netzbelastung bei höchstens 320 kW für die Flotte mit 24 E-Bussen.

Tabelle A-7: Simulationsergebnisse des gesteuerten Ladens einer Busflotte für verschiedene Ladeleistungen und Batteriekapazitäten (auszugsweise)

| Ladeleistungen | | | | | |
|-------------------------------------|---|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|
| | | 40 kW | 80 kW | 40 kW | 80 kW |
| 60 kWh-Batterie | | | | | |
| Start Ladevorgang | | 10 Minuten nach Ankunft | | 15 Minuten nach Ankunft | |
| Dauer bis alle geladen [h] | | | | | |
| Zwischenankunftszeiten [Min] | 1 | 4,1 | 4,3 | 6,5 | 6,0 |
| | 5 | 4,6 | 4,1 | 6,1 | 5,9 |
| 90 kWh-Batterie | | | | | |
| Start Ladevorgang | | 10 Minuten nach Ankunft | | 15 Minuten nach Ankunft | |
| Dauer bis alle geladen [h] | | | | | |
| Zwischenankunftszeiten [Min] | 1 | 4,7 | 4,3 | 6,7 | 6,1 |
| | 5 | 4,7 | 4,3 | 6,8 | 6,3 |

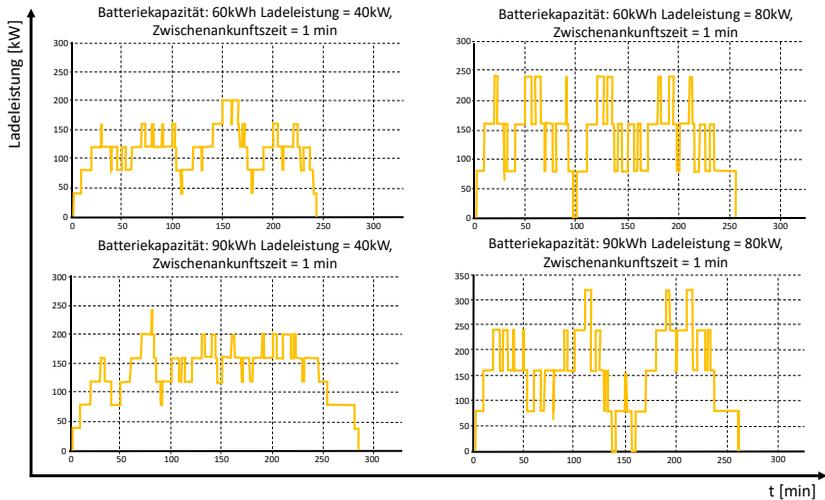


Abbildung A-17: Zeitliche Verläufe Netzbelastung bei gesteuertem Laden

Abschließend kann zusammengefasst werden, dass bei den gezeigten Szenarien das relativ einfach gestaltete gesteuerte Laden, im Hinblick auf eine Glättung der Netzbelastung, den gleichen positiven Effekt erzielt, wie eine Erhöhung der Zwischenankunftszeiten beim ungesteuerten Laden. Es ist davon auszugehen, dass sich durch eine intelligentere Programmierung der Ladesteuerung die Effizienz des Ladeprozesses noch weiter optimieren lässt. Damit bietet die Methodik des gesteuerten Ladens eine deutlich einfachere Umsetzbarkeit und Praktikabilität, als dies beim gezeigten ungesteuertem Laden der Fall ist. Grundsätzlich zeigen alle getätigten Untersuchungen, dass – ohne Betrachtung der Betriebswirtschaftlichkeit – das Bus-individuelle Langsamladen am Abstellplatz betrieblich und planerisch deutlich einfacher umzusetzen ist, wie das Laden an einer Schnellladestation auf dem Depot.

A.12 Rainflow-Algorithmus

Zur Ermittlung der Batteriealterung kommt der Rainflow-Algorithmus zum Einsatz. Dessen Funktionsweise soll nachfolgend veranschaulicht werden: Zuerst muss der zu analysierende SOC-Verlauf um 90 Grad gedreht werden, sodass die Zeitachse nach unten zeigt. Nun kann bildlich gesprochen der Regenwasserfluss von „Dach“ zu „Dach“ (ähnlich wie bei einem Pagodendach) betrachtet werden („Rainflow“). Die einzelnen Regenflüsse beginnen dabei am Ursprung und an der Innenseite jeder Spitze. Sie fließen schräg das „Dach“ hinunter, bis eine entgegengerichtete Spitze erreicht wird. Dort fallen sie senkrecht auf das darunterliegende „Dach“, von wo aus sie weiter hinabfließen. Das Ende eines Regenwasserflusses wird erreicht, wenn eine der folgenden Bedingungen eintritt:

- Der Regenfluss trifft auf einen von einem höherliegenden Dach herabfallenden Fluss.
- Der von einem Dach fallende Regenfluss endet auf der Höhe einer Spitze, die weiter links (bei Flussrichtung nach rechts) bzw. weiter rechts (bei Flussrichtung nach links) liegt als die Ausgangsspitze des betrachteten Flusses.
- Der von einem Dach nach unten fallende Regenfluss trifft auf kein darunterliegendes Dach mehr.

Jeder durch die genannten Regeln von Anfang bis Ende bestimmte Regenwasserfluss entspricht einem Halbzyklus einer Hystereseschleife. Zwei entgegengesetzte Halbzyklen gleicher Größe ergeben einen Vollzyklus und werden zu einer geschlossenen Hystereseschleife zusammengesetzt. Die am Ende der Analyse offen bleibenden Halbschleifen werden gesondert als Residuen betrachtet.

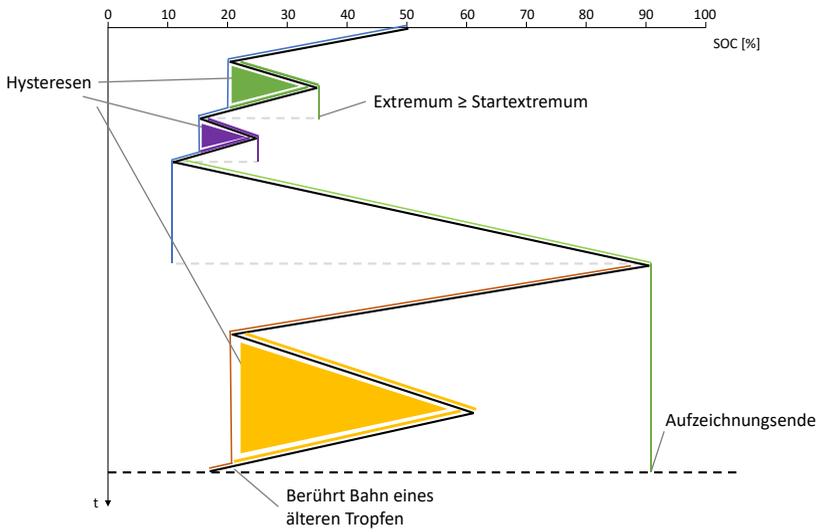


Abbildung A-18: Rainflow-Zählung angewendet auf einen SOC-Verlauf

B Abkürzungsverzeichnis

| | |
|----------|--|
| AC, DC | Alternating Current, Direct Current |
| ASM | Asynchronmotor |
| ävZ | äquivalenter Vollzyklus |
| B&B | Branch & Bound |
| B&C | Branch & Cut |
| BHLS | Buses with a High Level of Service |
| BMS | Batteriemanagementsystem |
| BMVI | Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur |
| BRT | Bus Rapid Transit |
| CCCV | Constant Current Constant Voltage |
| COP | Coefficient of Performance |
| cWLP | Capacitated Warehouse Location Problem |
| DOD | Depth of Discharge |
| EK | externe Kosten |
| EOL | End of Life |
| ESB | Ersatzschaltbild |
| GPS | Global Positioning System |
| GTFS | General Transit Feed Specification |
| GUI | Graphical User Interface |
| HA | Hinterachse |
| HVAC | Heating, Ventilation and Air Conditioning |
| i. A. a. | in Anlehnung an |
| i. H. v. | in Höhe von |
| ILP | Integer Linear Program |

| | |
|--------|---|
| IU | Konstantstrom-Konstantspannungs-Ladeverfahren |
| LCA | Life Cycle Assessment |
| LMG | Leistungsmessgerät |
| LP | Linear Program |
| LR | Lernrate |
| MILP | Mixed-Integer Linear Program |
| MIP | Mixed-Integer Program |
| NV, HV | Niederspannung, Hochspannung |
| OC | Opportunity Charging |
| ON | Overnight Charging |
| ÖPNV | Öffentlicher Personen Nahverkehr |
| OR | Operations Research |
| ÖSPV | Öffentlicher Straßenpersonenverkehr |
| rnv | Rhein-Neckar-Verkehr GmbH |
| SF | Servicefahrt |
| SF | Schädigungsfaktor |
| SOC | State of Charge |
| SOH | State of Health |
| SORT | Standardised On Road Testcycles |
| TCO | Total Cost of Ownership |
| TEUR | Tausend Euro |
| VA | Vorderachse |
| VBA | Visual Basic for Applications |
| VDV | Verband deutscher Verkehrsunternehmen |
| VZ | Vollzyklus |

