Energetische Gesamtfahrzeugsimulation von elektrischen Nutzfahrzeugen für reale Nutzungsprofile

vorgelegt von Dipl.-Ing. Jens-Olav Jerratsch ORCID: 0000-0002-7827-623X

an 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. Dietmar Göhlich Gutachterin: Prof. Dr. rer. nat. Stefanie Marker Gutachter: Dr. rer. pol. Sebastian Stütz

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 07. Mai 2021

Vorwort

Die ersten Ideen der vorliegenden Arbeit entstanden während meiner Tätigkeit bei der Volkswagen Consulting in Wolfsburg und in Zusammenarbeit mit der Entwicklungsabteilung von Volkswagen Nutzfahrzeuge. Hier geht mein Dank für die Unterstützung dieser wichtigen, frühen Phase insbesondere an Frank Harms, Dr. Sania de Miroschedji, Dr. Arkadiusz Opalinski und Jörg Strunz. Mein besonderer Dank gilt meiner Doktormutter und Mentorin an der Technischen Universität Berlin Prof. Dr. Stefanie Marker für die Aufgeschlossenheit meiner Person und dem Promotionsvorhaben gegenüber, die Weiterentwicklung des Themas, die Unterstützung über die gesamte Zeit mit Anregung und nützlicher Kritik und das Angebot zur Zusammenarbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an Ihrem Fachgebiet Fahrerverhaltensbeobachtung für energetische Optimierung und Unfallvermeidung im Rahmen der Forschungsprojekte EN-WIN und eHaul.

Dr. Sebastian Stütz danke ich für die Motivation und inhaltliche Unterstützung in der Endphase der Dissertation und die Übernahme des Zweitgutachtens. Prof. Dr.-Ing. Dietmar Göhlich danke ich für die Übernahme des Vorsitzes im Promotionsausschuss.

Ohne die zahlreiche Unterstützung der Kolleg*innen der Fachgebiete Fahrerverhaltensbeobachtung und Kraftfahrzeugtechnik sowie die Unterstützung durch studentische Mitarbeit und Abschlussarbeiten zu Projekt- und Promotionsthemen wäre diese Arbeit so nicht entstanden. Mein besonderer Dank geht an David Bitzker, Natascha Bode, Alexandru Cascatau, Anh Tuan Dong, Vincent Gregul, Jan Grell, Jan Grüner, André Hartwecker, Thomas Herzlieb, Martin Hofmann, Johannes Holtz, Kerstin Ipta, Jannik Kexel, Oliver Kilian, Sandro Kott, Paul Mex, Dr. Gerd Müller, Prof. Dr. Steffen Müller, Denis Reduth, Andreas Thomann, Alexander Windt und Ingo Wülfing.

Für die Zusammenarbeit bei der Aufnahme von in dieser Arbeit verwendeten Fahrzeugdaten bedanke ich mich zusätzlich bei Olaf Höhn und Henrike Schulz (Florida-Eis Manufaktur GmbH) und Andreas Igel (Igel Elektro Service GmbH) sowie für Anregungen zu Struktur und Verständlichkeit der Arbeit bei Dr. Arne Körber.

Für eine schier unerschöpfliche Unterstützung vom ersten Ansatz bis zum finalen Lektorat dieser Arbeit, das Vertrauen in mich, den sanften Druck, um am Ende auch fertig zu werden, und sehr, sehr, sehr viel mehr danke ich meiner Frau Miriam.

Jens-Olav Jerratsch, Berlin, 2021

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	II
Inhaltsverzeichnis	III
Vorabveröffentlichungen und betreute Abschlussarbeiten	IX
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XV
Symbolverzeichnis	XVII
Verzeichnis von Abkürzungen und weiteren Indizes	XX
Glossar	XXIII
Zusammenfassung	XXIV
Abstract	XXVI
1. Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Motivation	
1.2 Forschungsbedarf und Zielsetzung	5
1.3 Aufbau der Arbeit und Vorgehen	
1.4 Forschungsprojekt EN-WIN	
2. Stand von Wissenschaft und Technik	9
2.1 Elektromobilität	9
2.1.1 Bauformen	
2.1.2 Elektrischer Antriebsstrang	
2.1.3 Nebenverbraucher von Elektrofahrzeugen	
2.1.3.1 Bewertung der Energieverbräuche von Nebenverbrauchern	
2.1.3.2 Heizung und Klimaanlage	
2.1.3.3 Niedervolt-Nebenverbraucher und DCDC-Wandler	
2.1.3.4 Nutzfahrzeugspezifische Nebenverbraucher	
2.2 Nutzfahrzeuge, Grundlagen und technische Ausführungen	
2.2.1 Einteilung von Nutzfahrzeugen	
2.2.2 Elektrifizierung von Nutzfahrzeugverkehren	
2.3 Nutzungsorientierte Berechnung des Fahrzeugenergieverbrauchs	
2.3.1 Übersicht Modellansätze in der Literatur	

2.3.2	E	nergieverbrauchsberechnung am Antriebsstrang	23
2.3	3.2.1	Streckenverbrauch	24
2.3	3.2.2	Fahrwiderstände und Fahrwiderstandsleistung	24
2.3	3.2.3	Radwiderstand	24
2.3	3.2.4	Luftwiderstand	25
2.3	3.2.5	Steigungswiderstand	25
2.3	3.2.6	Beschleunigungswiderstand	25
2.3	3.2.7	Motorleistung, mechanische Verluste im Antriebsstrang und Schlupfverluste	26
2.3	3.2.8	Normalfahrwiderstand	27
2.3	3.2.9	Fahrwiderstandsleistung	27
2.3.3	D	atenbasierte Verfahren	27
2.3	3.3.1	Konstantwerte	27
2.3	3.3.2	Einfache Regressionsverfahren	28
2.3	3.3.3	Verfahren des maschinellen Lernens	28
2.4	Ver	wendung von Sekundärdaten	28
2.5	Öko	onomische und ökologische Bewertung des Einsatzes von Elektrofahrzeugen	29
2.5.1	W	/irtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen	29
2.5.2	В	estimmung der optimalen Fahrzeugbatteriegröße aus Realdaten und	
	Si	imulationsergebnissen	31
2.5.3	Z	ur ökologischen Betrachtung von Elektrofahrzeugen	31
2.6	Ver	fügbare elektrische Nutzfahrzeuge	32
3. Energ	getisc	he Gesamtfahrzeugsimulation von batterieelektrischen Nutzfahrzeugen	.35
3.1	Mot	tivation Energieverbrauchssimulation	35
3.2	Ver	brauchsbeeinflussende Parameter bei Elektrofahrzeugen und Anforderungen an die	
	Eing	gangsdaten	37
3.3	Dat	enbasis Energiesimulation	38
3.4	Auf	bau Gesamtfahrzeugenergiemodell	40
3.4.1	Fa	ahrenergiebedarfsmodell (Antriebsstrang)	41
3.4	4.1.1	Fahrzeugmodell	42
	3.4.1.	1.1 Fahrwiderstand	42

3.4.1.1.2 Räder und Bremse	42
3.4.1.1.3 Differenzial und Getriebe	43
3.4.1.2 Elektrische Maschine und Leistungselektronik	44
3.4.2 Nebenaggregatemodelle - Einleitung	44
3.4.3 Heizung und Klimaanlage	45
3.4.3.1 Thermisches Modell des Fahrgastraums	46
3.4.3.1.1 Temperatur Kabinenluft	48
3.4.3.1.2 Temperatur Laderaum	49
3.4.3.1.3 Kurzwellige solare Einstrahlung	49
3.4.3.1.4 Berechnung der Temperaturen für Bauteile der Umschließungsfläche	n 54
3.4.3.1.5 Einbauten / thermische Massen in der Fahrerkabine	58
3.4.3.2 Gebläse	58
3.4.3.2.1 Gesamtluftstrom Gebläse	58
3.4.3.2.2 Luftzustand Ausströmer	59
3.4.3.3 Heizung und Klimaanlage im Fahrzeug	60
3.4.3.4 Unterscheidung Heiz-/Klimabetrieb und Vorgabe der Soll-Innentemperatur	62
3.4.3.5 Winterbetrieb (Heizfall)	62
3.4.3.5.1 Regelkreise im Heizsystem	62
3.4.3.5.2 Wärmeübertragung im Heizkreis	64
3.4.3.5.3 Luft-PTC-Heizung	68
3.4.3.6 Sommerbetrieb (Klimafall)	69
3.4.3.6.1 Regelkreise im Klimasystem	70
3.4.3.6.2 Bestimmung des Coefficient of Performance	71
3.4.3.7 Weitere Modellierungsgrößen für den Heiz- und Klimabetrieb	73
3.4.4 Niedervolt-Nebenverbraucher und Gleichspannungswandler	73
3.4.5 On-Board-Ladegerät	74
3.4.6 Traktionsbatterie	74
3.5 Validierung des Modells für einen Stadtlieferwagen (2,3t zGG)	75
3.5.1 Datenbasis e-Caddy	75
3.5.1.1 Modellparameter des Fahrzeugs – Antrieb	
3.5.1.2 Modellparameter des Fahrzeugs – Fahrzeuggeometrie	
3.5.1.3 Modellparameter des Fahrzeugs – Heizung und Klimaanlage	77

3.5.1.4	Übersicht zu den aufgezeichneten und verwendeten Nutzungs- und	
	Umgebungsdaten	. 77
3.5.1.5	5 Validierungsdaten	. 78
3.5.2	Klassifizierung der Messdaten nach Relevanz	. 79
3.5.2.1	Identifikation relevanter Tagesdatensätze nach Mindestentfernung und -	
	betriebszeit	. 79
3.5.2.2	2 Identifikation von relevanten Grenzfällen für die Energieverbrauchsbetrachtungen	l
	und Kennfeld-Berechnungen	. 79
3.5.3	Ableitung fahrzeug- und komponentenspezifischer Kennfelder aus den Messdaten zu	r
	Parametrierung des Simulationsmodells	. 81
3.5.3.1	Drehzahl-Drehmoment-Kennfeld des Systems elektrische Maschine und	
	Leistungselektronik	. 82
3.5.3.2	2 Rekuperationskennlinie der E-Maschine	. 83
3.5.3.3	3 Kennlinie PTC-Heizer	. 83
3.5.3.4	Verbrauchsprofil elektrischer Klimakompressor	. 84
3.5.3.5	5 Verbrauchsprofil Niedervolt-Verbraucher und Gleichspannungswandler	. 86
3.5.4	Plausibilisierung Modellgüte mit Hersteller-Verbrauchsangaben	. 87
3.5.5	Bewertung Modellgüte anhand von Flottendaten	. 87
3.5.5.1	Gesamtfahrzeugmodell / Energieverbrauch an Batterie	. 89
3.5.5.2	2 Antriebsmodell	. 91
3.5.5.3	3 Modell Heizung	. 92
3.5.5.4	Modell Klima	. 93
3.5.5.5	5 Modell Niedervoltverbraucher	. 95
3.5.5.6	5 Fazit Güte Simulationsmodell e-Caddy	. 96
3.6 V	alidierung des Modells für ein leichtes eNfz der Transporterklasse (3,9t zGG)	. 97
3.6.1	Datenbasis SAIC Maxus EV80	. 97
3.6.1.1	Modellparameter des Fahrzeugs – Antrieb	. 99
3.6.1.2	2 Modellparameter des Fahrzeugs – Fahrzeuggeometrie	100
3.6.1.3	B Modellparameter des Fahrzeugs – Heizung und Klimaanlage	100
3.6.1.4	Übersicht zu den aufgezeichneten und verwendeten Nutzungs- und	
	Umgebungsdaten	101

3	.6.1.5	Validierungsdaten	102
3.6.2	2 K	lassifizierung der Messdaten nach Relevanz	102
3.6.3	3 A P	bleitung fahrzeug- und komponentenspezifischer Kennfelder aus den Messdaten arametrierung bzw. Gütebewertung des Simulationsmodells	zur 102
3	.6.3.1	Kennfelder Antrieb und Rekuperation	103
3	.6.3.2	Kennlinie PTC-Heizer	103
3	.6.3.3	Verbrauchsprofil elektrischer Klimakompressor	104
3	.6.3.4	Verbrauchsprofil Niedervolt-Verbraucher und Gleichspannungswandler	105
3.6.4	4 P	lausibilisierung Modellgüte mit Hersteller-Verbrauchsangaben	105
3.6.5	5 В	ewertung Modellgüte anhand Flottendaten	106
3	.6.5.1	Gesamtfahrzeugmodell / Energieverbrauch an Batterie	107
3	.6.5.2	Antriebsmodell	109
3	.6.5.3	Modell Heizung	110
3	.6.5.4	Modell Klima	111
3	.6.5.5	Modell Niedervoltverbraucher	113
3	.6.5.6	Fazit Güte Simulationsmodell Maxus EV80	114
4. Pral	ktische	Anwendung	115
4.1	Zus	ammenfassung des methodischen Vorgehens	115
4.1.1	l V	orbereitung	116
4.1.2	2 F	ahrzeugeinsatz zur Datenaufnahme	117
4.1.3	3 A	uswertung	117
4.2	Elel	ktrischer Stadtlieferwagen für Handwerkerbetrieb in Berlin	118
4.2.1	1 V	orbereitung	118
4.2.2	2 F	ahrzeugeinsatz zur Datenaufnahme	119
4.2.3	3 A	uswertung	121
4	.2.3.1	Gesamtkostenvergleich Elektrofahrzeug mit Diesel-Fahrzeug	127
4	.2.3.2	Wirtschaftliche Optimierung der Batteriegröße am Nutzungsprofil	132
5. Zus	ammer	nfassung, Diskussion, und Perspektiven	136
5.1	Zus	ammenfassung und Beantwortung der Forschungsfragen	136
5.2	Dis	kussion der Ergebnisse und Ansätze für weitere Forschungsarbeiten	137

5.	.3 Gesamtfazit	43
Lite	eraturverzeichnis1	45
А	Anhang: Ergebnisse der Marktrecherche zu eNfz	1

Vorabveröffentlichungen und betreute Abschlussarbeiten

Teilergebnisse dieser Dissertation wurden bereits vorab veröffentlicht:

- Jerratsch, Jens-Olav; Marker, Stefanie (2016): Electrifying Commercial Vehicle Fleets Energetic Simulation including Auxiliaries, 5th CoFAT (Conference on Future Automotive Technologies), Online verfügbar unter: https://mediatum.ub.tum.de/1319467?show_id=1319472&style=full_text, zuletzt geprüft am 12.12.2020
- Jerratsch, Jens-Olav; Herzlieb, Thomas; Marker, Stefanie (2018): Using secondary data to reduce measuring efforts in naturalistic driver observation, 7th CoFAT (Conference on Future Automotive Technologies), Online verfügbar unter: https://mediatum.ub.tum.de/1462985, zuletzt geprüft am 12.12.2020
- Jerratsch, Jens-Olav; Grüner, Jan; Gobernatz, Martin; Marker, Stefanie (2018): "Total cost optimization for extended-range electric vehicles (E-REV) by user-oriented battery dimensioning", 15th HEV Symposium, ISBN: 978-3-937655-43-7
- Jerratsch, Jens-Olav; Herzlieb, Thomas; Marker, Stefanie (2018): Weather Data Mapping to enrich Naturalistic Driving Data and enhance Energetic Simulation, F2018-STN-053, FISITA 2018 World Automotive Congress Proceedings. Disruptive Technologies for Affordable and Sustainable Mobility. Chennai, ISBN: 978-0-9572076-7-7
- Jerratsch, Jens-Olav; Herzlieb, Thomas; Kilian, Oliver; Bitzker, David; Kexel, Jannik; Marker, Stefanie (2020): EN-WIN: Abschlussbericht der TU Berlin. Technische Universität Berlin. *-in Druck-*
- Jerratsch, Jens-Olav; Herzlieb, Thomas; Marker, Stefanie (2020): Energetic consumption and economic feasibility of electric trucks of different size with respect to usage, Forschung im Ingenieurwesen *-eingereicht-*

Darüber hinaus wurden durch den Autor im Kontext der Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrerverhaltensbeobachtung für energetische Optimierung und Unfallvermeidung an der Technischen Universität Berlin Abschlussarbeiten zu den folgenden Themen betreut und deren Ergebnisse im Rahmen der Arbeit verwendet:

Bachelor- und Studienarbeiten

- Herzlieb, Thomas (2016): Verwendung externer Sekundärdaten bei der energetischen Betrachtung von Elektrofahrzeugen
- Hofmann, Martin (2015): Nutzerverhaltensstudie zur Bewertung des Nebenaggregate-Energieverbrauchs im Handwerk
- Kott, Sandro (2016): Energetische Betrachtung von Nebenverbrauchern in leichten und mittelschweren Nutzfahrzeugen
- Mex, Paul (2019): Simulation des Energieverbrauchs der Klimaanlage in realen Nutzungsprofilen
- Xu, Yebin (2020): Statistische Auswertung des Energieverbrauchs von eNFZ in Abhängigkeit von Fahr- und Umgebungsbedingungen

Masterarbeiten

- Bode, Natascha (2018): Weiterentwicklung einer Energieverbrauchssimulation mit realen Nutzungsprofilen zur Simulation von schweren E-Nutzfahrzeugen
- Cascatau, Axexandru (2018): Energetische Modellierung von Traktionsbatterie und Ladegerät für ein leichtes E-Nutzfahrzeug in Matlab/Simulink
- Dong, Anh Tuan (2019): Gesamtkostenbetrachtung zum Einsatz von elektrischen Lkw unter Berücksichtigung des Wertverlustes
- Grell, Jan Florian (2019): Validierung und Optimierung eines Energie-Simulationsmodells zur Abbildung von elektrischen Nutzfahrzeugen anhand von realen Fahrzeugdaten.
- Herzlieb, Thomas (2019): Verwendung von Machine Learning Methoden für die datengestützte Energieverbrauchsprognose von Elektrofahrzeugen
- Windt, Alexander (2019): Nutzerverhaltensstudie zur Bewertung des Nebenaggregate-Energieverbrauchs in der Lebensmittellogistik

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Reichweiten ausgewählter BEV (Linssen et al. 2012, S. 45)	4
Abbildung 1-2: Aufbau der Arbeit	7
Abbildung 2-1: Anzahl weltweit zugelassener Elektrofahrzeuge (International Energy Agency	
2020, S. 11)	10
Abbildung 2-2:Übersicht zur Einteilung von Nebenverbrauchern im Elektrofahrzeug (in	
Anlehnung an Köll et al. 2011, S. 27)	12
Abbildung 2-3: Leistungsbedarf zum stationären Kühlen des Fahrgastraums auf eine mittlere	
Temperatur von 22°C, einer Außenlufttemperatur von 30°C und einer solaren	
Einstrahlung von 500 W/m² in Abhängigkeit der relativen Außenluftfeuchtigkeit	
(Westerloh 2019, S. 34)	17
Abbildung 2-4: Einteilung der Straßenfahrzeuge (DIN 70010)	19
Abbildung 2-5: Leistungsbedarf zum Heizen und Kühlen des Fahrgastraums eines	
Kompaktklasse-Pkw auf 22°C bei unterschiedlichen Außenlufttemperaturen im	
stationären Betrieb (Westerloh 2019, S. 32)	23
Abbildung 2-6: Energiebedarf zum Aufheizen bzw. Abkühlen des Fahrgastraums bei	
unterschiedlichen Außenlufttemperaturen im instationären Betrieb auf eine mittlere	
Temperatur von 22 °C (Westerloh 2019, S. 33)	23
Abbildung 2-7: LCA-Vergleich konventionelles und Elektrofahrzeug der unteren Mittelklasse	
(Hill et al. 2020, S. 9)	32
Abbildung 3-1: Prinzipskizze Antriebs- und NA-Energiemodell: Datenverwendung und	
Validierung	35
Abbildung 3-2: Zusammenhang von Außentemperatur und dem mittleren spezifischem	
Gesamtenergieverbrauch (links) bzw. der mittleren Leistung der PTC-Heizung	
(rechts) eines Elektrofahrzeugs, jeweils mit linearer Regressionsgeraden, Quelle:	
eigene Auswertung auf Basis e-Caddy Flottendaten	37
Abbildung 3-3: Gesamtübersicht Energiemodell	40
Abbildung 3-4: Antriebmodell BEV (eigene Darstellung nach Linssen et al. 2012, S. 35)	41
Abbildung 3-5: Übersicht Antriebsstrang-Modell	41
Abbildung 3-6: Berechnung von Motormoment und -drehzahl	42
Abbildung 3-7: Übersicht Nebenaggregate-Energiemodell	45
Abbildung 3-8: Übersicht HVAC- und Fahrgastraummodell	46
Abbildung 3-9: Abmessungen Kabine und Laderaum des Nutzfahrzeug-Modells (h: Höhe, l:	
Länge, b: Breite)	47
Abbildung 3-10: Wärmeströme und Bilanzräume des Fahrzeugmodells (in Anlehnung an Konz	
et al. 2011, S. 18)	48

Abbildung 3-11: Bestimmung des Sonneneinfallswinkels auf eine geneigte Ebene (Quaschning	
2015, S. 75)	50
Abbildung 3-12: Codierung der Himmelsrichtungen für Sonnenazimut α_s und	
Fahrzeugausrichtung α_{Fzg}	52
Abbildung 3-13: Übersicht Bauteilbeschaffenheit der Innenraumbegrenzungsflächen	54
Abbildung 3-14: Leckageluftlinien für B-Klasse/Mittelklasse-Pkw (Großmann 2013, S. 60)	59
Abbildung 3-15: Prinzipskizze HVAC – Wasser-PTC-Heiz- und Kühlkreislauf	61
Abbildung 3-16: Prinzipskizze HVAC – Luft-PTC-Heizung und Kühlkreislauf	61
Abbildung 3-17: Regelkreise Heizsystem	63
Abbildung 3-18: Prinzip-Bild Heizwasserkreislauf	65
Abbildung 3-19: Regelkreise Klimasystem	70
Abbildung 3-20: CoP einer Prüfstands-Kompressionskälteanlage (Mardorf und Menger 2010, S.	
7)	71
Abbildung 3-21: CoP in Abhängigkeit der Luftaustrittstemperatur am Verdampfer (Mardorf und	
Menger 2010, S. 7)	72
Abbildung 3-22: Histogramme zu den e-Caddy-Realdaten	81
Abbildung 3-23: Kennfeld System Leistungselektronik und E-Maschine	82
Abbildung 3-24: Rekuperationsmoment E-Maschine	83
Abbildung 3-25: Kennlinie PTC-Heizer	84
Abbildung 3-26: Kennfeld Klimaleistungsbedarf (bivariate Regression, quadratisch)	85
Abbildung 3-27: Leistungskennfeld DCDC-Wandler bzw. NV-Verbraucher (bivariate	
Regression, 3. Grad) in kW	86
Abbildung 3-28: Leistungsverlauf und Energieverbrauch e-Caddy im NEFZ	87
Abbildung 3-29: Simulierter und gemessener Energiebedarf Gesamtfahrzeug, Antrieb und	
Nebenaggregate am 30. Jan, Gesamtfahrstrecke: 56km	88
Abbildung 3-30: Vergleich des gemessenen (Log) mit dem simulierten (Sim) Energiebedarf auf	
Ebene Gesamtfahrzeug bzw. an der Traktionsbatterie	89
Abbildung 3-31: Boxplot der Differenz von berechnetem zu geloggtem Gesamtfahrzeug-	
Energieverbrauch auf 100km normiert	90
Abbildung 3-32: Vergleich des gemessenen (Log) mit dem simulierten (Sim) Energiebedarfs	
des Fahrzeugantriebs	91
Abbildung 3-33: Boxplot der Differenz von simuliertem zu geloggtem Antriebs-	
Energieverbrauch auf 100km normiert	91
Abbildung 3-34: Vergleich des gemessenen (Log) mit dem simulierten (Sim) Energiebedarfs	
der PTC-Heizung	92
Abbildung 3-35: Boxplot der Differenz von simuliertem zu geloggtem Heizungs-	
Energieverbrauch auf 100km normiert	93

Abbildung 3-36: Vergleich des gemessenen (Log) mit dem simulierten (Sim) Energiebedarfs	
des Klimakompressors	93
Abbildung 3-37: Vergleich des gemessenen (Log) mit dem durch Regression (Ber) berechneten	
Energiebedarfs des Klimakompressors	94
Abbildung 3-38: Boxplot der Differenz von durch Regression berechnetem zu geloggtem	
Klima-Energieverbrauch auf 100km normiert	95
Abbildung 3-39: Vergleich des gemessenen (Log) mit dem simulierten (Sim) Energiebedarfs	
des DCDC-Wandlers / NV-Bordnetzes	95
Abbildung 3-40: Boxplot der Differenz von simuliertem zu geloggtem DCDC-Energieverbrauch	
auf 100km normiert	96
Abbildung 3-41: Histogramme zu den Maxus-Realdaten	98
Abbildung 3-42: SAIC Maxus EV80 der Florida-Eis Manufaktur GmbH mit Kofferaufbau	
(Bild: Jerratsch)	99
Abbildung 3-43: Kennlinie Luft-PTC-Heizer	. 103
Abbildung 3-44: Kennfeld Klimaleistungsbedarf (bivariate, quadratische Regression)	. 104
Abbildung 3-45: Leistungsbedarf DCDC-Wandler während der Fahrt (Maxus EV80, bivariate,	
kubische Regression)	. 105
Abbildung 3-46: Leistungsverlauf und Energieverbrauch Maxus EV80 im NEFZ (Sim)	. 106
Abbildung 3-47: Vergleich des gemessenen (Log) mit dem simulierten (Sim) Energiebedarf auf	
Ebene Gesamtfahrzeug / an der Traktionsbatterie	. 107
Abbildung 3-48: Boxplot der Differenz von berechnetem zu geloggtem Gesamtfahrzeug-	
Energieverbrauch auf 100km normiert	. 108
Abbildung 3-49: Vergleich des gemessenen (Log) mit dem simulierten (Sim) Energiebedarfs	
des Fahrzeugantriebs	. 109
Abbildung 3-50: Boxplot der Differenz von simuliertem zu geloggtem Antriebs-	
Energieverbrauch auf 100km normiert	. 109
Abbildung 3-51: Vergleich des gemessenen (Log) mit dem simulierten (Sim) Energiebedarfs	
der PTC-Heizung	. 110
Abbildung 3-52: Boxplot der Differenz von simuliertem zu geloggtem Heizungs-	
Energieverbrauch auf 100km normiert	. 111
Abbildung 3-53: Vergleich des gemessenen (Log) mit dem durch Regression (Ber) berechneten	
Energiebedarfs des Klimakompressors	. 111
Abbildung 3-54: Boxplot der Differenz von durch Regression berechnetem zu geloggtem	
Klima-Energieverbrauch auf 100km normiert	. 112
Abbildung 3-55: Vergleich des gemessenen (Log) mit dem simulierten (Sim) Energiebedarfs	
des DCDC-Wandlers / NV-Bordnetzes	. 113

13
15
19
20
22
23
24
26
28
31
33
35

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Richtwerte für Wirkungsgrade der Antriebskomponenten (Tschöke 2015, S. 39)	11
Tabelle 2.2: Übersicht der Nebenaggregate im Elektrofahrzeug	15
Tabelle 2.3: Einteilung der Nutzfahrzeuge nach Gewichtsklassen in EU (Hoepke und Breuer	
2016, 25ff; Europäische Kommission 2011)	20
Tabelle 2.4: Gegenüberstellung energetischer Verbrauchssimulationen in der Literatur	22
Tabelle 2.5: Anhaltswerte für den Antriebsstrangwirkungsgrad in Abhängigkeit vom	
Antriebskonzept (Haken 2011, S. 183)	26
Tabelle 2.6: Fact-Sheet Elektrofahrzeug-Datenbank, I SEE e-Movano (I SEE 2019)	33
Tabelle 2.7: Fact-Sheet Elektrofahrzeug-Datenbank, SAIC Maxus EV80 Kastenwagen	
(ecomento.de 2020)	34
Tabelle 3.1: Bewertung von Einflussgrößen auf den Energieverbrauch von Fahrzeugsystemen:	
1: starker Einfluss, 2: mittlerer Einfluss, 3: kein/geringer Einfluss (eigene Bewertung)	38
Tabelle 3.2: Übersicht Logger-Eingangsgrößen Energiemodell	39
Tabelle 3.3: Übersicht zusätzliche Eingangsdaten Energiemodell	39
Tabelle 3.4: Übersicht Scheibenausrichtung	52
Tabelle 3.5: Albedo für unterschiedliche Umgebungen (Quaschning 2015, S. 79)	53
Tabelle 3.6: Absorptionskoeffizienten von Oberflächen nach Farbe (Großmann 2013, S. 18)	54
Tabelle 3.7: Auf ETD = 100° C normierte Wärmetauscherleistung Q' ₁₀₀ in kW (Großmann	
2013, S. 172)	67
Tabelle 3.8: CoP des implementierten Kältekreises nach Abbildung 3-20	72
Tabelle 3.9: Parameterübersicht Antrieb e-Caddy	75
Tabelle 3.10: Parameterübersicht Geometrie e-Caddy	76
Tabelle 3.11: Übersicht Modellbedatung HVAC e-Caddy	77
Tabelle 3.12: Übersicht Logger-Eingangsgrößen Energiemodell e-Caddy	78
Tabelle 3.13: Übersicht zusätzliche Umgebungsgrößen Energiemodell e-Caddy	78
Tabelle 3.14: Übersicht Validierungs- und Kennfelddaten Energiemodell	79
Tabelle 3.15: Übersicht Modellbedatung Antrieb	99
Tabelle 3.16: Übersicht Modellbedatung Geometrie	. 100
Tabelle 3.17: Übersicht Modellbedatung HVAC	. 101
Tabelle 3.18: Übersicht Logger-Eingangsgrößen Energiemodell e-Caddy	. 101
Tabelle 3.19: Übersicht zusätzliche Umgebungsgrößen Energiemodell e-Caddy	. 102
Tabelle 3.20: Übersicht Validierungs- und Kennfelddaten Energiemodell	. 102
Tabelle 4.1: Minimaldatensatz der zu erfassenden Daten zur Beschreibung des Nutzungsprofils	. 116
Tabelle 4.2: Themenkatalog für Erstbesprechung mit der*dem Flottenbetreiber*in	. 117
Tabelle 4.3: Übersicht Nutzungs- und Umweltdaten	. 119
Tabelle 4.4: Übersicht Elektroinstallations-Profil aufbereitet	. 120

Tabelle 4.5: Übersicht Jahresprofil Stadtlieferwagen Elektroinstallationsbetrieb als
Eingangswerte für Simulation und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung
Tabelle 4.6: Simulationsergebnis Jahresnutzungsprofil Stadtlieferwagen Handwerk
Tabelle 4.7: Vergleich Energieverbrauch bei unterschiedlichen Soll-Innentemperaturen
(verbrauchskritischer Tag)125
Tabelle 4.8: Auswahl verfügbarer elektrischer Stadtlieferwagen (Bönnighausen 2020; Mercedes
Benz 2020; Nissan 2020) 127
Tabelle 4.9: Parametrisierung des TCO-Vergleichs für den e-Caddy 130
Tabelle 4.10: Übersicht der Prämissen für den Batteriekapazitäts-Optimierungsalgorithmus
Tabelle 4.11: Ergebnisse der Batterieoptimierung Profil Elektroinstallationsbetrieb

Symbolverzeichnis

Formelsymbol	Bedeutung	Einheit
$\#_R$	Anzahl der Räder	-
A	Fläche	m ²
а	Beschleunigung	m/s ²
а	Seitenlänge einer Fläche	m
A_S	Albedo-Wert	-
b	Breite, Seitenlänge einer Fläche	m
С	Wärmekapazität	kJ/kgK
\mathcal{C}_p	Wärmekapazität (isobar)	kJ/kgK
\mathcal{C}_X	Luftwiderstandsbeiwert	-
\mathcal{C}_{eta}	Schräglaufsteifigkeit	N/rad
E_{Batt}	bei vollgeladener Batterie verfügbare Energie / Batteriekapazität	kWh
E_G	Globalstrahlungsenergie	W/m ²
ETD	Eintrittstemperaturdifferenz	К
F	Kraft	Ν
f_R	Rollwiderstandsbeiwert	‰
F_S	Parameter zur Bestimmung der diffusen Solarstrahlung	-
F_W	Fahrwiderstandskraft	Ν
F_{WB}	Beschleunigungswiderstand	Ν
F_{WL}	Luftwiderstand	Ν
F_{WR}	Radwiderstand	Ν
F_{WRF}	Federungswiderstand	Ν
F_{WRK}	Kurvenwiderstand	Ν
F_{WRL}	Lagerwiderstand	Ν
F_{WRR}	Rollwiderstand	Ν
F_{WRS}	Schwallwiderstand	Ν
F_{WRV}	Vorspurwiderstand	Ν
F_{WS}	Steigungswiderstand	Ν
g	Erdbeschleunigung	m/s ²
Gr	Grashofzahl	-
h	Höhe	m
h	spezifische Enthalpie	kJ/Kg
<i>h</i> _{Dampf}	Verdampfungsenthalpie Wasser	2257 kJ/kg
h_{Fzg}	geografische Höhe des Fahrzeug-Standorts	m
i	Übersetzungsverhältnis	-
I _{reg}	Integrationsanteil im PI-Regler	-
J	Trägheitsmoment	kg*m

Formelsymbol	Bedeutung	Einheit
Jzgl	Parameter der Zeitgleichung zur Beschreibung des Standes der Sonne im Jahr	0
kA	Wärmedurchgangszahl kW/K	
1	Länge	m
lat	Latitute / geografische Breite	0
11	charakteristische Länge	m
lon	longitude / geografische Länge	0
LZ	lokale Zeit Zeit	
т	Masse	kg
'n	Massenstrom	kg/s
М	Drehmoment	Nm
MESZ	Mitteleuropäische Sommerzeit	Zeit
MEZ	Mitteleuropäische Zeit Zeit	
mod	nod Modus / Zustand 0/1	
MOZ	MOZ mittlere Ortszeit Zeit	
ms	Schwungmasse	kg
п	Drehzahl 1/min	
ns	Anzahl der Scheiben	-
Nu	Nusseltzahl	-
<i>odo_{Fzg}</i>	Odometer	km
Р	Leistung	kW
р	Druck	bar
Pos _{Fzg}	Fzg-Position (Lat, Lon)	0
Pr	Prantlzahl	-
P _{reg}	Proportionalanteil im PI-Regler	-
$p_{x,x}$	Quantil der Residualverteilung	kWh/ 100km
q	Steigung	%
Ż	Wärmestrom	kW
Ra	Rayleighzahl	-
<i>rd</i> _{yn}	dynamischer Reifenradius	m
Re	Reynoldszahl	-
rF	relative (Luft-)Feuchte	%
S	Sonne (Stand und Intensität)	-
t	Zeit	s
V	Geschwindigkeit	km/h oder m/s
V	Volumen	m ³
W	Arbeit / Energie	kWh
WOZ	wahre Ortszeit	Zeit

Formelsymbol	Bedeutung	Einheit
Х	Wassergehalt der Luft	kg/kg
Zgl	Zeitgleichung	min
α	Steigungswinkel	0
α	Wärmeübergangskoeffizient	kJ/m ² K
α	Anstellwinkel der Scheibe zur Waagerechten	0
$lpha_{EB}$	Absorptionskoeffizient Einbauten	-
$lpha_{Fzg}$	Ausrichtung des Fzg	0
$lpha_j$	Absorptionskoeffizient Bauteil i	-
α_s	Azimut der Sonne	0
β	Vorspurwinkel	0
γs	Höhenwinkel der Sonne	0
δ	Sonnendeklination	0
ε	Emissionskoeffizient	-
ε	Massenzuschlagsfaktor	(kg)
η	Wirkungsgrad	-
θ	Temperatur	°C
$artheta_{gen}$	Winkel zwischen Sonnen- und Flächennormaler	0
λ	Schlupf	-
λ_{Luft}	Wärmeleitfähigkeit Luft	W/mK
V _{Luft}	kinematische Viskosität Luft	m²/s
ρ	Dichte	kg/m ³
σ	Boltzmannkonstante	1,38x10 ⁻²³ J/K
τ	Transmissionskoeffizient	-
$ au_n$	Transmissionskoeffizient senkrechte Bestrahlung	-
Ω	Kreisfrequenz	rad/s
Ω	Drehbeschleunigung	rad/s ²

Abkürzung	Bedeutung	
0	Zustände des durchkonditionierten Fzg zu Tagesbeginn	
3F-Raum	Parameterraum des Fahrer-Fahrzeug-Fahrumgebung-Modells	
А	Antrieb	
ABS	Antiblockiersystem	
AC	alternating current / Wechselstrom	
AfA	Abschreibung für Anlagen	
Aus	Ausströmer	
Batt	Batterie	
BMS	Batteriemanagementsystem	
Во	Boden	
СоР	coefficient of performance / Leistungszahl des Klimakreislaufs	
D	Differenzial	
Da	Dach	
DAS	Datenakquisesystem	
DC	direct current / Gleichstrom	
DCDC	Gleichspannungswandler zur Versorgung des NV-Bordnetzes	
DGM	digitales Geländemodell des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie	
diff	diffus	
dir	direkt	
DoD	depth of discharge / Entladungstiefe	
DWD	Deutscher Wetterdienst	
e	Regelabweichung	
eBKV	Elektrischer Bremskraftverstärker	
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz	
EKK	elektrischer Klimakompressor	
el	elektrisch	
EM	Elektrische Maschine	
eNfz	(Batterie-) Elektrisches NFZ	
EN-WIN	Forschungsprojekt "Elektrische Nutzfahrzeuge wirtschaftlich und nachhaltig einsetzen"	
ePkw	elektrischer Pkw	
EPS	electric power steering / Elektrische Servolenkung	
erz	erzwungen	
ESC	electric stability control / Elektrisches Stabilitätsprogramm	
FS	Frontscheibe	
FVB	Fachgebiet Fahrerverhaltensbeobachtung für energetische Optimierung und Unfallvermeidung an der Fakultät Verkehrs- und Maschinensysteme der Technischen Universität Berlin	

Verzeichnis von Abkürzungen und weiteren Indizes

Abkürzung	Bedeutung	
Fzg	Fahrzeug	
G	Getriebe	
gen	geneigt	
ges	gesamt	
HA	Hinterachse	
hor	horizontal	
HS	Heckscheibe/-tür	
Hsh	Heckscheibenheizung	
HV	Hochvolt (Spannungslage Batterie / Bordnetz >300 V)	
HVAC	Heating, Ventilation Air Conditioning /Heiz- und Klimasystem	
HVB	Hochvoltbatterie	
HW	Heizwasser	
HWT	Heizungswärmetauscher	
i	Index Scheiben, Regelkreise	
Ι	innen	
j	Index Bauteile der Kabinenbegrenzungsflächen	
Kfz	Kraftfahrzeug	
KS	Karosserie-Seite	
L	Luft	
lam	laminar	
LCA	life cycle analysis / Lebenszyklusanalyse	
LE	Leistungselektronik	
Lkw	Lastkraftwagen	
LR	Laderaum	
LS	Luftspalt	
max	Maximum	
mean	arithmetisches Mittel	
min	Minimum	
misch	gemischt	
NA	Nebenaggregat / -verbraucher	
ND	Nutzungsdauer	
NDS	naturalistic driver study / Fahrerverhaltensstudie	
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus	
Nfz	Nutzfahrzeug	
NV	Niedervolt (Spannungslage Batterie / Bordnetz 12/24V)	
OEM	original equipment manufacturer / Fahrzeughersteller	
Pkw	Personenkraftwagen	
proj	projiziert	
PTC	positive temperature coefficient heating /elektrische Kaltleiterheizung	

Abkürzung	Bedeutung
PWM	Pulsweitenmodulation
Rad	Am Rad
red	reduziert
ref	reflektiert
reg	Regression
Reku	Rekuperation
Shz	Sitzheizung
sim	Simulation
SoC	state of charge / Ladezustand der Batterie
SoH	state of health / Gesundheitszustand der Batterie
SS	Seitenscheibe
SW	Spritzwand
TCO	total cost of ownership / Gesamtkosten
th	thermisch
turb	turbulent
TW	Trennwand
u	Stellgröße
U	Umgebung
VA	Vorderachse
VW	Volkswagen
W	Führungsgröße
WLTP	worldwide harmonized light duty test procedure
х	in Fahrtrichtung
у	Regelgröße
zGG	zulässiges Gesamtgewicht

Glossar

Bezeichnung	Erläuterung
Batteriekapazität	Die Kapazität einer Batterie bzw. eines Akkumulators C wird in der Einheit Ah angegeben. Im Kontext der Elektromobilität wird verbreitet auch die einer vollen Batterie entnehmbare Energiemenge E als Kapazität bezeichnet und in kWh angegeben.
Elektrofahrzeug	Die Aussagen in dieser Arbeit zum Elektrofahrzeug beziehen sich auf sonst auch als vollelektrisch oder batterieelektrisch bezeichnete Fahrzeuge
Energieverbrauch	Der Energieverbrauch des Elektrofahrzeugs stellt im technisch-naturwissenschaftlichen Sinne eine Energieumwandlung (hier von chemischer zunächst in elektrische und dann in kinetische Fahrenergie bzw. Wärme) dar. Die Begriffsverwendung erfolgt in Anlehnung an den Kraftstoffverbrauch beim konventionellen Fahrzeug und den Begriff der Energieverbrauchskennzeichnung von Pkw (BMWi und BMU 2011).
Nutzbare Batteriekapazität	Durch das BMS/ den OEM eingeschränkte Kapazität zur Vermeidung vorschneller Alterung
Technische Batteriekapazität	Nennkapazität der Fahrzeugbatterie ohne Einschränkung des DoD
(Traktions-) Batterie	Die Batterie stellt im technischen Sinne einen Lithium-Ionen- Akkumulator, der aus wiederaufladbaren Sekundärzellen besteht, dar. Im Kontext der Elektromobilität ist die Bezeichnung Batterie gebräuchlich (z.B. now GmbH 2020).

