

# Methodischer Technologievergleich von Systemkonzepten für die Elektrifizierung von Stadtbussen

vorgelegt von  
Tu-Anh Fay, M.Sc.

von der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme  
der Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften  
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing Henning Meyer
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Dietmar Göhlich
Gutachterin:	Prof. Dr.-Ing. Beate Bender

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 07. Februar 2019

Berlin 2019

## Vorwort

Die Forschungsarbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Methoden der Produktentwicklung und Mechatronik und als Projektmitarbeiterin im E-Bus Berlin Projekt, welches vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur im Rahmen des Schaufensters Elektromobilität gefördert wurde.

An dieser Stelle möchte ich den zahlreichen Menschen danken, ohne die das Anfertigen der vorliegenden Promotionsarbeit nicht möglich gewesen wäre.

Ganz besonders danken möchte ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietmar Göhlich für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit, das entgegengesetzte Vertrauen und für die vielfältigen Chancen und Möglichkeiten, die ich während meiner Arbeit am Fachgebiet genießen durfte. Insbesondere möchte ich Ihnen für die Unterstützung in der letzten Phase der Promotion danken. Für die Bereitschaft zur Begutachtung meiner Arbeit möchte ich mich herzlich bei Frau Prof. Dr.-Ing. Beate Bender bedanken. Des Weiteren bedanke ich mich herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Henning Meyer für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Mein Dank gilt darüber hinaus den Partnern des E-Bus Berlin Projekts, insbesondere Frau Simone Torzynski, Herrn Erhard Musal und Herrn Frank Hüselitz (BVG), Frau Dana Hahn (Bombardier Transportation) und Herrn Christian Goll (Solaris) für die fachliche Unterstützung, die kritische inhaltliche Auseinandersetzung und die gewährten Unternehmenseinblicke. Insbesondere möchte ich mich bei Herrn Minh-Thuy Truong (ehemals BVG, jetzt Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV)) bedanken für die Unterstützung im E-Bus Berlin Projekt, insbesondere für die Ermöglichung von Messversuchen auf der Strecke und im Betriebshof und später für die Ermöglichung der Teilnahme an verschiedenen Veranstaltungen und den Austausch mit dem VDV.

Ein ganz lieber Dank geht an Frau Schmunkamp und meine Kollegen am Fachgebiet für die fachlichen Diskussionen in der Forschung, in der Lehre und im alltäglichen Leben aber auch für die privaten Unternehmungen, insbesondere für die horizonterweiternden Erfahrungen, die ich durch die Unterstützung bei der Treibjagd im Wald, erlangen konnte. Ganz besonders danken möchte ich meinem ehemaligen Kollegen Alexander Kunith, der mit mir hauptsächlich im E-Bus Berlin Projekt zusammengearbeitet hat und von dem ich viel im Bereich des Projektmanagements und der wirtschaftlichen Analysen gelernt habe.

Außerdem danke ich allen von mir betreuten Studierenden, die mit ihren Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten einen sehr wertvollen Beitrag zum Ergebnis dieser Arbeit geleistet haben. Stellvertretend herausheben möchte ich Dominic Jefferies und Ludger Heide, die mich durch ihren Einsatz in besonderem Maße unterstützt haben und mittlerweile auch als Kollegen am Fachgebiet tätig sind. Ebenso möchte ich den ehemaligen studentischen Mitarbeitern Herrn Fabian Gongoll, Herrn Benjamin Liebheit, Frau Dorothea Schneider, Herrn Sebastian Meinzolt und Herrn Marco Zimmermann für ihren unermüdlichen Einsatz danken.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meinen Eltern, meinem Mann Robert Fay und meinen Schwiegereltern und Freunden für die unentwegte Unterstützung, für das Verständnis, für die Geduld und den Zuspruch bedanken, die sie während der Erstellung dieser Arbeit aufgebracht haben.

Berlin, den 17. Dezember 2018

Tu-Anh Fay

## **Kontakt**

tu-anh.fay@tu-berlin.de

## Kurzfassung

Vor dem Hintergrund des Klimawandels und der Schadstoffbelastung der Luft in urbanen Ballungsräumen müssen zunehmende Anstrengungen unternommen werden um dem entgegenzuwirken. Die Elektrifizierung des öffentlichen Personennahverkehrs spielt dabei eine wichtige Rolle, weil durch die hohen Laufleistungen der Linienbusse sich die Elektrifizierung hier besonders positiv auf die Umwelt auswirkt.

Durch vielfältige Fördermaßnahmen sind weltweit bereits diverse Elektrobus-Projekte initiiert worden, dennoch stehen die Busbetreiber weiterhin vor der Problematik die Potentiale einzelner Technologien unter Berücksichtigung der jeweiligen Randbedingungen zu bewerten. Die Kombination der Teilsysteme ergibt einen großen theoretisch möglichen Lösungsraum, der eine bewusste Reduktion erfordert. Ein weiterer erschwerender Faktor ist, dass die Wechselwirkungen zwischen den Teilsystemen und die Abhängigkeiten zwischen Randbedingung und System bisher nicht vollständig bekannt sind.

In der vorliegenden Arbeit wird unter Berücksichtigung einer ganzheitlichen Betrachtungsweise eine praxisrelevante Methodik zur Bewertung der verschiedenen Systemkonzepte für die Elektrifizierung von Stadtbussen vorgestellt. Der Fokus in dieser Arbeit liegt auf reinen batterieelektrischen Systemlösungen, kann jedoch auch auf andere Konzepte wie z.B. Brennstoffzellenbusse angewendet werden. Im ersten Schritt wird das Zielsystem definiert, welches die kundenwertigen Merkmale untersucht und diese mit Systemmerkmalen korreliert. Basierend auf einer relationsorientierten Funktionsmodellierung wird die hohe Komplexität des Systems veranschaulicht und Wechselwirkungen sowie Abhängigkeiten sichtbar gemacht. Diese werden mit der Produktstruktur in Beziehung gesetzt und, abhängig von den zu untersuchenden Teilsystemen, können die konzeptrelevanten Systemmerkmale identifiziert werden. Darauf aufbauend wird ein Simulationsmodell für das Gesamtsystem erstellt, welches die konzeptrelevanten Systemmerkmale quantitativ bestimmt. Abschließend können diese gegenübergestellt und verglichen werden. Die Anwendung der Methodik wird am Beispiel von Batterie- und Ladesystemen für die Elektrifizierung einer Buslinie in Berlin demonstriert.

Auf Basis der vorgestellten Methodik lassen sich unterschiedliche Konzepte auf ihre Machbarkeit untersuchen und es kann somit eine Technologie- und Konzeptvorauswahl getroffen werden. Diese wenigen vorausgewählten Varianten dienen dann als Eingangsdaten für eine vollständige wirtschaftliche Total-Cost-of-Ownership-Analyse.

## Abstract

In the context of climate change and the air pollution in conurbations, increasing efforts must be made to counteract this. Therefore, the electrification of local public transport plays an important role. The electrification of the public buses has a particularly positive impact on the environment, because of the high mileage of the public buses.

Many electric bus projects have already been initiated worldwide through a variety of incentives. Still, bus operators face the problem of assessing the potential of individual technologies taking into account the given boundary conditions. The combination of the subsystems results in a large theoretically possible solution space, which requires a deliberate reduction. Another challenging factor is that the interactions between the subsystems and the dependencies between the boundary conditions and the system are not fully known, yet.

Taking into account a holistic approach, this work presents a methodology with practical relevance for evaluating the various system concepts for the electrification of city buses. The focus in this work lies on battery electric system solutions, but the methodology can also be applied to other technologies such as fuel cell buses. The presented methodology starts with the definition of the target system. It includes the examination of customer relevant attributes and an assignment to the systems attributes. Based on a relationship-oriented functional modeling, the high complexity of the system is illustrated and interdependencies as well as impacts are made visible. Next, these interdependencies and impacts are related to the product structure and, depending on the subsystems to be examined, the concept-relevant system attributes can be identified. Subsequently, an overall system simulation model is developed, which determines the concept-relevant system attributes quantitatively. Finally, these system attributes are assessed and compared. The application of the methodology is demonstrated using the example of battery and charging systems for the electrification of a bus line in Berlin.

On the basis of the presented methodology, different concepts can be examined with regard to feasibility and thus a technology and concept pre-selection can be made. These pre-selected concepts then provide input for a total cost-of-ownership analysis.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>iii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>iv</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>viii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>xi</b>
<b>Variablenverzeichnis</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>xvi</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Ziel der Arbeit.....	3
1.2 Struktur der Arbeit .....	4
<b>2. Stand der Technik und Wissenschaft</b> .....	<b>6</b>
2.1 Übersicht zu elektrischen Buskonzepten .....	6
2.1.1 Brennstoffzellenbus .....	7
2.1.2 Batteriebus .....	8
2.1.3 Europäischer Markt für Elektrobusse .....	11
2.1.4 Chinesischer Markt für Elektrobusse .....	12
2.2 Teilsysteme im Batteriebus .....	15
2.2.1 Antriebssystem .....	17
2.2.2 Externes Energieübertragungssystem.....	25
2.2.3 Klimatisierungssystem .....	29
2.3 Methodische Grundlagen .....	32
2.3.1 Begriffsdefinition .....	32
2.3.2 Technikbewertung .....	33
2.4 Übersicht zu bisherigen Simulationsmodellen .....	43
<b>3. Forschungsumfang</b> .....	<b>46</b>
3.1 Forschungsbedarf.....	46
3.2 Forschungsfragen .....	46
3.3 Abgrenzung der Arbeit .....	49
3.4 Vorgehensmodell .....	51
<b>4. Entwicklung des Zielsystems</b> .....	<b>53</b>
4.1 Erläuterung kundenwerte Merkmale.....	53
4.2 Ableitung der konzeptrelevanten Systemmerkmale .....	56
4.3 Bestimmung der Zielwerte.....	60

<b>5.</b>	<b>Betreiber- und standortspezifische Randbedingungen .....</b>	<b>64</b>
5.1	Fahrzyklen.....	64
5.1.1	Standardisierte realitätsnahe Fahrzyklen.....	64
5.1.2	Gemessene Fahrzyklen.....	66
5.2	Betriebsbedingungen.....	68
5.3	Topologie - Höhendaten und Bestimmung der Steigung.....	68
5.4	Klima.....	69
<b>6.</b>	<b>Modellentwicklung.....</b>	<b>71</b>
6.1	Ziel des Gesamtsystem -Simulationsmodells .....	71
6.2	Gesamtsystem-Simulationsmodell.....	72
6.2.1	Teilmodell zur Bestimmung des Leistungsbedarfs Antrieb .....	73
6.2.2	Teilmodell zur Bestimmung des Leistungsbedarfs Klima .....	75
6.2.3	Batteriemodell .....	78
6.2.4	Lademodell.....	79
6.2.5	Batteriekonfiguration.....	80
6.3	Einschränkungen des Modells .....	82
<b>7.</b>	<b>Verifikation und Validierung des Simulationsmodells.....</b>	<b>84</b>
7.1	Referenzfahrzeug und Messtechnik.....	84
7.2	Verifikation .....	85
7.3	Validierung.....	87
7.3.1	Validierung des Antriebssystems inklusive Batteriemodell.....	88
7.3.2	Validierung des Klimatisierungssystems .....	90
<b>8.</b>	<b>Anwendung der Methodik am Beispiel der Studie zum Energiezuführungssystem und Batteriesystem .....</b>	<b>94</b>
8.1	Schritt 1: Bestimmung des Zielsystems und seiner Zielwerte.....	94
8.2	Schritt 2: Aufstellung der zu untersuchenden Konzeptvarianten und Definition des Lastprofils .....	95
8.2.1	Konzeptvarianten.....	95
8.2.2	Lastprofil .....	96
8.3	Schritt 3: Analyse der Systemeigenschaften.....	98
8.3.1	Auslegung der erforderlichen Batteriegröße .....	98
8.3.2	Bestimmung der konzeptrelevanten Systemeigenschaften .....	99
8.3.3	Bestimmung der kundenwerten Eigenschaften .....	102
8.4	Schritt 4: Konzeptbewertung .....	103
<b>9.</b>	<b>Sensitivitätsanalyse .....</b>	<b>105</b>
<b>10.</b>	<b>Fazit.....</b>	<b>109</b>

10.1	Zusammenfassung.....	109
10.2	Kritische Würdigung und Ausblick .....	110
<b>11.</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>113</b>
11.1	Eigene Veröffentlichungen unter dem Namen Ly .....	125
11.2	Eigene Veröffentlichungen unter dem Namen Fay .....	126
11.3	Richtlinien, Normen und Schriften .....	126
11.4	Studentische Abschlussarbeiten.....	127
<b>Anhang</b>	<b>.....</b>	<b>i</b>
Anhang A0	Chinesische Förderpolitik .....	i
Anhang A1	Zielwertsystem.....	ii
Anhang A2	klimatische Eingangsdaten für die Simulation des Jahresverbrauchs .....	iv
Anhang A3	Berechnung des Wärmeaustauschs mit der Umgebung.....	v
Anhang A4	Simulink – Modellbeschreibung.....	viii
Anhang A5	Kenndaten der Batterie .....	x
Anhang A6	Kenndaten des Ladesystems .....	xi
Anhang A7	Tabellarische Übersicht der Ergebnisse.....	xii

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit .....	5
Abbildung 2: Innovative elektrische Bussysteme im ÖPNV .....	7
Abbildung 3: Elektrobuskonzepte in Europa 2017 .....	11
Abbildung 4: Europaweite Elektrobustellungen im Jahr 2017 .....	12
Abbildung 5: Verkaufszahlen elektrisch betriebener Busse in China .....	12
Abbildung 6: Beschaffung chinesischer Busse mit alternativem Antrieb nach Technologie .....	13
Abbildung 7: Verkehrsentwicklung in Shenzhen von 2008 bis 2016 .....	14
Abbildung 8: Typische Wirkungsgradkennfelder von Synchron- und Asynchronmaschinen .....	19
Abbildung 9: Differenz der Wirkungsgrade $\eta_{PSM} - \eta_{ASM}$ .....	19
Abbildung 10: Zu berücksichtigende Aspekte bei der Integration von Batteriezellen in ein Energiespeichersystem eines Elektrofahrzeugs ..	20
Abbildung 11: Theoretische Energiedichten verschiedener Batterien im Vergleich zu Benzin .....	23
Abbildung 12: Zweipunktwechselrichter.....	24
Abbildung 13: Pantograph mit Kontaktkopf und Kontaktierung in der Haube .....	26
Abbildung 14: Invertierter Pantograph der Firma Schunk .....	26
Abbildung 15: Freizuhaltendes Lichtraumprofil gemäß RAS 2006.....	27
Abbildung 16: Blockdiagramm eines induktiven Ladesystems .....	27
Abbildung 17: Koreanische Batteriewechselstation der Firma begins.....	28
Abbildung 18: Batteriewechselstation in Peking.....	28
Abbildung 19: Elektrische Aufdach-Klimaanlage Konvekta UL 500 EM.....	30
Abbildung 20: Systemschaubild konventionelles Klimatisierungssystem .....	30
Abbildung 21: Schematischer Aufbau des Kältemittelkreislaufs und schematischer Kälteprozess .....	30
Abbildung 22: Zielsystemstruktur, Dissertation Ziemann.....	38
Abbildung 23: Gegenüberstellung aller in der Studie von Mahmoud et al. (2016) untersuchten Elektrobusse .....	39
Abbildung 24: Vereinfachte Darstellung des Modellierungsprozesses.....	42
Abbildung 25: Vorgehensmodell.....	47
Abbildung 26: Betrachtete elektrische Bussysteme dieser Arbeit.....	49
Abbildung 27: Betrachtetes E-Bus-System und Systemgrenze.....	50
Abbildung 28: Vorgehensmodell der technisch wirtschaftlichen Bewertungsmethodik.....	51
Abbildung 29: Umfang der Dissertation.....	52
Abbildung 30: Wesentliche Abhängigkeiten zwischen Relations- und Beschaffungsmerkmalen .....	57
Abbildung 31: Beziehungsmatrix Produktstruktur-Kundenwerte Merkmale.....	59

Abbildung 32: Ableitung der konzeptrelevanten kundenwerten Merkmale.....	59
Abbildung 33: Geschwindigkeitsverlauf und Fahrgastaufkommen während eines Umlaufs .....	67
Abbildung 34: Auswertung von 32 Umläufen der Linie, bereinigt um die Endhaltstellenaufenthalte.....	67
Abbildung 35: Höhenprofil und Steigungswinkel $\alpha$ als Funktion der Strecke.....	69
Abbildung 36: Verteilung der Tagesmitteltemperatur für die drei Jahrestypen .....	70
Abbildung 37: Relative Feuchte und Globalstrahlung als Funktion der Lufttemperatur basierend auf den Tagesmittelwerten der drei Jahrestypen .....	70
Abbildung 38: Aufbau des Fahrmodells .....	72
Abbildung 39: Aufbau des Lademodells .....	73
Abbildung 40: Fahrgastraum mit allen Wärme- und Stoffströmen .....	75
Abbildung 41: Reales Klimatisierungssystem und Modifizierung für Simulation .....	77
Abbildung 42: Entladekurve aus dem Datenblatt und modelliert für ein Batteriesystem .....	78
Abbildung 43: Routine zur Grobauslegung der Batterie .....	80
Abbildung 44: Schrittweise Reduktion zur Auslegung der erforderlichen Batterie .....	81
Abbildung 45: Vereinfachtes Blockschaltbild des Referenzfahrzeugs .....	85
Abbildung 46: Verifikation des Teilmodells zur Bestimmung des Leistungsbedarfs Antrieb, oben ungefiltert, Mitte gefiltertes Beschleunigungssignal, unten gefiltertes Beschleunigungssignal, korrigiertes Höhengsignal und geglätteter Steigungswinkel .....	86
Abbildung 47: Gemessene Verbrauchswerte je Umlauf. „NV 24 V“: 24-V-Nebenverbraucher; „NV HV“: Hochvolt-Nebenverbraucher .....	88
Abbildung 48: Vergleich von Messung und Simulation des Batteriemodells anhand eines vorgegebenen Leistungsbedarfs .....	89
Abbildung 49: Vergleich von Messung und Simulation des Antriebssystems, ohne Klimatisierung .....	90
Abbildung 50: Vergleich von Messung und Simulation der Fahrgastraumtemperatur.....	91
Abbildung 51: Vergleich Messung und Simulation des Energieverbrauchs durch den Heizbetrieb.....	91
Abbildung 52: Vergleich Messung und Simulation des Energieverbrauchs durch den Kühlbetrieb .....	92
Abbildung 53: Auslegung der Batterie im Grenzbetrieb mit Gewichtsbeschränkung und Ladezustandsfenstern $\Delta SoC_{LFP} = 85\%$ , $\Delta SoC_{NMC} = 30\%$ , $\Delta SoC_{LTO} = 40\%$ .....	100
Abbildung 54: Energieverbrauch je Konzept, je mittlerer Tagesaußentemperatur und 18°C Innenraumtemperatur .....	101
Abbildung 55: durchschnittlicher Verbrauch je Konzept.....	101

Abbildung 56: Treibhausgasemissionen je Konzept .....	102
Abbildung 57: Nutzbare Batteriekapazität und mögliche Reichweite mit einer Ladung unter Annahme des Durchschnittsverbrauchs je Konzept ....	102
Abbildung 58: Beförderungskapazität und Leergewicht je Konzept .....	103
Abbildung 59: Vergleich des durchschnittlichen Energieverbrauchs für ein Jahr mit extremem Winter, ein Durchschnittsjahr und ein Jahr mit extremem Sommer.....	105
Abbildung 60: Vergleich der Geschwindigkeitsprofile Manhattan Bus Zyklus, Linie 204 und Braunschweig Bus Zyklus .....	106
Abbildung 61: Strecke, Energieverbrauch bei 10°C Außentemperatur und Ladezustand am Ende der Fahrt für das Konzept iOC-NMC .....	107
Abbildung 62: Auswirkung einer steigenden C-Rate und einer doppelten Ladeleistung auf die Ladezeit für das Konzept kOC-LTO .....	108
Abbildung 63: Modell einer n-schichtigen Wand mit allen auftretenden Wärmeströmen .....	v

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Betriebskonzepte in Bezug auf die Ladeleistung (nach VDV Schrift 260).....	8
Tabelle 2: Produktstruktur eines elektrisch betriebenen Linienbusses.....	16
Tabelle 3: Vergleich der Merkmalsausprägung von LFP, LTO und NMC Pouch Zellen.....	21
Tabelle 4: Vergleich von Lithium-Luft, Zink-Luft mit gängigen Li-Ionen Speichern.....	23
Tabelle 5: Eigenschaften umgesetzter Energieübertragungssysteme.....	28
Tabelle 6: Anforderungskategorie und abgeleitete Anforderungen an das Antriebssystem, Dissertation Reupold.....	36
Tabelle 7: Bewertungskriterien und Zuordnung, Dissertation Reupold.....	37
Tabelle 8: Kriterien der AG Innovative Antriebe Bus zur Auswertung der Förderprojekte.....	40
Tabelle 9: Kundenwerte Merkmale in der Entwicklung elektrisch betriebener Linienbusse.....	41
Tabelle 10 Übersicht zu einer Auswahl von bestehenden Simulationsmodellen.....	43
Tabelle 11: Simulationsmodelle im Vergleich.....	45
Tabelle 12: Kundenwerte Merkmale und Klassifizierung ihrer Bewertbarkeit.....	55
Tabelle 13: Zusammenhang zwischen kundenwerten Merkmalen und Relationsmerkmalen.....	56
Tabelle 14: Verwendete Symbole und Abkürzungen in Abbildung 28.....	58
Tabelle 15: Konzeptrelevante Systemmerkmale.....	60
Tabelle 16: Literaturangaben zu Reichweiten für Batteriebusse mit Depotladung.....	61
Tabelle 17: Literaturangaben zum realen Leergewicht von 12 m Batteriebusen.....	62
Tabelle 18: Literaturangaben zu Ladezeiten für Batteriebusse mit Depotladung.....	63
Tabelle 19: realitätsnahe Bus-Fahrzyklen zur Verbrauchs- und Emissionsmessung... ..	65
Tabelle 20: charakteristische Parameter der realitätsnahen Fahrzyklen.....	66
Tabelle 21: Allgemeine Daten zu den Elektrobussen im E-Bus Berlin Projekt.....	84
Tabelle 22: Gegenüberstellung der gemessenen Verbräuche.....	87
Tabelle 23: Zielwerte Depotladung.....	94
Tabelle 24: Zielwerte Gelegenheitsladung.....	95
Tabelle 25: Lösungsraum mit unterschiedlichen Varianten.....	95
Tabelle 26: Verträglichkeitsanalyse mit Batterietechnologien.....	96
Tabelle 27: Merkmalsausprägung der untersuchten Batteriezellen.....	98
Tabelle 28: Auslegung der Batterie im Grenzbetrieb mit Ladezustandsfenster $\Delta SoC_{LFP} = 85\%$ , $\Delta SoC_{NMC} = 30\%$ , $\Delta SoC_{LTO} = 62\%$ und konzeptrelevante Systemeigenschaften, grau bedeutet Anforderung nicht erfüllt.....	99

Tabelle 29: Nationale Förderung für chinesische Busse mit alternativem Antrieb in 2016.....	i
Tabelle 30: Nationale Förderung für chinesische Busse mit alternativem Antrieb in 2017/2018.....	i
Tabelle 31: Kundenwerte Merkmale in der Batteriebusentwicklung mit Unterwerten .....	ii
Tabelle 32: klimatische Eingangsdaten für die Simulation .....	iv
Tabelle 33: Auslegung der Batterie im Grenzbetrieb mit Gewichtsbeschränkung und Ladezustandsfenstern $\Delta SoC_{LFP} = 85\%$ , $\Delta SoC_{NMC} = 30\%$ , $\Delta SoC_{LTO} = 40\%$ .....	xii

## Variablenverzeichnis

Variable	Einheit	Bezeichnung
$c_{p,inner}$	J/kg	spezifische Wärmekapazität
$c_w$	1	Luftwiderstandsbeiwert
$d_{Rotor}$	m	Durchmesser des Rotors
$f_R$	1	Rollwiderstandsbeiwert
$g$	m/s <sup>2</sup>	Erdbeschleunigung
$h$	m	Höhenangaben eines Fahrprofils
$h_{pC}$	J/kg	Spezifische Enthalpie
$i$	1	Übersetzung
$i_{max,charge}$	A	Maximaler Ladestrom
$k$	W/m <sup>2</sup> K	Wärmedurchgangskoeffizient
$l$	m	Länge
$m_{ges}$	kg	Gesamtmasse
$m_{inner}$	kg	Masse der Innenausstattung, thermische Masse
$m_{zus}$	kg	Zusatzmasse (bestehend aus Batterie, Ladesystem und Fahrgäste)
$m_{Fzg,min}$	kg	Masse des Fahrzeuges ohne Batterie, Ladesystem und Fahrgäste
$n_{EM,max}$	1/s	Maximale Drehzahl des Elektromotors
$n_{Rad,max}$	1/s	Maximale Drehzahl am Rad
$n_{Motor}$	1/s	Motordrehzahl
$r_{dyn}$	m	Dynamischer Raddurchmesser
$s$	m	Streckenangabe eines Fahrprofils
$s_{PTC}$	1	Stellsignal für den Luftherhitzer
$t$	s	Zeit
$t_{Zyklus}$	s	Zeit eines Zyklus
$v$	m/s	Geschwindigkeit
$v'$	m/s	Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit
$v_{max}$	m/s	Maximale Geschwindigkeit
$A_{Aufbau}$	m <sup>2</sup>	Fläche des Aufbaus, die für die Berechnung der Wärmeströme relevant ist
$A_W$	m <sup>2</sup>	Anströmfläche für Luftwiderstand
$C$	N/m <sup>2</sup>	Ausnutzungsfaktor
$COP$	1	Coefficient of Performance (Leistungszahl)
$COP_{total,AC}$	1	Gesamtleistungszahl der Klimaanlage
$COP_{total,PTC}$	1	Gesamtleistungszahl des Luftherhitzers
$E_{total}$	kWh/km	Gesamtenergieverbrauch
$E_{total}$	kWh/km	Durchschnittlicher Energieverbrauch
$F_{Wres}$	N	Gesamtfahrwiderstand
$F_{WB}$	N	Beschleunigungswiderstand
$F_{WL}$	N	Luftwiderstand
$F_{WR}$	N	Reibungswiderstand

Variable	Einheit	Bezeichnung
$F_{WS}$	N	Steigungswiderstand
$\dot{H}$	J/s	Enthalpiestrom
$\dot{H}_{doors,in}$	J/s	Enthalpiestrom Türen (Zuluft)
$\dot{H}_{doors,out}$	J/s	Enthalpiestrom Türen (Abluft)
$\dot{H}_{exitAir}$	J/s	Enthalpiestrom Abluft
$\dot{H}_{recircAir}$	J/s	Enthalpiestrom Umluft
$\dot{H}_{treatedAir}$	J/s	Enthalpiestrom Zuluft
$\dot{H}_{vapour,passengers}$	J/s	Enthalpiestrom der Passagiere
$M_{Motor}$	Nm	Drehmoment des Motors
$\dot{M}_{doors,in}$	kg/s	Massenstrom Türen (Zuluft)
$\dot{M}_{doors,out}$	kg/s	Massenstrom Türen (Abluft)
$\dot{M}_{exitAir}$	kg/s	Massenstrom Abluft
$\dot{M}_{recircAir}$	kg/s	Massenstrom Umluft
$\dot{M}_{treatedAir}$	kg/s	Massenstrom Zuluft
$\dot{M}_{vapour,passengers}$	kg/s	Massenstrom der Passagiere
$N_{Tamb}$	1	Anzahl der Tage, an denen eine bestimmte mittlere Außentemperatur vorliegt
$P_{el,Antrieb}$	W	Elektrische Antriebsleistung
$P_{total}$	W	Gesamtleistung
$P_{Comp}$	W	Kompressorleistung
$P_{Motor}$	W	Motorleistung
$P_{PTC}$	W	Elektrische Leistung des Lufterhitzers
$\dot{Q}$	J/s	Wärmestrom
$\dot{Q}_{heatLoss}$	J/s	Wärmestrom an die Umgebung
$\dot{Q}_{inner}$	J/s	Wärmestrom der thermischen Trägheiten
$\dot{Q}_{passengers}$	J/s	Wärmestrom der Passagiere
$\dot{Q}_{CabinAir}$	J/s	Wärmestrom der Klimaanlage
$\dot{Q}_{sol}$	J/s	Wärmestrom der Sonnenstrahlung
$\dot{Q}_{Evap}$	J/s	Verdampfungswärmestrom
$\dot{Q}_{PTC,max}$	J/s	Maximaler Wärmestrom des Lufterhitzers
$s_{fahrzyklus}$	km	Strecke des Fahrzyklus
$SoC$	%	State of Charge (Ladezustand)
$SoC_{min}$	%	Minimaler Ladezustand
$SoC_{max}$	%	Maximaler Ladezustand
$SoC_{Ende}$	%	Ladezustand am Ende einer Fahrt bzw. beim Beginn der Ladung
$T_{amb}$	°C	Außentemperatur
$T_{PC}$	K	Temperatur des Innenraums (Passenger Cabin)
$THG_{Faktor}$	kgCO <sub>2</sub> eq/kWh	Faktor zur Bestimmung der Treibhausgasemissionen basierend auf dem Strommix 2015
$U_{PC}$	J	Innere Energie des Fahrgastraums

Variable	Einheit	Bezeichnung
$U_{SoC}$	J	Batteriespannung in Abhängigkeit des Ladezustands
$\alpha$	1	Steigungswinkel
$\varepsilon$	1	Emissionsgrad
$\eta_{\text{Antriebsstang}}$	1	Wirkungsgrad des Gesamtantriebsstranges
$\eta_{\text{Aux}}$	1	Wirkungsgrad der Nebenverbraucher
$\eta_{\text{ASM}}$	1	Wirkungsgrad der Asynchronmaschine
$\eta_{\text{Aux}}$	1	Wirkungsgrad der Nebenverbraucher
$\eta_{\text{BS}}$	1	Wirkungsgrad der Batterie
$\eta_{\text{CS}}$	1	Wirkungsgrad des Energiezuführungssystems
$\eta_{\text{Max}}$	1	Maximaler Wirkungsgrad
$\eta_{\text{Getriebe}}$	1	Wirkungsgrad des Getriebes
$\eta_{\text{Inverter}}$	1	Wirkungsgrad des Umrichters
$\eta_{\text{Motor}}$	1	Wirkungsgrad des Motors
$\eta_{\text{PSM}}$	1	Wirkungsgrad der permanentenregten Synchronmaschine
$\eta_{\text{PSM}}$	1	Wirkungsgrad des Luftherhitzers
$\lambda_m$	1	Massenfaktor
$\rho_L$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte von Luft
$\tau$	1	Transmissionsgrad
$\Delta SoC$	1	Ladezustandsfenster

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
k.A.	keine Angabe
AC	Air Condition (Klimaanlage)
ASM	Asynchronmaschine
BMS	Batteriemanagementsystem
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BRA	Braunschweig Zyklus
BSS	Batteriewechselsystem
CUEDC	Composite Urban Emissions Drive Cycles
DKE	Deutsche Kommission Elektrotechnik
DoD	Depth of Discharge (Entladungsgrad)
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
GNNS	Globales Navigationssatellitensystem
GPS	Global Positioning System
HV	Hochvolt
IEA	International Energy Agency
LCC	Life Cycle Cost (Lebenszykluskosten)
LFP	Lithium-Eisen-Phosphat
LMP	Lithium-Metall-Polymer
LTO	Lithium-Titan-Oxyd
MAN	Manhattan Bus Cycle
MPM	Methoden der Produktentwicklung und Mechatronik, Fachgebiet von Prof. Göhlich
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NMC	Lithium-Nickel-Manganese-Cobalt-Oxyd
NV	Nebenverbraucher
NYBus	New York Bus Cycle
OCC	Orange County Bus Cycle
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PKW	Personenkraftwagen
PSM	Permanenterregte Synchronmaschine
SoC	State of Charge (Ladezustand)
SoH	State of Health (Alterungszustand einer Batterie)
SORT	Standardised On-Road Test Cycle
TCO	Total Cost of Ownership (Gesamtkosten)
VDI	Verband Deutscher Ingenieure
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen
THG	Treibhausgas
TTW	Tank-to-Wheel
WTT	Well-to-Tank
WTW	Well-to-Wheel

# 1. Einleitung

Elektromobilität ist eine Herausforderung dieser Zeit. Probleme wie Ressourcenknappheit, Luftverschmutzung und Klimaschutz aber auch Wettbewerbsfähigkeit werden im Zusammenhang mit Elektromobilität genannt. Dabei wird Elektromobilität als eine Schlüsseltechnologie zur nachhaltigen Umgestaltung der Mobilität gesehen, die das Klima und die Umwelt schont, sowie technologische Innovationen und neue Geschäftsmodelle fördert.<sup>1</sup>

Auf den Verkehrssektor fielen 2014 nahezu 30 % des nationalen Endenergieverbrauchs<sup>2</sup>, wovon mehr als 90 % auf Erdöl basieren und rund 18 % der gesamten Treibhausgasemissionen.<sup>3</sup> Nach dem Sektor Energiewirtschaft und Industrie ist der Verkehrssektor einer der Hauptverursacher von Treibhausgasemissionen.<sup>4</sup> Ein Umdenken ist gefordert und wird politisch durch Maßnahmen unterstützt. So wurde Ende 2015 das internationale Klimaschutzabkommen von Paris verabschiedet, worin sich die Mitgliedsstaaten darauf einigten die globale Erderwärmung auf unter 2 °C zu beschränken. Unter Anerkennung dieser Grenze hat sich die Europäische Union zum Ziel gesetzt ihre Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80-95% gegenüber 1990 zu senken. Im vierten Monitoring Bericht zur Energiewende hat sich die Bundesregierung auf eine etappenweise Reduzierung der Treibhausgasemissionen festgelegt.<sup>5</sup> Zur Umsetzung der Ziele hat die Bundesregierung Ende 2014 das *Aktionsprogramm Klimaschutz 2020* und den *Nationalen Aktionsplan Energieeffizienz* eingeführt, Ende 2016 wurde der *Klimaschutzplan 2050* beschlossen. Die im Klimaschutzplan 2050 genannten Maßnahmen zur Erreichung der nationalen Ziele sind u. a. die weitere Förderung der Elektromobilität, Schaffung von finanziellen Anreizen und weitere Förderung von neuen technologischen Entwicklungen bei Bussen und Bahnen sowie die Förderung zur weiteren Vernetzung der Verkehrsangebote. So soll nach Vorgabe der Bundesregierung der Endenergieverbrauch im Verkehrssektor bis 2020 um 10 % und bis 2050 um rund 40 % im Vergleich zu 2005 verringert werden.

Die beschränkte Reichweite, ungenügende Ladeinfrastruktur und hohe Kosten gelten als Haupthindernisse für die Marktdurchdringung von elektrischen Personenwagen. Busse hingegen haben ein regelmäßiges Einsatzprofil mit geplanten Routen und durch die geplanten Stopps an den Haltestellen ein vorhersehbares Geschwindigkeitsprofil, sodass die benötigte und mitzuführende Energie bestimmt und das Bussystem mit der Ladeinfrastruktur optimal abgestimmt werden kann. Auf diese Weise ist das Thema Reichweite

---

<sup>1</sup> Vgl. Nationale Plattform Elektromobilität 2016

<sup>2</sup> Endenergie bezieht sich auf den direkt im Verkehr genutzten Teil der Energie, ohne Betrachtung der Vorkette.

<sup>3</sup> Vgl. Bundesministerium für Umwelt et al. 2016, S. 49

<sup>4</sup> Vgl. Bundesministerium für Umwelt et al. 2015, S. 27

<sup>5</sup> Gegenüber 1990 sollen bis 2020 die Treibhausgasemissionen um 40 % reduziert werden, bis 2030 um mindestens 55 % und bis 2040 um mindestens 70 %

und Ladeinfrastruktur plan- und beherrschbar. Durch die hohen Laufleistungen, die ein Vielfaches der Emissionsreduktion im Vergleich zum Pkw erlauben, kann die Elektrifizierung des öffentlichen Personennahverkehrs einen hohen Beitrag zur Reduktion der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor leisten. Hinzu kommt die Vermeidung von lokalen Luftschadstoffen und Lärmemissionen.

Historisch gesehen, ist die Elektromobilität im ÖPNV kein Neuland. So beschreibt C.C. Chan den Aufschwung und den Fall der Elektrofahrzeuge im Zeitraum 1828 bis 1930.<sup>6</sup> Die Elektrifizierung des ÖPNV ist ebenfalls nicht neu, der erste Elektrobuss in Berlin für 26 Fahrgäste wurde im Mai 1898 erstmals vorgestellt und ging nach zwei Jahren Testbetrieb im März 1900 in den fahrplanmäßigen Probebetrieb. Leider wurde der Betrieb bereits zum Ende des Jahres infolge vielfältiger Störungen wieder eingestellt.<sup>7</sup> Ein Verwaltungsbericht des Königlichen Polizei-Präsidiums von Berlin – Abteilung Verkehrspolizei fasste die Erfahrungen wie folgt zusammen:

*Das Urteil über die im Berliner Verkehrsleben bisher erschienenen elektrischen Omnibusse muß also dahin zusammengefaßt werden, daß dieselben zwar schon recht aner kennenswerte Leistungen auf dem Gebiete der elektrischen Fahrzeuge darstellen, jedoch von dem wünschenswerten Grade von Vollkommenheit noch ziemlich weit entfernt und bei dem jetzigen Stande der Technik zur Durchführung eines fahrplanmäßigen Omnibusbetriebes noch nicht geeignet sind.*<sup>8</sup>

Mit der Entwicklung zuverlässiger Verbrennungsmotoren rückte der batteriebetriebene Elektrobuss für die nächsten Jahrzehnte in den Hintergrund. Mit der Ölkrise in den frühen 1970ern bekam das Thema einen weiteren Aufschwung. So stellte Mercedes Benz 1969 seinen ersten Elektro-Hybrid Bus OE302<sup>9</sup> und MAN 1970 seinen ersten elektrischen Stadtbus mit Batterie-Anhänger vor<sup>10</sup>. Weitere Konzeptideen wurden von G. Hoffman bereits 1972 vorgestellt<sup>11</sup>.

Mit den im Klimaschutzabkommen von Paris definierten Zielen und Diskussionen zu Fahrverboten von Dieselfahrzeugen in stark belasteten Städten zur Reduktion der Stickoxidwerte<sup>12</sup> rückt das Thema Elektromobilität wieder in den Vordergrund. Mit Hilfe von Förderprogrammen wurden weltweit zahlreiche Pilot- und Demonstrationsprojekte initiiert, um die Praxistauglichkeit und Potentiale verschiedenster Systemlösungen zu testen.<sup>13</sup> Erste Förderprojekte sind bereits beendet (z.B. E-Bus Berlin), Erfahrungen der

---

<sup>6</sup> Vgl. Chan 2013

<sup>7</sup> Vgl. Aschenbrenner 1898

<sup>8</sup> Aschenbrenner 1898, S. 4

<sup>9</sup> Vgl. Ebeling 2015

<sup>10</sup> Vgl. W.D.R. 1970

<sup>11</sup> Vgl. Hoffman 1972

<sup>12</sup> Im Frühjahr 2018 entschied das Bundesverwaltungsgericht, dass Fahrverbote für Dieselfahrzeuge in Städten mit überschrittenen Stickoxidgrenzwerten rechtlich zulässig sind und dass die Kommunen über Ausmaß der Fahrverbote entscheiden müssen, vgl. rbb24 - Rundfunk Berlin-Brandenburg 2018

<sup>13</sup> Vgl. ZeEUS 2017

Projektpartner und Ergebnisse der Begleitforschung des Projektes können im jeweiligen Abschlussbericht nachgelesen werden.<sup>14</sup>

Trotz vieler initiiertes Hybrid- und Elektrobus-Projekte in Deutschland und Europa ist die gesammelte Praxiserfahrung noch gering und die Betreiber stehen weiterhin vor der Problematik die Potentiale einzelner Technologien im Zusammenwirken mit anderen unter Berücksichtigung der gegebenen Randbedingungen zu bewerten. Dies spiegelt sich vor allem in der breiten Vielfalt der im Einsatz befindlichen Fahrzeuge wider.<sup>15</sup>

Mit der Elektrifizierung treten dabei Herausforderungen auf, die vorher eine sekundäre Bedeutung hatten. Klimatisierung und Beheizung von Elektrobussen im öffentlichen Stadtverkehr können unter Extrembedingungen 50 % des Gesamtenergiebedarfs ausmachen.<sup>16</sup> Die fehlende Abwärme des Motors und das regelmäßige Öffnen der Türen erschweren die Situation. Die benötigte Energie muss durch den Energiespeicher bereitgestellt werden und führt zu Abstrichen in der Reichweite oder Behaglichkeit. Die Wahl der Ladestrategie hat dabei maßgeblichen Einfluss auf das Buskonzept, da Größe und Kapazität des verbauten Speichers stark hiervon abhängen. Die Eigenschaften verschiedener Batterietypen und Ladetechnologien haben ebenfalls Einfluss auf das Gewicht und damit den Traktionsenergieverbrauch, die mögliche Ladezeit und damit auch Einfluss auf den Betriebsablauf.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass vor dem Hintergrund des Klimawandels und der zunehmenden Verknappung fossiler Energieträger zunehmende Anstrengungen unternommen werden um dem entgegenzuwirken. Die Elektrifizierung des öffentlichen Personennahverkehrs spielt dabei eine entscheidende Rolle.

## 1.1 Ziel der Arbeit

Vor dem Hintergrund der dargestellten Problemstellung soll im Rahmen der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit eine Methodik zur technischen Bewertung der Technologiealternativen von Systemkonzepten für die Elektrifizierung von Stadtbussen erarbeitet werden. Die Interdependenz der fahrzeug- und infrastrukturseitigen Teilsysteme unter den jeweiligen klimatischen und betreiberspezifischen Rahmenbedingungen erfordert im ersten Schritt die Analyse der relevanten Systemeigenschaften. Denn für eine fundierte Entscheidung müssen die Ausprägungen der wichtigsten Merkmale der zur Auswahl stehenden Alternativen analysiert werden, erst dann ist eine nachvollziehbare Bewertung möglich.<sup>17</sup> Die Technologiebewertung bildet dabei die Ausgangsbasis für eine Technologieentscheidung, die bei der Erstellung einer Technologie-Roadmap getroffen wird.<sup>18</sup>

---

<sup>14</sup> Ergebnisse deutscher Projekte können in Faltenbacher et al. 2016 nachgelesen werden.

<sup>15</sup> Vgl. ZeEUS 2017 und Kunith 2017, S. 53–58

<sup>16</sup> Vgl. Faltenbacher et al. 2016, S. 47

<sup>17</sup> Vgl. Lindemann (2007), S. 155

<sup>18</sup> Vgl. Spangenberg 2014, S. 33

Diese Arbeit zielt daher unter Berücksichtigung einer ganzheitlichen Betrachtungsweise auf die Entwicklung einer praxisrelevanten Methodik zur Bewertung der verschiedenen Systemkonzepte für die Elektrifizierung von Stadtbussen.

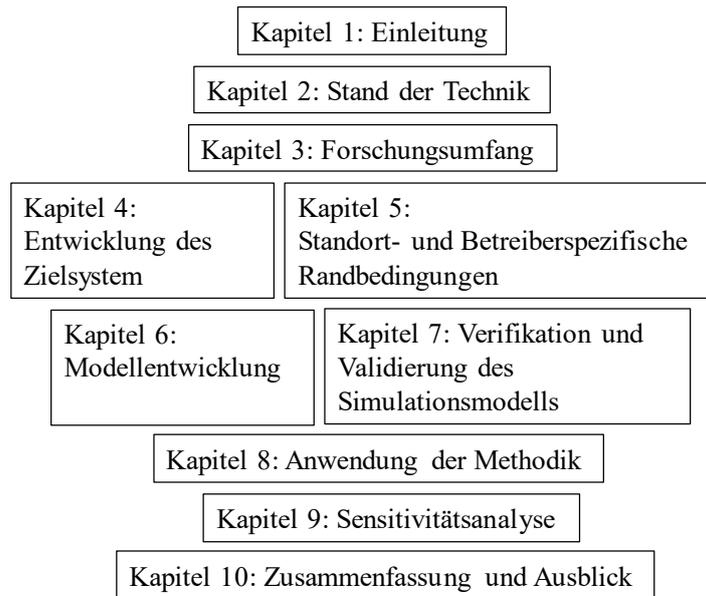
Die Ermittlung der Systemeigenschaften erfolgt mittels Eigenschaftsanalyse basierend auf einem teilvalidierten Simulationsmodell und berücksichtigt die standort- und betreiberspezifischen Anforderungen wie klimatische Gegebenheiten, individuelle Fahrprofile der Buslinien sowie deren geplante Umläufe.

Des Weiteren werden im Rahmen dieser Dissertation Produkteigenschaften identifiziert, die einen starken Einfluss auf die Systemeigenschaften haben.

Die Anwender dieser Methodik sind in erster Linie Auftragnehmer, die sich auf eine Ausschreibung eines Busbetreibers bewerben. Durch Anwendung dieser Methodik wird der Auftragnehmer im Entwicklungsprozess unterstützt das eigene Produkt mit den Zielwerten des Kunden (Busbetreibers) abzugleichen und entsprechende Entwicklungsziele abzuleiten. Des Weiteren können Teile dieser Methodik vom Busbetreiber genutzt werden um den Planungs- und Entscheidungsprozess zu unterstützen.

## 1.2 Struktur der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist eine anwendungsorientierte Arbeit und gliedert sich in acht Kapitel (vgl. Abbildung 1). Nachdem im **ersten Kapitel** einleitend die Hintergründe, Motivation und Zielstellung der Dissertation erläutert wurden, erfolgt im **2. Kapitel** die Beschreibung des Stands der Technik. Diese umfasst im ersten Teil eine Übersicht zu umgesetzten elektrischen Buskonzepten und im zweiten Teil die Erläuterung der technischen Grundlagen einzelner Teilsysteme. Im dritten Teil werden die methodischen Grundlagen zur Technikbewertung aufgearbeitet. In **Kapitel 3** wird der Forschungsumfang spezifiziert. Es erfolgt die Ableitung des Forschungsbedarfs, die Aufstellung der Forschungsfragen und die Abgrenzung der Arbeit. In **Kapitel 4** wird der erste Teil der Methodik bearbeitet und die Entwicklung des Zielsystems beschrieben. In **Kapitel 5** erfolgt die Beschreibung der standort- und betreiberspezifischen Randbedingungen. Diese umfassen die Fahrzyklen, die Betriebsbedingungen und die Klimadaten. Die Entwicklung und Validierung des Simulationsmodells wird in **Kapitel 6** und **Kapitel 7** beschrieben. In **Kapitel 8** wird die entwickelte Methodik angewendet. In **Kapitel 9** erfolgt eine Sensitivitätsanalyse um den Einfluss verschiedener Randbedingungen aufzuzeigen. Die wesentlichen Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Dissertation werden in **Kapitel 10** abschließend zusammengefasst und ein Ausblick zu weiterführenden Arbeiten wird gegeben.



**Abbildung 1: Aufbau der Arbeit**

## 2. Stand der Technik und Wissenschaft

Das vorliegende Kapitel unterteilt sich in drei Unterkapitel. Im ersten Teil wird ein Überblick zu innovativen elektrischen Buskonzepten mit einem besonderen Fokus auf den europäischen und chinesischen Markt gegeben. Der zweite Teil befasst sich mit den für die Arbeit erforderlichen Grundlagen zu den Teilsystemen im Elektrobuss, wobei auch auf aktuelle Forschungsarbeiten verwiesen wird. Im letzten Abschnitt werden die methodischen Grundlagen zur Technikbewertung aufgearbeitet.

### 2.1 Übersicht zu elektrischen Buskonzepten

Mit Hilfe von Förderprogrammen wurden weltweit zahlreiche Pilot- und Demonstrationsprojekte initiiert, um die Praxistauglichkeit und Potentiale verschiedenster Systemlösungen zu testen. Nach IEA - International Energy Agency 2017 bestand die weltweite Elektrobussflotte im Jahr 2016 aus rund 345.000 Fahrzeugen, doppelt so viele wie im Jahr 2015. China ist dabei führend, etwa 343.500 Elektrobusse fahren auf chinesischen Straßen, darunter etwa 300.000 reine Batteriebusse. Die europäische Elektrobussflotte konnte 1.273 Fahrzeuge im globalen Busbestand ausweisen.

Seit Ende 2017 hat die chinesische Stadt Shenzhen mit dem dort ansässigen und global agierenden Elektrofahrzeughersteller BYD seine gesamte Busflotte umgestellt. Mit nunmehr 16.359 Elektrobussen ist Shenzhen's Nahverkehrssystem globaler Spitzenreiter. In Europa stellen aktuell Großbritannien, die Niederlande, Frankreich und Polen den größten Anteil an E-Bussen.<sup>19</sup>

Während in deutschen Städten bisher eher kleinere Projekte umgesetzt wurden<sup>20</sup>, verfolgen London und Paris den ambitionierten Plan ihre gesamte Busflotte zu elektrifizieren. So möchte London bis 2019 die Doppeldeckerflotte und bis 2020 die innerstädtische Eindeckerflotte auf vollelektrifizierte Fahrzeuge umstellen, das entspricht einem Fahrzeugbestand von 3.400 Fahrzeugen. Der Pariser Verkehrsbetrieb RATP hat angekündigt die gesamte konventionelle Dieselbusflotte von 4.500 Fahrzeugen bis 2025 durch 80 % Hybrid- und vollelektrifizierte Fahrzeuge sowie 20 % Biogasbusse zu ersetzen.<sup>21</sup>

Hybridkonzepte mit hohen Reichweiten bei überschaubaren Mehrkosten sind als Übergangslösung zu sehen und werden in dieser Arbeit nicht betrachtet.<sup>22</sup> Positive Entwicklungen im Batteriesegment lassen steigende Energiedichten (höhere Reichweiten und

---

<sup>19</sup> Vgl. eMobilServer 2018

<sup>20</sup> In Deutschland beträgt der Bestand an Elektro- und Hybridbussen Anfang 2018 respektive 183 und 362 Fahrzeuge. Der Elektrobussbestand stieg damit um +8,9 % und der Hybridbusbestand um 13,8 %, vgl. Kraftfahrt-Bundesamt 2018, S. 29

<sup>21</sup> Vgl. weiterführende Informationen zu Umsetzungsmaßnahmen für London und Paris können den jeweiligen Strategiepapieren entnommen werden. Siehe hierzu u. a. RATP – Régie autonome des transports Parisiens (2015) und TfL - Transport for London (2015).

<sup>22</sup> Vgl. auch AG Innovative Antriebe Bus 2015, S. 4

kleinere Batterien) und sinkende Kosten (sinkende Gesamtkosten) erwarten, sodass sich langfristig reine Elektrofahrzeuge durchsetzen werden. Zudem ergeben sich bei der Konzeptauslegung durch die Möglichkeit des Entfalls von Schaltgetriebe und Anfahrkupplung sowie durch eine erheblich kompaktere E-Maschine im Vergleich zum Verbrennungsmotor neue Freiheitsgrade. Ein lokal emissionsfreier Betrieb kann über einen Brennstoffzellenbus bzw. einen Batteriebus realisiert werden (siehe Abbildung 2).

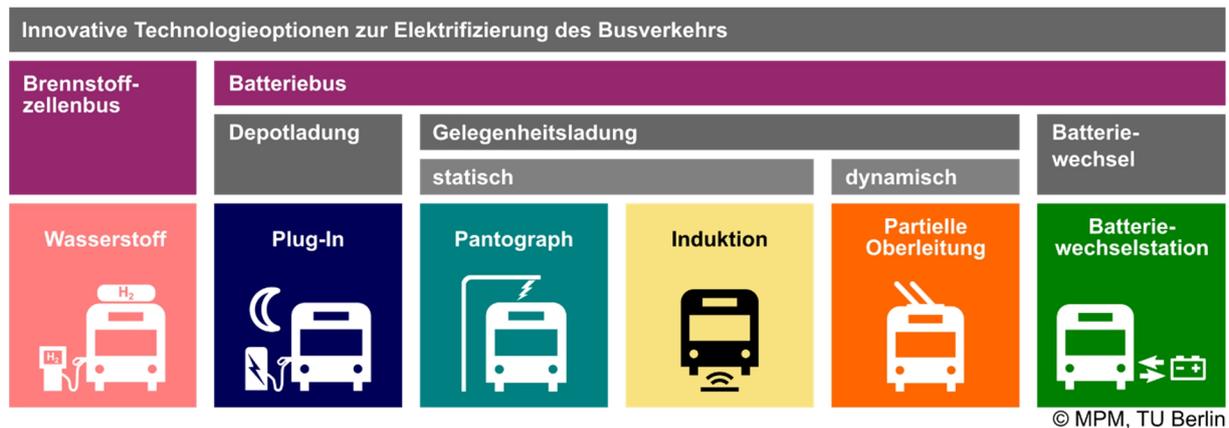


Abbildung 2: Innovative elektrische Bussysteme im ÖPNV<sup>23</sup>

Im Folgenden werden die Konzepte kurz vorgestellt.

### 2.1.1 Brennstoffzellenbus

Bei dieser Technologie wird die Energie i.d.R. in Form von flüssigem oder gasförmigem Wasserstoff im Bus mitgeführt. Die chemische Energie wird mit Hilfe einer Brennstoffzelle in elektrische Energie umgewandelt und bereitgestellt. In der Regel verfügen Brennstoffzellenbusse auch über eine kleine Hochleistungsbatterie<sup>24</sup>, die das Speichern von Energie aus Rekuperation ermöglicht. Das Betriebsverhalten eines Brennstoffzellenbusses ähnelt einem konventionellen Dieselbus. Ausreichend Energie kann in einem Tank oder Metallhydrid-Speicher mitgeführt werden und das Nachtanken an einer Wasserstofftankstelle ist in wenigen Minuten möglich. Die Substitution eines konventionellen Busses durch einen Brennstoffzellenbus hat auf den Betrieb somit wenig Auswirkung. Der Einsatz von Brennstoffzellenbussen geht jedoch mit hohen Kosten einher. Die Anschaffungskosten liegen im Jahr 2018 im JIVE2 Förderprojekt immer noch bei 625.000€ und werden für 2020 auf etwa 450.000€ geschätzt.<sup>25</sup> Hinzu kommt die vergleichsweise geringe Lebensdauer der Brennstoffzellen von rund 15.000<sup>26</sup> Betriebsstunden.

<sup>23</sup> Darstellung des MPM Fachgebiets

<sup>24</sup> Beispiel H<sub>2</sub>Bus Rhein-Main: Brennstoffzellen-Hybridbus mit einer 24 kWh LTO-Batterie, vgl. kommunalwirtschaft.eu 2016

<sup>25</sup> Vgl. Conrad 2018, Folie 13

<sup>26</sup> Vgl. FCH JU 2017

den. Dies entspricht je nach Einsatzprofil 3 bis 4 Jahren und bedingt drei bis vier Wechsel über die Lebensdauer eines Busses.<sup>27</sup> Des Weiteren hat der Brennstoffzellenbus einen schlechteren Antriebswirkungsgrad, bei gleichem Energiebedarf auf der Strecke verbraucht der Brennstoffzellenbus mehr Energie.<sup>28</sup> Das spiegelt sich in den energiebezogenen Betriebskosten wider ( $H_2 = 0,53 \text{ US\$/km}$  und  $\text{Strom} = 0,15 \text{ US\$/km}$ )<sup>29</sup>.

## 2.1.2 Batteriebus

Anders als beim Brennstoffzellenbus wird die Energie in einem Batteriebus in einem elektrochemischen Speicher, der Batterie, mitgeführt. Es sind kein zusätzlicher Tank oder andere Peripheriegeräte wie Pumpen, Entfeuchter, etc. notwendig. Der VDV<sup>30</sup> unterscheidet verschiedene Betriebskonzepte allgemein in Bezug auf die Ladeleistung, die in Tabelle 1 aufgeführt sind, weiterhin wird in der Betriebsstrategie zwischen Depotladung (Depot Charging) und Gelegenheitsladung (Opportunity Charging) unterschieden.<sup>31</sup>

**Tabelle 1: Betriebskonzepte in Bezug auf die Ladeleistung (nach VDV Schrift 260)**

Ladeformen	Leistung [kW]	Ladezeit [min]
Langsamladung	< 100	> 30
Schnellladung	100 – 300	1 – 30
Ultraschnellladung	> 300	< 1, oft < 0,5

### Depotladung

Das Betriebskonzept Depotladung beschreibt die Nachladung des batteriebetriebenen Busses bei längeren Betriebspausen im Depot. In der Regel geschieht dies über Nacht beim Abstellen der Busse, sodass die Depotladung auch Übernachtsladung (Overnight Charging) genannt wird. Die Nachladung im Depot erfolgt in der Regel speicherschonend per Langsamladung an einer Ladesäule mit einem Stecker, der manuell angebracht wird. Dieses Konzept erfordert eine höhere Speicherkapazität, da mit einer Ladung möglichst ein gesamter Betriebstag absolviert werden soll. Aktuell sind in 12 m Bussen bereits Speicherkapazitäten größer 300 kWh<sup>32</sup> möglich. Im Betrieb können bis zu 90 % der mitgeführten Energie genutzt und ohne elektrische Heizung eine Reichweite von etwa 200 bis 300 km erreicht werden. Unter Verwendung einer elektrischen Heizung

<sup>27</sup> Annahme: Lebensdauer eines Busses beträgt 12 Jahre.

<sup>28</sup> Typische Fahrzeug-Wirkungsgrade („Tank-to-Wheel“): Brennstoffzellen-Elektroantrieb 40-50%, Batterie-Elektroantrieb: 70-80%

<sup>29</sup> Vgl. Mahmoud et al. 2016, Tabelle 7

<sup>30</sup> VDV steht für Verband Deutscher Verkehrsunternehmen. Seine Mitglieder umfassen 600 Unternehmen des öffentlichen Personenverkehrs und des Schienengüterverkehrs.

<sup>31</sup> VDV Schrift 260, S. 11

<sup>32</sup> Beispiele: BYD K9 345 kWh, Alstom Aptis 346 kWh, Ebusco 2.1 HV 311 kWh, vgl. ZeEUS 2017

kann die Reichweite deutlich unter 200 km fallen. Dieses Konzept wird vom Bushersteller BYD verfolgt und ist beispielsweise in Shenzhen, China, und Nottingham<sup>33</sup> im Einsatz.

## **Gelegenheitsladung**

Das Betriebskonzept Gelegenheitsladung umfasst alle Ladekonzepte, die während des Betriebs eine Nachladung vorsehen. Dabei kann zwischen dynamischer Nachladung an partiellen Oberleitungen und stationärer Nachladung an planmäßigen Haltepunkten (z.B. Endhaltestellen und Knotenpunkte mit höherer Standzeit) unterschieden werden. Bei der **Gelegenheitsladung mit dynamischer Nachladung** fährt der Bus unter einer zweipoligen Oberleitung und greift eine Leistung von bis zu 700 kW über zwei Stromabnehmer ab.<sup>34</sup> In Deutschland sind Oberleitungsbusse heute in nur drei Städten zu finden: Solingen, Esslingen und Eberswalde. In Städten mit vorhandenem Oberleitungsnetz wird der Einsatz von Hybrid-Oberleitungsbussen untersucht. So startete das Solinger Projekt "Mit dem Batterie-Oberleitungs-Bus (BOB) und der intelligenten Ladeinfrastruktur zum emissionsfreien ÖPNV" im März 2017 mit einem Förderbescheid des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Das auf fünf Jahre ausgelegte Projekt soll u.a. in einer Machbarkeitsstudie untersuchen wie das gesamte Liniennetz wirtschaftlich und effizient elektrisch zu befahren ist ohne Vergrößerung der vorhandenen Kapazitäten des Oberleitungsnetzes. Die Batterie-Oberleitungs-Busse werden während der Fahrt aufgeladen und können so besonders sensible Strecken (z. B. bei denkmalgeschützten Gebäuden) oder teure bzw. wartungsintensive (z. B. Kreuzungs-) Bereiche ohne Oberleitung überbrücken.<sup>35</sup>

Dieses Betriebskonzept erfordert ohne vorhandene Oberleitungen hohe Infrastrukturinvestitionen und ist städtebaulich schwierig durchzusetzen.<sup>36</sup> Neben den baurechtlichen Aspekten spielt auch die politische und gesellschaftliche Akzeptanz bei einer Neuerichtung eine Rolle.