C Symbolverzeichnis

| Zeichen | Größe | Einheit |
|----------------|-----------------------------------|------------|
| α | Steigungswinkel | ° |
| $\ddot{a}VZ$ | äquivalente Vollzyklen | |
| AK | Anschaffungskosten | € |
| $\beta_{Lärm}$ | Lärmemissionskostenfaktor | |
| b | Energiebedarf | l/100 km |
| BK | Betriebskosten | € |
| C | C-Rate | 1/h |
| C_N | Nennkapazität | Wh |
| d | Index | |
| e | Index | |
| e_{ges} | Energiemenge | kWh bzw. l |
| E | Degressionsfaktor Erfahrungskurve | |
| E | Leerlaufspannung | V |
| EK | Entsorgungskosten | € |
| f | Index | |
| F_N | Normalkraft | N |
| F_W | Gesamt-Fahrwiderstand | N |
| F_{WB} | Beschleunigungswiderstand | N |
| F_{WL} | Luftwiderstand | N |
| F_{WR} | Rollwiderstand | N |
| F_{WSt} | Steigungswiderstand | N |
| F_Z | Antriebskraft | N |

| | | |
|------------|----------------------------------|-----------|
| γ | Gewichtungsfaktor | |
| g | globale Emission | |
| i | Übersetzungsverhältnis Getriebe | |
| i | Index | |
| i | Opportunitätszinssatz | % |
| I | Strom | A |
| I_0 | Investitionsausgabe | € |
| j | Index | |
| k | Index | |
| K | Produktpreis/Anschaffungskosten | € |
| K | Polarisationsspannung | V |
| K | Korrekturfaktor Batteriealterung | |
| K_{Ext} | externe Kosten | € |
| KW_{t0} | Kapitalwert | € |
| l | Radstand | m |
| l | lokale Emission | |
| L | Induktivität | H |
| Ld_{Bat} | gesamte Lebensdauer Batterie | a |
| Ld_{kal} | kalendarische Lebensdauer | a |
| Ld_{zyk} | zyklische Lebensdauer | a |
| LR | Lernrate | |
| m | Masse | kg bzw. t |
| M | Moment | Nm |
| M_B | Bremsmoment | Nm |
| M_R | Antriebsmoment | Nm |
| n | Index | |
| n | Drehzahl | 1/s |

| | | |
|----------------|--|----------|
| n_{Mot} | Motordrehzahl | 1/s |
| n_R | Raddrehzahl | 1/s |
| η | Wirkungsgrad | % |
| ω | Winkelgeschwindigkeit | rad/s |
| p | Emissionskosten | €/t |
| P | Leistung | W |
| P_{el} | elektrische Wirkleistung | W |
| P_{Fe} | Ummagnetisierungs- und Wirbelstromverluste | W |
| P_{Luft} | Luftspaltleistung | W |
| P_{mech} | mechanische Wirkleistung | W |
| $P_{Mot,mech}$ | mechanische Motorleistung | W |
| P_R | mechanische Antriebsleistung am Rad | W |
| P_R | ohmsche Verluste | W |
| P_{Reib} | Reibungsverluste | W |
| $P_{Verlust}$ | Verlustleistung | W |
| PR | Kostendegressionsrate | |
| Q | elektrische Ladung | Ah |
| \dot{Q} | Wärmestrom | W |
| Q_N | Nennladung | Ah |
| r_{dyn} | dynamischer Rollradius | m |
| R | ohmscher Widerstand | Ω |
| R_i | Innenwiderstand | Ω |
| s | Schlupf | % |
| s | Strecke | km |
| SF_{kal} | kalendarische Alterung | 1/a |
| SF_{zyk} | zyklische Alterung | 1/a |
| t | Zeit | s |

| | | |
|-----------|--------------------------------------|------------|
| U | Spannung | V |
| U_0 | Leerlaufspannung | V |
| U_K | Klemmenspannung | V |
| U_N | Nennspannung | V |
| v_{Fzg} | Fahrzeuggeschwindigkeit | m/s |
| v_{Rad} | Radgeschwindigkeit | m/s |
| V | Energiebedarf | kWh bzw. l |
| x | Gewichtungsfaktor | |
| X | kumulierte Produktionsmenge | |
| Z | abzuzinsender Zahlungsstrom | € |
| Z | Inflationsatz, Opportunitätszinssatz | %/a |

D Literaturverzeichnis

- [1] UNITED NATIONS: *Adoption of the Paris Agreement*, FCCC/CP/2015/L.9. Paris, 2015
- [2] EUROPÄISCHEN PARLAMENT UND RAT DER EUROPÄISCHEN UNION: *Richtlinie 2008/50/EG über Luftqualität und saubere Luft für Europa*, Amtsblatt der Europäischen Union L152, 2008
- [3] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *White Paper on transport : Roadmap to a single European transport area : towards a competitive and resource-efficient transport system*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2011
- [4] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT: *Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 : Kabinettsbeschluss vom 3. Dezember 2014*, Berlin, 2014
- [5] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Aufforderungsschreiben - Vertragsverletzung Nr. 2015/2073*, Brüssel, 2015
- [6] C40 CITIES: *C40 Clean Bus Declaration urges cities and manufacturers to adopt innovative clean bus technologies*, Buenos Aires, 2015
- [7] ELECTRIVE.NET: *Zitate des Tages : Olaf Wollersheim*, <http://www.electrive.net/tag/olaf-wollersheim/> – abgerufen: 08.12.2016
- [8] FALTENBACHER, M. ; VETTER, O., et al.: *Statusbericht 2015/16 : Hybrid- und Elektrobus-Projekte in Deutschland*, Berlin, 2016
- [9] HESSISCHES MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, ENERGIE, VERKEHR UND LANDESENTWICKLUNG: *Neues Förderprogramm für Elektrobusse angekündigt*, Wiesbaden, 2016, <https://www.hessen.de/presse/>

pressemittteilung/neues-foerderprogramm-fuer-elektrobuss-
angekuendigt – abgerufen: 09.12.2016

- [10] MENGES, S. ; HAHN, D., et al.: *PRIMOVE Mannheim: Umsetzung der PRIMOVE Technologie im täglichen Busbetrieb im ÖPNV und Entwicklung, Test und Zulassung der PRIMOVE Technologie für den Lieferwagenbetrieb : Schlussbericht*, Mannheim, 2016
- [11] MINISTRY OF INDUSTRY AND INFORMATION TECHNOLOGY OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA: *Notice on Printing and Distributing the Work Plan for the Promotion of New Energy Vehicles in the Field of Public Service, such as Beijing-Tianjin-Hebei Railway*, <http://www.miit.gov.cn/n1146285/n1146352/n3054355/n3057585/n3057592/c3616769/content.html> – abgerufen: 12.12.2016
- [12] DEPARTMENT FOR TRANSPORT: *Government awards £30 million funding for cleaner, greener bus journeys*, <https://www.gov.uk/government/news/government-awards-30-million-funding-for-cleaner-greener-bus-journeys> – abgerufen: 08.12.2016
- [13] MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ÉNERGIE ET DE LA MER: *Grands axes : Titre III : Développer les transports propres*, <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Titre-III-Developper-les> – abgerufen: 08.12.2016
- [14] ELIPTIC: *Safe integration of ebuses into existing electric PT infrastructure*, <http://www.eliptic-project.eu/thematic-pillars/integration-ebuses> – abgerufen: 08.12.2016
- [15] INTERNATIONAL ASSOCIATION OF PUBLIC TRANSPORT (UITP): *ZeEUS : Answering environmental urban challenges through the electrification of urban buses*, Brüssel, 23.01.2014
- [16] MÜLLER-HELLMANN, A.: *Batteriebusse im ÖPNV – Strategien, Konzepte, Realisierungen*, KORTHAUER, R. (Hrsg.): *Handbuch Elektromobilität 2015*, S. 102-115, EW Medien und Kongresse, Frankfurt a. M., 2015

- [17] REINHARDT, W.: *Geschichte des öffentlichen Personenverkehrs von den Anfängen bis 2014 : Mobilität in Deutschland mit Eisenbahn, U-Bahn, Straßenbahn und Bus*, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015
- [18] KURCZVEIL, T.: *Optimierung des Energiemanagements induktiv geladener Busse unter Berücksichtigung betrieblicher und verkehrlicher Randbedingungen*, Heureka '14 : Optimierung in Verkehr und Transport, S. 510–523, FGSV-Verlag, Köln, 2014
- [19] VERBAND DEUTSCHER VERKEHRSUNTERNEHMEN (VDV): *Bewertung von E-Bus-Konzepten aus der Sicht von Planung und Betrieb*, VDV-Mitteilungen 11/2014, Nr. 2319, Köln, 2014
- [20] MÜLLER-HELLMANN, A. ; THURM, S.: *Batteriebusse im ÖPNV*, Der Nahverkehr, Nr. 11, S. 30–34, 2015
- [21] AICHINGER, W. ; GIES, J., et al.: *Elektromobilität in der Stadt- und Verkehrsplanung. : Praxiserfahrungen aus den Modellregionen und weitere Wissensbedarfe*, BMVI (Hrsg.), Berlin, 2014
- [22] SPANGENBERG, F., GÖHLICH, D.: *Foresighting new technological systems using simulation - application on e-mobility*, 6th ISPIM Innovation Symposium – Innovation, 2013
- [23] WEIß, M.: *Kostendeckung im ÖPNV*, Der Nahverkehr, Nr. 6, S. 70–73, 2016
- [24] SCHNIEDER, L.: *Betriebsplanung im öffentlichen Personennahverkehr*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2015
- [25] BAKKER, S. ; KONINGS, R.: *The transition to zero-emission buses in public transport – The need for institutional innovation*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017
- [26] MAHMOUD, M. ; GARNETT, R., et al.: *Electric buses : A review of alternative powertrains*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 62, S. 673–684, 2016

- [27] ROGGE, M. ; WOLLNY, S., et al.: *Fast Charging Battery Buses for the Electrification of Urban Public Transport—A Feasibility Study Focusing on Charging Infrastructure and Energy Storage Requirements*, *Energies*, Nr. 8, S. 4587–4606, 2015
- [28] BIEDERMANN, H. (Hrsg.): *Industrial Engineering und Management : Beiträge des Techno-Ökonomie-Forums der TU Austria*, Springer Gabler, Wiesbaden, 2016
- [29] FICHTL, H. ; STEINERT, F.: *IVision and IVInet – Tool Chain for the Electrification of City Bus Routes*, *Transportation Research Procedia* 14, S. 2554–2563, 2016
- [30] MOTT, P. ; KOESLING, S.: *Was bewegt die ÖPNV-Branche?*, *Der Nahverkehr*, Nr. 1-2, S. 19–22, 2013
- [31] MÜLLER-HELLMANN, A.: *Batteriebusse ante portas!?*, *Der Nahverkehr*, Nr. 5, S. 21–27, 2013
- [32] NATIONALE PLATTFORM ELEKTROMOBILITÄT: *Fortschrittsbericht 2014 – Bilanz der Marktvorbereitung*, Berlin, 2014
- [33] DÜNNEBEIL, F. ; REINHARD, C., et al.: *Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasminderung bei schweren Nutzfahrzeugen*, Umweltbundesamt, Texte 32/2015, Dessau, 2015
- [34] MARGRAF, J. ; PÜTZ, R.: *Stickoxid-Emissionen von Bussen effektiv reduziert*, *Der Nahverkehr*, Nr. 9, S. 7–11, 2015
- [35] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY: *World Energy Outlook 2016*, <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WorldEnergyOutlook2016ExecutiveSummaryEnglish.pdf> – abgerufen: 06.08.2016
- [36] FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEMUND INNOVATIONSFORSCHUNG ISI: *Produkt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030*, Karlsruhe, 2015