Zusammenfassung

Die Elektromobilität wurde als Schlüsseltechnologie bei der Dekarbonisierung des Verkehrssektors identifiziert. Derzeit stehen einer weiten Verbreitung insbesondere die begrenzte Reichweite, mangelnde Ladeinfrastruktur und Fahrzeugverfügbarkeit sowie die hohen Investitionen für Elektrofahrzeuge im Wege.

Der wirtschaftliche Betrieb eines Elektrofahrzeugs ist nur möglich, wenn die hohen Anfangsinvestitionen durch die beim Elektrofahrzeug geringeren Betriebskosten kompensiert werden können. Verschiedene Forschungsprojekte haben dargelegt, dass die richtige Dimensionierung der teuren Traktionsbatterie am spezifischen Einsatzfall ein zentraler Erfolgsfaktor für den wirtschaftlichen Einsatz der Elektromobilität ist. Dies setzt eine gute Kenntnis der Nutzungsbedingungen voraus, aus denen dann die benötigte Energiemenge für einen spezifischen Einsatzfall abgeleitet werden kann. Die Kenntnis dieser Bedingungen liegt vor allen bei gut planbaren Fahrten vor, wie es z.B. bei vielen gewerblichen Fahrzeugflotten der Fall ist.

Bei batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen muss neben der Fahrenergie auch die Energie für alle Nebenaggregate (NA) der Traktionsbatterie entnommen werden. Insbesondere das Heiz- und Klimasystem (HVAC), das unter extremen Einsatzbedingungen über 50% der gespeicherten Energie verbrauchen kann, muss in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen besonders betrachtet werden. Wie auch der Energiebedarf zur Erledigung der Fahraufgabe ist der Energiebedarf der NA in großem Maße von der individuellen Nutzung des Elektrofahrzeugs geprägt.

Diese Dissertation entwickelt und demonstriert eine simulationsbasierte und praxisorientierte Methode zur Ableitung des Tagesenergiebedarfs für Haupt- und Nebenverbraucher und damit der benötigten Batteriekapazität und -kosten für den Einsatz von elektrischen Nutzfahrzeugen (eNfz). Neuheitswert hat dabei die Verwendung von realen Einsatzprofilen zur Bewertung von nutzungsspezifischen Anwendungsfällen und die simulative Abbildung aller energetisch relevanten NA. Das Simulationsmodell umfasst dafür die Berechnung des Antriebsenergiebedarfs anhand von Fahrwiderständen und Komponentenwirkungsgraden, ein Regler basiertes HVAC- und thermisches Fahrgastraummodell sowie datengestützte Modelle der weiteren NA. Zum Zwecke der Validierung werden reale Verbrauchs- und Nutzungsdaten von eNfz der Gewichtsklassen 2,3t und 3,9t im realen Nutzungsbetrieb über einen Zeitraum von mehreren Jahren bzw. Monaten ausgewertet. Die Anwendung der Methode wird anhand eines Beispiels aus dem Handwerk beschrieben und diskutiert. Im Ergebnis beantwortet diese Dissertation die Fragen wie sich ein eNfz bei einer spezifischen Nutzung einsetzen und ob es sich gegenüber einem konventionell angetriebenen Fahrzeug wirtschaftlich betreiben lässt und unterstützt dabei in folgenden Anwendungsfällen:

- Hilfe für Flottenbetreiber bei Investitionsentscheidungen zu eNfz
- Hilfe bei der täglichen Einsatzdisposition von eNfz

 Identifikation potenzieller Anwendungsfälle für eNfz als Beitrag zur gesellschaftlichen Zielstellung zur Reduktion der CO₂-Intensität des Verkehrssektors

Als zentrale Ergebnisse sind festzuhalten:

Bei der Bewertung des Fahrzeugenergieverbrauchs liegt der Fokus auf dem Antrieb und den Hochvolt-NA (insbesondere HVAC), die Niedervolt-NA können dagegen vereinfacht summarisch abgebildet werden. Des Weiteren stellt sich die Simulation vor allem bei der Bewertung von extremen Bedingungen (Temperatur, Geschwindigkeit, lange Fahrstrecke oder -dauer) gegenüber einfachen, statischen Verfahren (univariate, lineare Regression) als genauer heraus. Darüber hinaus wird gezeigt, dass der Einsatz von leichten Nutzfahrzeugen, die bereits stark von den Entwicklungen und Kostendegressionen im Pkw-Bereich profitieren, unter Berücksichtigung der aktuellen Förderlandschaft schon heute wirtschaftlich sein kann. Hierbei unterstützten eine sinnvoll dimensionierte Traktionsbatterie und eine täglich hohe Ausnutzung der verfügbaren Energiemenge. Um die Nutzbarkeit von eNfz weiter zu steigern, bieten organisatorische Kompensationsmechanismen (z.B. flexible Disposition innerhalb einer Flotte oder Einplanung von Zwischenladungen) ein großes Potenzial. So können energetische Bedarfsschwankungen, die z.B. durch unterschiedliche Beladung, Tourenlänge oder Wetter hervorgerufen werden, ausgeglichen werden. Absehbare Kostendegressionen bei eNfz (Batterie, industrielle Serienfertigung) sowie Kostensteigerungen bei Diesel-Nutzfahrzeugen (Abgasnachbehandlung, Maut, CO₂-Abgaben) lassen erwarten, dass Transportaufgaben mit eNfz in zunehmendem Maße wirtschaftlich werden und das batterieelektrische Nutzfahrzeug sich perspektivisch nicht mehr mit dem Dieselantrieb, sondern in zunehmendem Maße mit anderen emissionsfreien, alternativen Antrieben wirtschaftlich messen muss.



Aufbau der Arbeit

Abstract

E-mobility has been identified to be a key technology for the decarbonization of the transport sector. Today especially short driving range, limited availability of charging infrastructure and vehicle models, and high initial investment expenditure are reasons for slow adaption in absolute numbers. An economically feasible usage of an electric vehicle is possible only if high initial investments can be compensated by low operational expenses. Multiple research projects suggest that dimensioning the expensive propulsion battery according to the designated usage scenario can be a key lever to reach economic feasibility. This implies profound knowledge of the designated applications in order to derive the needed energy for specific use cases. This prerequisites tours that are well plannable in advance and thus makes commercial fleet operation a viable application for e-mobility.

The propulsion battery in battery electric vehicles needs to power not only the drive train but all auxiliaries as well. Heating, ventilation and air conditioning (HVAC) for the cabin alone can contribute up to 50% to the energetic demand of an electric vehicle in harsh environmental conditions. Both propulsion and auxiliary energy demand are highly dependent on individual usage of the vehicle. This dissertation develops and demonstrates a simulation based approach to derive daily energy demands of an electric commercial vehicle. This enables the identification of usage oriented battery capacities and costs. Novelties are usage of real driving data from specific use cases and simulation based estimation of all energetically relevant auxiliaries. The model calculates needed propulsion power based on driving resistance and the component efficiencies. HVAC power is estimated using a thermal cabin model and controller based models for cabin heating and cooling. Other auxiliaries' need of electric power are estimated by data-based efficiency maps. The validation of the model is carried out by applying real driving data of commercial electric vehicles of 2,3t and 3,9t gross vehicle weight throughout a timespan of several years or month respectively. The practical application of the method is outlined and discussed by evaluating the driving profile of an electrican's company in Berlin.

As a result the dissertation aims to answer these questions: How to deploy an electric vehicle in a certain use case and can it compete economically with a diesel powered vehicle? These applications are targeted:

- Assist commercial fleet operators with investment decisions regarding the propulsion of their vehicle fleet
- Assist dispatch decisions regarding daily operation of electric commercial vehicles
- Identify potential fields of application for electric commercial vehicles in order to address the global challenge to cut carbon emissions in the transport sector

The main results of this work are the following:

For estimation of electric vehicle's consumption propulsion and high voltage auxiliaries are most important. Low voltage auxiliaries also have an impact but can be regarded at on a simplified, aggregated level. The simulative approach proves to yield good results especially when analyzing extreme conditions (temperatures, speed, long driving time and distances) compared to simple statistic methods (univariate, linear regression). Additionally the total cost of ownership analysis shows that light duty electric vehicles, profiting from cost advances in the passenger car sector, can already today compete with conventional vehicles, given the current subsidy regime in Germany. This is true particularly for cases with a rationally dimensioned battery and constant high daily driving distances. Organizational measures to compensate for varying daily energetic demand offer a high potential to further increase usability of electric commercial vehicles. This can be flexibility in the dispatchment depending on energetic parameters or scheduling of recharging stops for electric commercial vehicle drivers. These measures could compensate for varying energetic demand due to i.e. load, whether, or trip-distance. Expected decrease in cost for electric vehicles (i.e. due to technical development, mass production) and increase in cost for conventional vehicles (i.e. due to emission regulation, toll, driving restrictions) will improve the feasibility of electric vehicles in the years to come. It can thus be expected that economic comparison with other emission free propulsion technologies will in the future become even more important than with the diesel technology.



Structure of this dissertation

1. Einleitung



Zur Führung des Leseflusses wird jedem Kapitel die in Abschnitt 1.3 erläuterte Struktur der Arbeit vorangestellt und das aktuelle Kapitel hervorgehoben.

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Auf europäischer Ebene ist der Treibhausgasausstoß insgesamt in den vergangenen Jahren rückläufig. Lediglich im Verkehrssektor ist dieser von 967 Mt im Jahr 1990 auf 1226 Mt CO₂-eq im Jahr 2016 sogar angestiegen. Analog gilt dies für Deutschland als größten Emittenten in Europa (EU transport in figures 2018, S. 125). Durch die Covid19-Pandemie und die damit einhergehenden Maßnahmen zur Reduktion der Virusverbreitung wurde im ersten Halbjahr Jahr 2020 ein beispielloser Rückgang der CO₂-Emissionen gegenüber dem Vorjahr weltweit von 8,8%, beim Landverkehr sogar von 18,6% festgestellt. Jedoch zeigt die Entwicklung im Sommer 2020 bereits, dass daraus keine nachhaltige Emissionsreduktion zu erwarten ist. Es wird im Gegenteil deutlich, wie groß die Herausforderungen einer nachhaltigen Emissionsreduktion zum Einhalten des 1,5°C-Ziels sind (Liu et al. 2020). Die Bundesregierung hat das Ziel von einer Mio. elektrischen Fahrzeugen im Jahr 2020 (Bundesregierung 2011, S. 10) und 7-10 Mio. im Jahr 2030 (Bundesregierung 2019, S. 76) auf Deutschlands Straßen ausgegeben. Während es zu Beginn der 2010er-Jahre kaum Elektrofahrzeuge in den Markt geschafft haben (Focus 2014), nimmt die Dynamik aktuell mit Inkrafttreten der aktuellen CO₂-Regulierung in der EU und durch Kaufanreizsysteme deutlich zu, sodass im ersten Halbjahr 2020 die Pkw-Neuzulassungen extern aufladbarer Elektrofahrzeuge (vollelektrisch und plug-in-hybrid) auf 8,1% gestiegen sind (Transport and Environment 2020, S. 36). In Deutschland lag der Anteil im Oktober 2020 sogar bereits bei 8,4% vollelektrischen und 9,1% plug-in-hybriden Modellen (Kraftfahr-Bundesamt 2020). Die CO₂-Emissionen im Verkehr sind in den nächsten Jahren deutlich zu reduzieren, sowohl im Pkw- (Bundesregierung 2019, S. 62) wie auch im Lkw-Bereich (Europäisches Parlament 2019). Auch wenn die Priorisierung insgesamt noch umstritten ist, setzen erste

Fahrzeugherstellfirmen mit klaren Bekenntnissen auf die Batterie-Elektromobilität als zentralen Baustein für die Mobilitätswende (Mohaupt 2019; Sorge 2019).

Dass Elektrofahrzeuge trotz aktuell steigender Zulassungszahlen im Vergleich mit konventionellen Fahrzeugen eine noch geringe Verbreitung aufweisen, hat mehrere Gründe (Schönfelder et al. 2009, S. 378; Hanselka und Jöckel 2010, S. 26; Kampker et al. 2018, 16ff). Hierzu gehören vor allem:

- Anschaffungsinvestition: Elektrofahrzeuge sind im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen in der Anschaffung vor allem aufgrund der hohen Batteriekosten deutlich teurer. Dies hindert insbesondere Nutzende, bei denen die Anschaffungskosten z.B. aufgrund geringer Jahresfahrleistung einen Großteil der Mobilitätskosten ausmachen, die Elektromobilität für sich in Erwägung zu ziehen.
- 2) Infrastruktur: Der Zugang zu Ladepunkten stellt ein weiteres Hemmnis für die Elektromobilität dar. Die öffentliche Ladeinfrastruktur ist noch nicht ausreichend ausgebaut und das Roaming unter den Anbietenden funktioniert nur teilweise. Die Möglichkeit einer eigenen Ladeeinrichtung ist zudem nicht immer gegeben und mit weiteren Kosten verbunden.
- 3) Reichweite: Aufgrund der deutlich geringeren Energiedichte heutiger Batterien im Vergleich mit konventionellem Kraftstoff ist die Reichweite von am Markt befindlichen Elektrofahrzeugen beschränkt. Diese Reichweite ist für einen Großteil der täglich zu bewältigenden Strecken zwar ausreichend, doch stößt die Elektromobilität noch oft auf Ablehnung. Dies begründet sich insbesondere durch Ungewissheit über die tatsächliche verfügbare und benötigte Reichweite (Reichweitenangst / range-anxiety, vgl. Eberle und Helmolt 2010; Franke et al. 2012) sowie den Bedarf an wenigen Tagen im Jahr größere Distanzen, z.B. für Urlaub oder Geschäftsreisen, zurückzulegen.
- 4) Fahrzeugverfügbarkeit: Im Pkw-Bereich steigt die Zahl der erhältlichen Modelle aktuell bereits deutlich an. Praktisch alle Herstellfirmen bieten elektrische Fahrzeugmodelle an, liegen aber in der Modellvielfalt noch unter der für konventionelle Fahrzeuge (z.B. BMW, Mitsubishi, Renault, Volkswagen) Ausnahmen bilden reine Elektrofahrzeugunternehmen wie Tesla. Im Nutzfahrzeugbereich ist das im Jahr 2020 am Markt verfügbare Angebot bei leichten Nutzfahrzeugen auf wenige Modelle großer OEM (z.B. Renault Kangoo, Volkswagen E-Crafter, SAIC Maxus EV80, Mercedes Benz e-Sprinter) oder kleinere Unternehmen (z.B. Goupil, Streetscooter), sowie bei schweren Nutzfahrzeugen weitgehend auf umgerüstete Fahrzeuge (z.B. EFORCE, Framo, Futuricum, Emoss, Orten) beschränkt (s. Abschnitt 2.6).

Trotz dieser Hindernisse besteht ein gesellschaftliches und politisches Interesse an der beschleunigten Verbreitung der Elektromobilität (Bundesregierung 2011, S. 10). In allen vier Aspekten konnten in den letzten Monaten und Jahren bereits deutliche Fortschritte erzielt werden. Jedoch werden erst mit nochmals stärker zunehmender Nachfrage nach Elektrofahrzeugen und steigenden Produktionszahlen zum einen weitere Reduktionen der Kosten, sowie zum anderen die Weiterentwicklung der Batterietechnologie und damit der Reichweite erwartet. Neben der gezielten Förderung bei der Anschaffung von Elektrofahrzeugen im Einzelfall ist daher die Identifikation von bereits heute potenziell wirtschaftlich attraktiven Einsatzbereichen für Elektrofahrzeuge von zentraler Bedeutung.

Ein wirtschaftlicher Betrieb eines Elektrofahrzeugs ist nur möglich, wenn die hohen Anfangsinvestitionen durch die beim Elektrofahrzeug geringeren Betriebskosten kompensiert werden können. In diesem Spannungsfeld ist der Energiegehalt der Batterie ausschlaggebend, da die Batterie eines Elektrofahrzeugs einen Großteil des Anschaffungspreises ausmacht, sie gleichzeitig maßgeblich für die Reichweite und damit die Einsatzmöglichkeiten des Fahrzeugs ist. Daher ist die richtige Dimensionierung der Batterie am nutzungsspezifischen Einsatzfall ein zentraler Erfolgsfaktor für den wirtschaftlichen Einsatz der Elektromobilität (z.B. Mareev et al. 2018).

Etwa 80% der 2008 gefahrenen Personen-Kilometer in Deutschland entstehen durch private Nutzung wie Freizeit, Einkäufe, Erledigungen, Begleitungen und Arbeits- bzw. Ausbildungswege (Follmer et al. 2010, S. 29). Zahlreiche bisherige Projekte zur Marktgängigkeit von Elektrofahrzeugen fokussieren daher aufgrund der besseren Verfügbarkeit im Pkw-Sektor auf Privatnutzer (Linssen et al. 2012, S. 25). Auf EU-28-Ebene bestreiten Pkw 61% der Treibhausgasemissionen im Straßenverkehr, Nutzfahrzeuge und Busse 38%. Der Anstieg fällt dabei bei den leichten Nutzfahrzeugen mit +52% von 1990 bis 2015 am größten aus (EU transport in figures 2018, S. 138–139). Kommerzielle Fahrzeugflotten, insbesondere im städtischen Wirtschaftsverkehr mit leichten und mittelschweren Nutzfahrzeugen, bilden daher eine weitere für die Emissionsreduktion sehr relevante Gruppe. Dies gilt umso mehr, da hier Verkehrsleistung und Emissionen stark zunehmen und aufgrund des Flottencharakters der verfügbare Fuhrpark gezielt den Voraussetzungen der Elektromobilität angepasst werden kann (Orner 2017, S. 25; Hüttl et al. 2010, S. 51).

Im konventionell angetriebenen Fahrzeug steht durch den Verbrennungsprozess in der Antriebseinheit eine große Menge thermischer Energie zur Verfügung, die beim Thermomanagement und für die Innenraumheizung Verwendung findet. Außerdem werden andere Nebenaggregate (NA) zum Teil direkt mechanisch an den Verbrennungsmotor gekoppelt und so mit Energie versorgt. Beim Elektrofahrzeug herrschen aufgrund des Wegfalls der Verbrennungsabwärme und bedingt durch den Motorstillstand beim stehenden Fahrzeug andere Voraussetzungen. Hier muss neben der Fahrenergie auch die Energie für alle NA der Traktionsbatterie entnommen werden. Insbesondere für das Heizen der Fahrerkabine besteht ein erheblicher Heizleistungsbedarf in Abhängigkeit der Außentemperatur. Den Einfluss des Heiz- und Klimasystems (HVAC), das unter auch in Deutschland vorkommenden, kalten Umgebungsbedingungen über 50% der gespeicherten Energie verbrauchen kann (Renner und Koppe 2010, S. 160–162; TÜV SÜD 2010), verdeutlicht Abbildung 1-1, in der die erzielten Reichweiten einiger Elektrofahrzeuge in Abhängigkeit von der Außentemperatur aufgetragen sind. Insbesondere im Nutzfahrzeugbereich sind zudem weitere NA an Bord wie z.B. Hydrauliksysteme, zusätzliche Kühlsysteme, Hebevorrichtungen, oder Pressen, die einen hohen Energiebedarf besitzen können und deren Berücksichtigung für eine wirtschaftlich optimale Auslegung der Fahrzeugbatterie zusätzlich relevant ist.





Abbildung 1-1: Reichweiten ausgewählter BEV (Linssen et al. 2012, S. 45)

Unter realen Bedingungen führt der Betrieb von Nebenaggregaten wie Klimakompressor und elektrischer Heizung, aber auch z.B. Lenkunterstützung, Bremsunterstützung, Licht, Batteriekühlung oder Luftkompressor zu einem Mehrverbrauch von Energie (Lunanova 2009, S. 275; Wallentowitz und Freialdenhoven 2011, S. 126–127). Dieser ist von den individuellen Nutzungsbedingungen abhängig. Damit entsteht der Bedarf jenseits von Standardverbräuchen und Reichweiten, nutzungsindividuelle Reichweiten zu bestimmen und in Entscheidungsprozesse einfließen zu lassen. Methoden der Fahrerverhaltensforschung bieten über den Rahmen der direkten Fahrtätigkeit hinaus das Potenzial, individuelles Fahr- und Nutzungsverhalten zu analysieren und Rückschlüsse auf sicherheitsrelevante, ökologische und ökonomische Aspekte zu ziehen (FOTNET 2014, S. 4ff; Sagberg und et al. 2011, S. 18). Dies ermöglicht Aussagen über die Abhängigkeit des Energieverbrauchs vom jeweiligen Nutzungsverhalten. Damit lassen sich Nutzungsparameter identifizieren, die relevanten Einfluss auf den Energieverbrauch des Fahrzeugs haben. Dies ermöglicht einerseits die Energieverbrauchsprognose in Abhängigkeit der identifizierten Parameter bei vorgegebener Fahrzeugnutzung. Andererseits erlaubt es, zwecks Reichweitenverlängerung oder Kostenoptimierung gezielt den Einfluss von Nutzungsanpassungen quantitativ zu bewerten. Zusammenfassend ergibt sich der Bedarf einer nutzungsindividuellen Energieverbrauchsprognose für elektrische Nutzfahrzeuge aus den folgenden Überlegungen:

- Nutzfahrzeuge stellen eine wachsende, in Bezug auf Elektromobilität und Emissionsreduktionspotenzial noch nicht ausreichend betrachtete Fahrzeuggruppe dar.
- Der Realverbrauch des Gesamtsystems Elektrofahrzeug liegt regelmäßig über den Normverbräuchen und hängt stark von der individuellen Nutzung ab. Diese Diskrepanz führt

in Verbindung mit Reichweitenangst zu Verunsicherungen beim Einstieg in die Elektromobilität.

• Zur Verringerung dieser Verunsicherung trägt die Kenntnis von realitätsnahen, täglich variierenden Verbräuchen, insbesondere in Abhängigkeit vom individuellen Nutzungsprofil und den jeweiligen Umgebungsbedingungen, bei.

Die Kenntnis des nutzungsindividuellen Energiebedarfs eines Elektrofahrzeugs kann in folgenden Situationen unterstützend wirken:

- Investitionsentscheidungen: Welche Fahrleistungen kann ein bestimmtes Fahrzeug unter bestimmten Bedingungen erreichen? Welches gesamtwirtschaftliche Potenzial ist damit verbunden?
- Dispositionsentscheidungen: Wie ist ein bestimmtes Fahrzeug unter bestimmten Randbedingungen sinnvoll einzusetzen? Welche Touren sollte es aufgrund der prognostizierten Rahmenbedingungen übernehmen? Welche Effekte haben verfügbare Handlungsoptionen bei der Disposition (z.B. Nutzlastanpassung, Tourenreihenfolge, Zwischenladungsstopps, Fahrzeiten, Fahrzeugwechsel, Anpassung Komfortfunktionen)?
- Echtzeitprognose für **Reaktionsentscheidungen** bei sich kurzfristig während einer Fahrt ändernden Bedingungen, z.B. Stau, Zusatzaufträge, Defekte, Wetterumschwung, besetzte Ladeinfrastruktur): Welche Optionen existieren, um eine Tour sicher zu beenden? Welche Auswirkungen ergeben sich jeweils?

1.2 Forschungsbedarf und Zielsetzung

Neben dem Antriebsstrang, spielen die NA im Elektrofahrzeug eine zentrale Rolle bei der energetischen Betrachtung. Bei der energetischen Optimierung von konventionellen Fahrzeugen spielen die NA dagegen bisher eine untergeordnete Rolle. Dies liegt zum einen daran, dass insbesondere leistungsstarke Nebenaggregate im Allgemeinen direkt mechanisch oder thermisch durch den Verbrennungsmotor angetrieben werden (Braess und Seiffert 2011, S. 183–184). Diese Energien stehen ausreichend zur Verfügung und der Verlust an Reichweite durch den Mehrverbrauch stellt im konventionellen Fahrzeug aufgrund der hohen Energiedichte im Energiespeicher keine Einschränkung der Verwendbarkeit dar. Zudem finden energieintensive NA wie die Kabinenheizung bei der Ermittlung von Normverbräuchen keine Berücksichtigung. Die Optimierung von NA im konventionellen Fahrzeug beschäftigt sich damit stärker mit Package- und Sicherheits-Aspekten als mit Energieeffizienz.

Daher wurden zur energetischen Optimierung und simulationsgestützten Abbildung der NA im Fahrzeug bisher nur geringe Anstrengungen unternommen. In den bestehenden Modellen zum Zwecke der mit Sicherheiten behafteten Komponenten- und Systemauslegung wird der Energiebedarf von NA als "worst-case-Szenario" mit maximaler Leistungsaufnahme modelliert (Lunanova 2009, 1, 25). Bei Anwendung dieser Modelle für Verbrauchsberechnungen werden nutzungsindividuelle Faktoren, die auf den NA-Energieverbrauch wirken, nicht berücksichtigt. Diese "worst-case"-Betrachtung des NA-Energieverbrauchs kann daher zu einer Überdimensionierung des Energiespeichers führen. Da die Traktionsbatterie der größte Kostentreiber im Elektrofahrzeug ist, führt die Überdimensionierung zur Zunahme der Kosten (Linssen et al. 2012, S. 246). Gleichzeitig verschlechtert sich der ökologische Fußabdruck des Elektrofahrzeugs durch erhöhten Ressourcenverbrauch bei der Batterieherstellung und die Zunahme des Fahrzeuggewichts.

Sinnvoll erscheint daher die Auslegung der Batterie und damit der Reichweite an spezifischen Nutzungserfordernissen, die reale Fahr- und Umgebungsbedingungen abbilden. Gleichzeitig erwarten Nutzende eine genaue und zuverlässige Prognose des Energieverbrauchs bzw. der Reichweite (Hüttl et al. 2010, S. 45). Hierzu eignen sich besonders simulationsgestützte Ansätze. Aus dieser Situation abgeleitet, ergeben sich folgende Forschungsfragen, die in dieser Dissertation bearbeitet werden:

- 1. Wie setzt sich der Energieverbrauch im eNfz zusammen und welches sind die relevanten Verbraucher?
- 2. Wie genau lässt sich der Energieverbrauch für Antrieb und NA eines elektrischen Nutzfahrzeugs für spezifische Einsatzprofile mithilfe eines Simulationsmodells bestimmen?
- 3. Wie lässt sich die optimale Batteriekapazität für ein spezifisches Nutzungsprofil bestimmen?
- 4. Wie ist die entwickelte Methodik in der Praxis anzuwenden?

Aus den Forschungsfragen werden direkt die zentralen Ziele für die vorliegende Dissertation abgeleitet:

- 1. Identifikation und Beschreibung der energetisch relevanten Verbraucher im eNfz
- 2. Erstellung und Validierung eines Gesamtfahrzeug-Energieverbrauchsmodells für eNfz unter Berücksichtigung der energetisch relevanten Verbraucher und Einflussfaktoren
- 3. Ableitung der wirtschaftlich optimalen Batteriekapazität für ein vorliegendes Nutzungsprofil unter Berücksichtigung des Gesamtenergieverbrauchs im eNfz
- 4. Anwendung der entwickelten Methodik anhand eines Praxisbeispiels und Bewertung, ob ein vorliegendes Nutzungsprofil grundsätzlich für den Einsatz von eNfz geeignet erscheint

1.3 Aufbau der Arbeit und Vorgehen

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in 5 Kapitel, deren Struktur in Abbildung 1-2 dargestellt ist und die im Folgenden kurz beschrieben wird.



Abbildung 1-2: Aufbau der Arbeit

Ausgangssituation, Zielsetzung, Forschungsfragen (Einleitung)

Das aktuelle Kapitel leitet die Arbeit ein. Es beschreibt neben der Ausgangssituation den Forschungsbedarf und die Zielsetzung und erläutert die Struktur dieser Dissertation.

Stand von Wissenschaft und Technik

Das zweite Kapitel fasst die Grundlagen für die technischen und wirtschaftlichen Betrachtungen in der Arbeit zusammen. Zunächst sind relevante Aspekte von Elektro- und Nutzfahrzeugen zusammengestellt. Detailliert wird insbesondere erörtert, welche Ansätze zur Energieverbrauchsprognose bei elektrischen Nutzfahrzeugen für reale Einsatzfälle in der Literatur existieren und welche Komponenten die energetisch relevanten Verbraucher im eNfz sind. Im Anschluss folgen Grundlagen für Berechnung und Simulation von Energieverbräuchen im Elektronutzfahrzeug und für die Verwendung von Sekundärdaten. Es folgt ein Abschnitt mit den grundlegenden Überlegungen für den wirtschaftlichen Vergleich von elektrischen und konventionellen Nutzfahrzeugen auf Gesamtkostenbasis und die Einführung der Methode zur Bestimmung der gesamtkostenoptimalen Traktionsbatterie. Abschließend sind aktuell verfügbare und in Entwicklung befindliche elektrische Nutzfahrzeuge zusammengestellt.

Energetische Simulation von elektrischen Nutzfahrzeugen

Dieses Kapitel beschreibt Struktur und mathematischen Aufbau des Modells der entwickelten numerischen Simulation von Fahr- und NA-Energiebedarf anhand von Nutzungs-, Fahrzeug- und Umgebungsparametern. Hierbei liegt der Fokus in der energetischen Beschreibung der relevanten Nebenverbraucher, vor allem der Heizung. Abschließend wird das Modell anhand von zwei Fahrzeug-Nutzungs-Kombinationen validiert. Dazu werden zwei Datensätze herangezogen. Zunächst werden die Daten aus einem Flottenversuch mit 20 Volkswagen e-Caddy mit zulässigem Gesamtgewicht von 2,3t verwendet. Anschließend wird das Modell bezüglich der im Rahmen des Forschungsprojekts EN-WIN mit einem Transporter vom Typ SAIC Maxus EV80 mit zulässigem Gesamtgewicht von 3,9t aufgezeichneten Nutzungsdaten ausgewertet.

Praktische Anwendung

Anhand eines Anwendungsfalls aus dem Handwerk wird die Anwendung der entwickelten Methode verdeutlicht. Dies umfasst den Einsatz des validierten leichten eNfz-Energiemodells auf ein real erfasstes Profil, die praktische und wirtschaftliche Bewertung und abschließend die Berechnung der für den Anwendungsfall optimalen Kapazität der Traktionsbatterie.

Diskussion, Zusammenfassung und Perspektiven

Die Arbeit schließt mit der zusammenfassenden Beantwortung der Forschungsfragen, einer Diskussion und Einordnung der Ergebnisse, sowie einem Ausblick für den Anschluss weiterer wissenschaftlicher Arbeiten und der Anwendung in der Praxis.

1.4 Forschungsprojekt EN-WIN

Das Forschungsprojekt Elektromobile Nutzfahrzeuge wirtschaftlich und nachhaltig einsetzen (EN-WIN) wurde von 2017 bis 2020 im Rahmen des Programms "Erneuerbar Mobil" vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit gefördert (Förderkennzeichen 16EM3118-2). Neben dem Fachgebiet Fahrerverhaltensbeobachtung für energetische Optimierung und Unfallvermeidung der Technische Universität Berlin (FVB) waren das Fraunhofer Institut für Materialflusstechnik und Logistik als Konsortialführer, der Fachbereich Logistik der Hochschule Fulda, die Florida-Eis Manufaktur GmbH, die Ludwig Meyer GmbH & Co. KG und die BPW Gruppe beteiligte Partner.

Als Teil dieses Projekts wurden das Fahrzeug-Energiesimulationsmodell weiterentwickelt und Nutzungsdaten von elektrischen und konventionellen Gefördert durch:



Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



Nutzfahrzeugen über CAN-Datenlogger im Realbetrieb aufgezeichnet. In dieser Arbeit werden Daten des SAIC Maxus EV80 mit zulässigem Gesamtgewicht von 3,9t ausgewertet und verwendet, um die Übertragbarkeit des Energiesimulationsmodells auf eine weitere Fahrzeugklasse zu bewerten. Darüber hinaus wurden im Projekt EN-WIN umfangreiche Kostendaten zu den betrachteten Fahrzeugen erhoben, um elektrische und konventionelle Nutzfahrzeuge auf Basis der Gesamtkosten über die Nutzungsdauer vergleichbar zu machen (Jerratsch et al. 2020).
2. Stand von Wissenschaft und Technik



2.1 Elektromobilität

Die Alltagstauglichkeit der Elektromobilität wird seit Jahren kontrovers diskutiert. Das Grundkonzept ist bereits so alt wie das Automobil selbst. Trotzdem konnten sich Elektrofahrzeuge lange Zeit nur in geringem Umfang gegen die Konkurrenz mit Verbrennungsmotoren durchsetzen (Hofmann 2014, S. 7).

Aufgrund der vergleichsweise geringen Umweltbeeinträchtigung (Doppelbauer 2020b, S. 7) und politischer Unterstützung erlebt die Elektromobilität derzeit einen deutlichen Anstieg bei Nachfrage und Absatz. Dies lässt sich auf die immer schärfer werdenden Regulierungen der lokalen Emissionen von Fahrzeugen und den stärker ins Bewusstsein rückenden Klimawandel zurückführen. In den vergangenen Jahren konnten technologisch und kostenseitig große Fortschritte erzielt werden. Ferner wirken sich Ressourcenknappheit und gesteigerte Kundenanforderungen auf die steigende Nachfrage nach Elektrofahrzeugen aus (Wallentowitz und Freialdenhoven 2011, 3ff).

Die Anzahl der zugelassenen Elektroautos nimmt weltweit aktuell entsprechend stark zu (Abbildung 2-1).



Abbildung 2-1: Anzahl weltweit zugelassener Elektrofahrzeuge (International Energy Agency 2020, S. 11)

Dennoch bestehen auch weiterhin wesentliche Hemmnisse bei der Verbreitung der Elektromobilität. Dies sind vor allem die noch hohen Anschaffungskosten, die begrenzte Reichweite und die Abhängigkeit von wenig verbreiteter Ladeinfrastruktur, sowie die Dauer des Ladevorgangs (Karle 2015, S. 23–24). Vorteilhaft sind die geringen Betriebskosten und die geringen lokalen Emissionen (Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 2013, S. 2). Die folgenden Absätze tragen die für das Verständnis dieser Dissertation zentralen Aspekte zum Elektrofahrzeug zusammen. Als vertiefende Literatur zum Elektrofahrzeug allgemein und aktuelle Entwicklungen wird auf einschlägige Literatur verwiesen (z.B. Hacker und Kasten 2017; Hanselka und Jöckel 2010; Hüttl et al. 2010; Karle 2015; Füßel 2017; Kampker et al. 2018; Pokojski 2019; International Energy Agency 2020; Doppelbauer 2020a).

Abgrenzungen zum Begriff des elektrischen Nutzfahrzeugs

Im allgemeinen Sprachgebrauch wird die Elektromobilität oft auf batterieelektrische Personenkraftfahrzeuge bezogen. Im weiteren Sinne bezeichnet die Elektromobilität jedoch die Gesamtheit aller Antriebsformen und Fahrzeuge, die sich zumindest teilweise eines elektrischen Antriebs bedienen. Bei Beschränkung auf den Straßenverkehr können hierzu fahrzeugseitig neben den Pkw, auch Krafträder, Leichtfahrzeuge, Nutzfahrzeuge oder Busse gehören. Antriebsseitig sind neben den rein batterieelektrisch angetriebenen Fahrzeugen auch die Hybride (Micro-, Mild-, Voll-, Plug-In-Hybrid) und der Brennstoffzellen-Antrieb der Elektromobilität zuzurechnen (Karle 2015, S. 26, 30). Die Analysen dieser Dissertation befassen sich ausschließlich mit dem batterieelektrischen Nutzfahrzeug. Aufgrund der Ähnlichkeit der hier im Fokus stehenden leichten Nutzfahrzeuge zu Pkw, wird an Stellen, wo keine expliziten Informationen und Werte zu eNfz verfügbar sind, auf verfügbare Daten für Pkw zurückgegriffen. Eine Übertragung auf andere Fahrzeug- und Antriebsformen der Elektromobilität im Straßenverkehr erscheint grundsätzlich in vielen Fällen möglich.

2.1.1 Bauformen

Bei der Entwicklung von Elektrofahrzeugen durch etablierte Hersteller wird zwischen eines eigens für den elektrischen Antrieb entwickelten Fahrzeugs (purpose design) und eines von einem konventionellen Fahrzeug abgeleiteten (conversion design) unterschieden. Die Vorteile des purpose design liegen dabei auf der höheren Anzahl an Freiheitsgraden zur technischen, ergonomischen und wirtschaftlichen Optimierung des Gesamtfahrzeugs für die Elektromobilitätsanwendung. Zwecke bei der Entwicklung von conversion design ist das Einsparen von Entwicklungskosten, die Verwendung von Gleichteilen mit konventionellen Fahrzeugen, die Integration von Hybridvarianten und die Beibehaltung von etablierten Prozessen oder die Mischfertigung von elektrischen, hybriden und konventionellen Fahrzeugen auf einer Produktionslinie (Karle 2015, S. 18–20; Wallentowitz und Freialdenhoven 2011, S. 159–160).

Während in der ersten Hälfte der 2010er Jahre bei Pkw meist das conversion design auf Grund der geringen Stückzahlen bei den großen Fahrzeugherstellern favorisiert wurde, setzt sich aktuell mit erwarteten höheren Stückzahlen verstärkt das purpose design durch (z.B. Tesla, Volkswagen ID-Serie). Im Nutzfahrzeugbereich steht dieser Schritt mit wenigen Ausnahmen noch bevor. Das conversion design dominiert die noch geringe Modellvielfalt am Markt in allen Klassen (vgl. Abschnitt 2.6 bzw. Anhang A). Vor allem neue Wettbewerber haben erste purpose-design-Fahrzeuge im Angebot (z.B. Streetscooter Work) oder kündigen diese an (z.B. Tesla Semi, Nikola Tre). Aus Gründen der Verfügbarkeit befassen sich die Analysen von Realdaten dieser Dissertation mit conversion-design-eNfz.

2.1.2 Elektrischer Antriebsstrang

Der Fahrzeugantrieb stellt den zentralen Energieverbraucher im Elektrofahrzeug dar. Zentral für den Energieverbrauch ist der Wirkungsgrad η des Antriebstrangs bzw. seiner Komponenten. Diese sind Traktionsbatterie, Leistungselektronik, Elektromotor und Getriebe. Tabelle 2.1 fasst gängige Werte für diese Komponenten zusammen.

Komponente	η_{min}	η_{max}
Batterie	92%	96%
Leistungselektronik	95%	97%
Schaltgetriebe	80%	95%
Getriebe mit fester Übersetzung	93%	98%
Differenzial	92%	98%
Elektromotor	87%	95%

Tabelle 2.1: Richtwerte für Wirkungsgrade der Antriebskomponenten (Tschöke 2015, S. 39)

Der Wirkungsgrad der elektrischen Maschine hängt von der Bauform ab. Am unteren Ende liegen die Asynchronmaschinen, am oberen die permanent erregten Synchronmaschinen. Effiziente elektrische Antriebstränge verzichten auf Schaltgetriebe, lediglich fest-übersetzte bzw. Differentialgetriebe finden Verwendung. Damit ergeben sich mittlere Gesamtwirkungsgrade im Bereich von 77% (Komarnicki et al. 2018b, S. 48) bis deutlich über 80% (Tschöke 2015, S. 38–39), je nach Komponenten und Fahranforderungen. Die vorliegende Arbeit untersucht die Wirkungsgrade nochmals allgemein im Abschnitt 2.3.2.7 sowie fahrzeugspezifisch in 3.5.3.

2.1.3 Nebenverbraucher von Elektrofahrzeugen

Neben dem zur Bewegung des Kraftfahrzeugs nötigen Antriebsstrang existiert in modernen Fahrzeugen eine Vielzahl an weiteren Systemen, die Energie für ihre jeweilige Funktion benötigen. Beim Elektrofahrzeug kommt diese Energie grundsätzlich aus der Traktionsbatterie. Damit beeinflusst dieser Energiebedarf auch die Reichweite. Zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage sind daher die aus energetischer Sicht relevanten Nebenaggregate zu identifizieren. Für Elektrofahrzeuge können die Nebenaggregate in Anlehnung an Köll et al. 2011, S. 27 wie in Abbildung 2-2 dargestellt in folgende Gruppen eingeteilt werden (vgl. auch Basshuysen und Schäfer 2017, 512ff; Haupt 2013, S. 16–18):

- 1. Elektrische Fahrhilfen und Sicherheitskomponenten wie Servolenkung, Assistenzsysteme und Beleuchtung
- 2. Motor-Hilfsaggregate an der Antriebsmaschine wie Kühlerventilator und Motorsteuergerät
- 3. HVAC-Komponenten wie Heizung, Klimakompressor, Wasserpumpe, Gebläse
- 4. Komfortkomponenten wie Infotainment, Sitz-/Lenkradheizung, Scheibenheizung
- 5. Nutzfahrzeugspezifische Verbraucher wie Ladebordwand, Laderaumtemperierung

1	2	3	4	5
El. Fahrhilfen, Sicherheit • eBKV • Wischer • Licht • Hupe • EPS • ABS /ESC	Motor- Hilfsaggregate • Kühlergebläse • Motorsteuerung	HVAC • PTC • EKK • Wasserpumpe • Gebläse innen	Komfort, Infotainment • Scheibenheizung • Schiebedach • Sitz-/Lenkrad- heizung • Sitzsteller • Fensterheber • Tür-/Klappen- öffner • Leuchten und Instrumente • Spiegelsteller • Navigation/Radio	Nfz-spezifisch • Kältemaschine • Ladebordwand

Gruppierung von Nebenverbrauchern

Abbildung 2-2:Übersicht zur Einteilung von Nebenverbrauchern im Elektrofahrzeug (in Anlehnung an Köll et al. 2011, S. 27)

Um insbesondere Sicherheits-, aber auch Komfortfunktionen in allen Betriebssituationen (z.B. bei Stillstand von Fahrzeug und Motor) effizient bereitstellen zu können, sind die Nebenverbraucher im Elektrofahrzeug grundsätzlich elektrisch angetrieben, anders als in konventionellen Fahrzeugen (Hofmann 2014, S. 273). Ferner lassen sich Nebenverbraucher im Elektrofahrzeug unterscheiden nach dem Anschluss an das Hochvoltnetz (HV) bzw. Niedervoltnetz (NV).