Die **Gelegenheitsladung mit stationärer Nachladung** sieht das Nachladen an Endhaltestellen und/oder ausgewiesenen Zwischenstationen vor. Durch die begrenzte Haltezeit an den Haltestellen erfolgt die Nachladung mittels Schnellladung oder Ultraschnellladung. Das häufige Aufladen erlaubt einen Ganztagesbetrieb mit theoretisch unbegrenzter Reichweite, jedoch sind die Fahrzeuge an die Infrastruktur entlang der Linie gebunden und können nicht wie die Busse mit Depotladung flexibel eingesetzt werden. Die Gelegenheitsladung erlaubt auch eine geringere Speicherkapazität im Fahrzeug mitzu-

---

<sup>33</sup> vgl. ZeEUS 2017

<sup>34</sup> Vgl. Mitschke und Wallentowitz 2014, S. 96

<sup>35</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) 2017, S. 34–35

<sup>36</sup> Vgl. Kurpjuweit 2015

führen. Zusätzlich zu der Ladeinfrastruktur auf der Linie ist Ladeinfrastruktur im Betriebshof erforderlich, um die Batterien während der Pausenzeit zu balancieren<sup>37</sup> und den Bus vorkonditionieren<sup>38</sup> zu können.

Die stationäre Nachladung kann konduktiv manuell über eine Steckerverbindung oder konduktiv automatisch über bspw. einen Stromabnehmer erfolgen. Des Weiteren ist eine kontaktlose Übertragung mittels elektromagnetischer Induktion möglich. Die konduktive manuelle Nachladung erfordert einen erhöhten Personaleinsatz und ist nach Wissen der Autorin nur in China umgesetzt.<sup>39</sup> Eine Kostenabschätzung des Personalbedarfs fand in Göhlich et al. 2014 für einen angenommenen Einsatz in Deutschland statt. Die überhöhten Kosten stehen in keinem Verhältnis zu den Vorteilen im Vergleich zu den anderen Möglichkeiten. Daher wird dieses Energieübertragungssystem in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Details zu den Energieübertragungssystemen finden sich in Kapitel 2.2.2.

## **Batteriewechsel**

Bei diesem Konzept wird die entladene Batterie in einer Batteriewechselstation in wenigen Minuten gegen eine aufgeladene Batterie ausgetauscht und in der Wechselstation schonend geladen. Durch die kurze Wechselzeit und die schonende Nachladung sind Vorteile der Gelegenheits- und der Depotladung vereint, jedoch erfordert dieses Konzept einen entsprechenden Platzbedarf für die Wechselstation und eine Anzahl an vorgehaltenen Batterien. Umgesetzte Bus-Projekte finden sich in China, Korea und demnächst auch in Indien. In China sind bereits seit 2008 mehrere Batteriewechselstationen im Betrieb. Die seitlich im Fahrzeug platzierten Batterien werden mit Hilfe von Robotern innerhalb weniger Minuten ausgetauscht.<sup>40</sup> In Korea verfolgt die Firma begins ein Konzept mit Wechselbatterien im Dach. Seit Juni 2015 sind begins Wechselstationen auf der Insel Jeju in Betrieb.<sup>41</sup> In Indien hat die Firma Ashok Leyland in Zusammenarbeit mit Sun Mobility auf der Auto Expo 2018 India den Circuit S Bus vorgestellt.<sup>42</sup> Ähnlich wie in China sind die Batteriepacks seitlich im Fahrzeug platziert und werden mit Hilfe eines Roboters in wenigen Minuten ausgetauscht. Auch wenn Batteriewechselsysteme in Europa bisher keinen Absatz haben, so ist die Technologie, insbesondere

---

<sup>37</sup> Der Ladezustand einzelner in Reihe geschalteter Batteriezellen wird aneinander angeglichen.

<sup>38</sup> Der Elektrobuss wird vor dem Einsatz auf der Linie auf Betriebstemperatur gebracht.

<sup>39</sup> In Chongqing und Foshan werden Elektrobusse per Plug mit bis zu 380 kW aufgeladen vgl. ITS Center 2016 und Higer Bus 2015

<sup>40</sup> Eine Wechselstation der Firma Dianba für 120 Busse wurde zur Shanghai Expo 2010 errichtet. Auf einer Fläche von 4295 m<sup>2</sup> können die Batterien von 8 Bussen gleichzeitig innerhalb von 8 min. gewechselt werden. Neuere Generationen z.B. 2015 in Zhongshan benötigen für 120 Busse nur noch 441 m<sup>2</sup> Fläche und 4 min. für einen Wechsel. Informationen wurden aus einem Firmenvideo von Dianba (Stand Sept. 2015) extrahiert.

<sup>41</sup> Das Förderprojekt endete im Februar 2017. Die Busse sind weiter im Betrieb. Vgl. Wee 2017

<sup>42</sup> Vgl. Shyam 2018

in Verbindung mit Smart Grid Anwendungen interessant. Aufgrund des hohen Platzbedarfs wird die Wechselstation, wenn sie in Europa eingesetzt werden würde, eher im Depot oder einer größeren Betriebshaltestelle integriert sein statt an einer Endhaltestelle. Eine Betriebshaltestelle ist eine Haltestelle, an der die Fahrer mit ihren Bussen auf den nächsten Einsatz warten. Das heißt, dass dieser Bereich nach Beendigung des Linienbetriebs aufgesucht wird. Die Betriebshaltestelle Hertzallee z.B. steht in der Berliner Innenstadt und bietet einen Pausenplatz für 13 Tages- und 4 Nachtlinien.

### 2.1.3 Europäischer Markt für Elektrobusse

Es gibt diverse elektrische Buskonzepte, die in ihrer Umsetzung auf verschiedene Technologien zurückgreifen. Eine Auswertung europaweiter Demonstrationsvorhaben im Jahr 2016 zeigte ein stärkeres Interesse am Gelegenheitsladen (fast Zweidrittel).<sup>43</sup> Abbildung 3 zeigt die Auswertung von 980 sich im Einsatz befindlichen Elektrobussen in Europa im Jahr 2017 nach verwendetem Konzept. Mehrheitlich sind Batteriebusse (70 %) im Betrieb, davon sind 56 % Depotlader und 44 % Gelegenheitslader.

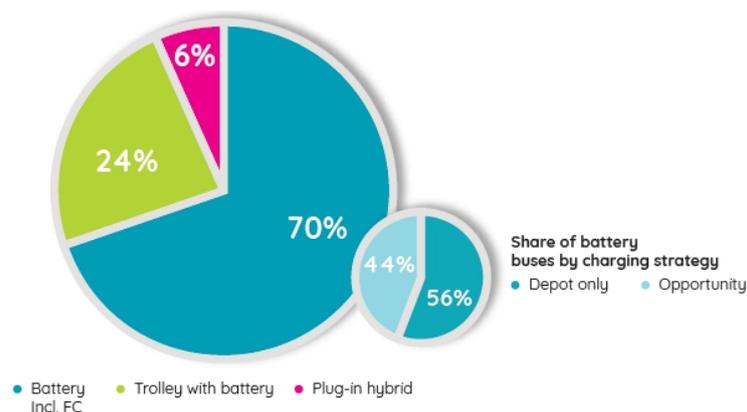


Abbildung 3: Elektrobuskonzepte in Europa 2017<sup>44</sup>

Abbildung 4 spiegelt die Bestellungen im Jahr 2017 nach einer Studie von Herrn Baguette in Europa wider. So wurden im Jahr 2017 europaweit 1246 Elektrobusse bestellt, darunter etwa 84 % reine Batteriebusse und überwiegend 12-13 m und 18-19 m Busse.

<sup>43</sup> Vgl. Kunith 2017, S. 57

<sup>44</sup> ZeEUS 2017, S. 10

## European electric bus orders in 2017

sales and tests ≥1 year; including Turkey & Israel, without CIS countries



Abbildung 4: Europaweite Elektrobusbestellungen im Jahr 2017<sup>45</sup>

Die Auswertung der Hybrid- und Batteriebusse zeigt, dass der europäische Markt für Elektrobusse wächst. Von den im Jahr 2017 bestellten 1146 Bussen sind 40 % Depotlader und 60 % Gelegenheitslader. Anders als bei der Fahrzeuglänge ist bezüglich der Ladetechnologie keine klare Präferenz zwischen Depotladern und Gelegenheitsladern erkennbar.

### 2.1.4 Chinesischer Markt für Elektrobusse

Die Verkaufszahlen von Batteriebussen in China sind in Abbildung 5 für die Jahre 2011 bis 2017 gezeigt. Im Vergleich zu Europa liegen die Verkaufszahlen in China deutlich höher, jedoch ist im Jahr 2017 ein Rückgang der Verkaufszahlen von etwa 20% zu erkennen.

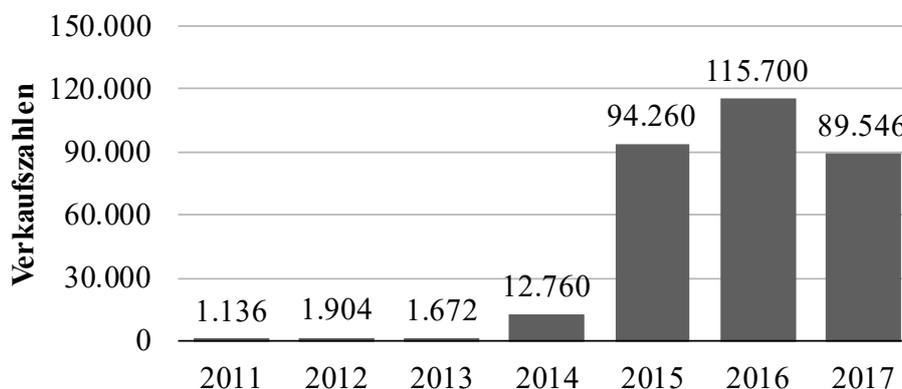


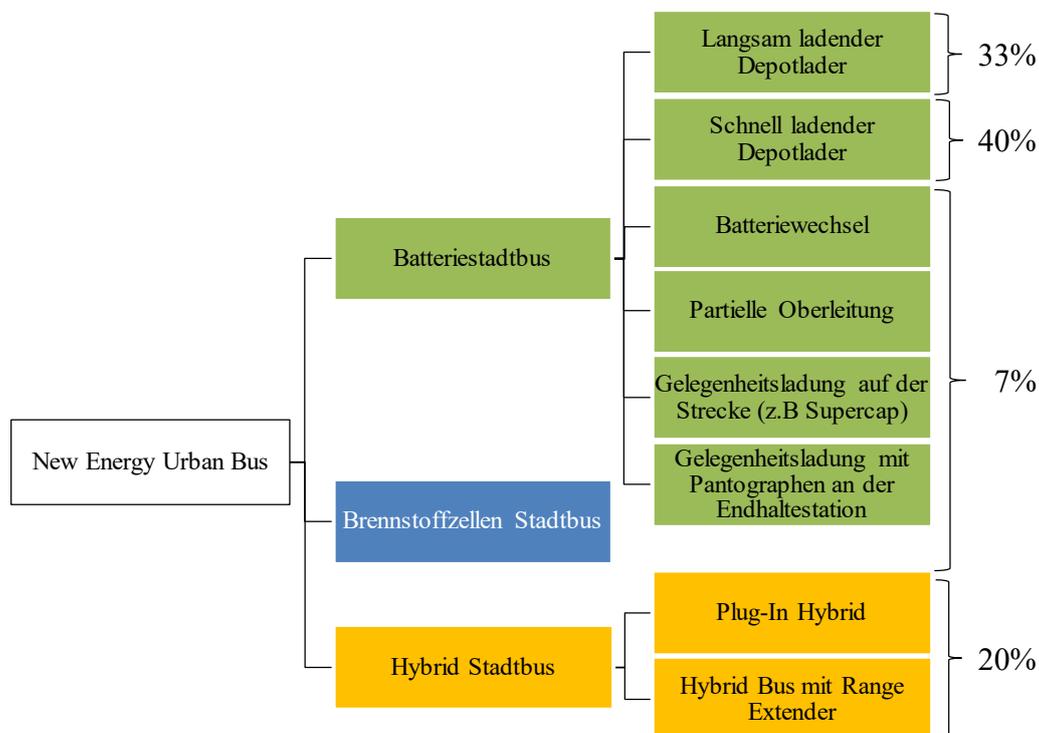
Abbildung 5: Verkaufszahlen elektrisch betriebener Busse in China<sup>46</sup>

<sup>45</sup> Baguette 2018

<sup>46</sup> Vgl. Dixon 2018 und EV Sales 2017

Der Rückgang der Verkaufszahlen im Jahr 2017 hängt eng mit der Reduzierung und Deckelung sowie der verschärften Regulierung der Fördergelder durch die Zentralregierung zusammen. So wurde bis 2016 für die verschiedenen Fahrzeuglängen die Fördersumme über die Parameter Energieeffizienz und elektrische Reichweite bestimmt. Seit 2017 gibt es an diese Parameter eine Minimalanforderung und die Parameter Laderate (für schnell ladende Busse) bzw. Energiedichte der Batterie (für langsam ladende Busse) werden als Korrekturfaktoren eingesetzt. Zusätzlich wurde je Fahrzeuglänge eine Obergrenze für die Fördersumme festgelegt.<sup>47</sup>

Eine Auswertung der Beschaffungszahlen von Bussen mit alternativem Antrieb in China Ende 2017 nach Technologie zeigt Abbildung 6. Die Abbildung verdeutlicht den Trend der Beschaffung von reinen Batteriebussen. Dies lässt sich ebenfalls durch die Förderpolitik erklären, denn für Batteriebusse erhalten Busbetreiber im Vergleich zum Hybridbus die doppelte Fördersumme.<sup>48</sup> Es zeigt sich auch, dass unter den Batteriebussen das Konzept Depotlader am häufigsten umgesetzt ist.



**Abbildung 6: Beschaffung chinesischer Busse mit alternativem Antrieb nach Technologie<sup>49</sup>**

Die Gründe für Chinas Vorreiterrolle sind vielfältig und sollen am Beispiel der Stadt Shenzhen näher untersucht werden. Im Jahr 2009 wurde von der chinesischen Regierung

<sup>47</sup> Vgl. Cui 2017, Tabelle 4 und Tabelle 5, vgl. auch Retzer et al. 2018, Kapitel 4.

Die Tabellen 4 und 5 zur Berechnung der Fördersummen und ein Rechenbeispiel können dem Anhang A0 entnommen werden.

<sup>48</sup> Sun 2018

<sup>49</sup> Vgl. Sun 2018, Figure 3, Stand Ende 2017, Übersetzung und Präzisierung der Technologie durch die Autorin nach Rücksprache mit dem Autor des Artikels.

das Programm „Ten cities, 1000 vehicles“<sup>50</sup> initiiert, um die Entwicklung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben in China voranzubringen. Mit dem Programm wurden vorwiegend gewerbliche Flotten gefördert. Zu den ersten Pilotstädten gehörten u.a. Peking, Shanghai und Shenzhen. Im Jahr 2010 wurde die Stadt Shenzhen vom Verkehrsministerium zusätzlich zur „Busstadt“<sup>51</sup> ernannt, seitdem wird das Verkehrsnetz kontinuierlich verbessert und vergrößert sowie das Angebot des öffentlichen Nahverkehrs gesteigert (siehe Abbildung 7). Von 2008 bis 2016 ist das Verkehrsliniennetz um mehr als 9000 km und die Anzahl der Busse um mehr als 4400 Einheiten gewachsen.

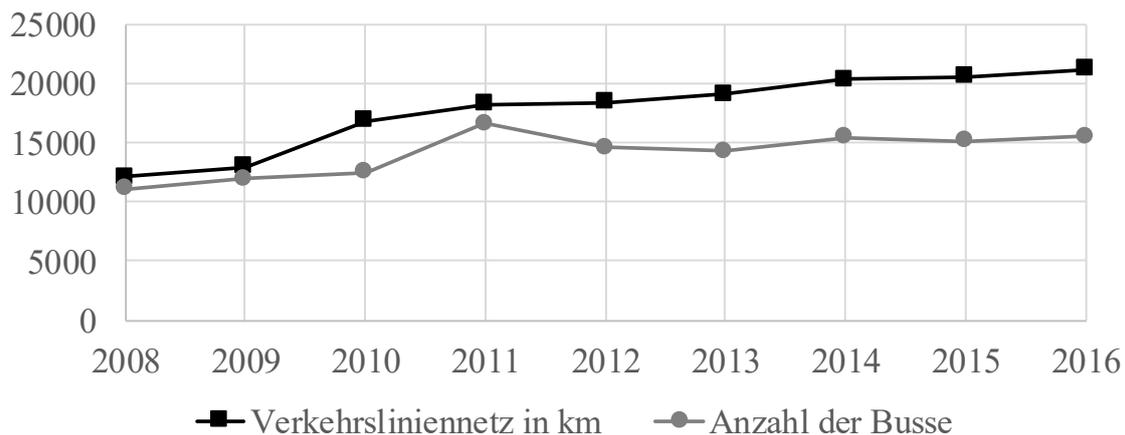


Abbildung 7: Verkehrsentwicklung in Shenzhen von 2008 bis 2016<sup>52</sup>

Durch große Veranstaltungen wie die Sommer-Universiade 2011 wurden weitere Anschaffungen forciert.<sup>53</sup> Zur Steigerung der Elektrobussbeschaffungen wurde im Jahr 2015 von der Lokalregierung eine Mindestquote eingeführt. Mindestens 70 % der Neubeschaffungen mussten Elektrobusse sein. So konnte Ende 2016 verkündet werden, dass mehr als 90 % der Flotte bereits elektrisch ist und Ende 2017 erfolgte die komplette Umstellung der Flotte.<sup>54</sup>

Am Beispiel von Shenzhen wird aufgezeigt wie der Weg hin zu einer elektrischen Flotte aussehen kann. Durch die zahlreichen Förderprogramme konnten die Anschaffungskosten unter den von konventionellen Bussen liegen, da Fördergelder auf Zentralregierungsebene und in gleicher Höhe auf Provinzebene verteilt wurden.<sup>55</sup> Von Vorteil war auch, dass Shenzhens Infrastruktur mit der Elektrifizierung ausgebaut werden konnte

<sup>50</sup> Chinesisch: 十成千辆, mit diesem Programm wurde der Kauf von Elektrobussen sowohl von der Zentralregierung als auch von den Provinzen subventioniert. Dies führte dazu, dass der Kauf eines Elektrobusses teilweise günstiger wurde als der Kauf eines Dieselmotors. vgl. World Bank und PRTM Management Consultants 2011

<sup>51</sup> Im chinesischen „公交都市“ genannt, ist eine politisch forcierte strategische Ausrichtung der Stadtentwicklung. In solchen Städten wird der Ausbau des öffentlichen Personennahverkehrs gefördert und vorangetrieben um dem wachsenden Verkehrsaufkommen zu begegnen.

<sup>52</sup> Vgl. Shenzhen Urban Transport Planning Center 2017, S.80ff

<sup>53</sup> Zur Universiade 2011 wurden 2011 Elektrobusse lanciert

<sup>54</sup> Vgl. <http://www.xchuxing.com> 2017

<sup>55</sup> Sun 2018

und somit weniger Konflikte mit vorhandener Infrastruktur vorlagen. Jedoch werden die Verbreitung der Elektromobilität stark von lokalem Protektionismus begleitet. So fahren in Shenzhen 100 % reine Batteriebusse des dort ansässigen Busherstellers BYD.

Der lokale Protektionismus kann so weit gehen, dass Provinzregierungen Busherstellern aus anderen Provinzen den Zutritt zum Markt erst dann gewähren, wenn vor Ort ein Produktionswerk oder ein bestimmter Anteil Zukaufteile von lokalen Herstellern verbaut ist. Es gibt auch Lokalregierungen, die ihre Subventionspolitik sowie technische Normenvorgaben an lokalen Herstellern von Elektrofahrzeugen ausrichten, sodass technische Normen in manchen Provinzen sogar von staatlichen Vorgaben abweichen können.<sup>56</sup> Dies führt dazu, dass die Qualität der Fahrzeuge je Region und vorhandener Industrie von unterschiedlicher Güte ist. Eine Auswertung der realen täglichen Fahrleistung je Fahrzeug über alle Provinzen Chinas ergab, dass die Elektrobusse im Jahr 2017 durchschnittlich 119 km/Tag fahren. Das Minimum des Durchschnitts lag bei etwa 70 km/Tag in Peking und das Maximum bei etwa 160 km/Tag in Guangdong (Provinz in der die Stadt Shenzhen ist). 2016 lag der Schnitt in China noch bei 97 km/Tag.<sup>57</sup>

## 2.2 Teilsysteme im Batteriebus

Zur Unterstützung des methodischen Technologievergleichs von Systemkonzepten ist es wichtig, die Teilsysteme und ihre Wechselwirkungen zu kennen um ihren entsprechenden Einfluss auf die zu erreichenden Ziele zu verstehen. Die Konversion vom Diesel zum Elektrobus geschieht nicht nur durch das Umrüsten, Hinzufügen oder Weglassen einzelner Komponenten oder Teilsysteme. Vielmehr gibt es für jede Systemkomponente Entwicklungs- und Forschungsbedarf. Entsprechend entstehen für die verschiedenen Systemkomponenten unterschiedliche innovative Lösungen, die erst im Zusammenwirken das Gesamtsystem E-Bus darstellen.

Das Produkt wird in seiner Gesamtheit in einer Produktstruktur beschrieben und kann je nach Detaillierungsstufe mehrere Ebenen umfassen. Je nach eingesetzter Technologie und konstruktiver Umsetzung kann die Produktstruktur differieren. So ist beispielsweise bei einem Zentralantrieb ein Differential erforderlich, während radnahe Motoren gegebenenfalls mit einem Untersetzungsgetriebe arbeiten. Dies muss bei der Detaillierung der Produktstruktur berücksichtigt werden.

Die in Tabelle 2 gezeigte Produktstruktur wurde mit Hilfe der VDV Schriften 230 und 230/1 *Rahmenempfehlungen für konventionelle und elektrisch betriebene Stadt-Niederflur-Linienbusse* hergeleitet.

---

<sup>56</sup> Felizeter 2016

<sup>57</sup> Vgl. Liu 2018

**Tabelle 2: Produktstruktur eines elektrisch betriebenen Linienbusses<sup>58</sup>**

Teilsystem	Baugruppe/Komponente	
Gesamtfahrzeug	<b>Diagnosesystem</b>	<b>Schutzwiderstand</b>
<b>Antriebssystem</b>	<b>Elektromotor</b> <b>Energiespeicher</b>	<b>Antriebswechselrichter</b> <b>Getriebe</b>
Fahrwerk	Achsen <b>Bremsanlage</b> Räder/Reifen	Federung Lenkung
Fahrzeugaufbau	<b>Bodenrahmen</b> <b>Aufbau</b> Türen	Einstieghilfen Außenbeleuchtung
Innenausstattung	Bestuhlung Haltestangen, Haltewunschtaster Innenverkleidung Innenbeleuchtung Fußboden	Sondernutzungsfläche Dachvouten Piktogramme Fahrgastzählsysteme
Fahrer Arbeitsplatz	Fahrersitz <b>Anzeige</b> <b>Bedienelemente</b>	Sicherheitseinrichtungen Geräteträger für Kasse, RBL Fahrscheindrucker, und EKS <sup>59</sup>
<b>Klimatisierungssystem</b>	<b>Klimaanlage</b> <b>Heizanlage</b>	Gebläse
Informationseinrichtung	Fahrgastinformation/-bedienung	Betriebsleitsystem
Versorgungsanlage	Betriebsstoffe Druckluft	Lenkhilfe Schmierung
Bordnetz	Bordnetzspeicher <b>Bordnetzwandler</b>	Serielle Datensysteme Video-Überwachung
<b>Externes Energieübertragungssystem</b>	<b>fahrzeugseitiges Ladesystem</b> <b>wegseitige Infrastruktur</b>	<b>Erkennungsmodul (Kommunikation zur Ladefreigabe)</b>

In der VDV Schrift 230 werden unter dem Kapitel *elektrische Anlage* aufgrund des höheren Stellenwerts weitere Empfehlungen gegeben. In der VDV Schrift 230/1 sind die Ausführungen zu der Hochvolttechnik in einem separaten Kapitel ausgeführt, um die Komplexität übersichtlicher darstellen zu können.<sup>60</sup> In dieser Arbeit wurden die Komponenten der elektrischen Anlage und der Hochvolttechnik entsprechend aufgeteilt, z.B. wurden Antrieb und Energiespeicher dem Antriebssystem zugeteilt.

<sup>58</sup> Vgl. VDV-Schrift 230; VDV-Schrift 230/1; Teilsysteme, Baugruppen und Komponenten in Fettschrift sind im Vergleich zum konventionellen Linienbus hinzugekommen oder unterlagen einer wesentlichen Veränderung.

<sup>59</sup> RBL = rechnergesteuertes Betriebsleitsystem, EKS = Elektronische Einstiegskontrolle

<sup>60</sup> Vgl. VDV-Schrift 230/1, S. 9

Die Produktstruktur des batterieelektrischen Busses unterscheidet sich im Wesentlichen in drei Teilsystemen vom konventionellen Bus. Das Antriebssystem umfasst die Antriebsstrangkomponenten wie den Elektromotor, der als Traktionsmotor und als elektrische Bremse (generatorischer Betrieb) eingesetzt wird, den Energiespeicher, den Wechselrichter und das Getriebe sowie deren Anordnung. Das Klimatisierungssystem umfasst die Klimatisierung mit eigenem elektrischen Antrieb und die Heizung, die nunmehr ohne Abwärme des Verbrennungsmotors einen viel höheren Energieverbrauch verursacht. Das neu hinzugekommene Energiezuführungssystem beinhaltet das wegseitige und fahrzeugseitige Ladesystem.

Im Folgenden soll auf diese Teilsysteme näher eingegangen werden. Je nach Stand der Technik sind ausgereifte oder innovative Lösungen vorhanden, die erst im Zusammenwirken das Gesamtsystem E-Bus darstellen. Im Folgenden werden diese Teilsysteme bezüglich ihres Stands der Technik beleuchtet und aktuelle Forschungsgebiete vorgestellt.

### **2.2.1 Antriebssystem**

Das Antriebssystem umfasst die Antriebsstrangkomponenten (Energiespeicher, Wechselrichter, elektrische Maschine, Getriebe) und ihre Anordnung. Im Busbereich sind verschiedene Antriebssysteme denkbar mit Zentralmotor, radnahen Motoren und Untersetzungsgetriebe oder Radnabenmotoren. Im Folgenden werden die Antriebsstrangkomponenten näher betrachtet und deren Alternativen für batterieelektrische Busse aufgezeigt.

#### **Elektrische Maschine**

Die elektrische Maschine wandelt für den Antrieb des Elektrobusses elektrische Energie in Kinetische. Bei der Rekuperation wird wiederum die kinetische Energie während des Bremsvorgangs von der elektrischen Maschine umgewandelt und dem elektrischen Energiespeicher zugeführt. Dadurch wird ein Teil der Energie wieder genutzt und geht nicht wie beim konventionellen Bremsen in Form von Wärme verloren. Die Anforderungen an eine elektrische Maschine unterscheiden sich je nachdem, ob der Motor in einem Hybrid- oder batterieelektrischen Fahrzeug eingesetzt wird<sup>61</sup>. Im Antriebssystem von Elektrofahrzeugen kommen sowohl Asynchronmaschinen, permanenterregte und stromerregte Synchronmaschinen sowie geschaltete Reluktanzmaschinen zum Einsatz<sup>62</sup>. Eine Auswertung des ZeEUS eBus Reports<sup>63</sup> ergab, dass 20 von 26 Elektrobusan-

---

<sup>61</sup> Vgl. Finken 2011, hier wurden die Anforderungen an die Motortypen je nach Betrieb verglichen

<sup>62</sup> Vgl. Neudorfer 2016

<sup>63</sup> Vgl. ZeEUS Project 2016

biertern Zentralmotoren mit Asynchron- oder permanenterregter Synchronmaschine anbieten. Aufgrund des Wunsches der durchgängigen Niederflrigkeit werden auch Elektroportalachsen mit zwei elektrischen Maschinen umgesetzt.<sup>64</sup>

Die mechanische Leistung  $P_{\text{Motor}}$  einer elektrischen Maschine berechnet sich aus dem Drehmoment  $M_{\text{Motor}}$  und der Drehzahl  $n_{\text{Motor}}$  wie folgt:

$$P_{\text{Motor}} = 2\pi \cdot M_{\text{Motor}} \cdot n_{\text{Motor}}$$

Das Drehmoment wird in der elektrischen Maschine erzeugt. Es hängt allgemein quadratisch vom Durchmesser des Rotors  $d_{\text{Rotor}}$ , linear von der aktiven Rotorlänge  $l$  (Länge des Rotors im magnetischen Feld) und dem Ausnutzungsfaktor  $C$  ab:

$$M_{\text{Motor}} = \frac{1}{2\pi} C d_{\text{Rotor}}^2 l$$

Mit beiden Gleichungen wird verständlich, warum die elektrischen Maschinen bei hohen Drehzahlen betrieben werden sollten. Bei gleicher Leistung, gleichem Ausnutzungsfaktor und Verdopplung der Drehzahl kann das aktive Volumen der elektrischen Maschine halbiert werden. Dies bedeutet jedoch auch, dass zwei 50 kW Motoren schwerer sind als ein 100 kW Motor: Die aktive Länge des Rotors wird halbiert, die Gesamtlänge des Rotors nicht und damit ist das Gewicht von zwei kleineren Motoren durch die passive Rotorlänge und das Gehäuse größer.<sup>65</sup> Des Weiteren ist für jeden Motor ein Umrichter erforderlich. Das macht die mehrmotorigen Systeme schwerer, teurer und komplexer. Jedoch sind die kleineren Motoren näher an den Rädern unterzubringen und unterstützen so die Niederflurtechnik im Bus. Zusätzlich kann die Fahrdynamik durch die Beeinflussung der einzelnen Antriebsräder verbessert werden.<sup>66</sup>

Zwei gängige Motortypen in Elektrobussen sind die permanenterregte Synchron- (PSM) und die Asynchronmaschine (ASM). Abbildung 8 zeigt typische Wirkungsgradkennfelder dieser Motortypen mit Wechselrichter. Im Nennpunkt ist der Wirkungsgrad der PSM 2 % Punkte höher.

---

<sup>64</sup> Vgl. ZF Friedrichshafen AG, ZF Elektroportalachse mit zwei radnahen Asynchronmaschinen und Untersetzungsgetriebe ( $i = 22,66$ )

<sup>65</sup> Vgl. Datenblätter HVH410-075 (BorgWarner Inc. 2016a) und HVH410-150 (BorgWarner Inc. 2016b), die Aktivlänge beträgt jeweils 75 mm bzw. 150 mm, die Gesamtlänge des Motors ist 202,76 mm bzw. 277,76 mm

<sup>66</sup> Vgl. Zhang und Goehlich 2016

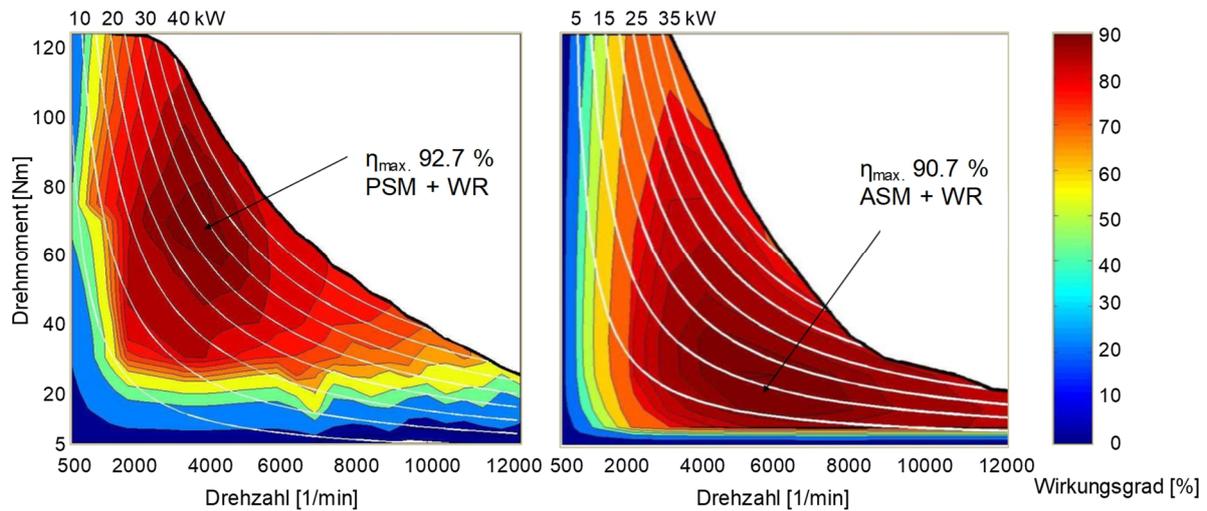


Abbildung 8: Typische Wirkungsgradkennfelder von Synchron- und Asynchronmaschinen<sup>67</sup>

Ein Vergleich der Kennfelder zeigt, dass die Verluste in einer Synchronmaschine in den meisten Betriebspunkten geringer sind. Dies liegt vor allem daran, dass bei der Asynchronmaschine das magnetische Feld aufgebaut werden muss und durch die Rotorwicklungen zusätzliche ohmsche Verluste entstehen. Bei niedriger Belastung und hoher Drehzahl kehrt sich das Verhältnis um, da bei hohen Drehzahlen in einer PSM hohe Ströme zur Feldschwächung benötigt werden und die induzierte Polradspannung, welche linear von der Drehzahl abhängt, steigt.<sup>68</sup>

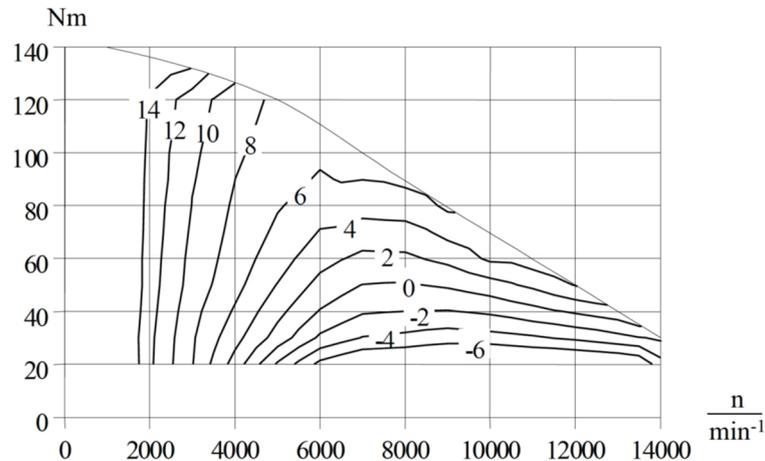


Abbildung 9: Differenz der Wirkungsgrade  $\eta_{PSM} - \eta_{ASM}$ <sup>69</sup>

Im Individualverkehr wird eine PSM wegen ihrer höheren Leistungsdichte bevorzugt<sup>70</sup>, Asynchronmotoren sind aus der Bahntechnik bekannt und haben im Schadensfall ein geringeres Risiko, da sie nicht über ein permanentes Magnetfeld verfügen. Im Schadensfall kann der Erregerstrom und damit das Erregerfeld abgeschaltet werden und es

<sup>67</sup> Vgl. Neudorfer 2016

<sup>68</sup> Vgl. Schäfer 2015, Kapitel 3 Elektrische Antriebsmotoren

<sup>69</sup> Schäfer 2015

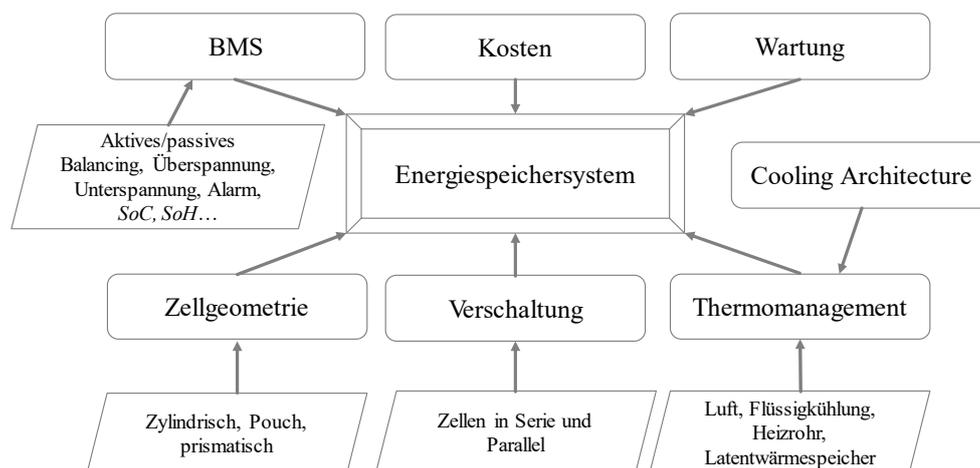
<sup>70</sup> Vgl. Kreim 2015 und Grune 2013

wird keine Spannung in der Maschine induziert. Die hohe Leistungsdichte der PSM ermöglicht eine kompakte Bauweise, jedoch führt der Einsatz von Magneten zu vergleichsweise hohen Kosten und die Kühlung der Magnete muss gewährleistet sein. Obwohl elektrische Maschinen im Vergleich zu anderen Komponenten des Antriebsstrangs weit entwickelt sind und z.B. in der Bahn- und Straßenbahntechnik zum Einsatz kommen, streben Komponentenentwickler nach noch besseren Wirkungsgraden, höheren Leistungsdichten und geringeren Kosten. So befasst sich die Dissertation von Johannes Zerbe mit innovativen Wickeltechnologien für Statorspulen.<sup>71</sup> Andere Autoren forschten nach einer Wirkungsgradoptimierten Regelstrategie für Reluktanzmaschinen bzw. einer Regelstrategie für mehrmotorige Antriebssysteme zur Erhöhung der Fahrstabilität und Verringerung des Energieverbrauchs und untersuchten EMV-Wechselwirkungen zwischen dem Antriebsbordnetz und dem 12 V Bordnetz.<sup>72</sup>

## Energiespeicher

Energiespeicher können nach dem genutzten physikalischen Effekt geordnet werden. Eine umfangreiche Übersicht findet sich in Sterner und Stadler (2014). Im ÖPNV sind vier genutzte physikalische Effekte bekannt: i) mechanisch, ii) elektrisch, iii) chemisch und iv) elektrochemisch.

In dieser Dissertation werden wie bereits in Kapitel 2.1.3 erläutert reine Batteriebusse untersucht. Der Energiespeicher Batterie speichert die Energie elektrochemisch. Bei der Integration des passenden Speichers in ein Elektrofahrzeug sind Faktoren wie Zellgeometrie, Verschaltung, Thermomanagement, Batteriemanagementsystem (BMS), Kosten und Wartung, zu beachten. Diese sind in Abbildung 10 zusammengefasst.



**Abbildung 10: Zu berücksichtigende Aspekte bei der Integration von Batteriezellen in ein Energiespeichersystem eines Elektrofahrzeugs<sup>73</sup>**

<sup>71</sup> Vgl. Zerbe 2018

<sup>72</sup> Vgl. Tetsuya Kojima 2018, Zhang 2017, Hu 2017, Jeschke 2016

<sup>73</sup> Eigene Darstellung nach Saw et al. 2016

Ein vorherrschendes Argument gegen die Elektromobilität ist die vergleichsweise geringe Energiedichte, welche im Individualverkehr für eine Reichweitenbeschränkung sorgt. Beim Einsatz im Personennahverkehr ist die Strecke bekannt und der Energieverbrauch kann bestimmt werden, sodass die Batterie entsprechend dem Betriebskonzept<sup>74</sup> ausgelegt wird.

Im Busbereich kommen zurzeit folgende lithiumbasierte Speichertypen zum Einsatz: Lithium-Eisen-Phosphat (LFP oder  $\text{LiFePO}_4$ ), Lithium-Nickel-Manganese-Cobalt-Oxyd (NMC) und Lithium-Titan-Oxyd (LTO). Diese unterscheiden sich in ihren Eigenschaften und sind in Tabelle 3 gegenübergestellt.

**Tabelle 3: Vergleich der Merkmalsausprägung von LFP, LTO und NMC Pouch Zellen<sup>75</sup>**

Merkmal	LFP	NMC	LTO
Nennspannung [V]	≈ 3.2	≈ 3.6	≈ 2.3
Nennkapazität [Ah]	14...45	37...53	20...65
Gravimetrische Energiedichte [Wh/kg]	115...146	165...175	63...77
C-Rate [C]	1	2... 3	4...10
Zyklenfestigkeit (DoD 100 %)	3.000	1.000...5.000	10.000...20.000
Temperaturbereich Laden [°C]	0...45	0...45	-30...60
Temperaturbereich Entladen [°C]	-30...55	-30...60	-40...60

Die angegebene Zyklenfestigkeit entspricht der Lebensdauer einer Batterie und wird in der Regel bei 20-25°C und für Vollzyklen (DoD = Depth of Discharge 100 %) ermittelt. In den in Tabelle 3 angegebenen Temperaturbereichen sind die Batterien funktionsfähig, jedoch ist mit einer erheblich geringeren Zyklenfestigkeit bzw. Nennkapazität zu rechnen, wenn die Batterie nicht in ihrem Komfortbereich betrieben wird. So werden beispielsweise im Datenblatt der LTO-Zelle von Altair Nanotechnologies 16.000 Vollzyklen bei 25°C und nur noch 4.000 Vollzyklen bei 55°C angegeben. Aus dem Datenblatt der LFP-Batterie von European Batteries ist zu lesen, dass die Entladung der Zelle bei -30°C im Vergleich zu 20°C eine Kapazität von etwa 45% aufweist.

Die unterschiedlichen Eigenschaften der Batterietypen müssen bei der Auslegung der Batterie und des Gesamtsystems berücksichtigt werden. Die Energiedichte beeinflusst den Energieverbrauch auf der Strecke, da sie das Gesamtgewicht des Busses beeinflusst. Die C-Rate der Batterie gibt abhängig von der Nennkapazität an wie viel Strom pro Zeit von der Batterie aufgenommen werden kann, das hat Auswirkungen auf die Rekuperationsfähigkeit des Busses, die effektive Ladeleistung und Ladedauer des Gesamtsystems. Eine C-Rate von 1 C bedeutet, dass die Batterie nach einer Stunde aufgeladen ist. Damit wird eine 30 Ah Batterie bei 1 C mit 30 A geladen und eine 40 Ah Batterie mit 40 A. Daraus folgt auch, dass die 30 Ah Batterie mit 4 C und die 40 Ah Batterie mit 3 C

<sup>74</sup> Die Betriebskonzepte sind in Kapitel 2.1.2 beschrieben

<sup>75</sup> Vgl. folgende Datenblätter Kokam 2015, Leclanché 2016a, 2016b, Altair Nanotechnologies 2011, EIG 2016a, 2016b, European Batteries 2012

mit demselben Ladestrom von 120 A geladen werden. Ist die C-Rate durch die Technologie begrenzt, so kann zur Erhöhung der Ladeleistungsaufnahmefähigkeit die Anzahl der parallelen Zellen erhöht werden, da sich der Ladestrom auf die parallel verschalteten Zellen aufteilt. Die Zwischenkreisspannung des Systems ergibt die Anzahl der Zellen in Serie. Die maximale Zwischenkreisspannung ist begrenzt durch die verwendete Leistungselektronik. Sie wird in der Regel als Zwischenkreisnennspannung bei 50 % Ladezustand angegeben und schwankt mit dem Spannungsverhalten der Batterie.

Die Ausführungen zeigen die Komplexität der Auslegung. Hinzu kommt, dass das Gesamtgewicht limitiert ist. Ein konventioneller 12 m Standardbus hat nach EU Richtlinien ein zulässiges Gesamtgewicht von 19,5 t.<sup>76</sup> Das Leergewicht beträgt etwa 11,6 t und ergibt eine maximale Zuladung von 7,9 t. Damit ergibt sich eine maximale Beförderungskapazität von 115 Fahrgästen.<sup>77</sup> Durch das zusätzliche Batteriegewicht im Batteriebus erhöht sich das Leergewicht, das führt zu einem Konflikt zwischen Batterie- und Beförderungskapazität. Eine Auswertung der Fahrgastzahl nach Sitzplätzen und Stehfläche in einem 12 m Bus ergab, dass die angegebene maximale Anzahl an Fahrgästen eine Dichte von 10 Fahrgäste/m<sup>2</sup> Stehfläche voraussetzt. Dies ist im Realbetrieb nicht realistisch. Bei einer Dichte von 4 Fahrgäste/m<sup>2</sup>, bleibt für die Elektrifizierung ein maximales Zusatzgewicht von 3400 kg über.<sup>78</sup> Dies entspricht einem Leergewicht von 15 t. Die aktuelle Forschung im Bereich der Speichertechnologie befasst sich grundlegend mit dem Aufbau und der Struktur von Batteriezellen und ihren Komponenten sowie die Auswirkung bestimmter Parameter auf die Alterung<sup>79</sup>. Weiterer Gegenstand sind experimentelle und simulative Verfahren zur Bestimmung der Alterung.<sup>80</sup> Für die Alterung der Batterie spielen neben der Betriebstemperatur die Zyklentiefe, der mittlere SoC und die C-Rate eine Rolle.<sup>81</sup>

Außerdem befasst sich die aktuelle Forschung mit der Untersuchung von geeigneten Elektroden-Materialpaarungen, welche auf seltene und schlecht recyclebare Materialien verzichten. Dabei zeigen, wie in Abbildung 11 zu sehen, Materialpaarungen wie Eisen-Luft (Fe-Luft) und Lithium-Luft (Li-Luft) vielversprechende theoretische Energiedichten. Die praktische Energiedichte ist allerdings geringer (vgl. Tabelle 4).

---

<sup>76</sup> Vgl. European Union 2015

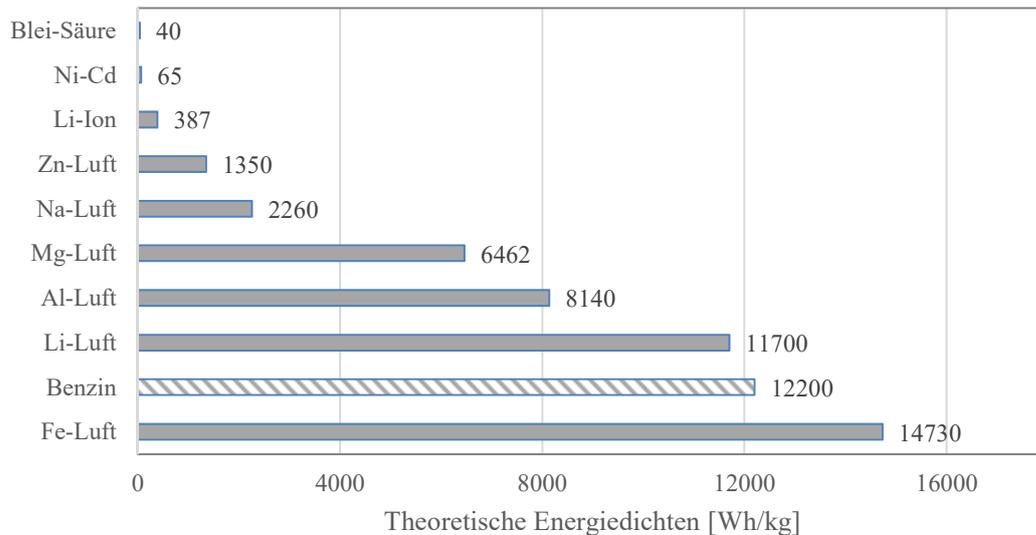
<sup>77</sup> Fahrgastgewicht 68 kg nach MAN Nutzfahrzeuge Gruppe 2008

<sup>78</sup> Vgl. Göhlich et al. 2018

<sup>79</sup> Vgl. folgende Dissertationen: Buchberger 2016, Eberle 2017, Keil 2017, Münnix 2017

<sup>80</sup> Vgl. folgende Dissertationen: Bauer 2017, Käbitz 2016, Schmalstieg 2017, Sun 2017

<sup>81</sup> Vgl. Schmalstieg et al. 2014; Herb 2010



**Abbildung 11: Theoretische Energiedichten verschiedener Batterien im Vergleich zu Benzin<sup>82</sup>**

Tabelle 4 vergleicht die Eigenschaften einer gängigen Lithium Ionen Batterie ( $\text{LiCoO}_2$ ) mit einer Lithium-Luft und einer Zink-Luft Batterie.

**Tabelle 4: Vergleich von Lithium-Luft, Zink-Luft mit gängigen Li-Ionen Speichern<sup>83</sup>**

Batterietyp	Lithium Ion	Lithium-Luft	Zink-Luft
Theoretische (praktische) gravimetrische Energiedichte [Wh/kg]	387 (150-280)	11700 (800)	1350 (400-800)
Theoretische (praktische) volumetrische Energiedichte [Wh/l]	570 (400)	6170	6091 (800-1400)
Geschätzte Kosten [US\$/kWh]	150-300	70-200	65-135
Anzahl Zyklen mit >80 % Restkapazität	500-1000	10-200	25 – 9.000+

Die Eigenschaften stellen laborwerte dar und sind je nach Materialanteil in Elektrode, Elektrolyt und Separator unterschiedlich. Je nach Quelle unterscheiden sich die Eigenschaften, so kann bei einer Zink-Luft Zelle die Anzahl der Zyklen bis zu einer Restkapazität von 80 % zwischen 25 und 9.000+ liegen.

Für weiterführende Informationen zu Entwicklungsperspektiven wird auf die Veröffentlichung „Energiespeicher-Roadmap (Update 2017)“ des Fraunhofer ISI<sup>84</sup> verwiesen. Sie gibt einen ausführlichen Überblick über das Potenzial einzelner Batterietechnologien und zeigt Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien auf.

<sup>82</sup> Eigene Darstellung nach Yu et al. 2017

<sup>83</sup> Für gravimetrische Energiedichte vgl. Yu et al. 2017, S. 30, für volumetrische Energiedichte vgl. Breitkopf und Swider-Lyons 2017, S. 483 und Imanishi et al. 2016, S. 4, für Kosten vgl. Gallagher et al. 2014 und Fu et al. 2017, S. 28 und für Zyklenfestigkeit vgl. Korthauer 2013, S. 178, Wilcke und Kim 2016, S. 46 und Fu et al. 2017, S. 13

<sup>84</sup> Thielmann et al. 2017

## Antriebswechselrichter

Der Wechselrichter ist das leistungselektronische Bindeglied zwischen dem Energiespeicher und der elektrischen Maschine. Er formt die Gleichspannung des Energiespeichers (des Zwischenkreises) über eine Pulsweitenmodulation in eine dreiphasige Wechselspannung mit variabler Amplitude und Frequenz zur Speisung der elektrischen Maschine um. Die Klemmen-Gleichspannung am Energiespeicher bestimmt dabei die maximale Drehspannungsamplitude am Ausgang des Wechselrichters. Die Stromtragfähigkeit der Leistungshalbleiter wiederum begrenzt den Umrichterstrom auf der Drehspannungsseite. Das Schalten der Halbleiterelemente im Wechselrichter ist verlustbehaftet. Typische Wirkungsgrade liegen abhängig von Last und Drehzahl bei 97% und mehr<sup>85</sup>. Ähnlich wie bei elektrischen Maschinen können die Verluste anhand von Wirkungsgradkennfeldern dargestellt werden.

Der Zweipunktwechselrichter (siehe Abbildung 12) ist die gängigste Ausführungsform<sup>86</sup> und besteht aus sechs IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistor) und sechs Dioden, davon jeweils zwei pro Wechselspannungsphase. Die IGBT-Module müssen für die maximal zu erwartende Leistung zuzüglich einer Sicherheit ausgelegt sein.

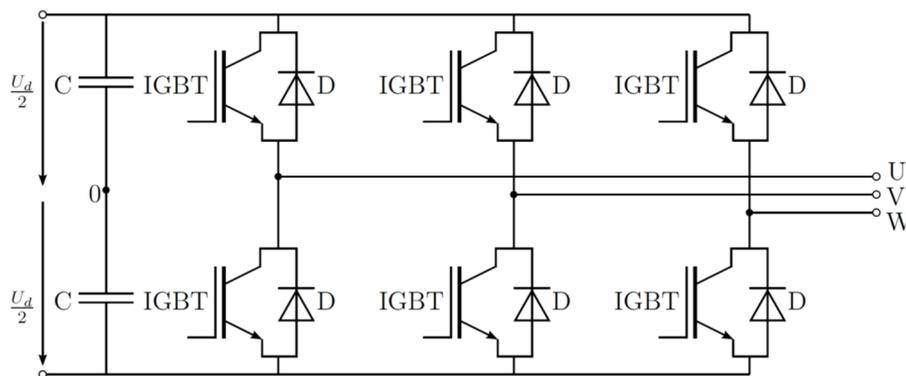


Abbildung 12: Zweipunktwechselrichter<sup>87</sup>

Das Interesse an der Leistungselektronik spiegelt sich in aktuellen Förderrichtlinien wieder. So werden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Förderrichtlinie „Kompakter und robuster Leistungselektronik der nächsten Generation“ 10 Projekte zu Innovationen in der Leistungselektronik auf Basis von neuen Halbleitermaterialien Siliziumcarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN), sowie in der höchstintegrierten siliziumbasierten Leistungselektronik gefördert. Mit den neuen Materialien sollen sich unter anderem höhere Schaltfrequenzen, höhere Arbeitstemperaturen und eine weitere Miniaturisierung realisieren lassen. Die Förderung erstreckt sich über drei Jahre, teilweise bis 2020.<sup>88</sup>

<sup>85</sup> Tschöke 2015, S. 38

<sup>86</sup> Vgl. Reupold 2014

<sup>87</sup> Reupold 2014, S. 73

<sup>88</sup> Vgl. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 2016

## Getriebe

Bei verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen sind aufgrund des eingeschränkten Drehzahlbereichs von Verbrennungskraftmaschinen Getriebe mit fünf bis acht Gängen (inkl. Rückwärtsgang) zwingend erforderlich. Elektrische Maschinen mit einem vergleichsweise großen Bereich konstanter Leistung können mit einfacheren Getrieben ohne Drehrichtungsumkehrfunktion kombiniert werden. Wie im Kapitel zu elektrischen Maschinen erläutert, können elektrische Maschinen mit einem Getriebe kleiner gebaut werden. In vielen Anwendungen genügt ein einzelner Gang.

Die Auslegung der Getriebeübersetzung  $i$  hängt vom Drehzahlbereich der elektrischen Maschine und der gewünschten Höchstgeschwindigkeit  $v_{\max}$  ab. Der Zusammenhang wird in folgender Gleichung gezeigt:

$$n_{\text{EM,max}} = n_{\text{Rad,max}} \cdot i = \frac{v_{\max}}{2\pi \cdot r_{\text{dyn}}} \cdot i$$

$n_{\text{EM,max}}$  ist die maximale Drehzahl des Motors,  $n_{\text{Rad,max}}$  ist die maximale Drehzahl am Rad und  $r_{\text{dyn}}$  ist der dynamische Reifenradius.

Für ein Fahrzeug mit 150 km/h Höchstgeschwindigkeit, einem dynamischen Reifendurchmesser von 0,33 m und einem Motor wie in Abbildung 8 mit einer maximalen Drehzahl von 12.000  $\text{min}^{-1}$  ergibt sich eine Übersetzung von  $i \approx 10$ . Diese hohe Übersetzung lässt sich mit einem Planetenradgetriebe oder mit einem zweistufigen Stirnradgetriebe realisieren. Der Wirkungsgrad liegt bei etwa 98 %.<sup>89</sup>

In Hybridfahrzeugen spielen insbesondere Planetenradgetriebe eine Rolle, da mit ihnen eine Leistungsverzweigung umgesetzt wird. Wie in Kapitel 2.1 bereits erwähnt, wird in dieser Arbeit der Hybridbus als Übergangslösung betrachtet und daher nicht weiter untersucht. Für weiterführende Informationen zu Getrieben in Hybridfahrzeugen sei auf die Literatur verwiesen.<sup>90</sup>

### 2.2.2 Externes Energieübertragungssystem

Wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, können verschiedene Betriebsstrategien für Batteriebusse definiert werden. Die erforderlichen Energieübertragungssysteme zu den Betriebsstrategien werden nach der Art des Energietransports in konduktive und induktive Systeme bzw. Batteriewechsel unterschieden und bestehen aus einer fahrzeugseitigen und wegseitigen Komponente.

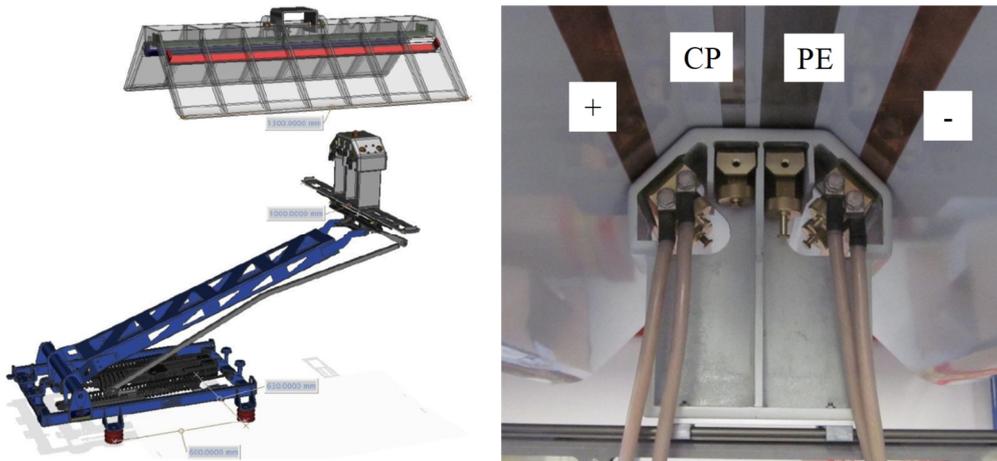
Die **konduktive** Energieübertragung benötigt einen physikalischen, Metall-Metall Kontakt zwischen dem Fahrzeug und der Ladestation. Dies kann mit einem Stecker realisiert werden, welcher manuell in das Fahrzeug gesteckt wird oder mit einem Stromabnehmer/

---

<sup>89</sup> Naunheimer et al. 2007, Tabelle 2.12

<sup>90</sup> Vgl. Klement 2017

Pantograph (vgl. Abbildung 13), welcher automatisch an die Ladestation andockt. Sobald der Bus sich unter der Ladestation positioniert hat, wird der Stromabnehmer automatisch ausgefahren und dockt selbstständig in der Dachhaube der Ladestation an.