- [37] NAVIGANT RESEARCH: *Electric Drive Trucks and Buses : Market Data for Medium and Heavy Duty Commercial All-Electric, Plug-In Hybrid Electric, and Hybrid Electric Vehicles*, <https://www.navigantresearch.com/newsroom/sales-of-electric-trucks-and-buses-are-expected-to-reach-nearly-160000-annually-by-2023> – abgerufen: 06.07.2016
- [38] KESICKI, F. (Hrsg.); REMME, U. (Hrsg.); BLES, M. (Hrsg.); FAHL, U. (Hrsg.): *Eine integrative Szenarienanalyse der langfristigen Ölpreisentwicklung*, 6. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, Wien, 2009
- [39] MCKINSEY & COMPANY: *Urban buses: alternative powertrains for Europe*, 2012, https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/20121029%20Urban%20buses%2C%20alternative%20powertrains%20for%20Europe%20-%20Final%20report_0_0.pdf – abgerufen: 16.08.2016
- [40] SCI VERKEHR GMBH: *Buses - Global Market Trends : Markets – Competition – Companies – Key Figures*, Hamburg, 2015, https://www.sci.de/fileadmin/user_upload/Flyer_MC_Bus.pdf – abgerufen: 10.10.2016
- [41] FROST & SULLIVAN: *Strategic Analysis of Global Hybrid and Electric Heavy-Duty Transit Bus Market*, 2013, <http://www.frost.com/sublib/display-report.do?id=NC7C-01-00-00-00> – abgerufen: 15.09.2016
- [42] FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEMUND INNOVATIONSFORSCHUNG ISI: *Gesamt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030*, Karlsruhe, 2015
- [43] HAUSBERGER, S. ; BLASSNEGGER, J., et al.: *Saubere Stadtbustechnologien : Nachrüstlösungen und Neufahrzeuge : Version 01-2010*, Graz, 2010, http://www.eltis.org/sites/default/files/case-tudies/documents/icut_broschuere_aktuell1_11.pdf – abgerufen: 12.12.2016

- [44] TRANSPORT FOR LONDON: *The new Ultra Low Emission Zone is coming*, London, 2016, <https://tfl.gov.uk/modes/driving/ultra-low-emission-zone> - abgerufen: 28.02.2017
- [45] VERBAND DEUTSCHER VERKEHRSUNTERNEHMEN (VDV): *VDV-Statistik 2015*, Köln, 2016
- [46] DESCHERMEIER, P.: *Die Großstädte im Wachstumsmodus : Stochastische Bevölkerungsprognosen für Berlin, München und Frankfurt am Main bis 2035*, IW-Report 39, Köln, 2016
- [47] VERBAND DEUTSCHER VERKEHRSUNTERNEHMEN (VDV): *VDV-Jahresbericht 2015/2016*, Köln, 2016
- [48] PÜTZ, R.: *Modell zur ökologischen und ökonomischen Analyse und strategischen Optimierung von Linienbusflotten*, TU Berlin, Institut für Land- und Seeverkehr (ILS), Fachgebiet Kraftfahrzeuge, Dissertation, Berlin, 2010
- [49] VERBAND DEUTSCHER VERKEHRSUNTERNEHMEN (VDV): *Life Cycle Cost (LCC) bei Linienbussen : Bewertungskriterien bei Ausschreibungen*, VDV-Mitteilungen 2315, 09/2010, Köln, 2010
- [50] PTERNEA, M. ; KEPAPTSOGLU, K., et al.: *Sustainable urban transit network design*, Transportation Research Part A: Policy and Practice 77, S. 276–291, 2015
- [51] ZISTEL, M.: *Entwicklung eines Finanzierungs- und Förderkonzepts für den Markthochlauf Elektrobuss in Deutschland*, 3. Dresdner Fachkonferenz – Innovation Elektrobuss, Dresden, 2015
- [52] SCHMITZ, M.: *Elektrobuss : Technik - Wirtschaftlichkeit – Ausblick*, 11. Deutscher Nahverkehrstag, Koblenz, 2016
- [53] EUROPÄISCHEN PARLAMENT UND RAT DER EUROPÄISCHEN UNION: *Richtlinie zur Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge*, 2009/33/EG, Amtsblatt der Europäischen Union L120, 2009

- [54] DEUTSCHE BAHN AG: *Deutsche Bahn testet autonom fahrende Busse*, http://www.deutschebahn.com/de/konzern/im_blickpunkt/12924696/20161216_autonomes_fahren.html – abgerufen: 03.03.2017
- [55] ACKERMANN, T. ; RÖHRLEEF, M.: *Herausforderung Digitalisierung für die ÖV-Branche*, Der Nahverkehr, Nr. 11, S. 6–10, 2016
- [56] VERBAND DEUTSCHER VERKEHRSUNTERNEHMEN (VDV): *Zukunftsszenarien autonomer Fahrzeuge : Chancen und Risiken für Verkehrsunternehmen*, Positionspapier, Köln, 2015
- [57] PÜTZ, R.: *Linienbus-Verkehrssysteme mit elektrischem Fahrentrieb: Potenzial für eine emissionsfreie Mobilität = Public service bus systems with electric propulsion*, DVV Media Group, Hamburg, 2007
- [58] ADOLF, J. ; BALZER, C., et al.: *Shell Nutzfahrzeug-Studie : Diesel oder alternative Antriebe - Womit fahren LKW und Bus morgen? : Fakten, Trends und Perspektiven bis 2040*, Hamburg, 2016
- [59] KUNITH, A.: *Methodik zur Technologiebewertung für die Elektrifizierung des urbanen öffentlichen Busverkehrs*, TU Berlin, Fachgebiet Methoden der Produktentwicklung und Mechatronik, Dissertation, Berlin, 2017
- [60] KNOTE, T.: *Betriebliche Anforderungen : Erfahrungen aus Einführungskonzeptionen*, trolley:motion 4. Internationale E-Bus-Konferenz, Hamburg, 2014
- [61] E-MOBIL BW GMBH: *Baden-Württemberg Kompetenz in Elektromobilität*, Stuttgart, 2013, https://wm.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-wm/intern/Dateien_Downloads/Innovation/Kompetenzatlas_e-mobilitaet.pdf – abgerufen: 03.03.2016
- [62] LAJUNEN, A. ; LIPMAN, T.: *Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of diesel, natural gas, hybrid electric, fuel cell hybrid and electric transit buses*, Energy 106, S. 329–342, 2016

- [63] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *Instandhaltung – Wesentliche Leistungskennzahlen für die Instandhaltung (DIN EN 15341:2007-06)*, Beuth GmbH, Berlin, 2007
- [64] BECKER, T. ; GRAEF, A.: *Beschaffung von Elektrobussen*, Der Nahverkehr, Nr. 10, S. 21–23, 2015
- [65] VERBAND DEUTSCHER VERKEHRSUNTERNEHMEN (VDV): *Elektromobilität: E-Busse im ÖPNV weiter fördern*, Presseinformation, Berlin, 2016
- [66] SCHLOSSER, C.: *Schwerpunkte der BMVI-Förderrichtlinie zur Elektromobilität ab 2015*, Elektromobilität vor Ort – 2. Fachkonferenz des BMVI für kommunale Vertreter, Offenbach, 2015
- [67] SCHWARZE, J.: *Konzeption einer Batteriebuslinie in Köln*, 6. VDV-Akademie Konferenz Elektrobusse – Markt der Zukunft!?, Berlin, 2015
- [68] TRANSPORT FOR LONDON: *GLA - Mayor announces two new electric-only bus routes*, <https://tfl.gov.uk/info-for/media/press-releases/2017/february/gla---mayor-announces-two-new-electric-only-bus-routes> – abgerufen: 09.08.2017
- [69] YANG, Y. ; ZHAO, H., et al.: *Drive Train Design and Modeling of a Parallel Diesel Hybrid Electric Bus Based on AVL/Cruise*, EVS25 World Battery,Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, Nr. 4, S. 75–81, 2010
- [70] HALMEAHO, T. ; RAHKOLA, P., et al.: *Hybrid City Bus Design Evaluation Using System Level Simulations*, IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), S. 1671–1676, 2014
- [71] CAI, Y. ; YANG, F., et al.: *Impact of control strategy on battery degradation for a plug-in hybrid electric city bus in China*, Energy 116, S. 1020–1030, 2016

- [72] HE, H. ; TANG, H., et al.: *Global Optimal Energy Management Strategy Research for a Plug-In Series-Parallel Hybrid Electric Bus by Using Dynamic Programming*, Mathematical Problems in Engineering, Nr. 1, S. 1–11, 2013
- [73] ELBERT, P.: *Noncausal and causal Optimization Strategies for Hybrid Electric Vehicles*, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für dynamische Systeme und Regelungstechnik, Dissertation, Zürich, 2014
- [74] WANG, B. H. ; LUO, Y. G., et al.: *Simulation of city bus performance based on actual urban driving cycle in China*, International Journal of Automotive Technology, Nr. 4, S. 501–507, 2008
- [75] KÜHNE, R.: *Electric buses – An energy efficient urban transportation means*, Energy 35, Nr. 12, S. 4510–4513, 2010
- [76] THEIN, M.: *Projekt eBus Skorpion*, 3. Dresdner Fachkonferenz – Innovation Elektrobus, Dresden, 2016
- [77] HUA, T. ; AHLUWALIA, R., et al.: *Status of hydrogen fuel cell electric buses worldwide*, Journal of Power Sources 269, S. 975–993, 2014
- [78] KIM, Jeongyong ; SONG, Inho, et al.: *An Electric Bus with a Battery Exchange System*, Energies 8, Nr. 7, S. 6806–6819, 2015
- [79] KASCHUB, T. ; PAETZ, A.-G., et al.: *Feasibility of Battery Switch Stations for Local Emission Free Public Transport*, 7th Conference on Energy Economics and Technology, Dresden, 2012
- [80] CHAO, Z. ; XIAOHONG, C.: *Optimizing Battery Electric Bus Transit Vehicle Scheduling with Battery Exchanging : Model and Case Study*, Procedia - Social and Behavioral Sciences 96, S. 2725–2736, 2013
- [81] MCKENZIE, E. C. ; DURANGO-COHEN, P. L.: *Environmental life-cycle assessment of transit buses with alternative fuel technology*,