2.1.3.1 Bewertung der Energieverbräuche von Nebenverbrauchern

Um festzulegen, welche Nebenverbraucher relevant bei der Bestimmung des Gesamtenergiebedarfs eines elektrischen Kraftfahrzeugs sind, wird die mittlere und maximale Leistung betrachtet. Grundsätzlich ist dabei zwischen Dauer-, Langzeit- und Kurzzeitverbrauchern zu unterscheiden (Reif 2011, S. 441). Eine Literaturrecherche ergab dabei die in Tabelle 2.2 zusammengestellten Ergebnisse. Die mittleren Leistungen mit *-Kennzeichnung wurden hierbei aus den recherchierten Extremwerten abgeleitet.

Kat Nr.	Kategorie	Verbraucher	P [W] (mittel)	P [W] (max)	Einschalt- dauer	Span- nung	Quelle
1	Elektrische Fahrhilfen, Sicherheit	Elektrischer Bremskraft- verstärker (eBKV)	200	1500	kurz	NV	Wallentowitz und Freialdenhoven 2011, S. 127; Köll et al. 2011, S. 56; Komarnicki et al. 2018a, S. 54; Wallentowitz und Reif 2006, S. 303
1	Elektrische Fahrhilfen, Sicherheit	Scheiben- wischer (Front)	115*	150	lang	NV	Büchner 2008, S.8
1	Elektrische Fahrhilfen, Sicherheit	Fernlicht	112	140	lang	NV	Köll et al. 2011, S. 56; Büchner 2008, S.8
1	Elektrische Fahrhilfen, Sicherheit	Abblendlicht	100	120	lang	NV	Köll et al. 2011, S. 56; Büchner 2008, S.8
1	Elektrische Fahrhilfen, Sicherheit	Nebel- scheinwerfer	85		lang	NV	Köll et al. 2011, S. 56
1	Elektrische Fahrhilfen, Sicherheit	Scheiben- waschanlage	75*	100	kurz	NV	Büchner 2008, S.8
1	Elektrische Fahrhilfen, Sicherheit	Hupe / Fanfare	70*	80	kurz	NV	Büchner 2008, S.8
1	Elektrische Fahrhilfen, Sicherheit	Scheibenwischer (Heck)	47,5*	65	kurz	NV	Büchner 2008, S.8
1	Elektrische Fahrhilfen, Sicherheit	Nebelschluss- leuchte	44		lang	NV	Köll et al. 2011, S. 56

Kat	Kategorie	Verbraucher	P [W]	P [W]	Einschalt-	Span-	Ouelle
Nr.	maregorie		(mittel)	(max)	dauer	nung	Quene
1	Elektrische Fahrhilfen, Sicherheit	Servolenkung elektrisch (EPS)	10 bis 100*	2000	kurz	NV	Wallentowitz und Freialdenhoven 2011, S. 127; Reif et al. 2012, S. 288; Komarnicki et al. 2018a, S. 54
1	Elektrische Fahrhilfen, Sicherheit	Standlicht	26		dauer	NV	Köll et al. 2011, S. 56
1	Elektrische Fahrhilfen, Sicherheit	Schluss- und Kennzeichen- leuchte	25	30	lang	NV	Reif 2011, S. 441
1	Elektrische Fahrhilfen, Sicherheit	Blinklicht	24		kurz	NV	Köll et al. 2011, S. 56
1	Elektrische Fahrhilfen, Sicherheit	Bremslicht	22		kurz	NV	Köll et al. 2011, S. 56
1	Elektrische Fahrhilfen, Sicherheit	Rückfahr- scheinwerfer	20		kurz	NV	Büchner 2008, S. 8
1	Elektrische Fahrhilfen, Sicherheit	Innenraum- beleuchtung	15*	20	kurz	NV	Büchner 2008, S. 8
1	Elektrische Fahrhilfen, Sicherheit	ABS / ESC	600	600	kurz	NV	Heinemann 2007, S. 76
2	Motor-Hilfs- aggregate	Kühlergebläse	30	120	lang	NV	Reif 2011, S. 441
2	Motor-Hilfs- aggregate	Motorsteuerung	200*	300	dauer	NV	Büchner 2008, S. 8; Hesse 2011, S. 19
3	HVAC	Heizung (PTC)	3000*	6000	lang	HV	Beetz et al. 2010, S. 249
3	HVAC	elektrischer Klimakom- pressor (EKK)	2500	4000	lang	HV	Wallentowitz und Reif 2006, S. 303
3	HVAC	Wasserpumpe	300	300	dauer	NV	Heinemann 2007, S. 76;
3	HVAC	Innenraum- gebläse	50	120	lang	NV	Reif 2011, S. 441
4	Komfort, Infotainment	Frontscheiben- heizung	500	1000	lang	NV	Heinemann 2007, S. 76
4	Komfort, Infotainment	Heckscheiben- heizung	200	200	lang	NV	Büchner 2008, S. 8

Kat Nr.	Kategorie	Verbraucher	P [W] (mittel)	P [W] (max)	Einschalt- dauer	Span- nung	Quelle
4	Komfort, Infotainment	Schiebedach	175*	200	kurz	NV	Büchner 2008, S. 8
4	Komfort, Infotainment	Sitzheizung	150*	200	lang	NV	Büchner 2008, S. 8
4	Komfort, Infotainment	Fensterheber	150		kurz	NV	Büchner 2008, S. 8
4	Komfort, Infotainment	Sitzverstellung	125*	150	kurz	NV	Büchner 2008, S. 8
4	Komfort, Infotainment	Heckklappen- öffner	100		kurz	NV	Büchner 2008, S. 8
4	Komfort, Infotainment	Lenkradheizung	65*	80	lang	NV	Büchner 2008, S. 8
4	Komfort, Infotainment	Türöffner	30		kurz	NV	Büchner 2008, S. 8
4	Komfort, Infotainment	Kontrollleuchten und Instrumente	20	22	lang	NV	Reif 2011, S. 441
4	Komfort, Infotainment	Spiegel- verstellung	20		kurz	NV	Büchner 2008, S. 8
4	Komfort, Infotainment	Navigation	17,5*	20	dauer	NV	Büchner 2008, S. 8
4	Komfort, Infotainment	Radio		500	dauer	NV	Büchner 2008, S. 8
5	Nfz- spezifisch	Kältemaschine Laderaum	5000	12.000	lang	HV	Eigene Messung an 18t-Kühlfahrzeug
5	Nfz- spezifisch	Ladebordwand		4400	kurz	NV	Kott 2014, S. 48

Tabelle 2.2: Übersicht der Nebenaggregate im Elektrofahrzeug

Die Leistung der Dauerverbraucher kann, da sie wenig vom Nutzungsprofil abhängt, summarisch zusammengefasst und als konstant angesetzt werden. Für individuelle Fahrzeuge kann der Verbrauch entweder nach Abschalten aller Kurz- und Langzeitverbraucher vom Multifunktionsdisplay abgelesen oder genauer durch Leistungs- bzw. Strommessungen bestimmt werden. Zusätzlich ist das Einschaltverhalten zu berücksichtigen, um dem erhöhten Leistungsbedarf beim/nach dem Einschalten des Fahrzeugs gerecht zu werden (Reif 2011, S. 443). Kurzzeitverbraucher sind aufgrund ihrer geringen Einschaltdauer in der Regel aus energetischer Sicht nicht als relevant anzusehen, anders als bei einer leistungsbezogenen Betrachtung. Verdeutlicht wird dies nochmals im Abschnitt 2.1.3.4 am Beispiel der Ladebordwand. Aufgrund der hohen angegebenen Maximalleistungen werden die elektrische Servolenkung und der elektrische Bremskraftverstärker trotz der Einordnung als Kurzzeitverbraucher im Weiteren betrachtet.

Für die Energieverbrauchssimulation sind damit die Langzeitverbraucher mit höherer Leistung im Fokus. Im Folgenden werden daher die in der Tabelle fett gekennzeichneten Verbraucher mit über 500W mittlerer Leistung (Heizer, Klimakompressor, Frontscheibenheizung) sowie einige Nutzfahrzeug-spezifische Nebenaggregate betrachtet. Aus Sicherheits- und Effizienzgründen ist es in der Regel sinnvoll, genau die Komponenten mit hohem Leistungsbedarf an das HV-Bordnetz anzuschließen (Reif et al. 2012, S. 291). Durch diese energetisch motivierte Unterscheidung in HVund NV-Verbraucher können alle NV-Nebenverbraucher summarisch über die Leistung des NV-Bordnetz versorgenden Gleichspannungs-(DCDC-) Wandlers zusammengefasst berücksichtigt werden (Komarnicki et al. 2018a, S. 53).

Nach dieser energetischen Analyse werden nun im Folgenden die Nebenaggregate Heizer, Klimakompressor, ABS/ESC, EPS, eBKV, Frontscheibenheizung, Laderaumkühlung und Ladebordwand weiter untersucht. Damit wird zudem die erste Forschungsfrage beantwortet.

2.1.3.2 Heizung und Klimaanlage

Tabelle 2.2 zeigt den vielen Nutzer*innen von Elektrofahrzeugen bekannten, eingangs erwähnten und in der Literatur beschriebenen (Menken 2016, S. 3) Umstand, dass die HVAC-Anlage aus energetischer Sicht der mit Abstand bedeutendste Nebenverbraucher ist. Bei extremen Temperaturen kann der Energiebedarf in gleicher Höhe wie der des Antriebs liegen und damit die Reichweite stark beeinträchtigen. Hierbei ist zu beachten, dass der Energiebedarf der HVAC-Anlage in den schweren Nutzfahrzeugen mit steigendem Fahrleistungsbedarf relativ geringer als beim Pkw ausfällt (Mareev et al. 2018, S. 13).

Heizung

Aufgrund der hohen Effizienz im Antriebsstrang von in der Regel über 80% steht beim Elektrofahrzeug anders als bei verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeug nicht ausreichend Abwärme zum Heizen der Fahrgastkabine zur Verfügung (Jung et al. 2011, S. 397; Kampker et al. 2018, S. 361–362). Aus diesem Grund werden elektrische Heizungen verbaut. Weit verbreitet kommen Kaltleiter-(PTC-) Heizelemente zum Einsatz, die elektrische Leistung in Wärme wandeln und entweder direkt oder über einen zwischengeschalteten Wasserkreis und einen Heizungswärmetauscher die in den Fahrgastraum einströmende Luft erwärmen. Zur Energieeinsparung kann alternativ auch ein Wärmepumpensystem verwendet werden, das den Klimakreislauf und Umgebungswärme nutzt. Hierdurch kann die elektrische Heizleistung im Mittel um ca. 50% gesenkt und damit der Reichweitenverlust durch Heizen in etwa halbiert werden (Jung et al. 2011, S. 400; Drage et al. 2017, S. 48; Westerloh 2019, 14ff).

Klimaanlage

Aktuelle Fahrzeugklimaanlagen basieren im Normalfall auf einstufigen Kompressionskälteanlagen mit thermostatischem Expansionsventil. Im Verbrauchsmodell, das dieser Dissertation zugrunde liegt, wurde auch diese Bauform betrachtet. Neben der sensiblen Wärme ist im Klimatisierungsbetrieb auch die latente Wärme zu berücksichtigen. In Abbildung 2-3 ist beispielhaft für konstante Umgebungsbedingungen der Kühlleistungsbedarf für ein Pkw der Kompaktklasse in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte der Außenluft und konstanten Temperatur- und Strahlungsverhältnissen abgebildet. Dabei wird deutlich, dass eine hohe Luftfeuchtigkeit im Klimabetrieb den Energieverbrauch stark ansteigen lassen kann.



Abbildung 2-3: Leistungsbedarf zum stationären Kühlen des Fahrgastraums auf eine mittlere Temperatur von 22°C, einer Außenlufttemperatur von 30°C und einer solaren Einstrahlung von 500 W/m² in Abhängigkeit der relativen Außenluftfeuchtigkeit (Westerloh 2019, S. 34)

2.1.3.3 Niedervolt-Nebenverbraucher und DCDC-Wandler

Alle NV-Verbraucher im Elektrofahrzeug werden insgesamt über den DCDC-Wandler mit elektrischer Energie versorgt. Daher können diese Verbraucher gemeinsam bilanziell betrachtet werden. Aus energetischer Sicht ist es sinnvoll, die in Tabelle 2.2 dargestellten NV-Verbraucher mit hohen Werten bei den mittleren Leistungen genauer zu betrachten. Dadurch lassen sich relevante Einflussgrößen für den Leistungsbedarf am DCDC-Wandler ableiten.

Elektrische Assistenzsysteme (EPS, eBKV, ABS, ESC)

Elektrische Regelsysteme dienen der Sicherheits- bzw. Komfortsteigerung im Kraftfahrzeug und nehmen durch die Entwicklung von (teil-) autonomen Fahrfunktionen in Form von Assistenzsystemen einen beständig steigenden Stellenwert ein.

Die elektrische Servolenkung unterstützt den*die Fahrer*in durch Krafteinwirkung beim Lenkvorgang. Die benötigten Momente und damit Leistungen sind insbesondere beim stehenden oder langsam fahrenden Fahrzeug, z.B. bei Parkvorgängen, hoch. Im Mittel liegt der Leistungsbedarf allerdings bei moderaten Werten (Reif et al. 2012, S. 288–289).

Die elektrische Bremsverstärkung unterstützt die mechanischen Radbremsen. Bei Elektrofahrzeugen werden moderate Bremsvorgänge über die Rekuperation der E-Maschine durchgeführt. Nur bei geringen Geschwindigkeiten und bei sehr starken nötigen Verzögerungen kommen mechanische Bremse und Bremskraftverstärker zum Einsatz. Starke Verzögerungen kommen wiederum insbesondere bei hohen Fahrgeschwindigkeiten vor. Dadurch ist zu erwarten, dass auch die elektrische Bremsunterstützung ein energetisch deutlich mit der Fahrzeuggeschwindigkeit korreliertes Verhalten aufweist. Für die Traktionsregelsysteme ABS und ESP, die ebenfalls vergleichsweise hohe Leistungswerte aufweisen, gilt eine analoge Einordnung (vgl. Grell 2019, S. 90).

Frontscheibenheizung

Als weiterer energieintensiver NV-Nebenverbraucher fällt die Frontscheibenheizung auf. Diese wird (analog zur Heckscheibenheizung) eingesetzt, um die Frontscheibe von Eis und Beschlag zu befreien bzw. frei zu halten. Insbesondere im Elektrofahrzeug, bei dem die Kabinenheizung einen deutlichen Einfluss auf Energieverbrauch und Reichweite hat, bietet die Frontscheibenheizung die Möglichkeit in bestimmten Situationen die Kabine weniger stark zu heizen, damit Energie zu sparen und dennoch ohne sicherheitskritischen Scheibenbeschlag auszukommen. Scheibenbeschlag tritt auf, wenn die Feuchtigkeit der Luft in der Fahrzeugkabine an einer (kalten) Scheibe kondensiert. Daher stellt die Umgebungstemperatur einen herausragenden Einflussfaktor für den mittleren Energiebedarf der Frontscheibenheizung dar.

DCDC-Wandler

Sowohl Assistenzsysteme wie auch Frontscheibenheizung sind regelmäßig als NV-Verbraucher ausgeführt und können daher zusammen mit anderen NV-Komponenten über den DCDC-Wandler-Verbrauch berücksichtigt werden. Fahrzeuggeschwindigkeit und Umgebungstemperatur stellen damit wichtige Einflussfaktoren für den Energie- und Leistungsbedarf am DCDC-Wandler dar.

2.1.3.4 Nutzfahrzeugspezifische Nebenverbraucher

Die folgenden Absätze stellen exemplarisch zwei sehr weit verbreitete Nutzfahrzeug-(Nfz-)spezifische Nebenverbraucher vor. Je nach Leistungsbedarf können diese an das HV- oder das NV-Bordnetz angeschlossen sein.

Laderaumkühlung

Analog zur Klimatisierung der Fahrerkabine, benötigen temperaturgeführte Transporte Energie zur Aufrechterhaltung der Laderaumtemperatur. In der Regel sind Frischeprodukte (Kühlwaren) bei 2 bis 8°C zu transportieren, Tiefkühlwaren bei -18°C. In den meisten Anwendungsfällen wird die Temperatur analog der Fahrgastklimatisierung über einen Kälteprozess, im Winter ggf. auch als Wärmepumpe genutzt, realisiert. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde mit dem Maxus EV80 von Florida Eis ein Fahrzeug mit eutektischer Kühlung betrachtet, bei dem eine kalte Lauge in den Kältespeicher des Fahrzeugs eingebracht wird und zum Ende des Einsatzzyklus wieder fahrzeugextern über einen Kältekreis regeneriert wird. Dies hat den Vorteil, dass keine elektrische Energie zur Laderaumkühlung der Traktionsbatterie entnommen wird. Aus diesem Grund wird die Laderaumkühlung hier nicht weiter betrachtet. Bei Kühlfahrzeugen mit Onboard-Kälteaggregat stellt die Laderaumkühlung jedoch ein relevantes NA dar.

Ladebordwand

Nach Tabelle 2.2 beträgt die Spitzenleistung beim Einsatz einer elektro-hydraulisch angetriebenen Ladebordwand 4,4kW und liegt damit in der Größenordnung z.B. des Klimakompressors. In Kott

2016, S. 57–58 wird allerdings dargelegt, dass ein mittlerer Auslieferzyklus im Verteilerverkehr lediglich auf einen Energieverbrauch von 154Wh kommt bei 11,5t beförderter Last und 16 Hebevorgängen. Dies liegt in den kurzen Einsatzdauern der Ladebordwand und der Tatsache begründet, dass Beladung in der Regel an Rampen stattfindet und Waren daher regelmäßig abgesenkt, aber selten gehoben werden. Nur in speziellen Einsatzfällen muss ggf. mit höheren Verbräuchen gerechnet werden. Aus diesem Grund und da die im weiteren betrachteten eNfz über keine Ladebordwand verfügen, wird der Energiebedarf hier nicht weiter betrachtet.

Weitere Nutzfahrzeug-Nebenverbraucher

Je nach Verwendungszweck und Aufbau existiert eine Vielzahl an weiteren eNfz-NA. Beispiele, die hier nicht weiter vertieft werden, sind elektrische Druckluftkompressoren für Brems- und Lenksysteme, vollelektrische oder hydroelektrische Pressen für Müllsammelfahrzeuge (Futuricum 2020a) und Kehraufbauten (Futuricum 2020b).

2.2 Nutzfahrzeuge, Grundlagen und technische Ausführungen

Dieses Kapitel ordnet die betrachteten Fahrzeuge nach zentralen Kriterien Fahrzeugtyp, Gewicht und Einsatzgebiet ein.

2.2.1 Einteilung von Nutzfahrzeugen

Nach Abbildung 2-4 gliedern sich gemäß DIN 70010 die Straßenfahrzeuge. Der in dieser Dissertation verwendete Begriff des Nutzfahrzeugs bzw. eNfz lässt sich nach dieser Ordnung auf die Nutzkraftwagen aber auch die Fahrzeugkombination von Nutzkraftwagen und Anhängefahrzeug beziehen.



Abbildung 2-4: Einteilung der Straßenfahrzeuge (DIN 70010)

Die Tabelle 2.3 gibt einen Überblick über die Einteilung von Nfz nach EU-Fahrzeugklassen, in Gewichtsklassen nach zulässigem Gesamtgewicht und listet gewöhnliche Anwendungsbereiche dieser Fahrzeuge auf. Die in dieser Dissertation beschriebene Methode lässt sich grundsätzlich auf alle gelisteten Fahrzeugklassen anwenden. Begründet durch die Verfügbarkeit geeigneter Daten erfolgt die Anwendung im Kapitel 4 für leichte Nutzfahrzeuge.

Nutzfahrzeug-Klasse	zGG	Gewöhnliche Anwendungsgebiete
Leichte Nutzfahrzeuge (N1)	≤3,5t	Innenstadtbelieferungen, Expressfahrten
Leichte und mittelschwere Lkw (N2)	>3,5 bis 12t	Regionale bzw. Innenstadtbelieferungen
Schwere Lkw (N3)	>12 bis 26t (32t bei vier Achsen)	Schwerer Verteilerverkehr, Regionalverkehr, Baustellenverkehr
Schwere Nfz-Kombinationen (Sattel- und Gliederzüge)	≤ 40t (44t im kombinierten Verkehr)	Fernverkehr, schwerer Verteilerverkehr

Tabelle 2.3: Einteilung der Nutzfahrzeuge nach Gewichtsklassen in EU (Hoepke und Breuer 2016, 25ff; Europäische Kommission 2011)

2.2.2 Elektrifizierung von Nutzfahrzeugverkehren

Um trotz der genannten Einschränkungen den Anteil von Elektrofahrzeugen am Markt zu steigern, sind neben der technischen und ökonomischen Weiterentwicklung der Fahrzeugkonzepte und der Batterietechnologie zusätzliche Schritte notwendig. Einen Beitrag kann die Identifikation von Nutzer*innen liefern, für die die genannten Nachteile begrenzt und die Vorteile überproportional relevant sind. Dem innerstädtischen Liefer- oder Zustellverkehr kommt bei der Elektrifizierung eine besondere Rolle zu, da er sich aus folgenden Gründen besonders für den Einsatz von Elektrofahrzeugen eignet (vgl. Adamczyk 2018; Hoepke und Breuer 2016, S. 529–530; Arndt et al. 2016, S. 1; Schulz et al. 2012):

- Mittlerer, gut planbarer Reichweitenbedarf
- Niedrige Effizienz konventioneller Antriebe durch Start-Stopp-Verkehr und niedrige Durchschnittsgeschwindigkeiten
- Hohe Emissionsbelastung der Innenstädte und drohende Einfahrverbote für konventionelle Fahrzeuge
- Hohe Sichtbarkeit der Fahrzeuge zur Positionierung des eigenen Unternehmens als Innovationstreiber
- Bereits größere Anzahl an verfügbaren leichten Nutzfahrzeugen-Modellen zur Auswahl am Markt vorhanden

2.3 Nutzungsorientierte Berechnung des Fahrzeugenergieverbrauchs

Der nutzerspezifische Einsatzfall wird durch einen spezifischen Fahrzyklus beschrieben, aus dem dann der benötigte Energieinhalt der Traktionsbatterie abgeleitet wird, um die geforderte Fahrleistung mit minimalen Investitionen sicherzustellen (Linssen et al. 2012, S. 77; Mareev et al. 2018). Um den Energiebedarf eines Elektrofahrzeugs für ein bestimmtes, individuelles Nutzungsprofil zu bestimmen, kommen grundsätzlich physikalisch/mathematische und datengestützte Verfahren in Frage. Für beide Verfahren muss das auszuwertende Nutzungsverhalten und die Umgebungsbedingungen ausreichend beschrieben sein. Zur Anwendung ersterer muss zudem das physikalische System Elektrofahrzeug in Bezug auf die energetischen Gegebenheiten detailliert bekannt sein, für letzteres müssen ausreichend umfangreiche historische Nutzungsdaten vorliegen, z.B. um Verfahren des maschinellen Lernens anwendbar zu machen.

Physikalische Simulation beschreibt dabei die Anwendung von Modellen, die die physikalischenergetischen Wirkzusammenhänge in ausreichender Detailtiefe direkt über physikalische Gesetzmäßigkeiten beschreiben. Im Gegensatz dazu beschreiben sogenannte Black-Box-Modelle nur den Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen, z.B. über ein empirisches Wirkungsgradkennfeld oder mathematische Gleichungen, ohne den inneren Wirkmechanismus zu erklären (vgl. Dobmann 2018, S. 47). In dieser Dissertation werden wie in anderen physikalischen Simulationen diese beiden Verfahren in Kombination eingesetzt, je nach Verfügbarkeit von physikalischen Parametern, Messdaten und gewünschter Detaillierungstiefe.

Zunächst werden im folgenden Abschnitt bestehende Ansätze für energetische Simulationen von Elektrofahrzeugen aus der Literatur beschrieben und von dem in dieser Dissertation gewählten Ansatz abgegrenzt. Anschließend werden Grundlagen für die verwendete fahrwiderstandsbasierte Ermittlung der Antriebsleistung zusammengestellt, was dem Stand der Technik entspricht. Diese findet im Kapitel 3 im Rahmen des Gesamtfahrzeugenergiemodells Anwendung. Dort wird dann insbesondere auf die Modellierung der NA eingegangen.

2.3.1 Übersicht Modellansätze in der Literatur

Tabelle 2.4 zeigt eine Übersicht von in der Literatur verwendeten Modellierungsansätzen zur simulationsbasierten Bestimmung des Energieverbrauchs von Elektrofahrzeugen unter Berücksichtigung des Antrieb- und Nebenaggregate-Energieverbrauchs.

Quelle	Ziel	Antrieb (v-t-Profil)	HVAC	Sonst. NA	Datenbasis
Baumgart 2010	Energetische Optimierung Klimaanlage	Dynamisch, drei selbst definierte Zyklen	Dynamisch; Testreferenzjahr Region Bayern	/	Generische Zyklen: v_{Fzg} , \mathcal{G}_U , rel. Feuchte (rF), Sonne (S)
Konz et al. 2011	Konzeptvergleich HVAC bzgl. Energieverbrauch und Komfort	Dynamisch, Zyklus (NEFZ)	Außentemperatur statisch in zwölf Zuständen; Globalstrahlung statisch in drei Zuständen und Tagesgang	/	Generische Zyklen aus 3F-Raum: v_{Fzg} , ϑ_U
Linssen et al. 2012	Flottenenergiebedarf für Netzintegration von Elektrofahrzeugen als Pufferspeicher	Dynamisch, Zyklus (NEFZ, ARTEMIS)	Konstant Szenarien (Eco, Basis, Winter)	Konstant	Generische Zyklen: v _{Fzg} , P _{NV}
Hofemeier 2013	Auslegung und energetische Optimierung Thermo- management	Dynamisch, Zyklus (NEFZ, Großglockner)	statisch in vier Klimazuständen	An/Aus- Lastfall Shz, Hsh, andere konstant	Generische Zyklen: $v_{Fzg}, \vartheta_U, rF,$ S, α
Grube 2014	Reduktion Strombedarf im Bordnetz	Dynamisch, 25 Standard- Zyklen	statisch in drei Klimazuständen	statisch, in zwei Zuständen	Generische Zyklen: $v_{Fzg}, \vartheta_U, rF, S$
Orner 2017	Auslegung und Gleichteile- optimierung nach Nutzerkriterien	Eigene Zyklen	Statisch in fünf Zuständen	Konstant	Eigene Zyklen
Westerloh 2019	Konzeptvergleich HVAC bzgl. Energieverbrauch bei Flotten	Dynamisch, Zyklus (WLTP)	Außentemperatur statisch in sechs Zuständen; Globalstrahlung nach Tagesgang der Sonne	/	Generische Zyklen: $v_{Fzg}, \vartheta_U, rF, S$
Jerratsch 2021 (Diese Arbeit)	Berechnung des Energieverbrauchs von Antrieb und NA für spezifische Einsatzfälle	Dynamisch nutzungs- spezifisch	Dynamisch nutzungs- spezifisch	kennfeld- basierte DCDC- Leistung	Realdaten: Nutzung $(v_{Fzg}, \vartheta_I, mod_{Fzg}),$ Umgebung $(\vartheta_U, rF, S, \alpha_S),$ Fahrzeug

Tabelle 2.4: Gegenüberstellung energetischer Verbrauchssimulationen in der Literatur

Insgesamt werden durch die betrachteten Modelle die Fahrsituation, also der Antriebsverbrauch, und ein statischer Heiz- und Klimabetrieb bereits gut erfasst. Hierbei werden sowohl der stationäre Erhaltungsbetrieb bei konstanter Temperatur, wie auch der Aufheiz-/ bzw. Abkühlbetrieb (s. Abbildung 2-5 und Abbildung 2-6) betrachtet. Die Betrachtung eines real erfassten, dynamischen Geschwindigkeits-, Steigungs- und Klimaprofils mit Außentemperatur-, Feuchte- und Solarstrahlungsprofilen, wie sie ein*e Nutzer*in im Alltag erfährt, wird dagegen in keiner der Quellen abgebildet. Diese Lücke zu schließen, bildet den Schwerpunkt dieser Dissertation.



Abbildung 2-5: Leistungsbedarf zum Heizen und Kühlen des Fahrgastraums eines Kompaktklasse-Pkw auf 22°C bei unterschiedlichen Außenlufttemperaturen im stationären Betrieb (Westerloh 2019, S. 32)



Abbildung 2-6: Energiebedarf zum Aufheizen bzw. Abkühlen des Fahrgastraums bei unterschiedlichen Außenlufttemperaturen im instationären Betrieb auf eine mittlere Temperatur von 22 °C (Westerloh 2019, S. 33)

2.3.2 Energieverbrauchsberechnung am Antriebsstrang

Die im Antriebsstrang umgesetzte Fahrenergie hat im Normalfall den größten Anteil am Energiebedarf bei der Nutzung des Kraftfahrzeugs. Aufgrund des im Vergleich zum verbrennungsmotorischen Antriebsstrang einfachen Aufbaus des batterieelektrischen Antriebs ist eine Berechnung der Fahrleistung und damit des Energiebedarfs aus den vom Fahrzeug zu überwindenden Fahrwiderständen in allen Fahrsituationen mit hoher Genauigkeit möglich. Die zur Berechnung der momentanen Fahrwiderstände notwendigen Grundlagen sind in der Literatur vielfältig beschrieben und in diesem Abschnitt zusammengefasst. Hierbei beschränkt sich wie auch bei den Beispielen in der Literatur die Betrachtung auf den Bereich der Längsdynamik. Quer- und Vertikaldynamik werden vernachlässigt (Proff 2019, S. 301).

2.3.2.1 Streckenverbrauch

Der Streckenverbrauch eines Fahrzeugs W_A (Antriebsenergiebedarf für die Überwindung einer Strecke s) berechnet sich nach (1) und (2) über das Zeitintegral aus den Fahrwiderständen des Fahrzeugs F_{W} , der Fahrzeuggeschwindigkeit v, den Energiewandlungsverlusten im Antriebstrang η_A und dem Schlupf λ_A (Haken 2011, S. 207).

$$P_A = \frac{F_W \cdot v}{(1 - \lambda_A) \cdot \eta_A} \tag{1}$$

$$W_A = \int P_A \, dt \tag{2}$$

Die Berechnung der einzelnen Komponenten ist im Folgenden beschrieben.

2.3.2.2 Fahrwiderstände und Fahrwiderstandsleistung

Die folgenden Zusammenhänge zu Fahrwiderständen und Fahrwiderstandsleistungen folgen, falls nicht anders angegeben der Darstellung in Haken 2011, 137ff.

Der Gesamtfahrwiderstand F_W setzt sich nach der Zugkraftformel (3) zusammen aus Rad-(F_{WR}), Luft-(F_{WL}), Steigungs-(F_{WS}), und Beschleunigungswiderstand (F_{WB}). Da keine Fahrten mit Anhänger berücksichtigt werden, entfällt der an anderer Stelle hier aufgeführte Zughakenwiderstand.

$$F_{W} = F_{WR} + F_{WL} + F_{WS} + F_{WB}$$

$$= m_{Fzg} \cdot g \left[f_{R} \cdot \cos\alpha + \sin\alpha + (1+\varepsilon) \cdot \frac{a_{x}}{g} \right] + \frac{\rho_{L}}{2} \cdot c_{x} \cdot A \cdot v^{2}$$
(3)

Analog dazu kann die Fahrwiderstandsleistung (4) betrachtet werden.

$$P_{W} = F_{W} \cdot v$$

$$= m_{Fzg} \cdot g \left[f_{R} \cdot \cos\alpha + \sin\alpha + (1 + \varepsilon) \cdot \frac{a_{x}}{g} \right] \cdot v + \frac{\rho_{L}}{2} \cdot c_{x} \cdot A \cdot v^{3}$$
(4)

Die einzelnen Fahrwiderstände bzw. -leistungen, deren Berechnung und die Modellierung im Gesamtenergieverbrauchsmodell werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

2.3.2.3 Radwiderstand

Der Radwiderstand F_{WR} bezeichnet die Summe von Rollwiderstand F_{WRR} , Schwallwiderstand F_{WRS} , Lagerwiderstand F_{WRL} , Vorspurwiderstand F_{WRV} , Kurvenwiderstand F_{WRK} und Federungswiderstand $F_{WRF}(5)$.

$$F_{WR} = F_{WRR} + F_{WRS} + F_{WRL} + F_{WRV} + F_{WRK} + F_{WRF}$$

$$\tag{5}$$

Da der Rollwiderstand F_{WRR} ca. 80% des Radwiderstandes ausmacht, finden im vorliegenden Modell wie auch in anderen Fällen der praktischen Verwendung, nur Roll- und Vorspurwiderstand F_{WV}

Berücksichtigung. Der Schwallwiderstand F_{WRS} tritt in relevantem Umfang nur bei stark nasser Fahrbahn auf, der Lagerwiderstand F_{WRL} beträgt in der Regel lediglich ~1% des Rollwiderstands, der Kurvenwiderstand F_{WK} kann, insbesondere bei kleinem Querbeschleunigungsanteil, ebenfalls vernachlässigt werden genauso wie Federungswiderstand F_{WF} bei Fahrt auf ebener Straße. Damit ergibt sich der Rollwiderstand F_{WR} unter Berücksichtigung des Rollwiderstandsbeiwerts f_R , des Steigungswinkels α , des Vorspurwinkels β und der Schräglaufsteifigkeit der Reifen c_{β} nach (6).

$$F_{WR} = f_R \cdot m_{Fzg} \cdot g \cdot \cos \alpha + \#_{R\ddot{a}der} \cdot c_\beta \cdot \beta \cdot \sin (\beta)$$
(6)

Bei unbekanntem Rollwiderstandsbeiwert können Werte z.B. von Haken 2011, S. 140 oder Hoepke und Breuer 2016, S. 50–51 verwendet werden.

2.3.2.4 Luftwiderstand

Der Luftwiderstand berechnet sich nach (7) aus dem Luftwiderstandsbeiwert c_x , der Stirnfläche A und der Luftdichte ρ_L unter Vernachlässigung von natürlich auftretendem Wind.

$$F_{WL} = c_x \cdot A \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot v^2 \tag{7}$$

Näherungswerte für c_x und A können z.B. Hoepke und Breuer 2016, S. 55 und Haken 2011, S. 153 entnommen werden.

2.3.2.5 Steigungswiderstand

Der Steigungswiderstand F_{WS} berücksichtigt, dass bei der Bergfahrt dem System Fahrzeug potenzielle Energie zugeführt, bei der Talfahrt potenzielle Energie abgeführt wird und berechnet sich nach (8).

$$F_{WS} = m_{Fzg} \cdot g \cdot \sin \alpha = m_{Fzg} \cdot g \cdot \sin(\arctan\left(\frac{q}{100}\right)) \tag{8}$$

2.3.2.6 Beschleunigungswiderstand

Bei der Beschleunigung des Fahrzeugs muss Energie aufgewendet werden, um einerseits die Fahrzeugmasse translatorisch, andererseits die Drehmassen (Motor, Getriebe, Wellen, Räder) rotatorisch zu beschleunigen. Die Beschleunigung hängt damit von der Fahrzeugmasse m_{Fzg} , dem auf Raddrehzahl reduzierten Antriebsstrang-Trägheitsmoment J_{red} , dem dynamischen Reifenhalbmesser r_{dyn} und der translatorischen Fahrzeugbeschleunigung a_{Fzg} ab (9). Alternativ kann der Drehbeschleunigungsanteil über den Drehmassenzuschlagsfaktor ε berücksichtigt werden. Anhaltswerte für diesen Faktor im konventionellen Fahrzeug mit Schaltgetriebe liefert Haken 2011, S. 158.

$$F_{WB} = \left(m_{Fzg} + \frac{J_{red}}{r_{dyn}^2}\right) \cdot a_{Fzg} = m_{Fzg} \cdot (1+\varepsilon) \cdot a_{Fzg}$$
(9)

Im Elektrofahrzeug entfallen die Drehmassen des Verbrennungsmotors und des Schaltgetriebes. Aus diesem Grund ist der Drehmassenzuschlagsfaktor im Elektrofahrzeug im unteren Bereich nahe ε_0 zu veranschlagen.

Bei Vorliegen der Einzelträgheitsmomente von Vorder- (VA), Hinterachse (HA), Differenzial (D), Getriebe (G) und elektrischer Maschine (EM) kann das reduzierte Trägheitsmoment J_{red} an den Rädern nach (10) mithilfe der Übersetzungsverhältnisse im Getriebe i_G und Differential i_D berechnet werden.

$$J_{red} = J_{VA} + J_{HA} + J_D i_D^2 + (J_G + J_{EM}) i_G^2 i_D^2$$
(10)

Da die Trägheitsmomente der Komponenten oft unbekannt sind, liegt eine andere Berechnungsmöglichkeit in der Berücksichtigung der Schwungmassen von Vorder- $m_{S,VA}$ bzw. Hinterachse $m_{S,HA}$, Differenzialgetriebe $m_{S,D}$ Getriebe $m_{S,G}$ und elektrischer Maschine $m_{S,EM}$. Diese können z.B. der Fahrzeugzulassung entnommen werden. Daraus lässt sich über die Definition des Trägheitsmoments (11), die Übersetzungen im Differenzial i_D und im Getriebe i_G und den dynamischen Reifenhalbmesser r_{dyn} das reduzierte Trägheitsmoment nach (12) ermitteln.

$$J = m \cdot r \tag{11}$$

$$J_{red} = \left[m_{S,VA} + m_{S,HA} + m_{S,D} i_D^2 + (m_{S,G} + m_{S,EM}) i_G^2 i_D^2 \right] \cdot r_{dyn}$$
(12)

2.3.2.7 Motorleistung, mechanische Verluste im Antriebsstrang und Schlupfverluste

Zur Überwindung der Fahrwiderstandsleistung P_W muss eine um die Antriebsstrangverluste P_V gesteigerte Motorleistung P_M zur Verfügung gestellt werden. Dies liegt an Verlusten durch Schlupf λ_A und dem Wirkungsgrad des Antriebstrangs η_A (13).

$$P_W = P_M - P_V = P_M \cdot \eta_A \cdot (1 - \lambda_A) \tag{13}$$

In vielen normalen Fahrsituationen ist der auftretende Schlupf klein und kann vernachlässigt werden (vgl. Schramm et al. 2017, S. 200). Je nach Ausführung des Fahrzeugs unterscheidet sich der mechanische Antriebsstrangwirkungsgrad η_A in Abhängigkeit der vorhandenen Komponenten. Ein Überblick über die einzelnen Komponenten gibt Haken 2011, S. 182.

Der gesamte Antriebsstrangwirkungsgrad η_A ergibt sich aus dem Produkt der einzelnen Wirkungsgrade. Für Antriebsstränge mit Stirnradgetriebe können aus Tabelle 2.5 in Abhängigkeit des zugrundeliegenden Antriebskonzepts Anhaltswerte für konventionelle Fahrzeuge entnommen werden.

Antriebskonzept	Motoreinbaulage	Antriebsstrangwirkungsgrad ηA
Frontantrieb	quer	0,87 0,92
Heckantrieb	quer	0,87 0,92
Mittelmotor	quer	0,87 0,92
Frontantrieb	längs	0,85 0,91
Heckantrieb	längs	0,85 0,91
Mittelmotor	längs	0,85 0,91
Standardantrieb	längs	0,83 0,88
Allradantrieb	längs	0,80 0,88

Tabelle 2.5: Anhaltswerte für den Antriebsstrangwirkungsgrad in Abhängigkeit vom Antriebskonzept (Haken 2011, S. 183)

Für Elektrofahrzeuge kann aufgrund des Entfalls von Schaltgetriebe und Kupplung mit einem höheren mechanischen Antriebsstrang-Wirkungsgrad vom Ausgang elektrischen Maschine zum Rad gerechnet werden, der nach Angaben von Komarnicki et al. 2018a, S. 48 mit $\eta_A=95\%$ angesetzt werden kann.

2.3.2.8 Normalfahrwiderstand

Nach Haken 2011, S. 160 berücksichtigt der Normalfahrwiderstand F_{W0} bei Konstantfahrt in der Ebene bei Windstille ohne Anhänger genau den Roll- und den Luftwiderstand (14)

$$F_{W0} = m \cdot g \cdot f_R + \frac{\rho}{2} \cdot c_x \cdot A \cdot v^2$$
⁽¹⁴⁾

2.3.2.9 Fahrwiderstandsleistung

Abgeleitet aus den Fahrwiderstandskräften F_W lassen sich Fahrwiderstandsleistungen P_W beschreiben nach (15)

$$P_W = F_W \cdot v \tag{15}$$

Daraus ergibt sich für die Konstantfahrt ohne Anhänger bei gerader Fahrbahn und Windstille analog zum Normalfahrwiderstand die Normalfahrwiderstandsleistung P_{WO} (16).

$$P_{W0} = P_{W0} \cdot v = m_{Fzg} \cdot g \cdot f_R \cdot v + \frac{\rho}{2} \cdot c_x \cdot A \cdot v^3$$
⁽¹⁶⁾

2.3.3 Datenbasierte Verfahren

Als datenbasierte Verfahren im Zusammenhang mit der Energieverbrauchsberechnung von Elektrofahrzeugen werden solche Verfahren verstanden, die direkt den Energieverbrauch von Teilsystemen oder des Gesamtfahrzeugs anhand von Nutzungs- bzw. Umgebungsdaten über statistische Zusammenhänge bestimmen. Damit grenzen sie sich von den oben genannten mathematischen Black-Box-Modellen ab, die auf Komponentenebene physikalische Zusammenhänge vereinfachen und dann im Rahmen des Gesamtmodells eingesetzt werden können.