**Abbildung 13: Pantograph mit Kontaktkopf und Kontaktierung in der Haube<sup>91</sup>**

Nach dem Ladeprozess wird der Stromabnehmer wieder eingefahren. Bei dieser Variante ist die aktive Komponente auf dem Dach des Busses untergebracht.

Alternativ gibt es invertierte Pantographen, siehe Abbildung 14, mit der aktiven Komponente in der Ladestation. Auf dem Dach des Busses befinden sich die passiven Gegenstücke.



**Abbildung 14: Invertierter Pantograph der Firma Schunk<sup>92</sup>**

Die Gestaltung und Positionierung des Kontaktsystems müssen das notwendige Lichtraumprofil (siehe Abbildung 15) sowie Sicherheitsabstände zu anderen elektrischen Leitern beachten. Dies bedeutet, dass ein Lademast, welcher eine Kontaktierung

<sup>91</sup> Eigene Ergänzung basierend auf Weigel 2013, CP = Control Pin, PE = Schutzleiter

<sup>92</sup> Schunk Bahn und Industrietechnik GmbH 2018

über dem Bus vorsieht, eine Höhe von mind. 4,5 m aufweisen muss, sofern es im öffentlichen Straßenraum an allgemein befahrenen Straßen aufgestellt werden soll.

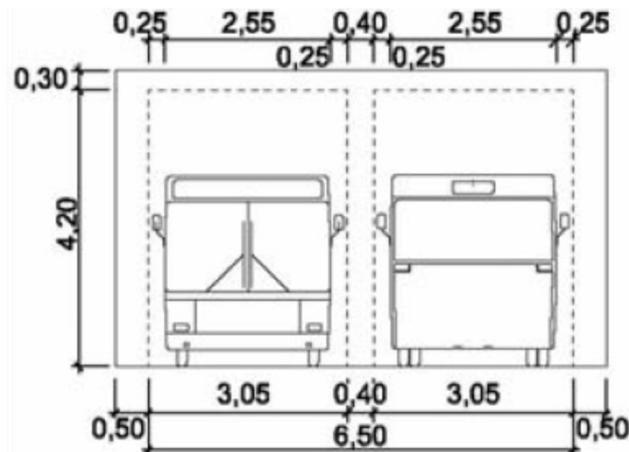


Abbildung 15: Freizuhaltenes Lichtraumprofil gemäß RAS 2006<sup>93</sup>

Weitere Lösungen sehen das Kontaktieren an der Seite des Fahrzeugs vor oder beinhalten die aktive Komponente im Unterboden des Busses (Alstom in Paris).

Die **induktive** Energieübertragung erfolgt berührungslos mithilfe von zwei Spulen, der Primär- und der Sekundärspule (Abbildung 16). Die Primärspule ist in der Regel im Boden unter der Haltestelle versenkt, während die Sekundärspule sich im Boden des Busses befindet. Nachdem der Fahrer den Bus korrekt positioniert hat, wird mit einer hochfrequenten Wechselspannung in der Primärspule ein Magnetfeld aufgebaut, welches durch die Sekundärspule geht und dort eine Wechselspannung induziert.

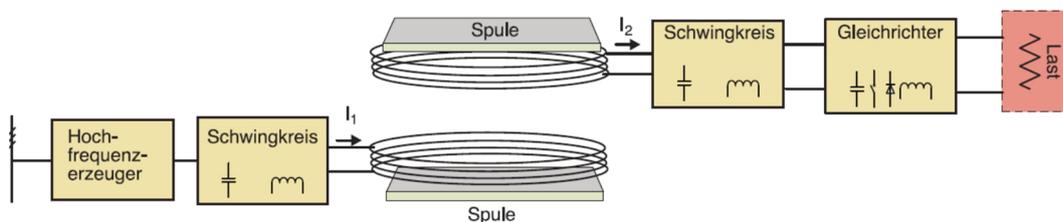


Abbildung 16: Blockdiagramm eines induktiven Ladesystems<sup>94</sup>

Zur Verstärkung/Verbesserung der Energieübertragung wird die Sekundärspule mit einem Schwingkreis gekoppelt, dessen Resonanzfrequenz der der Primärspule entspricht. Diese Energieübertragungstechnologie erfordert zusätzlich eine Versorgungs- und eine Kühleinheit. Die Versorgungseinheit ist unterirdisch verbaut und erfordert somit Tiefbauarbeiten. Die Umsetzung dieses Konzepts fand im E-Bus Berlin Projekt mit dem Partner Bombardier Transportation statt.

Beim **Batteriewechselsystem** erfolgt keine Energieübertragung im eigentlichen Sinne. Es werden entladene Batterien mittels Wechselroboter in Wechselstationen mit einer

<sup>93</sup> VDV Schrift 260, Abbildung 20

<sup>94</sup> Basierend auf Lukic und Pantic 2013, Figure 2

geladenen ausgetauscht. Die entladenen Batterien werden unabhängig vom Fahrzeugbetrieb mit idealer Ladeleistung und Temperatur geladen. So hängt die Ladezeit aus Sicht des Fahrzeugs lediglich von der Wechselzeit ab.

Abbildung 17 und Abbildung 18 zeigen umgesetzte Beispiele in Korea und China.

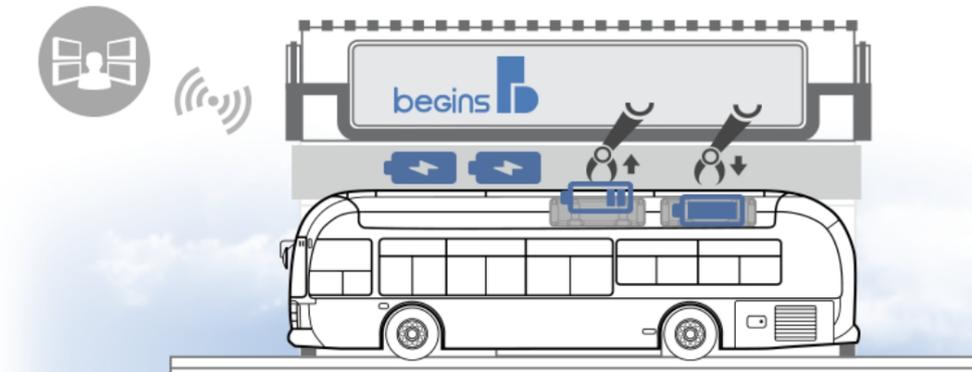


Abbildung 17: Koreanische Batterie-Wechselstation der Firma begins<sup>95</sup>



Abbildung 18: Batterie-Wechselstation in Peking<sup>96</sup>

Nachdem die verschiedenen Technologien der Energiezuführungssysteme vorgestellt wurden, werden die Technologien in folgender Tabelle gegenübergestellt. Sie unterscheiden sich in Gewicht, Ladeleistung, Übertragungswirkungsgrad und Totzeit<sup>97</sup>.

Tabelle 5: Eigenschaften umgesetzter Energieübertragungssysteme<sup>98</sup>

Energieübertragungssystem	Stecker	Pantograph	Invertierter Pantograph	Induktion	Batterie-wechsel
Geschätztes Gewicht im Fahrzeug [kg]	40	155	15	555	15
Ladeleistung [kW]	2 x 40	375	375	200	20
Übertragungswirkungsgrad [%]	98	95	95	90	98
Totzeit [s]	60	2	8	9	240

<sup>95</sup> BEGINS CO. LTD. 2018

<sup>96</sup> eigene Aufnahme

<sup>97</sup> Zeit vom Aktivieren des Ladevorgangs bis zum Verbinden der Schnittstelle sowie die Deaktivierung

<sup>98</sup> Ly et al. 2016, Göhlich et al. 2018

Die Vielfalt der Energieübertragungssysteme findet derzeit Einzug in die Standardisierungsaktivitäten. Parallel zum Pariser Klimaabkommen 2015 erließ die europäische Kommission im Mandat M/533 den Auftrag bis Ende 2019 einen gemeinsamen Standard für das Laden elektrischer Busse zu finden. Daraufhin wurde der DKE-Arbeitskreis 353.0.10 „Laden von Elektrobussen“ gegründet. Für das konduktive Laden werden im Normentwurf bereits 11 unterschiedliche Konzepte berücksichtigt.<sup>99</sup>

### 2.2.3 Klimatisierungssystem

Das Klimatisierungssystem im Fahrzeug umfasst das Thermomanagement der Fahrgastkabine und des Fahrerarbeitsplatzes und gehört mittlerweile zum Standard. Der Anteil mit Klimaanlage ausgestatteter Stadtbusse ist von 1993 bis 2013 von 5 % auf 69 % gestiegen.<sup>100</sup> Die Anforderungen an die Klimatisierung von Linienbussen sind in der VDV Schrift 236 zu finden und umfassen die Raumtemperatur, die Strömungsgeschwindigkeit, die Luftfeuchtigkeit, den Luftaustausch, die Luftreinheit, die Geräuschemissionen und die Wärmedämmung. Die Anforderungen gelten sowohl für konventionell als auch für elektrisch betriebene Linienbusse.<sup>101</sup>

Von der VDV wird empfohlen die Abwärme des Antriebssystems zu integrieren, wobei für die Energiespeicher eine separate Klimatisierung vorgeschlagen wird, um eine hinreichende Leistungsfähigkeit und Lebensdauer sicherzustellen.<sup>102</sup> Durch die fehlende Abwärme des Verbrennungsmotors, muss die Energie für das Heizen durch die Batterie bereitgestellt werden. Die Klimatisierung des Fahrgastraums ist neben dem Antriebssystem der größte Verbraucher und kann zu einer Reichweiteneinschränkung von bis zu 45 % führen.<sup>103</sup> Daher wird im Lastenheft gefordert, dass der Energiebedarf für den Fahrzeugeinsatz im Temperaturbereich -15 °C bis +40 °C in 5 K Schritten angegeben werden muss.<sup>104</sup>

Zur Klimatisierung elektrisch betriebener Busse werden Aufdach-Klimaanlagen, mit Kühl- und Heizfunktion, mit elektrisch angetriebenem Verdichter angeboten (siehe Abbildung 19).

---

<sup>99</sup> Vgl. Normentwurf E DIN EN 61851 Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge, insbesondere Teil 23-1 ist für Elektrobusse von Interesse.

<sup>100</sup> Vgl. Umweltbundesamt 2018

<sup>101</sup> Vgl. VDV-Schrift 236

<sup>102</sup> Vgl. VDV-Schrift 230/1, S. 20-21

<sup>103</sup> Vgl. Basile 2014, Faltenbacher et al. 2016, S. 47

<sup>104</sup> Vgl. VDV-Schrift 230/1, S. 12



Abbildung 19: Elektrische Aufdach-Klimaanlage Konvekta UL 500 EM<sup>105</sup>

Die Unabhängigkeit des Verdichters vom Antriebsmotor hat Vorteile für die Regelung der Kälteanlage. Da keine Kältemittelleitungen durch den Bus verlegt werden müssen, kann die Anlage außerdem hermetisch ausgeführt werden. Bei Wahl einer Anlage mit Heißwasseranschluss bedarf es eines Wasserkreislaufes mit Wärmequelle und Wasserpumpe. Als Wärmequelle für den Wasserkreislauf stehen PTC<sup>106</sup>-Hochvolt-Wasserheizungen zur Verfügung. Zusätzlich zur Aufdachanlage sorgen im Bodenbereich montierte Heizkörper (Umluftgebläse, Konvektoren) für eine Wärmeverteilung im Fahrgastraum (vgl. Abbildung 20).

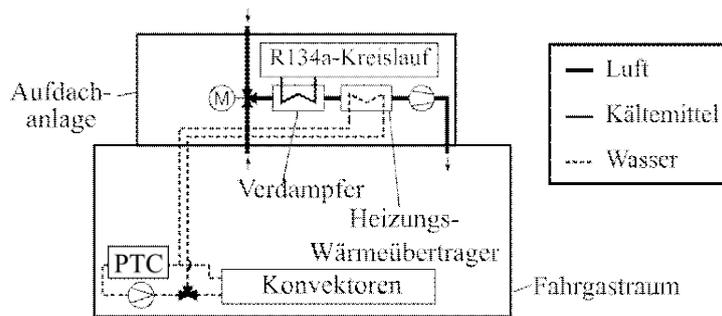


Abbildung 20: Systemschaubild konventionelles Klimatisierungssystem

Ein schematischer Aufbau der Kälteanlage findet sich in Abbildung 21. Die Kälteanlage ist eine Kompressionskältemaschine mit den Hauptkomponenten Verdichter, Kondensator, Expansionsventil, Verdampfer und dem Kältemittel R134a.

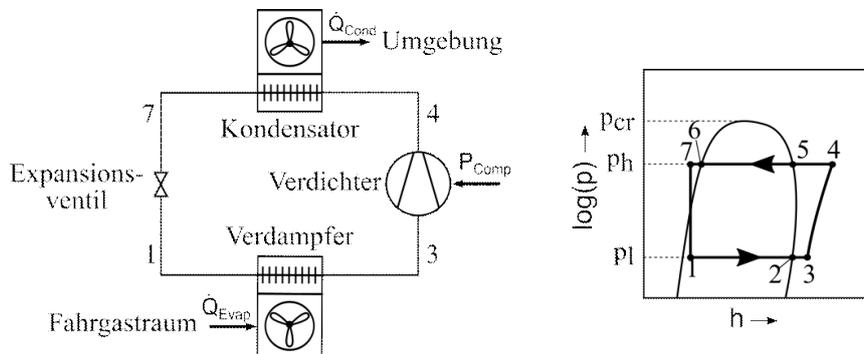


Abbildung 21: Schematischer Aufbau des Kältemittelkreislaufs und schematischer Kälteprozess

<sup>105</sup> Vgl. Konvekta AG 2013

<sup>106</sup> PTC Positive Temperature Coefficient, elektrischer Widerstand, dessen Widerstand mit der Temperatur steigt

Die Effizienz der Aufdachanlage wird über die Leistungszahl, auch Coefficient of Performance  $COP$  genannt, beschrieben. Sie ist definiert als das Verhältnis von Kälteleistung zu Verdichterleistung.

$$COP_{AC} = \frac{\dot{Q}_{Evap}}{P_{Comp}}$$

Der Energieverbrauch der Klimatisierung lässt sich aktiv über die Verbesserung der Wirkungsweise und Erhöhung der Effizienz der Klimatisierungskomponenten reduzieren. So kann der Heizbetrieb statt über elektrische Heizer über Wärmepumpen<sup>107</sup> oder in einer Kombination mit Infrarotstrahlern und die Erwärmung bestimmter Flächen erfolgen. Das Aufdach-Wärmepumpensystem schaltet zwischen Heiz- und Kühlbetrieb mittels eines umkehrbaren Kältemittelkreislaufes oder mittels einer Luftumkehr um. Wärmepumpen werden mit den Kältemitteln R134a und R744 (CO<sub>2</sub>) angeboten. Seit 2014 ist diese Technologie z.B. in Dresden im Einsatz.<sup>108</sup>

Seit Mai 2017 fährt ein mit Infrarotstrahlern ausgestatteter Oberleitungsbus der Firma Hess „SwissTrolley Plus“ durch Zürich. Die 12 x 200 W Infrarotstrahler sind in der Decke hinter der Lochplatte platziert, werden über die 24 V Quelle versorgt und bei ca. 5 °C zugeschaltet. Die notwendige Mindesttemperatur im Bus konnte auf diese Weise, ohne Einschränkung der Behaglichkeit, von 22 °C auf 20 °C gesenkt werden.<sup>109</sup>

Passiv lässt sich der Energieverbrauch über die Verringerung des Heiz- und Kühlbedarfs beeinflussen, z.B. durch die Verbesserung der Isolationswirkung über doppelt verglaste Fenster,<sup>110</sup> Nutzung der Abwärme des Schutzwiderstandes, Anpassung der Innenraumtemperatur an die Außentemperatur über eine Temperaturdifferenz-Steuerung, statt eines festen Wertes und Pufferung von Heizenergie über Latentwärmespeicher während des Vorkonditionierens. Die Vorkonditionierung bereitet das Fahrzeug vor seinem Einsatz, während es noch mit einem externen Energieübertragungssystem gekoppelt ist, vor. Dazu gehört, dass das Fahrzeug und seine Komponenten klimatisiert und die Druckluftversorgung hergestellt wird, dadurch wird der Energiespeicher zum Beginn des Einsatzes entlastet. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von Türluftschleiern. Sie können die Infiltration durch heiße bzw. kalte Außenluft begrenzen und kommen beispielsweise in Schweden zum Einsatz.<sup>111</sup>

In der Dissertation von Welp<sup>112</sup> wird der Einfluss des Wärmeeintrags über gekrümmte Flächen auf den Energiebedarf untersucht. Durch die Analogie zur Gebäudetechnik wurde vom Autor die Glaskrümmung als ein wesentlicher Unterschied herausgearbeitet,

---

<sup>107</sup> Der  $COP$  liegt bei Wärmepumpen über 1 und beim elektrischen Heizer bei etwa 0,9. Vgl. Jefferies et al. 2015

<sup>108</sup> Vgl. Spheros Blog 2015

<sup>109</sup> Vgl. Vogel 2018; SRF 2018 und Gespräch mit Herrn Blaettler von Hess auf der Busworld 2017

<sup>110</sup> Vgl. Ebusco 2.1, Ausführung für BSAG Bremen in Krämer und Hanke 2017

<sup>111</sup> Vgl. Heise 2014

<sup>112</sup> Welp 2017: Passive Energieeffizienzmaßnahmen im Fahrzeug zur Reduzierung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs

da die Sonneneinstrahlung im Fahrzeug über leicht gekrümmte Flächen erfolgt. Die Untersuchung ergab jedoch, dass die Glaskrümmung, wenn sie in der Gebäudetechnik eingesetzt wird, einen höheren Einfluss auf den Wärmeeintrag hat als im Automobilbereich. Dies liegt daran, dass die durchschnittliche Glaskrümmung der Fahrzeuge in einem Bereich liegt, der für die Berechnung der Strahlungstransmission eine untergeordnete Rolle spielt.

Übliche Systemkombinationen zur Klimatisierung von Elektrobussen finden sich in der Publikation Jefferies et al. (2015).

## 2.3 Methodische Grundlagen

Thema dieser Arbeit ist ein methodischer Technologievergleich. Das Ziel ist die Entwicklung einer gesamtheitlichen Bewertungsmethodik, welche es ermöglicht unter Einbeziehung von klimatischen und betreiberspezifischen Anforderungen durch Analyse der Systemeigenschaften verschiedene Systemkonzepte zu vergleichen. Dies setzt eine systematische Technikbewertung voraus.

### 2.3.1 Begriffsdefinition

Unter dem Begriff **Methode** wird die Beschreibung eines planmäßigen Vorgehens zum Erreichen eines bestimmten Ziels verstanden. Während die **Methodik** die Beschreibung einer planmäßigen Verfahrensweise nach einem Vorgehensplan unter Einschluss mehrerer Methoden und Hilfsmittel ist.<sup>113</sup>

Der Begriff **Technologie** und **Technik** wird im deutschen Sprachgebrauch häufig synonym benutzt, wobei im angelsächsischen Sprachgebrauch beides mit dem Wort „technology“ abgedeckt wird. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Begriffe wie folgt definiert:

*„Technologie (ist das) Wissen über naturwissenschaftliche Zusammenhänge, das zur Lösung technischer Probleme angewendet werden kann. Technik ist dagegen angewandte, problemorientiert operationalisierte Technologie oder (...) materielle Anwendung von Technologie in Produkten oder Prozessen.“<sup>114</sup>*

Im Rahmen der Arbeit sollen Systemeigenschaften analysiert werden. Unter **Systemeigenschaft** wird ein Merkmal und seine Ausprägung verstanden (Bsp. Merkmal Farbe mit der Ausprägung rot). Des Weiteren können Systemmerkmale in Stellgrößen (Beschaffenheitsmerkmal) und Folgegrößen (Funktionsmerkmal und Relationsmerkmal) unterteilt werden. Beschaffenheitsmerkmale sind vom Entwickler unmittelbar festlegbar

---

<sup>113</sup> Vgl. Feldhusen und Grote 2013, Ehrlenspiel und Meerkamm 2013, Lindemann 2009

<sup>114</sup> Vgl. Trommsdorff und Steinhoff 2013, S. 11

z.B. Nennspannung und Gewicht einer Batteriezelle. Infolge der Festlegung der Beschaffenheitsmerkmale ergeben sich die Funktionsmerkmale und Relationsmerkmale, z.B. Übertragbare Ladeleistung und Energieverbrauch.<sup>115</sup>

Die Summe der Eigenschaften lässt sich in einer Eigenschaftsliste zusammenfassen oder mit Hilfe eines Netzdiagramms und Eigenschaftsfeldern visualisieren.<sup>116</sup>

Zur Bewertung der Eigenschaften sind **Werte** und **Ziele** erforderlich. **Werte** kommen in Wertungen zum Ausdruck. Sie sind Ergebnisse individueller und sozialer Entwicklungsprozesse und können in verschiedenen Kulturen und gesellschaftlichen Gruppen voneinander abweichen bzw. unterschiedlichen Präferenzen unterliegen. Werte werden in Zielen und Normen konkretisiert. **Ziele** sind Eigenschaften, dessen Verwirklichung erstrebt werden.<sup>117</sup>

Beispiel: Ein technisches System muss wirtschaftlich sein. Die Wirtschaftlichkeit ist ein angestrebter Wert und kann mit einem oder mehreren Zielen konkretisiert werden: Hohe Lebensdauer der eingesetzten Komponenten, geringe Anschaffungskosten, etc.

### 2.3.2 Technikbewertung

Technikbewertung bedeutet nach VDI 3780:

*„... das planmäßige, systematische, organisierte Vorgehen, das*

- *den Stand einer Technik und ihre Entwicklungsmöglichkeiten analysiert,*
- *unmittelbare und mittelbare technische, wirtschaftliche, gesundheitliche, ökologische, humane, soziale und andere Folgen dieser Technik und möglicher Alternativen abschätzt,*
- *aufgrund definierter Ziele und Werte diese Folgen beurteilt oder auch weitere wünschenswerte Entwicklungen fordert,*
- *Handlungs- und Gestaltungsmöglichkeiten daraus herleitet und ausarbeitet,*

*so dass begründete Entscheidungen ermöglicht und gegebenenfalls durch geeignete Institutionen getroffen und verwirklicht werden können.“<sup>118</sup>*

Die Phasen der Technikbewertung umfassen die Definition und Strukturierung des Problems, die Folgenabschätzung, die Bewertung und die Entscheidung. In der Praxis sind diese Phasen überlappend und können auch über Rückkopplung miteinander verbunden sein. Für jede Phase wird in der Richtlinie allgemein beschrieben welche Auf-

---

<sup>115</sup> Vgl. Lindemann 2009

<sup>116</sup> Vgl. Wiedemann 2014: In der Dissertation werden Eigenschaftsfelder, die AUDI verwendet vorgestellt.

<sup>117</sup> Vgl. VDI-Richtlinie 3780

<sup>118</sup> VDI-Richtlinie 3780

gaben zu erfüllen bzw. welche Aspekte zu berücksichtigen sind. Dabei wird in der Richtlinie konstatiert, dass eine systematische Methodenlehre und eine kritische Methodendiskussion in der Technikbewertung noch wenig entwickelt sind.<sup>119</sup>

Die Phasen der Technikbewertung lassen sich in Vorgehensmodellen der Produktentwicklung wiederfinden. So wird im allgemeinen Modell der Produktentwicklung folgendes generelles Vorgehen vorgestellt:

1. Klären und Präzisieren des Problems bzw. der Aufgabe,
2. Ermitteln von Funktion und deren Strukturen,
3. Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen,
4. Bewerten und Auswählen von Lösungskonzepten
5. Gliedern in Module und Schnittstellendefinition,
6. Gestalten der Module,
7. Integrieren des gesamten Produkts und
8. Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben.

Am Ende eines jeweiligen Schrittes steht ein bestimmtes Ergebnis (z.B. die Anforderungsliste nach dem Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung). Die Richtlinie bietet allgemeingültige und branchenunabhängige Grundlagen zur methodischen Produktentwicklung.<sup>120</sup>

Ergänzend zur VDI-Richtlinie 2221 ist die VDI-Richtlinie 2206 „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ einzuordnen, welche den Fokus auf das Entwickeln mechatronischer Systeme setzt und auf das Zusammenspiel maschinenbaulicher, elektrotechnischer und informationstechnischer Entwicklungen eingeht. Die Richtlinie schlägt ein flexibleres Vorgehensmodell vor, welches sich im Wesentlichen auf einen allgemeinen Problemlösungszyklus auf der Mikroebene, auf das V-Modell auf der Makroebene und auf vordefinierte Prozessbausteine zur Bearbeitung wiederkehrender Arbeitsschritte stützt. Der Problemlösungszyklus beginnt mit der Situationsanalyse bzw. Zielübernahme und beinhaltet das Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung. Er mündet in einer Entscheidung, ob die gefundenen Lösungsalternativen als Grundlage für die weitere Planung verwendet werden können. Abschließend wird das weitere Vorgehen geplant. Das V-Modell als Makrozyklus beschreibt eine logische Reihenfolge wesentlicher Teilschritte, jedoch kann die zeitliche Abfolge der Bearbeitung in der Praxis abweichen. Es können je nach Entwicklungsaufgabe mehrere Makrozyklen durchlaufen werden. Ergebnis des Makrozyklus ist ein Produkt, dessen Reifegrad mit jedem Zyklus steigt. Nach dem ersten Zyklus entsteht in der Regel ein Labormuster, welches in den nächsten Zyklen weiter konkretisiert und detailliert wird. Im Makrozyklus wird

---

<sup>119</sup> Vgl. VDI-Richtlinie 3780

<sup>120</sup> Vgl. VDI-Richtlinie 2221 Blatt 1, Entwurf

das Gesamtsystem also im Entwurf von der groben Ebene bis auf die feine Ebene herunter spezifiziert. Anschließend folgen die domänenspezifischen Entwürfe. Diese werden in der Systemintegration wieder zusammengeführt um deren gemeinsame Funktionalität analysieren zu können. Die wiederkehrenden Prozessbausteine Systementwurf, domänenspezifischer Entwurf und Systemintegration werden unterstützt von Modellen zur Abbildung und Untersuchung der Systemeigenschaften.<sup>121</sup>

Im Folgenden wird näher auf die Ziele und Werte in der Technikbewertung sowie auf die Modellbildung eingegangen.

## **Ziele und Werte in der Technikbewertung**

Zur Bewertung der Systemeigenschaften ist es erforderlich, die für den spezifizierten Untersuchungszweck relevanten Werte und Ziele zu definieren und die Beziehungen zwischen diesen zu bestimmen. Dabei muss gewährleistet sein, dass diese Werte und Ziele das System, dem Untersuchungszweck entsprechend, abbilden und überlappungsfrei sind. Somit ist gesichert, dass kein für den Untersuchungszweck relevantes Charakteristikum vernachlässigt wird, aber auch keine Eigenschaft Einfluss auf mehrere Werte hat und damit die Bewertung überproportional bestimmt. Werte und Ziele im technischen Handeln sind in der VDI Richtlinie 3780 beschrieben. Werte bzw. Wertbereiche sind: Funktionsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit, Wohlstand, Sicherheit, Gesundheit, Umweltqualität, Persönlichkeitsentfaltung und Gesellschaftsqualität.<sup>122</sup> Die Herleitung der Ziele und Zielwerte hängt von externen und internen Kontextfaktoren ab. Zu den externen Kontextfaktoren zählen auf der makroökonomischen Ebene z.B. Gesellschaft und Kultur, auf der mikroökonomischen Ebene z.B. Markt und Kunde. Die internen Kontextfaktoren beschreiben unternehmensinterne Faktoren und lassen sich in die Ebenen Organisation, Projekt und Individuum unterteilen.<sup>123</sup> So kann ein Unternehmen unter Berücksichtigung der eigenen Expertise in der Motorenentwicklung Zielwerte in der Fahrleistung festlegen, die eine Begeisterung beim Kunden auslöst und somit nach dem Kano-Modell die Kaufentscheidung positiv beeinflussen. Entscheidend bei der Erstellung des Zielsystems ist die Bestimmung des Grenzbereichs und einer akzeptablen Streuung bei der Zielerreichung. Beispielsweise kann im Wertbereich Sicherheit festgelegt werden, dass die Strahlungswerte aller Fahrzeuge in Bezug auf elektromagnetische Verträglichkeit unter bestimmten, festgelegten Grenzwerten (z.B. aus Normen und/oder Richtlinien) liegen. Bei Fahrleistungszielen kann dagegen eine Streuung von z.B. 5% akzeptiert werden. Diese Grenzwerte und Streuungen lassen sich insbesondere über Kundenanforderungen und Marktanalysen herleiten.

Werte und Ziele in der (e-) PKW- Entwicklung finden sich in verschiedenen Veröffentlichungen und Dissertationen.<sup>124</sup>

---

<sup>121</sup> Vgl. VDI-Richtlinie 2206

<sup>122</sup> Vgl. VDI-Richtlinie 3780

<sup>123</sup> Vgl. VDI-Richtlinie 2221 Blatt 2, Entwurf

<sup>124</sup> Vgl. Reupold 2014, Wiedemann 2014, Ziemann 2006, etc.

Wiedemann<sup>125</sup> baut in seiner Dissertation auf ein Wertsystem der AUDI AG auf. Dieses wird vom Autor als Eigenschaftsstruktur bezeichnet und umfasst die Eigenschaften aus Kundensicht in mehreren Ebenen. Die erste Ebene setzt sich aus den Werten Design, Fahrerlebnis, Geländetauglichkeit, Komfort, Information & Kommunikation, Wirtschaftlichkeit, Alltagstauglichkeit, Qualität & Zuverlässigkeit, Sicherheit und Umweltverträglichkeit zusammen. Die zweite Ebene des Eigenschaftsfelds Alltagstauglichkeit beinhaltet u.a. die Eigenschaften Transport von Personen und Gütern, Bodenfreiheit und Reichweite. Die Ziele finden sich in Eigenschaftszielen wider. Diese Eigenschaften aus Kundensicht werden über die Anwendung eines House of Quality mit technischen Stellhebeln in Verbindung gebracht.

Reupold<sup>126</sup> fokussiert in seiner Arbeit das Antriebssystem mit Topologie und Komponenten. Er unterscheidet Werte und Ziele in Anforderungen, abgeleitet von Kundenanforderungen, und Bewertungskriterien und leitet die Zielwerte über Fahrzeugklassenabhängige Randbedingungen und Referenzwerte ab. Anforderungen spiegeln Eigenschaften wider, die das Produkt erfüllen muss. Ist dies nicht gegeben, wird das Konzept von der Bewertung ausgeschlossen. Unter dem Begriff Bewertungskriterium sind alle Eigenschaften der zu bewertenden Komponenten und Systeme gelistet, die für deren Differenzierung im Hinblick auf die Erfüllung der Kundenanforderungen relevant sind. In Tabelle 6 sind die Anforderungskategorie und die abgeleiteten Anforderungen an das Antriebssystem aufgeführt. Tabelle 7 listet die Bewertungskriterien und ordnet diese den Komponenten und den Bewertungsebenen zu.

**Tabelle 6: Anforderungskategorie und abgeleitete Anforderungen an das Antriebssystem, Dissertation Reupold<sup>127</sup>**

Kategorie	Antriebssystem
Fahrbarkeit	Anfahrbarkeit Steigungsfähigkeit Beschleunigung
Leistungs-/ Energiedichte	Erfüllung der Fahrzeuganforderungen
Wirtschaftlichkeit	Herstellungs-/ Wartungskosten
Sicherheit	Crashsicherheit
Funktionalität	Reichweite Zugkraftverlauf Höchstgeschwindigkeit
Kundennutzen	Fahrkomfort

<sup>125</sup> Vgl. Wiedemann 2014, Ableitung von Elektrofahrzeugkonzepten aus Eigenschaftszielen

<sup>126</sup> Vgl. Reupold 2014, Lösungsraumanalyse für Hauptantriebsstränge in batterieelektrischen Straßenfahrzeugen

<sup>127</sup> Reupold 2014, Tab.2.1

**Tabelle 7: Bewertungskriterien und Zuordnung, Dissertation Reupold<sup>128</sup>**

	Bewertung auf Komponentenebene bzw. direkter Vergleich der Komponente	Bewertung auf Systemebene
Topologie	Kosten, Bauraum, Überlastbarkeit, Zuverlässigkeit, Einzelradsteuerung, Komplexität	Effizienz, Fahrleistung, Fahrsicherheit
elektrische Maschine	Akustik, Überlastbarkeit, Schleppmomente, Zuverlässigkeit, Komplexität und Spannungsqualität (generatorischer Betrieb)	Kosten, Effizienz, Bauraum, Fahrsicherheit und Fahrleistung.
Getriebe	Effizienz, Fahrsicherheit, Akustik, Zuverlässigkeit, Komplexität und Flexibilität	Kosten, Fahrleistung, Bauraum und Schleppmomente
Wechselrichter	Fahrsicherheit, Akustik, Zuverlässigkeit, Komplexität, Flexibilität und Spannungsqualität	Kosten, Effizienz und benötigter Bauraum
Energiespeicher	Akustik, Zuverlässigkeit, Komplexität, Flexibilität, nutzbarer Energieinhalt und Spannungsqualität	Kosten, Effizienz und Bauraum.

Ziemann<sup>129</sup> befasst sich in seiner Dissertation mit dem Zielsystemmanagement komplexer Produkte und nennt die Gefahr der Erzeugung nicht mehr handhabbarer und unüberschaubarer Datenmengen. Um dies zu vermeiden, schlägt er eine sinnvolle Strukturierung und entwicklungsphasengerechte Detailierung der Ziele vor. Er stellt in seiner Arbeit einen detaillierten Katalog der von der BMW AG betrachteten Fahrzeugeigenschaften vor und bezeichnet diese als „kundenwerte Gesamtfahrzeugmerkmale“. <sup>130</sup> Diese Kundensicht wird in Bereiche eingeteilt, in einer Eigenschaftsstruktur zusammengefasst und über eine „Beziehungsmatrix Eigenschaften Module“ mit der Produktstruktur, welche die Unternehmenssicht darstellt, verknüpft. <sup>131</sup> Alle Anforderungen und Ziele werden der jeweiligen Struktur und einem bestimmten Zieltyp<sup>132</sup> zugeordnet. Es gibt Zieltypen, die die Anforderungen an das Produkt aus Kundensicht beinhalten und Zieltypen, die die daraus abgeleiteten, lösungsbeschreibenden Größen und Anforderungen von Unternehmensbereichen und Entwicklungsabteilungen aufnimmt (siehe Abbildung 22).

<sup>128</sup> Vgl. Reupold 2014, Kapitel 4 und 5

<sup>129</sup> Ziemann 2006, Zielsystemmanagement für die Produktentstehung von PKW

<sup>130</sup> Ziemann 2006, S. 133-153

<sup>131</sup> Diese Verknüpfung ist in der Literatur auch unter Needs-Metrics Matrix bekannt, vgl. Ulrich und Eppinger 2016

<sup>132</sup> Nach VDI 2221 sind die hier genannten Zieltypen vergleichbar mit den in der VDI beschriebenen Kontextfaktoren.

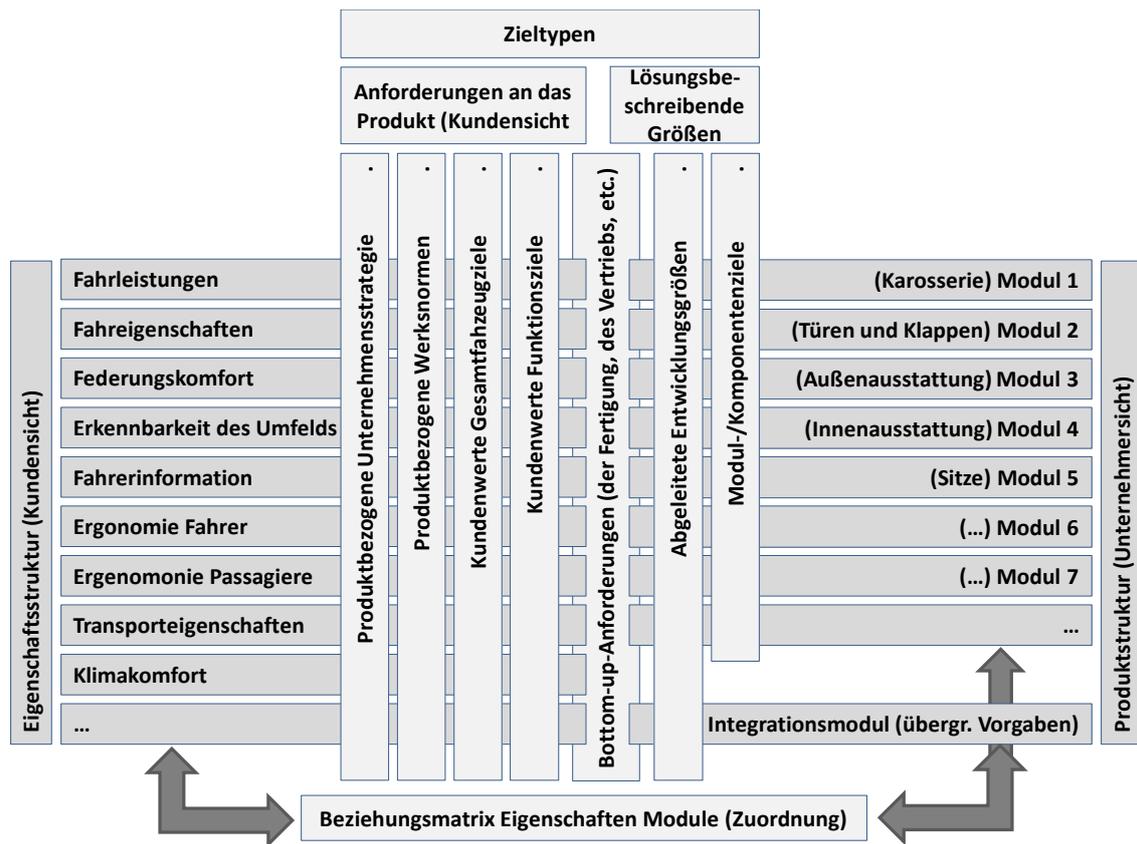


Abbildung 22: Zielsystemstruktur, Dissertation Ziemann<sup>133</sup>

Die dargestellten Zieltypen können auch in produktübergreifende und produktspezifische Vorgaben unterteilt werden. Die produktübergreifenden Vorgaben werden in der frühen Phase der Produktentwicklung durch die produktbezogene Unternehmensstrategie sowie durch Gesetze und Normen festgelegt. Die unternehmensstrategischen Vorgaben beziehen sich beispielsweise auf markenprägende (Design-)Elemente, wie z.B. der „Hofmeisterknick“ (BMW), die Bestimmung des relevanten Wettbewerbsumfelds und entsprechende Vorgaben zur Differenzierung gegen dieses nach einer Benchmark-Analyse (Vergleich und gewünschte Positionierung des zukünftigen Produkts), etc. Auf diese Weise lassen sich für die Eigenschaftsbereiche Orientierungswerte festlegen, welche für die Bewertung der Systeme genutzt werden.

Umfassende Zielsysteme in der Nutzfahrzeug-Entwicklung sind in der Literatur nach Wissen der Autorin weniger beschrieben bzw. beziehen sich auf einzelne Werte.<sup>134</sup>

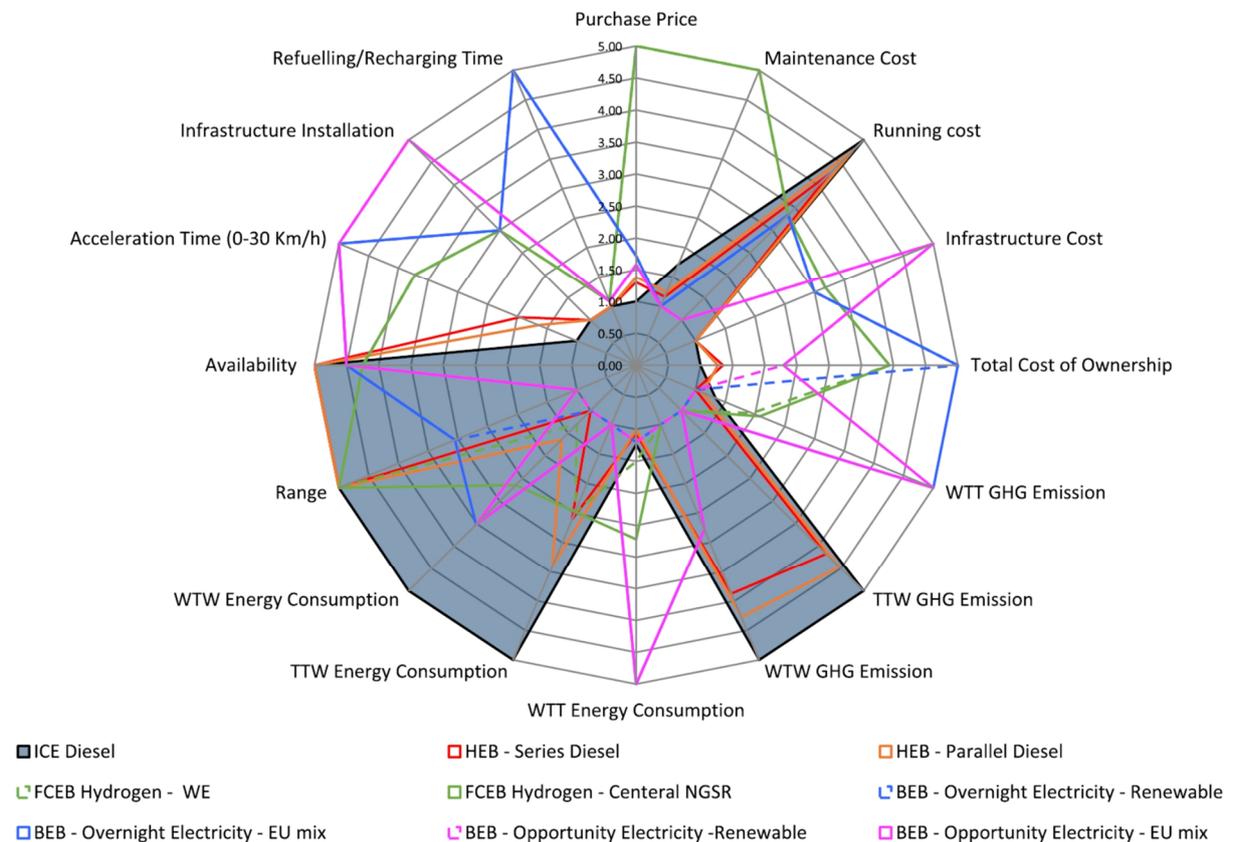
Gräbener<sup>135</sup> bewertet in seiner Dissertation die Nutzfahrzeugkonzepte in den Werten Technologie, Betrieb, Wirtschaftlichkeit, Umwelteinflüsse und Image. Das verwendete Zielsystem zeigt allerdings eine große Überlappung der Werte Technologie und Betrieb,

<sup>133</sup> Ziemann 2006, S. 35, Bild 8

<sup>134</sup>Vgl. Lajunen 2014 Fokus auf Energieeffizienz, Thiebes 2012 Fokus auf Kraftstoffersparnis und Produktivitätssteigerung, Kunith 2017: Fokus auf Wirtschaftlichkeit

<sup>135</sup> Gräbener 2017: Methodische Entwicklung und Bewertung von Elektrifizierungskonzepten für innerstädtische Nutzfahrzeuge

da Unterwerte wie z.B. Flexibilität, Wartungsintensität und Elektrifizierungsgrad in beiden Werten enthalten sind. Die Autoren um Mahmoud<sup>136</sup> geben in ihrer Publikation einen Überblick zu Bussen im öffentlichen Personennahverkehr. Die Autoren untersuchen Brennstoffzellen-, Batterie- und Hybridbusse in den Werten Wirtschaft, Betrieb, Energie und Umwelt und fassen die Ergebnisse in einem Spinnendiagramm zusammen (Abbildung 23).



**Abbildung 23: Gegenüberstellung aller in der Studie von Mahmoud et al. (2016) untersuchten Elektrobusse<sup>137</sup>**

Im Spinnendiagramm wird deutlich, dass die Werte nicht überlappungsfrei sind. Die dargestellten Kosten sind Teil der Gesamtkosten (Total-Cost-of-Ownership), die WTW Analyse für Energieverbrauch und Emissionen setzt sich aus der WTT und TTW Analyse zusammen.<sup>138</sup> Außerdem hängen Reichweite und Energieverbrauch sowie Betriebskosten (Running Cost) voneinander ab.

Im Rahmen der Begleitforschung der von den Ministerien (BMVI, BMU und BMWi) geförderten Hybridbus und Elektrobuss Projekte wurden die existierenden Ergebnisse

<sup>136</sup> Vgl. Mahmoud et al. 2016

<sup>137</sup> Mahmoud et al. 2016

<sup>138</sup> Die Well-to-Wheel Analyse (WTW) ist eine ganzheitliche Untersuchung des gesamten Prozesses der Herstellung und Verwendung von Kraftstoffen zur Kraftübertragung auf die Räder eines Fahrzeugs und untergliedert sich in die Teilbereiche Well-to-Tank (WTT) und Tank-to-Wheel (TTW).

und Erfahrungen von einer Ministerien übergreifenden, interdisziplinären Arbeitsgruppe „Innovative Antriebe Bus“ erfasst und bewertet. Hierfür wurden von den Mitgliedern der Arbeitsgruppe fünf Bewertungskategorien aufgestellt (siehe Tabelle 8) und entsprechende Daten aufgenommen bzw. dezidierte Messungen durchgeführt.<sup>139</sup>

**Tabelle 8: Kriterien der AG Innovative Antriebe Bus zur Auswertung der Förderprojekte<sup>140</sup>**

Bewertungskategorie	Bewertungskriterien
Praxistauglichkeit und Einsatzreife	Täglicher Einsatz, Laufleistung Verfügbarkeit (Fahrzeuge, Ladeinfrastruktur) Anpassung Infrastruktur (Werkstatt / Nachladen auf Linie)
Effizienz	Kraftstoff- und Stromverbrauch aus Dauertests und Einzelmessungen Einfluss Nebenverbraucher
Ökologie und Klimaschutz	Reduktion CO <sub>2</sub> Reduktion NO <sub>x</sub> Feinstaub / PM Reduktion Lärm
Wirtschaftlichkeit	Lebenszykluskosten (LCC) Break Even Analyse mit Referenztechnologie
Akzeptanz	Öffentlichkeitsarbeit, Befragungen

Im ZeEUS eBus Report #2 werden Hersteller von Batteriebussen und ihre Produkte vorgestellt. Anders als in Automobilzeitschriften beschränkt sich dieser Bericht neben allgemeinen Angaben zu Abmaßen, Gewicht und Anzahl der Passagiere auf die Angaben zu den eingesetzten Komponenten (Zulieferer, Typ, charakteristische Parameter, z.B. Elektromotor, Zulieferer ZF, Typ 2 x Asynchronmotor, Leistung 2 x 125 kW, Moment 2 x 11.000 Nm).<sup>141</sup> Ähnliche Angaben finden sich in der Zeitschrift Omnibus Spiegel.<sup>142</sup> In der Ausgabe wurden sechs verschiedene Batteriebusse mit unterschiedlichen Konfigurationen getestet. Die Tests umfassten die Vermessung des Energieverbrauchs und der Geräuschemissionen, aber auch eine Beurteilung des Designs, des Arbeitsplatzes, des Bedienkomforts, der Verarbeitung etc. durch Busfahrer und Werkstattpersonal. Eine finale Gegenüberstellung fehlt jedoch.

<sup>139</sup> Ausgewertet wurden 154 Hybridbusse (76 12 m und 78 18 m-Busse) sowie 16 Batteriebusse (sieben 12 m und vier 18 m Busse mit induktiver Ladetechnologie, ein 12 m Bus mit Stromabnehmer. vgl. Faltenbacher und Vetter 2015; Faltenbacher et al. 2016, letzter Stand der Auswertung April 2016. Seitdem wurden weitere Busprojekte initiiert und Anfang 2018 lag der Bestand bei 183 Elektro- und 362 Hybridbussen (Kraftfahrt-Bundesamt 2018). Seit Mitte 2018 hat die Arbeitsgruppe die Begleitforschung wiederaufgenommen.

<sup>140</sup> Vgl. AG Innovative Antriebe Bus 2015

<sup>141</sup> Vgl. ZeEUS 2017, S. 118 ff.

<sup>142</sup> Vgl. Krämer und Hanke 2017

Die in der vorangegangenen Literatur beschriebenen Merkmale spiegeln die vom Kunden wahrnehmbaren Merkmale wider und müssen für eine methodische Produktentwicklung mit dem Ziel der Umsetzung entsprechender Kundenwünsche zusammengetragen und strukturiert werden (vgl. Tabelle 9).

**Tabelle 9: Kundenwerte Merkmale in der Entwicklung elektrisch betriebener Linienbusse<sup>143</sup>**

Kundenwerte Merkmale	
Max. Fahrleistungen, Fahrerlebnis	<b>Akustikkomfort</b>
<b>Fahreigenschaften</b>	<b>Wirtschaftlichkeit</b>
Design Exterieur/Interieur	<b>Energieeffizienz</b>
Ergonomie Fahrer	<b>Betriebstauglichkeit</b>
<b>Bedienbarkeit Fahrzeug</b>	<b>Sicherheit</b>
Ergonomie Passagiere	<b>Qualität</b>
<b>Ökologie und Klimaschutz</b>	<b>Imagegewinn</b>
<b>Klimakomfort</b>	Besondere Fahrzeugeigenschaften

Die Erreichung der Kundenwünsche (kundenwertes Merkmal mit bestimmter Ausprägung) als Entwicklungsziel wird umgesetzt durch das Übersetzen der Kundenwünsche in Systemanforderungen, daher ist die Kenntnis über das System und die Verknüpfung zwischen den Systemmerkmalen und den kundenwerten Merkmalen erforderlich.<sup>144</sup>

Die Zuordnung erfolgt über eine Beziehungsmatrix bzw. Verknüpfungsmatrix, die dem Gedanken des Quality Function Deployment<sup>145</sup> entspricht.

## Modellbildung

Bei innovativen Entwicklungen ist es nicht immer möglich die Eigenschaften von komplexen Gesamtsystemen anhand von realen Produkten zu untersuchen, da diese teilweise noch nicht existieren oder weil es zu teuer und aufwendig ist. Eine vergleichsweise kostengünstige Methode stellt die Simulation dar. Mit Hilfe der Simulation ist es möglich Gesamtsysteme mit unterschiedlichen Konfigurationen unter gleichen Randbedingungen hinsichtlich bestimmter Eigenschaften zu untersuchen um Erkenntnisse über das reale System zu erhalten. Abhängig von der betrachteten Problemstellung kann die erforderliche Güte des Modells variieren. Daher sollte Klarheit über die Entwicklungsaufgabe bestehen, bevor mit der Modellierung begonnen wird.<sup>146</sup>

Abbildung 24 zeigt eine vereinfachte Darstellung des Modellierungsprozesses.

<sup>143</sup> Kundenwerte Merkmale basierend auf Ziemann 2006, S. 133-153, Faltenbacher et al. 2016; Krämer und Hanke 2017, VDV-Mitteilung 2319, . Die kundenwerten Merkmale mit den Untermerkmalen sind im Anhang A1 gelistet. Merkmale in Fettschrift sind im Vergleich zu den Merkmalen eines konventionellen Linienbusses hinzugekommen oder ihre Ausprägung unterliegen einer wesentlichen Veränderung, vgl. Anhang A1

<sup>144</sup> Vgl. Kapitel 2.2, S.18

<sup>145</sup> Vgl. Lindemann 2009, S. 298

<sup>146</sup> Vgl. VDI-Richtlinie 2206

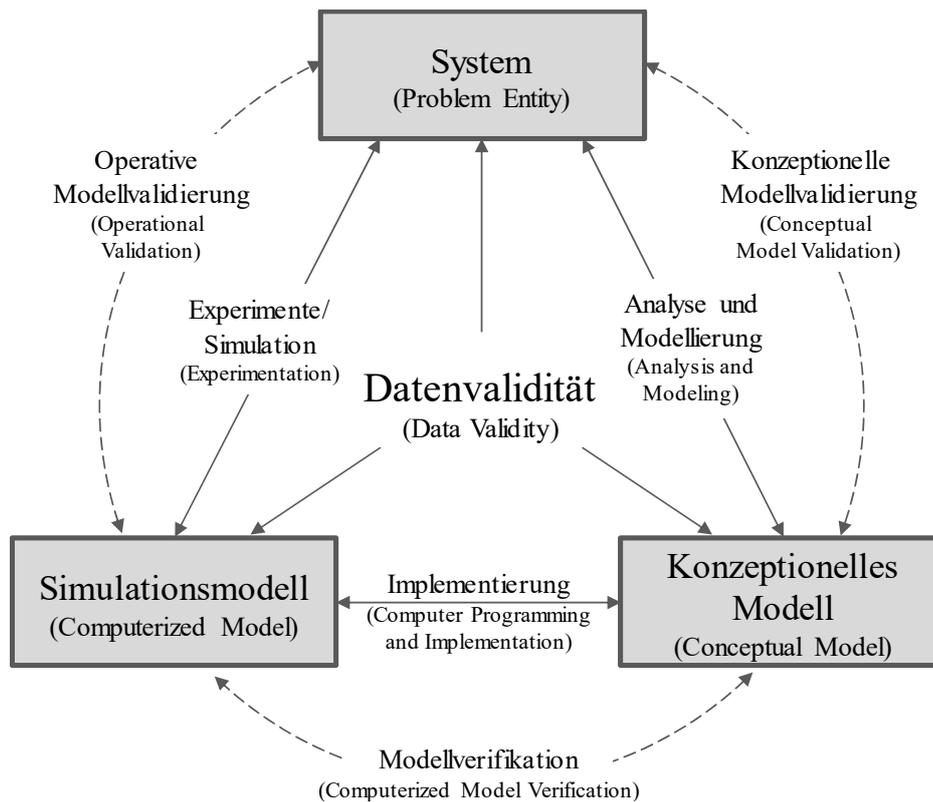


Abbildung 24: Vereinfachte Darstellung des Modellierungsprozesses<sup>147</sup>

Der Modellierungsprozess lässt sich im Dreieck System, konzeptionelles Modell und Simulationsmodell darstellen. Unter System ist das zu simulierende, reale System (z.B. der batterieelektrische Bus) zu verstehen. Das konzeptionelle Modell ist eine mathematische Darstellung des Systems, die für einen bestimmten Anwendungszweck geeignet ist, und das Simulationsmodell, welches die Implementierung des konzeptionellen Modells auf einem Computer ist. Das konzeptionelle Modell entsteht durch eine Analyse- und Modellierungsphase, das Simulationsmodell über eine Implementierungsphase und Rückschlüsse auf das reale System werden durch Durchführen der Simulation in der Versuchsphase erhalten. Parallel zu diesen Phasen findet die Verifikation und Validierung statt.<sup>148</sup> Der Verifikation und der Validierung liegen zwei Fragen zugrunde, die im Laufe des Entstehungsprozesses zu beantworten sind: Verifikation beantwortet die Frage: „Ist das Modell richtig (implementiert)?“ Validierung beantwortet die Frage: „Wird das richtige Modell verwendet?“<sup>149</sup> Die Verifikation stellt sicher, dass das konzeptionelle Modell formal richtig implementiert ist und dass durch die Diskretisierung keine Berechnungsfehler entstehen. Die Validierung kann in konzeptionelle und operative Validierung unterteilt werden. Die Validierung hat zum Ziel eine Aussage über die Gültigkeit des Modells für seinen Anwendungszweck zu treffen. Sie ist erforderlich, um Vertrauen in die durch die Simulation erzeugten Ergebnisse zu erzielen und damit die Simulation als alternatives Untersuchungswerkzeug zum Realversuch zu

<sup>147</sup> Eigene Darstellung nach Sargent 1981

<sup>148</sup> Vgl. Sargent 1981

<sup>149</sup> Vgl. Viehof und Winner 2017

rechtfertigen. Die konzeptionelle Validierung ist Teil der Systemmodellierung und dient dem Nachweis, dass die Theorien und Annahmen, die dem konzeptionellen Modell zugrunde liegen, korrekt sind und dass sie das System für den jeweiligen Anwendungszweck verlässlich beschreiben. Die operative Validierung basiert auf einem Vergleich von Messdaten des realen Systems mit Ergebnissen des Simulationsmodells und gibt eine Aussage zur Übereinstimmungsgenauigkeit von Simulationsmodell und realem System im definierten Anwendungsbereich. <sup>150</sup>

## 2.4 Übersicht zu bisherigen Simulationsmodellen

Im Rahmen von Demonstrationsprojekten sind in den letzten Jahren vermehrt Publikationen entstanden, u.a. mit dem Schwerpunkt Modellentwicklung zur Analyse von elektrifizierten und teilelektrifizierten Bussystemen. Tabelle 10 gibt eine Übersicht. Die Simulationsmodelle sind unterteilt in akademisch forschungsgetriebene oder kommerzielle Simulationsmodelle.

**Tabelle 10 Übersicht zu einer Auswahl von bestehenden Simulationsmodellen**

Autor Jahr, <b>Name</b>	Kategorie	Verfügbarkeit	Softwareumgebung	Richtung
Wipke et al. 1999 <sup>151</sup> , <b>ADVISOR</b>	akademisch	Open source	MATLAB/ Simulink	rückwärts
Lin et al. 2001, <b>HE-VESIM</b>	akademisch	unbekannt	MATLAB/ Simulink	vorwärts
Siemens Industry Software 2014, <b>LMS Imagine.Lab</b>	kommerziell	kommerziell	unbekannt	vorwärts und rückwärts
Auer und Krug 2012, <b>TheFaMoS</b>	akademisch	unbekannt	MATLAB/ Simu- link + Flowmaster	rückwärts
Lindemann und Gühmann 2003, <b>VeLoDyn</b>	kommerziell	kommerziell	MATLAB/ Simulink	vorwärts
Back 2005, <b>kein Name</b>	akademisch	geschlossen	MATLAB/ Simulink	vorwärts
Haupt 2013, <b>kein Name</b>	akademisch	geschlossen	Modelica/ Dymola	vorwärts
Kossel 2011 <b>Kein Name</b>	akademisch	geschlossen	Modelica	vorwärts
Halmeaho et al. 2017 <b>Kein Name</b>	akademisch	unbekannt	MATLAB/ Simulink/Simscape	vorwärts
Fichtl und Steinert 2016 <b>Fraunhofer IVision</b>	kommerziell	kommerziell	MATLAB/ Simulink	vorwärts und rückwärts
Lajunen und Lipman 2016 <b>kein Name</b>	akademisch	kommerziell	Autonomie vehicle simulation software	vorwärts und rückwärts
(Sinhuber et al. 2010, 2012) <b>kein Name</b>	akademisch	geschlossen	MATLAB/ Simulink	vorwärts

<sup>150</sup> Vgl. Sargent 1981, VDI-Richtlinie 2206, Viehof und Winner 2017

<sup>151</sup> Vgl. aktuellste Version von 2003 unter <https://sourceforge.net/projects/adv-vehicle-sim/>

Weiterhin ist die Verfügbarkeit und die verwendete Softwareumgebung aufgezeigt. Eine weitere Unterscheidung erfolgt in vorwärts- und rückwärtsrechnende Modelle<sup>152</sup>.

Wie Tabelle 10 zeigt, sind über die Zeit einige Simulationsmodelle entstanden. Akademisch forschungsgetriebene Modelle sind meist in Dissertationen entstanden und sind in der schriftlichen Abhandlung beschrieben aber nicht öffentlich verfügbar.