- Transportation Research Part D: Transport and Environment 17, Nr. 1, S. 39–47, 2012
- [82] KLIUCININKAS, L. ; MATULEVICIUS, J., et al.: *The life cycle assessment of alternative fuel chains for urban buses and trolleybuses*, Journal of environmental management 99, S. 98–103, 2012
- [83] BVG: *Projekt E-Bus Berlin*, <https://www.bvg.de/de/Aktuell/E-Bus> – abgerufen: 13.01.2017
- [84] GÖHLICH, D. ; LY, T.-A., et al.: *Economic assessment of different air-conditioning and heating systems for electric city buses based on comprehensive energetic simulations*, EVS28 International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, 2015
- [85] KURCZVEIL, T. ; BECKER, U.: *Optimization of novel charging Infrastructures using linear programming*, IFAC-PapersOnLine 49, Nr. 3, S. 227–230, 2016
- [86] KURCZVEIL, T. ; SCHNIEDER, L.: *Planung für Projekt emil*, Der Nahverkehr, Nr. 12, S. 24–29, 2014
- [87] KURCZVEIL, T. ; SCHNIEDER, E.: *Implementing the functional requirements for determining the optimal arrangement of a distributed charging infrastructure*, IFAC Proceedings Volumes 46, Nr. 22, S. 37–42, 2013
- [88] BURMEISTER, Felix ; SCHNIEDER, Lars, et al.: *Simulation Based Studies on the Integration of Battery-Electric Vehicles in Regional Bus Services*, IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems, S. 1333–1338, 2015
- [89] MEINS, J. ; SOYCK, F., et al.: *Application of high-power inductive charging of electric buses in scheduled line service*, 11. Symposium Hybrid- und Elektrofahrzeuge, Braunschweig, 2014
- [90] ROHLFS, W. ; MAREEV, I., et al.: *Innovative Schnellladung von E-Bussen im Projekt SEB e-ÖPNV*, Der Nahverkehr, Nr. 5, S. 11-16, 2015

- [91] SINHUBER, P. ; ROHLFS, W., et al.: *Study on Power and Energy Demand for Sizing the Energy Storage Systems for Electrified Local Public Transport Buses*, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, S. 315–320, 2012
- [92] SAUER, D. U.: *Entwicklungen im Batteriebereich, Auswirkungen auf Planung, Betrieb und Sicherheit von Elektrobussen und Ladeinfrastruktur*, Elektrobusse - Markt der Zukunft!, Berlin, 2016
- [93] BUNZEL, A.: *Konzeptvergleich zur Energiebedarfsbestimmung von elektrischen ÖPNV-Stadtbussen*, 26. Verkehrswissenschaftliche Tage, Dresden, 2018
- [94] UFERT, M.: *Optimization-based System Design of Battery-Electric Urban Bus Routes*, 26. Verkehrswissenschaftliche Tage, Dresden, 2018
- [95] BÜCHNER, S. ; KLAUSNER, S., et al.: *Conception and implementation of a charging station for electric buses in public transport*, BARGENDE, M.; REUSS, H.-C.; WIEDEMANN, J. (Hrsg.): 15. Internationales Stuttgarter Symposium, Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 585–594, 2015
- [96] SAROCH, L.: *IVI IVision 2012*, VDI-Berichte Nr. 2169, S. 111-123, 2012
- [97] VTT FINLAND: *Electric bus systems*, <http://www.vttresearch.com/services/smart-industry/eco-efficient-products/solutions-for-new-energy-sources-and-zero-emission-vehicles/electric-bus-systems> – abgerufen: 13.01.2017
- [98] LAURIKKO, J. ; PIHLATIE, M., et al.: *Electric city bus and infrastructure demonstration environment in Espoo, Finland*, EVS28 International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, Goyang, Korea, 2015

- [99] CHOI, U.-D. ; JEONG, H.-K., et al.: *Commercial Operation of Ultra Low Floor Electric Bus for Seoul City Route*, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Seoul, Korea, 2012
- [100] LAJUNEN, A.: *Powertrain Design Alternatives for Electric City Bus*, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, S. 1112–1117, 2012
- [101] SCHRÖDER, J.: *Projekt eMOTION : Konzept zur Einführung elektrischer Busse in den bestehenden öffentlichen Personennahverkehr*, Fachhochschule Flensburg (Hrsg.), Flensburg, 2015
- [102] NAUMANN, S. ; BÜCHTER, H., et al.: *CACTUS : Models and Methods for the Evaluation and the Optimal Application of Battery Charging and Switching Technologies for Electric Busses*, Magdeburg, 2014
- [103] BÜCHTER, H. ; NAUMANN, S.: *Einsatz von Elektrobussen präzise planen*, Der Nahverkehr, Nr. 5, S. 17–21, 2015
- [104] FILIPPO, G. ; MARANO, V., et al.: *Simulation of an electric transportation system at The Ohio State University*, Applied Energy 113, S. 1686–1691, 2014
- [105] REUER, J. ; KLIEWER, N., et al.: *The electric vehicle scheduling problem : A study on time-space network based and heuristic solution approaches*, Proceedings of the 13th Conference on Advanced Systems in Public Transport, 2015
- [106] OLSEN, N. ; KLIEWER, N.: *Electric Vehicle Scheduling - A study on charging modeling for electric vehicles*, Operations Research Proceedings 2016, Springer, Cham, S. 653-658, 2017
- [107] ECKART, J. ; SCHAEFFNER, Y.: *Vergleich der Gesamtkosten verschiedener E-Bussysteme*, Nahverkehrs-praxis 11/12, 2015
- [108] LAMBRECHT, U. ; BERGG, F., et al.: *Potenziale des Hybrid-Oberleitungsbusses als effiziente Möglichkeit für die Nutzung erneuerbarer Energien im ÖPNV : Thematische Einführung*,

Untersuchungsziele, erste Ergebnisse, Fachworkshop Hybrid-Oberleitungsbus, Berlin, 2015

- [109] COONEY, G. ; HAWKINS, T. R., et al.: *Life Cycle Assessment of Diesel and Electric Public Transportation Buses*, Journal of Industrial Ecology 17, Nr. 5, S. 689-699, 2013
- [110] NURHADI, L. ; BORÉN, S., et al.: *A Sensitivity Analysis of Total Cost of Ownership for Electric Public Bus Transport Systems in Swedish Medium Sized Cities*, Transportation Research Procedia 3, S. 818-827, 2014
- [111] OLSSON, O.: *Method to analyze cost effectiveness of different electric bus systems*, EVS29 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium. Montréal, Québec, 2016
- [112] QIN, N. ; GUSRIALDI, A., et al.: *Numerical analysis of electric bus fast charging strategies for demand charge reduction*, Transportation Research Part A: Policy and Practice 94, S. 386-396, 2016
- [113] MAPELLI, F. L. ; TARSITANO, D., et al.: *A study of urban electric bus with a fast charging energy storage system based on lithium battery and supercapacitors*, Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies, 2013
- [114] YU, Z. ; DAWEI, M., et al.: *Energy flow analysis of an electric city bus based on wavelet transform with Mallet prolongation*, International Transactions on Electrical Energy Systems, 2017
- [115] ZEEUS PROJECT: *ZeEUS eBus Report : An overview of electric buses in Europe*, Brüssel, 2016
- [116] GLOTZ-RICHTER, M.: *eLIPTIC : electrification of public transports in cities*, Elektrobusse - Markt der Zukunft!, Berlin, 2016
- [117] FRAUNHOFER IVI: *Simulationstool IVIvision*, <http://www.ivi.fraunhofer.de/de/forschungsfelder/fahrzeug-und->

- antriebstechnik/antriebstechnik/simulationstool-ivision.html –
abgerufen: 16.01.2017
- [118] EBUSPLAN GMBH: *ebusplan - Ihr Partner für die Einführung von Elektrobussen*, <http://www.ebusplan.com/de/> – abgerufen: 15.02.2018
- [119] HÖROLD, S. ; BREITKOPF, M.: *Konzept für eine städteübergreifende Einführung von elektrisch angetriebenen Linienbussen in Thüringen : Endbericht*, Dresden, 2015
- [120] OTTO, T. ; LANGE, J.: *Die Elektrobussflotte nimmt den Betrieb auf : Machbarkeit, Realisierung und Betrieb von Elektrobussflotten*, Der Nahverkehr, Nr. 10, S. 54–59, 2016
- [121] LASKE, A.: *Innovative Technologien und Lösungen für eBusse : Siemens MO UT LRV eBus*, 3. Dresdner Fachkonferenz Innovation Elektrobuss, Dresden, 2015
- [122] PROTERRA INC.: *Proterra Calculator*, <https://www.proterra.com/calculator/index.html> – abgerufen: 28.02.2017
- [123] ALSTOM SA: *Aptis : A new mobility experience*. Saint-Ouen Frankreich, 2017, http://www.newtl.com/wp-content/uploads/2017/03/aptis_product_sheet_march_17_en.pdf – abgerufen: 15.12.2017
- [124] DAIMLER AG: *Lösungen für die urbanen Verkehrsprobleme von heute und morgen: Mercedes-Benz auf dem GPTS in Montreal/Kanada*, Stuttgart, 2017, <http://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko.xhtml?oid=17370605> – abgerufen: 08.08.2017
- [125] QI, K.: *Darstellung und Vergleich unterschiedlicher Modellierungsansätze für die Lokalisierung von Ladeinfrastrukturen für E-Fahrzeuge*, Karlsruher Institut für Technologie, Teilinstitut für Bahnsystemtechnik, Bachelorarbeit, Karlsruhe, 2017