Für den Anwendungsfall der Energieverbrauchsberechnung werden die datengestützten Verfahren in drei Gruppen aufgeteilt, die hier kurz beschrieben sind.

- Verwendung von Konstantwerten (z.B. Herstellerangaben, Mittelwerte)
- Verwendung von "einfachen" Regressionsverfahren
- Verfahren von Verfahren des maschinellen Lernens bzw. der künstlichen Intelligenz

Die ersten beiden Verfahren werden im Rahmen der Modellvalidierung in Kapitel 3.5 und 3.6 der Energiesimulation gegenübergestellt, um die Simulationsgüte zu bewerten.

2.3.3.1 Konstantwerte

Jedes Fahrzeug, das in Europa zugelassen ist, weist einen bei der Zulassung nach festgelegtem Testverfahren ermittelten Verbrauchswert bzw. eine Verbrauchsspanne auf. Dieser Wert kann für überschlägige Rechnungen für eine grobe Bestimmung des Energiebedarfs für eine Fahraufgabe herangezogen werden. Da die Testbedingungen für Nutzungs- und Umgebungsbedingungen genau vorgegeben sind und Nebenverbraucher zum Teil abgeschaltet werden dürfen, ergibt diese Abschätzung nur in Ausnahmefällen realitätsnahe Werte und führt in der Regel zu einer Unterschätzung des Energiebedarfs. Um dem entgegen zu wirken, können reale Energieverbräuche von Fahrzeugen herangezogen werden und daraus über Lagemaße (Mittelwert, Median) ein realistischer Wert für den Streckenverbrauch abgeleitet werden. Da jedoch auch hier die Nutzungsund Umgebungsbedingungen nicht individuell betrachtet werden können, ist bei unterschiedlichen Fahrten eine hohe Residualstreuung zu erwarten.

2.3.3.2 Einfache Regressionsverfahren

Mittels Regressionsverfahren lassen sich Zusammenhänge von unabhängigen Einflussgrößen (z.B. Geschwindigkeit, Temperatur) auf die Zielgröße (Energiebedarf) modellieren. Dabei können univariate oder multivariate sowie lineare oder nichtlineare Modelle zum Einsatz kommen, je nach erwarteten Zusammenhängen, Umfang der Daten und verfügbarer Rechenleistung. Dieser Ansatz kommt in der wissenschaftlichen Literatur bei der Ermittlung des Gesamtfahrzeugenergiebedarfs zur Anwendung (z.B. Qi et al. 2018). Beim hier vorgestellten Ansatz werden Komponentenmodelle für den Klimakompressor und den DCDC-Wandler über multivariate nichtlineare Regressionsmodelle verwendet.

2.3.3.3 Verfahren des maschinellen Lernens

Das maschinelle Lernen bietet den zentralen Vorteil, dass das mathematische Modell zur Bestimmung des Energieverbrauchs nicht durch den Anwender erstellt werden muss, sondern durch einen Algorithmus. Dabei wird ein Leistungskriterium optimiert, welches aus vorhandenen Daten Rückschlüsse zieht, wie das gestellte Problem gelöst werden kann. Nach Durchlaufen dieses Lernprozesses kann das erstellte Modell genutzt werden, um Erkenntnisse aus neuen, vorher nicht betrachteten Daten zu gewinnen (Alpaydın 2014, S. 2). Die Abgrenzung zu den Regressionsverfahren ist fließend, da viele Verfahren des maschinellen Lernens auf Regressionsverfahren aufbauen, dabei aber mehrere Modelle miteinander verbinden bzw. höhere Komplexität erreichen (z.B. Cauwer et al. 2017).

2.4 Verwendung von Sekundärdaten

Zur Berücksichtigung der Umgebungssituation bei der Energieverbrauchsberechnung spielen eine Vielzahl von Parametern eine Rolle. Diese analog der Nutzungsdaten während realer Fahrten aufzuzeichnen, ist aus wirtschaftlichen und praktischen Gründen nicht immer möglich und sinnvoll. Stattdessen können zeit- und ortsabhängig Umgebungswerte aus anderen Datenquellen dem Realdatensatz zugeordnet werden. Dies geschieht über eine Abfrage von in der Fahrzeugumgebung verfügbaren Datenquellen. Dafür wurden am Fachgebiet Fahrerverhaltensbeobachtung für energetische Optimierung und Unfallvermeidung der Technischen Universität Berlin Methoden entwickelt, um folgende Parameter orts- und zeitabhängig verfügbar zu machen:

- Wetterdaten (Temperatur, Feuchte, Wind, solare Strahlung, Niederschlag) mit Daten aus Deutscher Wetterdienst 2020 (DWD)
- Höhenprofile (geographische Höhe und Steigung) mit Daten aus einem digitalen Geländemodell (DGM) vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie o. J.
- Mautstreckerkennung mit digitalen Kartendaten (OpenStreetMap o. J.)

Neben der Ergänzung von Werten, die sich nur sehr aufwändig direkt am fahrenden Fahrzeug messen lassen (z.B. Niederschlag) sind folgende Aspekte des Vorgehens interessant:

- Gegenseitige Validierung der verbauten Messtechnik und der Methode der Sekundärdatenzuordnung
- Ergänzung von Werten, deren Genauigkeit bzw. Zuverlässigkeit bei der fahrzeuggebundenen Messung unzureichend ist (z.B. GPS-basierte geografische Höhe bzw. Steigung)
- Verzicht bei weiteren Fahrzeugen auf Messtechnik für über Sekundärquellen verfügbare Werte
- Anwendung bei bereits vorhandenen Datensätzen, die nicht über diese Werte verfügen
- Anwendung, wenn keine Realdaten zur Verfügung stehen (z.B. für die Energieverbrauchsprognose)

Das Vorgehen zur Zuordnung dieser Sekundär-Umgebungsdaten zu den Nutzungsdaten ist in Jerratsch et al. 2018 und Jerratsch et al. 2020 dokumentiert.

2.5 Ökonomische und ökologische Bewertung des Einsatzes von Elektrofahrzeugen

2.5.1 Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen

Die alleinige Kenntnis der Anschaffungskosten eines eNfz ist für eine fundierte Investitionsentscheidung nicht ausreichend. In der Regel wird diese auf Basis einer vergleichenden Gesamtkostenbetrachtung, oder total-cost-of-ownership- (TCO-) Rechnung, zwischen alternativen Investitionsoptionen durchgeführt. Die Zuhilfenahme von Berechnungstools erleichtert diese Betrachtung erheblich. Derartige Berechnungstools gibt es bereits für konventionelle Nutzfahrzeuge fast aller Klassen, beispielsweise als Service seitens der jeweiligen Nutzfahrzeughersteller (Iveco Magirus AG o.J.) oder als kommerzielles Angebot (IMPARGO GmbH 2018). Bei Elektrofahrzeugen beschränkt sich die Verfügbarkeit jedoch auf Pkw und leichte Nutzfahrzeuge, beispielsweise in Form des "Kostenrechners für Elektrofahrzeuge" des Öko-Instituts e.V. (Öko-Institut e.V. 2017). Vergleichende Berechnungen für Elektro- und Dieselnutzfahrzeuge und weitere alternative Antriebe bietet z.B. das Tool AFLEET für den Fahrzeugeinsatz in den USA an (Argonne National Laboratory 2019). Hier liegt der Fokus auf Berechnung und Vergleich von Emissionen der einzelnen Antriebsarten. Die implementierte ökonomische Analysefunktion berücksichtigt dabei keine differenzierte Restwertentwicklung und betrachtet insbesondere keine Effekte der Batteriealterung. Dies ist für batterieelektrische Lkw für ein differenziertes Bild jedoch sinnvoll. Darüber hinaus sind für die Betrachtung der folgenden Anwendungsfälle deutsche Preise und Rahmenbedingungen anzusetzen. Einen weiteren Ansatz verfolgen Taefi et al. 2017. Hier wird auf Basis von vorhandenen eNfz die wirtschaftlich optimale Fahr- und Ladeleistung für jeden Einsatztag hergeleitet. Dabei finden insbesondere auch Batteriealterung, -wiederbeschaffung und -restwert Berücksichtigung. Während sich der Ansatz gut für die Identifikation idealer Einsatzbedingungen anbietet, ist die wirtschaftliche Bewertung eines existierenden Fahrprofils nicht beschrieben, hierfür ist insbesondere eine variierende Entladetiefe zu modellieren. Außerdem leitet sich der Gesundheitszustand der Batterie (SoH, state of health) nicht aus technischen Zusammenhängen ab, sondern aus den Garantiebedingungen der Hersteller.

Aus diesen Gründen wurde im Rahmen des Projekts EN-WIN ein TCO-Tool zum Vergleich von Elektro- und Dieselnutzfahrzeugen anhand realer Fahrprofile aufgebaut. Die Kostenstrukturierung der Anwendung orientiert sich an der Literatur (Wittenbrink 2014, 74ff) und berücksichtigt anhand eines wählbaren Kalkulationszinssatzes die periodengerechte Verrechnung von

- Fixkosten für Beschaffung von Fahrzeugen, Batterien und Ladeinfrastruktur, Wartung, Instandhaltung, Kfz-Steuer und Versicherung sowie
- variablen Kosten für Kraft- und Schmierstoffe bzw. Strom, Maut und Reifen in Abhängigkeit der Fahrleistung.

Dabei werden auftretende Batteriealterung und -ersatzkosten sowie der Batterierestwert anhand der variablen Nutzungsbedingungen bestimmt und mit den Beschaffungskosten verrechnet.

Weitere Kostenarten der Transportkostenrechnung werden nicht betrachtet, insbesondere, da der Kostenvergleich der Bewertung einer vollständigen Substitution eines konventionellen Nfz durch ein eNfz dient. Damit wird vorausgesetzt, dass sich die Transportaufgabe vollständig mit dem eNfz erfüllen lässt. Es ist nicht berücksichtigt, dass z.B. aufgrund einer geringeren Nutzlast oder Reichweite zusätzliche Fahrzeuge bzw. Touren in bestimmten Anwendungsfällen notwendig sein können. Aus diesem Grund werden Personal- und Gemeinkosten für beide Antriebsarten gleichgesetzt und nicht weiter berücksichtigt. Ferner wird eine einmalige Entscheidung zwischen zwei Investitionsalternativen betrachtet. Daher werden nicht Wiederbeschaffungswerte, sondern Beschaffungskosten abzüglich erwarteter Restwerte in der Berechnung berücksichtigt. Die angesetzten Aufwände werden periodengerecht erfasst. Als zentrales Ergebnis werden die Differenzen der Kapitalwerte der Gesamtkosten für die beiden alternativen Fahrzeuge ausgegeben. Der Abschlussbericht der TU Berlin zum Projekt EN-WIN beinhaltet eine detaillierte Dokumentation der Kostenvergleichsmethodik (Jerratsch et al. 2020). Die Anwendung wird im Kapitel 4 am Praxisbeispiel vorgestellt.

2.5.2 Bestimmung der optimalen Fahrzeugbatteriegröße aus Realdaten und Simulationsergebnissen

Die Traktionsbatterie stellt bei der Anschaffung von batterieelektrischen Fahrzeugen den entscheidenden Kostenfaktor dar. Eine bedarfsoptimale Auslegung der Batteriegröße ist somit ein wichtiges Element für die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen. Im Rahmen des EN-WIN-Projekts wurde eine Methodik entwickelt, die anhand von gemessenen oder simulierten Energieverbräuchen die für eine gewünschte Nutzungsdauer optimale Batteriekapazität bestimmt. Dabei werden der Gesamtfahrzeugenergieverbrauch je Tag und die prognostizierte Batteriealterung berücksichtigt. Die ermittelte Batteriekapazität kann mit der bestmöglichen technischen Näheren vergleichen werden. Letztere bezeichnet am Markt verfügbare bzw. die durch Hinzufügen/Entfernen ganzer Batteriestränge entstehende Batteriekapazitäten bei den betrachteten Fahrzeugen. So kann eine wirtschaftlich optimale Investitionsentscheidung getroffen werden. Hierbei werden die individuell entstehenden Zusatzkosten bei Einplanung von untertägigem Zwischenladen (Umwege, Wartezeiten, höhere Strompreise an öffentlicher Ladeinfrastruktur) berücksichtigt und zu dem Einsparpotenzial einer Batteriekapazitätsreduktion ins Verhältnis gesetzt. Das unterlegte Alterungsmodell berücksichtigt nutzungsprofilabhängig sowohl kalendarische wie auch zyklische Batteriealterung für die Berechnung der SoH-abhängigen Reichweite im Zeitverlauf. Der Abschlussbericht der TU Berlin zum Projekt EN-WIN (Jerratsch et al. 2020) enthält eine detaillierte Dokumentation der Methodik. Die praktische Anwendung dieser Batteriekapazitätsoptimierung wird im Kapitel 4 vorgestellt.

2.5.3 Zur ökologischen Betrachtung von Elektrofahrzeugen

Spätestens seit die Europäische Union und andere Regionen weltweit schärfere CO₂-Vorgaben für den Verkehrssektor vorschreiben und breiter angelegte Entwicklungen auch von etablierten Herstellern hin zur Elektromobilität in der Öffentlichkeit diskutiert werden, kommt immer wieder die Frage nach dem tatsächlichen ökologischen Nutzen im Vergleich zum konventionellen Antrieb auf. Einige Studien kommen zu dem Ergebnis, dass das Elektrofahrzeug bei Berücksichtigung der gesamten Lebenszyklusemissionen schlechter abschneidet als ein konventionelles, vergleichbares Fahrzeug (z.B. Buchal et al. 2019). Mittlerweile wurden diese und ähnliche Studien jedoch widerlegt (Hajek 2019; Reitberger 2019). Im Gegenteil dazu zeigen aktuelle Studien, dass das Elektrofahrzeug bei mittleren Fahrleistungen und Betrachtung von Lebenszyklusanalysen (LCA) aus ökologischer Sicht regelmäßig dem Verbrennungsfahrzeug bereits heute überlegen ist und dieser Vorteil sogar mit fortschreitender Energiewende wächst (Hoekstra und Steinbuch Maarten 2020; Helma et al. 2019; Fraunhofer ISI 2019). Lediglich in Regionen mit sehr kohleintensiver Stromerzeugung, in der EU z.B. Estland, Polen, Tschechien, fällt das Ergebnis heute noch nicht eindeutig zugunsten des Elektrofahrzeugs aus (vgl. Abbildung 2-7).



Abbildung 2-7: LCA-Vergleich konventionelles und Elektrofahrzeug der unteren Mittelklasse (Hill et al. 2020, S. 9)

Die Bewertung von elektrischen Nutzfahrzeugen fällt analog aus (Hill et al. 2020, 115ff). Dies darf jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass auch Elektrofahrzeuge Umweltbelastungen und soziale Konflikte hervorrufen, z.B. durch Ressourcenverbrauch, ungelöste Entsorgungsprobleme, Reifenabrieb, Bereitstellung des elektrischen Stroms und Raumbedarf. Aus diesem Grund ist für eine langfristig nachhaltige Mobilität in jedem Falle eine Verringerung an Fahrzeugen gegenüber heute und die stärkere Vermeidung von Verkehr bzw. die Wahl von alternativen Transportmitteln notwendig. Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass ein Elektrofahrzeug in aller Regel die Umwelt weniger belastet als ein vergleichbares, konventionell betriebenes Fahrzeug. Eine detaillierte ökologische Betrachtung ist jedoch nicht Bestandteil dieser Dissertation.

2.6 Verfügbare elektrische Nutzfahrzeuge

In den vergangenen Jahren haben sowohl die klassischen Hersteller von Nutzfahrzeugen wie auch neue Konkurrenten in steigendem Umfang elektrische Nutzfahrzeuge aller Größenklassen auf den Markt gebracht bzw. kündigen dies an. Insbesondere im Bereich der leichten Nutzfahrzeuge bis 3,5t besteht mittlerweile ein breites Angebot, sodass tatsächlich Alternativen am Markt bereitstehen, die sich zum Teil erheblich bezüglich Batteriegröße, Reichweite und Preis, aber auch Abmessung, Nutzlast und Batterietechnologie unterscheiden. Zur besseren Einordnung der Simulationsergebnisse ist eine Marktanalyse erfolgt, die die verfügbaren technischen Informationen zu in Deutschland erhältlichen eNfz in einer Tabelle zusammenfasst (s. Anhang A). Für eine übersichtliche Darstellung kann für jedes Fahrzeug anhand einer drop-down-Auswahl ein Fact-Sheet abgerufen und angezeigt werden. Tabelle 2.6 zeigt beispielhaft das Fact-Sheet für den I SEE e-Movano, ein von der Firma I SEE umgerüsteter Opel Movano. Tabelle 2.7 zeigt den SAIC Maxus EV80. Letzterer wurde im EN-WIN-Projekt eingesetzt. Die erhobenen Daten werden in Abschnitt 3.6 zur Validierung des Simulationsmodells verwendet. Insgesamt ist zu sehen, dass weiterhin in allen Segmenten, vor allem aber im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge, wo bisher wenige Angebote der klassischen OEM bestehen, Umrüst-Firmen Fahrzeuge anbieten. Aufgrund der kleinen Stückzahlen und der aufwendigen Herstellungsverfahren sind diese in der Regel deutlich teurer als ihre konventionellen Pendants. Hier ist zu erwarten, dass sich mit dem von mehreren OEM angekündigten Einstieg in die industrielle Serienfertigung auch bei schweren eNfz erhebliche Kostendegressionen ergeben werden, die entweder zu einer Reduktion der Anschaffungspreise oder einer Steigerung der Batteriekapazitäten führen werden. Diese Entwicklung ist bei Pkw und leichten Nfz bereits heute zu erkennen (Doppelbauer 2020a, S. 412–414). Neben der Verwendung für eine grobe Parametrierung des Simulationsmodells verschafft die erstellte Übersicht interessierten Nutzern von Nfz eine erste Übersicht über den Markt und bietet aufgrund der zusammengetragenen Details die Möglichkeit schnell potenziell nutzbare Fahrzeuge für den vorgesehenen Einsatzbereich zu identifizieren.

	Dater	Fahrzeug:		Daten Antrieb:			
	Тур			Motor	Permanent Synchronmotor		
	Dimension (LxBxH)	5548 x 2070 x 2500 mm		Dauerleistung / PS			
Nutriest	Radstand			max. Leistung / PS	85 kW		
NULZIASL	Gesamtgewicht	3,5 t	A un trulin la	Dauerdrehmoment			
	Leergewicht	2,46 t	Antrieb	Max. Drehmoment	270 Nm		
	Nutzlast	1,04 t		Drehzahl			
Getriebe	Übersetzung			Vmax	90 km/h		
	Тур			Wirkungsgrad			
	Batteriechemie		Verbrauch	Überland/Stadt	23 kWh/100 km		
	Kapazität	55 kWh	verbrauch	Autobahn			
	DOC (SOC-Fenster)			NEFZ	170 km		
	Betriebsspannung		Reichweite	Überland/Stadt			
	Ladezeit AC		Kelenweite	Autobahn			
B atta di la	Ladezeit DC	45 Min		Realistisch			
Batterie	Ladeleistung AC		Status	Preis	67.990€		
	Ladeleistung DC		Status	Projektstatus	Serie		
	Austauschbar				https://www.i-see.plus/isee-files/I-SEE-e-		
	Wechseldauer		Quellen				
	Gewicht						
F	Rückgewinnung			Stand Recherche	20.05.2019		

I SEE e-MOVANO

Tabelle 2.6: Fact-Sheet Elektrofahrzeug-Datenbank, I SEE e-Movano (I SEE 2019)

Saic Maxus EV80 - Kastenwagen							
	Dater	n Fahrzeug:		Daten Antrieb:			
	Тур			Motor			
	Dimension (LxBxH)	5700 x 1998 x 2345 mm		Dauerleistung / PS	60 kW		
Nutriest	Radstand	3850 mm		max. Leistung / PS	100 kW		
Nutziast	Gesamtgewicht	3,5	Antrich	Dauerdrehmoment			
	Leergewicht		Antheb	Max. Drehmoment	320 Nm		
	Nutzlast	0,95 t		Drehzahl			
Getriebe	Übersetzung			Vmax	100 km/h		
	Тур			Wirkungsgrad			
	Batteriechemie	LFP	Vorbrouch	Überland/Stadt	34,2 kWh/100km		
	Kapazität	56 kWh	verbrauch	Autobahn			
	DOC (SOC-Fenster)			NEFZ	200 km		
	Betriebsspannung	354 V	Reichweite	Überland/Stadt			
	Ladezeit AC	8 h	Kelenweite	Autobahn			
B atta da	Ladezeit DC	2h		Realistisch	192 (WLTP)		
Batterie	Ladeleistung AC		Status	Preis	48.500€		
	Ladeleistung DC		Status	Projektstatus	Serie		
	Austauschbar	-			https://www.firmenauto.de https://ecomento.de		
	Wechseldauer	-	Quellen				
	Gewicht]				
	Rückgewinnung			Stand Recherche	13.11.2020		

Tabelle 2.7: Fact-Sheet Elektrofahrzeug-Datenbank, SAIC Maxus EV80 Kastenwagen (ecomento.de 2020)

3. Energetische Gesamtfahrzeugsimulation von batterieelektrischen Nutzfahrzeugen



Zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage widmet sich dieses Kapitel dem Aufbau und der Validierung eines Simulationsmodells für den Energieverbrauch der Haupt- und Nebenverbraucher eines elektrischen Nutzfahrzeugs. Dazu wird ein numerisches Modell mit den Komponenten Antrieb, HVAC und Niedervoltverbraucher (DCDC) entwickelt, beschrieben und die Validierung dokumentiert. Abbildung 3-1 zeigt die prinzipielle Verwendung der Fahrzeug-, Nutzungs- und Umgebungsdaten bei Simulation und Modellvalidierung.



Abbildung 3-1: Prinzipskizze Antriebs- und NA-Energiemodell: Datenverwendung und Validierung

3.1 Motivation Energieverbrauchssimulation

Gebräuchliche Simulationsmodelle zur Verbrauchsanalyse oder -prognose im Elektrofahrzeug verwenden aggregierte Durchschnitts- oder Extremklimadaten zur Bewertung des klimatisch

induzierten Energieverbrauchs (Orner 2017, S. 53–54). Dies führt zu im Mittel und bei durchschnittlichen/normalen Bedingungen guten Ergebnissen. Bei vom Mittel abweichenden Nutzungsverhältnissen können die energetischen Umstände jedoch nicht korrekt prognostiziert werden. Somit kommt es im Einzelfall zu deutlich abweichenden Energieverbräuchen. Vor dem Hintergrund der begrenzten Reichweite bei Elektrofahrzeugen und auch den Diskussionen um die Realitätstreue von Verbrauchsangaben bei Fahrzeugen allgemein, führt dies zu Vertrauensverlusten gegenüber Verbrauchsangaben und Zurückhaltung bei der Entscheidung für Elektrofahrzeuge.

In Deutschland und Mitteleuropa stellt der Heizenergiebedarf im Fahrzeug den größten Anteil am NA-Energiebedarf dar. In wärmeren und feuchteren Regionen der Erde trifft dies auf den Energiebedarf der Klimaanlage zu (Westerloh 2019, S. 63). Bei in der Sonne geparkten Fahrzeugen können durch den Treibhauseffekt erhebliche Temperatursteigerungen im Fahrzeug erfolgen, die über die Klimaanlage wieder ausgeglichen werden müssen (Surpure 1982).

Hier setzt die in dieser Dissertation vorgestellte explizite Simulation spezifischer Einsatzszenarien an. Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 3-2 den tendenziellen Zusammenhang zwischen Umgebungstemperatur und normiertem Gesamtenergieverbrauch bzw. Heizenergieverbrauch eines elektrischen Stadtlieferwagens (vgl. Abschnitt 3.5). Zu beachten ist, dass der Gesamtenergieverbrauch auf eine Strecke von 100km, der Heizenergieverbrauch auf eine Zeit von einer Stunde normiert ist. Deutlich wird, dass ein Zusammenhang besteht und insbesondere an kälteren Tagen mehr Energie verbraucht wird. Die Streuung zeigt jedoch dabei auch, dass weitere Faktoren den Energieverbrauch beeinflussen. Hierzu können gehören:

- Wie wird die HVAC-Anlage eingesetzt (z.B. Solltemperatur, Einschaltdauer)?
- Welche anderen Wetterbedingungen herrschen (z.B. Solarstrahlung, Feuchte)?
- Welches Fahrprofil wird absolviert (z.B. Dynamik, Steigung)?
- Wie kontinuierlich erfolgt die Fzg-Nutzung (wenige lange vs. viele kurze Fahrten)?
- Welche sonstigen Nutzungsbedingungen liegen vor (Beladung, spezielle Nebenverbraucher)?

Durch die Vielzahl an Einflussfaktoren entsteht eine große Anzahl an sich gegenseitig beeinflussenden, möglichen energetischen Zuständen. Ziel des Einsatzes von numerischer Simulation ist es, dieser umfangreichen Kombinatorik unter Berücksichtigung der relevanten Einflussparameter gerecht zu werden und damit für unterschiedliche Bedingungen valide Energieverbräuche zu berechnen.



Abbildung 3-2: Zusammenhang von Außentemperatur und dem mittleren spezifischem Gesamtenergieverbrauch (links) bzw. der mittleren Leistung der PTC-Heizung (rechts) eines Elektrofahrzeugs, jeweils mit linearer Regressionsgeraden, Quelle: eigene Auswertung auf Basis e-Caddy Flottendaten

Das im Rahmen dieser Dissertation entwickelte Modell fokussiert auf die Berechnung des Gesamtfahrzeugenergiebedarfs für bereits erfasste Nutzungsprofile. Nicht Bestandteil des Modells ist die Auswahl von Strecken oder Prognosen zum Fahrverhaltens (z. B. Geschwindigkeitsprofil) bzw. der Umgebungsbedingungen (z. B. Temperaturen). Das Modell kann dennoch im Rahmen solcher Prognosezwecke Verwendung finden, z.B. um unterschiedliche Optionen energetisch zu bewerten, und so beispielsweise bei der Tourenplanung zu unterstützen.

3.2 Verbrauchsbeeinflussende Parameter bei Elektrofahrzeugen und Anforderungen an die Eingangsdaten

Zur realitätsnahen Erfassung des Energiebedarfs von Fahrzeugen sind drei Gruppen von Einflussparametern relevant (vgl. auch Harendt et al. 2015, S. 82; Menken 2016, S. 4-Abbildung 1.1):

- Fahrzeug: Welches Fahrzeug wird genutzt (z.B. Antrieb, Art, Größe, Ausstattung)?
- Nutzung: Wie wird das Fahrzeug genutzt (z.B. Strecke, Dynamik, Komfortbedarf, Beladung)?
- Umgebung: Welche Umgebungsbedingungen herrschen (z.B. Temperatur, Feuchte, Wind, Topografie)?

Das Fahrzeug kann in seinen Eigenschaften durch technische Parameter beschrieben werden. Diese ändern sich nicht oder nur wenig über den Zeitraum der Nutzung und werden als konstant angesehen. Anders verhält es sich mit dem Nutzungsprofil und den Umgebungsbedingungen. Diese müssen jeweils individuell für den spezifischen Einsatzfall beschrieben sein, um realistische Energieverbräuche durch die Simulation zu erhalten. Tabelle 3.1 zeigt eine qualitative Bewertung des Einflusses von Nutzungs- und Umgebungsdaten auf den Energieverbrauch von Antrieb und in Abschnitt 2.1.3 identifizierten Nebenverbrauchern. Für eine realitätsnahe Abbildung des Energieverbrauchs eines Systems ist die Verfügbarkeit von mindestens der mit "1" markierten Parameter vorausgesetzt. Die Verfügbarkeit der mit "2" bewerteten Größen besitzt das Potenzial die Ergebnisse weiter zu verbessern. Bei der Betrachtung von speziellen Nutzfahrzeugaufbauten sind ggf. weitere Einflussfaktoren zu betrachten.

Der Umfang der in dieser Dissertation verwendeten Fahrzeugparameter wird genauer in Abschnitt 3.5 bzw. 3.6 beschrieben.

Verbraucher		Antrich	ртс	FKK	Assistenz-	Scheiben-
Einflussgröße		Antrico			Systeme	heizung
	Geschwindigkeit/ Beschleunigung	1	3	3	1	3
Nutzung	Fzg-Status (Zündung)	1	1	1	1	1
	Beladung	2	3	3	3	3
	Sollinnentemperatur	3	1	1	3	3
	Umgebungstemperatur	2	1	1	3	1
	Wind	2	3	3	3	3
Umgebung	Niederschlag	2	3	3	3	3
	Feuchte	2	2	1	3	3
	solare Strahlung	3	2	1	3	3
	Höhe/Steigung	1	3	3	3	3

Tabelle 3.1: Bewertung von Einflussgrößen auf den Energieverbrauch von Fahrzeugsystemen: 1: starker Einfluss, 2: mittlerer Einfluss, 3: kein/geringer Einfluss (eigene Bewertung)

3.3 Datenbasis Energiesimulation

Zielstellung der Simulation ist es, die durch Datenlogger aufgezeichneten Informationen über die Fahrzeugnutzung (Tabelle 3.2) zu verwenden, um daraus den realen Energiebedarf in Abhängigkeit von der parametrierten Fahrzeug-, Antriebs- und Nebenverbraucherkonfiguration abzuleiten. Die Nutzung des Fahrzeugs wird dabei durch die folgenden zeitabhängig aufgezeichneten Variablen beschrieben. Da nicht alle Merkmale durch alle Datenlogger zu erfassen sind, können fehlende Merkmale unter Umständen über Bedingungen aus anderen Daten hergeleitet werden. So kann z.B. davon ausgegangen werden, dass der Fahrzeugzustand *Status_{Fzg}* = "an" lautet, wenn sich das Fahrzeug bewegt (v_{Fzg} >0). Auch kann anhand der Außentemperatur abgeschätzt werden, ob und wie die HVAC-Anlage betrieben wird.

Parameter	Beschreibung	Einheit	Quelle
t	Datum und Zeit	datetime	Fahrzeug- Datenlogger
v _{Fzg}	Fahrzeug-Geschwindigkeit	km/h	Fahrzeug- Datenlogger
Mod_{Fzg}	Fahrzeugzustand ("Zündung")	an/aus	Fahrzeug- Datenlogger

Parameter	Beschreibung	Einheit	Quelle
$\vartheta_{Luft,I}$	Lufttemperatur in der Fahrerkabine	°C	Fahrzeug-
			Datenlogger
$\vartheta_{Luft,U}$	Temperatur der Umgebungsluft	°C	Fahrzeug-
			Datenlogger
Lat _{Fzg}	Standort des Fahrzeugs, Breitengrad	0	Fahrzeug-
			Datenlogger
Lon _{Fzg} :	Standort des Fahrzeugs, Längengrad	0	Fahrzeug-
			Datenlogger
m _{Fzg}	Gesamtgewicht Fahrzeug	kg	Annahme
			Beladung
# _{Personen}	Anzahl Personen in der	(-)	Annahme
	Fahrgastkabine		Besetzung
$P_{Laden,verfügbar}$	aktuell verfügbare Ladeleistung	kW	Fahrzeug-
			Datenlogger

Tabelle 3.2: Übersicht Logger-Eingangsgrößen Energiemodell

Die Umgebungsbedingungen können, wenn nicht bereits direkt am Fahrzeug erfasst, aus anderen Quellen zugeordnet werden. Der Fahrzeugstandort, beschrieben über die geografischen Längen- und Breitenkoordinate wird zusammen mit dem Zeitstempel verwendet, um folgende Daten aus Sekundärdatenquellen (insbesondere Wetterdatenbanken, geografische Höhenmodelle, digitale Karten) anzureichern (Tabelle 3.3). Damit stehen zusätzlich diese Umgebungsbedingungen als Eingangsgröße für die Energiesimulation zur Verfügung.

Parameter	Beschreibung	Einheit	Quelle
h_{Fzg}	geographische Höhe	m über NN	Sekundärdaten
<i>q_{Fzg}</i>	Steigung des Fahrweges	%	(Bundesamt für Kartographie und Geodäsie o. J.)
$\vartheta_{Luft,U}$	Temperatur der Umgebungsluft	°C	
rH _{Luft,U}	relative Feuchte der Umgebungsluft	°C	Sekundärdaten (Deutscher Wetterdienst 2020)
γs	Höhenwinkel der Sonne über dem Horizont	0	
α_S	Azimut der Sonneneinstrahlung	0	
P _{Sonne,global}	spezifische Globalstrahlungsleistung der Sonne	W/m ²	
P _{Sonne,diff}	spezifische diffuse Strahlungsleistung der Sonne	W/m ²	

Tabelle 3.3: Übersicht zusätzliche Eingangsdaten Energiemodell

Aufgrund der Verfügbarkeit geeigneter Daten und den in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Potenzialen für die Elektromobilität wird das Modell zunächst mit Daten eines leichten Nutzfahrzeugs aus dem Segment Stadtlieferwagen parametriert und validiert, beschrieben in Abschnitt 3.5. Im Rahmen des Projekts EN-WIN wurden darüber hinaus weitere eNfz von 3,9t bis 40t zGG betrachtet. Notwendige Anpassungen am Modell für ein 3,9t-eNfz werden im Abschnitt 3.6 beschrieben. Die Einflussfaktoren Beladung, Wind und Niederschlag wurden mit mittlerem Einfluss bewertet, stehen jedoch in den Daten nicht zur Verfügung. Daher wird im Modell der Einfluss von Wind und Niederschlag vernachlässigt und eine konstante Beladung angenommen.

3.4 Aufbau Gesamtfahrzeugenergiemodell

Am Fachgebiet Fahrerverhaltensbeobachtung für energetische Optimierung und Unfallvermeidung der TU Berlin wurden in der Vergangenheit Modelle zur Energiesimulation von Fahrzeugen mit unterschiedlichen Antrieben erarbeitet. Eingesetzt und verfeinert wurden diese bisher in den Projekten NET-ELAN (Linssen et al. 2012), komDRIVE (Arndt et al. 2016) und EN-WIN (Jerratsch et al. 2020). Dieses Kapitel beschreibt den Aufbau des auf diesen Vorarbeiten aufbauenden, hier verwendeten Gesamtfahrzeug-Energiemodells. Weiterentwicklung für diese Dissertation erfolgte dabei insbesondere im Nebenaggregatemodell und bei der Parametrierung der betrachteten Fahrzeuge.



Abbildung 3-3: Gesamtübersicht Energiemodell

Abbildung 3-3 zeigt die Grundstruktur des Fahrzeug-Energiemodells. Das Modell besteht aus den Modulen Antriebsstrang, Nebenaggregate, Ladegerät und Batterie. Das Modul Antriebsstrang berechnet rückwärts aus den Eingangsgrößen Geschwindigkeit v_{Fzg} , Steigung q_{Fzg} , Gewicht m_{Fzg} über die Fahrwiderstände und Wirkungsgradkennfelder von elektrischer Maschine und Leistungselektronik die zur Fahrzeugbewegung benötigte elektrische Leistung $P_{Antrieb,DC}$. Im Modul Nebenaggregate wird aus Temperaturen ϑ_{Kabine} , $\vartheta_{Umgebung}$, relativer Feuchte rF, der Sonneneinstrahlung S und der Geschwindigkeit v_{Fzg} die Nebenverbraucherleistung $P_{NA,DC}$ berechnet. Das Modul Ladegerät simuliert kennfeldbasiert das Laden der Batterie über eine anliegende AC-Ladeleistung $P_{Laden,AC}$. Im Modul Batterie werden die Einzelleistungen zur System-Leistung P_{Batt} aufaddiert, über der Zeit integriert und der SoC der Traktionsbatterie bestimmt. Die einzelnen Modellkomponenten werden in den folgenden Abschnitten detailliert vorgestellt.

3.4.1 Fahrenergiebedarfsmodell (Antriebsstrang)

Die Fahrwiderstandsberechnung bildet die Basis für alle recherchierten Simulationsansätze für den Fahrenergieverbrauch in der Literatur. Eingangsparameter zur Beschreibung der Fahrzeugnutzung sind zeitabhängige Zustände der Geschwindigkeit, der Steigung und der Fahrzeugmasse. Das in diesem Modell implementierte Prinzip des batterieelektrischen Antriebsstrangs eines Elektrofahrzeugs zeigt Abbildung 3-4.



Abbildung 3-4: Antriebmodell BEV (eigene Darstellung nach Linssen et al. 2012, S. 35)

Die zum Antrieb des Fahrzeugs benötige Energie wird rückwärts über ein Längsdynamikmodell direkt aus den per Datenlogger aufgezeichneten Nutzungsdaten berechnet (Abbildung 3-5). Aus den Verläufen der Eingangsgrößen wird über die fahrzeugspezifischen Fahrwiderstände die mechanische Leistungsanforderung an der E-Maschine (Drehmoment *M* und Drehzahl *n*) bestimmt. Aus diesen leitet sich über die Wirkungsgradkennfelder von Elektromotor und Leistungselektronik der Leistungsbedarf an der Traktionsbatterie ab.



Abbildung 3-5: Übersicht Antriebsstrang-Modell

3.4.1.1 Fahrzeugmodell



Abbildung 3-6: Berechnung von Motormoment und -drehzahl

Das Fahrzeugmodell berechnet sequenziell aus den Eingangsparametern den Gesamtfahrwiderstand und dann entlang des Antriebstrangs über Rad, Bremse, Differential und Getriebe die herrschenden Drehmomente und Drehzahlen bis zur Abtriebswelle der Elektrischen Maschine (Abbildung 3-6).

3.4.1.1.1 Fahrwiderstand

Der Gesamtfahrwiderstand F_W wird entlang der im Kap 2.3.2 dargestellten Logik berechnet. Dabei finden Rollwiderstand, Vorspurwiderstand, Steigungswiderstand, translatorischer Anteil des Beschleunigungswiderstands und Luftwiderstand Berücksichtigung.

3.4.1.1.2 Räder und Bremse

Das Reifenmodell dient der Berechnung der Raddrehzahl Ω_{Rad} aus der Fahrzeuggeschwindigkeit v_{Fag} und dem dynamischen Rollradius r_{dyn} nach (17). Das Radmoment berechnet sich aus der Gesamtfahrwiderstandskraft F_{W} , dem dynamischen Rollradius r_{dyn} , der Radbeschleunigung $\dot{\Omega}_{Rad}$, und dem Gesamtträgheitsmoment des Antriebsstranges J_{Ges} nach (18). Vereinfachend wird das Trägheitsmoment aller rotierenden Komponenten bereits hier in das Radmoment nach (10) zusammengefasst. Dadurch ergibt sich eine obere Abschätzung der Antriebsstrang-Verluste in (24), da das zu übertragende Moment in Getriebe und Differential real kleiner ist.

$$\Omega_{Rad} = \frac{v_{Fzg}}{r_{dyn}} \tag{17}$$

$$M_{Rad} = F_W \cdot r_{dyn} + \dot{\Omega}_{Rad} \cdot J_{Ges} \tag{18}$$

Wie in Abschnitt 2.3.2.7 erwähnt, wird das Auftreten von Schlupf vernachlässigt.