In Tabelle 11 werden die Bestandteile der Simulationsmodelle hinsichtlich ihrer Umsetzung und Modellierungstiefe verglichen, daraus ergibt sich die Systemgrenze und der Fokus des jeweiligen Systemmodells. Die gelisteten Modelle betrachten Pkw- und Bus-Modelle zur Simulation von Hybridvarianten und reinen Elektrofahrzeugen. Die Arbeiten von Haupt und Kossel beziehen sich auf konventionelle Pkws und Busse, jedoch setzen beide ihren Schwerpunkt auf die Abbildung des thermischen Verhaltens.

Auffallend ist, dass die Systemmodelle mit Schwerpunkt thermische Modellierung die Softwareumgebung Modelica/Dymola verwenden. Während Modelle, die vorwiegend fahrzeugdynamische Eigenschaften untersuchen, auf MATLAB/Simulink basieren. Bei der Untersuchung beider Eigenschaften kann eine Kopplung von MATLAB/Simulink mit Flowmaster, GT-Suite und Modelica/Dymola erfolgen.

Die meisten Modelle beschränken sich auf die Abbildung des Fahrzeugs und setzen den Fokus auf das Antriebssystem und die Bestimmung des Energieverbrauchs basierend auf einem Fahrzyklus. Des Weiteren werden in den meisten Modellen die Emissionen nicht berücksichtigt. Das Ladesystem spielt im Pkw Bereich im Vergleich zum Busbereich eine untergeordnete Rolle, dies spiegelt sich auch in der Modellierung wider. Eine nähere Betrachtung der Busmodelle ergibt, dass die Ladesysteme gar nicht oder nur vereinfacht berücksichtigt sind und dass der Energiespeicher zwar komplexer modelliert, aber als Gesamtsystem nur energetisch dargestellt wird. Die Auslegung der Batterie erfolgt basierend auf dem erforderlichen Energiegehalt unabhängig von der Verschaltung und Charakteristik der Batterietechnologie.

---

<sup>152</sup> Beim vorwärtsrechnenden Modell wird dem Fahrer (Regler) ein Geschwindigkeitsverlauf als Aufgabe gegeben, die er mit dem Fahrzeugmodell (Regelstrecke) bewältigen muss. Beim rückwärtsrechnenden Modell wird ein Geschwindigkeitsverlauf und ein Höhenprofil vorgegeben, dem das Fahrzeug zu folgen hat. Das benötigte Motormoment zur Überwindung der Fahrwiderstände wird aus der vorgegebenen Strecke ermittelt.

**Tabelle 11: Simulationsmodelle im Vergleich**

		Simulationsbestandteile												
Name	Fahrzeug	ICE			elektrische Maschine			Speicher	Lade- system	mech. Modelle		therm. Modelle		
		Ver- brauch	Emis- sionen	Ver- brauch	Effi- zienz	Um- richter	Batterie		Ge- triebe	Reifen	Innen- raum	HVAC	Batterie	
ADVISOR	Pkw/Bus	++	O	++	+	X	+	X	X	O	X	X	X	X
HE-VESIM	Pkw	+	X	+	+	X	O	O	X	+	X	X	X	X
LMS Imagine.Lab	Pkw	+	X	+	X	X	X	X	X	+	++	X	X	X
TheFaMoS	Pkw	X	X	+	O	O	++	X	X	X	O	+	++	++
VeLoDyn	Pkw	+	X	O	O	O	O	X	X	++	+	X	X	X
Back	Pkw	++	X	+	+	+	+	X	X	+	O	X	X	X
Haupt	Pkw	+	X	X	X	X	X	X	X	+	O	++	+	X
Kossel	Bus	+	X	X	X	X	X	X	X	O	O	++	++	+
Halmeho	Bus	X	X	++	++	O	+	+	X	X	+	X	X	X
Fraunhofer IVision	Pkw/Bus	++	X	++	+	O	+	+	+	+	X	+	+	+
Lajunen /Lipman	Bus	+	O	+	+	+	+	+	X	O	O	X	X	X
Sinhuber	Bus	X	X	+	O	O	+	O	O	O	O	X	O	+

Legende: X nicht modelliert, O einfach modelliert (z.B. mit einer Konstante), + komplexe Modellierung (z.B. Look-up-Table), ++ Schlüsselbereich

### 3. Forschungsumfang

In diesem Kapitel wird der Forschungsbedarf aufgezeigt und die Forschungsfragen abgeleitet. Im Anschluss erfolgt die Abgrenzung der Arbeit.

#### 3.1 Forschungsbedarf

Nach den Ausführungen zu der Ausgangslage, den technischen und methodischen Grundlagen im Stand der Technik und Forschung werden im Folgenden der Forschungsbedarf aufgezeigt, die Forschungsfragen abgeleitet und die Ziele der vorliegenden Arbeit formuliert.

Die in Kapitel 1 aufgeführten Maßnahmen zum Klimaschutz bedingen ein Umdenken. Vor dem Hintergrund des Klimawandels und der zunehmenden Schadstoffbelastung der Luft in urbanen Ballungsräumen müssen zunehmende Anstrengungen unternommen werden um dem entgegenzuwirken. Die Elektrifizierung des öffentlichen Personennahverkehrs spielt dabei eine entscheidende Rolle, weil durch die hohen Laufleistungen der Linienbusse sich die Elektrifizierung um ein besonderes auf die Umwelt auswirkt.

Kapitel 2.1 gibt eine Übersicht zu elektrischen Buskonzepten und geht näher auf den europäischen und chinesischen Markt ein. Die Diversität zeigt, dass trotz vieler initiiertter Hybrid- und Elektrobus-Projekte die Busbetreiber weiterhin vor der Problematik stehen, die Potentiale einzelner Technologien im Zusammenwirken mit anderen unter Berücksichtigung der gegebenen Randbedingungen zu bewerten. Erschwerend kommt hinzu, dass die Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zwischen den Teilsystemen und Randbedingungen nicht vollständig bekannt sind. Mit der Elektrifizierung treten zusätzlich Herausforderungen auf, die vorher eine sekundäre Bedeutung hatten (siehe Kapitel 2.2.3).

Die Einführung innovativer Systeme und die sukzessive Substitution bestehender Flotten erfordern für die strategische Fahrzeugbeschaffung eine fundierte Technologieplanung und -entscheidung und setzen eine nachvollziehbare und systematische Technologiebewertung voraus. Die Komplexität aus den Interaktionen von Teilsystemen bedarf neuer gesamtheitlicher Methoden bei denen die Teilsysteme mit angemessenem Aufwand berücksichtigt werden.

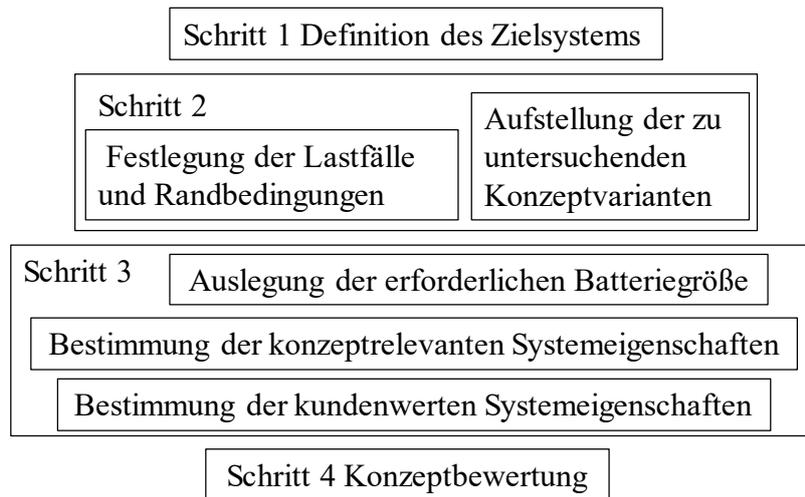
#### 3.2 Forschungsfragen

Aus dem im vorigen Kapitel festgestellten Forschungsbedarf lassen sich folgende Forschungsfragen ableiten:

**Übergeordnete Forschungsfrage: Mit welcher Methodik lassen sich die möglichen Technologiekombinationen eines Batteriebusse mit zugehöriger Ladeinfrastruktur objektiv bewerten und vergleichen?**

Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik baut auf den bereits bestehenden Vorgehensmodellen auf, welche in Kapitel 2.3.2 beschrieben sind, und ist auf die spezifischen Anforderungen des gesamtheitlichen Technologievergleichs bei der Elektrifizierung von Stadtbussystemen zugeschnitten.

Bekannte Methoden werden für diese Anwendung zusammengestellt und entsprechend angepasst bzw. erweitert. Insbesondere wird die Betreibersicht berücksichtigt. Das Vorgehensmodell der Methodik ist in Abbildung 25 dargestellt.



**Abbildung 25: Vorgehensmodell**

Aus der übergeordneten Forschungsfrage leiten sich drei spezifische Forschungsfragen ab:

**Forschungsfrage a: Welche Systemmerkmale müssen bei der Entwicklung eines urbanen batterieelektrischen Busses berücksichtigt werden?**

Für Schritt 1 des Vorgehensmodells ist die Beantwortung der Forschungsfrage a notwendig. Anders als in der PKW Branche handelt es sich bei den zu entwickelnden Fahrzeugen um Produkte mit geringer Stückzahl. In der ersten Phase der Förderung wurden einzelne Busse eingesetzt und getestet. Mittlerweile sind die Stückzahlen gestiegen, jedoch lässt sich diese weiterhin nicht mit einer Serienproduktion vergleichen. Da jeder Kunde (Busbetreiber) unterschiedliche Randbedingungen und Wünsche aufweist und bei der Produktentwicklung die Verbesserung des Kundennutzens im Vordergrund steht, baut das Zielsystem auf kundenwerten Eigenschaften auf.

Zur Definition des Zielsystems werden im ersten Schritt die kundenwerten Merkmale erläutert und die Merkmale in quantitativ und qualitativ bewertbare Merkmale kategorisiert (vgl. Kapitel 4.1). Aus der Erläuterung lassen sich die Relationsmerkmale ableiten, die über eine Beziehungsmatrix mit der Produktstruktur und den Beschaffenheitsmerkmalen verknüpft werden. Abhängig vom Entwicklungsauftrag und dem Untersuchungsrahmen werden mit Hilfe der Matrix konzeptrelevante Systemmerkmale identifiziert (vgl. Kapitel 4.2).

### **Forschungsfrage b: Welchen Einfluss haben die Teilsysteme auf die Eigenschaften des Gesamtsystems?**

Die Beantwortung dieser Forschungsfrage ist notwendig zur Bearbeitung der Schritte 2 und 3 des Vorgehensmodells. Die Abbildung und Untersuchung der konzeptrelevanten Systemeigenschaften (Merkmal und seine Ausprägung) erfolgt mit Hilfe eines Gesamtsystem-Simulationsmodells, welches das System innerhalb der Systemgrenze darstellt. Um verschiedene Systemkonzepte vergleichen zu können, ist ein generisches Simulationsmodell erforderlich, welches modular aufgebaut ist, sodass unterschiedliche Teilkomponenten untersucht werden können (vgl. Kapitel 6). Das Modell muss zusätzlich die standortspezifischen und betreiberspezifischen Rahmenbedingungen berücksichtigen (siehe Kapitel 5). Mit Hilfe des Modells kann der Einfluss bestimmter Teilsysteme auf die Systemeigenschaften quantifiziert und Merkmale der Teilsysteme mit großem Einfluss aufgezeigt werden.

### **Forschungsfrage c: Wie und wen kann die entwickelte Methodik bei der strategischen Technologieplanung und Systemauswahl unterstützen?**

Die Beantwortung der Forschungsfrage c beinhaltet den Schritt 4 des Vorgehensmodells. Anders als bei der Beschaffung von konventionellen Bussen sind mit der Elektrifizierung sowohl die Fahrzeuge als auch die Ladeinfrastruktur, der Netzanschluss als auch Schulungsmaßnahmen<sup>153</sup> für das Personal des Betreibers Teil der Beschaffung. Dies erfordert eine intensivere Abstimmung zwischen Betreiber, Bus- und Infrastrukturhersteller sowie Energieversorgern. Der Betreiber agiert in dieser Konstellation als informierter Kunde, der sich auch für produkt-spezifische Merkmale interessiert und diese einzuordnen weiß.<sup>154</sup>

Je nach Ausschreibung kann der Anbieter aus unterschiedlichen Bieterkonsortien bestehen (z.B. Fahrzeughersteller, Elektroausrüster und Infrastrukturanbieter). Dabei wird vom Verband Deutscher Verkehrsunternehmen empfohlen, dass zwischen dem Betreiber und dem Anbieter ein Generalauftragnehmer festzulegen ist, dies erleichtert die Abstimmung der Schnittstellen.<sup>155</sup>

Die entwickelte Methodik unterstützt dabei den Generalauftragnehmer bei der Zieldefinition und Verfolgung. Mithilfe des Zielsystems und dem Simulationsmodell können die Systemeigenschaften der Konzeptvarianten untersucht und bewertet werden und dem Kunden nutzenoptimale Lösungen angeboten werden. Der Betreiber wird durch das Zielsystem bei der Erstellung der Ausschreibung unterstützt und kann dieses bei der Abnahme heranziehen um das vorliegende Produkt mit seinem Zielsystem zu vergleichen.

Die Anwendung der Methodik wird in Kapitel 8 gezeigt.

---

<sup>153</sup> Z.B. Umgang mit Hochvoltssystem, Ausbildung zur Off-Board Diagnose

<sup>154</sup> Vgl. Krämer und Hanke 2017

<sup>155</sup> Vgl. VDV-Schrift 230/1

### 3.3 Abgrenzung der Arbeit

In dieser Arbeit wird der Fokus auf reine batteriebetriebene Elektrofahrzeugkonzepte als konsequentester Schritt zur Elektrifizierung gelegt. Emissionsbehaftete Antriebskonzepte sind explizit nicht Bestandteil des Untersuchungsrahmens und werden daher nicht diskutiert. Dies umfasst sowohl Fahrzeuge mit Verbrennungskraftmaschinen, teil-elektrifizierte Fahrzeugkonzepte als auch Konzepte mit Verwendung alternativer Kraftstoffe aus fossilen und biogenen Energieträgern z.B. für den Heizbetrieb.

Der Brennstoffzellenbus wird wegen der hohen Kosten, der vergleichsweise geringen Lebensdauer der Brennstoffzelle und des vergleichsweise niedrigen Antriebswirkungsgrads in dieser Arbeit nicht betrachtet.<sup>156</sup>

Innerhalb der Batteriebuskonzepte werden die Konzepte mit Depotladung, Gelegenheitsladung mit stationärer Nachladung (konduktiv automatisch sowie induktiv) und Batteriewechsel näher untersucht. Das Konzept mit Oberleitung erfordert ohne vorhandene Oberleitungen hohe Infrastrukturinvestitionen und ist städtebaulich schwierig durchzusetzen.<sup>157</sup> Neben den baurechtlichen Aspekten spielt auch die politische und gesellschaftliche Akzeptanz bei einer Neuerrichtung eine Rolle. Daher wird dieses Konzept im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Die in dieser Arbeit untersuchten Konzepte sind in Abbildung 26 zusammengefasst.

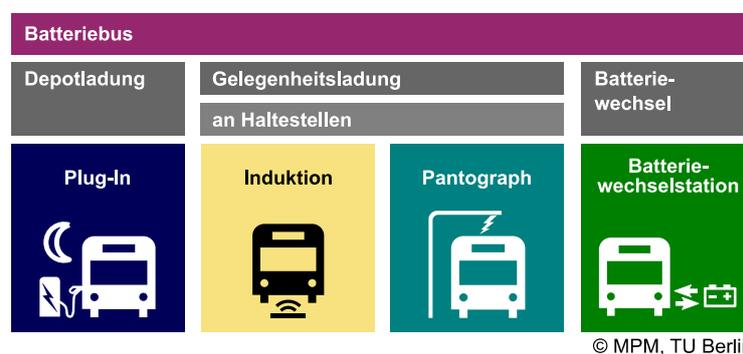


Abbildung 26: Betrachtete elektrische Bussysteme dieser Arbeit<sup>158</sup>

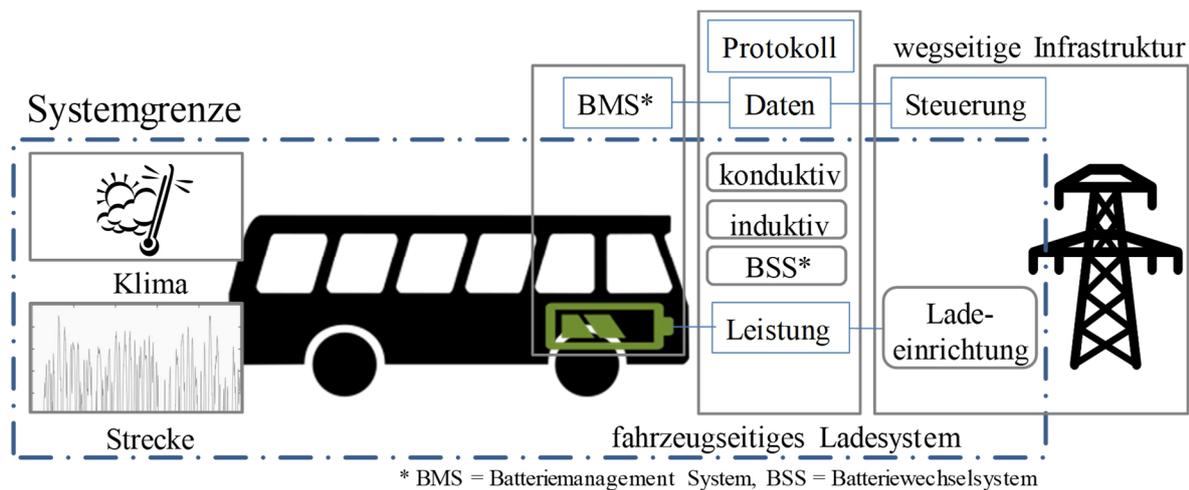
Die in Abbildung 26 beschriebenen Konzepte werden neben dem Betriebskonzept im Wesentlichen durch das Energiezuführungssystem (Kapitel 2.2.2) bestimmt. Ein weiterer wesentlicher Faktor ist die Batterie. Ihre Auslegung ist komplex und muss unter Berücksichtigung des Energieübertragungssystems und der vorherrschenden Rahmenbedingungen erfolgen. Das Konzept Pantograph umfasst zwei Varianten: der Stromabnehmer auf dem Dach des Busses und die invertierte Variante mit dem Pantographen im Lademast. Der Unterschied liegt damit im zusätzlichen Gewicht im Fahrzeug (vgl. Kapitel 2.2.2). Das Mehrgewicht im Fahrzeug ist für die Auslegung der Batterie schwerwiegender, daher wird diese Variante im Weiteren betrachtet.

<sup>156</sup> Vgl. Kapitel 2.1.1, S. 7

<sup>157</sup> Vgl. Kurpjuweit 2015

<sup>158</sup> Darstellung des MPM Fachgebiets

Im Rahmen dieser Arbeit sollen Auswirkungen der unterschiedlichen Batterietypen und des Energieübertragungssystems auf das Gesamtsystem näher untersucht werden. Abbildung 27 zeigt die betrachtete Systemgrenze. Sie umfasst neben dem Fahrzeug und der Infrastruktur die Rahmenbedingungen wie das vorherrschende Klima und die zu fahrende Strecke. Die Stromtrasse symbolisiert das Netz, denn im Rahmen dieser Arbeit sollen die Treibhausgasemissionen über den gesamten Kraftstoffpfad, also von der Primärenergie über die Produktion, den Transport und die Verteilung bestimmt werden.



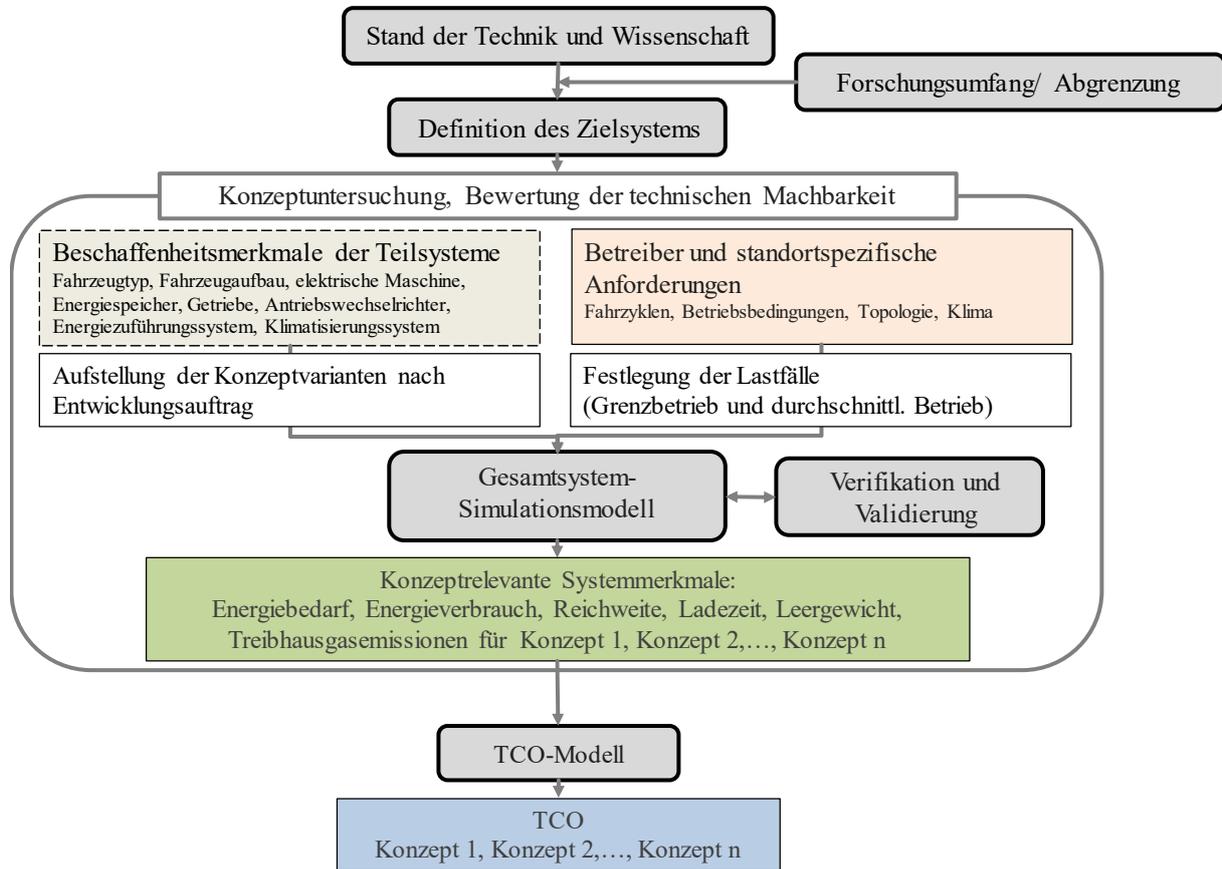
**Abbildung 27: Betrachtetes E-Bus-System und Systemgrenze**

Wie bereits in Kapitel 2.3.2 beschrieben, besteht auf Grund der Komplexität des Produkts und der Vielzahl an kundenwerten Merkmalen die Gefahr der Erzeugung nicht mehr handhabbarer und unüberschaubarer Datenmengen. Lindemann<sup>159</sup> schlägt daher vor sich in diesem Fall auf die Betrachtung von Teilsystemen zu begrenzen, die sich durch ihren Neuheitsgrad auszeichnen. In Tabelle 2, Seite 8, wurde die Produktstruktur eines elektrisch betriebenen Busses beschrieben und die Komponenten hervorgehoben, die durch die Elektrifizierung wesentlichen Änderungen unterliegen. Auf diese Komponenten wird im Folgenden die Betrachtung begrenzt. Außerdem, wie in der Abbildung zu sehen, liegt die Steuerung, das Protokoll und die Datenübertragung sowie das BMS außerhalb der betrachteten Systemgrenze, die Informations- und Kommunikationstechnik sind nicht Gegenstand dieser Arbeit. Folglich werden auch diese Systemeigenschaften hier nicht betrachtet. In Tabelle 9 wurden die kundenwerten Merkmale in der Entwicklung elektrisch betriebener Busse aufgelistet. Ebenso wie bei der Produktstruktur wird bei den kundenwerten Merkmalen der Fokus auf die Merkmale gesetzt, die durch die Elektrifizierung wesentlichen Änderungen unterliegen. Schließlich wurde in der Forschungsfrage a aufgeführt, dass die kundenwerten Merkmale quantitativ oder qualitativ bewertet werden können. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Fokus auf die quantitative Bewertung gelegt.

<sup>159</sup> Vgl. Lindemann 2009, S. 124

### 3.4 Vorgehensmodell

Nachdem in Kapitel 3.2 die Forschungsfragen und in Kapitel 3.3 die Abgrenzung der Arbeit aufgezeigt wurden, wird in diesem Abschnitt das Vorgehensmodell der technisch wirtschaftlichen Bewertungsmethodik vorgestellt (siehe Abbildung 28).

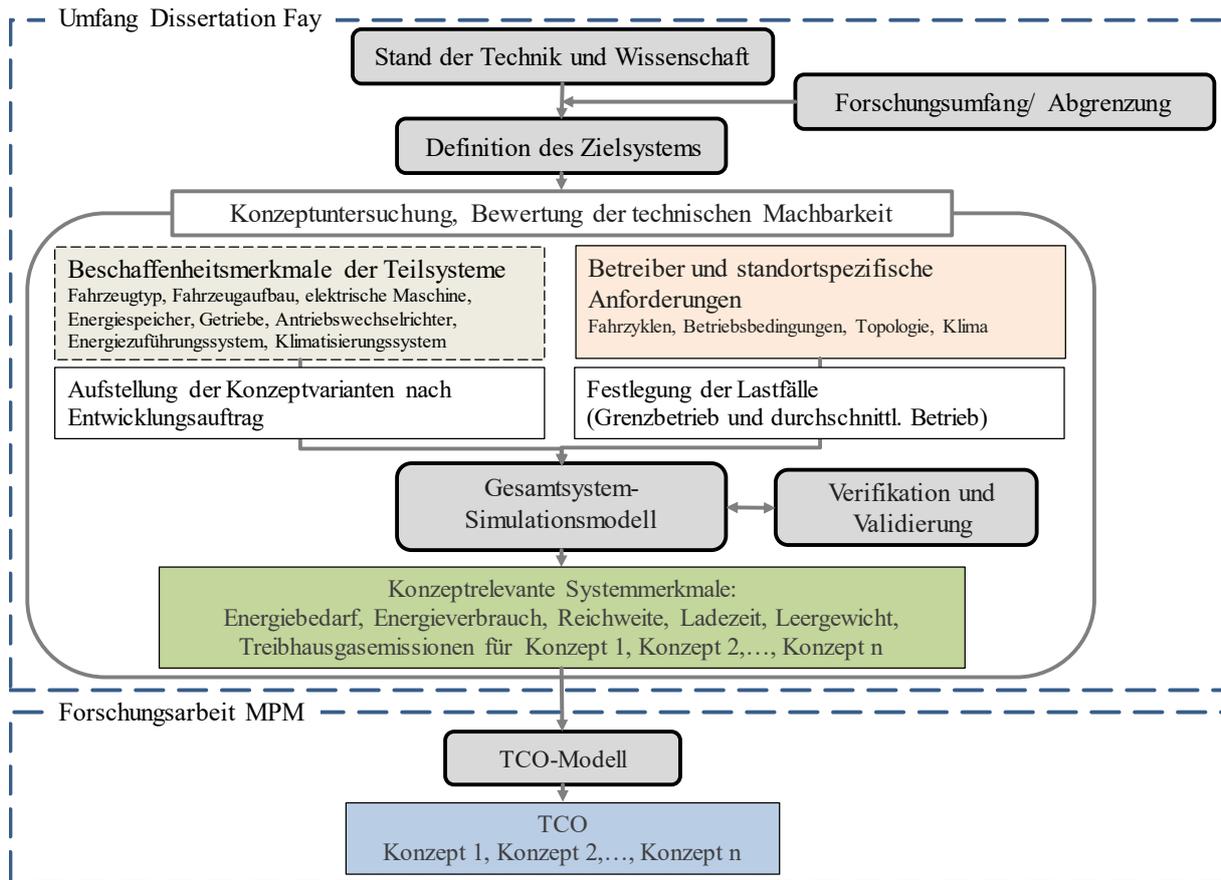


**Abbildung 28: Vorgehensmodell der technisch wirtschaftlichen Bewertungsmethodik**

Der Umfang dieser Dissertation ist in Abbildung 29 dargestellt. Die Arbeit umfasst die Konzeptuntersuchung und Bewertung der technischen Machbarkeit, angefangen vom Stand der Technik über die Definition des Zielsystems.

Die unter technischen Gesichtspunkten machbaren Systeme müssen in einem zweiten Schritt auch wirtschaftlich bewertet werden. Diese wird über weitere Arbeiten am Fachgebiet MPM abgebildet.<sup>160</sup>

<sup>160</sup> Vgl. Spangenberg 2014, Kunith 2017; Jefferies und Göhlich 2018



**Abbildung 29: Umfang der Dissertation**

## 4. Entwicklung des Zielsystems

Im Kapitel 2.3.2 wurden allgemeine Ziele und Werte in der Technikbewertung beschrieben und Merkmale aus Kundensicht zusammengetragen. Ferner wurde für die Entwicklung von Elektrobussen die kundenwertigen Merkmale zusammengestellt. Die für die Elektrifizierung relevanten Merkmale aus Kundensicht werden im Folgenden näher beschrieben und mit den Merkmalen des zu entwickelnden Produkts verknüpft. Anschließend werden sie nach ihrer Bewertbarkeit kategorisiert. Da nur die quantitativ bewertbaren Merkmale weiterverfolgt werden, erfolgt abschließend eine Zusammenfassung. In Kapitel 4.2 werden die Wechselwirkungen zwischen den Merkmalen analysiert und es erfolgt basierend auf dem Entwicklungsauftrag die Identifikation der konzeptrelevanten Merkmale.

### 4.1 Erläuterung kundenwertige Merkmale

Die **Fahreigenschaften** beschreiben den ruckfreien Verlauf des Brems – und Beschleunigungsmoments. Der Verlauf ist abhängig von der Steuerung des Motors und der Kopplung mit dem Getriebe. Es sind subjektiv erfahrbare Eigenschaften und werden daher qualitativ mit einer Note bewertet.

Die **Bedienbarkeit des Fahrzeugs** wird durch die Fahrerinformation und die Sichtbarkeit der Anzeigen bewertet. Dies hängt zusammen mit dem Design der Anzeigen und den Bedienelementen und wird qualitativ bewertet.

**Ökologie und Klimaschutz** wird über die Treibhausgasemissionen bewertet. Diese entstehen im gesamten Lebenszyklus des Fahrzeugs und können über eine Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Analysis) bestimmt werden. Im Rahmen des E-Bus Berlin Projekts wurde diese Analyse durchgeführt und festgestellt, dass bei einem Betrieb über 12 Jahre die Emissionen im Betrieb ausschlaggebend sind. Beim Diesel macht der Betrieb 98% und beim Elektrobuss mit deutschem Strommix 2015 bei 95 % der Emissionen aus.<sup>161</sup> Im Rahmen dieser Arbeit werden daher über die Well-to-Wheel Analyse nur die Treibhausgasemissionen für den Betrieb bestimmt. Diese sind abhängig vom Gesamtverbrauch des Fahrzeugs und dem verwendeten Strommix über die gefahrenen Kilometer während der Nutzungszeit. Die Einheit ist gCO<sub>2</sub>eq/km.

Die Anforderungen an den **Klimakomfort** haben sich durch geänderte Rahmenbedingungen verschärft. Um den Energieverbrauch zu senken, werden verschiedene Maßnahmen untersucht.<sup>162</sup> Zur Beurteilung des Klimakomforts muss entsprechend das Aufheiz- und das Abkühlverhalten bei definierten Außentemperaturen bestimmt werden. Es wird die Zeit gemessen bis eine entsprechende Soll-Innenraumtemperatur erreicht wird. Zusätzlich kann die Klimatisierung des Fahrerarbeitsplatzes getrennt von der Fahrgastkabine erfolgen, um den Klimakomfort für den Fahrer zu steigern.

---

<sup>161</sup> Vgl. Torzynski et al. 2016

<sup>162</sup> Vgl. Kapitel 2.2.3, S. 29

Der **Akustikkomfort** hängt von den Geräuschemissionen aller Komponenten auf und im Fahrzeug und deren Isolierungsmaßnahmen ab. Die Innen- und Außengeräusche werden nach ISO 5128 für ein Fahrspiel gemessen. Zusätzlich sind die Geräusche beim Anfahren und Abfahren an eine Haltestelle zu berücksichtigen. Die Einheit ist dB(A).

Die **Wirtschaftlichkeit** berücksichtigt die Gesamtkosten und wird über eine Total-Cost-of-Ownership Analyse bestimmt. Sie berücksichtigt die Investitionskosten für die Anschaffung der Busse und der Infrastruktur sowie die Betriebskosten. Diese umfasst die Energiekosten, die Emissionskosten, die Kosten für Instandhaltung und Wartung sowie das Personal. Die TCO wird in €/km angegeben.<sup>163</sup>

Die **Energieeffizienz** beschreibt die Verluste im System indem der Energiebedarf mit dem Energieverbrauch ins Verhältnis gesetzt wird. Der Energiebedarf für den Antrieb ergibt sich über die Fahrwiderstandsgleichung aus dem Fahrprofil und den erforderlichen Nebenverbrauchern wie Lenkhilfspumpe, der Energiebedarf für das Klimatisieren ergibt sich aus dem Heiz- und Kühlbedarf, der über die Einstellung einer gewünschten Innenraumtemperatur, der vorherrschenden Außentemperatur und abhängig von der Konstruktion des Fahrzeugaufbaus entsteht. Der Energieverbrauch ergibt sich über die zugeführte Energie beim Laden.

Die **Betriebstauglichkeit** wird über mehrere Merkmale definiert. Sie umfasst die Beförderungskapazität und die Produktivität eines Umlaufs über den Fahrplanwirkungsgrad<sup>164</sup>. Diese Merkmale sind von den Systemmerkmalen Leergewicht des Fahrzeugs und erforderliche Ladezeit an den Endhaltestellen abhängig. Über die mögliche Reichweite mit einer Ladung lässt sich die betriebliche bzw. planerische Flexibilität beurteilen. Sie bewertet die Möglichkeit, ob der Einsatz der Linie auf veränderten Routen (z.B. wegen einer Demonstration) machbar ist. Zusätzlich lässt sich die strategische Flexibilität, welche den Aufwand einer Versetzung der Infrastruktur bei zukünftigen Änderungen darstellt, über die Integration der Infrastruktur in den Straßenraum bewerten. Diese ist abhängig vom Flächenbedarf sowie möglichen Baumaßnahmen abhängig von der Technologie und der vorhandenen Stromversorgung. Die Beurteilung der vorhandenen Stromversorgung der zukünftigen Baumaßnahme ist abhängig von dem zukünftigen Ort, daher lässt sich die strategische Flexibilität in der Entwicklungsphase nicht quantitativ bestimmen. Ein weiterer Aspekt der Betriebstauglichkeit ist die Komplexität des Ladevorgangs. Sie kann zwar über die Merkmale Positioniergenauigkeit der Ladeschnittstelle in Fläche und Winkel und die Anzahl der Freiheitsgrade bestimmt werden. Sie hängt aber maßgeblich mit der richtigen Schulung und der Erfahrung des Fahrzeugführers vom richtigen Anfahren an die Ladestation über die richtige Auslösung des Ladevorgangs über die Bedienelemente zusammen und ist damit stark subjektiv geprägt.

---

<sup>163</sup> Vgl. Kunith 2017, Kapitel 3.5; Göhlich et al. 2018

<sup>164</sup> Bei dem Fahrplanwirkungsgrad werden die Nutzwagenzeiten (geplante Fahrten) mit den Leerzeiten (Aussetzzeit, Einsetzzeit, Wartezeit, Standzeit) ins Verhältnis gesetzt, vgl. Nowacki 2012. Die Wartezeit und Standzeit wird für das Laden verwendet.

Die **Sicherheit** umfasst mehrere Aspekte, z.B. die Kippsicherheit, die Crashesicherheit, die Hochvoltsicherheit und die elektromagnetische Verträglichkeit. Anders als bei den Merkmalen vorher unterliegt die Ausprägung der Merkmale einer Minimalanforderung. Sie müssen basierend auf definierten Tests nachgewiesen werden, z.B. Kippsicherheit nach Richtlinie 2000/85/EG, und sind nicht Teil der weiteren Betrachtung. Zusätzlich wird die Sicherheit des Betriebs über die Zugänglichkeit der Ladeschnittstelle und die externe Störanfälligkeit der wegseitigen Infrastruktur bestimmt. Die Zugänglichkeit hat die Ausprägung ebenerdig, erhöht, unterflur bzw. unzugänglich, wenn die Ladestation auf nicht öffentlichem Gelände liegt. Die externe Störanfälligkeit wird über das Potential für Vandalismus und Blockierung eingeschätzt. Beide Merkmale zur Sicherheit des Betriebs sind nicht quantitativ bewertbar.

Die **Qualität** wird über die Werte Zuverlässigkeit im Langzeitverhalten und Verfügbarkeit bewertet und spiegeln den Entwicklungsgrad der Technologie sowie unvorhersehbare Zwischenfälle wider, unter anderem hängt es mit der Bedienung durch den Fahrer zusammen und ist eng verknüpft mit der Sicherheit des Betriebs. Die Qualität kann in der frühen Phase der Entwicklung nicht quantitativ bewertet werden.

Das Merkmal **Imagegewinn** gibt Auskunft darüber inwiefern die Mitarbeiter durch den Einsatz innovativer Technologien motiviert werden und wie diese die Außenwirkung des Unternehmens beeinflussen. Diese werden qualitativ über Umfragen mit Mitarbeitern wie zum Beispiel Werkstattpersonal und Busfahrer sowie Fahrgäste ermittelt.

Tabelle 12 listet die Merkmale und kategorisiert diese nach ihrer Bewertbarkeit.

**Tabelle 12: Kundenwerte Merkmale und Klassifizierung ihrer Bewertbarkeit**

Kundenwerte Merkmale	Einheit	Bewertbarkeit frühe Entwicklungsphase
Fahreigenschaften	Note	qualitativ
Bedienbarkeit Fahrzeug	Note	qualitativ
Ökologie und Klimaschutz	gCO <sub>2</sub> eq/km	vollständig quantitativ
Klimakomfort	min	vollständig quantitativ
Akustikkomfort	dB(A)	vollständig quantitativ
Wirtschaftlichkeit	€/km	vollständig quantitativ
Energieeffizienz	%	vollständig quantitativ
Betriebstauglichkeit	divers	teilweise quantitativ
Sicherheit	Note	qualitativ
Qualität		qualitativ
Imagegewinn	Note	qualitativ

Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, wird in dieser Arbeit der Fokus auf die quantitativ bewertbaren Kundenmerkmale gelegt. Diese werden im Folgenden mit dem entsprechenden Relationsmerkmal zusammengefasst.

**Tabelle 13: Zusammenhang zwischen kundenwerten Merkmalen und Relationsmerkmalen**

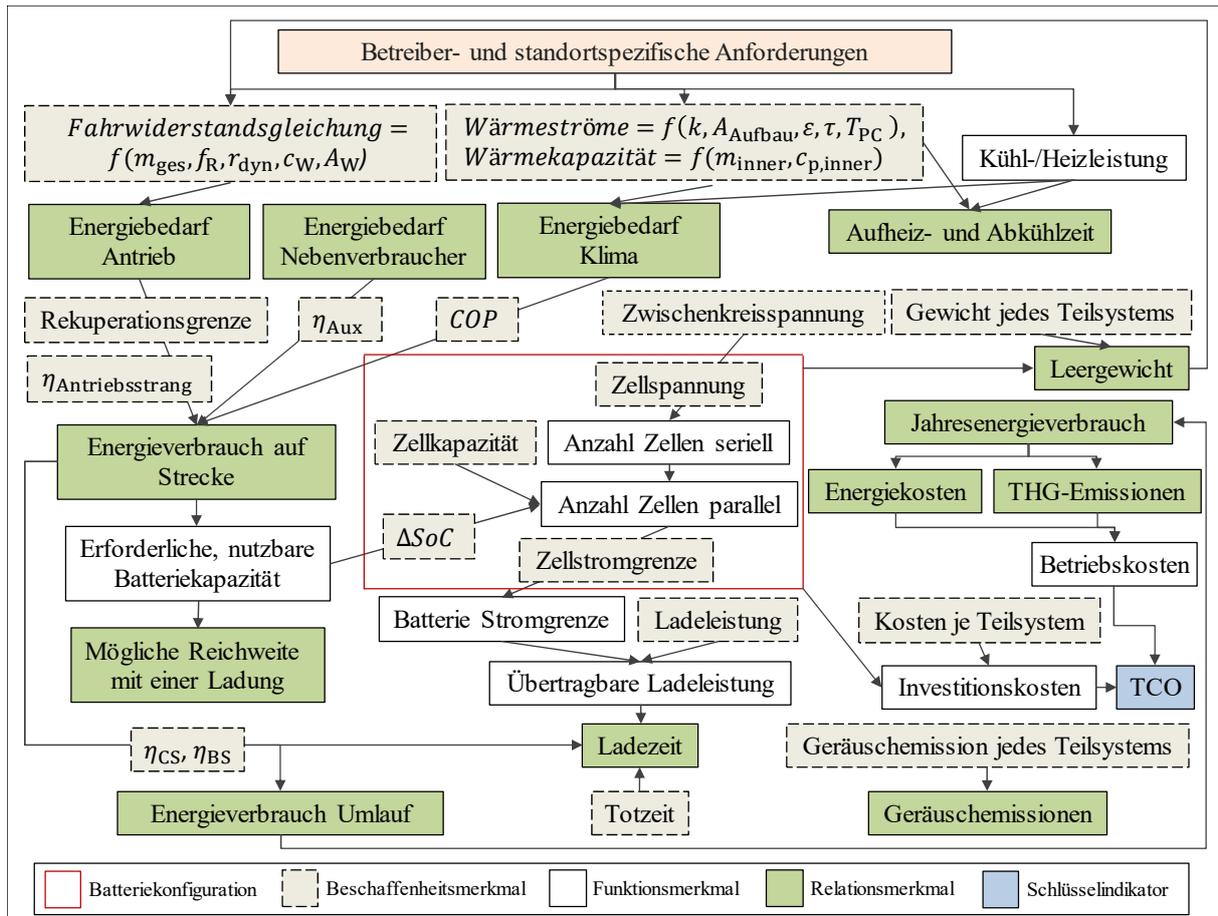
Kundenwerte Merkmale		Relationsmerkmal
Ökologie und Klimaschutz		Treibhausgasemissionen
Klimakomfort		Aufheiz- und Abkühlzeit
Akustikkomfort		Geräuschemissionen
Wirtschaftlichkeit		TCO
Energieeffizienz		Energiebedarf Energieverbrauch
Betriebstauglichkeit	planerische Flexibilität	Mögliche Reichweite mit einer Ladung
	Beförderungskapazität	Leergewicht
	Produktivität des Umlaufs über Fahrplanwirkungsgrad	Erforderliche Ladezeit

## 4.2 Ableitung der konzeptrelevanten Systemmerkmale

Wie in Kapitel 4.1 beschrieben, lassen sich Merkmale aus Kundensicht mit Merkmalen des zu entwickelnden Produktes verknüpfen. Diese Merkmale sind Relationsmerkmale des betrachteten Systems und sind Folgegrößen, die sich aus den Beschaffenheitsmerkmalen der Teilsysteme ergeben. Zur Bestimmung dieser Relationsmerkmale ist es erforderlich das Gesamtsystem zu betrachten und die Wechselwirkungen zwischen den Teilsystemen zu identifizieren.

Es wird an dieser Stelle die Methode der relationsorientierten Funktionsmodellierung angewendet.<sup>165</sup> Wegen der hohen Komplexität des Systems erfolgt die Darstellung in einer netzwerkartigen Struktur. Die wesentlichen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zeigt Abbildung 30. Die verwendeten Abkürzungen sind in Tabelle 14 erläutert.

<sup>165</sup> Vgl. Lindemann 2009, S. 119 ff und S. 301



**Abbildung 30: Wesentliche Abhängigkeiten zwischen Relations- und Beschaffenheitsmerkmalen**

Aus Abbildung 30 wird ersichtlich, dass die Relationsmerkmale teilweise in einer Konkurrenzbeziehung zueinander stehen. So bedeutet eine höhere planerische Flexibilität eine höhere Reichweite über eine größere Batterie. Dies steht in Konkurrenz mit einem niedrigen Leergewicht für eine höhere Beförderungskapazität. Diese Konkurrenzbeziehungen müssen bei der weiteren Entwicklung berücksichtigt werden. Des Weiteren kann der Abbildung entnommen werden, dass die aufgezeigten Relationsmerkmale in einen Schlüsselindikator TCO einfließen. So ergibt sich aus der Batteriekonfiguration eine erforderliche Batteriekapazität und dies beeinflusst die Investitionskosten. Der durchschnittliche Energieverbrauch wird u.a. vom Batteriegewicht beeinflusst und bestimmt die Energiekosten, welche Teil der Betriebskosten sind.

**Tabelle 14: Verwendete Symbole und Abkürzungen in Abbildung 28**

Symbol	Bedeutung
$m_{\text{ges}}$	Masse des Fahrzeugs inklusive Fahrer und Fahrgäste
$f_R$	Rollwiderstandsbeiwert
$r_{\text{dyn}}$	Dynamischer Reifenradius
$c_W$	Luftwiderstandsbeiwert
$A_W$	Anströmfläche für Luftwiderstand
$k$	Wärmedurchgangskoeffizient, abhängig vom Aufbau der Wand und der Fenster
$A_{\text{Aufbau}}$	Fläche des Aufbaus für die Berechnung der Wärmeströme
$\varepsilon$	Emissionsgrad
$\tau$	Transmissionsgrad
$T_{\text{PC}}$	Kabinentemperatur
$m_{\text{inner}}$	Masse der Innenausstattung, thermische Masse
$c_{p,\text{inner}}$	spezifische Wärmekapazität
$\eta_{\text{Antriebsstrang}}$	Wirkungsgrad des Antriebsstrangs, Produkt aus Wirkungsgrad des Motors, des Getriebes, des Wechselrichters und der Batterie.
$\eta_{\text{Aux}}$	Wirkungsgrad der Nebenverbraucher
$\eta_{\text{CS}}$	Wirkungsgrad des Energiezuführungssystems
$\eta_{\text{BS}}$	Wirkungsgrad der Batterie
$COP$	Leistungszahl (Coefficient of Performance)
$\Delta SoC$	Ladezustandsfenster (Delta State of Charge)
THG	Treibhausgas

Nachdem nun die Abhängigkeiten und Wechselwirkungen analysiert wurden, werden die kundenwerten Merkmale mit der Produktstruktur über eine Beziehungsmatrix in Verbindung gebracht. Dies zeigt Abbildung 31, dabei wurde das Leergewicht dem Gesamtfahrzeug zugeordnet und die Kosten jeder Komponente auf jedes Teilsystem verteilt. Mit der Beziehungsmatrix können anschließend die Module und Komponenten identifiziert werden, die einen Einfluss auf ein bestimmtes Merkmal haben. Zur Zielerreichung sind diese Module und Komponenten näher zu betrachten. Ebenso können wie in dieser Arbeit vorgesehen mit dieser Matrix Lösungsalternativen bewertet werden, indem die Auswirkung auf die Systemeigenschaften gegenübergestellt werden.

Beziehungsmatrix Produktstruktur - Kundenwerte Merkmale Beispiel	Gesamtfahrzeug	Motor	Batteriesystem	Getriebe	Wechselrichter	Fahrwerk	Fahrzeugaufbau	Fahrerarbeitsplatz	Klimatisierungssystem	Versorgungsanlage	Bordnetz	Energieübertragungssystem
Ökologie und Klimaschutz	x	x	x	x	x	x	x		x		x	x
Klimakomfort		x					x		x			
Akustikkomfort		x		x	x	x	x		x			
Energieeffizienz	x	x	x	x	x	x	x		x		x	x
Betriebstauglichkeit	x		x									x
Wirtschaftlichkeit	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

**Abbildung 31: Beziehungsmatrix Produktstruktur-Kundenwerte Merkmale**

Wie in Kapitel 3.3 erläutert, sollen im Rahmen dieser Arbeit die Auswirkungen der unterschiedlichen Batterietypen und des Energieübertragungssystems auf das Gesamtsystem näher untersucht werden. Aus Abbildung 32 ergeben sich die relevanten kundenwerten Merkmale.

Beziehungsmatrix Produktstruktur - Kundenwerte Merkmale Beispiel	Gesamtfahrzeug	Motor	Batteriesystem	Getriebe	Wechselrichter	Fahrwerk	Fahrzeugaufbau	Fahrerarbeitsplatz	Klimatisierungssystem	Versorgungsanlage	Bordnetz	Energieübertragungssystem
Ökologie und Klimaschutz	x	x	x	x	x	x	x		x		x	x
Klimakomfort		x					x		x			
Akustikkomfort		x		x	x	x	x		x			
Energieeffizienz	x	x	x	x	x	x	x		x		x	x
Betriebstauglichkeit	x		x									x
Wirtschaftlichkeit	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

**Abbildung 32: Ableitung der konzeptrelevanten kundenwerten Merkmale**

Die konzeptrelevanten kundenwerten Merkmale und die zugehörigen Relationsmerkmale sind in Tabelle 15 zusammengefasst. Diese sind die Treibhausgasemissionen, der Energiebedarf und –verbrauch, die mögliche Reichweite mit einer Ladung, das Leergewicht und die erforderliche Ladezeit.

**Tabelle 15: Konzeptrelevante Systemmerkmale**

Kundenwerte Merkmale		Relationsmerkmal
Ökologie und Klimaschutz		Treibhausgasemissionen
Energieeffizienz		Energiebedarf Energieverbrauch
Betriebstauglichkeit	planerische Flexibilität	Mögliche Reichweite mit einer Ladung
	Beförderungskapazität	Leergewicht
	Produktivität des Umlaufs über Fahrplanwirkungsgrad	Erforderliche Ladezeit
Wirtschaftlichkeit		Schlüsselindikator TCO

Der durchschnittliche Gesamtenergieverbrauch geht in die Energiekosten als Teil der Betriebskosten ein. Die Betriebs- und Investitionskosten fließen diese in die Total-Cost-of-Ownership- Analyse (TCO-Analyse) ein.

### 4.3 Bestimmung der Zielwerte

Nachdem die konzeptrelevanten Merkmale vorliegen, ist für das Zielsystem und die weitere Entwicklung die Ausprägung der Merkmale festzulegen. Dies geschieht in Relation zu Wettbewerbsprodukten. Hierfür wurden in erster Linie der ZeEUS eBus Report #2, Veröffentlichungen in entsprechenden Zeitschriften wie Omnibus Spiegel und Auswertungen der Arbeitsgruppe „Innovative Antriebe Bus“ herangezogen. Es ist festzuhalten, dass die Ausprägungen nicht immer vollumfänglich vergleichbar sind, da die Umstände unter denen die Ausprägungen ermittelt wurden, nicht gleich und nicht immer bekannt sind, z.B. gleiche Linie, ähnliche Verkehrsbedingung, Zeitraum der Untersuchung und damit klimatische Randbedingung. Dennoch wird an dieser Stelle versucht, eine kurze Zusammenfassung zu geben.

#### Energieverbrauch und mögliche Reichweite

In der Literatur wird entweder der Energieverbrauch in kWh/km oder die Reichweite in km angegeben, wobei der Energieverbrauch für die Betriebsstrategie Gelegenheitsladen und die Reichweite für Depotladung angegeben wird. Dies ist sinnvoll, da das Merkmal Energieverbrauch beim Gelegenheitsladen zu verstehen gibt, wie weit der Bus fahren kann bis er wieder aufgeladen werden muss. Die Linienlänge liegt zwischen 4,4 km und 12,4 km.<sup>166</sup> Die Reichweite ist theoretisch unendlich, da der Bus an den Endhaltestellen immer wieder aufgeladen wird und somit theoretisch unendlich lange fahren könnte. Die Reichweite bei Depotladung ist begrenzt und die Angabe erlaubt eine Einschätzung, auf welcher Linie der Bus einsetzbar ist.

<sup>166</sup> Vgl. ZeEUS 2017, 4,4 km in Tampere, Finnland und 12,4 km in Turku, Finnland

Der Energieverbrauch für 12 m Batteriebusse wird in der Literatur zwischen 0,8 kWh/km und 1,5 kWh/km als Fahrverbrauch nach SORT 2 bzw. SORT 1<sup>167</sup> angegeben. Hybricon Bus System gibt für seinen Bus in Umea, Schweden einen gemessenen Verbrauch von 1,3 bis 2,2 kWh/km an.<sup>168</sup> Die Messung erfolgte über ein Jahr im städtischen Betrieb und Dieselizeinsatzheizung. Der E-Bus im E-Bus Berlin Projekt verbrauchte während eines Jahres mit elektrischer Heizung im monatlichen Schnitt zwischen 1,33 kWh/km und 2,42 kWh/km (bei -5°C Außentemperatur). Der gemessene Maximalwert lag bei 3,33 kWh/km.<sup>169</sup>

Die Reichweite für 12 m Busse wird in der Literatur zwischen 115 km und 320 km angegeben. Tabelle 16 gibt einen Überblick.

**Tabelle 16: Literaturangaben zu Reichweiten für Batteriebusse mit Depotladung<sup>170</sup>**

Bustyp	Reichweite	Testbedingung Bemerkung	Batterie
Hunan TEG6125BEV03	115 km	full loaded, air-conditioned, city bus cycle	182.5 kWh LFP
Rampini E12	120/130 km	public urban service	180 kWh LFP
Bolorré Bluebus 12	180 km	Line 21, RATP, Paris	240 kWh Lithium-Metall-Polymer (LMP)
BYD ADL Enviro200EV	250 km	London route 507, 521	324 kWh LFP
Yutong E12LF for UK	305 km	Under SORT	295 kWh LFP
BYD 12m Overseas	320 km	Under SORT	324 kWh LFP

## Treibhausgasemissionen

Im E-Bus Berlin Projekt wurden die Treibhausgasemissionen bestimmt und mit den konventionellen Bussen, die vorher auf der Linie fahren, verglichen. Die konventionellen Busse verbrauchten im Schnitt 44 l/100 km, die E-Busse im Schnitt 1,68 kWh/km. Eine Auswertung der WTW Treibhausgasemissionen im Betrieb ergab, dass der Dieselsebus im Schnitt 1,4 kgCO<sub>2</sub>eq/km und der E-Bus mit deutschem Strommix 2015 1 kg CO<sub>2</sub>eq/km emittierte. Daraus ergibt sich eine Einsparung von etwa 30%. Unter der Annahme, dass der Strom aus Windkraft erzeugt wurde, konnte eine Einsparung von 98% (0,02 kgCO<sub>2</sub>eq/km) ausgemacht werden.<sup>171</sup>

<sup>167</sup> Standardised On-Road Test Cycle, Standardisierter Zyklus mit konstanten Geschwindigkeitsplateaus, vergleichbar mit NEFZ, SORT 1 hat ein Geschwindigkeitsplateau von 12 km/h und SORT 2 18 km/h

<sup>168</sup> Vgl. ZeEUS 2017, S. 133

<sup>169</sup> vgl. Torzynski et al. 2016

<sup>170</sup> Vgl. ZeEUS 2017

<sup>171</sup> Vgl. Torzynski et al. 2016

Neuere konventionelle Busse verbrauchen um die 38 l/100 km. Dies entspricht 1,2 kgCO<sub>2</sub>eq/km und für den E-Bus eine Ersparnis von immer noch 17%.

Die Treibhausgasemissionen sind proportional zum Energieverbrauch: 1,68 kWh/km ergeben 1 kg CO<sub>2</sub>eq/km, somit kann unter Verwendung des gleichen Strommix die Treibhausgasemissionen je Energieverbrauch berechnet 1 kg CO<sub>2</sub>eq werden.

$$THG_{\text{Faktor}} = \frac{1 \text{ kgCO}_2\text{eq/km}}{1,68 \text{ kWh/km}} = 0,595 \frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{kWh}} \quad (4)$$

## Leergewicht

Im Rahmen eines Internationalen Vergleichstests wurden 6 Batteriebusse gewogen. Die Busse brachten die in Tabelle 17 zusammengefassten Leergewichte auf die Waage:

**Tabelle 17: Literaturangaben zum realen Leergewicht von 12 m Batteriebussen** <sup>172</sup>

Bustyp	Leergewicht	Beförderungskapazität / Gesamtgewicht	Bemerkung
Linkker 13 Low Entry	10.290 kg	77/ 16.000 kg	50 kWh LTO Batterie Aluminium Aufbau
VDL Citea SLF-120 electric	12.600 kg	82/ 19.000 kg	122 kWh NMC Batterie Edelstahlgerippe und Sandwichdach, GFK Seitenwände
Sileo S12, Ausführung Bonn	12.850 kg	74/ 18.000kg	230 kWh LFP Batterie Stahlgerippe und Aluminium Seitenwände
Bolorré Bluebus 12, Ausführung RATP, Paris	12.890 kg	97/ 20.000 kg	240 kWh LMP Batterie Stahlgerippe und Aluminium Seitenwände
Ebusco 2.1, Ausführung Bremen	13.000 kg	79/ 18.500 kg	311 kWh LFP Batterie Stahlgerippe und Aluminium Seitenwände
Solaris Urbino 12 electric	13.790 kg	75/ 19.000 kg	240 kWh LFP Batterie Stahlgerippe und Aluminium Seitenwände
12 m Standardbus	15.000 kg	65/ 19.500 kg	34 Sitze und 4 Fahrgäste/m <sup>2</sup> Stehfläche, 11.600 kg + 3.400 kg für Komponenten der Elektrifizierung <sup>173</sup>

<sup>172</sup> Krämer und Hanke 2017

<sup>173</sup> Vgl. Kapitel 2.2.1, S. 20

## Erforderliche Ladezeit

Die erforderliche Ladezeit für Depotlader kann aus der Literatur ermittelt und nachvollzogen werden (siehe Tabelle 18), je nach Ladeleistung und Batteriegröße werden 1 h bis 6 h angegeben.

**Tabelle 18: Literaturangaben zu Ladezeiten für Batteriebusse mit Depotladung<sup>174</sup>**

Bustyp	Ladezeit	Ladeleistung	Batterie
Hunan TEG6125BEV03	1 h	150 kW	182.5 kWh LFP
Rampini E12 <sup>175</sup>	3 - 6 h	15-30 kW	180 kWh LFP
Bolorré Bluebus 12	5 h	50 kW	240 kWh LMP
BYD ADL Enviro200EV	4 h	80 kW	324 kWh LFP
Yutong E12LF for UK	5 h	60kW	295 kWh LFP
BYD 12m Overseas	4 - 4,5 h	2 x 40 kW	324 kWh LFP

Die Ladezeit bei Gelegenheitsladung an Endhaltestellen wird zwischen 2 min bis 12 min angegeben.<sup>176</sup> Diese Werte sind jedoch schwer ins Verhältnis zu setzen, da nicht spezifiziert wird, wie viel Energie in der Zeit nachgeladen wurde. Für das Gelegenheitsladen ist die zusätzliche Angabe einer Energieübertragungsrate in kWh/min sinnvoll. Im E-Bus Berlin Projekt beträgt diese etwa 3 kWh/min und die durchschnittliche Ladezeit 6 min.