- [126] KUNITH, A. ; MENDELEVITCH, R., et al.: *Electrification of a City Bus Network: An Optimization Model for Cost-Effective Placing of Charging Infrastructure and Battery Sizing of Fast Charging Electric Bus Systems*, DIW Berlin, Discussion Papers 1577, Berlin, 2016
- [127] WANG, X. ; YUEN, C., et al.: *Electric Vehicle Charging Station Placement for Urban Public Bus Systems*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 18, Nr. 1, S. 128–139, 2017
- [128] CRUZ-ZAMBRANO, M. ; CORCHERO, C., et al.: *Optimal location of fast charging stations in Barcelona: A Flow-Capturing approach*, 10th International Conference on the European Energy Market, 2013
- [129] CHEN, T. ; KOCKELMAN, K., et al.: *Locating Electric Vehicle Charging Stations*, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2385, S. 28–36, 2013
- [130] GONZÁLEZ, J. ; ALVARO, R., et al.: *Determining Electric Vehicle Charging Point Locations Considering Drivers' Daily Activities*, Procedia Computer Science 32, S. 647–654, 2014
- [131] KAMEDA, H. ; MUKAI, N.: *Optimization of Charging Station Placement by Using Taxi Probe Data for On-Demand Electrical Bus System, Knowledge-based and intelligent information and engineering systems*, 15th international conference, KES 2011, S. 606-615, Springer, Berlin, 2011
- [132] BARCO, J. ; GUERRA, A., et al.: *Optimal Routing and Scheduling of Charge for Electric Vehicles: Case Study*, Mathematical Problems in Engineering, 2013
- [133] ASAMER, J. ; REINTHALER, M., et al.: *Optimizing charging station locations for urban taxi providers*, Transportation Research Part A: Policy and Practice 85, S. 233–246, 2016
- [134] AUER, M. ; KRUG, S.: *Gesamtfahrzeugsimulation eines batterieelektrischen Fahrzeugs*, Abschlussbericht zum

- Kooperationsprojekt "Gesamtfahrzeugsimulation eines batterieelektrischen Fahrzeugs", Stuttgart, 2012
- [135] JANIAUD, N. ; VALLET, F., et al.: *Electric vehicle powertrain simulation to optimize battery and vehicle performances*, Vehicle Power and Propulsion Conference, 2010
- [136] KRAL, C. ; SIMIC, D.: *Simulation von Elektrofahrzeugen*, Elektrotechnik & Informationstechnik 128, S. 28–35, 2011
- [137] FRAUNHOFER ISE: *Techno-ökonomische Bewertung von Energietechnologien*, <https://www.ise.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/energiesystemtechnik/energiesystemanalyse/techno-oekonomische-bewertung-von-energie-technologien.html> – abgerufen: 13.03.2017
- [138] INSTITUT FÜR INDUSTRIEBETRIEBSLEHRE UND INDUSTRIELLE PRODUKTION: *Forschungsaktivitäten am Lehrstuhl für Energiewirtschaft*, <http://www.iip.kit.edu/2954.php> – abgerufen: 14.03.2017
- [139] KANNGIEßER, A.: *Entwicklung eines generischen Modells zur Einsatzoptimierung von Energiespeichern für die techno-ökonomische Bewertung stationärer Speicheranwendungen*, Technische Universität Dortmund, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Dissertation, Dortmund, 2013
- [140] SCHRAVEN, S. ; KLEY, F., et al.: *Induktives Laden von Elektromobilen – Eine techno-ökonomische Bewertung*, Fraunhofer ISI, Working Paper Sustainability and Innovation 8, Karlsruhe, 2010
- [141] SAKTI, A. ; MICHALEK, J. J., et al.: *A techno-economic analysis and optimization of Li-ion batteries for light-duty passenger vehicle electrification*, Journal of Power Sources 273, S. 966–980, 2015
- [142] DIMITROVA, Z. ; MARÉCHAL, F.: *Techno-economic design of hybrid electric vehicles using multi objective optimization techniques*, Energy 91, S. 630–644, 2015

- [143] HURTIG, O.: *Techno-ökonomischer Vergleich des Einsatzes von Strom, SNG und FT-Diesel aus Waldrestholz im Pkw-Bereich*. Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, Karlsruhe, 2013
- [144] BERLINER VERKEHRSBETRIEBE: *Zahlenspiegel 2016*, Berlin, 2016
- [145] HAMBURGER HOCHBAHN AG: *Zahlen, Daten, Fakten*, https://www.hochbahn.de/hochbahn/hamburg/de/Home/Unternehmen/Unser_Job_fuer_Hamburg/Zahlen-+Daten-+Fakten – abgerufen: 16.12.2016
- [146] AACHEN TOURIST SERVICE: *Zahlen, Daten, Fakten*, http://www.aachen.de/DE/tourismus_stadtinfo/150_presse/150_70/150_70_90.html – abgerufen: 19.12.2016
- [147] STADTVERKEHRSGESELLSCHAFT MBH FRANKFURT ODER: *Zahlen und Fakten*, <http://www.svf-ffo.de/de/svf/zahlen-und-fakten.html> – abgerufen: 19.12.2016
- [148] HALBERSTÄDTER VERKEHRS-GMBH: *Kennzahlen*, <http://stadtverkehr-halberstadt.de/hvg/> – abgerufen: 19.12.2016
- [149] BEIJING TRANSPORT INSTITUTE: *2016_Peking Transport Annual Report*, Peking, 2016, <http://www.bjtrc.org.cn/JGJS.aspx?id=5.3&Menu=GZCG> – abgerufen: 08.08.2016
- [150] SHANGHAI URBAN AND RURAL CONSTRUCTION AND TRANSPORTATION DEVELOPMENT RESEARCH INSTITUTE: *2015_Shanghai Transport Annual Report*, Shanghai, 2015
- [151] TRANSPORT FOR LONDON: *Buses*, <https://tfl.gov.uk/corporate/about-tfl/what-we-do/buses> – abgerufen: 08.08.2017
- [152] *Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland* (1949), <https://www.bundestag.de/grundgesetz> – abgerufen: 05.01.2017
- [153] *Gesetz zur Regionalisierung des öffentlichen Personennahverkehrs (Regionalisierungsgesetz - RegG)* (1993), <http://www.gesetze-im-internet.de/pbefg/> – abgerufen: 05.01.2017

- [154] *Personenbeförderungsgesetz (PBefG)* (1961), <http://www.gesetze-im-internet.de/pbefg/> – abgerufen: 05.01.2017
- [155] REINHARDT, W.: *Öffentlicher Personennahverkehr : Technik - rechtliche und betriebswirtschaftliche Grundlagen*, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2012
- [156] KLIEWER, N.: *Optimierung des Fahrzeugeinsatzes im öffentlichen Personennahverkehr : Modelle, Methoden und praktische Anwendungen*, Universität Paderborn, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Dissertation, Paderborn, 2005
- [157] FINN, B. ; HEDDEBAUT, O., et al.: *Buses with High Level of Service : Fundamental characteristics and recommendations for decision-making and research*, Final Report COST Action TU 603, Brüssel, 2011
- [158] INTERNATIONAL ASSOCIATION OF PUBLIC TRANSPORT: *UITP Project 'SORT' : Standardised On-Road Test Cycles*, 2014
- [159] GUIDA, U.: *Where we stand? Where we go? Do we have enough charge? The European (e)Bus scenario*, Urban Future Conference, Graz, 2016
- [160] VERBAND DEUTSCHER VERKEHRSUNTERNEHMEN (VDV): *Fahrzeug in Verkehrsunternehmen*, VDV Schriften 801, Köln, 1998
- [161] TÜV NORD: *Ermittlung der Geräuschemission von Kfz im Straßenverkehr : Forschungsauftrag 200 54 135*, Würselen, 2005
- [162] GIRON, E.: *FCH JU: Helping to make FCB today's reality*, 4. Internationale E-Bus-Konferenz, Hamburg, 2014
- [163] ELBERT, P.: *Energieeffiziente Mobilitätssysteme für den ÖPNV : Welche straßenbezogenen Antriebstechnologien sind richtungsweisend?*, 5. Internationale E-Bus Konferenz von trolley:motion, Berlin, 2016

- [164] PÜTZ, R.: *Quo vadis Linienbusantrieb? : Potenziale unterschiedlicher Antriebs-/Kraftstoffoptionen*, VDV-Jahrestagung 2014 – Spartentreffen Bus, Berlin, 2014
- [165] IFOK GMBH: *Hybrid-Oberleitungsbusse – Ein Beitrag zur Gestaltung der Energiewende im Verkehrssektor oder Techniknostalgie?*, Fachworkshop im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung (MKS), Berlin, 2015
- [166] METROPOLREGION RHEIN-NECKAR: *Rhein-Neckar in Zahlen*, <https://www.m-r-n.com/start/investieren-und-wirtschaften/rhein-neckar-in-zahlen.html> – abgerufen: 04.01.2017
- [167] KOMMUNALE STATISTIKSTELLE MANNHEIM: *Daten und Fakten*, <https://www.mannheim.de/stadt-gestalten/daten-und-fakten> – abgerufen: 04.01.2017
- [168] BOMBARDIER INC.: *Primove E-Bus : 100% Elektromobilität auf anspruchsvoller Stadtlinie*, Berlin, 2015, https://primove.bombardier.com/fileadmin/primove/content/MEDIA/Publications/PT_PRIMOVE_Datasheet_2015_Mannheim_DE_110dpi.pdf - abgerufen: 20.03.2016
- [169] PÜTZ, R.: *Einführung in die Linienbustechnik*, Alba, Düsseldorf 2012
- [170] VERBAND DEUTSCHER VERKEHRSUNTERNEHMEN (VDV): *Rahmenempfehlung für Stadt-Niederflur-Linienbusse*, VDV-Schrift 203 7/2014, Köln, 2014
- [171] KRAMER, U.: *Kraftfahrzeugführung : Modelle - Simulation - Regelung*, Hanser, München, 2008
- [172] ZVEI - ZENTRALVERBAND ELEKTROTECHNIK UND ELEKTRONIKINDUSTRIE E. V.: *Spannungsklassen in der Elektromobilität*, Frankfurt a. M., 2013
- [173] AHLERT, A.: *Analytische Modellierung und Simulation eines elektrischen Stadtbusses*, Karlsruher Institut für Technologie,