In modernen Elektrofahrzeugen ist man bestrebt, einen möglichst großen Teil der beim Verzögern verfügbaren mechanischen Energie mittels Rekuperation wieder in elektrische Energie zu wandeln und in der Traktionsbatterie zu speichern. Diesem Ansatz trägt auch das hier beschriebene Modell Rechnung, indem immer bis zum geschwindigkeitsabhängigen, maximal möglichen Rekuperationsmoment der E-Maschine die Verzögerung durch Rekuperation modelliert ist. Erst beim Überschreiten dieses maximalen Rekuperationsmoments wird die Radbremse aktiv, um das zusätzlich benötigte Bremsmoment bereitzustellen. Um die Momenteneinleitung korrekt am Rad darzustellen, die Verluste im Antriebsstang richtig abzubilden und dennoch das volle Rekuperationsmoment an der E-Maschine ausnutzen zu können, ist es nötig, das maximale Rekuperationsmoment der E-Maschine unter Berücksichtigung der Momentanwerte für Verluste und Geschwindigkeit auf die Rad-Position umzurechnen. Dies erfolgt über die in Abbildung 3-6 dargestellte Rückkopplung der Verluste von Getriebe und Differential *M*_{Verlust,bisEM} und die Gesamtübersetzung im Antriebsstrang *i*_{ges} nach (19). Das maximale Rekuperationsmoment der EM *M*_{Reku,max,EM} ist dabei durch ein drehzahlabhängiges Kennfeld, dass vom Gesamtsystem elektrische Maschine, Leistungselektronik und Batterie abhängt, beschrieben.

$$M_{Reku,max,Rad} = \left(M_{Reku,max,EM} + M_{Loss}\right) \cdot i_{ges}$$
(19)

Die modellierte Bremse bringt nun im Verzögerungsfall ein Bremsmoment M_{Bremse} nach (20) auf, das an das Differential weitergegebene gebremste Moment $M_{Rad,gebremst}$ folgt demnach (21).

$$M_{Bremse} = \begin{cases} M_{Rad} - M_{Reku,max,Rad} & wenn \ M_{Rad} > M_{Reku,max,Rad} \\ 0 & sonst \end{cases}$$
(20)

$$M_{Rad,gebremst} = M_{Rad} - M_{Bremse}$$
(21)

3.4.1.1.3 Differenzial und Getriebe

Die Übersetzungsstufen im Differential und im Getriebe werden zusammengefasst und wandeln zum einen Drehmoment (22) und Drehzahl (23) über das Gesamt-Übersetzungsverhältnis i_{ges} . Ferner wird ein Wirkungsgrad der mechanischen Wandlung (24) von η_A = 95% angesetzt (Komarnicki et al. 2018b, S. 48) und bei der Berechnung der Sollwertvorgabe des EM-Moments berücksichtigt.

$$M_{EM,Soll} = \frac{M_{Rad,gebremst} - abs(M_{Getriebe,Verlust})}{i_{ges}}$$
(22)

$$\Omega_{Aus} = \Omega_{Ein} \cdot i_x \tag{23}$$

$$M_{Getriebe, Verlust} = M_{Rad} \cdot \left(\frac{1}{\eta_A} - 1\right)$$
⁽²⁴⁾

3.4.1.2 Elektrische Maschine und Leistungselektronik

Das implementierte EM-Modell beruht auf einem Zwei-Quadranten-Wirkungsgradkennfeld (Rückwärtsfahrten werden analog zu Vorwärtsfahrten behandelt) η_{EM} , dass die benötigte bzw. verfügbare elektrische Wechselstromleistung der $P_{EM,el}$ bestimmt (25).

$$P_{EM,el} = \left(\Omega_{EM} \cdot M_{EM,Ist}\right) \cdot \eta_{EM}$$
⁽²⁵⁾

Die Leistungselektronik (LE) wurde ebenfalls über ein Wirkungsgradkennfeld umgesetzt und berechnet die benötigte bzw. verfügbare Gleichstromleistung P_{LE} (26).

$$P_{LE} = P_{EM,el} \cdot \eta_{LE} \tag{26}$$

Je nach Fahrzeug ist das Moment des Antriebs (und damit auch die Leistung) geschwindigkeitsabhängig begrenzt. Dies ist für Antriebs- und Rekuperationsbetrieb in (27) beschrieben.

$$M_{EM,Ist}$$

$$= \begin{cases} \min(M_{EM,Soll}, M_{EM,max,Antr}(n_{EM})) & wenn M_{EM} > 0 \ (Antrieb) \\ \max(M_{EM,Soll}, M_{EM,min,Reku}(n_{EM})) & wenn M_{EM} < 0 \ (Rekuperation) \end{cases}$$
(27)

Durch die Rückwärtsberechnung der EM-Leistung aus dem Fahrprofil kann sich die Situation ergeben, dass das berechnete Soll-Moment über dem maximal verfügbaren Moment liegt. Diese Fälle werden durch einen Soll-Ist-Abgleich ausgegeben und können bei Bedarf in weitere Auswertungen einfließen. Da gleichartige Elektrofahrzeuge in den betrachteten Stadtverkehrsbedingungen bei niedrigen und mittleren Geschwindigkeiten im Vergleich zu Dieselfahrzeugen regelmäßig über ein größeres Maximalmoment verfügen, war diese Einschränkung im Rahmen dieser Dissertation nicht relevant. Zur Realisierung von hohen Verzögerungen, die nicht über die Rekuperation abgebildet werden können, wurde die Bremse (Abschnitt 3.4.1.1.2) modelliert.

3.4.2 Nebenaggregatemodelle - Einleitung

Wie einleitend beschrieben, ist neben dem Fahrenergiebedarf der Energiebedarf der Nebenaggregate nicht zu vernachlässigen. Im Elektrofahrzeug werden Nebenaggregate entweder direkt über die Hochvoltbatterie versorgt (HV-Nebenverbraucher) oder über das Niederspannungs-Bordnetz und die 12V- bzw. 24V-Batterie, die über einen DCDC-Wandler ebenfalls aus der Hochvoltbatterie gespeist werden (NV-Nebenverbraucher). Aus Energieeffizienz- und Strombegrenzungsgründen werden die
Hauptverbraucher Heizung und Klimakompressor der HVAC-Anlage als HV-Nebenverbraucher ausgeführt. In Pkw- und leichten Nfz werden aktuell alle anderen Nebenaggregate als NV-Nebenverbraucher ausgeführt. Dies bedingt sich insbesondere durch die Möglichkeit auf vorhandene kosteneffiziente Komponenten aus konventionellen Fahrzeugen zurückzugreifen. Bei schweren Nfz zeichnet sich ab, dass weitere energieintensive Nebenverbraucher, wie z.B. Kälteaggregate zur Kühlung des Laderaums, an das HV-Netz angeschlossen werden. Aufgrund der energetischen Dominanz liegt der Fokus dieser Dissertation auf der HVAC-Anlage (Abschnitt 3.4.3). Die Berücksichtigung der NV-Nebenverbraucher wird im darauffolgenden Abschnitt 3.4.4 dargelegt (Abbildung 3-7).



Abbildung 3-7: Übersicht Nebenaggregate-Energiemodell

Wie in Abschnitt 2.1.3 diskutiert, werden die HV-Nebenverbraucher (HVAC-Anlage mit PTC-Heizer und Klimakompressor) in der Simulation nutzungsabhängig betrachtet. Bei der Betrachtung der NV-Nebenverbraucher zeigt sich eine geschwindigkeits- und temperaturabhängige Berücksichtigung als sinnvoll wie bereits in Abschnitt 2.1.3.3 abgeleitet.

3.4.3 Heizung und Klimaanlage

Die Hochvoltnebenverbraucher aktueller Elektrofahrzeuge sind PTC-Heizer und Klimakompressor bzw. Wärmepumpe. Um die Energiebedarfe näherungsweise zu bestimmen, wird ein thermisches Modell des Fahrgastraums verwendet. Dies ermöglicht die Ableitung der Energiebedarfe aus den oben beschriebenen, einfach zu erfassenden Messgrößen.

In diesem Abschnitt werden das thermische Modell des Fahrgastraums mit seinen Bestandteilen, sowie der Heiz-/Kühlkreis mit der Steuerung der HVAC-Anlage beschrieben (s. Abbildung 3-8).



Abbildung 3-8: Übersicht HVAC- und Fahrgastraummodell

Während in den hier betrachteten Anwendungsfällen in Europa der Heizfall im Vordergrund steht, ist bei einer globalen Betrachtung in vielen Regionen der Welt der Kühlfall dominant (Westerloh 2019, S. 63).

3.4.3.1 Thermisches Modell des Fahrgastraums

Zur Bestimmung der erforderlichen Heiz- und Kühlleistungen wurde ein Modell in Anlehnung an Konz et al. 2011, 18ff aufgebaut. In diesem Abschnitt wird der Modellaufbau am Beispiel eines elektrischen Stadtlieferwagens beschrieben. Diesem liegen folgende Annahmen und Randbedingungen zugrunde (s.a. Abbildung 3-9):

- Der Fahrzeuginnenraum wird als zwei homogene Luftmassen, die Fahrerkabine und den Laderaum, getrennt betrachtet. Wärmeübertrag zwischen beiden Luftmassen kann durch Konvektion über eine Trennwand stattfinden.
- Die Fahrerkabine wird von den Karosserieflächen Spritzwand SW, Seitenteile KS, Dach Da, Boden Bo, Rück- bzw. Trennwand TW und den Scheibenflächen Frontscheibe FS und Seitenscheiben SS begrenzt.
- Der Laderaum LR ist analog durch Karosserieflächen ohne Scheiben begrenzt und über die Trennwand und einen Luftspalt LS mit der Kabine verbunden.
- Alle Einbauten und deren thermische Massen liegen im Fahrgastraum, im Laderaum werden keine zusätzlichen thermischen Massen berücksichtigt.
- Je Insasse wird ein Wassereintrag von 30g/h und ein Wärmeeintrag von 117W berücksichtigt (Großmann 2013, S. 20–21).



Abbildung 3-9: Abmessungen Kabine und Laderaum des Nutzfahrzeug-Modells (h: Höhe, l: Länge, b: Breite)

Das Modell wurde aus Gründen der Rechenzeit, der Reduktion der Implementierungskomplexität und bedingt durch die Verfügbarkeit von Eingangs- und Validierungsdaten als zwei-Zonen-Temperaturmodell aufgebaut und besteht aus der homogenen Luftzone Fahrerkabine und der homogenen Luftzone Laderaum. Während zur Bewertung der Komfortsituation der Fahrgäste detailliertere Mehrzonenmodelle zum Einsatz kommen, ist dieses Vorgehen im Kontext der thermischen Fahrgastraum-Modellierung zur Abschätzung des Heiz-/Klima-Energiebedarfs als hinreichend genau anerkannt (Westerloh und Köhler 2014, S. 8; Baumgart 2010, S. 107). Die Abbildung 3-10 zeigt schematisch die implementierten Wärmeübertragungsmechanismen für die Fahrgastkabine.



Abbildung 3-10: Wärmeströme und Bilanzräume des Fahrzeugmodells (in Anlehnung an Konz et al. 2011, S. 18)

Da zum Umluftbetrieb keine Nutzungsdaten vorliegen und die Umluftphasen im Allgemeinen nur zeitlich begrenzt genutzt werden, wird von dauerhaftem Frischluftbetrieb ausgegangen.

Im Folgenden werden die implementierten Bilanzräume und Wärmeströme, die über Differenzialgleichungssysteme gekoppelt sind, vorgestellt.

3.4.3.1.1 Temperatur Kabinenluft

Die Lufttemperatur der Fahrerkabine bildet die Ziel- und Regelgröße der Heiz- und Klimaregelung des HVAC-Systems. Sie berechnet sich aus spezifischer Enthalpie *h* und Wasserbeladung *x* der Kabinenluft unter Berücksichtigung der Wärmekapazitäten $c_{p,Luft}$ und c_{Wasser} sowie der Verdampfungsenthalpie von Wasser $h_{verdampfen}$ (28).

$$\vartheta_{Kabine} = \frac{\left(h - h_{Verdampfen} \cdot x\right)}{\left(c_{p,Luft} + c_{Wasser} \cdot x\right)}$$
(28)

Im Modell wird ausgehend von einem mit der Starttemperatur ϑ_0 durchkonditionierten Fahrzeug über Differentialgleichungen und Energiebilanzen die Momentantemperatur ϑ_{Kabine} in Abhängigkeit aller relevanten Wärmezu- und -abflüsse berechnet.

Bei Vernachlässigung von kinetischer und potenzieller Energie ergibt sich die Änderung der Kabinenluft-Enthalpie über der Zeit $\frac{\partial H_{Kabine}}{\partial t}$ nach (29).

$$\frac{\partial H_{Kabine}}{\partial t} = \sum_{i} \dot{Q}_{Karosserie,innen} + \dot{Q}_{Einbauten} + \dot{Q}_{HVAC,Heizen}(t) + \dot{Q}_{HVAC,Klima}(t)$$

$$+ \dot{Q}_{Personen} + \dot{Q}_{Einstrahlung} + (\dot{m}_{Gebläse} + \dot{m}_{Leckage}) \cdot (h_{U} - h_{Kabine})$$

$$(29)$$

Hierbei bezeichnet $\dot{Q}_{Karosserie,innen}$ den konvektiven Wärmestrom zwischen Kabinenluft und Karosserie inkl. Verscheibung, und $\dot{Q}_{Einbauten}$ denjenigen zwischen Kabinenluft und Einbauten. \dot{Q}_{HVAC} beschreibt die über das HVAC-System zu- oder abgeführte, $\dot{Q}_{Einstrahlung}$ die globalstrahlungsbedingte und $\dot{Q}_{Personen}$ die durch die Insassen zugeführte Wärmeleistung. Durch Entlüftungsöffnungen entweicht ein Massenstrom, der demjenigen des Gebläsemassenzustroms entspricht. Gleichzeitig stellen sich geschwindigkeitsabhängige Leckageluftströme ein. Der Term $(\dot{m}_{Gebläse} + \dot{m}_{Leckage}) \times (h_U - h_{Kabine})$ berücksichtigt daher die aufgrund von Feuchte- und Temperaturunterschieden vorliegende energetische Differenz der zu- und abströmenden Massen.

$$\frac{\partial X_{Kabine}}{\partial t} = \left(\dot{m}_{Gebläse} + \dot{m}_{Leckage} \right) \cdot \left(x_{Umgebung} - x_{Kabine} \right) + \dot{m}_{Wasser,HVAC} + \dot{m}_{Wasser,Personen}$$
(30)

Die Bilanz der Wasserbeladung ergibt sich aus der Differenz der mit den Luftströmen zugeführten Umgebungsfeuchte und der abgeführten Innenraumfeuchte ($\dot{m}_{Gebläse} + \dot{m}_{Leckage}$) × ($x_{Umgebung} - x_{Kabine}$), dem (negativen) Kondensatstrom der Klimaanlage $\dot{m}_{Wasser,HVAC}$, sowie dem Wassereintrag durch die Insassen $\dot{m}_{Wasser,Personen}$ (30). Zu- und abgeführter Massenstrom sind hierbei gleich groß.

3.4.3.1.2 Temperatur Laderaum

Das Laderaummodell ist analog zum Fahrgastraummodell aufgebaut. Es unterscheidet sich lediglich in den Punkten:

- Geometrie
- Keine Durchströmung mit Außenluft durch Gebläse oder Leckagen
- Keine inneren Wärmequellen wie Passagiere
- Keine Temperierung des Laderaums implementiert
- Kein direkter Energieeintrag durch solare Bestrahlung, da keine Verscheibungen

Damit berechnet sich die Laderaumtemperatur analog nach (28). In Analogie zu (29) ergibt sich die Enthalpieänderung der Luftmasse im Laderaum nach (31) aus den Wärmeströmen durch die Karosserieelemente um den Laderaum.

$$\frac{\partial H_{LR}}{\partial t} = \sum_{i} \dot{Q}_{Karosserie,innen}$$
(31)

3.4.3.1.3 Kurzwellige solare Einstrahlung

Über die solare Einstrahlung wird Wärme in die Fahrzeugkabine eingetragen. Im Modell berücksichtigt ist der Treibhauseffekt, der entsteht, da Strahlung im sichtbaren Spektrum aufgrund von Transmission durch die Verscheibung eintritt, an den Einbauten im Inneren absorbiert wird. Die sich erwärmenden Einbauten emittieren langwellige (infrarote) Strahlung, für die die Verscheibung undurchlässig ist (Großmann 2013, S. 124). Die Aufheizung der Außenflächen und Einlasskanäle durch solare Einstrahlung wird im Modell hingegen vernachlässigt. Die Einstrahlung durch die Scheiben erfolgt aufgrund eines direkten und eines diffusen Anteils der solaren Strahlung. Die Werte für die solare Bestrahlungsstärke auf eine horizontale Fläche $E_{G,hor}$ ergeben sich nach (32) aus einem direkten und einem diffusen Anteil. Die Berechnung des auf solare Einstrahlung zurückzuführenden Energieeintrags folgt den Darstellungen in Quaschning 2015, 70ff, Baumgart 2010, 120ff und Großmann 2013, 103ff.

$$E_{G,hor} = E_{dir,hor} + E_{diff,hor}$$
(32)

Die energetischen Anteile von direkter und diffuser Strahlung belaufen sich in Deutschland im Jahresmittel auf ähnlich hohe Werte. Mit Abstand zum Äquator steigt der Anteil an der diffusen Strahlung an (Quaschning 2015, S. 70). Die Bestrahlungsstärken von diffuser und direkter Sonneneinstrahlung auf eine horizontale Fläche können sensorisch oder über Wetterdatenbanken ermittelt werden (vgl. Kap 2.4). Bei der Betrachtung von geneigten Ebenen ist ferner die vom Untergrund reflektierte Strahlung $E_{ref,gen}$ zu betrachten.

$$E_{G,gen} = E_{dir,gen} + E_{diff,gen} + E_{ref,gen}$$
(33)

Direkte solare Einstrahlung auf die geneigte Ebene

Zur Berücksichtigung der solaren Einstrahlung für die Erwärmung des Fahrzeugs sind neben der durch Sekundärdatenzuordnung erhältlichen Bestrahlungsstärke und -richtung auch die Neigung und Ausrichtung der einzelnen Fenster des Fahrzeugs zu betrachten.

Da die direkte Einstrahlung gerichtet vorliegt, ist die Lage der Fahrzeugscheibe relativ zur horizontalen Ebene zu berücksichtigen. Es ist die durch die geneigte Scheibe auf eine dahinter liegende horizontale Fläche projizierte Fläche A_{proj} zu berechnen. Die dafür zugrunde liegenden geometrischen Zusammenhänge zeigt Abbildung 3-11. Hierbei bezeichnet *s* Sonnenvektor, *n* Flächennormale, α_s Sonnenazimut, α_E Azimut der geneigten Ebene, γ_s Sonnenhöhe und γ_E Höhenwinkel der geneigten Ebene.



Abbildung 3-11: Bestimmung des Sonneneinfallswinkels auf eine geneigte Ebene (Quaschning 2015, S. 75)

Die Flächennormalen werden positiv in Richtung Norden, Westen und Zenit definiert. Der Winkel θ_{gen} zwischen Sonnenvektor *s* und Flächennormaler *n* berechnet sich nach (34), die direkte Bestrahlungsstärke auf die geneigte Ebene nach (35). Soll wie im vorliegenden Fall nur eine Bestrahlung der Fläche von vorne (beim Fahrzeug von außen und nicht auch von innen) berücksichtigt werden, führt ein Winkel von $\theta_{gen} > 90^{\circ}$ zu keiner direkten Einstrahlung. Es gilt (36)

$$\theta_{gen} = \arccos(s \cdot n) = \arccos(-\cos\gamma_s \cdot \sin\gamma_E \cdot \cos(\alpha_s - \alpha_E) + \sin\gamma_s \cdot \cos\gamma_E)$$
(34)

$$E_{dir,gen} = E_{dir,hor} \frac{\cos \theta_{gen}}{\sin \gamma_S}$$
(35)

$$\cos \theta_{gen} = \begin{cases} \cos \theta_{gen} & \text{, wenn } \cos \theta_{gen} \ge 0 \\ 0 & \text{, wenn } \cos \theta_{gen} < 0 \end{cases}$$
(36)

Sonnenhöhe γ_S und Sonnenazimut α_S bestimmen sich aus der geografischen Lage des Fahrzeugs, Datum und Tageszeit. Hierfür werden nach (37), (38), (39) über den Parameter *J*, die Sonnendeklination δ und die Zeitgleichung *ZgI* bestimmt.

$$J_{ZGL} = 360^{\circ} \cdot \frac{Tag \ des \ Jahres}{Anzahl \ Tage \ im \ Jahr}$$
(37)

$$\delta = [0,3948 - 23,2559 \cdot \cos(J + 9,1^{\circ}) - 0,3915$$

$$\cdot \cos(2 \cdot J_{ZGL} + 5,4^{\circ}) - 0,1764 \cdot \cos(3 \cdot J_{ZGL} + 26^{\circ})]$$
(38)

$$Zgl = [0,0066 + 7,3525 \cdot cos(J_{ZGL} + 85,9^{\circ}) + 9,9359 \cdot cos(2 \cdot J_{ZGL} + 108,9^{\circ}) + 0,3387 \cdot cos(3 \cdot J_{ZGL} + 105,2^{\circ})]min$$
(39)

Nach (40), (41), (42) berechnen sich mittlere (*MOZ*) und wahre Ortszeit (*WOZ*) und Stundenwinkel ω der Sonne. Berücksichtigt hierbei werden die lokale Zeit *LZ*, die Zeitzone (*MEZ*: -1h oder *MESZ*: -2h) und die geografische Länge *lon*.

$$MOZ = LZ + Zeitzone + 4 \cdot lon \cdot \frac{min}{\circ}$$
(40)

$$WOZ = MOZ + Zgl \tag{41}$$

$$\omega = (12:00h - WOZ) \cdot 15^{\circ}/h \tag{42}$$

Über die geografische Breite *lat* bestimmen sich Sonnenhöhe γ_S und Sonnenazimut α_S nach (43) und (44).

$$\gamma_{S} = \arcsin(\cos\omega \cdot \cos \, lat \cdot \cos\delta + \sin \, lat \cdot \sin\delta) \tag{43}$$

$$\alpha_{S} = \begin{cases} 180^{\circ} - \arccos\left(\frac{\sin\gamma_{S} \cdot \sin lat - \sin\delta}{\cos\gamma_{S} \cdot \cos lat}\right) f \ddot{u}r \ WOZ \le 12:00h \\ \left\{180^{\circ} + \arccos\left(\frac{\sin\gamma_{S} \cdot \sin lat - \sin\delta}{\cos\gamma_{S} \cdot \cos lat}\right) f \ddot{u}r \ WOZ > 12:00h \end{cases}$$
(44)

Bestimmung der Ausrichtung des Fahrzeugs

Falls nicht im Datensatz enthalten, kann mithilfe der GPS-Koordinaten und eines Signals für Rückwärtsfahrten die Fahrzeugausrichtung α_{Fzg} bestimmt werden. Dabei ist für die Berechnung des Winkels zwischen Sonnen- und Flächennormaler darauf zu achten, dass die Winkel analog gewählt werden, hier von -90°=Osten über 0°=Süden, über 90°=Westen, 180° bzw. -180° = Norden wie in Abbildung 3-12. Die Berücksichtigung der Rückwärtsfahrten ist insbesondere bei der Betrachtung von in der Sonne geparkten Fahrzeugen relevant und daher nicht zu vernachlässigen.



Abbildung 3-12: Codierung der Himmelsrichtungen für Sonnenazimut as und Fahrzeugausrichtung aFzg

Bestimmung der Ausrichtung der Fahrzeugscheiben

Es wird vereinfachend davon ausgegangen, dass alle Fahrzeugscheiben eben und im Fahrzeug nach Tabelle 3.4 angeordnet sind.

Scheibe (i)	Azimut-Winkel α _i relativ zur Fahrzeugrichtung	Anstellwinkel γ _i relativ zur Horizontalen
Frontscheibe (FS)	$lpha_{Fzg}+0^{\circ}$	(+) Betrag abhängig von Fahrzeugtyp
Heckscheibe (HS)	$\alpha_{Fzg} + 180^{\circ}$	(-) Betrag abhängig von Fahrzeugtyp
Rechte Seitenscheibe (rSS)	$lpha_{Fzg}$ + 90°	(-) Betrag abhängig von Fahrzeugtyp
Linke Seitenscheibe (ISS)	$lpha_{Fzg}$ - 90°	(+) Betrag abhängig von Fahrzeugtyp

Tabelle 3.4: Übersicht Scheibenausrichtung

Diffuse solare Einstrahlung auf die geneigte Ebene

Ein einfacher isotroper Ansatz, der davon ausgeht, dass die diffuse Bestrahlungsstäke in allen Ebenausrichtungen gleich ist, und nur durch den Wegfall der Strahlung auf der Rückseite zu verringern ist, setzt mit Gleichung (45) an. In dieser Dissertation wird dagegen ein anisotroper Ansatz (46), (47) verwendet, da die Bestrahlungsdichte vor allem bei klarem Himmel stark von der Ausrichtung der Ebene abhängt (Quaschning 2015, S. 77).

$$E_{diff,gen} = E_{diff,hor} \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos \gamma_E)$$
(45)

$$F = 1 - \left(\frac{E_{diff,hor}}{E_{G,hor}}\right)^2 \tag{46}$$

$$E_{diff,gen} = E_{diff,hor} \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos \gamma_E)$$

$$\cdot \left(1 + F \cdot \sin^3 \frac{\gamma_E}{2}\right) \left(1 + F \cdot \cos^2 \theta_{gen} \cdot \cos^3 \gamma_S\right)$$
(47)

Reflektierte solare Einstrahlung auf die geneigte Ebene

Mithilfe eines isotropen Ansatzes und der in Tabelle 3.5 gelisteten Albedo-Werte A_S lässt sich die reflektierte Strahlungsenergie auf die geneigte Ebene mit (48) berechnen. Dieser vereinfachte Ansatz ist zulässig, da bei den geringen Albedo-Werten von Asphalt oder verwittertem Beton, wie er für Straßen angesetzt werden kann, der Anteil der Reflexion an der gesamten Einstrahlungsenergie als gering anzusehen ist (Mex 2019, S. 33).

Untergrund	Albedo As	Untergrund	Albedo As
Gras (Juli, August)	0,25	Asphalt	0,15
Rasen	0,18 0,23	Wälder	0,05 0,18
Trockenes Gras	0,28 0,32	Heide- und Sandflächen	0,10 0,25
Nicht bestellte Felder	0,26	Wasserfläche ($\gamma_S > 45^\circ$)	0,05
Nackter Boden	0,17	Wasserfläche ($\gamma_S > 30^\circ$)	0,08
Schotter	0,18	Wasserfläche ($\gamma_S > 20^\circ$)	0,12
Beton, verwittert	0,20	Wasserfläche ($\gamma_S > 10^\circ$)	0,22
Beton, sauber	0,30	Frische Schneedecke	0,80 0,90
Zement, sauber	0,55	Alte Schneedecke	0,45 0,70

Tabelle 3.5: Albedo für unterschiedliche Umgebungen (Quaschning 2015, S. 79)

$$E_{ref,gen} = E_{G,hor} \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos \gamma_E)$$
⁽⁴⁸⁾

Aufgrund der geringen sich ergebenden Werte und von Unsicherheit bzgl. der tatsächlichen,

umgebenden Flächen wird die reflektierte Solarstrahlung vernachlässigt.

Bestimmung des Transmissionsgrades der Fahrzeugscheiben

Bei der Verwendung von Klarglas kann bei senkrechter Sonneneinstrahlung von einem Transmissionsgrad τ_n über den gesamten Wellenlängenbereich von 77% für die Front- und 86% für die Heck- und Seitenscheiben ausgegangen werden (Großmann 2013, S. 115). Ferner hängt auch der Transmissionsgrad vom Einstrahlungswinkel ab. Diese Abhängigkeit wird nach Baumgart 2010, S. 123 über (49) angesetzt.

$$\tau = \tau_n - \left(\frac{\theta_{gen} \cdot \tau_n^{0,2}}{90^\circ}\right)^5 \tag{49}$$

Vereinfachend wird davon ausgegangen, dass die nicht durchgelassene Strahlung reflektiert wird, sodass keine strahlungsbedingte Erwärmung der Außenbauteile auftritt.

Absorption der Solarstrahlung im Fahrzeuginnenraum

Die durch die Scheiben ins Fahrzeuginnere gelangende Solarenergie wird an den Oberflächen des Fahrzeugsinnenraums mit deren jeweiligem Absorptionsgrad absorbiert und in Wärme umgewandelt. Der entstehende langwellige Wärmeaustausch zwischen den Bauteilen im Fahrzeuginneren wird vernachlässigt, da eine Transmission langwelliger Strahlung durch die Scheiben oder andere Begrenzungsflächen verhindert wird. Damit bleibt die eingetragene Energie im Inneren erhalten, bis sie über die Abluft oder Konvektion abgeführt wird. Tabelle 3.6 gibt eine Übersicht zu unterschiedlichen Absorptionskoeffizienten für solare Bestrahlung. Diese sind entsprechend der Innenausstattung des Fahrzeugs zu wählen.

Oberfläche in der Sonne	Absorptionskoeffizient α_{EB}
Schwarz	0,97 0,99
Weiß	0,12 0,26

Tabelle 3.6: Absorptionskoeffizienten von Oberflächen nach Farbe (Großmann 2013, S. 18)

3.4.3.1.4 Berechnung der Temperaturen für Bauteile der Umschließungsflächen

Bei der Bestimmung der Bauteiltemperaturen an der Fahrgastkabine werden zwei Fälle unterschieden: einwandige Bauteile (Scheiben, Trennwand, Karosserieteile im Bereich Laderaum) und zweiwandige bzw. isolierte Bauteile (Spritzwand, Karosserie-Seitenteile, -Dach, -Boden im Bereich Fahrerkabine). Den Unterschied veranschaulicht Abbildung 3-13.



Abbildung 3-13: Übersicht Bauteilbeschaffenheit der Innenraumbegrenzungsflächen

Die Berechnung der Wärmeübergänge erfolgt nach den Vorschriften des VDI-Wärmeatlas (VDI 2013) und wird im Folgenden beispielhaft für das Dach im Bereich der Fahrgastkabine dargelegt, gilt jedoch entsprechend auch für alle anderen Bauteile.

Das Dach im Bereich der Fahrgastkabine ist als verkleidetes Blech in Anlehnung an Baumgart 2010, S. 108 und Paulke et al. 2014, S. 14 modelliert mit den Schichten von außen (oben) nach innen (unten) Blech – Luftspalt – Verkleidung.

Die Temperaturen der einzelnen Schichten der Kabinenbauteile werden jeweils über Energiebilanzen bestimmt. Ausgehend von der Temperatur des durchkonditionierten Fahrzeugs ϑ_0 werden zu- und abströmende Wärmemengen bilanziert (50).

$$\frac{\partial \vartheta_{Dach,Blech}}{\partial t} = \frac{1}{c_{p,Blech,} \cdot m_{Dach,Blech}}$$
(50)
 $\cdot (\dot{Q}_{Dach,Blech,Konvektion,Innen} + \dot{Q}_{Dach,Blech,Konvektion,aussen} + \dot{Q}_{Dach,Blech,Strahlung,Umgebung})$

Die innen- und außenliegenden konvektiven Wärmeströme bestimmen sich aus den Vorgängen der freien bzw. erzwungenen Konvektion an überströmten, ebenen Flächen.

Die Konvektionsleistung an der ebenen Fläche bemisst sich über den Zusammenhang (51).

$$\hat{Q}_{Bauteil} = \alpha \cdot l_{Dach} \cdot b_{Dach} \cdot \Delta \vartheta_{Dach,Grenzschicht}$$
(51)

Hierbei bestimmt sich der Wärmeübergangskoeffizient α mit der Wärmeleitfähigkeit der Luft λ_{Luft} , der charakteristischen Länge der überströmten Fläche ll_{Fzg} und der Nusseltzahl Nu nach (52).

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_{Luft}}{ll_{Fzg}} \tag{52}$$

Zu beachten ist, dass sich die charakteristische Länge jeweils aus der überströmten Fläche ergibt, also ist $ll_{außen} = l_{Fzg}$ und $ll_{innen} = l_{Dach}$.

Je nach Strömungsverhältnissen der Luft müssen unterschiedliche Arten der Konvektion berücksichtigt werden. Bei stehender Luft (z.B. im Luftspalt, bei ausgeschaltetem Gebläse, beim stehenden Fahrzeug) findet allein freie Konvektion statt. Bei anliegender Relativgeschwindigkeit der Luft (Fahrtwind, Innengebläse) muss zusätzlich die erzwungene Konvektion berücksichtigt werden. Es kommt zur Mischkonvektion.

Freie Konvektion

Im Falle der freien Konvektion erhält man die Nusseltzahl *Nu* nach der Fallunterscheidung zwischen stabiler Grenzschicht (55) und Grenzschichtablösung. Im Heizfall (Winterbetrieb) entsteht ein Temperaturgradient von innen/unten (warm) nach außen/oben (kalt). Dadurch kommt es an den Oberseiten (Blech zu Umgebung und Verkleidung zu Zwischenspalt) zur Grenzschichtablösung. Hier wird je nach Reynoldszahl *Re* wiederum zwischen laminarer (*Re* <= 70.000) (53) und turbulenter (*Re* > 70.000) Strömung (54) unterschieden:

$$Nu_{Abl\bar{o}sung,lam} = 0,766 \cdot \left(Ra \cdot \left(1 + \left(\frac{0.322}{Pr} \right)^{\frac{11}{20}} \right)^{-\frac{20}{11}} \right)^{1,5}$$
(53)

$$Nu_{Abl\bar{o}sung,turb} = 0,15 \cdot \left(Ra \cdot \left(1 + \left(\frac{0.322}{Pr} \right)^{\frac{11}{20}} \right)^{-\frac{20}{11}} \right)^{\frac{1}{3}}$$
(54)

An den Unterseiten (Blech zu Zwischenspalt und Verkleidung zu Innenraum) hingegen tritt eine stabile Grenzschicht auf.

$$Nu_{stab} = 0.6 \cdot \left(\left(\left(\left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right) + 1 \right)^{-\frac{16}{9}} \cdot Ra \right)^{\frac{1}{5}}$$
(55)

In allen Fällen berechnet sich die Rayleighzahl aus Prantl- und Grashofzahl (56).

$$Ra = Gr \cdot Pr \tag{56}$$

Die Grashofzahl wiederum erhält man aus Umgebungstemperatur $\vartheta_{Umgebung}$, Temperaturdifferenz zwischen Dach und der umgebenden Luft $\Delta \vartheta_{Dach,Umgebung}$, der charakteristischen Länge des Daches ll_{Dach} und der kinematischen Viskosität der Luft ν_{Luft} (57).

$$Gr = \left(\frac{1}{\vartheta_{Umgebung} + 273.15}\right) \cdot \left(\frac{9.81 \cdot (ll_{Dach}^{3}) \cdot \Delta\vartheta_{Dach,Umgebung}}{\nu_{Luft}^{2}}\right)$$
(57)

Die charakteristische Länge der horizontalen, ebenen Fläche bezeichnet die Anströmlänge mit den Seitenlängen der rechteckigen Fläche a und b (58).

$$ll_{\text{Dach}} = \frac{a \cdot b}{2(a+b)} \tag{58}$$

Zum Fahrgastraum und zur Umgebung kann es abhängig von Gebläse- und Fahrzeuggeschwindigkeit auch zur erzwungenen Konvektion bzw. Mischkonvektion von freier und erzwungener Konvektion kommen. Im Luftzwischenspalt wird immer von freier Konvektion ausgegangen.

Erzwungene Konvektion

Zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten α nach Gleichung (52) setzt sich im Falle der erzwungenen Konvektion die Nusseltzahl aus einem laminaren und einem turbulenten Anteil zusammen (59)

$$Nu_{erzw} = 0.3 + \sqrt{Nu_{lam}^{2} + Nu_{turb}^{2}}$$
(59)

Beide Werte leiten sich aus Prantl- und Reynoldszahl her (60), (61).

$$Nu_{lam} = 0.644\sqrt{Re} \cdot \sqrt[3]{Pr} \tag{60}$$

$$Nu_{turb} = \frac{0.037 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr}{1 + 2.443 \cdot Re^{-0.1} \cdot \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)}$$
(61)

Die Reynoldszahl Re wiederum charakterisiert die Eigenschaften der Fluidströmung mit Strömungsgeschwindigkeit v_{Luft} , der charakteristischen Anströmlänge ll_{Fzg} und der kinematischen Viskosität der Luft v_{Luft} (62).

$$Re = \frac{v_{Luft} \cdot ll_{Fzg}}{v_{Luft}} \tag{62}$$

Mischkonvektion

Grundsätzlich tragen beide Konvektionsformen zum Wärmeübergang bei. Überwiegt eine der beiden Formen, kann der Wärmeübergang unter Vernachlässigung der anderen Form berechnet werden (keine oder hohe Relativgeschwindigkeiten). Im Übergangsbereich bei geringen Relativgeschwindigkeiten tragen beide Formen zum Wärmetransport bei und können bei gleichgerichteter Strömung über einen Komponentenansatz berücksichtigt werden (63).

$$Nu_{misch} = \sqrt[3]{Nu_{erzw}^3 + Nu_{frei}^3}$$
(63)

Bei anliegender Relativgeschwindigkeit zwischen Luft und Bauteil kommt es somit zur Überlagerung von freier und erzwungener Konvektion.

Langwelliger Strahlungsaustausch mit der Umgebung

Die durch ein Bauteil j mit der Umgebung ausgetauschte langwellige Strahlung hängt ab vom Emissionskoeffizienten ε_j , der Bolzmannkonstante σ , der Bauteilfläche A_j und den Temperaturen von Bauteil T_j und Umgebung T_U (64).

$$\dot{Q}_{Strahlung,Umgebung,j} = \varepsilon_j \cdot \sigma \cdot A_j \cdot \left(T_U^4 - T_j^4\right) \tag{64}$$

Im Modell berücksichtigt wird lediglich der Strahlungsaustausch mit der Umgebung. Der langwellige Strahlungsaustausch zwischen den Komponenten innerhalb des Fahrzeugs wird vernachlässigt. Dies ist möglich, da es sich hierbei nicht um Wärmeströme über die betrachtete Systemgrenze hinweg handelt und sie durch die vergleichsweise ähnlichen Temperaturniveaus der einzelnen Bauteile klein ausfällt. Ferner hat die modellierte Wärmekonvektion einen vergleichbar ausgleichenden Effekt.

Kurzwellige solare Einstrahlung

Der absorbierte Wärmestrom je Bauteil leitet sich aus dem Absorptionskoeffizienten α_j des Bauteils, sowie der in Abschnitt 3.4.3.1.3 beschriebenen Berechnung der solaren Einstrahlung ab.

3.4.3.1.5 Einbauten / thermische Massen in der Fahrerkabine

Die Einbauten (Instrumententafel, Mittelkonsole, Sitze, Lenkrad, Innenspiegel etc.), werden vereinfacht als eine Masse berücksichtigt. Die Temperaturänderung der Einbauten wird durch konvektiven Wärmeaustausch mit der Innenraumluft $\dot{Q}_{Konvektion,Einbauten}$, Sonneneinstrahlung durch die Scheiben $\dot{Q}_{Strahlung,Einbauten}$, sowie die Wärmekapazität $c_{Einbauten}$ und die Masse der Einbauten $m_{Einbauten}$ bestimmt (65).

$$\frac{\partial \vartheta_{Einbauten}}{\partial t} = \frac{\dot{Q}_{Konvektion,Einbauten} + \dot{Q}_{Strahlung,Einbauten}}{c_{Einbauten} \cdot m_{Einbauten}}$$
(65)

Der konvektive Wärmestrom $\dot{Q}_{Konvektion_Einbauten}$ wird analog zu den Bauteilen der Begrenzungsflächen bei freier Konvektion nach (66) berechnet. Er hängt von der Temperaturdifferenz zwischen Einbauten $\vartheta_{Einbauten}$ und Kabinenluft ϑ_{Kabine} , dem Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_{Einbauten}$ und der Oberfläche der Einbauten $A_{Einbauten}$ ab:

$$\dot{Q}_{Konvektion,Einbauten} = \alpha_{Einbauten} \cdot A_{Einbauten} \cdot (\vartheta_{Einbauten} - \vartheta_{Kabine})$$
(66)

Die durch die Einbauten absorbierte Strahlungsenergie (67) hängt allein von der Summe der durch alle $i=1..n_S$ Scheiben eingetretenen Strahlung ab. Vereinfachend wird angenommen, dass diese entsprechend des Absorptionskoeffizienten $\alpha_{Einbauten}$ komplett durch die Einbauten absorbiert wird. Der kurzwellige Teil der Strahlungsenergie, der wiederum durch die Scheiben entweicht und keine weitere Berücksichtigung im Modell erfährt, gleicht damit dem reflektierten Teil 1- $\alpha_{Einbauten}$.

$$\dot{Q}_{Strahlung,Einbauten} = \alpha_{Einbauten} \cdot \sum_{i}^{n_{S}} [E_{dir,gen,i} + E_{diff,gen,i}]$$
 (67)

3.4.3.2 Gebläse

3.4.3.2.1 Gesamtluftstrom Gebläse

Der Gesamtluftmassenstrom wird im realen Fahrzeug meist durch die Klima-Komfort-Steuerung geregelt. Falls keine Daten zu den realen Luftmassen- oder -volumenströmen vorliegen, werden Literaturwerte herangezogen. Großmann 2013 gibt maximal übliche Luftmassenströme an. In normalen Fahrsituationen wird üblicherweise ein geringerer Luftstrom eingestellt. Um dem gerecht zu werden, wird der Luftstrom mit 50% des Maximalwertes angesetzt. Im Winterfall wird zusätzlich

bewertet, ob die Heizung bereits im Stationärbetrieb arbeitet und der Luftstrom dann auf 25% des Maximalwertes verringert (68):

$$\dot{m}_{Luft,Gebläse}(t) = \dot{m}_{Gebläse,max} \cdot \begin{cases} 0,25 & \text{, wenn stationär und Heizfall} \\ 0,5 & \text{, sonst} \end{cases}$$
(68)

Zusätzlich werden geschwindigkeitsabhängig Leckageluftströme, die näherungsweise in Abbildung 3-14 auf der x-Achse abgelesen werden können, berücksichtigt. Der durch Leckagen und Entlüftungsöffnungen entweichende Luftmassenstrom bestimmt sich aus der Summe der Gebläse- und Leckageluftströme, sodass die Luftmasse im Fahrzeug zu jeder Zeit konstant bleibt.



Abbildung 3-14: Leckageluftlinien für B-Klasse/Mittelklasse-Pkw (Großmann 2013, S. 60)

Aufgrund der geringen Wärmekapazität von Luft und der kurzen Verweildauer der Luft bei Betrieb der HVAC werden in den Luftkanälen auftretende Wärmeverluste vernachlässigt.