## TCO

Die Ausprägung des TCO ist sehr stark von den betrachteten Kosten, den Eingangswerten und Randbedingungen abhängig. Werden zum Beispiel zusätzliche Personalkosten betrachtet, die durch die Mehrfahrten der Batteriebusse durch nicht ausreichende Reichweite entstehen? Wie werden Unsicherheiten berücksichtigt, z.B. Schwankungen im Ölpreis. Auf Grund der vielfältigen Abhängigkeiten können in diesem Abschnitt keine TCO Werte zusammenhangslos genannt werden, daher wird auf die Literatur verwiesen.<sup>177</sup>

---

<sup>174</sup> Vgl. ZeEUS 2017

<sup>175</sup> Anmerkung der Autorin. Die angegebene Ladezeit ist für die Ladeleistung und Batteriekapazität unrealistisch. Es sei denn, die Batterie wird nur zu 50 % aufgeladen.

<sup>176</sup> Vgl. ZeEUS 2017, Graz und Leipzig

<sup>177</sup> Eine umfangreiche TCO-Analyse für Elektrobuse ist in Kunith 2017 zu finden.

## 5. Betreiber- und standortspezifische Randbedingungen

In diesem Kapitel werden die die betreiberspezifischen und standortspezifischen Randbedingungen der zu elektrifizierenden Linie näher untersucht. Zu den betreiberspezifischen Randbedingungen zählen der Geschwindigkeitsverlauf der Linie, der geplante Umlauf sowie die Betriebszeit der Busse. Zu den standortspezifischen Randbedingungen gehören das vorherrschende Klima und die Topologie der Strecke.

Diese Randbedingungen werden in dieser Arbeit exemplarisch für den Standort Berlin und den Betreiber BVG zusammengetragen.

### 5.1 Fahrzyklen

Es gibt standardisierte Fahrzyklen zur Verbrauchs- und Emissionsmessung, die einen Geschwindigkeitsverlauf vorgeben und den Vergleich unterschiedlicher Fahrzeuge auf einem Rollenprüfstand ermöglichen. Fahrzyklen für Rollenprüfstände spiegeln Betriebsarten wider wie den Stadtverkehr oder den Vorortverkehr. Im Pkw Bereich ist der NEFZ und im Busbereich in Europa der SORT Zyklus als standardisierter Fahrzyklus zu nennen.

In Tietge et al. (2017) verglichen die Autoren den realen Verbrauch verschiedener Pkw mit dem nach NEFZ angegebenen. Die Auswertung der realen Verbräuche erfolgte für etwa 1,1 Millionen Fahrzeuge aus 8 europäischen Ländern und über 14 verschiedene Quellen.<sup>178</sup> Die Auswertung ergab, dass die realen Verbräuche nicht nur höher liegen als die auf der Basis des NEFZ ermittelten Verbrauchswerte, sondern, dass die mittlere Abweichung wächst (2001 8%, 2011 24% und 2015 40%)<sup>179</sup>. Um diesem Problem entgegenzuwirken, wurde weltweit versucht, realitätsnahe Fahrzyklen zu entwickeln. Diese basieren auf realen Fahrdaten und berücksichtigen Verkehrssituationen, das Fahrverhalten der lokalen Fahrer und indirekt die örtlichen Gegebenheiten, beziehen jedoch nicht explizit die Topologie der Strecke mit ein.<sup>180</sup>

In den folgenden Kapiteln wird ein Überblick zu standardisierten, realitätsnahen Fahrzyklen gegeben und auf die messtechnisch erfassten Fahrzyklen eingegangen.

#### 5.1.1 Standardisierte realitätsnahe Fahrzyklen

Eine umfangreiche Zusammenstellung zu standardisierten Fahrzyklen für Pkws, Vans, Motorräder, Lkws und Busse ist in Barlow et al.(2009) und Giakoumis (2017) zu finden.

---

<sup>178</sup> Vgl. ICCT - International Council on Clean Transportation 2017

<sup>179</sup> Tietge et al. 2016, S. 3

<sup>180</sup> Z.B. wurde in Europa im September 2017 der Worldwide Harmonized Light Duty Vehicles Test Cycle (WLTC) und die dazugehörige Testprozedur (WLTP) als verpflichtende Grundlage für die Typgenehmigung eingeführt. Dieser basiert auf realen Fahrdaten aus Asien, Europa und den USA und umfasst insgesamt 750.000 km an Messfahrten. Vgl. VDA Verband der Automobilindustrie 2017

Die Autoren um Barlow beschreiben insgesamt 256 Fahrzyklen, darunter sind 22 Busfahrzyklen. Giakoumis beschränkt sich auf die einflussreichsten Fahrzyklen für Verbrauchs- und Emissionsmessungen, die weltweit zum Einsatz kommen. Die sieben wesentlichen Fahrzyklen im Busbereich sind in Tabelle 19 zusammengefasst.

**Tabelle 19: realitätsnahe Bus-Fahrzyklen zur Verbrauchs- und Emissionsmessung<sup>181</sup>**

Fahrzyklus	Land	Beschreibung
Braunschweig Zyklus (BRA)	EU	Dieser Fahrzyklus wurde 1975 an der TU Braunschweig aus dem U.S. amerikanischen Rollenprüfstandszyklus für PKWs (FTP 75) entwickelt.
ADEME – RATP (ADEME)	EU	Der Zyklus wurde um das Jahr 2000 entwickelt und basiert auf der realen Buslinie 21 in Paris.
Manhattan Bus Cycle (MAN)	USA	Der Manhattan Zyklus wurde aus Fahrdaten von Bussen aus dem Kernbereich der Stadt New York generiert.
New York Bus Cycle (NYBus)	USA	Dieser Zyklus wurde in den 80ern von der US EPA entwickelt und spiegelt den Verkehr in New York wider.
Orange County Bus Cycle (OCC)	USA	Der Fahrzyklus wurde von der West Virginia University entwickelt und basiert auf Fahrmustern von Stadtbussen in Los Angeles.
Japanese JE05 (JE05)	JA-PAN	Seit 2005 ist JE05 der Fahrzyklus für Verbrauchsmessungen für Fahrzeuge mit einem Leergewicht von über 3.500 kg. Er fußt auf den Randbedingungen in Tokyo.
Australian CUEDC (CUEDC)	Australien	Die Daten für diesen Fahrzyklus stammen aus Messungen in Sydney. Die Entwicklung der Composite Urban Emissions Drive Cycles (CUEDCs) wurde 1998 von der Australian National Environment Protection Commission beauftragt.

Tabelle 20 fasst die charakteristischen Parameter der Fahrzyklen zusammen.

Mit Hilfe der Parameter lassen sich die Zyklen in Gruppen einteilen. Der New York Bus, der ADEME–RATP und der Manhattan Bus Zyklus spiegeln die Verkehrssituation in Megastädten wider, wobei der New York Bus Zyklus die Situation Stau berücksichtigt. Der Braunschweig und der Orange County Bus Zyklus beschreiben den Verkehr in mittelgroßen Städten oder in Randgebieten, hier ist das Verkehrsaufkommen reduziert und der Abstand zwischen den Stopps vergrößert sich. Der japanische JE05 und der australische CUEDC Zyklus sind Vorortzyklen, sie sind durch hohe Geschwindigkeiten, wenig Beschleunigungsvorgänge und seltene Stopps je Kilometer gekennzeichnet.

<sup>181</sup> Vgl. Barlow et al. 2009; Giakoumis 2017

**Tabelle 20: charakteristische Parameter der realitätsnahen Fahrzyklen**

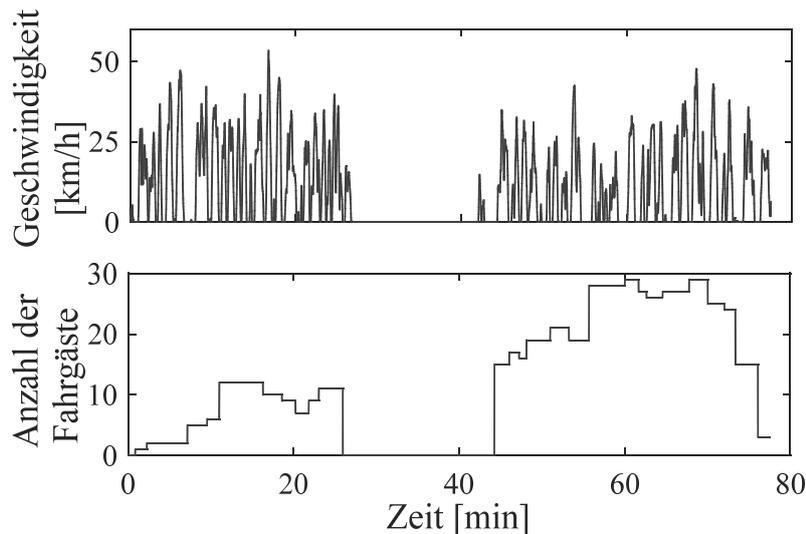
	Megastadt			Mittelgr. Stadt bzw. Randgebiet		Vorort	
	NYBus	ADEME	MAN	BRA	OCC	JE05	CUEDC
Dauer [s]	600	1898	1089	1740	1909	1829	1677
Strecke [km]	0,98	5,68	3,32	10,87	10,5	13,89	14,39
Maximalge- schwindigkeit [km/h]	49,57	47,9	40,72	58,2	65,39	87,6	84,95
Durchschnittsge- schwindigkeit [km/h]	5,94	10,77	10,99	22,5	19,85	27,34	30,89
Durchschnittliche Fahrgeschwindig- keit $v'$ <sup>182</sup>	17,12	15,5	16,71	29,48	24,7	36,16	36,09
Beschleunigungs- vorgänge [1/km]	17 <sup>183</sup>	12,33	12,63	7,63	8,36	4,46	5,56
Stillstandszeit [%]	65	31	34	24	20	24	14
Stopps [1/km]	12,13	7,04	6,32	2,76	3,04	0,94	0,23

## 5.1.2 Gemessene Fahrzyklen

Für die Auslegung eines E-Bussystems, in dem die mitzuführende Energie und die erforderlichen Leistungsspitzen entscheidend sind für die Größe der Batterie, ist es notwendig die realen Verbräuche zu kennen, daher wurden auch Fahrzyklen messtechnisch erfasst. Die Kenntnis über den Geschwindigkeits- und Höhenverlauf, sowie das Fahrgastaufkommen erlauben eine gesamtheitliche Betrachtung der Linie und eine bedarfsgerechte energetische Auslegung des Gesamtsystems. Im Zuge der Zusammenarbeit mit der BVG und dem gemeinsamen Projekt E-Bus Berlin wurde die Linie messtechnisch untersucht. Die Messungen erfolgten anfangs mit Hilfe von GPS- (1 Hz) und GNSS (5 Hz) -Datenloggern und später über einen integrierten Datenlogger (Viricity, 10 Hz). Zusätzlich zur Geschwindigkeit wurden teilweise Türöffnungszeiten und die Fahrgästeinzahl mitgeloggt. Mit Hilfe der Türöffnungszeiten wurde der Geschwindigkeitsverlauf auf Plausibilität geprüft und gegebenenfalls korrigiert. Die Fahrgästeinzahl dient auch als Eingangsgröße für die Simulation. In Abbildung 33 ist eine Messung eines Umlaufes der Linie dargestellt.

<sup>182</sup>  $v'$  ist die Geschwindigkeit ohne Berücksichtigung der Stopp-Phasen

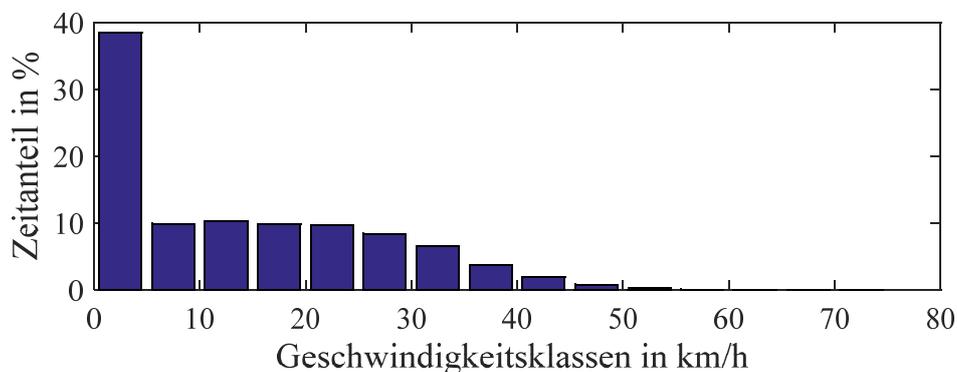
<sup>183</sup> Hier wurde die Quelle Reference Book verwendet, da in der ursprünglichen Quelle nicht plausible Werte stehen.



**Abbildung 33: Geschwindigkeitsverlauf und Fahrgastaufkommen während eines Umlaufs<sup>184</sup>**

Der erste Teil der Fahrt spiegelt einen durchschnittlichen Verlauf wider, während der zweite Teil ein erhöhtes Verkehrsaufkommen zeigt. Aus der Messung lässt sich auch der Einfluss des Fahrgastaufkommens auf das Geschwindigkeitsprofil ablesen. Ein hohes Fahrgastaufkommen bedingt teilweise längere Standzeiten insbesondere an Hauptverkehrsknotenpunkten (z.B. Haltestelle mit Anschluss an U-Bahn oder S-Bahn, vgl. 56. Minute).

Abbildung 34 zeigt die Auswertung der Zeitanteile in den Geschwindigkeitsklassen von 32 Umläufen der Linie.<sup>185</sup>



**Abbildung 34: Auswertung von 32 Umläufen der Linie, bereinigt um die Endhaltestellenaufenthalte**

Die Auswertung weist einen hohen zeitlichen Anteil in der Klasse 0 – 5 km/h auf und spiegelt damit die häufigen Stillstandsphasen an Ampeln, Haltestellen und Kreuzungen aber auch den Stop-and-Go-Betrieb wider. Es folgen relativ gleichmäßige Zeitanteile bis 30 km/h und danach ein langsames abflachen.

<sup>184</sup> Die Dauer eines Umlaufs beträgt 62 min ohne den Endhaltestellenaufenthalt, Durchschnittsgeschwindigkeit  $v = 9,7$  km/h (12,2 km/h ohne den Endhaltestellenaufenthalt),  $v' = 17$  km/h

<sup>185</sup> 12 Umläufe wurden mit dem GPS Sensor und 20 Umläufe mit dem GNSS-Sensor aufgenommen

Vergleicht man die Charakteristik der Linie<sup>186</sup> mit den standardisierten Fahrzyklen in Tabelle 20, so kann die Linie der Kategorie Megastadt zugeordnet werden.

## 5.2 Betriebsbedingungen

Der Fahrgast sieht an der Bushaltestelle einen Fahrplan, der ihm mitteilt zu welcher Uhrzeit und in welcher Taktung die Busse kommen. Zusätzlich ist die Fahrzeit von Haltestelle zu Haltestelle in Minuten angegeben. Der Betrieb einer Buslinie (in Deutschland) wird über Umlaufpläne geregelt. Auf jeder Linie ist festgelegt wie viele Busse fahren und wie die Einsatzzeiten sind. Hierzu gehört auch, dass die Busse morgens vom Depot zu einer vorgegebenen Endhaltestelle fahren (Einsetzfahrt) und abends wieder zurück (Aussetzfahrt). Über den Umlaufplan ist abhängig von der Anzahl der Busse, der Verkehrszeit<sup>187</sup> und der gewünschten Taktung die Standzeit an den Endhaltestellen geregelt.

Der Betriebstag für die untersuchte Linie beginnt um 5 h und endet um 22 h. Es wird angenommen, dass der Bus auch am Wochenende den gleichen Betriebsablauf hat. Die Einsetz- und Aussetzfahrt sowohl von der einen als auch von der anderen Endhaltestelle zum Betriebshof beträgt etwa 13 km. Aufgrund der Uhrzeit liegt ein geringeres Verkehrsaufkommen vor. Insgesamt absolviert ein Bus während des Betriebstages 11 Umläufe und damit insgesamt etwa 170 km. Die Standzeit an jeder Endhaltestelle beträgt etwa 10 min.

## 5.3 Topologie - Höhendaten und Bestimmung der Steigung

Das Höhenprofil einer Busroute kann von verschiedenen Webseiten ausgelesen werden.<sup>188</sup> Die Fahrstrecke wird in einer Karte von Google Maps nachgezeichnet und das Höhenprofil kann anschließend als txt-Datei abgespeichert werden. Die Datei umfasst vier Spalteneinträge: Strecke [km], Höhe [m], Breitengrad [°] und Längengrad [°] sowie 512 Zeileneinträge.

Die horizontale Auflösung der auf diese Weise gewonnenen Profildaten beträgt:

$$\text{Auflösung} = \frac{\text{Strecke [km]}}{512}$$

Dies bedeutet bei einer Länge von 6,3 km eine Auflösung von ca. 12 m.

---

<sup>186</sup> Durchschnitt der 32 Umläufe: Durchschnittsgeschwindigkeit 11,5 km/h (bzw. 13,5 km/h ohne Endhaltestellenaufenthalt, Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit 16,7 km/h, Dauer 3300 s (ohne Endhaltestellenaufenthalt), Strecke (Umlauf) 12,6 km

<sup>187</sup> Es wird unterschieden zwischen Haupt- und Nebenverkehrszeiten. Zur Hauptverkehrszeit ist mit einem erhöhten Verkehrs- und Fahrgastaufkommen zu rechnen, dem wird mit einer erhöhten Fahrzeit Rechnung getragen. Die Anpassung der Fahrzeit beruht auf Erfahrungswerten der Verkehrsplanungsstelle, vgl. auch Abbildung 33.

<sup>188</sup> Vgl. <http://geo.ebp.ch/gelaendeprofil/>, <https://www.arcgis.com/apps/Profile/index.html>

Beim Auslesen des Höhenprofils muss berücksichtigt werden, dass Straßen, die unter Brücken durchführen fehlerhafte Höhenangaben haben, da hier die Höhe der Brücke und nicht die der Straße angegeben wird.

Die Steigungswinkel für jeden Abschnitt werden über einen zentralen Differenzenquotienten und den Arkustangens ermittelt:

$$\alpha_i = \operatorname{atan}\left(\frac{h_{i+1} - h_{i-1}}{s_{i+1} - s_{i-1}}\right)$$

Zu berücksichtigen ist, dass der zurückgelegte Weg in km angegeben ist und eine Umrechnung in die Einheit Meter erfolgen muss.

Durch das schrittweise Differenzieren wird auch das Messrauschen verstärkt, daher wird der Steigungswinkel mit Hilfe eines Mittelwertfilters über 8 Werte (ca. 100 m) geglättet. Abbildung 35 zeigt das Ergebnis.

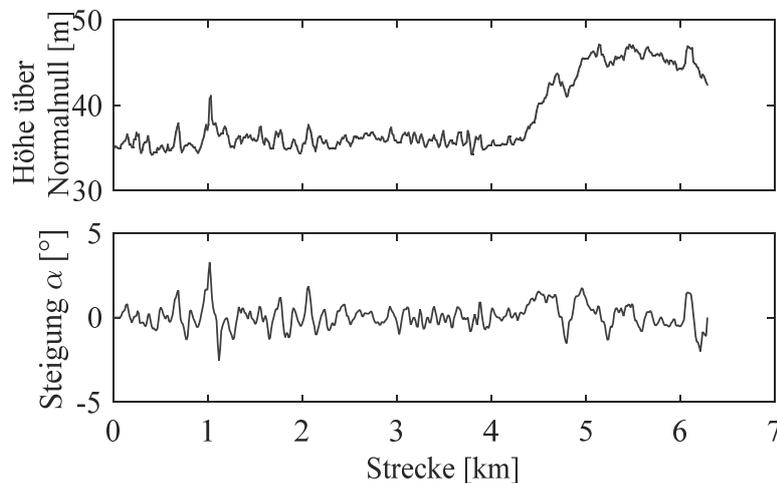


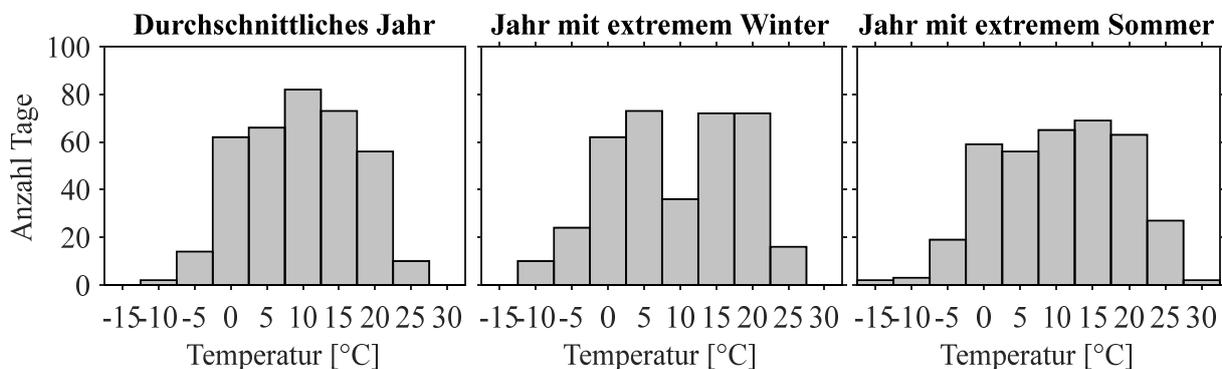
Abbildung 35: Höhenprofil und Steigungswinkel  $\alpha$  als Funktion der Strecke

## 5.4 Klima

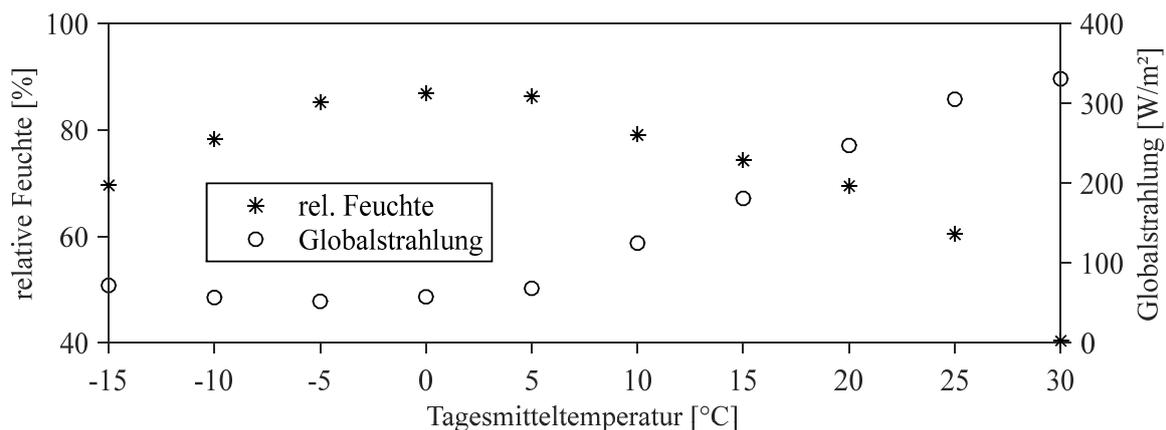
Der Energiebedarf durch Klimatisierung ist für den Fahrzeugeinsatz bei Außentemperaturen von  $-15^{\circ}\text{C}$  bis  $+40^{\circ}\text{C}$  zu bestimmen.<sup>189</sup> Zur Berechnung des durchschnittlichen Energiebedarfs muss die Häufigkeit des Auftretens bestimmter Temperaturen bekannt sein. Die Ermittlung der klimatischen Randbedingungen in Berlin kann über eine Anfrage bei der Freien Universität Berlin erfolgen. Der käuflich erwerbliche Datensatz beinhaltet für ein bestimmtes Jahr in stündlicher Auflösung die relative Feuchte, die Niederschlagssumme, die Lufttemperatur in 2 m Höhe und die stündliche Summe der Sonnenscheindauer sowie die stündlichen Mittelwerte der Globalstrahlung. Als weitere Quelle dienen die Testreferenzjahre (TRY) des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Diese enthalten den Jahresverlauf in stündlicher Auflösung von Tem-

<sup>189</sup> Vgl. Kapitel 2.2.3

peratur, Luftfeuchtigkeit und Globalstrahlung und weitere Parameter, die aus langjährigen Mittelwerten der Jahre 1988 bis 2007 gewonnen wurden. Bei dieser Quelle sind mehrere Klimazonen hinterlegt, Berlin liegt in der Zone 4, im nordostdeutschen Tiefland. Des Weiteren ist zusätzlich ein Jahr mit extremem Sommer und extremem Winter hinterlegt.<sup>190</sup> Die stündlichen Werte wurden für einen Betriebstag<sup>191</sup> zu einem Tagesmittelwert zusammengefasst und in 5 K Schritten gruppiert. Abbildung 36 zeigt die Histogramme eines durchschnittlichen Jahres, mit extremem Winter und extremem Sommer basierend auf den Daten von 1988 bis 2007. Abbildung 37 zeigt die relative Feuchte und Globalstrahlung als Funktion der Lufttemperatur basierend auf den Tagesmittelwerten durchschnittliches Jahr, Jahr mit extremem Winter und Jahr mit extremem Sommer. Für die weiterführende Untersuchung wurde das durchschnittliche Jahr verwendet. Die Zahlenwerte für die Eingangsdaten in die Simulation können dem Anhang A2 entnommen werden.



**Abbildung 36: Verteilung der Tagesmitteltemperatur für die drei Jahrestypen**



**Abbildung 37: Relative Feuchte und Globalstrahlung als Funktion der Lufttemperatur basierend auf den Tagesmittelwerten der drei Jahrestypen**

<sup>190</sup> Vgl. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2013

<sup>191</sup> Der Betriebstag ist je nach Umlaufplan unterschiedlich. Hier wurde ein Betriebstag von 4 bis 1 Uhr angenommen. Dies deckt mit 21 Std. Betriebsdauer 95 % der Flotte ab, vgl. Göhlich et al. 2018

## 6. Modellentwicklung

In diesem Kapitel wird das Simulationsmodell zur Untersuchung der konzeptrelevanten Systemeigenschaften vorgestellt. Zunächst wird das Ziel des Gesamtsystem-Simulationsmodells dargestellt. Die einzelnen Modell-Bestandteile werden anschließend hinsichtlich ihrer mathematischen Darstellung beschrieben und die vorgenommenen Einschränkungen aufgezeigt.

### 6.1 Ziel des Gesamtsystem -Simulationsmodells

Ausgehend von der Zielsetzung lassen sich der Modellzweck und die daraus resultierenden Anforderungen an das zu entwickelnde Simulationsmodell definieren. Mithilfe einer definierten Systemgrenze (vgl. Abbildung 27) lässt sich spezifizieren, welche Komponenten zu modellieren und wie welche Eingangsgrößen zu berücksichtigen sind. Mit Hilfe des Simulationsmodells sollen unterschiedliche Elektrifizierungskonzepte für Batteriebusse untersucht und bewertet werden können, daher muss das Modell modular und generisch aufgebaut sein. Im Vergleich zu den bereits vorhandenen Modellen in Kapitel 2.4. wird der Fokus bei diesem Modell auf die Untersuchung unterschiedlicher Energiezuführungssysteme und Batteriesysteme gelegt. Die Auswirkung dieser Teilsysteme auf das Gesamtsystem wird über definierte Systemeigenschaften analysiert. In Kapitel 4.2 wurden die konzeptrelevanten Systemmerkmale abgeleitet. Das Gesamtsystem-Simulationsmodell muss mithilfe der Beschaffenheitsmerkmale der Teilsysteme und unter Berücksichtigung der betreiber- und standortspezifischen Anforderungen diese quantitativen, konzeptrelevanten Systemmerkmale bestimmen.

Die wesentlichen Beschaffenheitsmerkmale zur Bestimmung der konzeptrelevanten Systemmerkmale sind in Abbildung 30 dargestellt und in Tabelle 14 beschrieben. Die Betreiber- und standortspezifischen Anforderungen sind die zu fahrenden Fahrzyklen, das Fahrgastaufkommen, das Höhenprofil und die klimatischen Randbedingungen. Diese sind in Kapitel 5 beschrieben.

Zur Bestimmung der Ausprägungen der Systemmerkmale Energiebedarf und Energieverbrauch sowie mögliche Reichweite und Ladezeit müssen im Modell alle relevanten energetischen Flüsse über Funktions- und Verlustmodelle abgebildet werden. Die Ausprägung des Merkmals Leergewicht ergibt sich aus der Summe der Gewichte der einzelnen Komponenten. Die Treibhausgasemissionen werden über den Jahresenergieverbrauch und den verwendeten Strommix bestimmt.

Die mit dem Gesamtsystem-Simulationsmodell bestimmten konzeptrelevanten Systemmerkmale fließen in den Schlüsselindikator TCO ein. Die TCO-Analyse erfordert ein separates TCO-Modell<sup>192</sup>, welches nicht Bestandteil dieser Arbeit ist. Vielmehr gehen

---

<sup>192</sup> Vgl. Kunith 2017

die Ergebnisse des hier entwickelten Gesamtsystem-Simulationsmodells als Eingangsdaten für die Bestimmung der vollumfänglichen Investitions- und Betriebskosten ein (vgl. Abbildung 28). Die hier vorgestellte Konzeptuntersuchung kann auch als Vorselektion verstanden werden: Ist die technische Machbarkeit nicht gegeben, wird das Konzept in der weiteren TCO-Analyse nicht berücksichtigt.

## 6.2 Gesamtsystem-Simulationsmodell

Wie in Kapitel 2.4 festgestellt, verwenden Systemmodelle mit Schwerpunkt in der thermischen Modellierung die Softwareumgebung Modelica/Dymola, während Modelle, die vorwiegend fahrdynamische Eigenschaften untersuchen, auf MATLAB/Simulink basieren. Durch die Untersuchung beider Eigenschaften in dieser Arbeit findet eine Kopplung von MATLAB/Simulink und Modelica/Dymola statt. Das Hauptdokument ist ein MATLAB-Skript. Dieses wird in Anhang A4 beschrieben.

Das Simulationsmodell besteht konkret aus einem Fahrmodell und einem Lademodell. Das Fahrmodell umfasst ein Längsdynamikmodell, ein thermisches Modell (in Modelica/ Dymola) und ein Batteriemodell. Abbildung 38 zeigt den Aufbau des Fahrmodells.

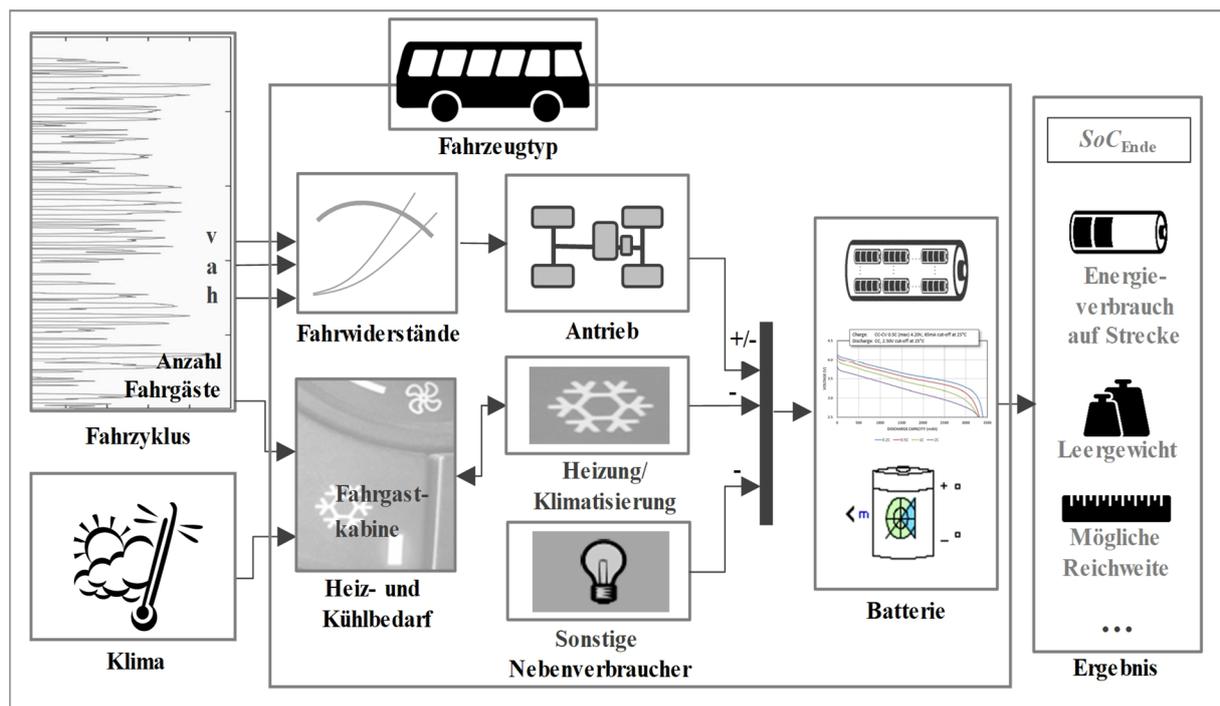


Abbildung 38: Aufbau des Fahrmodells

Mit Hilfe des Längsdynamikmodells werden die Fahrwiderstände aufgrund der Fahraufgabe und des Fahrzeugtyps bestimmt. Über Verlustmodelle des Motors, des Getriebes und des Antriebswechselrichters kann der Leistungsbedarf für den Antrieb berechnet werden. Das thermische Modell bestimmt aufgrund der gewünschten Innenraumtemperatur, des Fahrzeugaufbaus und der klimatischen Bedingungen den Heiz- bzw. Kühlbedarf und über das Klimatisierungssystem kann der Leistungsbedarf fürs Klimatisieren bestimmt werden. Der Leistungsbedarf durch weitere Nebenverbraucher wie

Beleuchtung und Luftkompressor werden mit einem Durchschnittswert berücksichtigt. Die erforderlichen Leistungsbedarfe werden (in MATLAB/Simulink) summiert und müssen durch die Batterie bereitgestellt werden. Da der Leistungsbedarf festgelegt ist, muss die Batterie die geforderte Fahrleistung liefern. Sie kann bis zu ihrer maximalen Ladeleistung Rekuperationsleistung zum Aufladen nutzen. Darüber hinaus anfallende Bremsleistung wird in der Realität über einen Bremswiderstand auf dem Dach abgeleitet und kann in der Simulation ignoriert werden. Das Batteriemodell umfasst die Verschaltung mehrerer Zellen und simuliert das beschriebene Verhalten.

Das Lademodell ist in Abbildung 39 dargestellt. Das Lademodell erhält aus dem Fahrmodell die Information über den Ladezustand der Batterie. Nach einer technologiespezifischen Totzeit stellt die Energiequelle die maximale Ladeleistung des Ladesystems bereit. Die Batterie nimmt entsprechend ihrer jeweiligen Ladekurve und dem Übertragungswirkungsgrad des Ladesystems diese Leistung auf bis der maximale Ladezustand erreicht ist.

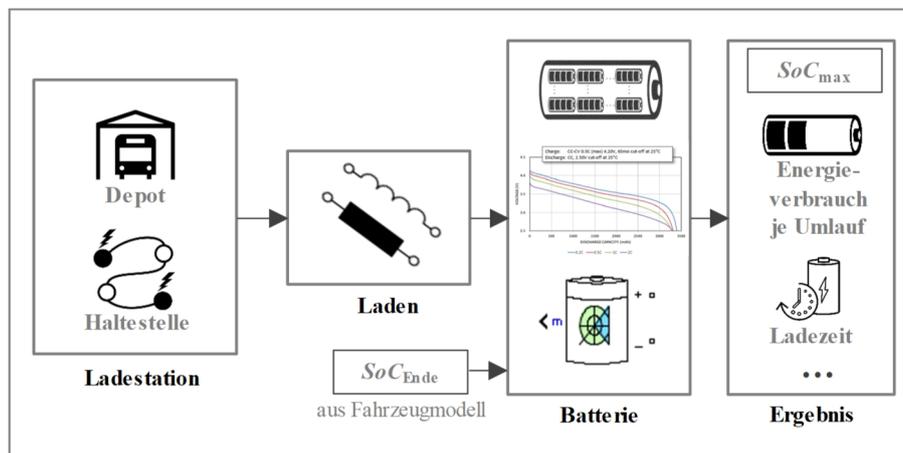


Abbildung 39: Aufbau des Lademodells

Nach der Analyse des realen Systems werden in den folgenden Kapiteln die Teilmodelle und ihre mathematische Darstellung näher beschrieben.

## 6.2.1 Teilmodell zur Bestimmung des Leistungsbedarfs Antrieb

Die geforderte mechanische Antriebsleistung berechnet sich aus der Fahrwiderstandsgleichung:

$$F_{W_{res}} = F_{WB} + F_{WR} + F_{WL} + F_{WS} \quad (1)$$

$$F_{W_{res}} = (\lambda_m m_{Fzg,min} + m_{zus})\dot{v} + m_{ges} g f_R \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \rho_L c_W A_W v^2 + m_{ges} g \sin(\alpha) \quad (2)$$

Der resultierende Fahrwiderstand  $F_{W_{res}}$  ergibt sich aus dem Beschleunigungswiderstand  $F_{WB}$ , dem Rollwiderstand  $F_{WR}$ , dem Luftwiderstand  $F_{WL}$  und dem Steigungswiderstand  $F_{WS}$ . Dabei ist  $\lambda_m$  der Massenfaktor, der die Drehträgheiten der rotierenden und zu beschleunigenden Massen im Fahrzeug berücksichtigt.  $m_{Fzg,min}$  ist die Masse

des Fahrzeugs ohne Batterie und Ladesystem,  $m_{\text{zus}}$  ist die zusätzliche Masse bestehend aus Batterie, Ladesystem und Fahrgäste,  $m_{\text{ges}}$  entspricht der Summe aus Fahrzeugmasse und zusätzliche Masse,  $f_R$  stellt den Rollwiderstand dar und ist abhängig von der Reifen- und Straßenbeschaffenheit. Der Luftwiderstandsbeiwert  $c_W$  charakterisiert die Form des Fahrzeugs und  $A_W$  ist die projizierte, angeströmte Frontfläche in Fahrtrichtung. Die Steigung der Straßenebene wird über den Winkel  $\alpha$  angegeben.

Zur Bestimmung der von der Batterie zur Verfügung zu stellenden Gesamtantriebsleistung ist die Charakteristik der elektrischen Maschine  $\eta_{\text{Motor}}$ , des Getriebes  $\eta_{\text{Getriebe}}$  sowie des Umrichters  $\eta_{\text{Inverter}}$  zu berücksichtigen (siehe Gleichung (3)).

$$P_{\text{el,Antrieb}}(t) = \frac{F_{\text{Wres}}v(t)}{\eta_{\text{Motor}} \cdot \eta_{\text{Getriebe}} \cdot \eta_{\text{Inverter}}} \quad (3)$$

Je nach Entwicklungsphase und gewünschter Aussagekraft, können die Verlustmodelle einfach oder komplex gestaltet werden. So können die mechanischen Verluste mit einem konstanten, einem leistungsabhängigen oder einem von Drehzahl und Drehmoment abhängigen Wirkungsgrad (Kennfeld) angegeben werden.

Im Rahmen des E-Bus Berlin Projektes wurde in einer Bachelorarbeit<sup>193</sup> ein Motor für Elektrobusse entworfen. Als Ausgangspunkt diente der Asynchronmotor, welcher in den Berliner E-Bussen verbaut werden sollte. Für diesen Asynchronmotor lagen geometrische Daten als auch Informationen zu maximalem Drehmoment, maximalem Strom, maximaler Drehzahl und Umrichterschaltfrequenz vor. Mit Hilfe der gegebenen Daten erfolgte eine analytische Vorauslegung des Motors. Die Auslegung erfolgte anschließend in der Software Speed, sodass der Motor die Anforderungen in einem gegebenen Arbeitspunkt bestmöglich erfüllte. Zusätzlich erfolgte die Simulation des Antriebswechselrichters als Zweipunktwechselrichter<sup>194</sup>. Beide Kennfelder wurden als Look-Up Tables in das Simulationsmodell integriert.

Im Rekuperationsbetrieb sind die Kennfelder an der x-Achse gespiegelt. Theoretisch ist es möglich über das gesamte Generatorkennfeld zu rekuperieren. Bei niedrigen Drehzahlen befindet sich die elektrische Maschine jedoch im Gegenstrombremsbetrieb, nimmt dabei mechanische und elektrische Leistung auf und wandelt diese in Wärme um. Dieser Bereich wird daher mit der Betriebsbremse verzögert und steht nicht zur Rekuperation zur Verfügung.<sup>195</sup> Daher sind die Kennfelder mit Ober- und Untergrenzen für maximales Fahr- und Bremsmoment in Abhängigkeit der Drehzahl versehen.

---

<sup>193</sup> Gongoll 2014 mit Unterstützung des Fachgebiets Elektrische Antriebe von Prof. Schäfer, TU-Berlin

<sup>194</sup> Ausgangspunkt ist das IGBT Modul FF600R12IE4, vgl. Infineon Technologies AG 2013

<sup>195</sup> Der Gegenstrombremsbetrieb liegt zwischen 0 und 10 km/h vor. Zwischen 0 und 4,5 km/h wird nicht rekuperiert, zwischen 4,5 und 10 km/h gibt es einen linearen Zusammenhang mit dem Bremsmoment. Dieser Bereich wurde von Solaris vorgegeben.

## 6.2.2 Teilmodell zur Bestimmung des Leistungsbedarfs Klima

Das thermische Simulationsmodell umfasst die Modellierung des Fahrgastraums als 1-Zonen-Modell (ideal durchmischter Bilanzraum mit homogener Lufttemperatur im Innenraum) und die Klimatisierungssysteme als Aufdachanlage. Das Modell entstand im Rahmen der von der Autorin betreuten Diplomarbeit von Herrn Dominic Jefferies<sup>196</sup> und basiert auf der Modellsprache Modelica/Dymola. Im Rahmen dieser Arbeit wird das konventionelle System bestehend aus einer Aufdachklimaanlage und einer Widerstandsheizung betrachtet, da dieses System bezogen auf den Energieverbrauch den worst-case darstellt.<sup>197</sup> Abbildung 40 zeigt den Fahrgastraum mit allen betrachteten Wärme- und Stoffströmen.

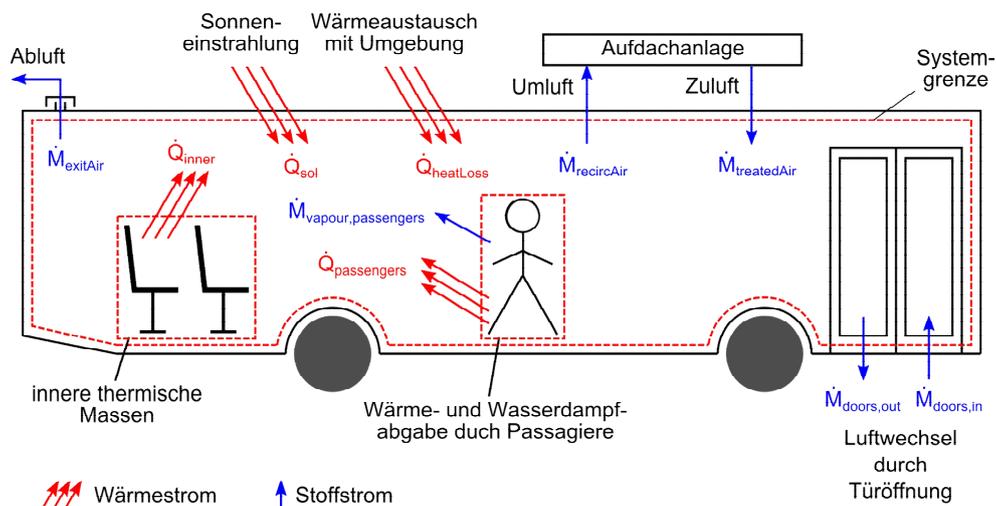


Abbildung 40: Fahrgastraum mit allen Wärme- und Stoffströmen

Die Bezeichnungen innerhalb des Modells sind in englischer Sprache, um Konsistenz mit der ebenfalls englischsprachigen Software herzustellen. Die Variablen im Text sind ebenfalls auf Englisch gehalten, um die Zuordnung im Simulationsmodell zu ermöglichen.

### Modellierung des Fahrgastraums

Zur Bestimmung der erforderlichen Heiz- bzw. Kälteleistung wird für den Fahrgastraum eine Energiebilanzgleichung aufgestellt (siehe Gleichung (4)). Die innere Energie des Fahrgastraums wird durch die Summe von Wärmeströmen  $\dot{Q}$  und Enthalpieströmen  $\dot{H}$  (Stoffströme mit spezifischer Enthalpie) beeinflusst.

$$\frac{dU_{PC}}{dt} = \frac{d}{dt} (M_{PC} \cdot h_{PC}) = \sum \dot{Q} + \sum \dot{H} \quad (4)$$

Die Wärmeströme setzen sich wie folgt zusammen:

<sup>196</sup> Teile der Arbeit wurden veröffentlicht, vgl. Göhlich et al. 2015, Jefferies et al. 2015

<sup>197</sup> Vgl. Kapitel 2.2.3

$$\sum \dot{Q} = \dot{Q}_{\text{heatLoss}} + \dot{Q}_{\text{sol}} + \dot{Q}_{\text{inner}} + \dot{Q}_{\text{passengers}} \quad (5)$$

$\dot{Q}_{\text{heatLoss}}$  beschreibt die Wärmeübertragung durch Wärmeleitung und Konvektion sowie die Wärmeabgabe der äußeren Oberfläche mittels Strahlungsaustausch mit der Umgebung.<sup>198</sup> Dieser Wärmestrom tritt an der Karosseriewand, an den Fenstern, am Boden und am Dach auf. Für die Modellierung wurden diese als ebene Wände angenommen, Radkästen und Dachvouten wurden nicht modelliert.  $\dot{Q}_{\text{sol}}$  bezeichnet den Wärmestrom, der aufgrund von solarer Strahlung entsteht.  $\dot{Q}_{\text{inner}}$  beschreibt den Wärmeübergang der inneren thermischen Massen (Sitze, Haltestangen etc.) an den Fahrgastraum.  $\dot{Q}_{\text{passengers}}$  ist der Wärmestrom, der durch die Fahrgäste produziert und an den Fahrgastraum übertragen wird. Die Wärmeabgabe der Fahrgäste wird nach dem Aktivitätsgrad II „sitzende Tätigkeit (Büro, Schule, Labor)“ bestimmt.<sup>199</sup>

Die Enthalpieströme setzen sich wie folgt zusammen:

$$\begin{aligned} \sum \dot{H} = & \dot{H}_{\text{doors,in}} - \dot{H}_{\text{doors,out}} - \dot{H}_{\text{exitAir}} + \dot{H}_{\text{vapour,passengers}} - \dot{H}_{\text{recircAir}} \\ & + \dot{H}_{\text{treatedAir}} \end{aligned} \quad (6)$$

$\dot{H}_{\text{doors,in}}$  und  $\dot{H}_{\text{doors,out}}$  beschreiben die Enthalpieströme, die aufgrund der Türöffnung entstehen. Allerdings wird der Effekt von ein- und aussteigenden Fahrgästen sowie in der Tür und damit in der Strömung stehenden Fahrgästen vernachlässigt. Sich bewegendes Fahrgäste verstärken den Luftaustausch während stehende Fahrgäste als Strömungswiderstand den Luftaustausch reduzieren. Welcher Effekt dominiert, hängt von der Anzahl der sich bewegendes und stehenden Fahrgäste ab. Hier wurde angenommen, dass sich die Effekte ausgleichen.  $\dot{H}_{\text{exitAir}}$  ist der durch die Abluft verursachte Enthalpiestrom. Die Fahrgäste im Bus geben über das Atmen und über das Schwitzen einen Enthalpiestrom  $\dot{H}_{\text{vapour,passengers}}$  an den Fahrgastraum ab. Im Umluftbetrieb wird ein definierter Anteil Luft aus dem Fahrgastraum durch das Klimatisierungssystem angesaugt ( $\dot{H}_{\text{recircAir}}$ ) und nach der Aufbereitung dem Fahrgastraum wieder zugeführt ( $\dot{H}_{\text{treatedAir}}$ ).

## Modellierung des Klimatisierungssystems

Wie in Kapitel 2.2.3 erläutert werden Aufdach-Klimaanlagen mit Heiz- und Kühlfunktion auf dem Bus verbaut, welche für die Heizfunktion einen Heißwasseranschluss bzw. einen Heizwasserkreislauf voraussetzen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das System, wie in Abbildung 41 gezeigt, modifiziert.

<sup>198</sup> Vgl. Anhang A3, hier wird der Wärmeaustausch mit der Umgebung näher erläutert

<sup>199</sup> Vgl. VDI 2078

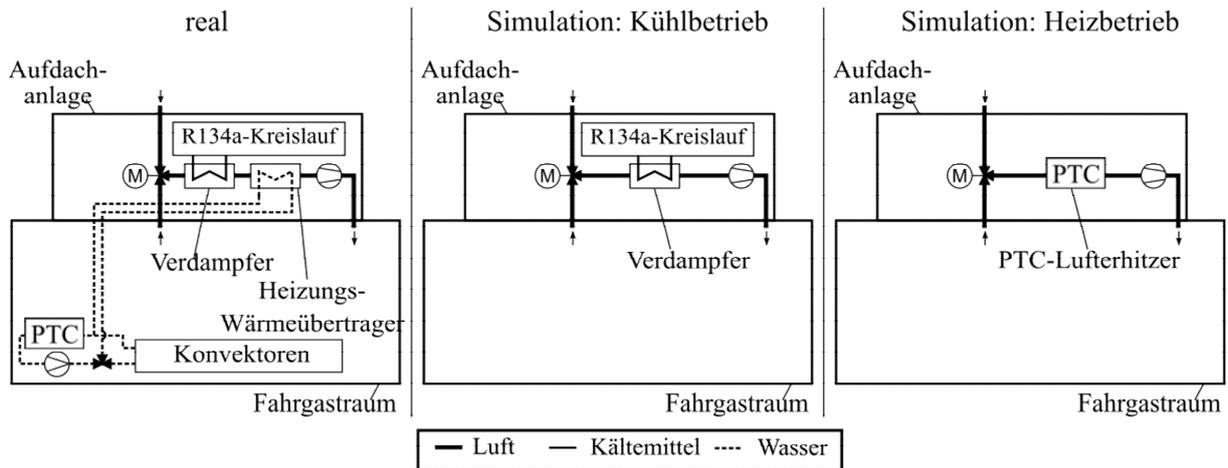


Abbildung 41: Reales Klimatisierungssystem und Modifizierung für Simulation<sup>200</sup>

Die Modellierung des Klimatisierungssystems umfasst im Kühlbetrieb hauptsächlich eine idealisierte Abbildung des Kältemittelkreislaufs mit dem Kälteprozess (vgl. Abbildung 21) und im Heizbetrieb die Abbildung eines elektrischen Lufterhitzers.

Die Leistungszahl  $COP$  des Kälteprozesses ergibt sich aus der Kälteleistung und der Verdichterleistung.<sup>201</sup> Bei der Gesamtleistungszahl wird zusätzlich die Gebläseleistung berücksichtigt (Gleichung (7)).

$$COP_{total,AC} = \left| \frac{\dot{Q}_{CabinAir}}{P_{Comp} + P_{fans}} \right| \quad (7)$$

Im Heizbetrieb wird die erforderliche Heizleistung durch den Lufterhitzer bereitgestellt, wobei  $s_{PTC}$  ein Stellsignal ist, welches abhängig von der erforderlichen Heizleistung die maximale Heizleistung reguliert (Gleichung (8)). Die erforderliche elektrische Leistung  $P_{PTC}$  bestimmt sich über den Wirkungsgrad (Gleichung (9)). Dieser wurde mit 95% angenommen.<sup>202</sup>

$$\dot{Q}_{CabinAir} = s_{PTC} \dot{Q}_{PTC,max} \quad (8)$$

$$P_{PTC} = \frac{\dot{Q}_{CabinAir}}{\eta_{PTC}} \quad (9)$$

Für den Lufterhitzer kann ebenfalls eine Gesamtleistungszahl definiert werden:

$$COP_{total,PTC} = \left| \frac{\dot{Q}_{CabinAir}}{P_{PTC} + P_{fans}} \right| \quad (10)$$

<sup>200</sup> Vgl. Göhlich et al. 2015

<sup>201</sup> Vgl. Kapitel 2.2.3,  $\dot{Q}_{CabinAir}$  entspricht  $\dot{Q}_{Evap}$

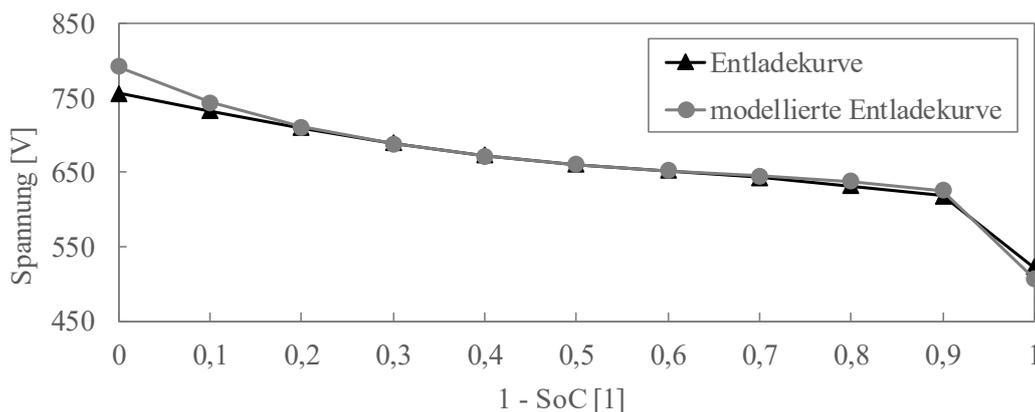
<sup>202</sup> Vgl. Houben et al. 2002

Mit Hilfe der erforderlichen Heiz- bzw. Kühlleistung und der Leistungszahl des Klimatisierungssystems liefert das thermische Modell den elektrischen Leistungsbedarf für die Klimatisierung des Fahrgastraums. Dieser Leistungsbedarf wird als Signal dem Matlab/Simulink Modell zugeführt. Voraussetzung für die Kopplung ist, dass beide Modelle die gleichen Eingangsparameter verwenden.

### 6.2.3 Batteriemodell

Die simulierte Batterie besteht aus seriell und parallel verschalteten Zellen und kann je nach Technologie bei gleicher Lebensdauer in unterschiedlich breiten SoC-Grenzen genutzt werden. Aufgrund der unterschiedlichen Beschaffenheitsmerkmale der Batterietechnologien ergeben sich unterschiedliche Batteriesysteme mit diverser Gesamtgewicht. Ist die Batteriegröße und die Verschaltung bekannt, kann diese vorgegeben werden. Ist sie nicht bekannt, muss sie nach Bedarf ausgelegt werden (siehe Unterabschnitt Auslegung der Batterie).

Das Batteriemodell erhält als Input die geforderte oder vorliegende elektrische Leistung an den Klemmen, übersetzt diesen in einen Entlade- bzw. Ladestrom und berechnet den aktuellen Batteriestand SoC. Das Batteriemodell ist ein Generisches nach Tremblay und Dessain.<sup>203</sup> Dieses generische Batteriemodell liefert weniger exakte Daten als spezialisierte Modelle. Ein großer Vorteil dieses Modells ist jedoch, dass sich die erforderlichen Parameter aus den Datenblättern der Batterien ablesen lassen und die Charakteristik über die Entladekurve beschrieben wird (vgl. Abbildung 42). Damit kann das Modell an verschiedene Batterietypen angepasst werden, ohne die Batterien selbst experimentell zu vermessen. Im generischen Modell wird angenommen, dass die Lade- und Entladecharakteristik gleich ist und dass ein konstanter Innenwiderstand vorliegt.<sup>204</sup>



**Abbildung 42: Entladekurve aus dem Datenblatt und modelliert für ein Batteriesystem**

Die Regelung des Lade- bzw. Entladestroms geschieht abhängig von dem aktuell vorliegenden Batteriezustand (SoC) und der vorliegenden Batteriespannung  $U_{SoC}(SoC)$ .

<sup>203</sup> Vgl. Tremblay et al. 2007; Tremblay und Dessaint 2009

<sup>204</sup> Vgl. Tremblay et al. 2007

Die Entladebedingung lautet:

$$I_{\text{total}} = \frac{P_{\text{total}}}{U_{\text{SoC}}} > 0 \quad (11)$$

$P_{\text{total}}$  beschreibt den Gesamtleistungsbedarf und ist beim Entladen positiv. Sinkt der aktuelle simulierte Batteriestand unter den definierten Minimalwert  $SoC_{\text{min}}$  wird die Simulation abgebrochen mit dem Hinweis, dass die Batterie zu klein ist. Während der Fahrt besteht beim Bremsen die Möglichkeit die Bremsenergie der Batterie zurückzuführen. Die Rekuperationsbedingung lautet:

$$I_{\text{total}} < 0 \quad (12)$$

$$\text{If } (|I_{\text{total}}| < i_{\text{max,charge}}(SoC)) \rightarrow \text{Lade mit } I_{\text{total}} \quad (13)$$

$$\text{else } \rightarrow \text{Lade mit } i_{\text{max,charge}}(SoC)$$

Der Rekuperationsstrom ist negativ (Gleichung (12)). Des Weiteren wird überprüft, ob abhängig vom  $SoC$  die Stromgrenzen der Batterie überschritten werden. Ist dies der Fall, wird der maximale Ladestrom auf die Stromgrenze der Batterie begrenzt (Gleichung (13)), um eine vorzeitige Alterung zu vermeiden. Der überschüssige Strom wird im Modell nicht berücksichtigt. In der Realität wird dieser über einen Bremswiderstand in Wärme umgewandelt.

Der Energieverbrauch für die Fahraufgabe ergibt sich wie folgt:

$$E_{\text{total}}(t) = \frac{\int P_{\text{total}}(t)dt}{S_{\text{fahrzyklus}}} \quad (14)$$

Die Batterietypen werden durch 19 Kenndaten beschrieben. Die Beschreibung der Kenndaten findet sich im Anhang A5.

## 6.2.4 Lademodell

Das Lademodell ist in Abbildung 39 dargestellt. Die Ladebedingung lautet:

$$I_{\text{charge}} = \frac{P_{\text{charge}} \cdot \eta_{\text{charge}}}{U_{\text{SoC}}} < 0 \text{ und } SoC < SoC_{\text{max}} \quad (15)$$

$$\text{If } (|I_{\text{charge}}| < i_{\text{max,charge}}(SoC)) \rightarrow \text{Lade mit } I_{\text{charge}} \quad (16)$$

$$\text{else } \rightarrow \text{Lade mit } i_{\text{max,charge}}(SoC)$$

Der Ladestrom ist negativ und der Ladevorgang wird beendet, wenn der Ladezustand seinen maximalen Wert  $SoC_{\text{max}}$  erreicht hat (Gleichung (15)). Des Weiteren wird wie

bei der Rekuperation überprüft, ob abhängig vom *SoC* die Stromgrenzen der Batterie überschritten werden und gegebenenfalls wird der maximale Ladestrom auf die Stromgrenze der Batterie begrenzt (Gleichung (16)). Die Dauer des Ladevorgangs wird nach Beendigung vom Simulationsmodell ausgegeben und ergibt mit der technologiespezifischen Totzeit die Ladezeit.

Die verschiedenen Ladesysteme werden durch fünf Kenndaten beschrieben (vgl. Anhang A6).