Teilinstitut für Bahnsystemtechnik, Masterarbeit, Karlsruhe,
2015

- [174] APPEL, W.: *Nutzfahrzeugtechnik : Grundlagen, Systeme, Komponenten*, 5. Aufl., Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2008
- [175] HABIG, K.-H. ; WOYDT, M.: *Tribologie*, GROTE, K.-H.; FELDHUSEN, J. (Hrsg.): Dubbel, S. 297–305, Springer, Berlin, Heidelberg, 2014
- [176] FLEGEL, Georg ; BIRNSTIEL, Karl, et al.: *Elektrotechnik für Maschinenbau und Mechatronik*, 10. Aufl., Hanser, München, 2016
- [177] SINHUBER, P. ; ROHLFS, W., et al.: *Conceptional Considerations for Electrification of Public City Buses, VDE-Kongress 2010 - E-Mobility: Technologien - Infrastruktur - Märkte : Proceedings*, 2010
- [178] GUZZELLA, L. ; SCIARRETTA, A.: *Vehicle Propulsion Systems : Introduction to Modeling and Optimization*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013
- [179] SCHRÖDER, D.: *Elektrische Antriebe – Grundlagen*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2013
- [180] NEUDORFER, H.: *Vergleich unterschiedlicher Antriebstechnologien für elektrische Busantriebe*, 5. Internationale E-Bus Konferenz von trolley:motion, Berlin, 2016
- [181] HOFMANN, P.: *Hybridfahrzeuge : Ein alternatives Antriebskonzept für die Zukunft*, Springer, Wien, 2010
- [182] GAO, Y. ; EHSANI, M.: *Electronic Braking System of EV And HEV : Integration of Regenerative Braking, Automatic Braking Force Control And ABS*, SAE Technical Paper Series, 01-2478, 2001
- [183] CORVES, B. ; KERLE, H.: *Getriebetechnik*, GROTE, K.-H.; FELDHUSEN, J. (Hrsg.): Dubbel, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 603–613, 2014
- [184] LINKE, H.: *Stirnradverzahnung*, Hanser, München, 2010

-
- [185] HÖHN, B.-R.: *Zahnradgetriebe*, GROTE, K.-H.; FELDHUSEN, J. (Hrsg.): Dubbel, S. 563–602, Springer, Berlin, Heidelberg, 2014
- [186] SAUER, D. U. ; KOWAL, J.: *Batterie-Technik : Grundlagen und Übersicht*, MTZ Wissen, Nr. 12, S. 58–63, 2012
- [187] ROTHGANG, S. ; ROGGE, M., et al.: *Battery Design for Successful Electrification in Public Transport*, Energies 8, Nr. 7, S. 6715–6737, 2015
- [188] REDDY, T. B. ; LINDEN, D.: *Linden's Handbook of Batteries*, 4. Aufl.: McGraw-Hill, New York, 2011
- [189] POP, V. ; BERGVELD, H. J., et al.: *Battery Management Systems : Accurate State-of-Charge Indication for Battery-Powered Applications*, Springer, Dordrecht, 2008
- [190] HERB, F.: *Alterungsmechanismen in Lithium-Ionen-Batterien und PEM-Brennstoffzellen und deren Einfluss auf die Eigenschaften von daraus bestehenden Hybrid-Systemen*, Universität Ulm, Fakultät für Naturwissenschaften, Dissertation, Ulm, 2010
- [191] VETTER, J. ; NOVÁK, P., et al.: *Ageing mechanisms in lithium-ion batteries*, Journal of Power Sources 147, S. 269–281, 2005
- [192] EBNER, M. ; MARONE, F., et al.: *Visualization and Quantification of Electrochemical and Mechanical Degradation in Li Ion Batteries*, Science, Nr. 342, S. 716-720, 2013
- [193] ROGGE, M. ; SAUER, D. U.: *Fast charging of battery buses and its impact on the aging of various lithium-ion cell types*, 10th Braunschweig Symposium Hybrid and Electric Vehicles, S. 250–267, Braunschweig, 2013
- [194] MILLER, A.: *Modeling Lithium Ion Battery Degradation in Electric Vehicles*, IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply (CITRES), 2010

- [195] LAM, L. ; BAUER, P.: *Practical Capacity Fading Model for Li-Ion Battery Cells in Electric Vehicles*, IEEE Transactions on Power Electronics 28, Nr. 12, S. 5910–5918, 2013
- [196] PAUL, S.: *Analyse der Ausfallwahrscheinlichkeiten von Lithium-Ionen-Energiespeichern in elektrifizierten Fahrzeugen*, Universität Ulm, Fakultät für Ingenieurwissenschaften und Informatik, Dissertation, Ulm, 2014
- [197] SCHMALSTIEG, J. ; KÄBITZ, S., et al.: *From Accelerated Aging Tests to a Lifetime Prediction Model: Analyzing Lithium-Ion Batteries*, IEEE World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), 2013
- [198] KÖHLER, M. ; JENNE, S., et al.: *Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit*, Springer, Dordrecht, 2012
- [199] MUENZEL, V. ; HOOG, J., et al.: *A Multi-Factor Battery Cycle Life Prediction Methodology for Optimal Battery Management*, KALYANARAMAN, S.; SEETHARAM, D. P.; SHOREY, R.; RAMCHURN, S.; SRIVASTAVA, M. (Hrsg.): *Proceedings of the 2015 ACM Sixth International Conference on Future Energy Systems - e-Energy*, New York, USA, S. 57–66, 2015
- [200] MARANO, V. ; ONORI, S., et al.: *Lithium-ion Batteries Life Estimation for Plug-in Hybrid Electric Vehicles*, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, S. 536-543, 2009
- [201] BIERHOFF, T.: *Verfahren zur kontinuierlichen Überwachung einer Batteriealterung*, Siemens AG, Anmelde-nr. 12156563.4, Veröffentlichungs-nr. EP 2631663 A1, 2013
- [202] SCHUNK BAHN UND INDUSTRIE-TECHNIK GMBH: *Ladestromabnehmer SLS101*, Bergheim, Österreich, 2013, <http://www.schunkgraphite.com/sixcms/media.php/1973/SLS101-datenblatt.pdf> - abgerufen: 01.03.2016
- [203] SIEMENS AG: *Charge your future – with the Siemens eBus charging infrastructure*, München, 2016, <https://w3.siemens.com/topics/>

- global/de/elektromobilitaet/PublishingImages/ladetechnik-busse/pdf/ebus-brochure-en.pdf - abgerufen: 01.03.2016
- [204] KNAISCH, K.: *Untersuchung von Spulensystemen zur induktiven Energieübertragung von Elektrofahrzeugen*. Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Dissertation, Karlsruhe, 2017
- [205] SCHMITT, T.: *Darstellung von Elektrobus-Technologien und Untersuchungen zur Elektrifizierung des Mannheimer Busliniennetzes*, Karlsruher Institut für Technologie, Teilinstitut für Bahnsystemtechnik, Bachelorarbeit, Karlsruhe, 2015
- [206] DIETMANNBERGER, M. ; MEYER, M., et al.: *Anforderungen an das Stromnetz durch Elektromobilität, insbesondere Elektrobusse, in Hamburg*, Metastudie Elektromobilität, Hamburg, 2016
- [207] ROSSEL, N.: *Modellierung eines urbanen Energieversorgungsnetzes zur Integration des E-Bus Betriebs*, Karlsruher Institut für Technologie, Teilinstitut für Bahnsystemtechnik, Bachelorarbeit, Karlsruhe, 2016
- [208] DICKERT, J. ; SCHEGNER, P.: *Residential Load Models for Network Planning Purposes*, Modern Electric Power Systems MEPS, 2010
- [209] SCHNIEDER, L. ; WEIBER, D., et al.: *Minimale Belastung elektrischer Netze durch Ladevorgänge von Elektrobusen*, 25. Verkehrswissenschaftliche Tage, Dresden, 2016
- [210] BLOCH-RUBIN, T. ; GALLO, J.-B., et al.: *Peak Demand Charges and Electric Transit Buses : White Paper*, U.S. Department of Transportation Federal Transportation Agency, 2014
- [211] MÜLLER-HELLMANN, A.: *Überlegungen zu zukünftigen Batteriebus-Systemen*, Der Nahverkehr, Nr. 6, S. 28–32, 2016
- [212] MONTOYA, A. ; GUÉRET, C., et al.: *The electric vehicle routing problem with nonlinear charging function*, Transportation Research Part B: Methodological, 2017

- [213] VERBAND DEUTSCHER VERKEHRSUNTERNEHMEN (VDV): *Klimatisierung von Linienbussen*, VDV Schriften 236, 04/96, Köln, 1996
- [214] VERBAND DEUTSCHER VERKEHRSUNTERNEHMEN (VDV): *Life-Cycle-Cost-optimierte Klimatisierung von Linienbussen : Teilklimatisierung Fahrgastraum Vollklimatisierung Fahrerarbeitsplatz*, VDV Schriften 236/1, 08/09, Köln, 2009
- [215] PIHLATIE, M. ; KUKKONEN, S., et al.: *Fully Electric City Buses – The Viable Option*, IEEE International Electric Vehicle Conference, 2014
- [216] BÖCKH, P. v.: *Wärmeübertragung : Grundlagen und Praxis*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2006
- [217] GROßMANN, H.: *Pkw-Klimatisierung : Physikalische Grundlagen und technische Umsetzung*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2010
- [218] TURNER, B.: *Neuartige Klimatisierungskonzepte für E-Stadtbusse.*, Karlsruher Institut für Technologie, Teilinstitut für Bahnsystemtechnik, Bachelorarbeit, Karlsruhe, 2017
- [219] RINDSFÜSSER, M. ; KUITUNEN, Stefan, et al.: *Lastsynchrones Thermomanagement für Hybrid-Omnibusse*, ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 115, Nr. 5, S. 390–394, 2013
- [220] NERLING, J. ; SCHALLER, F., et al.: *Vorkonditionierung von Elektrofahrzeugen zur Reichweitenerhöhung*, ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 118, Nr. 7-8, S. 42–47, 2016
- [221] SEIFFERT, U.: *Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz : Prozesse, Komponenten, Beispiele aus der Praxis*, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2008
- [222] MÄRZ, L. ; KRUG, W., et al.: *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik : Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2011