3.4.3.2.2 Luftzustand Ausströmer

Die zur Regelung der HVAC wichtige mittlere Ausströmertemperatur $\vartheta_{Aus,Ist}$ (69) leitet sich nach dem Enthalpieansatz (70) aus den Bedingungen der Umgebungsluft und den in der HVAC zu- bzw. abgeführten Wärmemenge her. Liegt im Klimabetrieb die Sättigungswasserbeladung *x'*, deren Werte in Abhängigkeit des Enthalpiegehalts der Luft am Ausströmer tabelliert sind (Langeheinecke et al. 2013, S. 336), unter der Umgebungswasserbeladung, *x_{Umgebung}*, so strömt gesättigte Luft in die Kabine aus und es entsteht dabei ein Kondensatmassenstrom \dot{m}_{Wasser} (71).

$$\vartheta_{Aus,Ist}(t) = \frac{h_{Luft,Aus} - h_{Dampf} \cdot x_{Ausström}}{c_{p,Luft} + c_{p,Dampf} \cdot x_{Ausström}}$$
(69)

$$mit h_{Luft,Aus}(t) = h_{Luft,Umgebung}(t) + \frac{\dot{Q}_{HVAC,Heizen}(t) + \dot{Q}_{HVAC,Klima}(t)}{\dot{m}_{Luft,Aus}(t)}$$
(70)

$$\dot{m}_{Wasser}(t) = \left(x_{Umgebung} - x_{Ausström}\right) \cdot \dot{m}_{Luft,Aus}(t)$$

$$mit \ x_{Aus} = min \left\{ \begin{array}{c} x_{Umgebung} \\ x' \end{array} \right\}$$
(71)

Aus (69) und (71) ergibt sich zudem, dass bei Abkühlung der feuchten Luft entlang des Sättigungszustands zusätzlich die Verdampfungsenthalpie des entstehenden Kondensats abgeführt werden muss. (vgl. z.B. Westerloh 2019, S. 35–36).

Für die Bewertung von reichweitekritischen Einsatztagen sind vor allem Tage mit hohem Energieverbrauch relevant. Wie beschrieben ist die HVAC der energieintensivste Nebenverbraucher. Um Tage mit hohem HVAC-Energieverbrauch zu betrachten, müssen extrem kalte und extrem warme Tage bewerten werden. Diese Tage sind dadurch gekennzeichnet, dass das HVAC entweder als Heizung oder als Klimaanlage arbeitet, aber nicht beides gleichzeitig. Bei moderaten Temperaturen schalten HVAC unter Umständen in den Reheat-Betrieb, bei dem zur Entfeuchtung die Umgebungsluft zunächst am Kondensator stark abgekühlt und anschließend am Heizungswärmetauscher wieder auf die gewünschte Ausströmer-Temperatur aufgeheizt wird. Da im Schwerpunkt warme oder kalte Tage bei maximalem Energiebedarf betrachte werden, entfällt der Bedarf den Reheat-Betrieb im Modell zu implementieren.

3.4.3.3 Heizung und Klimaanlage im Fahrzeug

Die Regelung der HVAC-Anlage dient der Aufrechterhaltung von Komfort und Konzentrationsfähigkeit der Insassen, insbesondere des*der Fahrers*Fahrerin. Hierzu werden Temperatur und in begrenztem Umfang Luftfeuchte des Innenraums überwacht und konditioniert (DIN 1946-3, S. 5). Abbildung 3-15 zeigt den prinzipiellen Aufbau des modellierten Klima- und Heizkreises mit einem Wasser-PTC-Heizkreis, Abbildung **3-16** den mit einer Luft-PTC-Heizung. Bei letzterem gibt der der PTC-Heizer seine Wärme direkt an die durch den Heizkanal strömende Luft ab. Beide Varianten sind im Modell implementiert und können alternativ verwendet werden.

Im Folgenden wird das Modell der HVAC-Anlage beschrieben.



Abbildung 3-15: Prinzipskizze HVAC – Wasser-PTC-Heiz- und Kühlkreislauf



Abbildung 3-16: Prinzipskizze HVAC – Luft-PTC-Heizung und Kühlkreislauf

3.4.3.4 Unterscheidung Heiz-/Klimabetrieb und Vorgabe der Soll-Innentemperatur

Die Messkampagnen im Rahmen dieser Arbeit und im Projekt EN-WIN haben gezeigt, dass die Sollwertvorgabe für die Innentemperatur der Fahrgastkabine nicht ohne weiteres aus dem Fahrzeug-CAN ausgelesen werden kann. Für diese Fälle wird die eingestellte Solltemperatur anhand der gemessenen Innenraumtemperatur geschätzt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Fahrzeuginsassen eine mittlere Wohlfühltemperatur anstreben, die sich für den Heiz- und Klimafall unterscheidet.

Laut DIN EN ISO 7730, S. 21 beträgt die Wohlfühltemperatur im Winter in Innenräumen mindestens 22°C. Um auch Fahrten gerecht zu werden, bei denen durch die*den Fahrer*in eine höhere Solltemperatur eingestellt wurde, wird die Soll-Innentemperatur $\vartheta_{Innen,Soll,Heizen}$ im Heizfall für jeden einzelnen Fahrabschnitt nach (72) festgelegt.

$$\vartheta_{Innen,Soll,Heizen} = max \begin{cases} \vartheta_{Innen,gemessen} \\ 22^{\circ}C \end{cases}$$
(72)

Analog zum Heizfall wird auch im Klimabetrieb für den Fall, dass keine Solltemperaturvorgabe explizit aus vorhandenen Daten verfügbar ist, die eingestellte Solltemperatur geschätzt. In Analogie zu DIN EN ISO 7730, S. 21 beträgt die Wohlfühltemperatur im Sommer in Innenräumen ca. 24,5°C. Um auch Fahrten gerecht zu werden, bei denen durch den Fahrer eine niedrigere Solltemperatur eingestellt wurde, wird die Soll-Innentemperatur $\vartheta_{Innen,Soll,Klima}$ im Klimafall für jeden einzelnen Fahrabschnitt nach (73) festgelegt.

$$\vartheta_{Innen,Soll,Klima} = \min \left\{ \begin{array}{c} \vartheta_{Innen,gemessen} \\ 24,5^{\circ}C \end{array} \right\}$$
(73)

3.4.3.5 Winterbetrieb (Heizfall)

Der Heizbetrieb ist durch ein PTC-Heizelement wahlweise mit oder ohne Wasserkreis modelliert. Im Folgenden wird zunächst das komplexere System mit Wasserkreis beschrieben.

3.4.3.5.1 Regelkreise im Heizsystem

Im Heizbetrieb werden die in Abbildung 3-17 vereinfacht dargestellten drei Regelkreise durchlaufen. Die Führungsgröße *w* wird mit der Regelgröße *y* verglichen und eine Regelabweichung *e* berechnet. Im Regler wird daraus eine Stellgröße *u* abgeleitet, die in die Regelstrecke eingeleitet wird. Geregelt werden dabei die Innentemperatur der Kabine ϑ_{l} die Ausströmertemperatur ϑ_{Aus} und die Heizwassertemperatur ϑ_{HW} . Implementiert sind PI-Regler deren Regelparameter $P_{reg,i}$ und $I_{reg,i}$ jeweils empirisch abzuleiten sind. Zusätzlich wird der Heizwassermassenstrom schrittweise geregelt.



Abbildung 3-17: Regelkreise Heizsystem

Regelung der Heizklappenstellung (Luftmassenstrom durch Heizungswärmetauscher)

Der Heizungswärmetauscher (HWT) ist als passives, nicht regelbares Bauteil modelliert. Um den Wärmeübertrag vom Heizkreis auf die Fahrerkabine in Abhängigkeit der Soll-Ist-Abweichung der Innentemperatur zu ermöglichen, wurde ein Heizklappen-(HK-)PI-Regler (74) modelliert, der den Luftmassenstrom (75) und damit den Wärmeübertrag durch den HWT regelt.

$$HK_{Luft}(t) = P_{reg,HK}\left(\vartheta_{I,Soll}(t) - \vartheta_{I,Ist}(t)\right) + I_{reg,HK}\int\left(\vartheta_{I,Soll}(t) - \vartheta_{I,Ist}(t)\right)dt$$
(74)

$$\dot{m}_{Luft,Heizkanal}(t) = HK_{Luft}(t) \cdot \dot{m}_{Luft,Gebläse}(t)$$
(75)

Regelung der Ausströmer-Solltemperatur

Um das Temperaturniveau des Heizsystems an die Umgebungsbedingungen anzupassen und damit bei unterschiedlichen Bedingungen ein aus energetischer und Klimakomfort-Sicht abgestimmtes Klimaergebnis bereitzustellen, wird beim Fahrzeug eine theoretische Regelgröße, die Ausströmer-Solltemperatur $\vartheta_{Aus,Soll}$ verwendet. Diese bestimmt sich anhand des Temperaturniveaus im Fahrzeug und der Umgebung, sowie der Solltemperaturvorgabe nach (76).

$$\vartheta_{Aus,Soll}(t) = \vartheta_{I,Soll}(t) + \left(\vartheta_{I,Soll}(t) - \vartheta_{Umgebung}(t)\right)$$

$$+ P_{reg,Aus} \cdot \left(\vartheta_{I,Soll}(t) - \vartheta_{I,Ist}(t)\right)$$

$$+ I_{reg,Aus} \cdot \left(\vartheta_{I,Soll}(t) - \vartheta_{I,Ist}(t)\right)$$

$$(76)$$

Ferner wird zwischen Aufheizvorgang und Stationärbetrieb unterschieden. Als stationär werden Zustände betrachtet, bei denen die Regelabweichung weniger als 5K beträgt (77).

$$\vartheta_{I,Soll}(t) - \vartheta_{I,Ist}(t) \le 5K \to stationärbetrieb$$
 (77)

Regelung der PTC-Leistung

Die Leistungsregelung des PTC-Heizelements (78) ist durch eine pulsweitenmodulierte Steuerung ausgeführt. Im Modell wird eine Soll-Vorgabe, begrenzt durch Werte zwischen 0 und 1, auf Basis des Temperaturunterschieds zwischen Heizwasser nach PTC $\vartheta_{HW,nachPTC}$ und der Ausströmer-Solltemperatur $\vartheta_{Ausström,Soll}$ berechnet. Ein entsprechender Temperaturgradient im Heizungssystem wird durch Addition eines Konstanten Offsets $\vartheta_{HW,Offset}$ zur Ausströmer-Temperatur-Vorgabe erreicht.

$$PWM_{PTC}(t) = P_{reg,PTC} \left(\vartheta_{HW,nachPTC}(t) - \left(\vartheta_{Ausström,Soll}(t) + \vartheta_{HW,Offset} \right) \right)$$
(78)
+ $I_{reg,PTC} \int \left(\vartheta_{HW,nachPTC}(t) - \left(\vartheta_{Ausström,Soll}(t) + \vartheta_{HW,Offset} \right) \right) dt$

In Abhängigkeit der PTC-Wandtemperatur ϑ_{PTC} beschreibt die PTC-Kennlinie die maximale PTC-Leistung P_{PTC,max}. Somit ergibt sich die Momentanleistung des PTC nach (79)

$$P_{PTC}(t) = PWM_{PTC}(t) \cdot P_{PTC,max}(\vartheta_{PTC}(t))$$
⁽⁷⁹⁾

Regelung der PTC-Pumpe (Wassermassenstrom im Heizkreis)

Der Heiz-Wassermassenstrom \dot{m}_{HW} wird im Bereich von 40% bis 60% des maximalen Massenstroms $\dot{m}_{HW,max}$ in drei Stufen geregelt (80). Dies erfolgt in Abhängigkeit der Heizwassertemperatur nach dem PTC-Heizer $\vartheta_{HW,nachPTC}$ und der PTC-Sollwertvorgabe PWM_{PTC} . Der elektrische Energieverbrauch der Pumpe ist bei den NV-Nebenverbrauchern zu berücksichtigen.

$$\dot{m}_{HW}(t) = \begin{cases} 0.4 \cdot \dot{m}_{HW,max}, wenn \ PWM_{PTC}(t) \ge 0.99 \ oder \ \vartheta_{HW,nachPTC} < 50^{\circ}C \\ 0.5 \cdot \dot{m}_{HW,max}, wenn \ PWM_{PTC}(t) < 0.99 \ und \ \vartheta_{HW,nachPTC} \ge 50^{\circ}C \\ 0.6 \cdot \dot{m}_{HW,max}, wenn \ PWM_{PTC}(t) < 0.99 \ und \ \vartheta_{HW,nachPTC} \ge 60^{\circ}C \end{cases}$$
(80)

3.4.3.5.2 Wärmeübertragung im Heizkreis

Für den Wärmetransport im Heizwasserkreis sind die vier Komponenten PTC, Verschlauchung heiß, HWT und Verschlauchung kalt modelliert (s. Abbildung 3-18), deren Modellierung in diesem Abschnitt beschrieben wird. Auf die explizite Modellierung der Wasserpumpe wird an dieser Stelle verzichtet, da sie für den Wärmeübertragungsprozess als nicht relevant eingestuft wird.



Abbildung 3-18: Prinzip-Bild Heizwasserkreislauf

Der PTC-Heizer

Der PTC-Heizer besteht aus feinen Rohrbündeln, um den Wärmeübertrag möglichst effizient zu gestalten. Folgende Gesetzmäßigkeiten sind für den Wärmeübertrag am PTC modelliert: Die zugeführte elektrische Leistung $P_{PTC,el}$ wird im PTC-Heizer vollständig in Wärme gewandelt und heizt das PTC-Rohrbündel auf. Dadurch entsteht ein Temperaturgefälle zum durchströmenden Heizwasser, was zu einem Wärmeübertrag $\dot{Q}_{PTC \rightarrow HW}$ führt. In der Bilanz stellt sich die PTC-Temperatur ϑ_{PTC} ein. Diese hängt von der Masse des PTC m_{PTC} und dessen Wärmekapazität c_{PTC} , sowie der Ausgangstemperatur $\vartheta_{PTC}(t = 0)$ ab (81).

$$\vartheta_{PTC}(t) = \vartheta_{PTC}(t=0) + \frac{\int (P_{PTC,el} - \dot{Q}_{PTC \to HW}) dt}{m_{PTC} \cdot c_{PTC}}$$
(81)

Der Wärmestrom $\dot{Q}_{PTC \rightarrow HW}$ (82) beruht aufgrund des strömenden Heizwassers auf erzwungener Konvektion mit den Wärmeübergangskoeffizienten α_{Rohr} , der inneren Oberfläche des PTC-Heizers $A_{PTC,innen}$ und der mittleren logarithmischen Temperaturdifferenz von ein- und ausströmendem Heizwasser zur PTC-Temperatur $\Delta \vartheta_{log,PTC}$ (83).

$$\dot{Q}_{PTC \to HW}(t) = \alpha_{Rohr}(t) * A_{PTC,innen} * \Delta \vartheta_{log,PTC}$$
(82)

$$mit \,\Delta\vartheta_{log,PTC}(t) = \frac{\left(\vartheta_{PTC}(t) - \vartheta_{HW,vorPTC}(t)\right) - \left(\vartheta_{PTC}(t) - \vartheta_{HW,nachPTC}(t)\right)}{\log\frac{\left(\vartheta_{PTC}(t) - \vartheta_{HW,vorPTC}(t)\right)}{\left(\vartheta_{PTC}(t) - \vartheta_{HW,nachPTC}(t)\right)}}$$
(83)

Durch den Wärmeübertrag $\dot{Q}_{PTC \rightarrow HW}(t)$ lässt sich nun die Temperatur des Heizwassers nach dem PTC ermitteln, mithilfe der Wärmekapazität c_{HW} und des Massenstroms \dot{m}_{HW} (84):

$$\vartheta_{HW,nachPTC}(t) = \vartheta_{HW,vorPTC}(t) + \frac{1}{c_{HW}} \int \frac{\dot{Q}_{PTC \to HW}(t)}{\dot{m}_{HW}(t)} dt$$
(84)

Vorlauf: Verschlauchung auf der warmen Seite (zwischen PTC-Heizer und HWT)

Bedingt durch die Leitungslängen und die Strömungsgeschwindigkeit des Heizwassers treten zeitliche Verzögerungen beim Transport der Wärme vom PTC zum HWT auf. Um dies praxisnah zu modellieren, wurde das Leitungssystem in zwei Teile zu je 50% Leitungslänge aufgeteilt in Vorlauf (vom PTC zum HWT) und Rücklauf (vom HWT zum PTC). Die Durchlaufzeit auf der heißen Seite $T_{Durchlauf,HW,heiß}$ beträgt nach (85) damit die Hälfte des Gesamtumlaufs, also der Zeit in der die gesamte Heizwassermasse m_{HW} einmal umgewälzt wurde. Die Heizwassermasse m_{HW} kann über das Volumen V_{HW} und die Dichte ρ_{HW} bestimmt werden (86).

$$T_{Durchlauf,HW,heiß}(t) = \frac{0.5 \cdot m_{HW}}{\dot{m}_{HW}(t)}$$
(85)
(85)

$$mit m_{HW} = V_{HW} \cdot \rho_{HW}$$

(0 **-**)

Ferner sind über dieses Modell auch näherungsweise die zu erwartenden Wärmeverluste über die Schlauchwände modelliert. Dabei wird unterschieden, ob die PTC-Pumpe an- oder ausgeschaltet ist. Im Betriebsfalle wird die Verlustleistung Q_{HWheiss,Verlust} (87) anhand der Eintrittstemperaturdifferenz ETD_{HWnachPTC,Umgebung} (88) und eines konstanten Wärmeverlustwertes kA_{HW,Schlauch} berechnet, der empirisch ermittelt wurde.

$$\dot{Q}_{HWheiss,Verlust}(t) = kA_{HW,Schlauch}(t) \cdot ETD_{HWnachPTC,Umgebung}(t)$$
 (87)

$$mit ETD_{HWnachPTC,Umgebungsluft}(t) = \vartheta_{HW,nachPTC}(t) - \vartheta_{Luft,Umgebung}(t)$$
(88)

Anhand der Wärmekapazität c_{HW} und dem Heizungswassermassenstrom \dot{m}_{HW} lässt sich die Temperaturdifferenz auf dem Weg zwischen PTC und HTW und damit die Temperatur beim Eintritt in den HWT $\vartheta_{HW,vorHWT}$ ermitteln (89).

$$\vartheta_{HW,vorHWT}(t) = \frac{\dot{Q}_{HWheiss,Verlust}(t)}{c_{HW} \cdot \dot{m}_{HW}(t)}$$
(89)

Im Falle der ausgeschalteten PTC-Pumpe hängt der Wärmeverlust nicht mehr von der Eintrittstemperatur ab, sondern kann als Differentialgleichung beschrieben werden. Dabei hängt der Wärmeverlust $\dot{Q}_{HWheiss,Verlust}$ direkt von der sich einstellenden Temperatur $\vartheta_{HW,SchlauchHeiss}$, der Wärmekapazität c_{HW} und der halben Heizwassermasse m_{HW} ab (90), (91). Als Initialwert für den Abkühlprozess des Heizwassers wird der Wert beim Abschalten der Pumpe verwendet.

$$\dot{Q}_{HWheiss,Verlust}(t)$$
 (90)

$$= kA_{HW,Schlauch}(t) \cdot \left(\vartheta_{HW,SchlauchHeiss}(t) - \vartheta_{Luft,Umgebung}(t)\right)$$

$$\vartheta_{HW,SchlauchHeiss}(t) = \vartheta_{HW,SchlauchHeiss}(t = aus) - \frac{\int \dot{Q}_{HWheiss,Verlust}(t)dt}{c_{HW} \cdot 0.5 \cdot m_{HW}}$$
(91)

Es wird vereinfachend von einer konstanten Temperaturverteilung zwischen PTC und HWT ausgegangen, sodass zu jedem Zeitpunkt (92) gilt.

$$\vartheta_{HW,vorHWT}(t) = \vartheta_{HW,SchlauchHeiss}(t)$$
(92)

Damit können die Werte bei Ein- bzw. Ausschaltvorgängen gleichgesetzt werden.

Der Heizungswärmetauscher (HWT)

Folgende Gesetzmäßigkeiten sind für den Wärmeübertrag am HWT modelliert:

Nach (Großmann 2013, S. 170) ist die Wärmetauscherleistung $\dot{Q}_{HW \to HWT}$ in Abhängigkeit der Eintrittstemperaturdifferenz am Heizungswärmetauscher ETD_{HWT}, dem Heizwassermassenstrom \dot{m}_{HW} und dem Luftmassenstrom durch den Heizkanal $\dot{m}_{Luft,Heizkanal}$ modelliert (93), (94). Die verwendeten Werte für \dot{Q}_{100} sind Tabelle 3.7 zu entnehmen.

$$\dot{Q}_{HW \to HWT}(t) = ETD_{HWT}(t) \cdot \frac{\dot{Q}_{100}}{100}$$
(93)

mit
$$ETD_{HWT}(t) = \vartheta_{HW,vorHWT}(t) - \vartheta_{Luft,vorHWT}(t)$$
(94)

Luftmassen- strom / kg/min Wassermassen- strom / kg/h	2	4	5	6	8	
100	2,93	4,58	5,23	5,76	6,13	
150	2,99	5,31	6,19	6,95	7,89	
200	3,15	5,59	6,62	7,52	8,80	
250	3,20	5,77	6,84	7,81	9,30	
300	3,17	5,90	7,01	8,09	9,68	
400	3,10	6,00	7,15	8,33	10,21	
500	3,21	6,06	7,35	8,50	10,44	
750	3,30	6,17	7,59	8,76	11,11	
1000	3,28	6,29	7,64	8,96	11,40	
1500	3,25	6,39	7,82	9,19	11,76	
	Heizleistung Órog / kW					

Heizleistung Q_{100} / kWTabelle 3.7: Auf ETD = 100°C normierte Wärmetauscherleistung Q'100 in kW (Großmann 2013, S. 172)

Um das Aufheizverhalten zu betrachten, wird zusätzlich die mittlere Temperatur des Wärmetauschers selbst ϑ_{HWT} als thermische Masse modelliert. Das Heizwasser wärmt also zunächst das Rohrbündel des HWT auf, dieses wiederum gibt Wärme an die durchströmende Luft ab. Die HWT-Temperatur ϑ_{HWT} kann damit durch eine Differentialgleichung beschrieben werden (95). Aufgrund der Modellierung der Temperaturverluste im Leitungssystem ist eine Neuzuweisung der Heizungswassertemperatur vor dem HWT als Initialtemperatur bei jedem Einschaltvorgang zu berücksichtigen.

(02)

$$\vartheta_{HWT}(t) = \vartheta_{HWT}(t=0) + \frac{\int (\dot{Q}_{HW \to HWT}(t) - \dot{Q}_{HWT \to Luft}(t)) dt}{m_{HWT} \cdot c_{HWT}}$$
(95)

Der Wärmestrom $\dot{Q}_{HWT \rightarrow Luft}$ beruht ebenfalls auf der oben beschriebenen \dot{Q}_{100} -Annäherung (96). Die ETD $\Delta \vartheta_{HWT,Luft}$ bezieht sich nun auf die HWT-Temperatur und die Lufteinströmtemperatur (97). Diese Energiemenge wird im Abschnitt 3.4.3.1.1 als der Fahrgastkabine zugeführt berücksichtigt.

$$\dot{Q}_{HVAC,Heizen}(t) = \dot{Q}_{HWT \to Luft}(t) = \Delta \vartheta_{HWT,Luft}(t) \cdot \frac{Q_{100}}{100}$$
(96)

$$mit \,\Delta\vartheta_{HWT,Luft}(t) = \vartheta_{HWT}(t) - \vartheta_{Luft,vorHWT}(t) \tag{97}$$

Durch den Wärmeübertrag $\dot{Q}_{HW \to HWT}(t)$ lässt sich auch die Temperatur des Heizwassers nach dem HWT ermitteln, mithilfe der Wärmekapazität c_{HW} und des Massenstroms \dot{m}_{HW} (98).

$$\vartheta_{HW,nachHWT}(t) = \vartheta_{HW,vorHWT}(t) - \frac{1}{c_{HW}} \int \frac{\dot{Q}_{HW \to HWT}(t)}{\dot{m}_{HW}(t)} dt$$
⁽⁹⁸⁾

Ferner wird die Lufttemperatur im Heizkanal nach dem HWT ermittelt. Zusätzlich zur Temperatur muss auch die Feuchte *x* der Eingangsluft Berücksichtigung finden. Die Berechnung erfolgt über den Ansatz der spezifischen Enthalpie der Luft $h_{Luft,nachHWT}$, der Verdampfungsenthalpie von Wasser h_{Dampf} , der isobaren Wärmekapazitäten von Luft $c_{p,Luft}$ und Wasserdampf $c_{p,Dampf}$ und der luftmassebezogenen Feuchte der Umgebungsluft $x_{Umgebung}$ (99). Die Enthalpie wird im HWT um den Wärmeeintrag $\dot{Q}_{HWT \rightarrow Luft}$ erhöht (100).

$$\vartheta_{Luft,nachHWT}(t) = \frac{h_{Luft,nachHWT} - h_{Dampf} \cdot x_{Umgebung}}{c_{p,Luft} + c_{p,Dampf} \cdot x_{Umgebung}}$$
(99)

$$mit h_{Luft,nachHWT}(t) = h_{Luft,vorHWT}(t) + \frac{\dot{Q}_{HWT \to Luft}(t)}{\dot{m}_{Luft,Heizkanal}(t)}$$
(100)

Da das Gebläse Umgebungsluft ansaugt, diese über den Verdampfer des Kältekreises zum HWT führt, entspricht die Eingangsenthalpie am HWT der am Ausgang des Verdampfers, bei ausgeschaltetem Kältekreis der Enthalpie der Umgebungsluft (101).

$$h_{Luft,vorHWT}(t) = h_{Luft,Umgebung}(t)$$

$$= c_{p,Luft} \cdot \vartheta_{Luft,Umgebung}(t) + c_{p,Dampf} \cdot \vartheta_{Luft,Umgebung}(t)$$

$$\cdot x_{Umgebung} + h_{Dampf} \cdot x_{Umgebung}$$
(101)

Rücklauf: Wasserleitungen auf der kalten Seite (zwischen HWT und PTC)

Die obige Berechnungslogik für den Vorlauf wird analog auch im Rücklauf verwendet. Unterschiede im Ergebnis ergeben sich lediglich durch das niedrigere Temperaturniveau.

3.4.3.5.3 Luft-PTC-Heizung

Alternativ zum Wasser-PTC-Modell ist ein Luft-PTC-Modell implementiert. Dieses beruht auf einer Vereinfachung des Wasser-PTC-Modells. Die Regelkreise für Heizklappe und Ausströmer-

Solltemperatur werden übernommen. Die PTC-Pumpe entfällt. Die Leistungsregelung des PTC-Heizelements erfolgt auf Basis der Abweichung von Ausströmer-Soll- und Ist-Temperatur ohne Offset (102).

$$PWM_{PTC}(t) = P_{reg,PTC} \left(\vartheta_{HW,nachPTC}(t) - \left(\vartheta_{Ausström,Soll}(t) \right) \right)$$

$$+ I_{reg,PTC} \int \left(\vartheta_{HW,nachPTC}(t) - \left(\vartheta_{Ausström,Soll}(t) \right) \right) dt$$
(102)

Folgende Gesetzmäßigkeiten sind für den Wärmeübertrag am PTC modelliert:

Die zugeführte elektrische Leistung $P_{PTC,el}$ wird im PTC-Heizer vollständig in Wärme gewandelt und heizt das PTC-Element auf. Dadurch entsteht ein Temperaturgefälle zur durchströmenden Luft, was zu einem Wärmeübertrag $\dot{Q}_{PTC \rightarrow Luft}$ führt. In der Bilanz stellt sich die PTC-Temperatur ϑ_{PTC} ein. Diese hängt von der Masse des PTC m_{PTC} und dessen Wärmekapazität c_{PTC} , sowie der Ausgangstemperatur $\vartheta_{PTC}(t = 0)$ ab (103).

$$\vartheta_{PTC}(t) = \vartheta_{PTC}(t=0) + \frac{\int (P_{PTC,el} - \dot{Q}_{PTC \to Luft}) dt}{m_{PTC} \cdot c_{PTC}}$$
(103)

Der Wärmestrom $\dot{Q}_{PTC \rightarrow Luft}$ (104) beruht aufgrund der strömenden Luft auf erzwungener Konvektion mit dem Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_{Rohr,Luft}$, der sich nach Schack 1969 vereinfacht durch (105) beschreiben lässt, der inneren Oberfläche des PTC-Heizers $A_{PTC,innen}$ und der Temperaturdifferenz von einströmender Umgebungsluft und PTC-Heizelement $\Delta \vartheta_{PTC,Umgebung}$ (106).

$$\dot{Q}_{PTC \to Luft}(t) = \alpha_{Rohr}(t) * A_{PTC,innen} * \Delta \vartheta_{PTC,Umgebung}$$
(104)

$$mit \,\alpha_{Rohr,Luft}(t)$$

$$= \left[4,13 + 0,23 \cdot \frac{0,5 \cdot (\vartheta_{Luft,Umgebung}(t) - \vartheta_{Luft,Heizkanal}(t)}{100} - 0,0077 \cdot \left(\frac{0,5 \cdot (\vartheta_{Luft,Umgebung}(t) - \vartheta_{Luft,Heizkanal}(t)}{100} \right)^2 \right]$$

$$\cdot \frac{v_{Luft,Heizkanal}^{0,75}}{(2 \cdot r_{PTC})^{0,25}}$$

$$(105)$$

und mit
$$\Delta \vartheta_{PTC,Umgebung}(t) = \vartheta_{PTC}(t) - \vartheta_{Luft,Umgebung}(t)$$
 (106)

In Analogie zum Wasser-PTC-System lässt sich nun der Zustand der Luft im Heizkanal nach dem PTC nach (99), (100) und (101) bestimmen, wobei nun statt $\dot{Q}_{HWT \rightarrow Luft}(t)$ nun $\dot{Q}_{PTC \rightarrow Luft}(t)$ einzusetzen ist.

3.4.3.6 Sommerbetrieb (Klimafall)

Wie eingangs beschrieben stellt der Klimafall in Deutschland im Vergleich zum Heizfall im Mittel eine geringere energetische Belastung des Systems Fahrzeug dar. Dies konnte durch Analysen von Fahrzeugverbrauchsdaten bestätigt werden (s. Abschnitt 3.5). Daher und weil für die Erstellung des Modells keine Messpunkte zu Zuständen des Kältekreises vorliegen, wird eine einfache Repräsentation des Kältekreises über einen CoP- (Coefficient of Performance-) Ansatz einer Standard-R134a-Kältekompressionsanlage verwendet. Für den Fall, dass keine expliziten Daten zum Betriebszustand der Klimaanlage vorliegen, wird davon ausgegangen, dass die Klimaanlage nur oberhalb von 17°C eingeschaltet wird.

Energetisch relevant ist die zu leistende elektrische Arbeit des Klimakompressors $W_{Kompressor,el}$ (107). Die Verbräuche der anderen Klimakomponenten (Gebläse, Steuerung) werden hier vernachlässigt und pauschal bei den NV-Nebenverbrauchern in Abschnitt 3.4.4 berücksichtigt. Zum Klimatisieren wird dem Fahrgastraum am Verdampfer künstlich der (negative) Wärmestrom $\dot{Q}_{HVAC,Klima}$ entnommen, der über einen CoP-Ansatz (108) bestimmt werden kann. Zur Berechnung des Klimatisierungs-Energiebedarfs ist demnach der Verdampfer-Wärmestrom $\dot{Q}_{Verdampfer}$ zu bestimmen. Der hier verwendete Ansatz wird in den folgenden Abschnitten beschrieben. Der Betriebsfall als Wärmepumpe wird nicht betrachtet.

$$W_{Kompressor,el} = \int P_{Kompressor,el} dt$$
(107)

$$\dot{Q}_{HVAC,Klima}(t) = \dot{Q}_{Verdampfer}(t) = -P_{Kompressor,el}(t) \cdot COP(\vartheta)$$
(108)

3.4.3.6.1 Regelkreise im Klimasystem

Für die Regelung der Lufttemperatur im Sommerfall werden die beiden in Abbildung 3-19 vereinfacht dargestellten Regelkreise durchlaufen. Die Führungsgröße *w* wird mit der Regelgröße *y* verglichen und eine Regelabweichung *e* berechnet. Im Regler wird daraus eine Stellgröße *u* abgeleitet, die in die Regelstrecke eingeleitet wird. Geregelt werden im Klimasystem die Innentemperatur der Kabine ϑ_I und die Ausströmertemperatur ϑ_{Aus} . Implementiert sind PI-Regler, deren Regelparameter $P_{reg,i}$ und $I_{reg,i}$ jeweils fahrzeugspezifisch zu applizieren sind.



Abbildung 3-19: Regelkreise Klimasystem

Regelung der Ausströmer-Solltemperatur

Die Ausströmer-Solltemperatur wird analog zum Winterfall, wie in Abschnitt 3.4.3.5.1 beschrieben, geregelt. Es findet jedoch keine Unterscheidung zwischen Abkühl- und Stationärbetrieb statt.

Regelung der Kompressorleistung und Ableitung der Verdampferleistung

Analog zum Winterfall leitet sich der Leistungsbedarf aus der Differenz von Soll- und Ist-Ausströmertemperatur her (109). Die elektrische Kompressorleistung wird dabei auf den Bereich von 0 bis $P_{Kompressor,max}$ begrenzt. Die Kälteleistung $\dot{Q}_{Verdampfer}$ bestimmt sich anschließend nach (108) und stellt die Energiemenge $\dot{Q}_{HVAC,Klima}$ dar, die im Abschnitt 3.4.3.1.1 als der Fahrgastkabine entzogen berücksichtigt und analog dem Winterbetrieb auch zur Berechnung der Ausströmertemperatur $\vartheta_{Aus,Ist}$ nach (69) verwendet wird.

$$P_{Kompressor,el}(t) =$$

$$P_{Kompressor,max} \left(P_{reg,Klima} \left(\vartheta_{Aus,Soll}(t) - \vartheta_{Aus,Ist}(t) \right) + I_{reg,Klima} \int \left(\vartheta_{Aus,Soll}(t) - \vartheta_{Aus,Ist}(t) \right) dt \right)$$

$$(109)$$

3.4.3.6.2 Bestimmung des Coefficient of Performance

Der CoP der Kälteanlage ist kennfeldbasiert und abhängig von der Umgebungstemperatur und der momentanen Kälteleistung und wird der Literatur entnommen.



Abbildung 3-20: CoP einer Prüfstands-Kompressionskälteanlage (Mardorf und Menger 2010, S. 7)

Mardorf und Menger 2010 betrachten den fahrzeugtypischen Aufbau einer Kompressionskälteanlage im Prüfstandsbetrieb. Tabelle 3.8 zeigt die aus der Abbildung 3-20 abgelesenen und verwendeten Kennfeld-Werte.

ϑ _{Umgebung} Żverdampfer,th / kW	25°C	35°C	45°C	
0,50 (extrapoliert)	5,25	3,25	1,95	
0,75	5,70	3,30	2,10	
1,50	5,25	3,25	2,20	
2,25	4,00	2,95	2,15	
3,00	3,25	2,45	1,82	
3,70	2,75 (extrapoliert)	2,00	1,30	
		CoP _{Kältekreis}		

 Tabelle 3.8: CoP des implementierten Kältekreises nach Abbildung 3-20

Zu beachten ist, dass sich die angegebenen CoP-Werte auf eine Verdampfer-Austrittstemperatur von 20°C beziehen. Für tiefere Temperaturen sinkt der CoP weiter ab. (110) zeigt den aus Abbildung 3-21 abgeleiteten Gradienten, der über alle Betriebspunkte als konstant angenommen wird. Der verwendete CoP wird nun linear aus dem Kennfeld abgeleitet und um die vorliegende Ausströmertemperatur korrigiert.

$$\Delta CoP = \frac{-0.02}{^{\circ}C} \tag{110}$$

$$CoP = f(\dot{Q}_{Verdampfer}, \vartheta_{Umgebung}) - 0,02 \cdot (20^{\circ}C - \vartheta_{Aus})$$
(111)



Abbildung 3-21: CoP in Abhängigkeit der Luftaustrittstemperatur am Verdampfer (Mardorf und Menger 2010, S. 7)

3.4.3.7 Weitere Modellierungsgrößen für den Heiz- und Klimabetrieb

Um Singularitäten bei Ein- und Ausschaltvorgängen zu vermeiden und Trägheiten der Wärmeübertragung abzubilden, wurden weitere Elemente modelliert. Da sich keine energetisch relevanten Einflüsse daraus ableiten, werden die Elemente nicht im Detail erläutert, sondern nur der Vollständigkeit halber hier genannt:

- Thermische Massen zur Simulation der thermischen Trägheit von Temperaturfühlern für Innentemperatur Fahrerkabine, Ausströmertemperatur, Heizwassertemperatur
- Nachlauf Gebläse: Vermeidung von Überhitzung des HWT
- Nachlauf PTC-Pumpe: Vermeidung von Überhitzung des PTC
- Zeitliche Glättung der Erwärmung des Heizwassers am PTC sowie der Abkühlung am HWT zur Vermeidung von Schwingungen
- Trägheiten im Ansprechverhalten bei Ein-/Ausschaltvorgängen bei PTC-Heizer und PTC-Pumpe

3.4.4 Niedervolt-Nebenverbraucher und Gleichspannungswandler

Wie in 2.1.3.1 dargelegt, existiert eine Vielzahl von NV-Nebenaggregaten in einem Elektrofahrzeug. Die meisten davon haben nur einen begrenzen Einfluss auf den Energiebedarf des Fahrzeugs. In Summe ist der Verbrauch jedoch nicht zu vernachlässigen, gerade in innerstädtischen Nutzungsprofilen mit geringem zeitbezogenen Antriebsenergieverbrauch. Daher wurde statt der physikalischen, detaillierten Simulation aller Komponenten ein zusammenfassender statistischer Ansatz zur Annäherung der Momentanleistung des DCDC-Wandlers verwendet:

Die Nebenaggregate im NV-Bordnetz werden über den DCDC-Wandler und die NV-Batterie mit Energie versorgt. Da letztere wie auch beim verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeug nicht extern geladen wird, geschieht die Versorgung bilanziell komplett über den DCDC-Wandler. Die elektrische Leistung auf der HV-Seite des DCDC-Wandlers kann daher stellvertretend für die aller NV-Nebenaggregate betrachtet werden. Die elektrische Leistung des DCDC-Wandlers ist über weite Teile des Fahrzeugbetriebs weitgehend konstant. Das Modell unterscheidet bei der DCDC-Wandlerleistung P_{DCDC} wie in Abschnitt 2.1.3.3 motiviert nur nach den Einflussgrößen Geschwindigkeit v_{Fzg} und Umgebungstemperatur $\vartheta_{Umgebung}$. Im abgeschalteten Fahrzeug wird kein Verbrauch berücksichtigt (112).

$$P_{NV} = P_{DCDC} = \begin{cases} 0 & , Mod_{Fzg} = 0 \\ f(v_{Fzg}, \vartheta_{Umgebung}) & , Mod_{Fzg} = 1 \end{cases}$$
(112)

Die Leistung P_{DCDC} während der Fahrt ist über ein empirisches Kennfeld aus Daten des betrachteten eNfz zu generieren.

3.4.5 On-Board-Ladegerät

Die Funktion des Ladegeräts spielt für den Energieverbrauch des Fahrzeugs im Betrieb keine Rolle. Für die wirtschaftliche Bewertung des Elektrofahrzeugs ist jedoch der Energiebedarf an der Steckdose relevant. Zum Aufladen der Batterie ist daher ein einfaches AC-Ladegerät implementiert, bei dem die Traktionsbatterie bei vorgegebener AC-Ladeleistung $P_{Laden,AC}$ mit konstantem Wirkungsgrad $\eta_{Laden,AC}$ mit der Leistung P_{Laden} geladen werden kann (113).

$$P_{Laden} = P_{Laden,AC} \cdot \eta_{Laden,AC} \tag{113}$$

Bei Verwendung eines mittleren Ladewirkungsgrades können trotz dieser Vereinfachung einerseits realitätsnahe Energiekosten berechnet werden, andererseits können so untertägige Ladevorgänge und benötigte Ladezeiten abgebildet werden, um die Reichweite des Fahrzeugs zu vergrößern. Schnellladung über DC-Ladepunkte ist nicht abgebildet.