## 6.2.5 Batteriekonfiguration

In Abbildung 30 wurden die Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zwischen den Teilsystemen aufgezeigt. Aus der Darstellung geht hervor, dass der Energieverbrauch von den betreiber- und standortspezifischen Anforderungen aber auch von der Gesamtmasse abhängen, die durch die Batterie beeinflusst wird. Daher muss in einem ersten Schritt abhängig von den betreiber- und standortspezifischen Anforderungen eine entsprechende Batterie konfiguriert werden (roter Kasten in Abbildung 30). Dabei ist das Zusatzgewicht für die Elektrifizierung auf 3400 kg begrenzt.<sup>205</sup>

Die Batteriekonfiguration unterteilt sich in zwei Schritte, eine Grobauslegung und eine schrittweise Reduktion. Grund für das Zwei-Stufen-Verfahren ist die Wechselwirkung zwischen Energieverbrauch und Batteriegewicht. Mit der Grobauslegung wird eine tendenziell zu große Batterie ausgelegt und der zugehörige Energieverbrauch und Ladezustand bestimmt. Die optimale Batteriegröße wird im zweiten Schritt iterativ ermittelt, indem die Batterie solange verkleinert wird, bis möglichst das komplette Ladezustandsfenster  $\Delta SoC$  ausgenutzt wird.

Abbildung 43 zeigt die Routine zur Grobauslegung der Batterie.

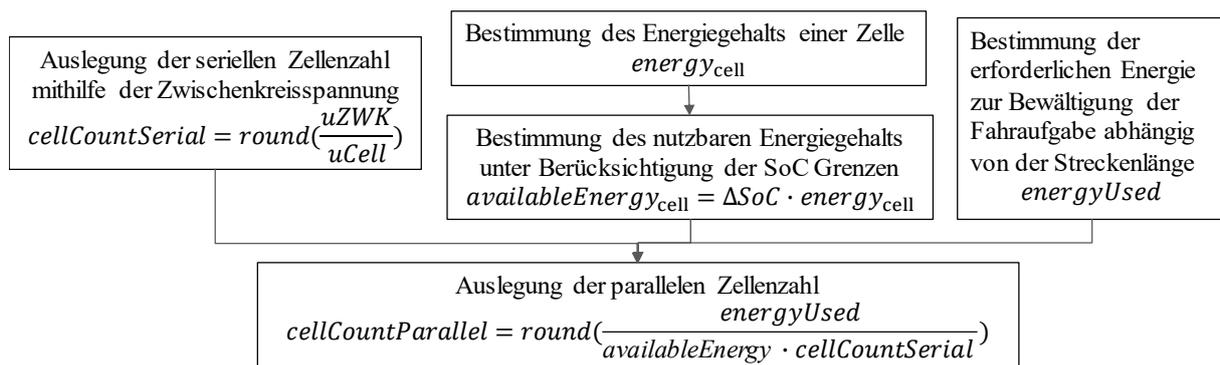


Abbildung 43: Routine zur Grobauslegung der Batterie

Der Energiegehalt der Batterie hängt wie folgt mit dem Energiegehalt einer Zelle ab:

$$Energy_{\text{pack}} = cellCountSerial \cdot cellCountParallel \cdot energy_{\text{cell}} \quad (17)$$

<sup>205</sup> Vgl. Unterkapitel Energiespeicher, S. 20

$cellCountSerial$  steht für die Anzahl der Zellen in Serie und kann mithilfe der maximalen Zwischenkreisnennspannung des Gesamtsystems und der maximalen Zellspannung der Zelle vorausgelegt werden.

Der Energieverbrauch je km wird abgeschätzt und mit einem Sicherheitsfaktor höher definiert (hier 1,2). Anschließend wird je nach gewünschter Streckenlänge die erforderliche Energie der Batterie  $energyUsed$  bestimmt und mit dem nutzbaren Energiegehalt je Zelle  $availableEnergy_{cell}$  die Anzahl der parallelen Zellen  $cellCountParallel$  bestimmt. Das Ergebnis der Grobauslegung ist eine zu große Batterie.

Nun erfolgt die schrittweise Reduktion (Abbildung 44). Es wird eine Simulation durchgeführt und der Verbrauch bzw. der Endwert des Batterieladezustands bestimmt. Ist die Batterie zu klein wird die Simulation vorzeitig abgebrochen und die Anzahl der parallelen Zellen um 1 erhöht. Läuft die Simulation normal durch, wird die Anzahl der parallelen Zellen reduziert.

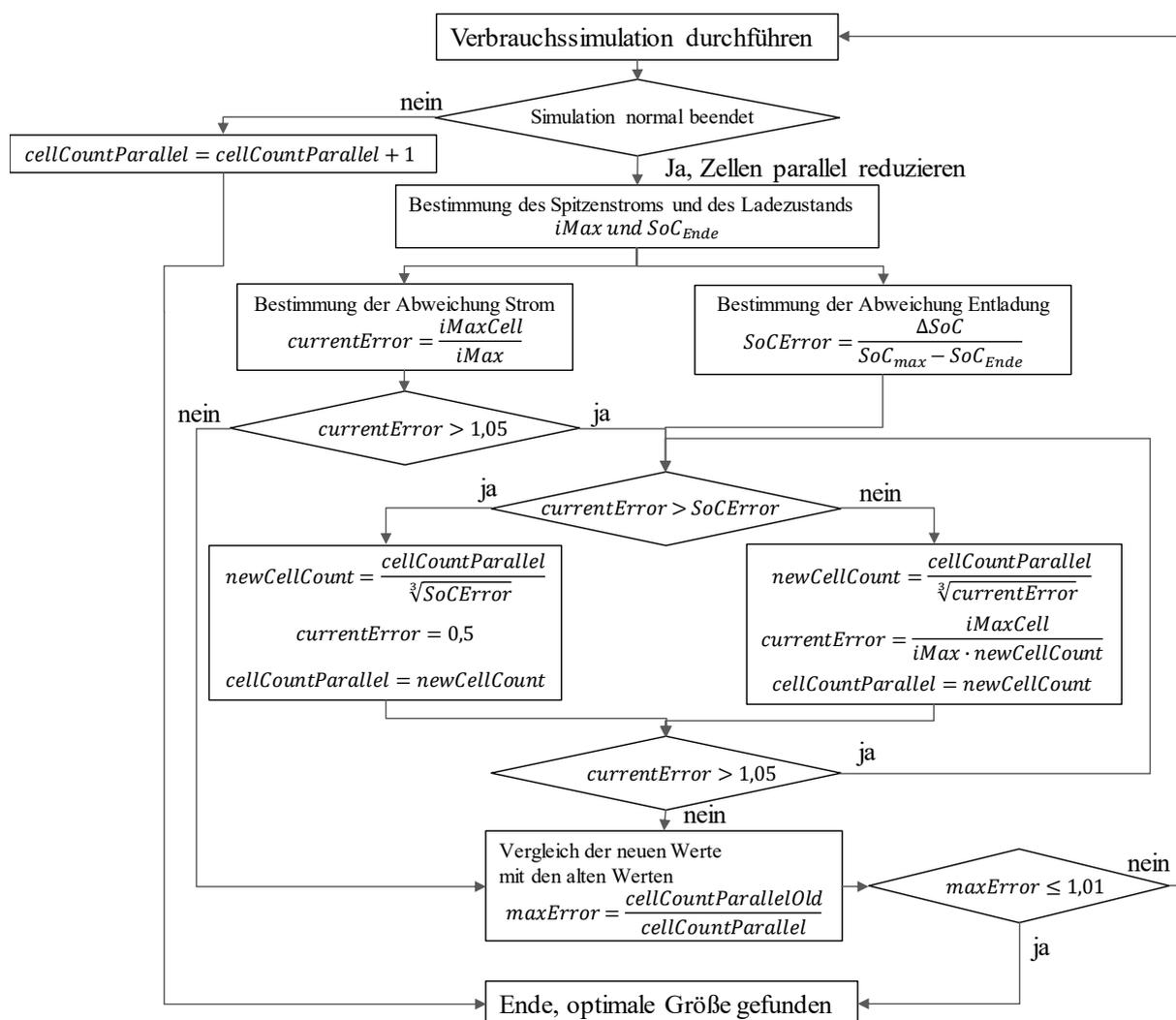


Abbildung 44: Schrittweise Reduktion zur Auslegung der erforderlichen Batterie

Zur Bestimmung des Gesamtgewichts des Batteriesystems wird das Zellengewicht  $m_{\text{cells}}$  mit dem Faktor 10:6 multipliziert. Das bedeutet, dass die Zellen 60 % des Gesamtgewichts ausmachen und 40 % Verkabelung, Kühlkanäle, Gehäuse, etc.<sup>206</sup>

Für die Reduktion werden zwei Randbedingungen herangezogen. Erstens, um welchen Faktor  $SoCError$  liegt die simulierte Entladung der Batterie  $SoC_{\text{max}} - SoC_{\text{Ende}}$  unter dem gewünschten Ladezustandsfenster  $\Delta SoC$  und zweitens, um welchen Faktor  $currentError$  liegt der simulierte Spitzenstrom  $iMax$  je Zelle unter dem Grenzstrom der Zelle  $iMaxCell$ . Der Spitzenstrom kann während der Fahraufgabe, z.B. beim Beschleunigungsvorgang oder beim Rekuperieren, oder beim Ladevorgang durch den Ladestrom auftreten. Der Faktor mit dem geringsten Wert gibt den limitierenden Faktor für die Feinauslegung an. Die Anzahl paralleler Zellen wird um die dritte Wurzel des limitierenden Faktors reduziert und die Simulation sowie die Verkleinerung erneut ausgeführt bis die Abweichung der vorigen Zellenzahl zur neuen Zellenzahl bei unter 1 % liegt. Die Verkleinerung um die dritte Wurzel wurde gewählt, um die Simulation einer zu kleinen Batterie und das Überschreiten der maximalen Entladung zu verhindern. Ist die optimale Verschaltung gefunden, wird diese im Cache gespeichert und das Gewicht der Zellen kann wie folgt bestimmt werden:

$$m_{\text{cells}} = cellCountSerial \cdot cellCountParallel \cdot m_{\text{cell}} \quad (18)$$

### 6.3 Einschränkungen des Modells

Aufgrund der hohen Komplexität realer Produkte werden mittels der Systembetrachtung Modelle entwickelt, die die Produkteigenschaften darstellen und durch Abstraktion komplexer Sachverhalte das für den Zweck Wichtige vom Unwichtigen trennen ohne relevante Eigenschaften auszublenden.<sup>207</sup> Im Folgenden werden die Effekte aufgelistet, welche zur Verringerung der Komplexität vernachlässigt wurden.

- Die Dynamik eines Fahrzeugs lässt sich über die Längs-, Quer- und Vertikaldynamik beschreiben. Für die Fortbewegung (Antreiben und Bremsen, Fahrwiderstände) des Busses ist die Längsdynamik relevant. Die Querdynamik beschreibt die Fahrstabilität, das Kurvenverhalten und die Spurführung. Die Vertikaldynamik umfasst das Schwingungsverhalten des Aufbaus. Die energetische Auslegung erfolgt über den Kraft- und Leistungsbedarf, welcher über die Längsdynamik beschrieben ist, d.h. für die Modellierung wurden die Effekte aus Quer- und Vertikaldynamik vernachlässigt.

---

<sup>206</sup> Eigene Untersuchung verschiedener Datenblätter und Vergleich mit Sauer 2017

<sup>207</sup> Vgl. Lindemann 2009, S. 11

- Zur Bestimmung des Luftwiderstands wurden Windgeschwindigkeiten vernachlässigt. Dies ist möglich, da das Fahrzeug im urbanen Gebiet mit einer hohen Gebäudedichte geschützt ist.
- Zur Bestimmung des Rollwiderstands wurde ein konstanter Rollreibungskoeffizient verwendet, d.h. es wurden keine variierenden Fahrbahnoberflächen und Veränderungen der Reifenkontakteigenschaften durch Regen oder Schnee betrachtet. Dies ist eine zulässige Vereinfachung, da nicht die Fahreigenschaften untersucht werden.
- Zur Bestimmung des Energiebedarfs über die Klimatisierung wurde eine konstante Luftfeuchtigkeit und eine ideale Durchmischung der Luft im Fahrgastraum angenommen. Dies ist möglich, da keine Behaglichkeitsuntersuchung durchgeführt wird. Da eine ideale Durchmischung angenommen wird, kann jeder Wärmeeintrag sofort in eine Temperaturerhöhung umgesetzt werden und der Ort des Wärmeeintrags (unter den Sitzen oder über die Aufdachanlage) muss nicht unterschieden werden.
- Die Kältekreisläufe wurden als stationäre Modelle unter stark idealisierten Annahmen implementiert. Es erfolgte keine Modellierung der Wärmeübertragung vom Kältemittel über den Verdampfer an die Fahrgastraumluft, d.h. die Wärmeübertragercharakteristik des Verdampfers wurde nicht berücksichtigt. Der Grund für diese Vereinfachung ist, dass eine Vielzahl an Parametern (Geometrie der Wärmeübertrager und Rohrleitungen, Kältemittelfüllmenge etc.) geschätzt werden müssten, die nicht öffentlich verfügbar sind.
- Das generische Batteriemodell geht von einer idealen Kühlung des Batteriesystems aus. Des Weiteren werden die Batteriesysteme je nach Zellchemie in ihrem empfohlenen Betriebsbereich eingesetzt, sodass die Auswirkungen auf die Batteriealterung geringgehalten werden. Eine nähere Betrachtung der Batteriealterung erfolgt nicht.

## 7. Verifikation und Validierung des Simulationsmodells

In Kapitel 6.2 wurden die konzeptionellen Teilmodelle des Gesamtsystem-Simulationsmodells und ihre mathematische Darstellung vorgestellt.

Dieses Kapitel beinhaltet die angewandten Methoden zur Verifikation und Validierung des Gesamtsystem-Simulationsmodells. Die Verifikation stellt sicher, dass das konzeptionelle Modell formal richtig implementiert ist. Die Validierung hat zum Ziel eine Aussage über die Gültigkeit des Modells für seinen Anwendungszweck zu treffen.<sup>208</sup>

### 7.1 Referenzfahrzeug und Messtechnik

Im Rahmen des E-Bus Berlin Projekts standen vier 12 m Elektrobusse als Referenzfahrzeuge zur Verfügung. Die technischen Spezifikationen der Busse sind in Tabelle 21 aufgelistet.

**Tabelle 21: Allgemeine Daten zu den Elektrobussen im E-Bus Berlin Projekt<sup>209</sup>**

Allgemeines	
Hersteller, Typ	Solaris, Urbino 12 electric
Fahrgastkapazität	70 Personen
Leergewicht	13 Tonnen
zul. Gesamtgewicht	18 Tonnen
Antriebssystem	
Hersteller	Vossloh-Kiepe
Typ E-Motor	zentraler Asynchronmotor
Antriebsleistung	160 kW/218 PS
Höchstgeschwindigkeit	65 km/h
Batteriesystem	
Hersteller	Bombardier
Batterietyp	Lithium-Ionen-Batterien
Kapazität, Spannung	90 kWh, 660 V
Gewicht der Batterien	1,1 Tonnen
Klimatisierung	
Klimaanlage	Konvekta UL 500 EM
max. Kühlleistung	24 kW
Heizung	Spheros Elektro-Wasserheizgerät
max. Heizleistung	20 kW
Wärmeverteilung	Dachheizung; Untersitzgebläse; Konvektoren

Zwei der Busse wurden mit Datenloggern und einer GPS-Antenne der Firma Viriciti ausgestattet. Die Datenlogger zeichneten die Daten des CAN-Busses mit 10 Hz auf. Abbildung 45 zeigt das vereinfachte Blockschaltbild des Referenzfahrzeugs mit Motor,

<sup>208</sup> Vgl. Kapitel 2.3.2, S.33

<sup>209</sup> Vgl. Torzynski et al. 2016

Hochvolt-Nebenverbrauchern und dem Batteriepack am Zwischenkreis mit entsprechenden Umrichtern. Die Bordnetzatterie ist nicht dargestellt.

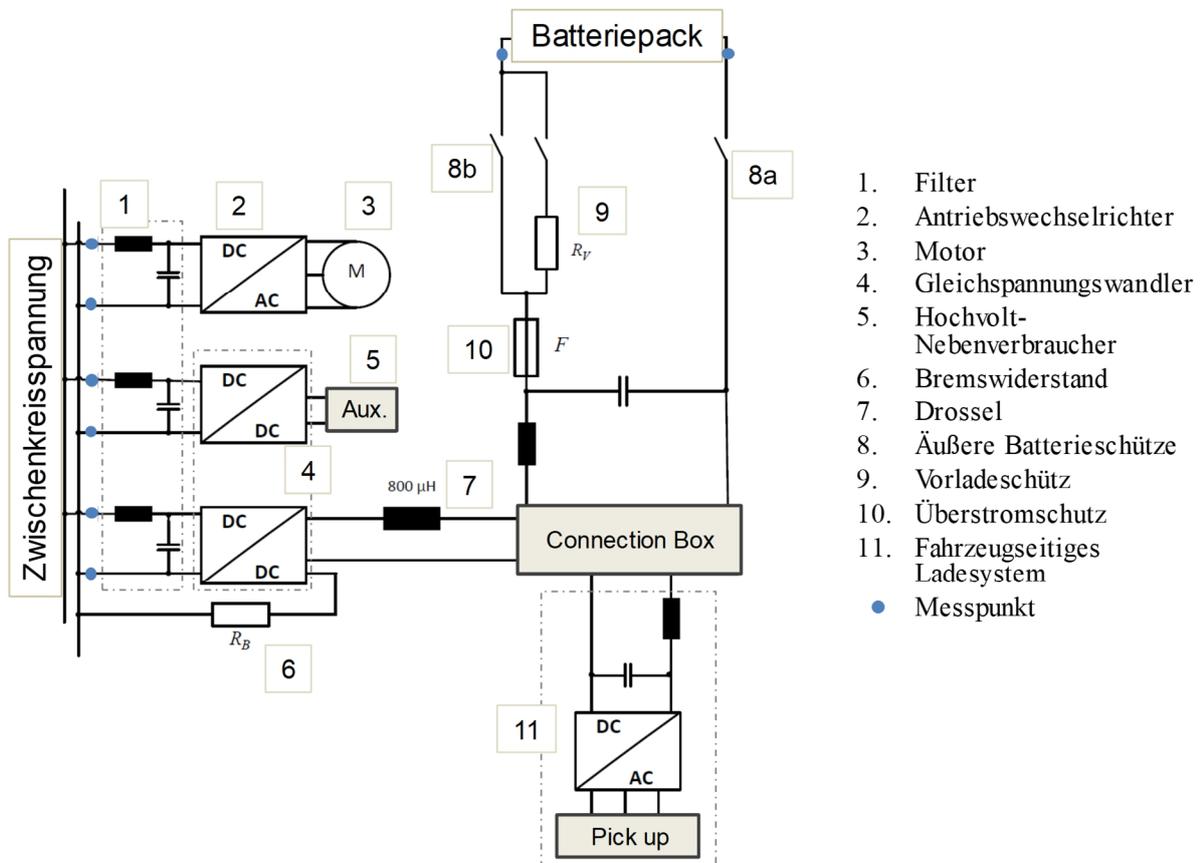


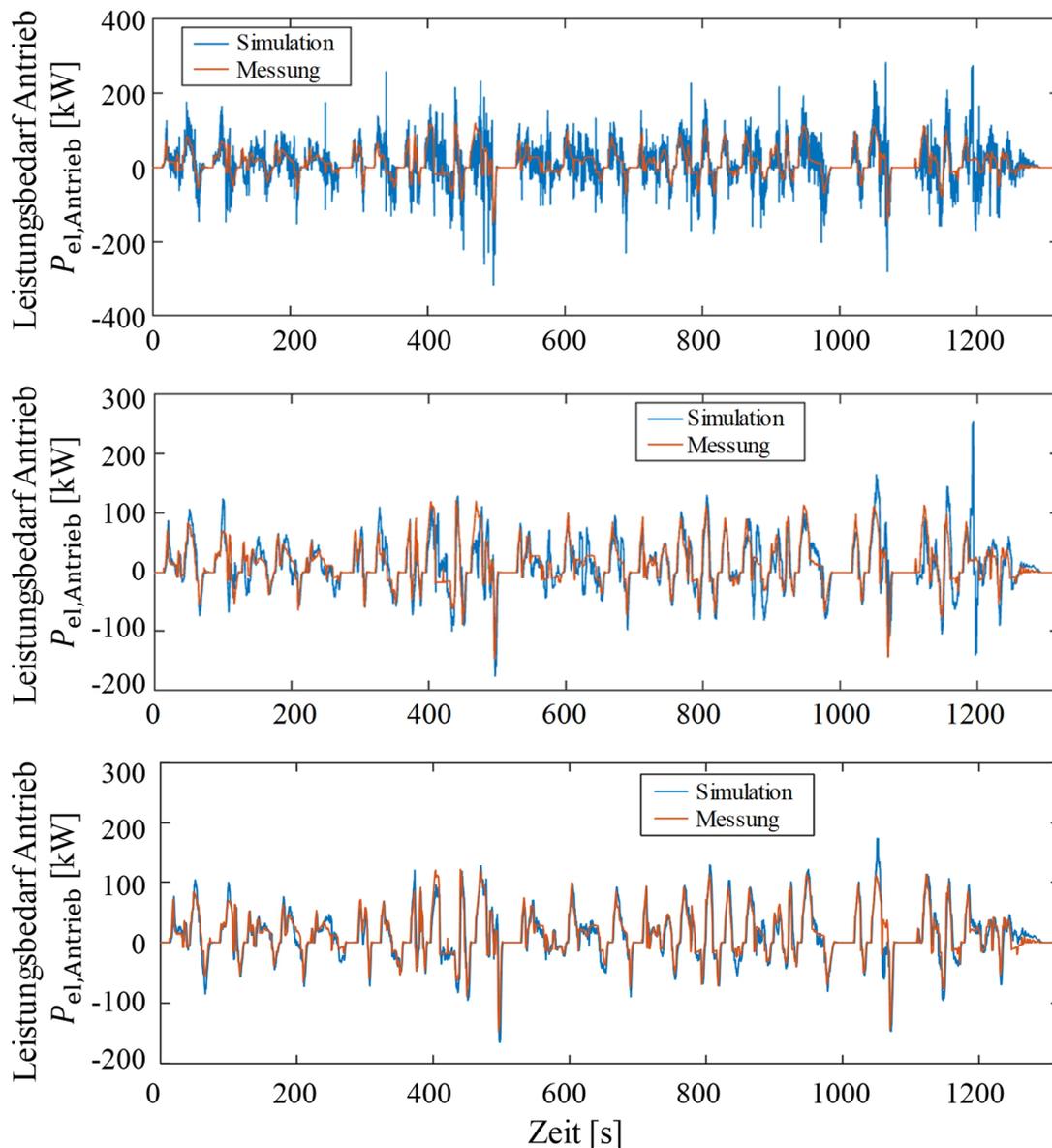
Abbildung 45: Vereinfachtes Blockschaltbild des Referenzfahrzeugs

Die Daten wurden auf einem Server gespeichert und konnten im Nachgang zur Messung am Rechner über ein entsprechendes Portal heruntergeladen werden.

## 7.2 Verifikation

Die Verifikation erfolgt mithilfe der Überprüfung von Einheiten und Dimensionen sowie der Betrachtung einzelner Signale. Konkret wurde bei jeder Gleichung überprüft, ob die Einheiten korrekt umgerechnet wurden und die Signale die richtigen Einheiten hatten, z.B. Umrechnung Geschwindigkeit von km/h zu m/s bzw. Leistung in Watt ergibt sich aus Kraft in Newton multipliziert mit Geschwindigkeit in m/s. Die Signale und Ergebnisse wurden auf Plausibilität geprüft, indem die Dimension der Werte mit denen realer Werte verglichen wurden. Eine weitere Methode der Verifikation ist der Vergleich der gemessenen und simulierten Ausgangssignale um Berechnungsfehler infolge von Diskretisierung zu minimieren.

Abbildung 46 zeigt den Vergleich des Leistungssignals  $P_{el,Antrieb}$ . Als Eingangsdaten der Simulation diente ein gemessener Geschwindigkeitsverlauf (diskretes Signal).



**Abbildung 46: Verifikation des Teilmodells zur Bestimmung des Leistungsbedarfs Antrieb, oben ungefiltert, Mitte gefiltertes Beschleunigungssignal, unten gefiltertes Beschleunigungssignal, korrigiertes Höhensignal und geglätteter Steigungswinkel**

Der erste Vergleich (oben) zeigt ein verrauschtes, simuliertes Signal. Dies lässt sich durch das verrauschte Beschleunigungssignal erklären, welches sich aus der Differentiation des diskreten Geschwindigkeitssignals ergibt. Als Maßnahme wurde eine Filterung des Beschleunigungssignals eingeführt. Das Ergebnis ist in der Mitte zu sehen. Simulation und Messung stimmen besser überein, jedoch ist immer noch ein leichtes rauschen und bei 1200 s ein Peak in der Simulation zu sehen. Die Prüfung der Eingangsdaten ergab, dass das Rauschen über das diskrete Höhenprofil und der Peak durch eine falsche Höhenangabe verursacht wurde. Der Bus fuhr bei Sekunde 1200 unter einer Brücke entlang und die Höhenangabe entsprach der der Brücke und nicht der der Straße.

Das Höhsignal wurde korrigiert und der aus dem Höhsignal berechnete Steigungswinkel mithilfe eines gleitenden Mittelwerts geglättet.<sup>210</sup> Das Ergebnis zeigt der unterste Vergleich.

### 7.3 Validierung

Die Validierung unterteilt sich in konzeptionelle und operative Validierung, wobei die konzeptionelle Validierung Teil der Systemmodellierung ist und dem Nachweis dient, dass die gewählten Theorien und getroffenen Annahmen korrekt und gültig sind. Die konzeptionelle Validierung wurde anhand von Veröffentlichungen und Vorstellung der Teilmodelle vor Fachpublikum durchgeführt. Die Teilmodelle des Gesamtsystem-Simulationsmodells wurden innerhalb des E-Bus Berlin Projekts den Entwicklern und auf Fachtagungen und Fachkonferenzen den Experten präsentiert.

Die operative Validierung basiert auf einem Vergleich von Messdaten des realen Systems mit Ergebnissen des Simulationsmodells. Eine Komponentvalidierung fand nicht statt, da die Komponenten der Teilmodelle nicht auf Prüfständen untersucht werden konnten. Eine Gesamtsystemvalidierung fand mithilfe von zwei Fahrzeugen statt. Es wurden Messfahrten ohne Fahrgäste im Heiz- und Kühlbetrieb bei minimaler und maximaler Einstellung des Klimatisierungssystems durchgeführt. Tabelle 22 stellt die gemessenen Verbräuche für die unterschiedlichen Randbedingungen gegenüber.

**Tabelle 22: Gegenüberstellung der gemessenen Verbräuche**

U Nr.	Heizbetrieb	Verbrauch [kWh/km]	Mehrverbrauch [%]	Kühlbetrieb	Verbrauch [kWh/km]	Mehrverbrauch [%]
5	Heizung aus	1,16	100	AC aus	1,21	100
1	Heizung ca. 18 °C	1,80	155	AC ca. 27 °C	1,49	123
2	Heizung ca. 18 °C, Türen auf	1,99	171	AC ca. 27 °C, Türen auf	1,72	141
3	Heizung ca. 24 °C	2,07	179	AC ca. 24 °C	1,61	133
4	Heizung ca. 24 °C, Türen auf	2,35	202	AC ca. 24 °C, Türen auf	1,82	150

Abbildung 47 stellt die Messergebnisse je Umlauf zusammengefasst dar. Der Energieverbrauch des Antriebs ist in beiden Fällen konstant und liegt bei etwa 0,8 kWh/km. Aus der Tabelle geht hervor, dass der wesentliche Verbraucher die Klimatisierung ist. Im Heizbetrieb bei 5°C Außentemperatur kann der Verbrauch bereits mehr als doppelt

<sup>210</sup> Vgl. Kapitel 5.3, S.68

so hoch sein wie bei der Fahrt ohne Heizen. Der Vergleich der Verbräuche ohne Klimatisierung zeigt, dass der Verbrauch im Kühlbetrieb höher liegt als im Heizbetrieb. Dies hängt mit der Batteriekühlung zusammen, die im Heizbetrieb von der kühleren Außentemperatur profitiert. Des Weiteren wird deutlich, dass die Einstellung der Soll-Fahrgastraumtemperatur ein großes Einsparpotential aufweist. So verbraucht der Bus rund 15% weniger, wenn die Heizung statt auf höchster Stufe auf niedrigster Stufe (ca. 18 °C statt 24 °C Fahrgastraumtemperatur) eingestellt ist.

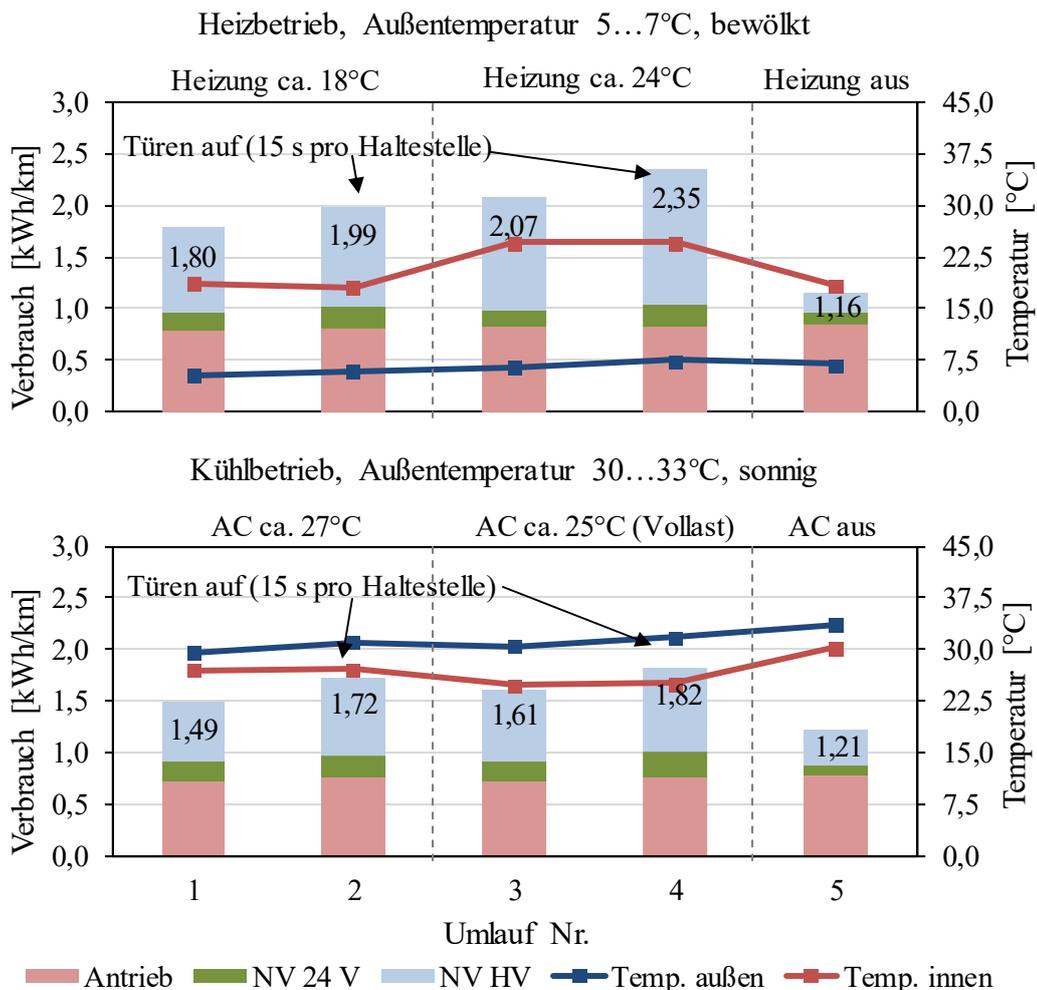


Abbildung 47: Gemessene Verbrauchswerte je Umlauf. „NV 24 V“: 24-V-Nebenverbraucher; „NV HV“: Hochvolt-Nebenverbraucher<sup>211</sup>

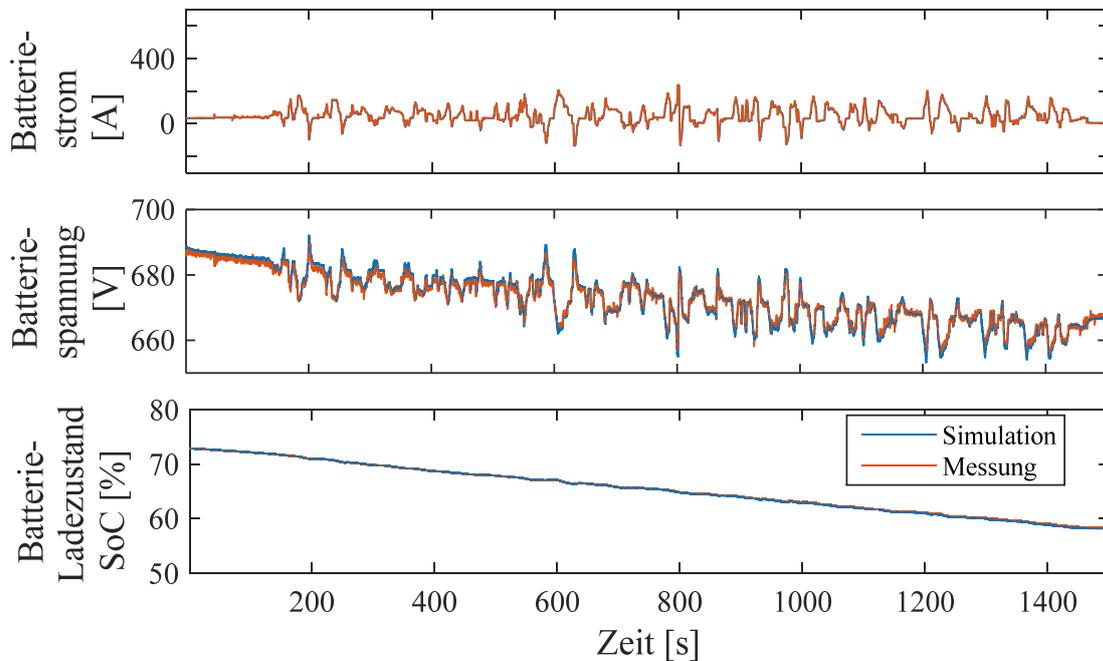
In den folgenden Kapiteln werden das Referenzfahrzeug und die verbaute Messtechnik sowie die wesentlichen Ergebnisse der Validierung aufgezeigt.

### 7.3.1 Validierung des Antriebssystems inklusive Batteriemodell

Das Antriebssystem wurde schrittweise validiert. Zur Validierung des Batteriemodells wurde während der Messfahrt der Gesamtleistungsbedarf aus Antrieb, Klimatisierung

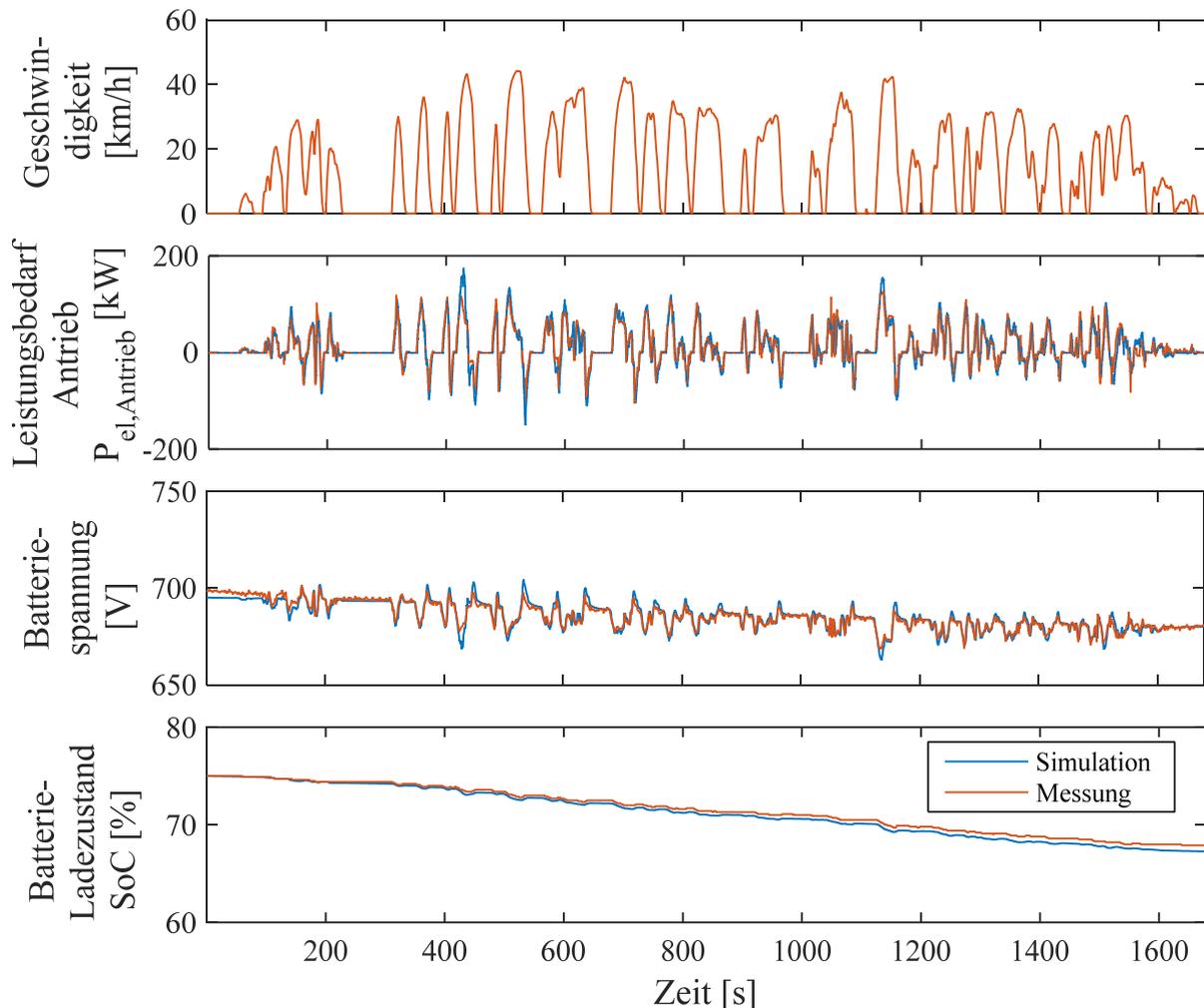
<sup>211</sup> Torzynski et al. 2016

und weiteren Nebenverbrauchern aufgenommen und als Eingangsdaten der Simulation übergeben. Die Fahrt von der Haltestelle Hertzallee zur Haltestelle Südkreuz umfasste 6,1 km. Das Höhenprofil ist in Abbildung 35 dargestellt. Das Ergebnis der Simulation im Vergleich zur Messung zeigt Abbildung 48. Das generische Batteriemodell zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den gemessenen Daten. Der abgebildete, simulierte Ladezustand ist 0,4 % geringer als der gemessene.



**Abbildung 48: Vergleich von Messung und Simulation des Batteriemodells anhand eines vorgegebenen Leistungsbedarfs**

Zur Validierung des Antriebssystems wurde der gemessene Fahrzyklus als Eingangsdatensatz zur Simulation des Leistungsbedarfs für Antrieb, der Batteriespannung und des SoCs verwendet. Die Gegenüberstellung der Simulation mit der Messung erfolgt in Abbildung 49. Der Vergleich der Verläufe zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Das Längsdynamikmodell kann das reale Verhalten wiedergeben, jedoch ergeben sich in der Simulation teilweise höhere Leistungsspitzen. Ein Vergleich der Leistungsbedarfe Antrieb über alle in Abbildung 47 dargestellten Messungen ergab eine mittlere Abweichung von 4 % und eine maximale Abweichung von 10 %. Für den Ladezustand ergab sich eine mittlere Abweichung von 1,5 % und eine maximale Abweichung von 2,1 %, d.h. der simulierte Verbrauch lag geringfügig höher als der tatsächlich gemessene Verbrauch.



**Abbildung 49: Vergleich von Messung und Simulation des Antriebssystems, ohne Klimatisierung**

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Energieverbrauch für den Antrieb das reale System sehr gut widerspiegelt und für weitere Untersuchungen des Antriebsverbrauchs geeignet ist.

### 7.3.2 Validierung des Klimatisierungssystems

Zur Validierung des Teilmodells zur Bestimmung des Leistungsbedarfs Klima wurde im ersten Schritt das thermische Verhalten des Busses untersucht. Dafür wurde dieselbe Fahrt wie in Abbildung 49 verwendet und der Verlauf der Fahrgastraumtemperatur bestimmt. In Abbildung 50 wird die simulierte und die gemessene Fahrgastraumtemperatur gegenübergestellt.

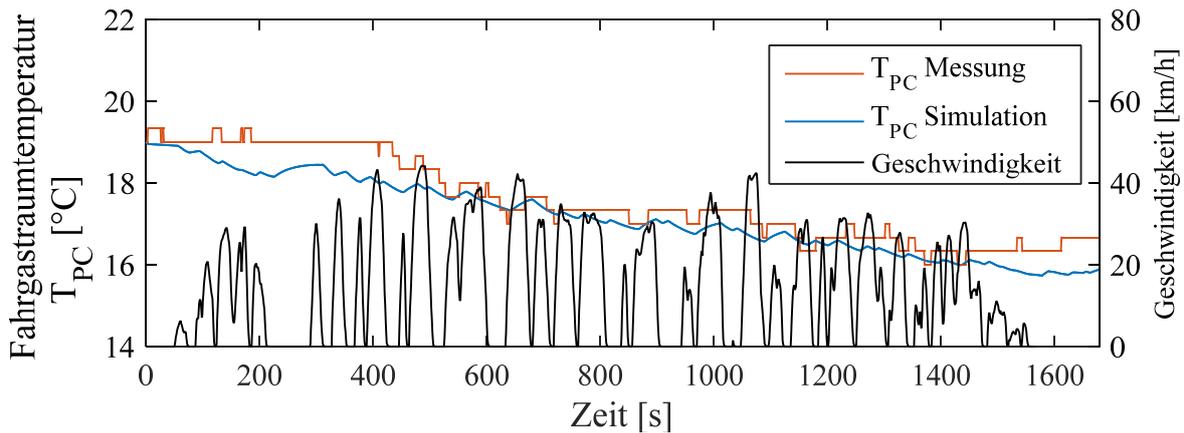


Abbildung 50: Vergleich von Messung und Simulation der Fahrgastraumtemperatur<sup>212</sup>

Das Modell zeigt eine gute Übereinstimmung mit dem realen System, wobei der simulierte Bus mehr abkühlt als das reale System. Die Abweichungen sind jedoch nicht größer als 1,5 K. Zur Validierung des Klimatisierungssystems wurden die Verbräuche für die in Abbildung 47 gezeigten Messfahrten simuliert. Der Vergleich in Abbildung 51 und Abbildung 52 zeigen deutliche Abweichungen zwischen Messung und Simulation. Der simulierte Verbrauch des Heizsystems liegt um bis zu 52 % unter der Messung.

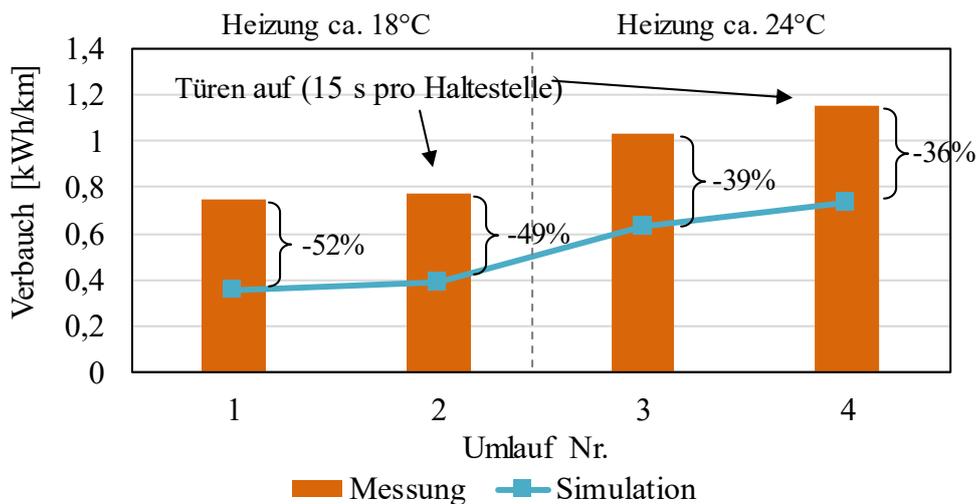
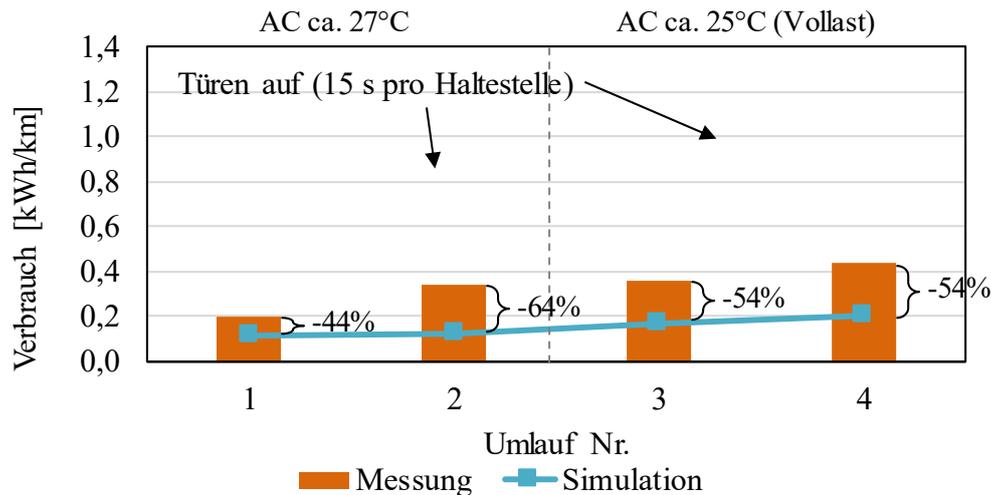


Abbildung 51: Vergleich Messung und Simulation des Energieverbrauchs durch den Heizbetrieb

Der simulierte Verbrauch des Kühlsystems liegt um bis zu 64 % unter der Messung.

<sup>212</sup> Göhlich et al. 2018



**Abbildung 52: Vergleich Messung und Simulation des Energieverbrauchs durch den Kühlbetrieb**

Die Abweichungen lassen sich wie folgt erklären<sup>213</sup>:

1. In der Simulation wurde eine stufenlose Regelung der Heiz- bzw. Kühlleistung angenommen. Tatsächlich werden der Widerstandsheiz- und der Klimakompressor durch eine Zweipunktregelung (ein/aus) geregelt, wodurch zusätzliche, instationäre Verluste entstehen.
2. Der Kältekreislauf wurde als ideales Modell implementiert und es erfolgte keine detaillierte Modellierung der Wärmeübertrager.
3. Es wurde ausschließlich die Luftheizung über die Dachanlage modelliert. Der Heißwasserkreislauf mit Bodenkonvektoren, welcher zusätzliche Verluste verursacht, wurde nicht modelliert.
4. In der Simulation werden Winde vernachlässigt. Die Messfahrten fanden auf der Strecke statt und die Randbedingungen Wind und Windrichtung konnten nicht kontrolliert werden. Die höhere Abweichung im Kühlbetrieb für Umlauf 2 könnte sich daher erklären.
5. Die Globalstrahlungsintensität und der Sonnenstand konnten auf dem Streckenversuch nicht eindeutig bestimmt werden, da entsprechende Sensoren fehlten. Die Globalstrahlungsintensität wurde aus der Datenbank Climate-SAF PVGIS entnommen, die für einen durchschnittlichen Tag im entsprechenden Monat der

<sup>213</sup> Punkt eins bis drei wurden bereits im Schlussbericht des E-Bus-Berlin Projekts aufgeführt. Vergleiche Torzynski et al. 2016

Messung die Globalstrahlung vorliegen hat. Eine in der Simulation des Kühlbetriebs geringer angenommene Globalstrahlungsintensität könnte erklären, dass weniger Wärmeeintrag und damit weniger Kühlleistung berechnet wurde.

Abschließend ist festzuhalten, dass die oben genannten Abweichungen des Energieverbrauchs für die Klimatisierung im Rahmen dieser Arbeit über einen Korrekturfaktor berücksichtigt werden, wobei davon ausgegangen werden kann, dass sich der Fehler bei den untersuchten Varianten gleich Auswirkungen wird, da alle mit demselben Klimatisierungssystem ausgestattet sind.

## 8. Anwendung der Methodik am Beispiel der Studie zum Energiezuführungssystem und Batteriesystem

In diesem Kapitel wird die in Kapitel 3.2 dargestellte Methodik am Beispiel der Untersuchung verschiedener Energieübertragungssysteme und Batteriesysteme angewandt. Das Grundfahrzeug in dem die Teilsysteme eingesetzt werden ist ein 12 m Batteriebus wie er im Kapitel 7.1 vorgestellt wurde. Allerdings wird eine Heizung mit 30 kW Heizleistung verwendet, da bereits bei  $-10^{\circ}\text{C}$  Außentemperatur etwa 24 kW benötigt werden.<sup>214</sup> Die zu elektrifizierende Linie ist die Linie 204 mit einer Gesamtumlaufänge von 12,56 km. Die Strecke von der Hertzallee zum S+U-Bahnhof Südkreuz beträgt 6,45 km und die Rückfahrt 6,11 km. Das Geschwindigkeitsprofil ist in Kapitel 0 und das Höhenprofil ist in Kapitel 5.3 beschrieben.

### 8.1 Schritt 1: Bestimmung des Zielsystems und seiner Zielwerte

Das Zielsystem wird über konzeptrelevante Systemmerkmale und ihre Ausprägungen definiert. Die Ableitung der konzeptrelevanten Systemmerkmale aus der Verknüpfung von Kundenwünschen und der Produktstruktur wird in Kapitel 4.2 erläutert. Für die Untersuchung der Energieübertragungs- und Batteriesysteme ergeben sich folgende konzeptrelevante Systemmerkmale: Treibhausgasemissionen, Energiebedarf und –verbrauch, mögliche Reichweite mit einer Ladung, Leergewicht und erforderliche Ladezeit. Die Ausprägungen der Merkmale wurden über eine Benchmark-Analyse ermittelt und deren Bandbreite geben die Grenzwerte des Zielsystems an (vgl. Kapitel 4.3). Im Folgenden werden diese ermittelten Zielgrenzwerte für die jeweiligen Betriebsstrategien in Tabelle 23 und Tabelle 24 aufgelistet.

Tabelle 23: Zielwerte Depotladung

Merkmal	Benchmark Minimalanforderung	Benchmark best case	Unternehmensanforderung
THG Emissionen	1,4 kgCO <sub>2</sub> eq/km	0,2 kgCO <sub>2</sub> eq/km	k.A.
Reichweite	115 km	250 km	160 km
Leergewicht	15.000 kg	13.790 kg	k.A.
Ladezeit	5h	3h	k.A.

---

<sup>214</sup> Vgl. Göhlich et al. 2018

**Tabelle 24: Zielwerte Gelegenheitsladung**

Merkmal	Benchmark Minimalanforderung	Benchmark best case	Unternehmensanforderung
THG Emissionen	1,4 kgCO <sub>2</sub> eq/km	0,2 kgCO <sub>2</sub> eq/km	k.A.
Energieverbrauch		0,8 kWh/km	
Reichweite	3,5 km	12,4 km	Linienbetrieb bei schwierigen Randbedingungen
Leergewicht	15.000 kg	12.600 kg	k.A.
Ladezeit	12 min.	2 min.	max. 10min

## 8.2 Schritt 2: Aufstellung der zu untersuchenden Konzeptvarianten und Definition des Lastprofils

### 8.2.1 Konzeptvarianten

In Kapitel 3.3 wurden die elektrischen Ladesysteme bereits auf vier Varianten reduziert und in Abbildung 26 dargestellt. Diese Bussysteme werden wie bereits erwähnt im Wesentlichen durch das Energiezuführungssystem beschrieben und sind einer bestimmten Betriebsstrategie (Depotladung oder Gelegenheitsladung) zugeordnet. In Abhängigkeit von diesen erfolgt die Auswahl und Auslegung des Batteriesystems. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Batterietypen LFP; NMC und LTO untersucht.<sup>215</sup> In Anlehnung an die morphologische Analyse<sup>216</sup> wird in Tabelle 25 der mögliche Lösungsraum mit 4 x 3 = 12 Varianten gezeigt.

**Tabelle 25: Lösungsraum mit unterschiedlichen Varianten**

Funktion	Option			
Betriebsstrategie	 Depot	 Gelegenheitsladen, statisch		
Energiezuführungssystem	 Plug-In	 Induktion	 Pantograph	 Batteriewechsel
Batterie System	LFP	NMC	LTO	

<sup>215</sup> LFP vgl. European Batteries 2012, NMC vgl. Kokam 2015, LTO vgl. Leclanché 2016a

<sup>216</sup> Vgl. Pahl et al. 2007

Im nächsten Schritt wird die Verträglichkeit zwischen den Teillösungen untersucht.<sup>217</sup> Tabelle 26 zeigt die Verträglichkeitsmatrix zwischen den definierten elektrischen Bussystemen mit dem Batterietyp.

**Tabelle 26: Verträglichkeitsanalyse mit Batterietechnologien**

	Kapazität, C-Rate				
Ladeleistung		80 kW	200 kW	375 kW	20 kW
LFP	45 Ah, 1 C	✓ Depot-LFP	✗	✗	✓ BW-LFP
NMC	46 Ah, 3 C	✗	✓ iOC-NMC	✓ kOC-NMC	✗
LTO	30 Ah, 4C	✗	✓ iOC-LTO	✓ kOC-LTO	✗

LFP Batterien lassen sich mit einer C-Rate von maximal 1 C aufladen, daher ist es sinnvoll diese mit einem Energiezuführungssystem zu kombinieren, die eine geringe Ladeleistung aufweisen. Diese sind das Plug-In und das Batteriewechsel-System mit jeweils 80 kW und 20 kW.<sup>218</sup> Die Batterietypen NMC und LTO sind für höhere C-Raten konzipiert und können daher mit Energiezuführungssystemen mit höherer Ladeleistung kombiniert werden. Daraus ergeben sich sechs zu untersuchende Varianten mit den Namen Depot-LFP, iOC-NMC, kOC-NMC, iOC-LTO, kOC-LTO, BW-LFP.

## 8.2.2 Lastprofil

Bei der Betriebsstrategie Depotladung fährt das Fahrzeug vom Depot, absolviert seine Tageskilometer und kommt zum Laden wieder rein. Hier ist festzulegen unter welchen Bedingungen der Batteriebus eine bestimmte Reichweite bewerkstelligen muss. Der limitierende Faktor ist das Batteriegewicht.

Bei der Betriebsstrategie Gelegenheitsladen wird die Standzeit an der Endhaltestelle zum Nachladen der Batterie verwendet. Zur Auslegung des Busses ist es erforderlich zu wissen, ob an beiden Endhaltestellen oder nur an einer eine Nachlademöglichkeit vorhanden ist. Die Reichweite und das Gewicht der Batterie stehen über die mitzuführende Kapazität in Konkurrenzbeziehung, daher sollte priorisiert werden wonach die Auslegung erfolgt. Die Auslegung der Batterie hat auch einen Einfluss auf die Investitionskosten und je nach Ladezustandsfenster  $\Delta SoC$  wird die Alterung der Batterie beeinflusst, daher sollte dieses beim Gelegenheitsladen möglichst klein gehalten werden.

<sup>217</sup> Vgl. Hellenbrand und Lindemann 2008; Gorbea et al. 2010

<sup>218</sup> Vgl. Die Eigenschaften der Batterietypen und der Energiezuführungssysteme sind in Tabelle 3, S. 21 und Tabelle 5, S. 28 beschrieben.

Im Folgenden werden daher für die zwei Betriebsstrategien jeweils die Lastprofile definiert. Das Lastprofil Grenzbetrieb wird zur Auslegung des Batteriesystems herangezogen, während das Lastprofil durchschnittlicher Betrieb zur Bestimmung der Treibhausgasemissionen und der Energiekosten dient.

## **Grenzbetrieb**

Zur Auslegung der Batterie und zur Bestimmung des tatsächlichen Leergewichts des Batteriebusses ist der Energieverbrauch im Grenzbetrieb relevant.

Für die Betriebsstrategie Gelegenheitsladung mit Induktion und Pantograph wird an beiden Endhaltestellen nachgeladen. Das heißt, für den Leistungsbedarf Antrieb wird die Rückfahrt (zweite Hälfte des Umlaufs) in Abbildung 33 herangezogen. Mit dem erhöhten Verkehrsaufkommen muss häufiger beschleunigt und abgebremst werden. Durch die zeitlich längere Fahrt ist auch die Klimatisierung länger im Einsatz. Dies trägt ebenfalls zum Grenzbetrieb bei. Der Leistungsbedarf Klima wird im Heizbetrieb bestimmt, da im Heizbetrieb der Energieverbrauch höher ist. Die Außentemperatur beträgt  $-15\text{ °C}$  und entspricht der kleinsten geforderten Temperatur (vgl. Kapitel 2.2.3). Im Grenzbetrieb wird die Heizung auf minimaler Stufe eingestellt, die Innenraumtemperatur entspricht  $18\text{ °C}$ . Die Batteriewechselstation wird aufgrund des hohen Flächenbedarfs nur auf einer Seite der Linie installiert. Die Batterie im Bus wird daher erst nach einem Umlauf ausgetauscht.

Für die Betriebsstrategie Depotladung wird gefordert, dass der Bus die 160 km Reichweite bewerkstelligen muss. Eine überschlägige Berechnung ergibt jedoch, dass dies nicht mit elektrischer Heizung bei einer Außentemperatur von  $-15\text{ °C}$  möglich ist.<sup>219</sup> Da das Batteriegewicht der limitierende Faktor ist, wird die Batterie nach diesem Kriterium ausgelegt und überprüft unter welchen Bedingungen der Batteriebus 160 km bewältigen kann. Der Leistungsbedarf Antrieb wird mit einem durchschnittlichen Umlauf bestimmt. Das mittlere Fahrgastaufkommen wird in der Literatur mit etwa 20 % angegeben.<sup>220</sup> Je nach Beförderungskapazität ändert sich die Zahl der Fahrgäste. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass die Hälfte der Sitzplätze belegt ist. Bei 34 Sitzplätzen entspricht dies 17 Fahrgästen. Der Tagesverbrauch Antrieb ergibt sich aus  $11 + 2$  Umläufen. Die zwei zusätzlichen Umläufe spiegeln die Einsetz- und Aussetzfahrt wider.

## **Durchschnittlicher Betrieb**

Mit dem Lastprofil durchschnittlicher Betrieb wird der Jahresverbrauch bestimmt, mit dem die Treibhausgasemissionen und die Energiekosten ermittelt werden. Der durchschnittliche Leistungsbedarf Klima ergibt sich aus den Leistungsbedarfen je Außentemperatur multipliziert mit der Anzahl der Tage. Der Leistungsbedarf Antrieb wird mit der

---

<sup>219</sup> Bei einem angenommenen Verbrauch von  $3,3\text{ kWh/km}$  ergäbe das auf 160 km eine erforderliche Batteriekapazität von 528 kWh.

<sup>220</sup> Vgl. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) 2016. Dies entspricht bei einer durchschnittlichen Beförderungskapazität eines 12 m Busses

vorausgelegten Batterie, 17 Fahrgästen und einem durchschnittlichen Fahrprofil bestimmt. Dieses Fahrprofil spiegelt den Durchschnitt der untersuchten Umläufe der Linie wider.