- [223] SCHRAMM, D. ; HILLER, M., et al.: *Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2010
- [224] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen, VDI 3633*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2013
- [225] BUNGARTZ, H.-J. ; ZIMMER, S., et al.: *Modellbildung und Simulation : Eine anwendungsorientierte Einführung*, Springer Spektrum, Berlin, 2013
- [226] BOURHALEB, M.: *Koordinierte struktur- und verhaltensorientierte Modellierung mechatronischer Systeme im Kraftfahrzeug*, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, Verkehrstechnik/ Fahrzeugtechnik 587, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2005
- [227] KORTÜM, W. ; LUGNER, P.: *Systemdynamik und Regelung von Fahrzeugen : Einführung und Beispiele*, Springer, Berlin, 1994
- [228] ISERMANN, R.: *Elektronisches Management motorischer Fahrzeugantriebe : Elektronik, Modellbildung, Regelung und Diagnose für Verbrennungsmotoren, Getriebe und Elektroantriebe*, ATZ/MTZ-Fachbuch, Vieweg + Teubner/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2010
- [229] NOLLAU, R.: *Modellierung und Simulation technischer Systeme : Eine praxisnahe Einführung*, Springer, Berlin, 2009
- [230] PÜTZ, R.: *Auf dem Weg zum Elektrobuss – Analyse der Lebenszykluskosten verschiedener Busantriebskonzepte*, Clean Fleets – Stadtbusse in der Beschaffung, Bremen, 2013
- [231] ELLRAM, L. M.: *Total cost of ownership: an analysis approach for purchasing*, International Journal of Physical Distribution & Logistics Management 25, Nr. 8, S. 4–23, 1995

- [232] VERBAND DEUTSCHER MASCHINEN- UND ANLAGENBAU E.V. (VDMA): *Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen, VDMA 34160*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2006
- [233] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): *Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC)*, VDI 2884, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2005
- [234] BODE, M. ; BÜNTING, F., et al.: *Rechenbuch der Lebenszykluskosten : Ein Leitfaden mit Rechenmodell und Arbeitshilfen*, VDMA-Verlag, Frankfurt a. M., 2011
- [235] VERBAND DEUTSCHER VERKEHRSUNTERNEHMEN (VDV): *Wirtschaftlichkeit von Linienbussen : Gegenüberstellung etablierter und alternativer Fahrzeugkonzepte der VDV-Linienbusfamilie*, VDV-Mitteilungen, 2318, 03/2007, Köln, 2007
- [236] BRUHN, M.: *Marketing : Grundlagen für Studium und Praxis*, Springer Gabler, Wiesbaden, 2016
- [237] HENDERSON, Bruce D.: *Die Erfahrungskurve in der Unternehmensstrategie*, Herder & Herder, Frankfurt a. M., 1974
- [238] DUTTON, J. M. ; THOMAS, A.: *Treating Progress Functions as a Managerial Opportunity*, The Academy of Management Review 9, Nr. 2, S. 235–247, 1984
- [239] FERIOLI, F. ; SCHOOTS, K., et al.: *Use and limitations of learning curves for energy technology policy : A component-learning hypothesis*, Energy Policy 37, Nr. 7, S. 2525–2535, 2009
- [240] GÖTZE, U.: *Investitionsrechnung : Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben*, Springer Gabler, Berlin, 2014
- [241] KPMG: *How KPMG True Value helped build the case for electric buses*, 2015, <https://home.kpmg.com/content/dam/kpmg/pdf/2015/10/volvo-group-kpmg-true-value-case-study.pdf> – abgerufen: 14.07.2017

- [242] BRECK, A. ; MITUSCH, K., et al.: *Die externen Kosten des Verkehrs*, In: SCHWEDES, O.; CANZLER, W.; KNIE, A. (Hrsg.): *Handbuch Verkehrspolitik*, Springer, Wiesbaden, S. 425–452, 2016
- [243] ENGELKAMP, P. ; SELL, F. L.: *Einführung in die Volkswirtschaftslehre*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2011
- [244] FICHTER, K. ; LOEW, T., et al.: *Betriebliche Umweltkostenrechnung : Methoden und praxisingerechte Weiterentwicklung*, Springer, Berlin, Heidelberg, 1997
- [245] ARNOLD, D. ; KUHN, A., et al.: *Handbuch Logistik*, Springer, Berlin, 2008
- [246] SCHWERMER, S.: *Methodenkonvention 2.0 zur Schätzung von Umweltkosten : Ökonomische Bewertung von Umweltschäden*, Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau, 2012
- [247] MAYER, J.: *Entwicklung eines umfassenden TCO-Modells als Grundlage für Investitionsentscheidungen zum E-Bus-Einsatz*. Karlsruher Institut für Technologie, Teilinstitut für Bahnsystemtechnik, Bachelorarbeit, Karlsruhe, 2016
- [248] PREISS, P. ; FRIEDRICH, R., et al.: *Deliverable n° 1.1 - RS 3a, Report on the procedure and data to generate averaged/aggregated data: New Energy Externalities Developments for Sustainability*, New Energy Externalities Developments for Sustainability, 2008
- [249] DOMSCHKE, W. ; DREXL, A., et al.: *Einführung in Operations Research*, Springer Gabler, Berlin, Heidelberg, 2015
- [250] DANTZIG, G. ; ORDEN, A., et al.: *The generalized simplex method for minimizing a linear form under linear inequality restraints*. In: *Pacific Journal of Mathematics* 5, Nr. 2, S. 183–195, 1955
- [251] HETTICH, F.: *Standortplanung für Ladestationen einer E-Stadtbuslinie unter Berücksichtigung der Batteriealterung*. Karlsruher Institut für Technologie, Teilinstitut für Bahnsystemtechnik, Bachelorarbeit, Karlsruhe, 2016

- [252] KALLRATH, J.: *Gemischt-ganzzahlige Optimierung: Modellierung in der Praxis*, Springer Spektrum, Wiesbaden, 2013
- [253] MATTFELD, D.: *Logistiknetzwerke : Modelle für Standortwahl und Tourenplanung*, Springer Gabler, Wiesbaden, 2014
- [254] BUNTE, S.: *Lösungen für Anwendungsfälle der Fahrzeugeinsatzplanung im öffentlichen Personennahverkehr*, Universität Paderborn, Wirtschaftsinformatik, Dissertation, Paderborn, 2009
- [255] SPEYER, T.: *Entwicklung einer Fahrzyklus-Analyse-Software zur Konfiguration von Elektro-Stadtbus-Netzen*, Karlsruher Institut für Technologie, Teilinstitut für Bahnsystemtechnik, Bachelorarbeit, Karlsruhe, 2016
- [256] DEBUS, M.: *GPS-Datenerfassung und Algorithmusentwicklung zur automatisierten Auswertung für eine E-Buslinie*, Karlsruher Institut für Technologie, Teilinstitut für Bahnsystemtechnik, Bachelorarbeit, Karlsruhe, 2014
- [257] OPENSTREETMAP: *OpenStreetMap – Deutschland*, <https://www.openstreetmap.de/> – abgerufen: 09.10.2017
- [258] RHEIN-NECKAR-VERKEHR GMBH: *Offene Daten*, <https://opendata.rnv-online.de/> – abgerufen: 01.02.2017
- [259] GOOGLE INC.: *GTFS Static Overview*, <https://developers.google.com/transit/gtfs/> – abgerufen: 01.03.2017
- [260] INTERNATIONAL ASSOCIATION OF PUBLIC TRANSPORT: *UITP-Projekt „SORT“ : Standardisierte Zyklen für Straßentests*, 2009
- [261] GRUHLER, J.-P.: *Modellierung, Simulation und Optimierung des Gesamtsystems E-Bus*, Karlsruher Institut für Technologie, Teilinstitut für Bahnsystemtechnik, Masterarbeit, 2017
- [262] PTV GROUP: *PTV Vissim*, Karlsruhe, 2017, <http://vision-traffic.ptvgroup.com/de/produkte/ptv-vissim/> - abgerufen: 27.04.2017

- [263] WIEDEMANN, R.: *Simulation des Straßenverkehrsflusses*, Schriftenreihe am Institut für Verkehrswesen 8, Karlsruhe, 1974
- [264] WAGNER, P.: *Verkehrssimulation von E-Bus-Linien unter besonderer Analyse betrieblicher Worst-Case Szenarien*, Karlsruher Institut für Technologie, Teilinstitut für Bahnsystemtechnik, Bachelorarbeit, Karlsruhe, 2018
- [265] IPG AUTOMOTIVE GMBH: *TruckMaker*, <https://ipg-automotive.com/de/produkte-services/simulation-software/truckmaker/> – abgerufen: 02.03.2017
- [266] ZF FRIEDRICHSHAFEN AG: *Elektroportalachse AVE 130*, Passau, 2014, https://press.zf.com/site/press/de_de/microsites/press/list/release/media_6344.html – abgerufen: 23.05.2015
- [267] LANDGERICHT KÖLN: *Urteil vom 2. April 2009, Az. 29 O 134/08*, <https://openjur.de/u/136000.html> – abgerufen: 22.08.2017
- [268] PATTIPATI, B. ; SANKAVARAM, C., et al.: *System Identification and Estimation Framework for Pivotal Automotive Battery Management System Characteristics*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C 41, Nr. 6, S. 869–884, 2011
- [269] TREMBLAY, O. ; DESSAINT, L.-A., et al.: *A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles*, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007
- [270] SHEPHERD, C. M.: *Design of Primary and Secondary Cells : An Equation Describing Battery Discharge*, Journal of Electrochemical Society 112, S. 657–664, 1965
- [271] AKASOL GMBH: *AKAMODULE*, Darmstadt, 2012, <https://www.akasol.com/de/akasystem-akm> - abgerufen: 17.03.2015