3.4.6 Traktionsbatterie

Mit der Modellierung von Traktionsbatterien unter Berücksichtigung unterschiedlicher Zellchemien und Verschaltungsvarianten beschäftigen sich Wissenschaft und Forschung insbesondere seit dem gesteigerten Interesse an Elektrofahrzeugen in Industrie und Gesellschaft. Aktuelle Ansätze, die die thermoelektrischen Vorgänge in der Batterie abbilden können, sind bereits umfangreich beschrieben und können der Literatur entnommen werden (z.B. Schmidt 2013, S. 39–40; Roscher 2011, S. 31; Hopp 2016, 24ff; He et al. 2011). Fokus dieser Dissertation ist die Modellierung des Energieverbrauchs der Fahrzeugkomponenten, nicht die Funktionsweise der Traktionsbatterie. Zur näherungsweisen Berechnung des Ladezustands der Batterie SoC_{Batt} wird ein verlustfreies, einfaches Modell verwendet. Das Modell addiert die ermittelten Komponenten-Leistungen zur Batterieleistung P_{Batt} auf (114). Anschließend wird integrativ der elektrische Gesamtenergieverbrauch W_{Batt} bestimmt (115) und der aktuelle SoC_{Batt} aus dem initialen SoC_{Start} zu Beginn der Fahrt und der bei vollgeladener Batterie verfügbaren Energiemenge E_{Batt} abgeleitet (116). Da die Ladeleistung P_{Laden} negativ einfließt, können Ladevorgänge berücksichtigt und mit einem steigenden SoC abgebildet werden.

$$P_{Batt} = P_{LE} + P_{HVAC} + P_{NV} + P_{DCDC} - P_{Laden}$$
(114)

$$W_{Batt} = \int -P_{Batt} dt \tag{115}$$

$$SOC_{Batt} = SOC_{Start} - \frac{W_{Batt}}{E_{Batt}}$$
(116)

3.5 Validierung des Modells für einen Stadtlieferwagen (2,3t zGG)

3.5.1 Datenbasis e-Caddy

Im Rahmen eines Langzeitflottenversuchs der Volkswagen AG mit einer Testflotte von 40 Fahrzeugen einer Kleinserie elektrifizierter VW Caddy (e-Caddy) wurden CAN-Bus-Daten über einen Zeitraum von mehreren Jahren unter realen Einsatzbedingungen geloggt. Hierbei wurden Fahrdaten über eine Strecke von gut 240.000km aufgezeichnet (Volkswagen AG 2015, S. 6). Davon wurden die Daten von 20 Fahrzeugen mit kurzem Radstand im Rahmen dieser Dissertation ausgewertet. In den folgenden Abschnitten sind die im Modell verwendeten Fahrzeug-, Nutzungs- und Umgebungsdaten beschrieben. Der e-Caddy basiert als conversion-design-Fahrzeug technisch einerseits auf dem konventionellen Caddy-Modell der Baureihe 2K, andererseits nutzt er die Hochvoltkomponenten des Testmodells Golf Blue-e-motion auf Basis des Golf 6. Die ausgewerteten Daten beziehen sich auf einen Testzeitraum über die Jahre 2013 bis 2015. Die Fahrten erfolgten vor allem im norddeutschen Raum und den Niederlanden mit flacher Topografie. Es liegt nahe, dass durch die weitgehende Nutzung vorhandener Komponenten die Kosten für die Testflotte möglichst geringgehalten werden sollten. Im Hinblick auf Vergleiche mit bis zur Serienreife entwickelten, aktuell am Markt erhältlichen Modellen ist dieser technische Vorserienstand in Bezug auf Verbrauch bzw. Effizienz und Batteriekapazität bzw. Reichweite zu berücksichtigen. Dafür sprechen z.B. die im Vergleich zu aktuellen Modellen geringe Batteriekapazität, sowie der Verzicht auf eine Wärmepumpe.

3.5.1.1 Modellparameter des Fahrzeugs – Antrieb

Dieses Kapitel beschreibt die Parametrierung des Modells mit den verfügbaren Werten des e-Caddy. Teilweise werden auch Literaturwerte verwendet, wenn keine Daten zum e-Caddy verfügbar sind. Die folgende Tabelle 3.9 fasst die implementierten Parameter des e-Caddy zusammen. Die Werte entstammen Datenblättern, Produktbroschüren, eigenen Messungen am Fahrzeug und der Literatur.

Parameter	Wert	Einheit	Quelle
Batteriekapazität (technisch) E _{Batt}	17,6	kWh	Volkswagen AG
Batteriekapazität (nutzbar) E _{Batt,nutzbar}	14,9	kWh	Auswertung Nutzungsdaten
Batteriemasse m _{Batt}	240	kg	Volkswagen AG
Nutzbares SoC-Fenster	84,5	%	Auswertung Nutzungsdaten
Wirkungsgrad AC-Ladegerät η_{Laden}	90	%	Auswertung Nutzungsdaten
max. Ladeleistung AC PLaden,max	11 / 22	kW	Auswertung Nutzungsdaten
Wirkungsgrad DCDC-Wandler η_{DCDC}	90	%	Auswertung Nutzungsdaten
Gesamtübersetzung Antriebsstrang iges	9,79	-	Volkswagen AG
dynamischer Reifenradius r _{dyn}	0,308	m	Continental 2018
Rollwiderstandsbeiwert f_r	0,012	-	Braess und Seiffert 2011, S. 35
Achs-Schwungmassen $m_{S,VA} / m_{S,HA}$ je	26	kg	Volkswagen AG
Trägheitsmoment E-Maschine J_{EM}	0,833	kg/m ²	Volkswagen AG
Vorspurwinkel β	0,3	0	Ersoy und Heißing 2008, S. 42
Schräglaufsteifigkeit der Reifen c_{β}	700	N/rad	Ersoy und Heißing 2008, S. 42

Tabelle 3.9: Parameterübersicht Antrieb e-Caddy

3.5.1.2 Modellparameter des Fahrzeugs – Fahrzeuggeometrie

Die folgende Tabelle 3.10 stellt die implementierten geometrischen Parameter des e-Caddy zusammen. Die Werte entstammen Produktbroschüren und eigenen Messungen. Die Bezeichner der geometrischen Abmessungen vom Fahrgast- und Laderaum beziehen sich auf Abbildung 3-9. Da der Stadtlieferwagen e-Caddy als Kastenwagen ausgeführt ist, entfällt der Luftspalt (LS) und der Laderaum schließt direkt an die Trennwand (TW) aus Kunststoff an.

Parameter	Wert	Einheit	Quelle
Volumen Laderaum V _{LR}	3,03	m ³	
Volumen Fahrerkabine V _{Kabine}	1,55	m ³	
l(Da)	0,37	m	
b(Da)	1,11	m	
l(Bo)	1,01	m	
b(Bo)	1,23	m	
l(KS)	1,01	m	
h(KS)	0,80	m	
b(SW)	1,23	m	
h(SW)	0,80	m	Produktbroschüre VW Caddy und
b(TW)	1,17	m	eigene Messung
h(TW)	1,23	m	
l(FS)	0,76	m	
b(FS)	1,17	m	
α(FS) zur Waagerechten	34	0	
h(SS)	0,43	m	
1(SS)	0,74	m	
h(LR)	1,23	m	
l(LR)	1,80	m	
b(LR)	1,36	m	
Nutzlast <i>m</i> _{Nutzlast}	625	kg	Volkswagen AG
zul. Gesamtgewicht zGG	2280	kg	Volkswagen AG
mittleres Eza Gewicht ma	1780	ka	Annahme: ein Fahrer mit wenig
mitteres rzg-Gewient m _{Fzg}	1780	кg	Nutzlast
Fahrzeug-Stirnfläche 4	2.83	m ²	Onlineforum
	2,05	111	(http://rc.opelgt.org/indexcw.php)
Luftwiderstandsbeiwert <i>cw</i>	0.4	_	Onlineforum
	0,7		(http://rc.opelgt.org/indexcw.php)
Summe der Oberflächen aller	10	m ²	Figene Abschätzung
Einbauten A_{EB}	10		
Summe der Massen aller	80	kø	Eigene Abschätzung
Einbauten <i>m</i> _{EB}		8	
Absorptionskoeffizient	0.98	-	schwarze Ausstattung (Großmann
Einbauten α_{EB}	0,20		2013, S. 18)

Tabelle 3.10: Parameterübersicht Geometrie e-Caddy

3.5.1.3 Modellparameter des Fahrzeugs – Heizung und Klimaanlage

Die folgende Tabelle 3.11 fasst die implementierten Parameter der HVAC-Anlage des e-Caddy zusammen. Die Werte entstammen Diskussionen mit Mitarbeitern der Volkswagen AG, Produktbroschüren, eigenen Messungen und der Literatur.

Parameter	Wert	Einheit	Quelle
Volumen Heizwasser im PTC-Kreis V _{HW}	2	1	Volkswagen AG
Volumenstrom Heizwasser \dot{V}_{HW}	10	l/min	Volkswagen AG
Wärmeverluste im Heizwasserkreis an Umgebung kA_{HK}	2	W/K	Auswertung Nutzungsdaten
Radius Wasserschlauch r _{Schlauch}	1	cm	Volkswagen AG
Überströmte Rohrlänge im PTC <i>l</i> _{PTC}	2	m	Eigene Abschätzung
Masse PTC <i>m</i> _{PTC}	2,6	kg	Volkswagen AG und Tellier et al. 2014, Webasto 2015
Masse Heizungswärmetauscher <i>m</i> _{HWT}	8	kg	Eigene Abschätzung
Offset der Heizwassertemperaturvorgabe am PTC ggü. Ausströmertemperatur $\vartheta_{HW,Offset}$	14	°C	Auswertung Nutzungsdaten
elektrische Leistung Klimakompressor P_{EKK}	5,1	kW	Volkswagen AG
Regelparameter P _{reg,Ausström} I _{reg,Ausström} P _{reg,HK} I _{reg,HK} P _{reg,PTC} I _{reg,Kältekreis} I _{reg,Kältekreis}	1 0,005 0,2 0,0005 0,1 0,001 250 0.02	-	Auswertung Nutzungsdaten, teilweise inklusive Umrechnung von Einheiten
Zieltemperatur Fahrerkabine Klimabetrieb, max. $\vartheta_{Innen,Soll,Klima,max}$	21	°C	abweichend zu Abschnitt 3.4.3.4: Auswertung Nutzungsdaten

Tabelle 3.11: Übersicht Modellbedatung HVAC e-Caddy

Stoffwerte wie Wärmekapazitäten, Strömungskennzahlen und Strahlungseigenschaften werden VDI 2013 entnommen.

3.5.1.4 Übersicht zu den aufgezeichneten und verwendeten Nutzungs- und Umgebungsdaten

Als Eingangsgrößen für das Modell stehen die folgenden, zeitabhängig aufgezeichneten Nutzungsgrößen zur Verfügung (s. a. Abs.3.3):

Parameter	Beschreibung	Einheit	Quelle
t	Datum und Zeit	datetime	
v_{Fzg}	Fahrzeug-Geschwindigkeit	km/h	
mod_{Fzg}	Fahrzeugzustand ("Zündung")	an/aus	Maalaamaana a Cadda
odo_{Fzg}	Streckenzähler (Odometer)	km	Messkampagne e-Caddy
$\vartheta_{Luft,Kabine}$	Lufttemperatur der Fahrerkabine	°C	Nutzfahrzeuge
$\vartheta_{Luft,U}$	Temperatur der Umgebungsluft	°C	T (utzhullizeuge
Doga	Standort des Fahrzeugs in	0	
I USFzg	Längen- und Breitengrad		

Tabelle 3.12: Übersicht Logger-Eingangsgrößen Energiemodell e-Caddy

Zusätzlich werden folgende Umgebungsgrößen als Sekundärdaten (s. Kap.2.4) den Messdaten zugeordnet und in der Simulation verwendet:

Parameter	Beschreibung	Einheit	Quelle
h_{Fzg}	geographische Höhe	m	
q_{Fzg}	Steigung des Fahrweges	%	
rF _{Luft,U}	relative Feuchte der Umgebungsluft	°C	
α_S	Höhenwinkel der Sonnen über dem Horizont	0	s. Kap.2.3.3
γs	Azimut der Sonneneinstrahlung	0	
P _{Sonne,global}	spezifische Global- strahlungsleistung der Sonne	W/m ²	
P _{Sonne,diff}	spezifische diffuse Strahlungsleistung der Sonne	W/m ²	

Tabelle 3.13: Übersicht zusätzliche Umgebungsgrößen Energiemodell e-Caddy

Weitere nicht quantifiziert verfügbare Einflussgrößen werden als konstant angenommen. Hierzu zählen die Anzahl an Personen im Fahrzeug $\#_{Personen}$, sowie das Fahrzeuggewicht m_{Fzg} . Wind und Niederschlag werden vernachlässigt. Als Startzustand für alle simulierten Temperaturen wird jeweils der erste verfügbare Messwert der Innentemperatur eines jeden Tages verwendet und damit von einem mit dieser Temperatur durchkonditionierten Fahrzeug ausgegangen.

3.5.1.5 Validierungsdaten

Zur Bestimmung von Kennlinien bzw. -feldern und zur Validierung des Modells werden zusätzlich zu den Eingangsgrößen auch die folgenden geloggten Größen herangezogen:

Parameter	Beschreibung	Einheit	Quelle
I _{Batt}	Strom am Batteriesystem	А	
U _{Batt}	Spannung am Batteriesystem	V	
I_{LE}	Gleichstrom an der Leistungselektronik zum	А	
	Betrieb der elektrischen Maschine		
II.n	Gleichspannung an der Leistungselektronik	V	
OLE	zum Betrieb der elektrischen Maschine	•	
P _{PTC}	elektrische Leistung des PTC-Heizers	kW	
ח	elektrische Leistung am elektrischen	1-337	Messkampagne e-Caddy
P_{EKK}	Klimakompressor	K W	von Volkswagen
I _{DCDC,HV}	Strom am DCDC-Wandler, Hochvoltseite	А	Nutzfahrzeuge
SoC _{Batt}	State of Charge der Hochvoltbatterie	%	
n _{EM}	Drehzahl der EM	U/min	
M _{EM}	Drehmoment der EM	Nm	
p _{Bremse}	Bremsdruck	bar	
Mod _{Reku}	Rekuperationsmodus	D/B	
Pedal _{Antrieb}	Stellung des Antriebspedals	%	
PTC _{Soll}	PTC-Sollwertvorgabe	%	

Tabelle 3.14: Übersicht Validierungs- und Kennfelddaten Energiemodell

3.5.2 Klassifizierung der Messdaten nach Relevanz

3.5.2.1 Identifikation relevanter Tagesdatensätze nach Mindestentfernung und -betriebszeit

Es liegen 6231 Tagesdatensätze von 20 Fahrzeugen vor. Zunächst werden alle Tage aussortiert, an denen weniger als 20 Kilometer Strecke zurückgelegt wurde oder das Fahrzeug weniger als 20 Minuten in Betrieb war. Diese können als nicht für die Reichweitenbestimmung relevant angesehen werden. Danach verbleiben 3546 Tagesdatensätze von weiterhin allen 20 Fahrzeugen. Dieser Datensatz wird zur Auswertung der Tagesdatenwerte herangezogen.

Im Mittel dieses Datensatzes wurden pro Tag 43,1 km zurückgelegt und bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 34,1 km/h im Mittel 22,1 kWh/100km verbraucht.

3.5.2.2 Identifikation von relevanten Grenzfällen für die Energieverbrauchsbetrachtungen und Kennfeld-Berechnungen

Bei der Abschätzung des Energiebedarfs für Klimatisierung und Heizung für ein vorgegebenes Nutzungsprofil mit den Zielen Reichweitenprognose bzw. Batteriegrößenoptimierung ist es zweckmäßig, insbesondere die wärmeren und die kälteren Tage genauer abzubilden. Damit wird erreicht, dass in Fällen eines größeren Energiebedarfs die Genauigkeit des Modells maximal ist. In den Fällen von mittleren Umgebungstemperaturen kommt dem Energieverbrauch der HVAC ein deutlich geringeres Maß an Bedeutung zu. Gleichzeitig ist an diesen milden Tagen der tatsächliche Energieverbrauch relativ stärker an spezifischen Nutzerpräferenzen und Einsatzfällen (z.B. Solltemperaturvorgabe, Türöffnung für Beladevorgänge, Aufheizverhalten und Regelung der HVAC) orientiert, was eine Bedarfsabschätzung deutlich unsicherer und relativ gesehen (simulierter Energieverbrauch / gemessenen Energieverbrauch) schlechter macht. Analoge Überlegungen gelten auch für den Antriebsenergiebedarf. Vor diesem Hintergrund werden jeweils die zehn Tage ausgewählt, die nach den folgenden zehn Kriterien über den Tagesverlauf jeweils die Extremwerte beinhalten:

- Tage mit höchsten aufgezeichneten Gesamtenergieverbrauch an der Batterie
- Tage mit höchsten aufgezeichneten Energieverbrauch an der E-Maschine
- Tage mit höchsten aufgezeichneten Energieverbrauch am PTC-Heizer
- Tage mit höchsten aufgezeichneten Energieverbrauch am Klimakompressor
- Tage mit längster gefahrener Strecke
- Kälteste Tage (mittlere Außentemperatur)
- Wärmste Tage (mittlere Außentemperatur)
- Tage mit längster Betriebsdauer
- Tage mit maximalem mittleren Temperaturunterschied Innen-Außen
- Tage mit höchster Durchschnittsgeschwindigkeit

Durch Überschneidungen der ausgewählten Tage ergeben sich 84 kritische Tage, die im Folgenden weiter betrachtet werden. Im Mittel dieses reduzierten Datensatzes mit extremen Tagen wurden pro Tag 65,4 km zurückgelegt und bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 41,2 km/h im Mittel 25,9 kWh/100km verbraucht (s. Abbildung 3-22). Im Vergleich zur mittleren Verbrauchsangabe von 21,3 kWh/100km im Abschlussbericht des Forschungsvorhabens "CO2-Emissionseinsparungen durch den Einsatz von E-Fahrzeugen in Nutzfahrzeugflotten – Ecargo" (Volkswagen AG 2015, S. 32) sind die mittleren Verbräuche höher, da hier explizit verbrauchskritische Tage betrachtet werden.


Abbildung 3-22: Histogramme zu den e-Caddy-Realdaten

3.5.3 Ableitung fahrzeug- und komponentenspezifischer Kennfelder aus den Messdaten zur Parametrierung des Simulationsmodells

Aufgrund der umfangreichen verfügbaren Daten des Modells e-Caddy können Kennfelder und -linien einzelner Komponenten oder Systeme aus den Daten abgeleitet werden. Dazu werden die Daten geeignet gefiltert und dann Datenpunkte nach bestimmten Kriterien ausgewertet. Durch Betrachtung von Quantilwerten, Mittelwerten oder Trendlinien entlang der unabhängigen Variablen werden Kennfelder bzw. -linien abgeleitet und anschließend zur Modellparametrierung verwendet. Die Verwendung von Kennfeldern für bestimmte Komponenten vereinfacht den Modellierungs- und Rechenaufwand im Modell erheblich. Dafür ist zu berücksichtigen, dass Einflüsse vernachlässigt und statistisch gemittelt werden. Dies ist bei der Bewertung der Modellvalidierung und auch -anwendung zu beachten. Die Verwendung der Kennlinien und -felder im Modell wird so implementiert, dass bei Abruf eines Datenpunktes außerhalb des empirisch ermittelten Kennfeldes der nächste Verfügbare Datenpunkt zugeordnet wird, es erfolgt keine Extrapolation der kennfeldinternen Verläufe.

3.5.3.1 Drehzahl-Drehmoment-Kennfeld des Systems elektrische Maschine und Leistungselektronik

Aufgrund der verfügbaren Daten werden EM und LE gemeinsam als ein Black-Box-System betrachtet. Die verfügbaren Größen elektrische (Gleichstrom-) Leistung an der LE und mechanische Leistung der EM werden schrittweise entlang der Einflussgrößen Drehmoment und Drehzahl gemittelt zur Beschreibung eines Gesamtkennfeldes herangezogen. Dieses Kennfeld des Systems EM und LE (s. Abbildung 3-23) beschreibt damit den mittleren Wirkungsgrad bei der Wandlung von elektrischer in mechanische Energie (positives Moment) oder andersherum (negatives Moment) entlang der Größen Drehmoment und Drehzahl. Beim e-Caddy bewegt sich der gemessene Systemwirkungsgrad zwischen 0,79 und 0,98. Zur Erzeugung des Kennfelds wurden Datenpunkte betrachtet, die folgenden Kriterien genügen:

- Fahrzeug in Bewegung $/V_{Fzg} /> 0$ km/h
- $mod_{Fzg}(,,Z$ ündung'') = an



Abbildung 3-23: Kennfeld System Leistungselektronik und E-Maschine

3.5.3.2 Rekuperationskennlinie der E-Maschine

Beim e-Caddy kann die gewünschte Intensität der Rekuperation durch die E-Maschine über den Wahlhebel eingestellt werden. Im Fahrmodus "B" wird bei Freigeben des Gaspedals automatisch die volle Rekuperationsleistung durch die E-Maschine geliefert. Dadurch ist es möglich, aus den vorliegenden Daten in Abhängigkeit der Geschwindigkeit das maximale Rekuperationsmoment der E-Maschine zu bestimmen. Als Bedingung für die berücksichtigten Datenpunkte wird gesetzt:

- Fahrzeug in Bewegung $/V_{Fzg} /> 0$ km/h
- Fahrmodus $mod_{Reku} = B$
- Bremsdruck unterhalb der Betätigungsschwelle $p_{Bremse} < 0,7$ bar
- Antriebspedalstellung $Pedal_{Antrieb} = 0\%$

Anschließend wird das gemessene Moment entlang der Fahrzeuggeschwindigkeit aufgetragen und das untere 5%-Quantil als Kennlinie verwendet (s. Abbildung 3-24).



Abbildung 3-24: Rekuperationsmoment E-Maschine

Durch Verwendung dieser Kennlinie wird im Verzögerungsfall die Aufteilung der Verzögerung auf E-Maschine (Rekuperation) und Bremse modelliert.

3.5.3.3 Kennlinie PTC-Heizer

PTC-Heizelemente besitzen die Charakteristik, dass der elektrische Widerstand mit der Temperatur steigt (positive temperature coefficient) und bei konstanter Spannung Stromstärke und damit die Heizleistung sinken. Dieses Verhalten zeigt auch der im e-Caddy verbaute PTC-Heizer (s. Abbildung 3-25). Betrachtet wird die Kühlmitteltemperatur am Eingang zum PTC-Heizelement $\vartheta_{HW,vorPTC}$. Die Bedingungen für die zur Bestimmung der Kennlinie verwendeten Datenpunkte lauten:

- mod_{Fzg} (,,,Zündung") = an
- PTC-Sollwertvorgabe $PTC_{Soll} = 100\%$
- Keine Berücksichtigung des Einschaltverhaltens des PTC-Elements: $t_{PTC,an} > 30s$

Der lineare Trend der Messdaten beschreibt die zu verwendende Kennlinie.



Abbildung 3-25: Kennlinie PTC-Heizer

3.5.3.4 Verbrauchsprofil elektrischer Klimakompressor

Die Energieaufnahme des Klimakompressors wird wie im Abschnitt 3.4.3.6 beschrieben simuliert. Zur Beschreibung der Einflussgrößen und zur Modellvalidierung stehen jedoch wichtige Daten nicht im genutzten Datensatz zur Verfügung (z.B. manuelles Ein-/Ausschalten der Klimaanlage, Temperatur/Druck Kältemittel, Lufttemperaturen am Verdampfer). Dadurch muss die Modellparametrierung nach Literaturwerten erfolgen. Hierbei sind stärkere Abweichungen zu erwarten. Aus diesem Grunde wird zur Bestimmung des Energiebedarfs am Klimakompressor zusätzlich eine bivariate kubische Regression eingesetzt. Als wichtigste Einflussgrößen (unabhängige Variablen der Regression) wurden folgende Größen identifiziert:

• Umgebungstemperatur ϑ_U

• Zeit seit Start des Fahrzeugs *t*_{Fzg,an}

So kann jedem Betriebszustand des e-Caddy ein mittlerer aus den verfügbaren Daten abgeleiteter elektrischer Leistungsbedarf für den Klimakompressor zugeordnet werden. Der mittlere Leistungsbedarf wird ermittelt für alle Datenpunkte, die das Kriterium erfüllen:

• $mod_{Fzg}(,,Z"undung") = an$

Damit werden Kühllasten, die beim Laden der Batterie anfallen, nicht berücksichtigt. Beim Laden wird die zum Kühlen/Klimatisieren benötigte Energie jedoch dem Netz entnommen und hat damit keine Auswirkungen auf die Reichweite, lediglich auf die verfügbare Ladeleistung.

Abbildung 3-26 zeigt das durch bivariate quadratische Regression erstellte Kennfeld des Leitungsbedarfs des Klimakompressors entlang der Einflussgrößen Umgebungstemperatur und Zeit seit Start des Fahrzeugs. Gut zu erkennen ist, dass insbesondere an warmen Tagen und zu Beginn der Fahrt Leistung für die Klimatisierung bezogen wird.



Abbildung 3-26: Kennfeld Klimaleistungsbedarf (bivariate Regression, quadratisch)

(117) zeigt die zugehörige Regressionsgleichung zur Bestimmung der elektrischen Klimatisierungsleistung in kW. Negative Ergebnisse sind dabei gleich null zu setzen. Der zu erwartende maximale Leistungsbedarf liegt bei hohen Temperaturen und zu Beginn einer Fahrt, wenn der Fahrgastraum zunächst heruntergekühlt werden muss. Die geringe mittlere Leistung bestätigt die eingangs formulierte Erwartung, dass der energetisch kritischere Einsatzbereich in Deutschland im Winterbetrieb liegt.

$$P_{EKK,Reg} = 0,001678 + 0,010917 \cdot \vartheta_U - 0.000032 \cdot t_{Fzg,an} - 0,000004$$
(117)
$$\cdot \vartheta_U \cdot t_{Fzg,an} + 0,000251 \cdot \vartheta_U^2$$

3.5.3.5 Verbrauchsprofil Niedervolt-Verbraucher und Gleichspannungswandler

Da der Energieverbrauch der NV-Verbraucher nicht einzeln erfasst wurde, wird die Leistung des DCDC-Wandlers summarisch betrachtet und daran statistisch der mittlere Gesamtverbrauch der NV-Nebenaggregate abgeschätzt. Den Überlegungen aus Abschnitt 2.1.3.3 folgend wird der Leistungsbedarf des DCDC-Wandlers in Abhängigkeit der Momentangeschwindigkeit V_{Fzg} und der vorherrschenden Umgebungstemperatur ϑ_U betrachtet und durch eine bivariate kubische Regression ein Kennfeld gebildet (Abbildung 3-27).





• $mod_{Fzg}(,,Z\ddot{u}ndung'') = an$

(118) zeigt die zugehörige Regressionsgleichung zur Bestimmung der elektrischen Leistung am DCDC in kW. Die Schätzwerte der Regression zeigen, dass der Basis-DCDC-Verbrauch bei ca.
0,3kW liegt. Insbesondere an kalten heißen Tagen sowie bei niedrigen Geschwindigkeiten sind wie erwartet erhöhte Leistungen zu beobachten und können damit im Modell Berücksichtigung finden. Der zu erkennende moderate Anstieg bei Geschwindigkeiten über 100 km/h erscheint zudem aufgrund des dann auftretenden Leistungsbedarfs bei stärkeren Bremsmanövern plausibel.

$$P_{DCDC,Reg} = 0,472028 - 0,011197 \cdot \vartheta_U - 0,002294 \cdot v_{Fzg} + 0.000014 \cdot v_{Fzg}^2$$
(118)
+ 0.000111 \cdot \vartheta_U \cdot v_{Fzg} + 0.000084 \cdot \vartheta_U^2 - 0.000002 \cdot \vartheta_U^2 \cdot v_{Fzg}
+ 0.000004 \cdot \vartheta_U^3

3.5.4 Plausibilisierung Modellgüte mit Hersteller-Verbrauchsangaben

Zur ersten Plausibilisierung des Modells werden die Ergebnisse beim Durchfahren des Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) mit den Hersteller-Verbrauchsangaben abgeglichen.



Abbildung 3-28: Leistungsverlauf und Energieverbrauch e-Caddy im NEFZ

Herstellerseitig ist der Energieverbrauch im NEFZ des e-Caddy mit 18,5 kWh/100 km angegeben. Das Modell bewertet den Energieverbrauch bei abgeschalteter HVAC mit 18,6 kWh/100km. Damit liegt der Fehler bei ca. 0,5% und das zugrundeliegende Fahrenergiemodell wird für die vom NEFZ abgedeckten Betriebspunkte als plausibel bewertet. Im weiteren Verlauf werden die zur Verfügung stehenden Messdaten verwendet, um die Validität des Modells bei unterschiedlichen Nutzungs- und Umgebungsbedingungen zu überprüfen.

3.5.5 Bewertung Modellgüte anhand von Flottendaten

Zur Bewertung der Güte des Simulationsmodells werden die Simulationsergebnisse den Messdaten gegenübergestellt und die Übereinstimmungsgüte statistisch bewertet. Dazu wird sowohl das Gesamtmodell wie auch die einzelnen Komponenten Antrieb, Heizung, Klima und DCDC betrachtet. Dargestellt wird die Auswertung jeweils anhand der unter 3.5.2.2 für Grenzsituationen ausgewählten Tagesdatensätze.

Zur Illustration wird in Abbildung 3-29 anhand eines Beispieltages der Tagesverlauf von simuliertem Energiebedarf des betrachteten Systems dem geloggten gegenübergestellt.



Abbildung 3-29: Simulierter und gemessener Energiebedarf Gesamtfahrzeug, Antrieb und Nebenaggregate am 30. Jan, Gesamtfahrstrecke: 56km

Es ist zu erkennen, dass sich untertägig auftretende Abweichungen teilweise bei Betrachtung des Gesamttagesenergiebedarfs wieder aufheben. Ein Erklärungsansatz hierfür liegt in den im Simulationsmodell implementierten, aus Mittelwerten generierten Kennlinien und Kennfeldern (z.B. Wirkungsgrad LE/EM, PTC-Kennfeld, Klima-Leistung), der Verwendung von konstanten Durchschnittswerten aus der Literatur für einige Parameter (z.B. Luftwiderstandsbeiwert c_w, Rollwiderstandsbeiwert f_r) und Effekten aus nicht berücksichtigten Einflussgrößen (z.B. Wind, kurzzeitiges Öffnen von Fenstern oder Türen).

Gütebewertung Tagesenergiebedarf

Der Fokus der Validierung liegt auf dem Vergleich von simulierten und geloggten kumulierten Tageswerten der Energieverbräuche. Diese stellen in vielen Anwendungsfällen einen Verbrauchszyklus zwischen zwei Ladevorgängen dar und sind damit für die Bestimmung der benötigten Reichweite bzw. Batteriekapazität ausschlaggebend. Für die in 3.5.2.2 beschriebenen 84 Grenzfälle zeigen die folgenden Abschnitte auf, wie gut die simulierten Ergebnisse auf Gesamtmodellund auf Komponentenebene die geloggten Realverbräuche reproduzieren können. Zusätzlich erfolgt eine Fehlerbetrachtung anhand von Boxplots der Residualwerte bei Subtraktion der Realwerte von den Simulationsergebnissen. Die Abweichungen werden zudem denen von einfachen statistischen Schätzverfahren (Mittelwert und einfache lineare Regression) gegenübergestellt.

Als Referenz wird auf die Validität anderer Modelle zur energetischen Simulation realer Fahrprofile verwiesen. So verbleibt z.B. bei Orner 2017, S. 54 im Basismodell ein Fehlerbereich von -7,26% bis 10,42%, im Mittel 0,23%.





Abbildung 3-30: Vergleich des gemessenen (Log) mit dem simulierten (Sim) Energiebedarf auf Ebene Gesamtfahrzeug bzw. an der Traktionsbatterie

Abbildung 3-30 zeigt die Ergebnisse der Gesamtfahrzeugsimulation mit dem simulierten über dem geloggten Tagesenergieverbrauch. Punkte unter der Winkelhalbierenden stellen Tage dar, an denen das Simulationsmodell den gemessenen Verbrauch unterschätzt, oberhalb liegen Tage, an denen das Simulationsmodell einen zu hohen Energiebedarf vorhersagt. Ergebnisse auf der Winkelhalbierenden zeigen Tage, an denen das Modell gut die realen Verbräuche abbildet. Insgesamt bildet das Modell den Energiebedarf gut ab, alle Datenpunkte befinden sich auf oder in der Nähe der Winkelhalbierenden. Insgesamt wird der Energiebedarf leicht überschätzt. Im Mittel errechnet das Modell einen Verbrauch von 25,9 kWh/100km gegenüber einem geloggten Verbrauch von 25,7 kWh/100km. Dies entspricht einem mittleren Fehler von 0,78%.

Anhand von Boxplots wird anschließend die Verteilung der Differenzen von simulierten zu geloggten Tagesenergieverbräuchen bezogen auf 100km betrachtet und mit einfachen Methoden der Verbrauchsschätzung verglichen (Abbildung 3-31). In der mit Sim bezeichneten unteren Zeile sind die Simulationsgüten der einzelnen Tage als Differenz des simulierten und geloggten Gesamttagesenergieverbrauchs bezogen auf 100km dargestellt. Im Median überschätzt die Simulation

den real gemessenen Verbrauch um $p_{0.50} = 0.9 \text{kWh}/100 \text{km}$.



Abbildung 3-31: Boxplot der Differenz von berechnetem zu geloggtem Gesamtfahrzeug-Energieverbrauch auf 100km normiert

Anmerkung: Zum Vergleich und zur Einordnung der Simulationsgüte in Zeile Sim sind in den Zeilen Mean und Reg die Ergebnisse einfacher datenbasierter Methoden zur Energieverbrauchsberechnung abgebildet. Mean steht dafür, dass für den Energieverbrauch das arithmetische Mittel aller betrachten Tagesdatensätze angesetzt wird. In der Zeile Reg ist das Ergebnis abgebildet bei Verwendung einer einfachen linearen Regression aller betrachten Tagesdatensätze mit der Tagesdurchschnittsgeschwindigkeit als unabhängige Variable.

Es wird deutlich, dass die beiden einfachen Alternativen zur simulativen Energiebedarfsprognose mit deutlich höheren Varianzen und damit Unsicherheiten behaftet sind. So sinkt der Interquartilsabstand der Abweichungen von berechnetem zu geloggtem Energieverbrauch aller betrachteter Tagen von 13,2 kWh/100km bei der Regression (Reg) auf 3,1 kWh/100km bei der implementierten Simulation (Sim). Die maximale auftretende Abweichung sinkt im absoluten Betrag von 16,2 kWh/100km (Reg) auf 5,5 kWh/100km (Sim).



Abbildung 3-32: Vergleich des gemessenen (Log) mit dem simulierten (Sim) Energiebedarfs des Fahrzeugantriebs

Bei Betrachtung des Hauptverbrauchers im Fahrzeug, des Antriebs, ergibt sich ein ähnliches Bild (Abbildung 3-32). Es zeigt sich, dass die Simulation den Energieverbrauch des Antriebsstranges gut vorhersagt.



Abbildung 3-33: Boxplot der Differenz von simuliertem zu geloggtem Antriebs-Energieverbrauch auf 100km normiert

Dies zeigt auch die Betrachtung des Verbrauchs auf 100km in Abbildung 3-33. Die Simulation des Antriebenergiebedarfs ergibt im Vergleich zu einer einfachen Mittelwertbetrachtung und auch zur univariaten, linearen Regression in Abhängigkeit der mittleren Fahrgeschwindigkeit etwas bessere Ergebnisse. Der Interquartilsabstand der Abweichungen von berechnetem zu geloggtem Energieverbrauch aller betrachteter Tage sinkt von 3,7 kWh/100km bei der Regression (Reg) auf 3,3 kWh/100km bei der implementierten Simulation (Sim). Die maximale auftretende Abweichung sinkt deutlich im absoluten Betrag von 12,0 kWh/100km (Reg) auf 6,9 kWh/100km (Sim). Bemerkenswert ist, dass die vergleichsweise einfachen Verfahren bei Betrachtung des Antriebs im Mittel deutlich besser geeignet sind, als auf Ebene des Gesamtfahrzeugs.

3.5.5.3 Modell Heizung



Abbildung 3-34: Vergleich des gemessenen (Log) mit dem simulierten (Sim) Energiebedarfs der PTC-Heizung

Die Heizung über das PTC-Element ist als verbrauchsstärkstes Nebenaggregat eine zentrale Komponente bei der energetischen Betrachtung von Elektrofahrzeugen. Abbildung 3-34 und Abbildung 3-35 zeigen, dass das hier implementierte Simulationsmodell bei auf Streckenverbrauch normierter Betrachtung eine vergleichbare Genauigkeit erzielt, wie das Antriebsmodell. Dabei ist es dem Mittelwert- und auch dem linearen Regressionsansatz mit der Außentemperatur als unabhängige Variablen deutlich überlegen.

Der Interquartilsabstand der Abweichungen von berechnetem zu geloggtem Energieverbrauch aller betrachteter Tage sinkt von 5,5 kWh/100km bei der Regression (Reg) auf 0,6 kWh/100km bei der implementierten Simulation (Sim). Dabei treten jedoch vermehrt Ausreißer auf. Dieser Effekt wird zum Teil durch das korrekte Erkennen von Tagen ohne Heizenergieverbrauch durch die Simulation erreicht. Die maximal auftretende Abweichung sinkt deutlich im absoluten Betrag von 11,8 kWh/100km (Reg) auf 3,9 kWh/100km (Sim). Das Ergebnis zeigt das im Vergleich zu den einfachen Verfahren große Potenzial den Heizungsenergiebedarf durch die Simulation mit hoher Güte zu berechnen.



Abbildung 3-35: Boxplot der Differenz von simuliertem zu geloggtem Heizungs-Energieverbrauch auf 100km normiert





Abbildung 3-36: Vergleich des gemessenen (Log) mit dem simulierten (Sim) Energiebedarfs des Klimakompressors

Die Auswertung des Klimamodells muss differenzierter ausfallen. Zunächst ist hervorzuheben, dass sich der mittlere Energieverbrauch des Klimakompressors deutlich unter dem mittleren Verbrauch der Heizung und damit auch des Antriebs bewegt (s. a. Abschnitt 3.5.3.4). Aufgrund der geringen Verfügbarkeit an Informationen zur Ausführung des Kältekreises und an relevanten Zustandsgrößen in den Messdaten, musste das Klimamodell weitgehend auf Basis von Literaturwerten parametriert werden. Deutlich wird bei Betrachtung von Abbildung 3-36, dass die Abweichungen zwischen simuliertem und gemessenem Verbrauch im Verhältnis zum jeweiligen Verbrauch größer sind, als bei den oben betrachteten Komponenten. Grundsätzlich besteht hier Potenzial, durch weitere Anpassungen und zusätzliche Messpunkte das Klimamodell erheblich zu verbessern. Dafür standen im Rahmen dieser Dissertation nicht die notwendigen Daten zur Verfügung. Daher wird für die weiteren Auswertungen das in Abschnitt 3.5.3.4 vorgestellte Kennfeld in Abhängigkeit von Außentemperatur und Fahrzeit verwendet. Das Ergebnis ist in Abbildung 3-37 dargestellt. Durch die konstante Achs-Skalierung ist direkt ablesbar, dass sich das Ergebnis gegenüber der Simulation verbessert. Dieses Ergebnis fließt auch in die oben dargestellte Energiebetrachtung auf Gesamtfahrzeugebene ein.



Abbildung 3-37: Vergleich des gemessenen (Log) mit dem durch Regression (Ber) berechneten Energiebedarfs des Klimakompressors

Abbildung 3-38 zeigt, dass auch dieses Verfahren gegenüber den einfachen, auf Tageswerten basierenden Betrachtungen nicht unbedingt besser abschneidet. Gleichzeitig zeigt der Vergleich der Verteilung mit denen der anderen Komponenten jedoch, dass die Abweichungen bei Betrachtung des Streckenverbrauchs bezogen auf 100km im Mittel zu vernachlässigen sind. Die Ausreißer beschränken sich auf einen Fehlerbereich von vergleichbarer Größenordnung wie bei der Heizung. Eine Addition der größeren Fehler bei Heizung und Klimatisierung ist dabei nicht zu erwarten, da diese saison- bzw. temperaturbedingt an unterschiedlichen Tagen auftreten.



Abbildung 3-38: Boxplot der Differenz von durch Regression berechnetem zu geloggtem Klima-Energieverbrauch auf 100km normiert

Der Interquartilsabstand der Abweichungen von berechnetem zu geloggtem Energieverbrauch aller betrachteter Tage sinkt von 1,4 kWh/100km bei der Regression (Reg) auf 0,2 kWh/100km bei der implementierten multivariaten Regression (Ber). Die maximale auftretende Abweichung dagegen sinkt nur sehr moderat im absoluten Betrag von 5,6 kWh/100km (Reg) auf 5,1 kWh/100km (Ber). Es treten dabei verstärkt positive Abweichungen auf, also eine Überschätzung des Energiebedarfs durch die kennfeldbasierte Berechnung.

3.5.5.5 Modell Niedervoltverbraucher



Abbildung 3-39: Vergleich des gemessenen (Log) mit dem simulierten (Sim) Energiebedarfs des DCDC-Wandlers / NV-Bordnetzes

Der DCDC-Verbrauch des e-Caddy ist grundsätzlich über weite Strecken im Vergleich zu den anderen Komponenten gering und mit Ausnahmen auch relativ konstant. Es ist kein physikalisches Simulationsmodell hinterlegt, sondern ein Kennfeld auf Basis einer bivariaten kubischen Regression (s. Abschnitt 3.5.3.5). Die Abbildung 3-39 zeigt, dass der Kennfeldansatz in den meisten Fällen gute Ergebnisse mit geringen absoluten Abweichungen liefert. Abbildung 3-40 verdeutlicht, dass die Abweichungen bei Betrachtung des Streckenverbrauchs auf 100km und im Vergleich mit den anderen Komponenten eine untergeordnete Rolle spielen.



Abbildung 3-40: Boxplot der Differenz von simuliertem zu geloggtem DCDC-Energieverbrauch auf 100km normiert

Im Vergleich zu der einfachen Mittelwertbetrachtung und auch zur univariaten linearen Regression in Abhängigkeit der mittleren Außentemperatur bietet der Ansatz die besseren Ergebnisse.

Der Interquartilsabstand der Abweichungen von berechnetem zu geloggtem Energieverbrauch aller betrachteter Tagen sinkt von 1,6 kWh/100km bei der Regression (Reg) auf 0,5 kWh/100km bei der implementierten Simulation (Sim). Die maximale auftretende Abweichung sinkt im absoluten Betrag von 3,4 kWh/100km (Reg) auf 2,4 kWh/100km (Sim).

3.5.5.6 Fazit Güte Simulationsmodell e-Caddy

Zusammenfassend und die dritte Forschungsfrage beantwortend ist festzustellen, dass das Modell im Vergleich zu einfacheren statistischen Verfahren (Mittelwert und univariate, lineare Regression auf Basis von Tageswerten) bessere Prognosewerte für den Energieverbrauch liefert. Auf der Ebene Gesamtsystem sind in Einzelfällen Abweichungen von bis zu 5,5 kWh/100km zu beobachten, dies entspricht bei einem mittleren Verbrauch von 25,9 kWh/100km ca. 21% des Verbrauchs. Im Mittel sind die Abweichungen jedoch deutlich geringer, sodass die mittleren 50% aller Abweichungen im Bereich von -0,1% bis 9,0% liegen.