### 8.3 Schritt 3: Analyse der Systemeigenschaften

#### 8.3.1 Auslegung der erforderlichen Batteriegröße

Die Auslegung der Batterie erfolgt nach dem in Kapitel 6.2.5 beschriebenen Vorgehen. Die Beschaffenheitsmerkmale der Batterietypen wurde aus Datenblättern entnommen und in Tabelle 27 zusammengefasst.

Tabelle 27: Merkmalsausprägung der untersuchten Batteriezellen<sup>221</sup>

Merkmal	LFP	NMC	LTO
Maximale Zellspannung [V]	3,65	4,2	2,7
Nennspannung [V]	3.2	3.7	2.3
Nennkapazität [Ah]	45	46	30
Innenwiderstand [mΩ]	2	1,2	2
Gewicht je Zelle [kg]	0,99	1	1,1
Gravimetrische Energiedichte [Wh/kg]	145	170	63
C-Rate [C]	1	3	4
Zyklenfestigkeit (DoD 100 %)	3.000	5.000	15000

Vergleicht man die Werte in Tabelle 27 mit den Werten in Tabelle 3, Seite 21, in der die Bandbreiten der verschiedenen Merkmale aufgezeigt sind, so fällt auf, dass die verwendete LFP und NMC Batteriezelle das obere Segment der Bandbreite abbildet und die vorliegende LTO Batteriezelle das untere Segment.

Bei der Betriebsstrategie Depotladung ist der limitierende Faktor das Gewicht, daher wird bei Auslegung der Batterie möglichst die gesamte Kapazität genutzt. Das Ladezustandsfenster  $\Delta SoC$  wird auf 85% gesetzt, die Batterie wird zwischen  $SoC_{min}$  10 % und  $SoC_{max}$  95 % genutzt.

Bei der Betriebsstrategie Gelegenheitsladen spielen Kosten und Alterung eine wesentliche Rolle. Die hier untersuchten Batterietechnologien NMC und LTO haben sehr unterschiedliche Zyklenfestigkeiten von 5.000 bzw. 15.000 Vollzyklen. Dies würde für die Nutzung auf der Linie mit 11 Umläufen, mit Einsatz- und Aussetzfahrt 24 Vollzyklen pro Tag bedeuten und die Batterien würden eine Lebensdauer von 208 bzw. 624 Tagen haben. Wird die Batterie mit Teilzyklen beansprucht, ergibt sich eine höhere Lebensdauer. Die Lebensdauer steigt exponentiell mit kleiner werdendem Ladezustandsfenster  $\Delta SoC$ . Wird für beide Technologien im Grenzbetrieb die gleiche Zyklenfestigkeit von

<sup>221</sup> LFP vgl. European Batteries 2012, NMC vgl. Kokam 2015, Koebel 2014, LTO vgl. Leclanché 2016a

30.000 Zyklen vorausgesetzt, ergeben sich nach Koebel (2014) folgende Ladezustandsfenster:  $\Delta SoC_{NMC}$  30 % und  $\Delta SoC_{LTO}$  62 %. Der Bus mit Batteriewechsel-Konzept hat das Ladeprofil des Busses mit Depotladung. Es wird daher ebenso ein Ladezustandsfenster von  $\Delta SoC_{LFP}$  85 % angenommen.

### 8.3.2 Bestimmung der konzeptrelevanten Systemeigenschaften

Mit der ausgelegten Batterie werden nun die konzeptrelevanten Systemeigenschaften bestimmt. Es ergeben sich mit den gewählten Ladezustandsfenstern im Grenzbetrieb drei technisch umsetzbare Konzepte und drei Konzepte, die die Anforderungen nicht erfüllen (siehe Tabelle 28).

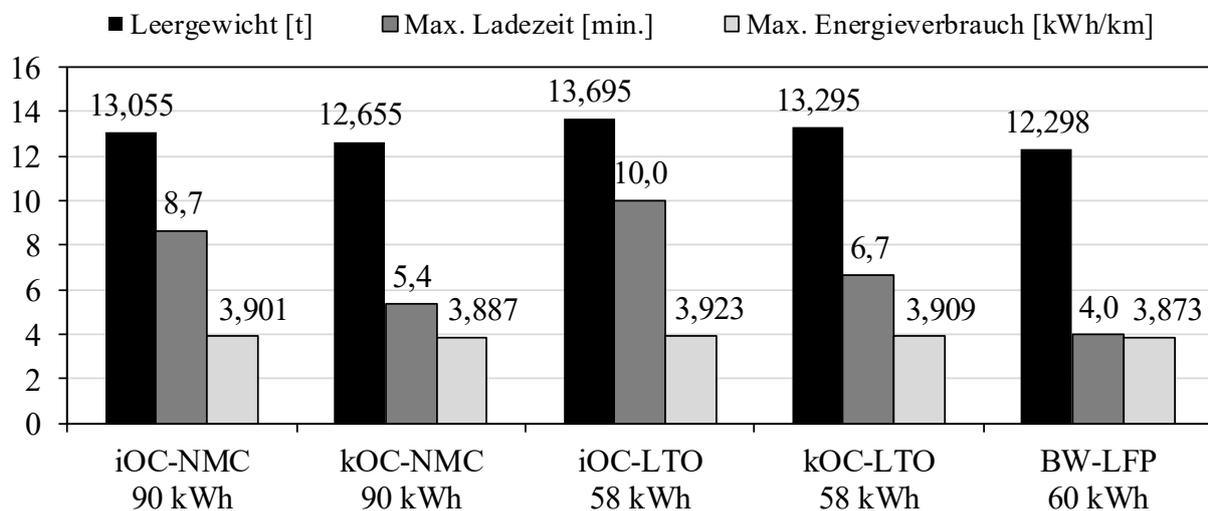
**Tabelle 28: Auslegung der Batterie im Grenzbetrieb mit Ladezustandsfenster  $\Delta SoC_{LFP} = 85\%$ ,  $\Delta SoC_{NMC} = 30\%$ ,  $\Delta SoC_{LTO} = 62\%$  und konzeptrelevante Systemeigenschaften, grau bedeutet Anforderung nicht erfüllt**

	Depot-LFP	iOC-NMC	kOC-NMC	iOC-LTO	kOC-LTO	BW-LFP
$\Delta SoC$ [%]	85	30	30	62	62	85
elektr. Heizleistung [kW]		30	30	30	30	30
Verschaltung s/p [Zellen]	207/10	180/3	180/3	280/2	280/2	207/2
Batteriekapazität [kWh]	298	90	90	39	39	60
Ladezustand am Ende der Fahrt [%]	10	38,0	38,1	22,6	22,9	14,8
Gewicht Batterie und fahrzeugseitiges Ladesystem [kg]	3400	1455	1055	1582	1182	698
Leergewicht [t]	15,000	13,055	12,655	13,182	12,782	12,298
Maximale Ladezeit [min]	200,5	8,7	5,4	11	10,2	4,0
Maximaler Energieverbrauch [kWh/km]	1,58	3,901	3,887	3,904	3,890	3,873
Reichweite [km]	160	-	-	-	-	-

Tabelle 28 verdeutlicht, dass das Konzept Depotladung mit der Auslegung der Batterie nach maximaler Gewichtsgrenze (3.400 kg) den Tageseinsatz mit 160 km nur schafft, wenn der Verbrauch bei unter 1,58 kWh/km liegt. Aufgrund des hohen Gewichts bedeutet dies einen Einsatz bei Außentemperaturen zwischen 15 °C und 20 °C. Dieses Konzept wird daher im weiteren Verlauf nicht weiter betrachtet.<sup>222</sup>

<sup>222</sup> Soll dieses Konzept trotzdem zum Einsatz kommen, wären im Winterbetrieb der Einsatz von Brennstoffzuheizern notwendig. Außerdem würde ein Mehrbedarf an Fahrzeugen und Personal auftreten.

Das größer gewählte Ladezustandsfenster  $\Delta SoC_{LTO}$  führt zu einer geringeren erforderlichen Batteriekapazität, daher fällt die geringe gravimetrische Energiedichte der LTO Batterie nicht so stark ins Gewicht. Der Gewichtsunterschied zwischen der NMC-Batterie und der LTO Batterie liegt bei etwa 130 kg. Jedoch wird deutlich, dass die Konzepte mit LTO Batterie mit einer C-Rate von 4 C und nur zwei Zellen parallel die geforderte Ladezeit nicht einhalten. Damit die hier verwendete LTO Batterie im Grenzbetrieb eine maximale Ladezeit von 10 min. nicht überschreitet, wurde die Anzahl paralleler Zellen auf drei gesetzt und ein Ladezustandsfenster von  $\Delta SoC_{LTO} = 40\%$  gewählt, sodass nun alle Konzepte mit Gelegenheitsladen anwendbar sind. Abbildung 53 zeigt die Ausprägung der Systemmerkmale Leergewicht, maximale Ladezeit und maximaler Energieverbrauch im Grenzbetrieb.<sup>223</sup> Die Energieverbräuche der Konzepte liegen nah beieinander. Das Mehrgewicht des induktiven fahrzeugseitigen Ladesystems von 400 kg wirkt sich in einem Mehrverbrauch von 0,014 kWh/km aus.



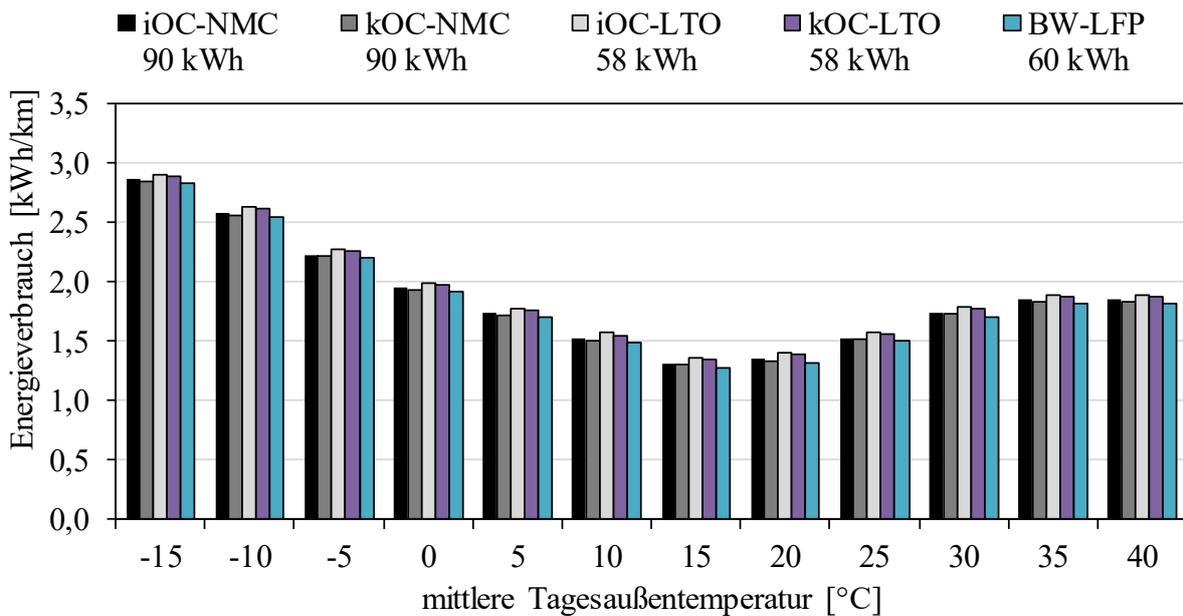
**Abbildung 53: Auslegung der Batterie im Grenzbetrieb mit Gewichtsbeschränkung und Ladezustandsfenstern  $\Delta SoC_{LFP} = 85\%$ ,  $\Delta SoC_{NMC} = 30\%$ ,  $\Delta SoC_{LTO} = 40\%$**

Der durchschnittliche Verbrauch  $E_{total,avg}$  ergibt sich aus dem Mittel der Energieverbräuche je Tagesaußentemperatur  $T_{amb}$  (siehe Abbildung 54) multipliziert mit der Anzahl der Tage  $N_{Tamb}$ , an denen diese Temperatur im Jahr auftritt.<sup>224</sup>

$$E_{total,avg} = \frac{\sum(E_{total}(T_{amb}) \cdot N_{Tamb})}{365} \quad (19)$$

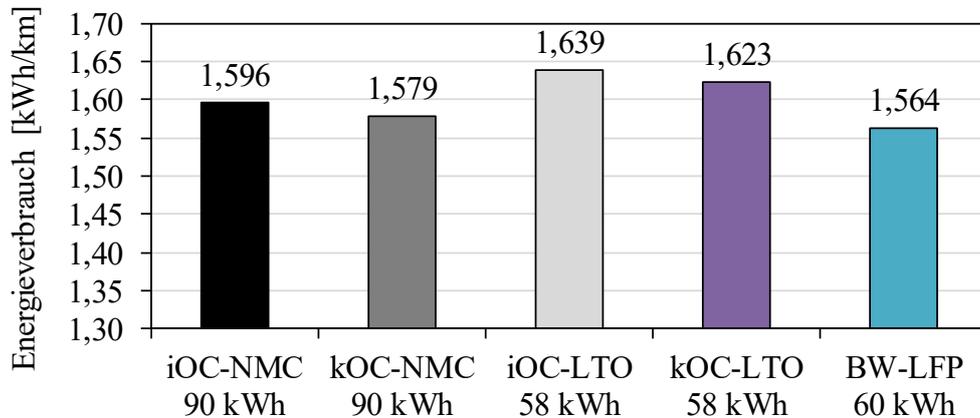
<sup>223</sup> Die vollständige Tabelle mit der jeweiligen Batteriekonfiguration befindet sich im Anhang A7.

<sup>224</sup> Hier wurde das Durchschnittsjahr, welches bereits in Kapitel 5.4 beschrieben wurde, verwendet.



**Abbildung 54: Energieverbrauch je Konzept, je mittlerer Tagesaußentemperatur und 18°C Innenraumtemperatur**

Der durchschnittliche Verbrauch ist in Abbildung 55 abgebildet und ist vergleichbar mit dem Energieverbrauch bei 10 °C Außentemperatur.



**Abbildung 55: durchschnittlicher Verbrauch je Konzept**

Die Treibhausgasemissionen sind proportional zum durchschnittlichen Verbrauch und lassen sich über den in Kapitel 4.3 ermittelten Faktor  $THG_{\text{Faktor}} = 0,595 \text{ kgCO}_2\text{eq/km}$  bestimmen. Das Ergebnis ist in Abbildung 56 zu sehen.

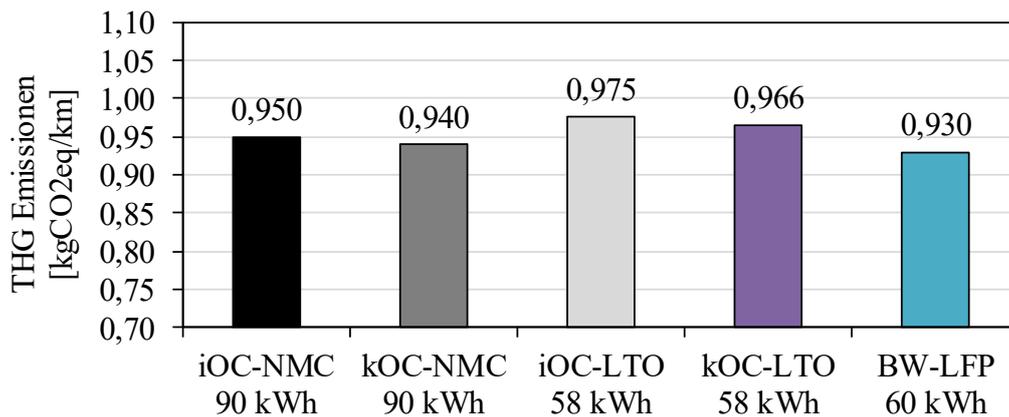


Abbildung 56: Treibhausgasemissionen je Konzept

### 8.3.3 Bestimmung der kundenwertigen Eigenschaften

Die kundenwertigen Merkmale Ökologie und Klimaschutz wurde bereits über die Treibhausgasemissionen bestimmt. Mit den vorliegenden Konzepten können während des Betriebs lokal Emissionen vermieden werden und global ist eine Einsparung zwischen 30 % und 34 % möglich, wenn von einem Vorgängermodell mit 44 l/100 km Verbrauch gerechnet wird.

Die Betriebstauglichkeit wird über die planerische Flexibilität, die Beförderungskapazität und die Produktivität des Umlaufs bestimmt. Die planerische Flexibilität wird über die mögliche Reichweite mit einer Ladung definiert. Unter Annahme des durchschnittlichen Verbrauchs, wie er in Abbildung 54 angegeben ist, ergibt sich eine Reichweite zwischen 14,1 km und 32,4 km (vgl. Abbildung 57). Damit ist unter Annahme eines durchschnittlichen Verbrauchs der Linienbetrieb mit nur einer Nachlademöglichkeit gegeben, sodass bei Ausfall einer Ladestation der Betrieb fortgesetzt werden kann.

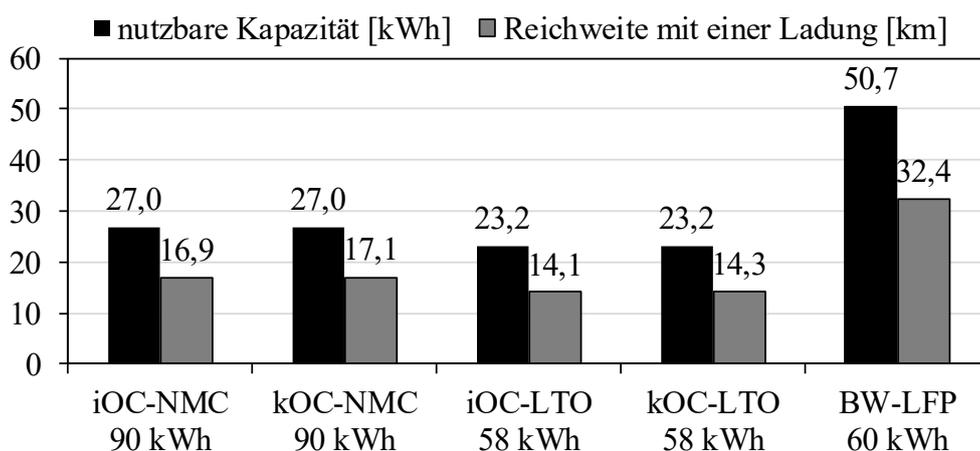
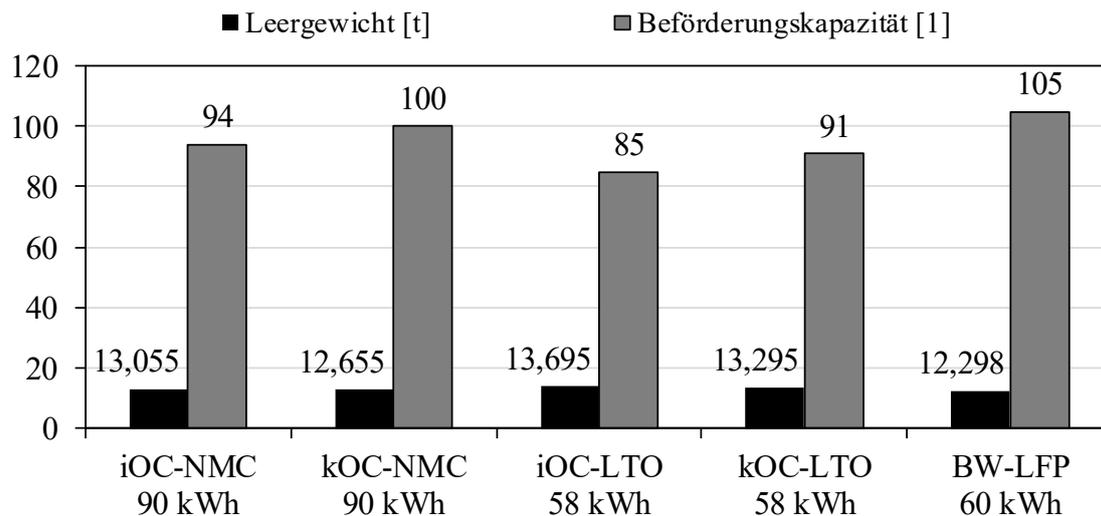


Abbildung 57: Nutzbare Batteriekapazität und mögliche Reichweite mit einer Ladung unter Annahme des Durchschnittsverbrauchs je Konzept

Die Beförderungskapazität lässt sich mithilfe des Leergewichts und des zulässigen Gesamtgewichts angeben. Sie liegt zwischen 85 Fahrgästen und 105 Fahrgästen.



**Abbildung 58: Beförderungskapazität und Leergewicht je Konzept**

Die Produktivität des Umlaufs wird über die erforderliche Ladezeit ermittelt. Da alle Konzepte im Grenzbetrieb unter 10 min Ladezeit bleiben, ist der Fahrplanwirkungsgrad unverändert.

## 8.4 Schritt 4: Konzeptbewertung

Aus technischer Sicht ist die Elektrifizierung der in Kapitel 5.1.2 beschriebenen Linie unter den gegebenen betreiber- und standortspezifischen Randbedingungen mit fünf Konzepten realisierbar. Diese sind die Konzepte mit Gelegenheitsladung iOC-NMC, kOC-NMC, iOC-LTO, kOC-LTO und das Batteriewechselkonzept. Das Konzept Batteriebus mit Depotladung ist unter den gegebenen Randbedingungen wegen der geringen Reichweite kein umsetzbares Konzept.

Vergleicht man die fünf realisierbaren Konzepte basierend auf der Batterietechnologie, so zeigen sich Vorteile in der NMC Batterie. Ihre hohe Nennkapazität und C-Rate gepaart mit einer hohen gravimetrischen Energiedichte machen diese Batterie zur bevorzugten. Ein Vergleich der Ladesysteme zeigt, dass das konduktive Ladesystem aufgrund des geringeren fahrzeugseitigen Gewichts einen geringeren Energieverbrauch verursacht und aufgrund der Ladeleistung eine kürzere Ladezeit ermöglicht. Unter den gewählten Betriebsbedingungen und dem Ladezustandsfenster der LFP-Batterie, scheidet die Batteriewechselstation in allen Merkmalen am besten ab, da die mitgeführte Batterie im Vergleich zu den anderen Konzepten am kleinsten ist. Das geringere Gewicht der Batterie beeinflusst positiv den Energieverbrauch. Durch die Wechseltechnologie und die Platzierung der Wechselstation direkt an einer Endhaltestelle ist die Ladezeit aus Sicht des Fahrzeugs auf 4 min begrenzt (vgl. Abbildung 53). Der niedrigere Verbrauch ergibt außerdem Vorteile in den Treibhausgasemissionen sowie der Reichweite mit einer Ladung (vgl. Abbildung 57) und das geringe Batteriegewicht wirkt sich positiv auf das Leergewicht und damit die Beförderungskapazität aus (Abbildung 58).

Die technische Machbarkeit ist in einem zweiten Schritt wirtschaftlich zu untersuchen. Es sind die Betriebskosten und die Anschaffungskosten zu bestimmen, welche in die TCO-Analyse einfließen. Für die Konzepte Gelegenheitsladung ist an jeder Endhaltestelle eine Schnellladestation mit 200 kW bzw. 375 kW und ein Transformator vorzusehen. Zusätzlich befindet sich im Depot je Bus eine Ladesäule mit Ladestecker. Für das Konzept Batteriewechsel ist eine Batteriewechselstation vorzusehen. Diese sollte zwei Wechselroboter haben, da sonst bei Ausfall eines Roboters der Betrieb der Linie nicht gewährleistet ist. Des Weiteren ist der Flächenbedarf vor Ort und die Anzahl der Wechselbatterien je Bus zu prüfen. Nicht immer ist es möglich eine Wechselstation an einer nahegelegenen Betriebsendhaltestelle aufzubauen. Liegt die Wechselstation im Depot müssten die Leerfahrten zur Wechselstation berücksichtigt werden, welche den Fahrplanwirkungsgrad verschlechtern würden. Für das Konzept Batteriewechsel sind im Grenzbetrieb pro Bus mindestens vier Batterien vorzuhalten (eine im Bus und drei in der Station).<sup>225</sup> Ein weiterer technischer Aspekt hat großen Einfluss auf die Kosten: die Batteriealterung. Durch das sehr groß ausgewählte Ladezustandsfenster  $\Delta SoC_{LFP} = 85\%$  altert die LFP Batterie schneller. Dies führt zu Mehrkosten, wenn die Batterie aufgrund von Alterung ausgetauscht werden muss.

---

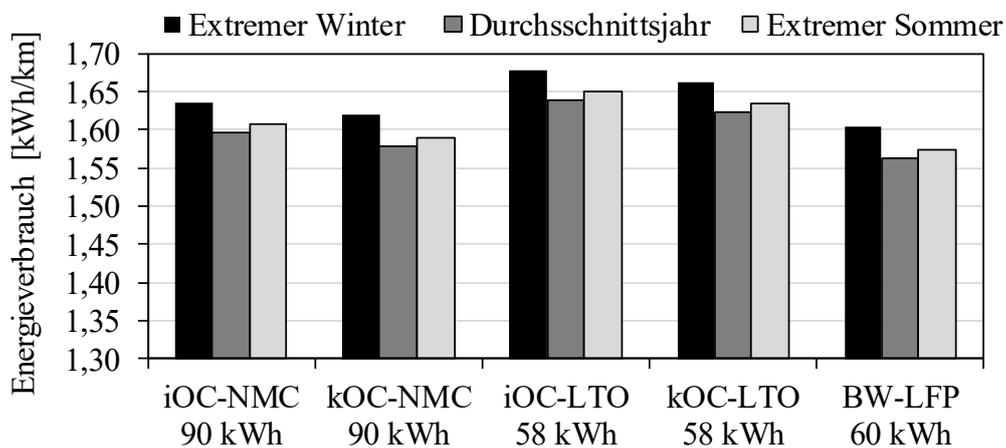
<sup>225</sup> Im Grenzbetrieb wird auf einem Umlauf die Batterie fast leer gefahren, dies entspricht etwa 51 kWh. Die Aufladung in der Station mit 20 kW würde mehr als 2,5 Stunden benötigen. Das bedeutet, dass die Batterie bei einem einstündigen Umlauf erst nach dem dritten Umlauf des Busses aufgeladen ist.

## 9. Sensitivitätsanalyse

In Kapitel 8 wurde die vorgestellte Methodik angewendet und 5 Konzepte konnten für die Elektrifizierung der Linie unter den gegebenen Randbedingungen identifiziert werden. In diesem Kapitel soll der Einfluss der betreiber- und standortspezifischen Randbedingungen sowie Potentiale der Teilsysteme untersucht werden.

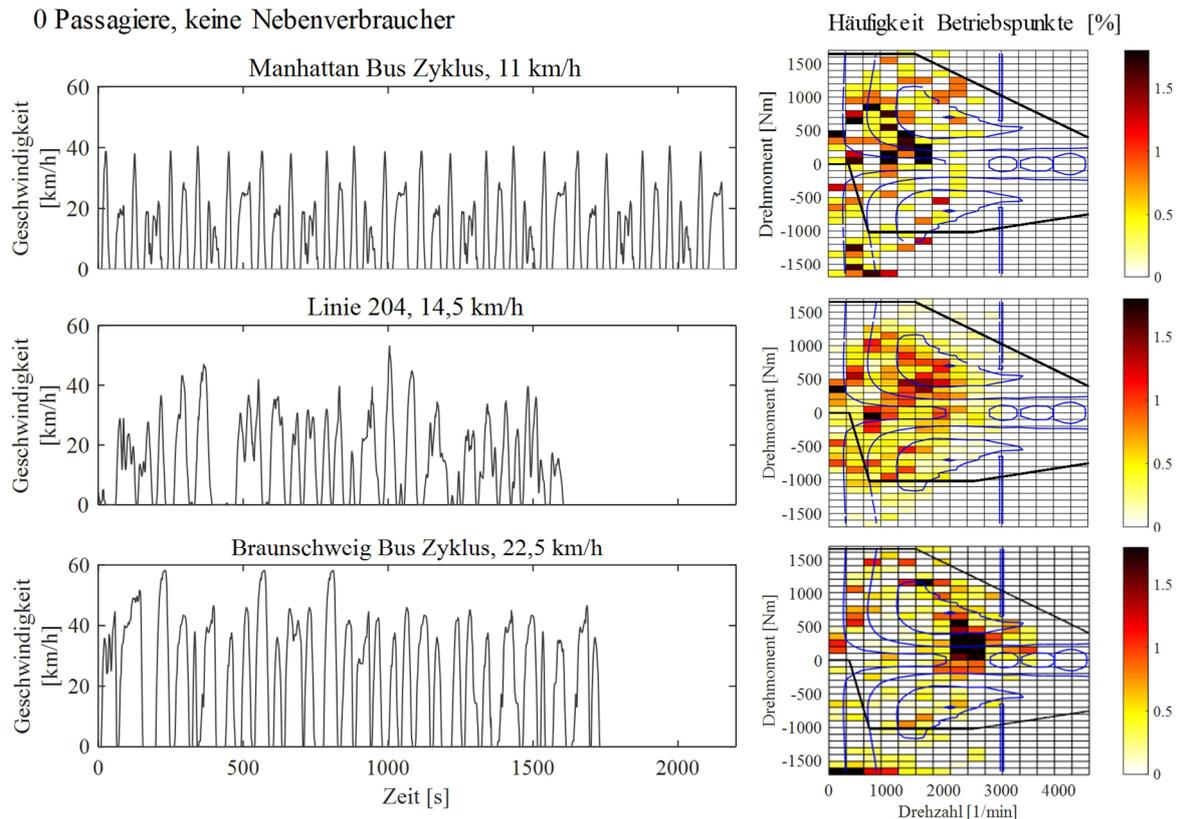
Es wird im Folgenden exemplarisch auf die Auswirkungen der Temperaturverteilung, des gefahrenen Fahrzyklus und die Beschaffenheitsmerkmale Ladeleistung und C-Rate eingegangen.

Der Einfluss der Temperaturverteilung kann in Abbildung 59 nachvollzogen werden. In einem Jahr mit extremem Sommer ist die Klimaanlage und in einem Jahr mit extremem Winter ist die Heizung mehr im Betrieb. Dies zeigt sich im durchschnittlichen Verbrauch, wobei der Verbrauch im Jahr mit extremem Winter höher liegt, da die Heizung mehr Energie verbraucht als die Klimaanlage.



**Abbildung 59: Vergleich des durchschnittlichen Energieverbrauchs für ein Jahr mit extremem Winter, ein Durchschnittsjahr und ein Jahr mit extremem Sommer**

Um den Einfluss des Fahrzyklus auf die Systemeigenschaften zu bestimmen, werden für die Untersuchung der Manhattan Bus und der Braunschweig Bus Zyklus zum Vergleich verwendet. Sie spiegeln den Verkehr in einer Megastadt und im Randgebiet wieder (vgl. Tabelle 20). Der Manhattan Bus Zyklus ist im Vergleich zur Linie 204 nur 3,35 km lang und hat eine etwas geringere Durchschnittsgeschwindigkeit. Damit der Bus auf beiden Linien etwa die gleiche Strecke zurücklegt, wird der Manhattan Bus Zyklus zweimal gefahren. Abbildung 60 stellt die drei Geschwindigkeitsprofile dar und zeigt die Häufigkeitsverteilung der Betriebspunkte im Motorkennfeld auf.



**Abbildung 60: Vergleich der Geschwindigkeitsprofile Manhattan Bus Zyklus, Linie 204 und Braunschweig Bus Zyklus**

Die Betriebspunktverteilung verdeutlicht die Charakteristik der Zyklen. Der Manhattan Bus Zyklus ist ein urbaner Bus Zyklus<sup>226</sup> mit vielen Betriebspunkten im niedrigen Drehzahlbereich. Der Stop und Go Verkehr mit hohen Beschleunigungen spiegelt sich in den Betriebspunkten mit hohem Drehmoment wider.

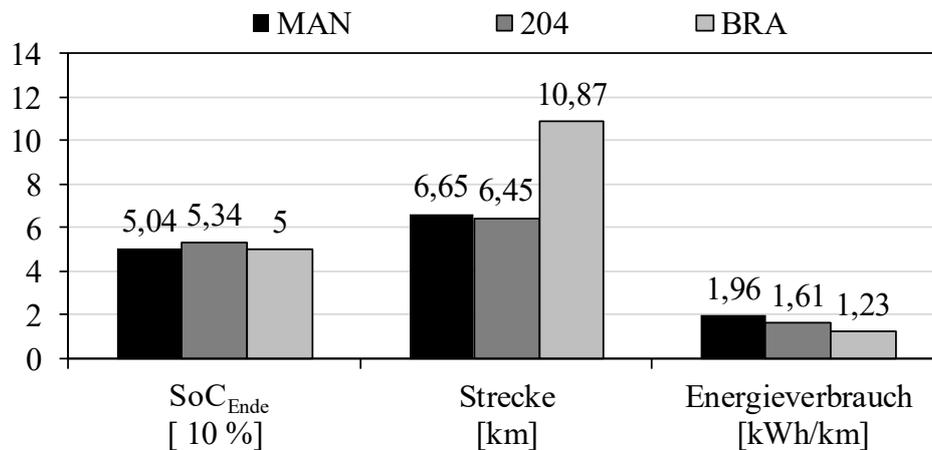
Der Braunschweig Bus Zyklus weist einen großen Betriebspunkteanteil im hohen Drehzahl- und niedrigen Drehmomentbereich auf. Dies spricht für Fahrten bei hoher Geschwindigkeit mit weniger Beschleunigung. Im Vergleich zur Linie 204 weisen der Manhattan Bus Zyklus und der Braunschweig Bus Zyklus weniger Betriebspunkte im Bereich der Rekuperation auf.

Die Untersuchung zeigt, dass abhängig vom Zyklus das Motorkennfeld unterschiedlich ausgenutzt wird. Um eine hohe Effizienz zu erreichen, sollte das Kennfeld mit dem Fahrzyklus und seinen Betriebspunkten abgestimmt sein. Des Weiteren sollte das Rekuperationspotential des Motors ausgenutzt werden, das heißt, dass scharfes Abbremsen mit hohen Bremsmomenten vermieden werden sollten. Dies erfordert eine vorausschauende Fahrweise.

In Abbildung 61 sind für die drei Fahrprofile der Batterie Ladezustand am Ende der Fahrt  $SOC_{\text{Ende}}$ , die zurückgelegte Strecke und der Energieverbrauch gezeigt. Die Studie

<sup>226</sup> Vgl. Abschnitt 5.1.1, Tabelle 20

wurde mit dem Konzept iOC-NMC, 17 Passagieren, 10°C Außentemperatur und ohne Berücksichtigung des Höhenprofils durchgeführt.



**Abbildung 61: Strecke, Energieverbrauch bei 10°C Außentemperatur und Ladezustand am Ende der Fahrt für das Konzept iOC-NMC**

Der Ladezustand am Ende der Fahrt verdeutlicht, dass die unterschiedlichen Fahrprofile etwa gleich viel Energie aufgewendet haben. Aufgrund der unterschiedlich zurückgelegten Strecke ergeben sich jedoch die verschiedenen Energieverbräuche in kWh/km. Die höhere Fahrgeschwindigkeit und die wenigen Stopps des Braunschweig Bus Zyklus führen zu einem geringeren Energieverbrauch in kWh/km. Der Verbrauch auf dem Manhattan Bus Zyklus ist im Vergleich zur Linie 204 etwas höher, dies kann mit der zeitlich längeren Fahrt begründet werden, in der die Heizung länger läuft und damit zum Mehrverbrauch beiträgt.

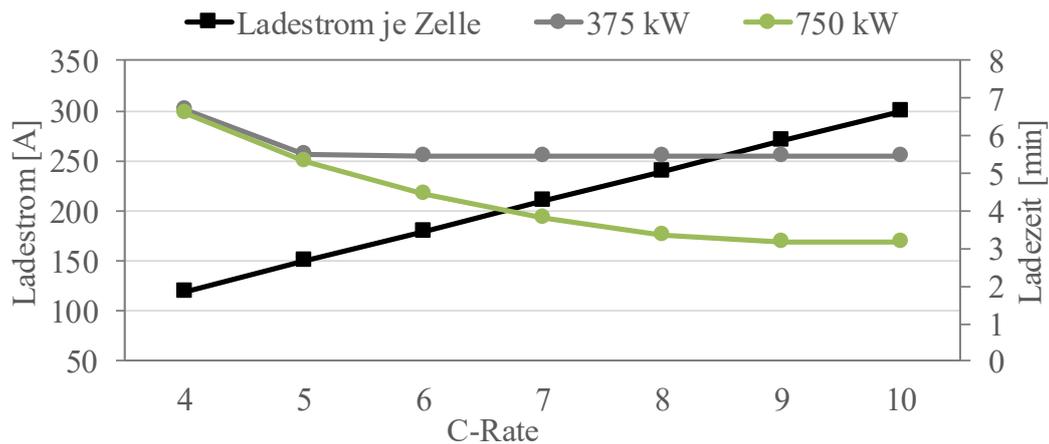
Die Untersuchung zeigt, dass bei Linien mit Vorort-Charakter wie der Braunschweig Bus Zyklus der Batteriebus einen geringeren Energieverbrauch je Strecke hat. Da diese Fahrzeuge in der Regel längere Wege zurücklegen, kann die mitzuführende Energie im Fahrzeug etwa in derselben Größenordnung wie bei einer Linie mit hohem Verkehrsaufkommen und kurzer Strecke liegen.

Im Rahmen der Studie wurden für die Untersuchung der Energiezuführungs- und Batteriesysteme auf dem Markt verfügbare Produkte und deren Beschaffenheitsmerkmale herangezogen und basierend auf den konkreten Produkten eine Bewertung vorgenommen. Im Folgenden erfolgt eine Potentialanalyse wie sich Verbesserungen in der Technologie auf den Systementwurf auswirken.

Das induktive Ladesystem benötigt für die Energieübertragung eine Spule im Fahrzeugboden. Eine Erhöhung der Ladeleistung geht nur mit einer Vergrößerung der Spule einher. Dies ist jedoch durch den Platz im Fahrzeugboden begrenzt. Induktive Ladesysteme mit mehr als 200 kW sind der Autorin nicht bekannt. Die Ladeleistung des konduktiven Ladesystems dagegen hängt von den Unterwerken und der Leistungselektronik ab. Einige Hersteller bieten bereits konduktive Ladesysteme mit 600 kW Ladeleistung an.<sup>227</sup>

<sup>227</sup> Vgl. ZeEUS 2017

In Abbildung 62 wird das Konzept kOC-LTO aus Kapitel 8 verwendet um das Potential einer höheren C-Rate in Kombination mit einer doppelten Ladeleistung zu untersuchen. Wird die C-Rate größer, wird der mögliche Ladestrom je Zelle erhöht. Für die Kombination mit der 375 kW Ladeleistung wird die Ladezeit mit einer 5 C-Rate mit der kOC-NMC Variante vergleichbar. Eine weitere Erhöhung der C-Rate zeigt keinen Effekt, da der vorliegende Ladestrom der der Stromaufnahmefähigkeit der Zelle entspricht. Wird die Ladeleistung und die C-Rate erhöht, können Ladezeiten unter 4 min realisiert werden.



**Abbildung 62: Auswirkung einer steigenden C-Rate und einer doppelten Ladeleistung auf die Ladezeit für das Konzept kOC-LTO**

Im Beispiel in Kapitel 8 wurde eine innerstädtische Linie elektrifiziert, welche an den Endhaltestellen eine 10-minütige Pause zum Nachladen zur Verfügung hatte. Reduziert sich diese Zeit nun auf z.B. 5 min würden die Konzepte mit induktivem Gelegenheitsladen wegfallen, da mit 200 kW Ladeleistung die Ladezeit von 5 min nicht erreicht werden kann. Mit dem konduktiven System und einer LTO-Batterie mit hoher C-Rate ist die verkürzte Ladezeit kein Hindernis.

## 10. Fazit

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst. Die zu Beginn der Arbeit formulierten Forschungsfragen werden aufgegriffen und beantwortet. Im Anschluss wird im Ausblick auf weiterführende Arbeiten und Forschungsarbeiten hingewiesen.

### 10.1 Zusammenfassung

Die Reduktion des fossilen Verbrauchs, die restriktiven Vorgaben zum Klimaschutz und die Bemühungen die zunehmende Schadstoffbelastung der Luft in urbanen Ballungsräumen zu reduzieren, führen zu einer steigenden Attraktivität von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben. Insbesondere Stadtbusse können lokal zu einer Reduktion der Schadstoffbelastung führen. Die Herausforderung für Verkehrsunternehmen besteht darin in der Menge der unterschiedlichen Konzepte ein für ihre Randbedingungen und Anforderungen passendes Gesamtsystem zu finden.

Ziel dieser Arbeit war es daher, unter Berücksichtigung einer ganzheitlichen Betrachtungsweise eine praxisrelevante Methodik zur Bewertung der verschiedenen Systemkonzepte für die Elektrifizierung von Stadtbussen zu entwickeln. Aus diesem Ziel wurden drei Forschungsfragen abgeleitet:

- a) Welche Systemmerkmale müssen bei der Entwicklung eines urbanen batterieelektrischen Busses berücksichtigt werden?
- b) Welchen Einfluss haben die Teilsysteme auf die Eigenschaften des Gesamtsystems?
- c) Wie und wen kann die entwickelte Methodik bei der strategischen Technologieplanung und Systemauswahl unterstützen?

Diese Forschungsfragen konnten im Laufe der Arbeit beantwortet werden. Die ganzheitliche Betrachtung umfasst die Sicht des Kunden, indem kundenwerte Merkmale untersucht und für die Elektrobussenentwicklung herausgearbeitet wurden. Diese Kundensicht wird mithilfe einer relationsorientierten Funktionsmodellierung mit den Systemmerkmalen des Batteriebusse in Verbindung gebracht und die Wechselwirkungen sowie Abhängigkeiten aufgezeigt. Auf diese Weise wird das Systemverständnis gefördert und verbessert. Abhängig vom Entwicklungsauftrag können mit dem Systemverständnis die konzeptrelevanten Systemmerkmale und Entwicklungsziele herausgearbeitet werden. Aufbauend auf der Funktionsmodellierung und der Kenntnis der zu bestimmenden konzeptrelevanten Systemmerkmale wurde ein Gesamtsystem-Simulationsmodell entwickelt, verifiziert und validiert. Dieses Gesamtsystem-Simulationsmodell wurde im Folgenden dazu genutzt den Einfluss der Teilsysteme auf die Gesamtsystemeigenschaften zu untersuchen. Unter Berücksichtigung des zuvor definierten Zielsystems und des Simulationsmodells werden die Systemeigenschaften der Konzeptvarianten untersucht und bewertet. Dem Kunden können so nutzenoptimale Lösungen angeboten werden.

Der Fokus in dieser Arbeit lag auf reinen Batteriebussen. Die Methodik kann jedoch auch auf andere Konzepte wie Brennstoffzellenbusse angewendet werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Methodik für die Untersuchung verschiedener Energiezuführungs- und Batteriesysteme angewendet. Die konzeptrelevanten Systemmerkmale sind die Treibhausgasemissionen, der Energieverbrauch, die mögliche Reichweite mit einer Ladung und die Ladezeit. Mit den vorliegenden unterschiedlichen Varianten der Energiezuführungs- und Batteriesysteme eröffnete sich mit den Betriebsstrategien Depotladung und Gelegenheitsladung ein großer Lösungsraum. Dieser wurde mithilfe von Vorüberlegungen und der Verträglichkeitsuntersuchung reduziert, sodass letztendlich sechs Konzepte ausgearbeitet und detaillierter untersucht wurden. Die Analyse ergab, dass unter den gewählten Randbedingungen fünf von sechs Konzepte technisch umsetzbar sind. Einzig das Konzept mit Depotladung wurde ausgeschlossen, da der Bus unter den gegebenen Randbedingungen die geforderte Reichweite nicht erreicht. Diese aus technischer Sicht umsetzbaren Konzepte müssen in einem zweiten Schritt auf Wirtschaftlichkeit untersucht werden. Zusammenfassend lassen sich vier Kernergebnisse dieser Arbeit festhalten:

1. Die vorgestellte Methodik fördert und verbessert das Gesamtsystemverständnis, indem explizit auf Wechselwirkungen und Abhängigkeiten eingegangen wird.
2. Die Arbeit zeigt eine ganzheitliche Betrachtung des Systems auf, die sowohl betriebliche wie auch standortspezifische Randbedingungen berücksichtigt.
3. Die vorliegende Arbeit leistet einen wesentlichen Beitrag zur Untersuchung der Machbarkeit eines Konzepts und ist daher auch als Vorselektion anzuwenden. Vor der Wirtschaftlichkeitsanalyse müssen die zu untersuchenden Konzepte mithilfe der vorgestellten Methodik auf ihre technische Umsetzbarkeit geprüft werden. Technisch nicht umsetzbare Konzepte werden an dieser Stelle ausgeschlossen und der Lösungsraum reduziert.
4. Die Ergebnisse dieser Arbeit sind ein wichtiger Bestandteil der Eingangsdaten für die Total-Cost-of-Ownership-Analyse.

## **10.2 Kritische Würdigung und Ausblick**

Die vorgestellte Methodik erlaubt den methodischen Technologievergleich von Systemkonzepten. Für die Untersuchung der Energiezuführungs- und Batteriesysteme wurden konkrete auf dem Markt verfügbare Produkte und deren Beschaffenheitsmerkmale herangezogen und basierend auf den konkreten Produkten eine Bewertung vorgenommen. Notwendige Annahmen zur Beschreibung des Systems fußen auf Literatur- bzw. Herstellerangaben und sind mit Unsicherheiten behaftet. Mithilfe von Validierungsmessungen wurde versucht diesen Fehler möglichst zu minimieren.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methodik zum methodischen Technologievergleich bietet Möglichkeiten zur Vertiefung und Erweiterung der Forschungsarbeiten. Der Fokus in dieser Arbeit lag auf reinen Batteriebussen. Die Methodik kann jedoch auch auf andere Konzepte wie Brennstoffzellenbusse angewendet werden. Für den Brennstoffzellenbus müsste das relationsorientierte Funktionsmodell erweitert werden und entsprechende Ergänzungen am Gesamtsystem-Simulationsmodell vorgenommen werden. Mit dem vorliegenden Modell ist es auch möglich den Einfluss anderer Teilsysteme als Batterie oder Ladesystem zu untersuchen. Das Gesamtsystem-Simulationsmodell stellt einen 12 m Batteriebus mit 160 kW zentralem Antrieb dar<sup>228</sup>. Die Untersuchung verschiedener Bustypen (18 m, 24 m, Doppeldecker) oder der Einfluss verschiedener Motoren lässt sich mit diesem Modell bestimmen. Für die Untersuchung verschiedener Bustypen sind die Busparameter anzupassen. Zur Untersuchung der Motoren ist die Kenntnis über das Wirkungsgradkennfeld und das Gewicht des Motors erforderlich und im Teilmodell zur Bestimmung des Leistungsbedarfs Antrieb zu ergänzen. Sollten zukünftig Untersuchungen des Klimakomforts im Vordergrund stehen bzw. unterschiedliche Klimatisierungssysteme gegenübergestellt werden, ist das Teilmodell zur Bestimmung des Klimabedarfs anzupassen und zu erweitern. Änderungen am Gesamtsystem-Simulationsmodell erfordern eine erneute Validierung.

Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zwischen den Randbedingungen und Beschaffenheitsmerkmalen der Teilsysteme wurde in Kapitel 9 mittels Sensitivitätsanalysen detaillierter untersucht. Es wurde auf den Einfluss der Temperaturverteilung sowie des Fahrprofils eingegangen und die Komplexität der Systemauslegung aufgezeigt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine linienbasierte Untersuchung vorgenommen sowie konkrete Fahrzeuge modelliert. Der betriebliche Aspekt Verspätung und seine Auswirkung auf den folgenden Betrieb wurde in dieser Arbeit nicht betrachtet. Die Auslegung der Batterie im Grenzbetrieb erlaubt jedoch eine gewisse Reserve und Toleranz. Es wurde aufgezeigt wie Fortschritte in der Batterieentwicklung (steigende C-Rate) in Kombination mit höheren Ladeleistungen sich auf die Entwicklung und Auslegung des Systems auswirken. Die Batterie stellt im Gesamtsystem eine Schlüsselkomponente dar. Weiterführende Untersuchungen sollten die Wechselwirkung zwischen Ladezustandsfenster, C-Rate, Temperatur und Batteriealterung betrachten und diese Erkenntnisse eng mit der TCO-Analyse verknüpfen.

Weitere Forschungsarbeit als Anknüpfung an diese umfasst die Betrachtung der Komponenten außerhalb der definierten Systemgrenze (vgl. Abbildung 27) und ihre Wechselwirkung. Hierzu gehören die Steuerung, das Protokoll und die Datenübertragung sowie das BMS. Die Anwendung der Methodik erlaubt eine Machbarkeitsprüfung und Vorselektion hinsichtlich des vordefinierten Zielsystems. Bei der Auslegung und Konkretisierung des ausgewählten Konzepts wird eine Bauraumanalyse erforderlich und weitere qualitative Systemeigenschaften sind zu berücksichtigen.

---

<sup>228</sup> Vgl. Kapitel 7.1, S.84



## 11. Literaturverzeichnis

- AG Innovative Antriebe Bus (Hg.) (2015):** Elektrische Antriebe im ÖPNV in Deutschland. Unter Mitarbeit von Klaus Bonhoff. Münster, zuletzt geprüft am 06.01.2016.
- Altair Nanotechnologies (Hg.) (2011):** 60 Amp Hour Cell. NANO LITHIUM-TITANATE BATTERY CELL. Datenblatt, zuletzt geprüft am 22.07.2018.
- Aschenbrenner, H. (1898):** Probefahrt des ersten Elektrobusses. Online verfügbar unter <http://www.luise-berlin.de/bms/bmstext/9805novc.html>, zuletzt geprüft am 2015-07-25.
- Auer, M.; Krug, S. (2012):** Gesamtfahrzeugsimulation eines batterieelektrischen Fahrzeugs. Abschlussbericht. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen.
- Back, M. (2005):** Prädiktive Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen. Dissertation.
- Baehr, H. (2016):** Wärme- und Stoffübertragung. 9., aktual. Aufl. 2016. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (SpringerLink : Bücher).
- Baguette, S. (2018):** The European market for electric buses in 2017. Hg. v. LinkedIn, zuletzt aktualisiert am 10.01.2018, zuletzt geprüft am 18.04.2018.
- Barlow, T.; Latham, S., et al. (2009):** A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions. 3. Aufl. Berkshire, zuletzt geprüft am 22.09.2016.
- Basile, R. (2014):** Herausforderungen an Klimatisierungs- und Heizungsanlagen bei Fahrzeugen mit Elektroantrieb, zuletzt geprüft am 07.08.2014.
- Bauer, M. (2017):** Elektrische und mechanische Verfahren zur Detektion von Alterungseffekten in Lithium-Ionen-Batterien. Dissertation. Technische Universität München, München.
- BEGINS CO. LTD. (Hg.) (2018):** :: Begins :: Online verfügbar unter <http://www.begins.co.kr/en/business/ebus>, zuletzt geprüft am 13.06.2018.
- BorgWarner Inc. (Hg.) (2016a):** HVH410-075 Electric Motor. Online verfügbar unter [https://cdn.borgwarner.com/docs/default-source/default-document-library/remy-pds---hvh410-075-sheet-euro-pr-3-16.pdf?sfvrsn=a742cd3c\\_9](https://cdn.borgwarner.com/docs/default-source/default-document-library/remy-pds---hvh410-075-sheet-euro-pr-3-16.pdf?sfvrsn=a742cd3c_9), zuletzt aktualisiert am 2016, zuletzt geprüft am 12.01.2018.
- BorgWarner Inc. (Hg.) (2016b):** HVH410-150 Electric Motor. Online verfügbar unter [https://cdn.borgwarner.com/docs/default-source/default-document-library/remy-pds---hvh410-150-sheet-euro-pr-3-16.pdf?sfvrsn=a642cd3c\\_7](https://cdn.borgwarner.com/docs/default-source/default-document-library/remy-pds---hvh410-150-sheet-euro-pr-3-16.pdf?sfvrsn=a642cd3c_7), zuletzt geprüft am 12.01.2018.

- Breitkopf, Cornelia; Swider-Lyons, Karen (Hg.) (2017):** Springer Handbook of Electrochemical Energy. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer Handbooks). Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=4759865>.
- Buchberger, I. (2016):** Electrochemical and structural investigations on lithium-ion battery materials and related degradation processes. Dissertation. Technische Universität München, München.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2013):** Aktualisierte und erweiterte Testreferenzjahre (TRY) von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse. Online verfügbar unter [https://www.bbsr-energieeinsparung.de/EnEVPortal/DE/Regelungen/Testreferenzjahre/Testreferenzjahre/01\\_start.html?nn=739044&notFirst=true&docId=743442](https://www.bbsr-energieeinsparung.de/EnEVPortal/DE/Regelungen/Testreferenzjahre/Testreferenzjahre/01_start.html?nn=739044&notFirst=true&docId=743442), zuletzt geprüft am 05.10.2018.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2016):** Kompakte und robuste Leistungselektronik der nächsten Generation (KomroL) — Mikroelektronikforschung. Online verfügbar unter <https://www.elektronikforschung.de/foerderung/nationale-foerderung/komrol>, zuletzt geprüft am 13.06.2018.
- Bundesministerium für Umwelt; Naturschutz; Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (2015):** Klimaschutz in Zahlen. Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik. Online verfügbar unter [www.bmub.bund.de](http://www.bmub.bund.de), zuletzt geprüft am 27.06.2017.
- Bundesministerium für Umwelt; Naturschutz; Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) (2016):** Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Online verfügbar unter [www.bmub.bund.de](http://www.bmub.bund.de), zuletzt geprüft am 27.06.2017.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2017):** Energie auf neuen Wegen. Aktuelles zur Weiterentwicklung der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung, zuletzt geprüft am 14.03.2018.
- Chan, C. (2013):** The Rise & Fall of Electric Vehicles in 1828–1930: Lessons Learned [Scanning Our Past]. In: *Proc. IEEE* 101 (1), S. 206–212. DOI: 10.1109/JPROC.2012.2228370.
- Conrad, J. (2018):** Herausforderungen im Überlandverkehr E-Mobilität mit Brennstoffzellen-Bussen am Beispiel der Regionalverkehr Köln GmbH. In 9. VDV-Akademie Konferenz ElekBu 2018. Regionalverkehr Köln GmbH. Berlin, zuletzt geprüft am 13.03.2018.
- Cui, H. (2017):** Adjustment to subsidies for new energy vehicles in China. Hg. v. ICCT - International Council on Clean Transportation.

- Dixon, T. (2018):** China's 2017 Electric bus sales numbers show a drop to 89,546 total sales. Hg. v. evobsession.com, zuletzt aktualisiert am 25.01.2018.
- Ebeling, F. (2015):** 1969: Geburtsstunde des Hybrid bei Daimler. Daimler stellt auf der IAA in Frankfurt den ersten Prototyp des Elektro-Hybrid-Busses OE 302 vor. Online verfügbar unter <http://www.mercedes-fans.de/magazin/classic/1969-geburtsstunde-des-hybrid-bei-daimler-daimler-stellt-auf-der-iaa-in-frankfurt-den-ersten-prototyp-des-elektro-hybrid-busses-oe-302-vor.8216>, zuletzt geprüft am 04.02.2016.
- Eberle, A. (2017):** The influence of different parameters on the discharge capacity and cycling performance of an S/C-composite cathode. Dissertation. Technische Universität München, München.
- Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H. (2013):** Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 5., überarb. und erw. Aufl. München: Hanser.
- EIG (Hg.) (2016a):** ePLB C High Energy Product, zuletzt geprüft am 22.07.2018.
- EIG (Hg.) (2016b):** ePLB T Super Power Product, zuletzt geprüft am 22.07.2018.
- eMobilServer (Hg.) (2018):** Shenzhen steigt komplett auf Elektrobuse um. Online verfügbar unter [https://www.emobilserver.de/nachrichten/elektro-fahrzeuge/elektro\\_bus/700-shenzhen-steigt-komplett-auf-elektrobuse-um.html](https://www.emobilserver.de/nachrichten/elektro-fahrzeuge/elektro_bus/700-shenzhen-steigt-komplett-auf-elektrobuse-um.html), zuletzt geprüft am 02.03.2018.
- European Batteries (Hg.) (2012):** EB 45 Ah. Datenblatt, zuletzt geprüft am 22.07.2018.
- European Union (2015):** Directive 2015/719 of the European Parliament and of the Council. In: *Official Journal of the European Union - Legislation* (L 115). Online verfügbar unter <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L0719&from=EN>.
- EV Sales (Hg.) (2017):** China PHEV Buses 2016. Online verfügbar unter <https://ev-sales.blogspot.com/2017/02/china-phev-buses-2016.html>, zuletzt aktualisiert am 15.02.2017, zuletzt geprüft am 06.12.2018.
- Faltenbacher, M.; Vetter, O. (2015):** Hybrid- und Elektrobuss-Projekte in Deutschland. Statusbericht 2014. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Berlin, zuletzt geprüft am 19.10.2018.
- Faltenbacher, M.; Vetter, O., et al. (2016):** Statusbericht 2015 / 16 Hybrid- und Elektrobuss-Projekte in Deutschland. Unter Mitarbeit von Arbeitsgruppe Innovative Antriebe Bus. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Berlin, zuletzt geprüft am 19.10.2018.

- FCH JU, Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (Hg.) (2017):** PROGRAMME REVIEW REPORT 2016. Online verfügbar unter <http://www.fch.europa.eu/publications/programme-review-report-2016>, zuletzt geprüft am 12.03.2018.
- Feldhusen, J.; Grote, K. H. (Hg.) (2013):** Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. 8. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer.
- Felizeter, B. (2016):** Leitfaden für Elektromobilität in China. Hg. v. German Industry & Commerce Greater China Beijing, zuletzt geprüft am 19.12.2016.
- Fichtl, H.; Steinert, F. (2016):** IVision and IVinet – Tool Chain for the Electrification of City Bus Routes. In: *Transportation Research Procedia* 14, S. 2554–2563. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.344.
- Finken, T. (2011):** Fahrzyklusgerechte Auslegung von permanentmagneterregten Synchronmaschinen für Hybrid- und Elektrofahrzeuge. Dissertation. RWTH Aachen University, Germany, Aachen.
- Fu, J.; Cano, Z., et al. (2017):** Electrically Rechargeable Zinc-Air Batteries. Progress, Challenges, and Perspectives. In: *Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.)* 29 (7). DOI: 10.1002/adma.201604685.
- Gallagher, K.; Goebel, S., et al. (2014):** Quantifying the promise of lithium–air batteries for electric vehicles. In: *Energy Environ. Sci.* 7 (5), S. 1555. DOI: 10.1039/c3ee43870h.
- Giakoumis, E. (2017):** Driving and Engine Cycles. Cham: Springer International Publishing.
- Gorbea, C.; Hellenbrand, D., et al. (2010):** COMPATIBILITY MATRIX METHODOLOGY APPLIED TO THE IDENTIFICATION OF VEHICLE ARCHITECTURES AND DESIGN REQUIREMENTS. In: INTERNATIONAL DESIGN CONFERENCE. DESIGN 2010. Dubrovnik, Croatia, May 17 - 20, S. 733–742.
- Gräbener, S. (2017):** Methodische Entwicklung und Bewertung von Elektrifizierungskonzepten für innerstädtische Nutzfahrzeuge. Dissertation. Technische Universität Berlin, Berlin.
- Grune, R. (2013):** Verlustoptimaler Betrieb einer elektrisch erregten Synchronmaschine für den Einsatz in Elektrofahrzeugen. Dissertation. Technische Universität Berlin, Berlin.
- Halmeaho, T.; Rahkola, P., et al. (2017):** Experimental validation of electric bus powertrain model under city driving cycles. In: *IET Electrical Systems in Transportation* 7 (1), S. 74–83. DOI: 10.1049/iet-est.2016.0028.