- [272] SAUER, D. U. ; KAIRIES, K.-P.: *Stromspeicher-Systeme für PV – ist Lithium die Lösung?*, 12. Workshop "Photovoltaik-Modultechnik", Köln, 2015
- [273] RADAJ, D. ; VORMWALD, M.: *Ermüdungsfestigkeit : Grundlagen für Ingenieure*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2007
- [274] NUHIC, A. ; TERZIMEHIC, T., et al.: *Health diagnosis and remaining useful life prognostics of lithium-ion batteries using data-driven methods*, Journal of Power Sources 239, S. 680–688, 2013
- [275] THE MATHWORKS, Inc.: *Rainflow Counting Algorithm*, <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/3026-rainflow-counting-algorithm> – abgerufen: 17.12.2017
- [276] SPHEROS GMBH: *Thermo AC/DC : Electric heater*, Gilching, 2012, <http://spherosasia.und-fertig.de/Products/Heaters/Thermo-E.html> - abgerufen: 09.09.2016
- [277] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): *Berechnung von Kühllast und Raumtemperaturen von Räumen und Gebäuden (VDI-Kühllastregeln)*, VDI 2078, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2008
- [278] GROFF, E.: *Aufbereitung und Auswertung von Messdaten eines Elektrobusses im regulären Linienbetrieb*, Karlsruher Institut für Technologie, Teilinstitut für Bahnsystemtechnik, Bachelorarbeit, Karlsruhe, 2017
- [279] BOMBARDIER INC.: *Primove Propulsion*, Berlin, 2015, https://primove.bombardier.com/fileadmin/primove/content/MEDIA/Publications/BT_PRIMOVE_Propulsion_Fact_Sheet_2015_110dpi.pdf - abgerufen: 15.06.2017
- [280] TESAR, M.: *Auslegungsmethodik für die Elektrifizierung von Buslinien*, Karlsruher Institut für Technologie, Teilinstitut für Bahnsystemtechnik, Masterarbeit, Karlsruhe, 2017

- [281] REIBNITZ, U. v.: *Szenario-Technik : Instrumente für die unternehmerische und persönliche Erfolgsplanung*, Gabler, Wiesbaden, 1991
- [282] HACKER, F.: *Wirtschaftlichkeit von Elektromobilität in gewerblichen Anwendungen*, Begleitforschung zum BMWi Förderschwerpunkt IKT für Elektromobilität II: Smart Car – Smart Grid – Smart Traffic, Abschlussbericht, Berlin, 2015
- [283] SCHWARZE, J.: *Konzeption einer Batteriebuslinie in Köln*, 3. Dresdner Fachkonferenz – Innovation Elektrobus, Dresden, 2015
- [284] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Inflationsrate in Deutschland von 1950 bis 2016*, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/4917/umfrage/inflationsrate-in-deutschland-seit-1948/> – abgerufen: 14.06.2017
- [285] ARAL AKTIENGESELLSCHAFT: *AdBlue*, <http://www.aral.de/de/retail/kraftstoffe-und-preise/unsere-kraftstoffe/adblue.html> – abgerufen: 06.04.2017
- [286] ARAL AKTIENGESELLSCHAFT: *Aktuelle Kraftstoffpreise BAT Hardtwald West*, <http://tankstelle.aral.de/tankstelle/sandhausen/a5/12141200/> – abgerufen: 06.04.2017
- [287] ECOINVENT ASSOCIATION: *ecoinvent*, <http://www.ecoinvent.org/database/database.html> – abgerufen: 07.02.2017
- [288] UMWELTBUNDESAMT: *ProBas*, <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php> – abgerufen: 07.02.2017
- [289] MENGELKOCH, J.: *Ermittlung, Bewertung und Modellierung der Emissionen beim E-Stadtbuss-Betrieb*, Karlsruher Institut für Technologie, Teilinstitut für Bahnsystemtechnik, Masterarbeit, Karlsruhe, 2015
- [290] VAN ESSEN, H. ; SCHROTEN, A., et al.: *External Costs of Transport in Europe : Update Study for 2008*, Delft, 2011

- [291] TU DELFT: *The Model of the Eco-costs / Value Ratio*, <http://www.ecocostsvalue.com/> – abgerufen: 03.02.2017
- [292] GUSTAVSSON, N. ; DELLHAM, D.: *Methodology Handbook: True Value Analysis of Electric Buses*, Gothenburg, 2015
- [293] BICKEL, P. ; FRIEDRICH, R., et al.: *HEATCO - Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment : Deliverable 5 Proposal for Harmonised Guidelines*, Stuttgart, 2004
- [294] EUROPÄISCHEN PARLAMENT UND RAT DER EUROPÄISCHEN UNION: *Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen und Motoren hinsichtlich der Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen (Euro VI) und über den Zugang zu Fahrzeugreparatur- und -wartungsinformationen (idF v. Nr. 595/2009)*, 2009
- [295] LAJUNEN, A.: *Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses*, Transportation Research Part C: Emerging Technologies 38, S. 1–15, 2014
- [296] BERGK, F. ; PÜTZ, R., et al.: *Analyse der Lebenszykluskosten von Hybrid-Oberleitungsbussen*, Fachworkshop Hybrid-Oberleitungsbusse, Berlin, 2015
- [297] PROTERRA INC.: *The Proterra Catalyst 35-Foot Transit Vehicle*, <https://www.proterra.com/products/35-foot-catalyst/> – abgerufen: 26.04.2017
- [298] FALTENBACHER, M.: *Modell zur ökologisch-technischen Lebenszyklusanalyse von Nahverkehrsbussystemen*, Universität Stuttgart, Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde, Dissertation, Stuttgart, 2006
- [299] LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG: *Luftreinhaltepläne für Baden-Württemberg : Grundlagenband 2015*, Karlsruhe, 2016

- [300] BERTHOLD, K.: *CO2-freier ÖPNV mit dem E-Stadtbus, Herausforderungen und Lösungen*, Tagungsband 26. Verkehrswissenschaftliche Tage TU Dresden, S. 25-34, Dresden, 2018
- [301] IBM CORPORATION: *Modeling with OPL*, <https://www-01.ibm.com/software/commerce/optimization/modeling/> – abgerufen: 30.08.2017
- [302] IBM CORPORATION: *CPLEX Optimizer*, <https://www-01.ibm.com/software/commerce/optimization/cplex-optimizer/> – abgerufen: 02.03.2017
- [303] IBM CORPORATION: *Branch and cut in CPLEX*, https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/en/SSSA5P_12.4.0/ilog.odms.cpo.help/refcpcpoptimizer/html/branch.html – abgerufen: 13.02.2017
- [304] BERTHOLD, K. ; FÖRSTER, P., et al.: Location Planning of Charging Stations for Electric City Buses. In: DOERNER, K.; LJUBIC, I.; PFLUG, G.; TRAGLER, G. (Hrsg.): *Operations Research Proceedings 2015*, S. 237–242, Springer International Publishing, Cham, 2017
- [305] ROHRBECK, B. ; BERTHOLD, K., et al.: *Location Planning of Charging Stations for Electric City Buses Considering Battery Ageing Effects*. In: KLIEWER, N.; EHMKE, J.; BORNDÖRFER, R. (Hrsg.): *Operations Research Proceedings 2017*, Springer, Berlin, 2018
- [306] FÖRSTER, P.: *OR-Standortplanung für Ladestationen im E-Stadtbus-Betrieb*, Karlsruher Institut für Technologie, Teilinstitut für Bahnsystemtechnik, Masterarbeit, Karlsruhe, 2014
- [307] BERTHOLD, K.; KUNITH, A., et al.: Planung und Optimierung der Ladeinfrastruktur für E-Stadtbusse, *Der Nahverkehr*, Nr. 7-8, S. 16–20, 2015
- [308] INTERNATIONAL ASSOCIATION OF PUBLIC TRANSPORT: *ZeEUS eBus Report #2*, Brüssel, 2017

- [309] ROGERS, E. M.: *Diffusion of innovations*, Collier Macmillan, New York, London, 1983
- [310] BLUHM, S.: *Stochastische Planung der Platzierung von Ladestationen für Elektro-Stadtbusse*, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Operations Research (IOR), Bachelorarbeit, Karlsruhe, 2016
- [311] ZIMMERMANN, N.: *Robuste Planung der Platzierung von Ladestationen für Elektro-Stadtbusse*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Operations Research (IOR), Bachelorarbeit, 2016
- [312] SIGLE, S.: *Simulationstechnische Analyse des Einflusses der thermischen Konditionierung von Fahrgastraum und Antriebskomponenten eines elektrisch angetriebenen Busses auf dessen Energiemanagement*, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Diplomarbeit, Karlsruhe, 2014
- [313] VERBAND DEUTSCHER VERKEHRSUNTERNEHMEN (VDV): *VDV-Schrift 825 : Auswirkungen alternativer Technologien im Linienbus auf Betriebshöfe und Werkstätten*, Köln, 2015
- [314] SCHMIDT, A.: *Flottenbetrieb von elektrischen und autonomen Serviceagenten im städtischen Personennahverkehr*, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Dissertation, Karlsruhe, 2017
- [315] IPG AUTOMOTIVE GMBH: *CarMaker Reference Manual Version 4.5*, Karlsruhe, 2014
- [316] UMWELTBUNDESAMT: *Nettostromerzeugung in Deutschland 2015 nach Primärenergieträgern*, Dessau, 2016
- [317] PORSCH, L. ; SUTTER, D., et al.: *Leitfaden zur Nutzen-Kosten-Abschätzung umweltrelevanter Effekte in der Gesetzesfolgenabschätzung*, Umweltbundesamt (Hrsg.), Dessau, 2014

- [318] MÜLLER, T.: *Welche Anforderungen stellen E-Busse an Betriebshöfe?*, Der Nahverkehr 36, Nr. 3, Sonderheft Elektrobusse, S. 24–27, 2018
- [319] WEBER, J.: *Bauliche und organisatorische Umsetzung des Busdepot-Ladens von Elektro-Busflotten*, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Operations Research (IOR), Masterarbeit, Karlsruhe, 2017
- [320] THE ANYLOGIC COMPANY: *AnyLogic*, <https://www.anylogic.de/> – abgerufen: 02.03.2018