- Haupt, C. (2013):** Ein multiphysikalisches Simulationsmodell zur Bewertung von Antriebs- und Wärmemanagementkonzepten im Kraftfahrzeug. Dissertation. Technische Universität München, München. Institut für Energietechnik.
- Heise, A. (2014):** Schweden: Umea erhält Stadtbusse mit Radnabenantrieb von Ziehl-Abegg -. Hg. v. OMNIBUSREVUE. Online verfügbar unter <https://www.omnibusrevue.de/schweden-umea-erhaelt-stadtbusse-mit-radnabenantrieb-von-ziehl-abegg-1330851.html>, zuletzt aktualisiert am 20.02.2014.
- Hellenbrand, D.; Lindemann, U. (2008):** USING THE DSM TO SUPPORT THE SELECTION OF PRODUCT CONCEPTS. In: 10TH INTERNATIONAL DESIGN STRUCTURE MATRIX CONFERENCE. DSM'08. STOCKHOLM, SWEDEN, 11 – 12 NOVEMBER 2008, S. 363–374, zuletzt geprüft am 12.12.2018.
- Herb, F. (2010):** Alterungsmechanismen in Lithium-Ionen-Batterien und PEM-Brennstoffzellen und deren Einfluss auf die Eigenschaften von daraus bestehenden Hybrid-Systemen. Dissertation. Universität Ulm, Ulm.
- Higer Bus (Hg.) (2015):** 28 台海格纯电动公交陆续投放佛山-苏州金龙-海格客车是智慧客车领导者. 28 Higer pure electric buses are successively launched in Foshan-Suzhou. Online verfügbar unter <http://www.higer.com/Mobile/hiyear2015/1799.html>, zuletzt geprüft am 06.12.2018.
- Hoffman, G. (1972):** Electric bus designs for urban transportation. In: *Transportation Research* 6 (1), S. 49–58. DOI: 10.1016/0041-1647(72)90110-4.
- Houben, H.; Binder, C.; Hamburger, A. (2002):** PTC-Innenraumheizung der neuesten Generation. Sonderdruck aus der ATZ/MTZ Sonderausgabe „System Partners“.
- <http://www.xchuxing.com> (Hg.) (2017):** 全球规模最大！深圳专营公交车辆实现纯电动化. (The greatest in the world! Shenzhen franchised public transport vehicles to achieve pure electrification). Online verfügbar unter <http://www.xchuxing.com/article-46032-1.html>, zuletzt geprüft am 20.10.2018.
- Hu, Z. (2017):** Optimization-based robust control for high-performance torque vectoring in electric vehicles operated by induction traction motors. Dissertation. RWTH Aachen University, Germany, Aachen.
- ICCT - International Council on Clean Transportation (Hg.) (2017):** Unterschied zwischen offiziellem und realem Kraftstoffverbrauch für neue Pkw in Europa höher als jemals zuvor. Unter Mitarbeit von Peter Mock. Online verfügbar unter <https://www.theicct.org/publications/laboratory-road-2017-update>, zuletzt geprüft am 03.01.2018.

- IEA - International Energy Agency (2017):** Global EV Outlook 2017: IEA.
- Imanishi, Nobuyuki; Luntz, Alan C.; Bruce, Peter (Hg.) (2016):** The lithium air battery. Fundamentals. New York, Heidelberg, Dordrecht, London: Springer.
- Infineon Technologies AG (2013):** Datenblatt / Datasheet FF600R12IE4, zuletzt geprüft am 29.11.2018.
- ITS Center, RIOH (Hg.) (2016):** 中国新能源城市公交车应用现状与发展政策. Application Status and Development policies of New Energy Buses in PRC, zuletzt geprüft am 21.04.2017.
- Jefferies, D.; Göhlich, D. (2018):** Integrated TCO Assessment of Bus Network Electrification Considering Rescheduling and Delays. Modelling Framework and Case Study. In: EVS31 (Hg.): 31st International Electric Vehicle Symposium & Exhibition. 31st International Electric Vehicle Symposium & Exhibition. Japan, Kobe, 1.-3. Oktober 2018.
- Jeschke, S. (2016):** Grundlegende Untersuchungen von Elektrofahrzeugen im Bezug auf Energieeffizienz und EMV mit einer skalierbaren Power-HiL-Umgebung. Dissertation. Universität Duisburg-Essen, Duisburg-Essen.
- Käbitz, S. (2016):** Untersuchung der Alterung von Lithium-Ionen-Batterien mittels Elektroanalytik und elektrochemischer Impedanzspektroskopie. Dissertation. RWTH Aachen University, Germany, Aachen.
- Keil, P. (2017):** Aging of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles. Dissertation. Technische Universität München, München.
- Klement, W. (2017):** Hybridfahrzeuge. Getriebetechnologie an Beispielen. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag.
- Koebel, C. (2014):** Update Primove Technology and Projects. VDV Elektrobusse 2014. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV). Berlin, 2014.
- Kokam (Hg.) (2015):** Great Power for Everyone. Broschüre, zuletzt geprüft am 01.09.2016.
- kommunalwirtschaft.eu (Hg.) (2016):** H2Bus Rhein-Main, zuletzt aktualisiert am 07.09.2016.
- Konvekta AG (Hg.) (2013):** Dachkompaktklimaanlage für Trolley- & Hybrid-Busse. UL 500 EM / 600 EM / 700 EM.
- Korthauer, Reiner (Hg.) (2013):** Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg.
- Kossel, R. (2011):** Hybride Simulation thermischer Systeme am Beispiel eines Reisebusses. Dissertation. Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig. Institut für Thermodynamik.

- Kraftfahrt-Bundesamt (Hg.) (2018):** Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen, zuletzt geprüft am 19.10.2018.
- Krämer, K.; Hanke, D. (2017):** Internationaler Vergleichstest. In: *Omnibus Spiegel* 38 (16-12), S. 4–26.
- Kreim, A. (2015):** Modellierung und Parameteroptimierung einer permanenterregten Synchronmaschine unter Berücksichtigung von Lastzyklen. Dissertation. Technische Universität Berlin, Berlin.
- Kunith, A. (2017):** Elektrifizierung des urbanen öffentlichen Busverkehrs. Dissertation. Technische Universität Berlin, Berlin. Methoden der Produktentwicklung und Mechatronik.
- Kurpjuweit, K. (2015):** "Wir haben einen Babyboom bei der BVG". Interview mit Sigrid Evelin Nikutta. Online verfügbar unter <http://www.tagesspiegel.de/berlin/bvg-chefin-sigrid-evelin-nikutta-wir-haben-einen-babyboom-bei-der-bvg/12753082.html>, zuletzt geprüft am 13.11.2016.
- Lajunen, A. (2014):** Improving the Energy Efficiency and Operating Performance of Heavy Vehicles by Powertrain Electrification. Dissertation. Aalto University, Espoo, Finland. School of Engineering.
- Lajunen, A.; Lipman, T. (2016):** Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of diesel, natural gas, hybrid electric, fuel cell hybrid and electric transit buses. In: *Energy* 106, S. 329–342. DOI: 10.1016/j.energy.2016.03.075.
- Leclanché (Hg.) (2016a):** LecCell 30Ah Hih Energy LTO. Datenblatt, zuletzt geprüft am 14.07.2016.
- Leclanché (Hg.) (2016b):** LecCell G/NMC 43Ah/160Wh. Datenblatt, zuletzt geprüft am 14.07.2016.
- Lin, C.-C.; Filipi, Z., et al. (2001):** Integrated, Feed-Forward Hybrid Electric Vehicle Simulation in SIMULINK and its Use for Power Management Studies. In: SAE 2001 World Congress, MAR. 05, 2001: SAE International 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States (SAE Technical Paper Series).
- Lindemann, M.; Gühmann, C. (2003):** VeLoDyn - Ein Werkzeug zur Triebstrangsimulation von Kraftfahrzeugen. In: 1. Tagung Simulation und Test in der Funktions- und Softwareentwicklung. Online verfügbar unter <http://www.iea.tu-berlin.de/uploads/media/Lindemann2003>.
- Lindemann, U. (2009):** Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. 3., korrigierte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10323208>.

- Liu, H. (2018):** 中国新能源公交车推广应用研究报告. Research Report on Chinas New Energy Urban Bus Promotion and Application. China Urban Sustainable Transportation Research Center (CATS). Peking, China.
- Lukic, S.; Pantic, Z. (2013):** Cutting the cord: Static and dynamic inductive wireless charging of electric vehicles. In: *Electrification Magazine, IEEE* 1 (1), S. 57–64.
- Mahmoud, M.; Garnett, R., et al. (2016):** Electric buses. A review of alternative powertrains. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 62, S. 673–684. DOI: 10.1016/j.rser.2016.05.019.
- MAN Nutzfahrzeuge Gruppe (2008):** Grundlagen der Nutzfahrzeugtechnik. Basiswissen Lkw und Bus. Bonn: Kirschbaum Verlag.
- Mitschke, M.; Wallentowitz, H. (2014):** Dynamik der Kraftfahrzeuge. 5., überarb. u. erg. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg (VDI-Buch).
- Münnix, J. (2017):** Einfluss von Stromdichte und Zyklentiefe auf graphitische Anoden. Dissertation. RWTH Aachen University, Germany, Aachen.
- Nationale Plattform Elektromobilität (Hg.) (2016):** Wegweiser Elektromobilität. Online verfügbar unter [http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/fileadmin/user\\_upload/Redaktion/Wegweiser\\_Elektromobilitaet\\_2016\\_web\\_bf.pdf](http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/Wegweiser_Elektromobilitaet_2016_web_bf.pdf), zuletzt geprüft am 05.01.2018.
- Naunheimer, H.; Bertsche, B.; Lechner, G.; Ryborz, J. (2007):** Fahrzeuggetriebe. Grundlagen, Auswahl, Auslegung und Konstruktion. 2., bearb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10189346>.
- Neudorfer, H. (2016):** Vergleich unterschiedlicher Antriebstechnologien für elektrische Busantriebe, 31.05.2016.
- Nowacki, P. (2012):** Fahrpersonalrecht. Online verfügbar unter <https://www.fahrpersonalrecht.de/inhalte/pdf/Kurzinformationen/Die%20Wirkungsgrade.pdf>.
- Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H. (2007):** Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung. 7. Aufl.: Springer Berlin Heidelberg.
- Pesaran, A. (2001):** Battery Thermal Management in EVs and HEVs: Issues and Solutions, Paper presented at Advanced Automotive Battery Conference in Las Vegas in 2001.
- rbb24 - Rundfunk Berlin-Brandenburg (Hg.) (2018):** Bundesverwaltungsgericht erlaubt Diesel-Fahrverbote. Online verfügbar unter <https://www.rbb24.de/politik/thema/2017/abgasalarm/beitraege/bundesverwaltungsgericht-zu-diesel-fahrverboten.html>, zuletzt aktualisiert am 27.02.18, zuletzt geprüft am 06.12.2018.

- Retzer, S.; Huber, M.; Wagner, M. (2018):** The E-Mobility Race and China's Determination to Win. Measures by the Chinese government to accelerate e-mobility development. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, zuletzt geprüft am 29.10.2018.
- Reupold, P. (2014):** Lösungsraumanalyse für Hauptantriebsstränge in batterieelektrischen Straßenfahrzeugen. Dissertation. Technische Universität München, München.
- Sargent, R. (1981):** An assessment procedure and a set of criteria for use in the evaluation of computerized models and computer-based modeling tools. Final Technical Report RADC-TR-80-409. U.S. Air Force, zuletzt geprüft am 13.07.2018.
- Sauer, D. U. (2017):** Aktuelle Entwicklung in der Batterietechnik und im Batteriemarkt. 8. VDV-Akademie Konferenz Elektrobusse –Markt der Zukunft! VDV Verband Deutscher Verkehrsunternehmen. Berlin, 07.03.2017.
- Saw, L.; Ye, Y.; Tay, A. (2016):** Integration issues of lithium-ion battery into electric vehicles battery pack. In: *Journal of Cleaner Production* 113, S. 1032–1045. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.11.011.
- Schäfer, U. (2015):** Skript - Elektrische Antriebe für Straßenfahrzeuge. Technik, Strukturen und Entwicklungen ; mit 8 Tabellen. Skript, Berlin.
- Schmalstieg, J. (2017):** Physikalisch-elektrochemische Simulation von Lithium-Ionen-Batterien. Implementierung, Parametrierung und Anwendung. Dissertation. RWTH Aachen University, Germany, Aachen.
- Schmalstieg, J.; Käbitz, S., et al. (2014):** A holistic aging model for Li(NiMnCo)O<sub>2</sub> based 18650 lithium-ion batteries. In: *Journal of Power Sources* 257, S. 325–334. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.02.012.
- Schunk Bahn und Industrietechnik GmbH (Hg.) (2018):** Smart Charging - Schunk Carbon Technology. Online verfügbar unter <https://www.schunk-carbontechnology.com/de/smart-charging/>, zuletzt aktualisiert am 04.06.2018, zuletzt geprüft am 13.06.2018.
- Shenzhen Urban Transport Planning Center (Hg.) (2017):** Shenzhen Transport Annual Report 2016. Online verfügbar unter <http://www.sztb.gov.cn/pcjt/jbqk/yytj/201709/P020171115562961369723.pdf>, zuletzt geprüft am 13.03.2018.
- Shyam, A. (2018):** Auto Expo 2018: Ashok Leyland's new electric bus may turn focus to battery swapping. Hg. v. The Economic Times. Online verfügbar unter <https://economictimes.indiatimes.com/automotive/ashok-leylands-new-electric-bus-may-turn-focus-on-battery-swaping/articleshow/62845416.cms>, zuletzt aktualisiert am 09.02.2018, zuletzt geprüft am 18.04.2018.

- Siemens Industry Software (Hg.) (2014):** LMS Imagine.Lab for vehicle system dynamics. Optimizing vehicle dynamics and chassis subsystems in a single environment. Online verfügbar unter [www.siemens.com/plm/lms](http://www.siemens.com/plm/lms), zuletzt geprüft am 20.06.2018.
- Sinhuber, P.; Rohlf, W.; Sauer, D. U. (2010):** Conceptional Considerations for Electrification of Public City Buses. Energy Storage System and Charging Stations. In: 2010 Emobility - Electrical Power Train. Leipzig, Germany.
- Sinhuber, P.; Rohlf, W.; Sauer, D. U. (2012):** Study on Power and Energy Demand for Sizing the Energy Storage Systems for Electrified Local Public Transport Buses. In: IEEE (Hg.): IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference 2012. Seoul, Korea (South), zuletzt geprüft am 04.11.2016.
- Spangenberg, F. (2014):** Technologie-Roadmapping bei Systeminnovationen. am Beispiel der Einführung von elektrischen Bussen im Nahverkehr. Dissertation. Technische Universität Berlin, Berlin.
- Spheros Blog (Hg.) (2015):** Luft-Wärmepumpe für Pilotlinie 64. Online verfügbar unter <http://blog.spheros.de/?p=1932>, zuletzt aktualisiert am 28.09.2015.
- SRF (Hg.) (2018):** VBZ testen neues System - Hightech-Bus spart auch beim Heizen. Online verfügbar unter <https://www.srf.ch/news/regional/zuerich-schaffhausen/vbz-testen-neues-system-hightech-bus-spart-auch-beim-heizen>, zuletzt aktualisiert am 09.01.2018, zuletzt geprüft am 25.09.2018.
- Sterner, M.; Stadler, I. (2014):** Elektrische Energiespeicher. Berlin Heidelberg: Springer.
- Sun, F. (2017):** X-ray radiographic and tomographic investigations of cycled lithium ion batteries. Dissertation. Technische Universität Berlin, Berlin.
- Sun, S. (2018):** Trends and challenges in electric-bus development in China – Sustainable Transport in China. Hg. v. [www.sustainabletransport.org](http://www.sustainabletransport.org). Online verfügbar unter <http://www.sustainabletransport.org/archives/5770>, zuletzt aktualisiert am 27.03.2018, zuletzt geprüft am 04.10.2018.
- Tetsuya Kojima (2018):** Efficiency Optimized Control of Switched Reluctance (noch nicht veröffentlicht). Dissertation. RWTH Aachen University, Germany. Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA).
- Thiebes, P. (2012):** Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. Grundlegende Erkenntnisse und Zusammenhänge, Vorstellung einer Methodik zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses und deren Validierung am Beispiel einer Forstmaschine. Zugl.: Karlsruhe, KIT, Diss., 2011. Print on demand. Karlsruhe, Hannover: KIT Scientific Publishing; Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek (Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik, Bd. 10).

- Thielmann, A.; Neef, C., et al. (2017):** Energiespeicher-Roadmap\_Update 2017. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, zuletzt geprüft am 12.01.2018.
- Tietge, U.; Sonsoles Díaz, et al. (2016):** From laboratory to road: A 2016 update of official and “real-world” fuel consumption From laboratory to road. A 2015 update of official and "real-world" fuel consumption and CO2 values for passenger cars in Europe. Hg. v. ICCT - International Council on Clean Transportation, zuletzt geprüft am 28.08.2017.
- Tietge, U.; Sonsoles Díaz, et al. (2017):** From laboratory to road international: A comparison of official and real-world fuel consumption and CO2 values for passenger cars in Europe, the United States, China, and Japan. Hg. v. ICCT - International Council on Clean Transportation. Online verfügbar unter [https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Lab-to-road-intl\\_ICCT-white-paper\\_06112017\\_vF.pdf](https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Lab-to-road-intl_ICCT-white-paper_06112017_vF.pdf), zuletzt geprüft am 03.01.2018.
- Tremblay, O.; Dessaint, L.-A. (2009):** Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications. In: *World Electric Vehicle Journal* 3 (1), S. 1–10.
- Tremblay, O.; Dessaint, L.-A.; Dekkiche, A.-I. (2007):** A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles. In: Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC 2007. IEEE, S. 284–289.
- Trommsdorff, V.; Steinhoff, F. (2013):** Innovationsmarketing - Trommsdorff / Steinhoff, Inhaltsverzeichnis. 2. Aufl. München: Franz Vahlen.
- Tschöke, Helmut (Hg.) (2015):** Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Basiswissen. Wiesbaden: Springer Vieweg (ATZ / MTZ-Fachbuch).
- Ulrich, K.; Eppinger, S. (2016):** Product design and development. 6. ed. New York, NY: McGraw-Hill.
- Umweltbundesamt (Hg.) (2018):** Umweltfreundliche Klimaanlage in Bussen. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/fluorierte-treibhausgase-fckw/anwendungsbereiche-emissionsminderung/umweltfreundliche-klimaanlagen-in-bussen>, zuletzt aktualisiert am 25.05.2018.
- VDA Verband der Automobilindustrie (Hg.) (2017):** WLTP – Neues Testverfahren weltweit am Start. Fragen und Antworten zur Umstellung von NEFZ auf WLTP. Online verfügbar unter [https://www.vda.de/dam/vda/publications/2017/WLTP...DE/WLTP\\_QA\\_DE.pdf](https://www.vda.de/dam/vda/publications/2017/WLTP...DE/WLTP_QA_DE.pdf), zuletzt geprüft am 03.01.2018.
- Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) (2016):** 2015. Statistik, zuletzt geprüft am 01.02.2018.

- Viehof, M.; Winner, H. (2017):** Stand der Technik und der Wissenschaft: Modellvalidierung im Anwendungsbereich der Fahrdynamiksimulation. Technische Universität Darmstadt. Darmstadt, zuletzt geprüft am 05.07.2018.
- Vogel, B. (2018):** Swiss Trolley plus: Ein Schweizer Entwicklung, die auch ohne Oberleitung fährt. Artikel im Auftrag des Bundesamts für Energie (BFE). Hg. v. ee-news. Online verfügbar unter <https://www.ee-news.ch/de/article/38704/swiss-trolley-plus-ein-schweizer-entwicklung-die-auch-ohne-oberleitung-fahrt&page=>, zuletzt aktualisiert am 18.06.2018, zuletzt geprüft am 25.09.2018.
- W.D.R. (1970):** Der Batteriebus. In: *Zeit online* 1970, 01.05.1970 (18/1970). Online verfügbar unter <http://pdf.zeit.de/1970/18/der-batteriebus.pdf>.
- Wee, D. (2017):** 전기차 배터리 리스사업 난항, 사업 중단 vs 계속 추진 (difficulties in battery lease business, Business discontinuation vs. keep pushing). Hg. v. electimes (전기신문). Online verfügbar unter <http://m.electimes.com/article.php?aid=1487225192141949002>, zuletzt aktualisiert am 17.02.2017, zuletzt geprüft am 19.04.2018.
- Weigel, W. (2013):** Schunk Smart Charging - Dachladesystem für Elektrobusse. Online verfügbar unter [http://crm.saena.de/sites/default/files/civicrm/persist/contribute/files/08\\_Weigel\\_Schunk.pdf](http://crm.saena.de/sites/default/files/civicrm/persist/contribute/files/08_Weigel_Schunk.pdf), zuletzt geprüft am 06.03.2015.
- Welp, R. (2017):** Passive Energieeffizienzmaßnahmen im Fahrzeug zur Reduzierung des Heiz- und Kühlenergiebedarfs. Dissertation. RWTH Aachen University, Germany, Aachen.
- Wiedemann, E. (2014):** Ableitung von Elektrofahrzeugkonzepten aus Eigenschaftszielen. Dissertation. Universität München, München.
- Wilcke, W.; Kim, H.-C. (2016):** The 800-km battery lithium-ion batteries are played out. Next up: lithium-air. In: *IEEE Spectrum* Volume 53 (Heft 3), S. 42–62.
- Wipke, K.; Cuddy, M.; Burch, S. (1999):** ADVISOR 2.1. A user-friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/forward approach. In: *IEEE Trans. Veh. Technol.* 48 (6), S. 1751–1761. DOI: 10.1109/25.806767.
- World Bank; PRTM Management Consultants, Inc. (Hg.) (2011):** The China New Energy Vehicles Program—Challenges and Opportunities. Online verfügbar unter [http://siteresources.worldbank.org/EXTNEWSCHINESE/Resources/3196537-1202098669693/EV\\_Report\\_en.pdf](http://siteresources.worldbank.org/EXTNEWSCHINESE/Resources/3196537-1202098669693/EV_Report_en.pdf), zuletzt geprüft am 20.10.2018.
- Yu, T.; Fu, J., et al. (2017):** Nonprecious Electrocatalysts for Li-Air and Zn-Air Batteries. Fundamentals and recent advances. In: *IEEE Nanotechnology Mag.* 11 (3), S. 29–55. DOI: 10.1109/MNANO.2017.2710380.

**ZeEUS (Hg.) (2017):** ZeEUS eBus Report #2. An updated overview of electric buses in Europe, zuletzt geprüft am 02.03.2018.

**ZeEUS Project (Hg.) (2016):** ZeEUS eBus Report. An overview of electric buses in Europe, zuletzt geprüft am 20.04.2017.

**Zerbe, J. (2018):** Innovative Wickeltechnologien für Statorspulen zur Erhöhung des Füllfaktors und Reduzierung der Beanspruchungen im Wickelprozess. Dissertation. Technische Universität Berlin, Berlin.

**ZF Friedrichshafen AG (Hg.):** Produktübersicht. Achs- und Getriebesysteme für Busse, zuletzt geprüft am 18.05.2018.

**Zhang, X. (2017):** Stability and Energy-Saving Control Strategy Design for Distributed Drive Electric Vehicles. Dissertation. Technische Universität Berlin, Berlin.

**Zhang, X.; Goehlich, D. (2016):** A Novel Driving and Regenerative Braking Regulation Design Based on Distributed Drive Electric Vehicles. In: 2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). 2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). Hangzhou, China, 17.10.2016 - 20.10.2016: IEEE, S. 1–6, zuletzt geprüft am 20.04.2017.

**Ziemann, A. (2006):** Zielsystemmanagement für die Produktentstehung von PKW. Dissertation. Technische Universität München, München.

## **11.1 Eigene Veröffentlichungen unter dem Namen Ly**

**Göhlich, D.; Kunith, A.; Ly, T.-A. (2014):** Technology assessment of an electric urban bus system for Berlin. In: C.A Brebbia und J.W.S Longhurst (Hg.): Urban Transport 2014. The Algarve, Portugal, 28.05.2014 - 30.05.2014: WIT Press Southampton, UK (WIT Transactions on The Built Environment), S. 137–149.

**Göhlich, D.; Ly, T.-A., et al. (2015):** Economic assessment of different air-conditioning and heating systems for electric city buses based on comprehensive energetic simulations. In: Electric Vehicle Symposium (EVS) (Hg.). EVS28 International Electric Vehicle Symposium and Exhibition. Kintex, Korea, May 3-6.

**Jefferies, D.; Ly, T.-A., et al. (2015):** Energiebedarf verschiedener Klimatisierungssysteme für Elektro-Linienbusse. In: Deutsche Kälte- und Klimatagung 2015. Hg. v. Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e.V. Dresden.

**Ly, T.-A.; Göhlich, D.; Heide, L. (2016):** Assessment of the interaction of charging system and battery technology for the use in urban battery electric bus systems. In: IEEE (Hg.): Vehicle Power and Propulsion Conference. The 13th IEEE Vehicle and Propulsion Conference. Hangzhou, China, 17.-20.10.2016. IEEE, zuletzt geprüft am 03.05.2017.

**Torzynski, S.; Göhlich, D., et al. (2016):** E-Bus Berlin - Betrieb der Buslinie 204. (vormals Buslinie 147) mit einer Flotte von Elektrobussen inklusive Infrastruktur zur induktiven Zwischenladung : FuE-Programm "Schaufenster Elektromobilität" der Bundesregierung : gemeinsamer Abschlussbericht : internationales Schaufenster Elektromobilität Berlin-Brandenburg : Laufzeit des Vorhabens vom: 01.01.2013 bis: 30.09.2016. Unter Mitarbeit von TIB - Technische Informationsbibliothek Universitätsbibliothek Hannover, Technische Informationsbibliothek, Berliner Verkehrsbetriebe, Vossloh Kiepe GmbH, Bombardier Transportation GmbH und Technische Universität Berlin.

## **11.2 Eigene Veröffentlichungen unter dem Namen Fay**

**Göhlich, D.; Fay, T.-A., et al. (2018):** Design of urban electric bus systems. In: *Des. Sci.* 4, S. 0. DOI: 10.1017/dsj.2018.10.

## **11.3 Richtlinien, Normen und Schriften**

VDI 2078, März 2012: Berechnung von Kühllast und Raumtemperaturen von Räumen und Gebäuden (VDI-Kühllastregeln).

VDV-Mitteilung 2319: Bewertung von E-Bus-Konzepten aus der Sicht von Planung und Betrieb.

VDV Schrift 260, März 2016: E-Bus-Infrastruktur/Ladestellen.

VDI-Richtlinie 2221 Blatt 2, Entwurf, März 2018: Entwicklung technischer Produkte und Systeme, Gestaltung individueller Produktentwicklungsprozesse.

VDI-Richtlinie 2221 Blatt 1, Entwurf, März 2018: Entwicklung technischer Produkte und Systeme, Modell der Produktentwicklung.

VDI-Richtlinie 2206, Juni 2004: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme.

VDV-Schrift 236, Juni 2015: Klimatisierung von Linienbussen der Zulassungsklassen I und II, für konventionell angetriebene Diesel und Gasbusse sowie für Hybrid-, Brennstoffzellen- und Elektrobuse.

VDV-Schrift 230/1, März 2018: Rahmenempfehlung für elektrisch betriebene Stadt-Niederflur-Linienbusse (E-Bus). Ergänzung zur VDV-Schrift 230.

VDV-Schrift 230, Dezember 2012: Rahmenempfehlung für Stadt-Niederflur-Linienbusse.

VDI-Richtlinie 3780, September 2000: Technikbewertung Begriffe und Grundlagen.

## 11.4 Studentische Abschlussarbeiten

Die Zuarbeit von Studierenden durch Abschlussarbeiten haben maßgeblich zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen. Dafür an dieser Stelle nochmal einen herzlichen Dank! Die Abschlussarbeiten entstanden unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung der Autorin. Die entstandenen Ergebnisse sind Voruntersuchungen in verschiedenen Bereichen der Dissertation und sind teilweise in die vorliegende Arbeit eingeflossen. Die Auflistung erfolgt in chronologischer Reihenfolge:

**Engel, F. (2013):** Bedarfsanalyse und Lösungsansätze für die Klimatisierung von Elektrobusen im ÖPNV, Diplomarbeit

**Gongoll, F. (2014):** Entwurf einer elektrisch erregten Synchronmaschine für einen 12-m-Elektrobus des Berliner Stadtverkehrs

**Shi, K. (2014):** Analyse von Heiz- und Kühlsystemen für Elektrobusse und Simulation einer elektrischen HVAC Anlage, Diplomarbeit

**Zhou, W. (2015):** The Investigation of the Technological Standards of Electric Buses and their Market Penetration in China, Bachelorarbeit

**Jefferies, D. (2015):** Entwicklung eines Simulationsmodells zur Ermittlung des Energiebedarfs und der Lebenszykluskosten verschiedener Heiz- und Kühlsysteme in einem Elektro- Linienbus

**Heide, L. (2015):** Technische Bewertung des Zusammenwirkens von Ladesystem und Speichertechnologie für den Einsatz in batteriebetriebenen Stadtbussen, Bachelorarbeit

**Kuptz, K. (2016):** Analyse gängiger Bustypen der BVG im Rahmen einer Parameterstudie und konstruktive Optimierungsansätze zur Steigerung der Energieeffizienz, Bachelorarbeit

**Bok, V. (2017):** Entwicklung eines Fahrzyklusgenerators für städtische Buslinien und einer benutzerfreundlichen Programmoberfläche für das E-Bus-Simulationsmodell, Masterarbeit

**Heide, L. (2018):** Empirical Analysis of Real-World Electric Vehicle Energy Consumption, Masterarbeit

# Anhang

## Anhang A0 Chinesische Förderpolitik

In den folgenden Tabellen sind die Fördersummen für chinesische Busse mit alternativem Antrieb für das Jahr 2016 und 2017/2018 gelistet.

**Tabelle 29: Nationale Förderung für chinesische Busse mit alternativem Antrieb in 2016<sup>229</sup>**

Vehicle type	EF <sup>1</sup> Wh/km·kg	Subsidy level CNY 10,000/vehicle					
		$6 \leq ER^2 < 20$	$20 \leq ER < 50$	$50 \leq ER < 100$	$100 \leq ER < 150$	$150 \leq ER < 250$	$ER \geq 250$
BEV (10-12 m in length)	$EF < 0.25$	22 <sup>3</sup>	26	30	35	42	50
	$0.25 \leq ER < 0.35$	20	24	28	32	38	46
	$0.35 \leq ER < 0.5$	18	22	24	28	34	42
	$0.5 \leq ER < 0.6$	16	18	20	25	30	36
	$0.6 \leq ER < 0.7$	12	14	16	20	24	30
PHEV		N/A	N/A	20	23	25	
Mid- to heavy-duty FCV		50					

1. EF = Energieeffizienz (Wh/km·kg)

2. ER = Elektrische Reichweite (km)

3. Single-Decker-Busse mit unterschiedlichen Fahrzeuglängen (LH, gemessen in m) erhalten unterschiedlich hohe Subventionen. Diese berechnen sich aus dem Wert in dieser Tabelle und einem Korrekturfaktor zur Anpassung der Fahrzeuglänge. Die Korrekturfaktoren sind 0,2 ( $LH \leq 6$ ), 0,5 ( $6 < LH \leq 8$ ), 0,8 ( $8 < LH \leq 10$ ), 1,0 ( $10 < LH \leq 12$ ) und 1,2 ( $LH > 12$ ).

Die Zuschüsse für Doppeldeckerbusse entsprechen denen für Single-Decker-Busse mit einer Länge von mehr als 12 m.

**Tabelle 30: Nationale Förderung für chinesische Busse mit alternativem Antrieb in 2017/2018<sup>230</sup>**

Vehicle type	Subsidy amount (CNY/kWh)	Adjustment factors			National subsidy ceilings (10,000 CNY/vehicle)		
					$6 < LH^* \leq 8$	$8 < LH \leq 10$	$LH > 10$
Fast-charging BEV	3,000	Charging speed of batteries (CS)			6	12	20
		$3C < CS \leq 5C$	$5C < CS \leq 15C$	$CS > 15C$			
		0.8	1	1.4			
Non-fast- Charging BEV	1,800	Battery energy density (BD, Wh/kg)			9	20	30
		$85 < BD \leq 95$	$95 < BD \leq 115$	$BD > 115$			
		0.8	1	1.2			
PHEV	3,000	Fuel saving rate (FS, %)			4.5	9	15
		$40 < FS \leq 45$	$45 < FS \leq 60$	$FS > 60$			
		0.8	1	1.2			
Mid-to heavy-duty FCV		50					

\*LH = Fahrzeuglänge

Die Fördersumme ergibt sich aus der Fördersumme je kWh multipliziert mit einem Korrekturfaktor. Die Fördersumme ist seit 2017 abhängig von der Fahrzeuglänge gedeckelt. Ein 12 m schnellladefähiger Bus mit 200 kWh Batterie und 4 C Laderate würde eine Fördersumme von  $(3000 \times 200 \times 0,8 = )$  480.000 CNY bekommen, wegen der Deckelung jedoch nur noch 200.000.

<sup>229</sup> Cui 2017, Tabelle 4

<sup>230</sup> Cui 2017, Tabelle 5

## Anhang A1 Zielwertsystem

Tabelle 31: Kundenwerte Merkmale in der Batteriebusentwicklung mit Unterwerten<sup>231</sup>

Kundenwerte Merkmale	Untermerkmal	Einheit
Maximale Fahrleistungen, Fahrerlebnis	Höchstgeschwindigkeit	km/h
	Beschleunigung mit Kickdown (0-50 km/h)	m/s <sup>2</sup>
	Beschleunigungszeit ohne Kickdown (0-50 km/h)	s
	Steigfähigkeit (Steigung in %)	%
Fahreigenschaften	Geradeausverhalten - Spurhaltung auf ebener Fahrbahn	Note
	Kurvenverhalten - Spurhaltung in der Kreisfahrt bei unebener Fahrbahn	Note
	Lenkverhalten- max. Lenkwinkelgeschwindigkeit	Grad/s
	Bremsverhalten - Richtungsstabilität bei Geradeausbremsung	Note
	Bremsverhalten - max. Abbremsung bei 30km/h	%
	<b>Bremsverhalten - ruckfreier Verlauf von Bremsmomenten</b>	
	Beschleunigungsverhalten- Nickwinkel bei maximaler Beschleunigung	°
	<b>Beschleunigungsverhalten - ruckfreier Verlauf von Antriebsmomenten</b>	
	Überlagerung von Längs- und Querschleunigung- Beschleunigung bei Kurvenfahrt Stabilität	Note
Design Exterieur	Abh. Vom Betreiber	-
Design Interieur	Abh. Vom Betreiber	-
Ergonomie Fahrer	Fahrerarbeitsplatz (Sitzposition, Verstellweg von Sitz, Armaturenbrett und Lenkrad, Pedalerie)	Note
	Zugänglichkeit des Fahrerarbeitsplatzes	Note
	Abstellflächen und Stauraum	Note
	Federungs-, Schwingungskomfort	Note
Bedienbarkeit Fahrzeug	<b>Fahrerinformation/-assistenz</b>	Note
	Erkennbarkeit des Fahrzeugumfelds	Note
	<b>Sichtbarkeit der Anzeigen</b>	Note
Ergonomie Passagiere	Ergonomie des Fahrgastsitzes	Note
	Zugänglichkeit	Note
	Haltestangenkonzept	Note
	Innenraumbeleuchtung	Note
	Federungs- und Schwingungskomfort	Note

<sup>231</sup> Vgl. Ziemann 2006; Wiedemann 2014; Mahmoud et al. 2016; Gräbener 2017; AG Innovative Antriebe Bus 2015, ZeEUS 2017; Krämer und Hanke 2017; VDV-Mitteilung 2319; VDV-Schrift 230; VDV-Schrift 230/1; Merkmale in Fettschrift sind im Vergleich zu den Merkmalen eines konventionellen Linienbusses hinzugekommen oder unterliegen einer wesentlichen Veränderung.

Kundenwerte Merkmale	Untermerkmal	Einheit
Ökologie und Klimaschutz	<b>WTW GHG Emission, f(Strommix, Verbrauch auf Linie)</b>	gCO <sub>2</sub> eq/km
Klimakomfort	<b>Aufheizverhalten - Dauer der Aufheizung des Innenraums auf def. Innenraumtemperatur durch die Heizung im Stillstand, -10 °C Außentemperatur, Keine Sonne</b>	min
	<b>Abkühlverhalten - Dauer der Abkühlung des Innenraums auf def. Innenraumtemperatur durch die Klimatisierung im Stillstand</b>	min
	Stationärer Klimakomfort (Zugerscheinungen)	Note
	Luftqualität (Gase/Gerüche)	mg/m <sup>3</sup>
	<b>Anzahl getrennter Klimazonen (Fahrer, Fahrgaskabine)</b>	1
Akustikkomfort	<b>Geräuschemissionen innen Fahrspiel bis 50km/h</b>	dB(A)
	<b>Geräuschemissionen außen Fahrspiel bis 50km/h</b>	dB(A)
	<b>Geräuschemissionen außen, Anfahren an Haltestelle mit 30 km/h</b>	dB(A)
	<b>Geräuschemissionen außen Stand</b>	dB(A)
	<b>Geräuschemissionen außen Abfahrt</b>	dB(A)
Wirtschaftlichkeit	<b>TCO Bus &amp; Infrastruktur (Anschaffungskosten, Wartungskosten, Betriebskosten)</b>	€/km
Energieeffizienz	<b>Energiebedarf/Energieverbrauch, entspricht Gesamtwirkungsgrad des Antriebs</b>	%
Betriebstauglichkeit Infrastruktur	<b>planerische, betriebliche Flexibilität f(Einsatz auf versch. Linien möglich?)</b>	Note
	<b>Strategische Flexibilität (Änderungen in der Zukunft) über die Integration in Straßenraum (Flächenbedarf, sicherer und aufwandsarmer Anschluss, vorh. Stromversorgung)</b>	Note
	<b>Komplexität des Ladevorgangs</b>	
Betriebstauglichkeit Fahrzeug	<b>Produktivität des Umlaufs (Fahrplanwirkungsgrad = f(Ladezeit, Wartezeit, Ein/Aussetzfahrt))</b>	%
	<b>Beförderungskapazität (Anzahl Sitze, Stehfläche, Unterflurtechnik)</b>	1
	<b>Reichweite mit einer Ladung</b>	km
	Wartungsfreundlichkeit (Zugänglichkeit)	Note
	Pflegeleichtigkeit/ Fahrzeugverschmutzung	Note
	Witterungstauglichkeit (Schutzklassen)	1
Sicherheit Fahrzeug/Infrastruktur	<b>Zugänglichkeit der Ladeschnittstelle (Ebenerdig, erhöht, unterflur, unzugänglich)</b>	Note
	<b>Exponierte Leiter</b>	
	<b>externe Störanfälligkeit</b>	Note
	<b>Kippsicherheit, Neigung der Ebene</b>	

Kundenwerte Merkmale	Untermerkmal	Einheit
	Crashsicherheit	
	Hochvoltsicherheit	
	<b>EMV</b>	
Qualität	<b>Zuverlässigkeit im Langzeitverhalten</b>	%
	<b>Verfügbarkeit</b>	%
	Korrosionsschutz	Note
	Qualitätseindruck/Wertigkeit für Verarbeitung, Materialien und Oberflächen	Note
Imagegewinn	<b>Mitarbeitermotivation</b>	Note
	<b>Einnahme Vorreiterrolle</b>	Note
	<b>Außenwirkung</b>	Note
	<b>Akzeptanzsteigerung</b>	Note
Besondere Fahrzeugeigenschaften	Diebstahlsicherheit - Zeitdauer bis Eindringen in Fahrzeug und Fahrzeugstart (keine Beschädigung)	sec
	Diebstahlsicherheit - Zeitdauer bis Eindringen in Fahrzeug und Fahrzeugstart (mit Beschädigung)	sec
	Watverhalten - Wasserdurchfahrt xyz mm	mm

## Anhang A2 klimatische Eingangsdaten für die Simulation des Jahresverbrauchs

Tabelle 32: klimatische Eingangsdaten für die Simulation

Temperatur [°C]	Luftfeuchtigkeit [%]	Globalstrahlung [W/m <sup>2</sup> ]	Anzahl Tage Durchschnittsjahr	Anzahl Tage Extremer Winter	Anzahl Tage Extremer Sommer
-15	70	72	0	0	2
-10	78	57	2	10	3
-5	85	52	14	24	19
0	87	58	62	62	59
5	86	68	66	73	56
10	79	125	82	36	65
15	74	181	73	72	69
20	69	248	56	72	63
25	60	305	10	16	27
30	40	331	0	0	2

Frischlufteanteil 15% im Kühlbetrieb, 10% im Heizbetrieb

17 Fahrgäste

Sollwert der Innenluft 18° Heizbetrieb, 25° Kühlbetrieb

## Anhang A3 Berechnung des Wärmeaustauschs mit der Umgebung

In Kapitel 6.2.2 wurde das Teilmodell zur Bestimmung des Leistungsbedarfs Klima vorgestellt. In diesem Abschnitt wird näher auf den Wärmeaustausch zwischen dem Fahr-  
gastraum und der Umgebung eingegangen ( $\dot{Q}_{\text{heatLoss}}$  und  $\dot{Q}_{\text{sol}}$ ).

$\dot{Q}_{\text{heatLoss}}$  beschreibt die Wärmeübertragung durch Wärmeleitung und Konvektion sowie die Wärmeabgabe der äußeren Oberfläche mittels Strahlungsaustausch mit der Umgebung. Dieser Wärmestrom tritt an der Karosseriewand, an den Fenstern, am Boden und am Dach auf.  $\dot{Q}_{\text{sol}}$  beschreibt die kurzwellige solare Einstrahlung an der Außenseite, die zum Teil transmittiert und zum Teil absorbiert wird. Dieser Wärmestrom tritt an den Flächen auf, die von der Sonne angestrahlt werden.

Exemplarisch soll im Folgenden der Wärmeaustausch an einer mehrschichtigen Wand bestimmt werden, welche in Abbildung 63 dargestellt ist.

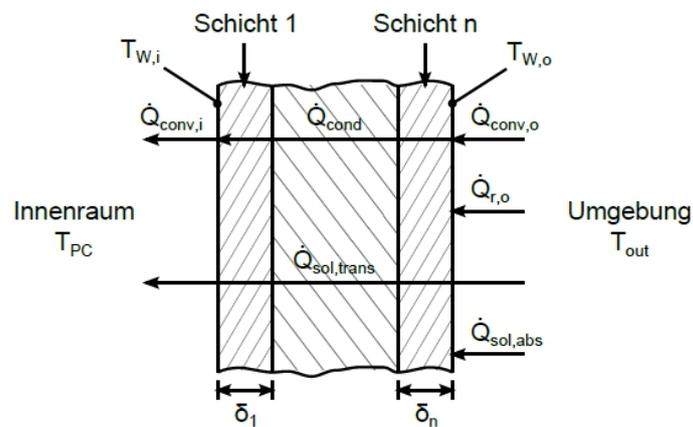


Abbildung 63: Modell einer n-schichtigen Wand mit allen auftretenden Wärmeströmen<sup>232</sup>

Die Wärmeströme lassen sich wie folgt berechnen<sup>233</sup> und bedeuten:

$$\dot{Q}_{\text{conv},i} = \alpha_i A (T_{\text{PC}} - T_{W,i}) \quad \text{konvektiver Wärmeübergang an der Innenseite} \quad (\text{A1})$$

$$\dot{Q}_{\text{conv},o} = \alpha_o A (T_{W,o} - T_{\text{out}}) \quad \text{konvektiver Wärmeübergang an der Außenseite} \quad (\text{A2})$$

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = k A (T_{W,i} - T_{W,o}) \quad \text{Wärmeleitung durch die Wand} \quad (\text{A3})$$

$$\dot{Q}_{r,o} = \varepsilon_o \sigma A (T_{W,o}^4 - T_{\text{out}}^4) \quad \text{Wärmestrahlung an der Außenseite} \quad (\text{A4})$$

$$\dot{Q}_{\text{sol,trans}} = \tau A \dot{q}_{\text{sol}} d_{\text{sol}} \quad \text{transmittierende Solarstrahlung} \quad (\text{A5})$$

$$\dot{Q}_{\text{sol,abs}} = a A \dot{q}_{\text{sol}} d_{\text{sol}} \quad \text{Absorbierende Solarstrahlung} \quad (\text{A6})$$

Die verwendeten Variablen bedeuten:

<sup>232</sup> Abbildung 4.4 aus der betreuten Diplomarbeit Jefferies 2015.

<sup>233</sup> Vgl. Baehr 2016

$\alpha_{i/o}$	Wärmeübergangskoeffizient an der Innenseite und Außenseite (Berechnung siehe Abschnitt Wärmeübergangskoeffizient)
$T_{W,i/o}$	Wandoberflächentemperatur an der Innenseite und Außenseite
$T_{PC}$	Temperatur in der Fahrgastkabine
$T_{out}$	Außentemperatur
$k$	Wärmedurchgangskoeffizient ( $k$ -Wert) (Berechnung siehe Abschnitt Wärmedurchgangskoeffizient $k$ )
$A$	Fläche der Wand
$\varepsilon_o$	Emissionsgrad der Außenseite
$\sigma$	Stefan-Boltzmann-Konstante
$\tau$	Transmissionsgrad der Wand
$a$	Absorptionsgrad der Wand
$\dot{q}_{sol}$	Globalstrahlung
$d_{sol}$	Dämpfungsfaktor zur Berücksichtigung der nicht senkrechten Einstrahlung auf die Seitenfläche (Berechnung siehe Abschnitt solarer Dämpfungsfaktor $d_{sol}$ )

Da der Wärmetransport als stationär betrachtet wird, ergibt sich aus der Energiebilanz einer dünnen, wandnahen Schicht für die Innenseite und Außenseite folgende Zusammenhänge:

$$\dot{Q}_{conv,i} = \dot{Q}_{cond} \quad (A7)$$

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{Q}_{conv,o} + \dot{Q}_{r,o} + \dot{Q}_{sol,abs} \quad (A8)$$

Der Netto-Wärmeeintrag in den Innenraum wird mit  $\dot{Q}_{net}$  bezeichnet und setzt sich wie folgt zusammen:

$$\dot{Q}_{net} = \dot{Q}_{conv,i} + \dot{Q}_{sol,trans} \quad (A11)$$

Ist  $\dot{Q}_{net}$  positiv, findet ein Netto-Wärmeeintrag in den Bus statt, ist  $\dot{Q}_{net}$  negativ, geht die Wärme aus dem Bus an die Umgebung.

Für einen Fahrgastraum müssen die Netto-Wärmeeinträge durch Wände, Fenster, Boden, Dach, etc. bestimmt und aufsummiert werden.

$$\dot{Q}_{heatLoss,net} = \dot{Q}_{net,body} + \dot{Q}_{net,windows} + \dot{Q}_{net,floor} + \dot{Q}_{net,roof} \quad (A12)$$

Zur Modellierung des Fahrgastraums wurde in der Simulationssprache Modelica ein Simulationsmodell entwickelt. Dieses beinhaltet u.a. die Gleichungen (A1) bis (A12). Ein Umstellen der Gleichungen ist nicht erforderlich, da Modelica eine objektorientierte Simulationssprache ist.

## Wärmeübergangskoeffizient $\alpha$

In den Gleichungen A1 und A2 sind die mittleren, konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_i$  und  $\alpha_o$  zu bestimmen. Diese hängen von den jeweiligen mittleren Nusselt-Zahlen  $Nu$ , der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und der charakteristischen Länge  $L_0$  ab.

$$\alpha_i = \frac{Nu_i \lambda_i}{L_{0,i}} \quad \text{bzw.} \quad \alpha_o = \frac{Nu_o \lambda_o}{L_{0,o}}$$

Es muss zwischen freier (natürlicher) Konvektion und erzwungener Konvektion unterschieden werden.

Für freie Konvektion berechnet sich die mittlere Nusselt Zahl wie folgt<sup>234</sup>:

$$Nu_{m,F} = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 Ra^{1/6}}{\left[1 + (0,492/Pr)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2$$

mit  $Pr$ , die Prandtlzahl, und  $Ra$ , die Rayleigh-Zahl, die wie folgt definiert sind:

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad \text{und} \quad Ra = \frac{\beta_{FL} |T_W - T_{Fl}| g H^3}{\nu^2} Pr$$

$\nu$  kinematische Viskosität des Fluids

$a$  Temperaturleitfähigkeit des Fluids

$\beta_{FL}$  isobarer Volumenausdehnungskoeffizient des Fluides bei  $T_{Fl}$

$T_{Fl}$  Temperatur des Fluids

$g$  Erdbeschleunigung

$H$  Höhe der Wand

Da freie Konvektion sowohl auf der Innenseite als auch auf der Außenseite vorliegt, muss für den Fall an der Innenseite als Fluid die Luft in der Fahrgastkabine und für die Außenseite die Umgebungsluft eingesetzt werden.

Für die Bestimmung der erzwungenen Konvektion muss zwischen laminarer und turbulenter Strömung unterschieden werden. Die Unterscheidung hängt von der Reynolds-Zahl ab. Die Nusselt-Zahl für diese Fälle berechnet sich wie folgt<sup>235</sup>:

$$Nu_{m,E,lam} = 0,664 Re^{1/2} Pr^{1/3} \quad \text{für} \quad Re \leq 5 \cdot 10^5$$

$$Nu_{m,E,turb} = \frac{0,037 Re^{0,8} Pr}{1 + 2,443 Re^{-0,1} (Pr^{2/3} - 1)} \quad \text{für} \quad 5 \cdot 10^5 < Re < 10^7$$

Mit

$$Re = Re_o = \frac{\nu L_{0,o}}{\nu_o}$$

<sup>234</sup> Vgl. Baehr 2016, S. 469

<sup>235</sup> Vgl. Baehr 2016, S. 404

dabei sind  $v$  die Geschwindigkeit des Busses,  $L_{0,o}$  die charakteristische Länge der Außenseite, in diesem Fall die Länge des Busses, und  $\nu_o$  die kinematische Viskosität der Außenluft.

An der Außenseite überlagern sich freie und erzwungene Konvektion. Die Nusselt-Zahl für diesen Fall berechnet sich nach folgender Gleichung<sup>236</sup>:

$$Nu_m = \sqrt[3]{Nu_{m,E}^3 + Nu_{m,F}^3}$$

### **Wärmedurchgangskoeffizient $k$**

Der Wärmedurchgangskoeffizient für eine mehrschichtige Wand wird wie folgt bestimmt:

$$k = \left( \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} \right)^{-1}$$

Er hängt ab von der Dicke  $\delta$  und der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  der einzelnen Schicht.

### **Solarer Dämpfungsfaktor $d_{sol}$**

Zur Bestimmung des Einflusses der Sonneneinstrahlung werden die Gleichungen (A5) und (A6) verwendet. Es wurde der solare Dämpfungsfaktor eingeführt, der berücksichtigt, dass nicht die gesamte Oberfläche des Busses angestrahlt wird. Im Rahmen dieser Arbeit wird vereinfacht von einer konstanten Solarstrahlung ausgegangen, die auf die vollständige Dachfläche und eine Längsseite des Fahrzeugs, bestehend aus einem Teil Fenster und einem Teil Karosserie, wirkt.

Die ermittelten Werte sind:

$$d_{sol,roof} = 1, d_{sol,floor} = 0, d_{sol,windows} = 0,46 \text{ und } d_{sol,body} = 0,38.$$

Eine Umrechnung der Solareinstrahlung auf die senkrechte Fläche erfolgte nicht. Dies führt zu einer Überschätzung des Wärmeeintrags und ist abhängig vom Betrag der Solarstrahlung.

## **Anhang A4 Simulink – Modellbeschreibung**

Das verwendete Simulationsmodell (erfordert mindestens Matlab R2012a und Simulink mit der Toolbox Simscape und Simscape Power Systems (früher: SimPowerSystems)). Die Simulation besteht aus mehreren Dateien (.m-Files), und zwei Simulink-Modellen, die nacheinander aufgerufen und ausgeführt werden. Die Hauptdatei trägt den Namen Simulation\_Optimierung.m. Wird diese ausgeführt, läuft die Simulation automatisch durch.

---

<sup>236</sup> Vgl. Baehr 2016, S. 478, freie Konvektion mit positivem Vorzeichen, da beide Strömungen im Fall des fahrenden Busses gleichgerichtet sind.

Im Folgenden wird der interne Ablauf bei Durchführung der Simulation erläutert.

Simulation\_Optimierung.m durchführen

1. Init.m ausführen
  - a. Liest Simulationseinstellungen.m ein  
Welche Strecke, fahrzyklen = Wie viele Umläufe bis zur Aufladung, Lädt vorhandene Batterien und Ladesysteme in den Workspace, Erstellt Matrix mit durchzuführenden Simulationen [Kombi aus Batterie und Ladesystem → Simulation durchführen ja = Eintrag 1, sonst null], SoC Grenzen der Batterien festlegen, z.B 35-65%, Batteriegröße auslegen oder festlegen? Batteriegröße festlegen → setCellCount = 1, z.B. 180s, 3p
  - b. Führt FahrzyklusLaden.m aus (Lädt das Fahrprofil und das Höhenprofil als Steigungswinkel, Abfrage, ob Fahrprofil in m/s [0] oder km/h vorliegt [1])
  - c. Busparameter.m laden → als .mat abspeichern
  - d. KlimaParameter laden
  - e. Solver Einstellungen
2. Mit zwei for Schleifen Batterie und Ladesystem kombinieren
3. mit SimulationsToRunMatrix prüfen ob die Kombination simuliert werden soll
4. SoC für Kombinationen laden
5. mit setCellCount prüfen, ob Batteriegröße vorgegeben ist oder optimiert werden soll
6. While(1)-Schleife zur Initialisierung der Anfangswerte
  - a. For Schleife zur Durchführung der Energiesimulation Gesamtverbrauch.mdl, in fahrzyklen ist gespeichert wie viele Fahrten gemacht werden, bis der Bus geladen wird, entsprechend werden nach dem ersten Durchlauf die Endwerte als Startwerte des neuen Durchlaufs gesetzt.
  - b. Nur wenn Batteriegröße optimiert werden soll wird Programmcode von Zeile 76 bis 111 durchgeführt → Verkleinerung bzw. Vergrößerung der Batterie

Gesamtverbrauch.mdl wurde fertig simuliert
7. Ladesimulation starten Ladesimulation.mdl
8. Simulationsparameter und –ergebnisse werden in der Variable result abgespeichert und result wird mit AddToCache.m in den Cache geladen

Mit der Report.m Funktion werden die Ergebnisse ausgewertet. Diese Datei enthält zwei Unterfunktionen barGraph und geschwProfil. Je nachdem welche Unterfunktion aktiviert ist, wird unterschiedliches visualisiert.

## Anhang A5 Kenndaten der Batterie

Die Kenndaten 2-11 müssen dabei so gewählt werden, dass die Charakteristik der Entladekurve möglichst gut getroffen wird.

1. **fancyName** Der Name der Batterie für die Konsolenausgabe.
2. **uNominal** Die Spannung der Batterie am Ende des linearen Bereiches der Entladekurve.  
Einheit: V
3. **qRated** Die Nennkapazität der Batterie.  
Einheit: Ah
4. **qMax** Die maximale Kapazität der Batterie. Dieser Wert sollte über der Nennkapazität liegen.  
Einheit: Ah
5. **uFull** Die Spannung der Batterie zu Beginn des Entladevorgangs. Dieser Wert sollte unter der Klemmenspannung ohne Last liegen.  
Einheit: V
6. **iNom** Der Entladestrom, für den die Spannungs- und Kapazitätswerte angegeben sind.  
Einheit: A
7. **rInternal** Der Innenwiderstand laut Datenblatt. Sollte kein Innenwiderstand dokumentiert sein, wird als Schätzwert der Zahlenwert von 1% der Nennleistung verwendet.  
Einheit: m $\Omega$
8. **comment** Ein frei verwendbares Textfeld.
9. **qNominal** Die entnommene Ladung am Ende des linearen Bereiches.  
Einheit: Ah
10. **uExponentialZone** Die Spannung zu Beginn des linearen Bereiches der Entladekurve.  
Einheit: V
11. **qExponentialZone** Die entnommene Ladung zu Beginn des linearen Bereiches der Entladekurve.  
Einheit: Ah
12. **ladestromgrenze** Der maximale Ladestrom für jeden Ladezustand.  
Einheit: A, Format: 1x100 Double
13. **iMaxDischarge** Der maximale Entladestrom für einen ca. 30-sekündigen Puls.  
Einheit: A
14. **mass** Die Masse einer Batterieeinheit.  
Einheit: kg
15. **volume** Das Packvolumen einer Batterieeinheit.  
Einheit: l

16. **modelToUse** Das zu verwendende Batteriemodell. Diese Variable ist derzeit ungenutzt, da nur ein Batteriemodell verwendet wird.  
Wert: Ludger Heide
17. **BatType\_for\_simulink** Der Batterietyp, der an das simulink-Batteriemodell übergeben wird.  
Mögliche Werte: Lead-Acid, Lithium-Ion
18. **cp** Die spezifische Wärmekapazität einer Batterie dieses Typs nach Pesaran (2001)  
Einheit: kJ/kg·K
19. **tMax** Die höchste zulässige Batterietemperatur.  
Einheit: °C

## Anhang A6 Kenndaten des Ladesystems

Das Ladesystem wird durch fünf Kenndaten beschrieben:

1. **mass** Die Gesamtmasse der Fahrzeugseitigen Komponenten  
Einheit: kg
2. **totzeit** Die Summe aus Zeit zwischen Halt des Busses und Ladebeginn sowie Zeit zwischen Ladeschluss und Abfahrt.  
Einheit: s
3. **P** Die maximale Dauerleistung dieses Ladesystems.  
Einheit: W
4. **fancyName** Der Name des Ladesystems für die Konsolenausgabe.
5. **effizienz** Anteil der Leistung, die im Fahrzeug am Laderegler des Energiespeichers ankommt.  
Zahlenwert zwischen 0 und 1 (keine Prozentwerte)

## Anhang A7 Tabellarische Übersicht der Ergebnisse

**Tabelle 33: Auslegung der Batterie im Grenzbetrieb mit Gewichtsbeschränkung und Ladezustandsfenstern  $\Delta SoC_{LFP} = 85\%$ ,  $\Delta SoC_{NMC} = 30\%$ ,  $\Delta SoC_{LTO} = 40\%$**

	iOC-NMC	kOC-NMC	iOC-LTO	kOC-LTO	BW-LFP
$\Delta SoC$ [%]	30	30	40	40	85
elektr. Heizleistung [kW]	30	30	30	30	30
Verschaltung s/p [Zellen]	180/3	180/3	280/3	280/3	207/2
Batteriekapazität [kWh]	90	90	58	58	60
Ladezustand am Ende der Fahrt [%]	38,0	38,1	32,1	32,9	14,8
Gewicht Batterie und fahrzeugseitiges Ladesystem [kg]	1455	1055	2095	1695	698
Leergewicht [t]	13,06	12,66	13,70	13,30	12,30
Maximale Ladezeit [min]	8,7	5,4	10,0	6,7	4
Maximaler Energieverbrauch [kWh/km]	3,901	3,887	3,923	3,909	3,873