Die absolut größten Verbräuche und auch Abweichungen treten insbesondere im Antriebsmodul und im Heizungsmodul auf. Aus diesem Grunde stellen diese beiden Komponenten des Simulationsmodells den Fokus dieser Dissertation dar. Die Module Klima und DCDC-Wandler beruhen auf aus Daten abgeleiteten multivariaten Regressionsmodellen. Hier treten zwar relativ höhere Abweichungen auf, absolut im Gesamtsystem sind diese jedoch geringer.

Durch die Berücksichtigung weiterer Einflussgrößen wie z.B. Fahrzeuggewicht/Beladung, Windgeschwindigkeit/-richtung, Sollklimatemperatur, Umluftanteil) und einer detaillierteren Abbildung des Fahrzeugs (z.B. Wärmeübertragung Heizsystem, Kältekreis) ist eine weitere Verbesserung der Modellgüte zu erwarten.

3.6 Validierung des Modells für ein leichtes eNfz der Transporterklasse (3,9t zGG)

Ein eingangs beschriebener Vorteil des physikalischen Simulationsmodells liegt in der vergleichsweise einfachen Übertragbarkeit auf verwandte Anwendungsfälle. In diesem Kapitel wird daher das für den Stadtlieferwagen entwickelte Energiemodell auf ein leichtes eNfz der Transporterklasse übertragen. Es werden die Anpassungen am Modellaufbau und der Parametrierung beschrieben, die verfügbaren Daten vorgestellt und schließlich eine Validierung des Modells mit energetischen Messgrößen durchgeführt und ausgewertet.

3.6.1 Datenbasis SAIC Maxus EV80

Im Rahmen des Projekts EN-WIN wurden mittels CAN-Datenlogger reale Nutzungs- und Verbrauchsdaten eines eNfz vom Typ SAIC Maxus EV80 mit Tiefkühl-Kofferaufbau der Firma Florida-Eis Manufaktur GmbH geloggt. Florida-Eis stattet seine Tiefkühl-Fahrzeuge unabhängig von der Antriebstechnologie mit einem eutektischen Kältespeichersystem aus, das während der Standzeit am Nachmittag bzw. über Nacht regeneriert wird und daher keine elektrische Energie aus der Traktionsbatterie bezieht. Daher ist trotz Tiefkühl-Aufbau für die Energieverbrauchs- bzw. Reichweitenberechnung kein zusätzliches Nebenaggregat zu berücksichtigen. Für diese Dissertation stehen 68 Tage aus dem Zeitraum 22.05.2020 bis 19.09.2020 zur Auswertung zur Verfügung. Im Mittel wurden am Tag 69,6 km zurückgelegt und bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 17,2 km/h und einer mittleren Umgebungstemperatur von 21,5 °C im Mittel 34,8 kWh/100km verbraucht. Die Verteilungen relevanter Messgrößen sind in Abbildung 3-41 dargestellt.

Der Maxus EV80 basiert als conversion-design-Fahrzeug technisch auf dem konventionellen Modell SAIC Maxus V80. Die Fahrten erfolgten sämtlich in Berlin und Umgebung bei flacher Topografie.



Abbildung 3-41: Histogramme zu den Maxus-Realdaten

Es ist zu beachten, dass aufgrund der Datenlage nur die Sommersaison betrachtet wird und ferner im Gegensatz zu Abschnitt 3.5 nur ein einziges Fahrzeug betrachtet wird. Abbildung 3-42 zeigt den SAIC Maxus EV80 der Florida-Eis Manufaktur GmbH, der im Projekt EN-WIN zum Einsatz kam.



Abbildung 3-42: SAIC Maxus EV80 der Florida-Eis Manufaktur GmbH mit Kofferaufbau (Bild: Jerratsch)

3.6.1.1 Modellparameter des Fahrzeugs – Antrieb

Dieses Kapitel beschreibt die Parametrierung des Modells mit den verfügbaren Werten des Maxus EV80. Teilweise werden auch Literaturwerte verwendet oder Parameter des e-Caddy übernommen, wenn keine spezifischen Daten verfügbar sind. Die folgende Tabelle 3.15 fasst die implementierten Parameter des Maxus EV80 zusammen. Die Werte entstammen Datenblättern, Produktbroschüren, eigenen Messungen am Fahrzeug und Literaturrecherchen. Bei fehlenden Informationen werden die Daten des e-Caddy als Annäherung verwendet.

Parameter	Wert	Einheit	Quelle
Batteriekapazität (nutzbar) E _{Batt,nutzbar}	56,0	kWh	ecomento.de 2020
Nutzbares SoC-Fenster	90	%	Annahme
Batteriekapazität (technisch) E_{Batt}	62,2	kWh	Annahme
Batteriemasse m _{Batt}	622	kg	Annahme zur Energiedichte:
Wirkungsgrad AC Ladagarät n	00	0/.	Übernehme e Ceddy
wirkungsgrad AC-Ladegerat <i>IJLaden</i>	90	70	Obernahme e-Caddy
max. Ladeleistung AC <i>P_{Laden,max}</i>	11	kW	Auswertung Nutzungsdaten
Wirkungsgrad DCDC-Wandler $\eta_{\scriptscriptstyle DCDC}$	90	%	Übernahme e-Caddy
Gesamtübersetzung Antriebsstrang <i>i</i> ges	9,49	-	Auswertung Nutzungsdaten
dynamischer Reifenradius r _{dyn}	0,351	m	Continental 2018, 205-75R16
Rollwiderstandsbeiwert f_r	0,012	-	Braess und Seiffert 2011, S. 35
Achs-Schwungmassen <i>m_{S,VA} / m_{S,HA}</i> je	26	kg	Übernahme e-Caddy
Trägheitsmoment E-Maschine <i>J</i> _{EM}	0,833	kg/m²	Übernahme e-Caddy
Vorspurwinkels β	0,3	0	Ersoy und Heißing 2008, S. 42
Schräglaufsteifigkeit der Reifen C_{β}	700	N/rad	Ersoy und Heißing 2008, S. 42

Tabelle 3.15: Übersicht Modellbedatung Antrieb

3.6.1.2 Modellparameter des Fahrzeugs – Fahrzeuggeometrie

Die folgende Tabelle 3.16 stellt die implementierten geometrischen Parameter des Maxus EV80 dar. Zur Ermittlung der Werte wurde das Fahrzeug vermessen. Die Bezeichner der geometrischen Abmessungen vom Fahrgastraum beziehen sich auf Abbildung 3-9. Da der Maxus EV80 mit Kofferaufbau ausgeführt ist, sind Laderaum und Fahrgastkabine durch einen Abstand thermisch entkoppelt. Daher wird der Laderaum bei der thermischen Betrachtung der Fahrgastkabine nicht berücksichtigt, sondern nur der Wärmeübertrag über die Rückwand zur Umgebungsluft.

Parameter	Wert	Einheit	Quelle
Volumen Fahrerkabine	3,8	m ³	
l(Da)	0,45	m	
b(Da)	2,00	m	
l(Bo)	1,22	m	
b(Bo)	2,00	m	
l(KS)	1,22	m	
h(KS)	1,10	m	
b(SW)	2,00	m	aigana Varmassung das Fahrzaugs
h(SW)	1,10	m	ergene vermessung des Famzeugs
b(TW)	2,00	m	
h(TW)	1,79	m	
l(FS)	1,03	m	
b(FS)	2,00	m	
α (FS) zur Waagerechten	42	0	
h(SS)	0,83	m	
l(SS)	0,69	m	
Nutzlast	600	kg	Florida-Eis Manufaktur GmbH
zul. Gesamtgewicht	3900	kg	Florida-Eis Manufaktur GmbH
mittleres Ezg-Gewicht	3840	kg	Annahme: aufgrund der geringen
Initieres rzg-Gewient			Nutzlast, sehr hohe Auslastung
Fahrzeug-Stirnfläche A	5,7	m ²	eigene Vermessung des Fahrzeugs
		-	Abgeleitet aus Transporter mit
Luftwiderstandsbeiwert CW	0,6		Kofferaufbau (www.sprinter-
			forum.de/viewtopic.php?t=7146)
Summe der Oberflächen aller	10 m ²		Figene Abschätzung
Einbauten <i>A</i> _{EB}			
Summe der Massen aller	100 kg		Figene Abschätzung
Einbauten <i>m</i> _{EB}			
Absorptionskoeffizient	0.08		schwarze Ausstattung (Großmann
Einbauten α_{EB}	0,70		2013, S. 18)

Tabelle 3.16: Übersicht Modellbedatung Geometrie

3.6.1.3 Modellparameter des Fahrzeugs – Heizung und Klimaanlage

Die folgende Tabelle 3.17 fasst die implementierten Parameter der HVAC-Anlage des Maxus EV80 zusammen.

Parameter	Wert	Einheit	Quelle
max. Leistung des Luft-PTC-Heizers	06	kW	Auswertung Nutzungsdaten
<i>F PTC,max</i> (001 180 02w. 0 C)			
Gleichwertiger Strömungsradius PTC r _{PTC}	1,5	cm	eigene Berechnung mit Angaben aus BorgWarner 2017
Überströmte Rohrlänge im PTC <i>I_{PTC}</i>	3	m	eigene Berechnung mit Angaben aus BorgWarner 2017
Masse PTC m_{PTC}	3,24	kg	BorgWarner 2017
elektrische Leistung Klimakompressor P_{EKK}	5,1	kW	Übernahme e-Caddy
Regelparameter	-	-	Übernahme e-Caddy
Zieltemperatur Fahrerkabine Klimabetrieb, max. $\vartheta_{Innen,Soll,Klima,max}$	21	°C	Übernahme e-Caddy

Tabelle 3.17: Übersicht Modellbedatung HVAC

Stoffwerte wie Wärmekapazitäten, Strömungskennzahlen und Strahlungseigenschaften werden VDI 2013 entnommen.

3.6.1.4 Übersicht zu den aufgezeichneten und verwendeten Nutzungs- und Umgebungsdaten

Als Eingangsgrößen für das Modell stehen die folgenden, zeitabhängig aufgezeichneten Nutzungsgrößen zur Verfügung (s. a. Abschnitt 3.3):

Parameter	Beschreibung	Einheit	Quelle	
t	Datum und Zeit	datetime		
V _{Fzg}	Fahrzeug-Geschwindigkeit	km/h		
mod_{Fzg}	mod_{Fzg}Fahrzeugzustand ("Zündung")			
odo_{Fzg}	Streckenzähler (Odometer)	km	Daten aus EN-WIN-	
$\vartheta_{Luft,Kabine}$	ft,KabineLufttemperatur der Fahrerkabineft,UmgebungTemperatur der Umgebungsluft		Messkampagne	
$\vartheta_{Luft,Umgebung}$				
Pos _{Fzg}	Standort des Fahrzeugs in	0		

Tabelle 3.18: Übersicht Logger-Eingangsgrößen Energiemodell e-Caddy

Zusätzlich werden folgende Umgebungsgrößen als Sekundärdaten (s. Kap.2.3.3) den Messdaten zugeordnet und in der Simulation verwendet:

Parameter	Beschreibung	Einheit	Quelle	
h_{Fzg}	geographische Höhe	m		
q_{Fzg}	Steigung des Fahrweges	%		
rF _{Luft,U}	relative Feuchte der Umgebungsluft	°C		
α_S	Höhenwinkel der Sonnen über	0		
	dem Horizont		s. Kap.2.4	
γ_S	Azimut der Sonneneinstrahlung	0		
P _{Sonne,global}	spezifische Global-	W/m^2		
	strahlungsleistung der Sonne	vv /111 ⁻		
P _{Sonne,diff}	spezifische diffuse	W//ma2		
	Strahlungsleistung der Sonne	VV / III2		

Tabelle 3.19: Übersicht zusätzliche Umgebungsgrößen Energiemodell e-Caddy

Weitere nicht quantifiziert verfügbare Einflussgrößen werden als konstant angenommen. Es wird von einer Person im Fahrzeug ausgegangen, sowie das Fahrzeuggewicht mit dem mittleren Fahrzeuggewicht angesetzt. Wind und Niederschlag werden vernachlässigt. Als Startzustand für alle simulierten Temperaturen wird jeweils der erste verfügbare Messwert der Innentemperatur eines jeden Tages verwendet und damit von einem mit dieser Temperatur durchkonditionierten Fahrzeug ausgegangen.

3.6.1.5 Validierungsdaten

Zur Bestimmung von Kennlinien bzw. -feldern und zur Validierung des Modells werden zusätzlich zu den Eingangsgrößen auch die folgenden, in Tabelle 3.20 geloggten Größen herangezogen:

Parameter	Beschreibung	Einheit	Quelle
P _{Batt}	Leistung des Batteriesystems	kW	
P_{LE}	elektrische Leistung der elektrischen Maschine	kW	
P _{PTC}	elektrische Leistung des PTC-Heizelements	kW	Daten aus
P _{EKK}	elektrische Leistung am elektrischen	1-W	EN-WIN-
	Klimakompressor	K VV	Mess-
P _{DCDC,HV}	elektrische Leistung des DCDC-Wandlers,	1×W	kampagne
	Hochvoltseite	K VV	
SoC _{Batt}	State of Charge der Hochvoltbatterie	%	

Tabelle 3.20: Übersicht Validierungs- und Kennfelddaten Energiemodell

3.6.2 Klassifizierung der Messdaten nach Relevanz

Aufgrund des geringen Datenumfangs werden alle 68 Tage vollständig im weiteren Verlauf für Kennfeldgenerierung und Validierung berücksichtigt.

3.6.3 Ableitung fahrzeug- und komponentenspezifischer Kennfelder aus den Messdaten zur Parametrierung bzw. Gütebewertung des Simulationsmodells

Analog zum Vorgehen beim e-Caddy werden Kennfelder aus den vorhandenen Messdaten erzeugt, um die Konfiguration des Maxus EV80 zu berücksichtigen. Teilweise werden jedoch auch Kennfelder

eingesetzt, die aus den Daten des e-Caddy ermittelt wurden, wenn die Datenlage keine Generierung von Maxus-typischen Kennfeldern zulässt und die Komponenten grundsätzlich vergleichbar sind.

3.6.3.1 Kennfelder Antrieb und Rekuperation

Aufgrund der weniger umfangreichen Daten, z.B. steht kein Drehmoment zur Verfügung, können keine Maxus EV80-spezifischen Kennfelder erzeugt werden für den Wirkungsgrad von E-Maschine und Leistungselektronik sowie für die Rekuperation. Stattdessen werden die für den e-Caddy ermittelten Kennfelder verwendet. Da in beiden Fahrzeugen permanent erregte Synchronmaschinen mit ähnlichen Leistungsmerkmalen, e-Caddy: $P_{Nenn} = 85$ kW, Maxus EV80: $P_{Nenn} = 92$ kW verbaut sind und die Spannungslage der HV-Batterien jeweils bei ca. 350V liegt, werden die Abweichungen vernachlässigt.

3.6.3.2 Kennlinie PTC-Heizer

Der Maxus EV80 besitzt ein Luft-PTC-Heizsystem. Da keine PTC-Temperaturen und keine Ansteuerungsdaten verfügbar sind, kann keine empirische Kennlinie ermittelt werden. Stattdessen kann aus den Messdaten herausgelesen werden, dass die maximale Leistung nur sehr kurz anliegt und dann schnell auf ein relativ niedriges Niveau abfällt. Dies erscheint aufgrund der schnelleren Erwärmung eines Luft-PTC-Systems auch plausibel. Daher wird analog zum System im e-Caddy ein linearer Verlauf der PTC-Kennlinie angenommen und anhand minimaler und maximaler auftretender Leistungsdaten parametriert (Abbildung 3-43).



Abbildung 3-43: Kennlinie Luft-PTC-Heizer

3.6.3.3 Verbrauchsprofil elektrischer Klimakompressor

Analog zum e-Caddy kann der Energiebedarf am Klimakompressor durch eine bivariate kubische Regression berechnet werden. Abbildung 3-26 zeigt das Ergebnis entlang der Einflussgrößen Umgebungstemperatur und Zeit seit Start des Fahrzeugs. Gut zu erkennen ist, dass insbesondere an warmen Tagen und zu Beginn der Fahrt Leistung für die Klimatisierung bezogen wird. Hier findet das Herunterkühlen der aufgeheizten Kabine statt. Die betrachteten Daten erfüllen das Kriterium



• $mod_{Fzg}(,,Z"undung") = an.$

Abbildung 3-44: Kennfeld Klimaleistungsbedarf (bivariate, quadratische Regression)

(119) zeigt die zugehörige Regressionsgleichung zur Bestimmung der elektrischen Klimatisierungsleistung in kW. Negative Ergebnisse sind dabei gleich null zu setzen. Insgesamt ist wiederum zu erkennen, dass die Klimatisierungsleistung selbst an warmen Tagen im Mittel deutlich unter dem Heizleistungsbedarf von kalten Tagen liegt. Auffällig ist, dass im Maxus EV80 auch zu Beginn der Fahrt auch an kälteren Tagen die Klimaanlage zunächst in Betrieb gesetzt wird. Dies jedoch auf einem geringen Leistungsniveau und nur für wenige Minuten.

$$P_{EKK,Reg} = 0.243607 - 0.009661 \cdot \vartheta_U - 0.000017 \cdot t_{Fzg,an} + 0.000348 \cdot \vartheta_U^2$$
(119)

3.6.3.4 Verbrauchsprofil Niedervolt-Verbraucher und Gleichspannungswandler

Analog zum e-Caddy wird der Leistungsbedarf des DCDC-Wandlers in Abhängigkeit der Momentangeschwindigkeit und der vorherrschenden Außentemperatur betrachtet und durch eine bivariate Regression ein Kennfeld gebildet (Abbildung 3-45)



Abbildung 3-45: Leistungsbedarf DCDC-Wandler während der Fahrt (Maxus EV80, bivariate, kubische Regression) Die Bedingungen und Überlegungen gleichen denen beim e-Caddy:

• $mod_{Fzg}(,,Z\ddot{u}ndung'') = an.$

(120) zeigt die zugehörige Regressionsgleichung zur Bestimmung der elektrischen Leistung in kW. Die Schätzwerte der Regression zeigen, dass der Basis-DCDC-Verbrauch bei ca. 0,35kW liegt. Insbesondere an kalten Tagen und bei niedrigen Geschwindigkeiten sind wie erwartet erhöhte Leistungen zu beobachten. Aufgrund der verfügbaren Datenlage können keine Aussagen zu Tagen mit einer mittleren Außentemperatur von $\vartheta_{Außen} \ge 25^{\circ}C$ getroffen werden. Analog e-Caddy könnten hier ebenfalls erhöhte Verbräuche auftreten.

$$P_{DCDC,Reg} = 0.006466 \cdot v_{Fzg} - 0.000200 \cdot v_{Fzg}^{2} - 0.174783 \cdot \vartheta_{Außen} + 0.001071 \qquad (120)$$
$$\cdot \vartheta_{Außen} \cdot v_{Fzg} + 0.000001 \cdot \vartheta_{U} \cdot v_{Fzg}^{2} + 0.008914 \cdot \vartheta_{U}^{2}$$
$$- 0.000031 \cdot \vartheta_{U}^{2} \cdot v_{Fzg} + 1.557145 - 0.000145 \cdot \vartheta_{U}^{3}$$
$$+ 0.000002 \cdot v_{Fzg}^{3}$$

3.6.4 Plausibilisierung Modellgüte mit Hersteller-Verbrauchsangaben

Für das auf 3,9t aufgelastete Modell Maxus EV80 mit Tiefkühl-Kofferaufbau von Florida Eis sind keine Hersteller-Verbrauchsangaben verfügbar. Daher kann nur eine grobe Plausibilisierung anhand

des für den Kastenwagen mit 3,5t zulässigem Gesamtgewicht verfügbaren Verbrauchswerts im NEFZ von 34,2 kWh/100km (ecomento.de 2020) vorgenommen werden. Das hier betrachtete Maxus-Modell benötigt in der Simulation mit ausgeschalteter HVAC 36,6 kWh/100km und damit ca. 7,0% mehr Energie (Abbildung 3-46). Dieser Energiemehrbedarf erscheint durch das um 800kg höher angesetzte Leergewicht und den erhöhten Luftwiderstand durch den Tiefkühl-Kofferaufbau plausibel.



Abbildung 3-46: Leistungsverlauf und Energieverbrauch Maxus EV80 im NEFZ (Sim)

Im weiteren Verlauf werden die zur Verfügung stehenden Messdaten verwendet, um die Validität des Modells bei unterschiedlichen Nutzungs- und Umgebungsbedingungen zu überprüfen.

3.6.5 Bewertung Modellgüte anhand Flottendaten

Die Bewertung der Modellgüte für das Fahrzeug SAIC Maxus EV80 geschieht analog zur Bewertung des e-Caddy in Abschnitt 3.5.5. Jedoch unterscheiden sich die zur Verfügung stehenden Validierungsdaten grundsätzlich: Zum einen stehen beim e-Caddy Daten von 20 baugleichen Fahrzeugen zur Verfügung, beim Maxus EV80 sind nur Daten eines Fahrzeugs vorhanden. Zudem umfassen die Daten beim e-Caddy mehrere Jahre im Zeitraum 2013 bis 2015 und damit alle Jahreszeiten und unterschiedliche Wetterbedingungen. Die Maxus EV80-Daten umfassen nur den Zeitraum Mai bis September 2020 und damit keine Daten aus der kalten Jahreszeit. Ferner wurden die e-Caddy durch unterschiedlichste Nutzer*innen an unterschiedlichen Standorten genutzt, während der Maxus nur durch einen Nutzer am Standort Berlin genutzt wurde. Diese Umstände begleiten die Auswertung der Validierungsdaten. Wiederum wird bei dieser Validierung der Vergleich von simulierten und geloggten kumulierten Tageswerten der Energieverbräuche betrachtet. Es werden alle n = 68 Tagesdatensätze für die Validierung herangezogen. Wiederum erfolgt zunächst für das Gesamtmodell, dann für die Komponentenmodelle eine Gegenüberstellung der absoluten Verbrauchswerte mit den realen Messwerten. Zudem erfolgt die Darstellung der Abweichungen (Subtraktion der Realwerte von den simulierten Energieverbräuchen) bezogen auf eine Strecke von 100km und der Vergleich zu den einfachen statistischen Verfahren anhand von Boxplots.

3.6.5.1 Gesamtfahrzeugmodell / Energieverbrauch an Batterie



Abbildung 3-47: Vergleich des gemessenen (Log) mit dem simulierten (Sim) Energiebedarf auf Ebene Gesamtfahrzeug / an der Traktionsbatterie

Abbildung 3-47 zeigt die Ergebnisse der Gesamtfahrzeugsimulation mit dem simulierten über dem geloggten Tagesenergieverbrauch. Punkte unter der Winkelhalbierenden stellen Tage dar, an denen das Simulationsmodell den gemessenen Verbrauch unterschätzt, oberhalb liegen Tage, an denen das Simulationsmodell einen zu hohen Energiebedarf vorhersagt. Ergebnisse auf der Winkelhalbierenden zeigen Tage, an denen das Modell gut die realen Verbräuche abbildet. Insgesamt bildet das Modell den Energiebedarf gut ab, alle Datenpunkte befinden sich auf oder in der Nähe der Winkelhalbierenden. Im Mittel errechnet das Modell einen Verbrauch von 35,5 kWh/100km gegenüber einem geloggten Verbrauch von 34,3 kWh/100km. Dies entspricht einem mittleren Fehler von 3,5%.

Tagesenergieverbräuchen bezogen auf 100km im Vergleich mit den einfachen Schätz-Methoden

(Abbildung 3-48). In der mit Sim bezeichneten unteren Zeile sind die Simulationsgüten der einzelnen Tage als Differenz des simulierten und geloggten Gesamttagesenergieverbrauchs bezogen auf 100km dargestellt. Insbesondere die Quantile $p_{0,25} = -1,4$ kWh/100km und $p_{0,75}=2,3$ kWh/100km zeigen, dass das Modell den Energieverbrauch im Mittel leicht überschätzt. Der Interquartilsabstand und auch die gesamte Spannweite zeigen, dass die Abweichungen in der gleichen Größenordnung liegen wie beim e-Caddy.



Abbildung 3-48: Boxplot der Differenz von berechnetem zu geloggtem Gesamtfahrzeug-Energieverbrauch auf 100km normiert

Anders ist es bei den Vergleichswerten Mittelwert (Mean) und univariate, lineare Regression (Reg) in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit. Hier zeigen sich gegenüber dem e-Caddy deutlich geringere Abweichungen, vergleichbar denen der Simulation. Wie eingangs beschrieben, basierten diese Auswertungen auf einer sehr homogenen Datenbasis, was einen Ansatz bietet, die guten Ergebnisse dieser einfachen Verfahren zu erklären.



Abbildung 3-49: Vergleich des gemessenen (Log) mit dem simulierten (Sim) Energiebedarfs des Fahrzeugantriebs

Bei Betrachtung des Hauptverbrauchers im Fahrzeug, des Antriebs, ergibt sich ein ähnliches Bild (Abbildung 3-49). Es zeigt sich, dass die Simulation den Energieverbrauch des Antriebsstranges gut vorhersagt.



Abbildung 3-50: Boxplot der Differenz von simuliertem zu geloggtem Antriebs-Energieverbrauch auf 100km normiert

Dies zeigt auch die Betrachtung des Verbrauchs auf 100km in Abbildung 3-50. Die Simulation des Antriebsenergiebedarfs ergibt im Vergleich zu einer einfachen Mittelwertbetrachtung und auch zur univariaten, linearen Regression in Abhängigkeit der mittleren Fahrgeschwindigkeit die besseren Ergebnisse. Der Interquartilsabstand der Abweichungen von berechnetem zu geloggtem Energieverbrauch aller betrachteter Tage sinkt von 3,6 kWh/100km bei der Regression (Reg) auf 2,3 kWh/100km bei der implementierten Simulation (Sim). Die maximale auftretende Abweichung sinkt im absoluten Betrag von 7,1 kWh/100km (Reg) auf 5,1 kWh/100km (Sim).



Abbildung 3-51: Vergleich des gemessenen (Log) mit dem simulierten (Sim) Energiebedarfs der PTC-Heizung

Die Betrachtung des Ergebnisses bei der Heizung muss differenzierter ausfallen. Abbildung 3-51 zeigt zunächst, dass bei der Heizung deutliche Abweichungen zwischen Simulation und geloggtem Energieverbrauch auftreten. Abbildung 3-52 zeigt bei auf Streckenverbrauch normierter Betrachtung, dass das hier implementierte Simulationsmodell nur ein zu den einfachen Verfahren vergleichbar gutes Ergebnis erzielt. Der Interquartilsabstand der Abweichungen von berechnetem zu geloggtem Energieverbrauch aller betrachteter Tage sinkt lediglich von 1,3 kWh/100km bei der Regression (Reg) auf 1,1 kWh/100km bei der implementierten Simulation (Sim). Die maximale auftretende Abweichung sinkt zwar im absoluten Betrag von 4,6 kWh/100km (Reg) auf 4,2 kWh/100km (Sim). Die Spannweite der Residuen steigt jedoch sogar höhere bei der Simulation auftretende positive Abweichungen. Hier überschätzt das Modell demnach stärker den Energiebedarf der Heizung als die einfachen Verfahren.

Dieses im Vergleich zum e-Caddy schlechtere Ergebnis lässt sich auf zwei wesentliche Gründe zurückführen. Zum einen enthält die Parametrierung mangels detaillierter Fahrzeugdaten an mehreren Stellen Literaturwerte bzw. Annahmen bei der Beschreibung des Luft-PTC-Heizungssystems. Zum anderen erfolgt diese Validierung vorwiegend anhand von wärmeren Tagen, an denen insgesamt weniger geheizt wird und die Nutzung der Heizung zudem stärker dem individuellen Nutzungsverhalten angepasst wird. Dadurch ist die implementierte Logik der Solltemperatureinstellung stärker anfällig für Abweichungen und die einfachen Verfahren schneiden besser ab, als dies bei heterogeneren Validierungsdaten zu erwarten ist. Die bei der Simulation der PTC-Heizung auftretenden Abweichungen liegen jedoch insgesamt unterhalb derer des Antriebsmodells. Aus diesen Gründen werden der Modellfehler als akzeptabel angesehen und die Ergebnisse der Simulation denen der einfachen Verfahren bevorzugt.



Abbildung 3-52: Boxplot der Differenz von simuliertem zu geloggtem Heizungs-Energieverbrauch auf 100km normiert

3.6.5.4 Modell Klima

Bei der Betrachtung des Klimamodells zeigt sich wiederum, dass die Verwendung des physikalischen Simulationsmodells zu sehr hohen Abweichungen führt, daher wird auch hier das in Abschnitt 3.6.3.3 vorgestellte Kennfeld in Abhängigkeit von Außentemperatur und Fahrzeit verwendet. Das Ergebnis ist in Abbildung 3-53 dargestellt und findet so auch in der oben dargestellten Energiebetrachtung auf Gesamtfahrzeugebene Anwendung.



Abbildung 3-53: Vergleich des gemessenen (Log) mit dem durch Regression (Ber) berechneten Energiebedarfs des Klimakompressors

Abbildung 3-54 zeigt, dass dieser Ansatz gegenüber den einfachen, auf Tageswerten basierenden Betrachtungen nicht unbedingt zu besseren Ergebnissen führt. Der Interquartilsabstand der Abweichungen von berechnetem zu geloggtem Energieverbrauch aller betrachteter Tage sinkt zwar von 1,1 kWh/100km bei der Regression (Reg) auf 0,8 kWh/100km bei der Berechnung auf Basis des multivariaten, nicht-linearen Regressionsansatzes (Ber). Die maximale auftretende Abweichung steigt jedoch im absoluten Betrag von 1,2 kWh/100km (Reg) auf 2,2 kWh/100km (Ber). Aufgrund analoger Überlegungen wie bei der Heizung finden dennoch die Ergebnisse der multivariaten Regression im Gesamtmodell Anwendung. Insbesondere bei auf die Umgebungstemperatur bezogen heterogeneren Daten ist zu erwarten, dass die einfachen Verfahren vergleichsweise schlechtere Ergebnisse liefern. Auf Basis der verfügbaren Datenbasis kann diese Vermutung im Rahmen dieser Dissertation jedoch nicht nachgewiesen werden. Auch hier ist eine Addition der größeren Fehler bei Heizung und Klimatisierung nicht zu erwarten, da diese temperaturbedingt an unterschiedlichen Tagen auftreten.



Abbildung 3-54: Boxplot der Differenz von durch Regression berechnetem zu geloggtem Klima-Energieverbrauch auf 100km normiert

3.6.5.5 Modell Niedervoltverbraucher



Abbildung 3-55: Vergleich des gemessenen (Log) mit dem simulierten (Sim) Energiebedarfs des DCDC-Wandlers / NV-Bordnetzes

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse des DCDC- Modells mit den Realverbräuchen zeigt eine grundsätzliche Übereinstimmung bei vorhandener Streuung (Abbildung 3-55). Beim Abgleich der Ergebnisse mit den einfachen Verfahren zeigen sich kaum Unterschiede (Abbildung 3-56). Dies folgt daraus, dass das verwendete Kennfeld (s. Abschnitt 3.6.3.4) nur sehr geringe Leistungsunterschiede in den verschiedenen Betriebspunkten aufweist. Die Streuung der auf 100km bezogenen Abweichungen liegt auf ähnlichem Niveau wie die anderen Nebenaggregatemodelle Klima und Heizer und damit deutlich unter derjenigen des Antriebs.



Abbildung 3-56: Boxplot der Differenz von simuliertem zu geloggtem DCDC-Energieverbrauch auf 100km normiert

3.6.5.6 Fazit Güte Simulationsmodell Maxus EV80

Auf der Ebene Gesamtsystem sind in Einzelfällen Abweichungen von bis zu 6 kWh/100km zu beobachten, dies entspricht bei einem mittleren Verbrauch von 34,3 kWh/100km gut 17% des Verbrauchs. Im Mittel sind die Abweichungen jedoch deutlich geringer, sodass die mittleren 50% aller Abweichungen im Bereich und von -1,5kWh/100km (-4,3%) bis 2,3 kWh (6,7%) liegen.

Die absolut mit Abstand größten Verbräuche treten im Antriebsmodul auf. Anders als beim e-Caddy spielt die Heizung nur eine untergeordnete Rolle. Dies liegt vor allem an den verfügbaren Validierungsdaten, die nur für den wenig heizintensiven Zeitraum von Mai bis September 2020 verfügbar waren. Zum anderen daran, dass der Maxus durch die höhere Gewichtsklasse und den Kofferaufbau antriebsseitig einen grundsätzlich höheren Energiebedarf hat.

Insgesamt ist festzuhalten, dass das Simulationsmodell für das Fahrzeug Maxus EV80 auf Gesamtfahrzeugebene gute, den einfachen Verfahren überlegene Ergebnisse erzielt. Anders als beim e-Caddy ist dies bei den Modellen der Nebenverbraucher nicht eindeutig der Fall. Hier erreicht das Modell nur eine den einfachen Verfahren vergleichbare Güte.

4. Praktische Anwendung



4.1 Zusammenfassung des methodischen Vorgehens

In Anlehnung an das modifizierte FESTA-V (FOTNET 2014) wird in diesem Abschnitt eine vereinfachte Methode zur Durchführung von Fahrerverhaltensstudien (naturalistic driving studies, NDS) zur Abschätzung des technischen und wirtschaftlichen Potenzials der Elektrifizierung von bestehenden Transportaufgaben entwickelt (Abbildung 4-1).



Abbildung 4-1: Vorgehensschema in Anlehnung an modifiziertes FESTA-V für NDS (FOTNET 2014, S. 7)

Zunächst sind die als für den Energieverbrauch relevant identifizierten Einflussgrößen im Alltagsbetrieb bei einem konventionellen Fahrzeug aufzuzeichnen und für die Verwendung in der Energiesimulation aufzubereiten. Anschließend wird der Energieverbrauch für das betrachtete Fahrzeug simulativ ermittelt. Zuletzt werden die simulierten, nutzungsspezifischen Energiebedarfe für den wirtschaftlichen Vergleich zwischen Verbrennerfahrzeug und eNfz verwendet und die Effekte einer Batteriekapazitätsoptimierung aufgezeigt. Das Vorgehen gliedert sich dabei in die Schritte

- 1) Vorbereitung
 - a. Zielsetzung
 - b. Datenbedarfe
 - c. Messgrößen und Datenakquisesystem (DAS)
- 2) Fahrzeugeinsatz zur Datenaufnahme
- 3) Auswertung
 - a. Energetische Simulation der Nutzung eines eNfz
 - b. Auswertung des Elektrifizierungspotenzials und Ableitung von Handlungsoptionen
 - c. Gesamtkostenvergleich Elektrofahrzeug mit Diesel-Fahrzeug
 - d. Optimierung der Batteriekapazitäten am Anwendungsfall

Die Reihenfolge der Teilschritte des Abschnitts Auswertung ist dabei praxistauglich gewählt. Damit ist beabsichtigt, dass vor der (aufwändigen) Kostenbewertung und -optimierung zunächst das grundsätzliche Elektrifizierungspotenzial der betrachteten Nutzungs-Fahrzeug-Kombination bewertet wird. Erst wenn bei auftretendem Reichweitemangel eine der Handlungsalternativen als zielführend identifiziert wurde, werden entweder die ersten Teilschritte erneut durchlaufen (bei Änderung des Fahrzeugs, bzw. des Nutzungsprofils) oder mit den Teilschritten Gesamtkostenvergleich und Batteriekapazitätsoptimierung fortgefahren, um ein wirtschaftlich bewertetes Ergebnis zu erhalten. Die Schritte werden im Folgenden kurz erläutert. Im Abschnitt 4.2 wird das Vorgehen anhand eines Beispiels konkretisiert.

4.1.1 Vorbereitung

Die Zielsetzung der Datenakquise ist die Aufnahme von realen Einsatzfällen zur Anwendung der vorgestellten Methode der Energiesimulation und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Die Datenbedarfe leiten sich dabei aus den Eingangsgrößen der Energiesimulation und der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung her und sind in Tabelle 4.1 gelistet.

Domäne	Messgröße	Einheit	Zweck	
Nutzung	GPS-Position (Breite, Länge)	0	für Zuordnung Sekundärdaten	
	Geschwindigkeit (GPS)	km/h	Ableitung Fahrprofil	
	Innentemperatur Fahrerkabine	°C	Ableitung Solltemperaturniveau	
Umgebung	Außentemperatur	°C	Bestimmung Heiz-/Kühlbedarf,	
			Wirkungsgrade, DCDC-Leistung	
(ggi. als Sələmdör	Fahrbahnsteigung	0	Bestimmung Steigungswiderstand	
daten)	Relative Feuchte	%	Bestimmung Heiz-/Kühlbedarf	
	solare Globalstrahlung	W/m ²	Bestimmung Heiz-/Kühlbedarf	

Tabelle 4.1: Minimaldatensatz der zu erfassenden Daten zur Beschreibung des Nutzungsprofils
Um Fahrzeuge zunächst grob auf Substitutionseignung mit eNfz zu bewerten, werden weitere Informationen direkt in einer Diskussion mit der*dem Flottenbetreiber*in erhoben (s. Tabelle 4.2)

Größe	Bemerkung
Art / Klasse der Fzg	Aufbau, Gewicht, spezielle Nebenverbraucher
Einsatzgebiet und Geschwindigkeitsprofil	Stadt, regional, gemischt, Autobahn
Mittlere Fahrleistungen je Fzg pro Tag	-
Mittlere Fahrleistung je Fzg pro Jahr	-
Maximale Fahrleistung je Fzg pro Tag	-
Nutzungsmodus	Fahrergebunden, Pooling, private Nutzung zu
Nutzungsmodus	berücksichtigen, Mitfahrer
Tourontun	Hin-/Rückfahrten vs. Rundtouren, Anzahl und
rourentyp	Dauer Stopps am Betrieb/unterwegs
Beladung	Mittlere / Maximale Zuladung
Nachnutzung	Haltedauer, Verkauf an Gewerbe/privat/Export
Besondere nicht-ökonomische Interessen an	z.B. besondere ökologische Interessen, geringe
Elektromobilität	Geräuschemissionen

 Tabelle 4.2: Themenkatalog für Erstbesprechung mit der*dem Flottenbetreiber*in

Bei der Auswahl des DAS ist zusätzlich zu beachten, dass die verbaute Messtechnik den*die Fahrer*in nicht einschränkt und alle Bestandteile verdeckt oder möglichst unauffällig platziert sind. Dadurch wird der Einfluss des DAS auf das Fahrverhalten minimiert.

4.1.2 Fahrzeugeinsatz zur Datenaufnahme

Nach Installation des DAS erfolgt der Fahrzeugeinsatz im regulären Betrieb bei dem*der Einsatzpartner*in unter Realbedingungen ohne Auflagen zum Fahrverhalten. Die Daten werden je nach System entweder periodisch manuell ausgelesen oder per Mobilfunknetz direkt auf einen TU-Server übertragen.

4.1.3 Auswertung

Zunächst werden die eingehenden Daten für die weitere Verwendung aufbereitet. Damit einher geht die Aufteilung in Tagespakete, die Validierung der Funktion des DAS durch Plausibilisierung der erhaltenen Messwertebereiche sowie die Anreicherung mit Sekundärdaten.

Energetische Simulation der Nutzung eines elektrischen Nutzfahrzeugs

Das in Kapitel 3 vorgestellte und validierte Modell wird verwendet, um den Energiebedarf des erfassten Nutzungsprofils zu simulieren. Hierbei können auch bei kurzen Erfassungszeiträumen saisonale Einflüsse über die Nutzung von Sekundärdaten berücksichtigt werden.

Auswertung des Elektrifizierungspotenzials und Ableitung von Handlungsoptionen

Ausgehend von den Ergebnissen der energetischen Bewertung werden Handlungsoptionen aufgezeigt, um zum einen die Nutzbarkeit des eNfz im Anwendungsfall zu ermöglichen und zum anderen die wirtschaftliche Position des eNfz (weiter) zu verbessern. Dabei werden folgende Ansätze betrachtet:

- I. Anpassung/Verkürzung der Tour an reichweitekritischen Tagen
- II. Anpassung des Komfortanspruchs an reichweitekritischen Tagen
- III. Einplanung von Zwischenladungen an kritischen Tagen
- IV. Abschätzung der Verwendung von alternativen eNfz, z.B. mit größerer Batterie bzw. höheren Wirkungsgraden

Gesamtkostenvergleich Elektrofahrzeug mit Diesel-Fahrzeug

Wie im Abschnitt 2.5 skizziert, wird der Einsatz des energetisch simulierten eNfz wirtschaftlich mit dem Einsatz des konventionellen Fahrzeugs vergleichen. Auf Basis einer gesamtwirtschaftlichen TCO-Betrachtung werden Investitionen und laufende Kosten über die Nutzungsdauer einbezogen.

Wirtschaftliche Optimierung der Batteriegröße am Nutzungsprofil

Wie in Abschnitt 2.5.2 eingeführt, wird abschließend für den betrachteten Anwendungsfall aus den Fahrzeug- und Nutzungsdaten eine aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten optimale Batteriekapazität ermittelt und die erwarteten Auswirkungen auf Nutzung und Wirtschaftlichkeit beschrieben.

4.2 Elektrischer Stadtlieferwagen für Handwerkerbetrieb in Berlin

Die Auswahl des Unternehmens und des Fahrzeugs sowie die Datenaufnahme erfolgte im Rahmen von studentischen Abschlussarbeiten. Die Voraussetzungen zur Teilnahme an den Studien beinhalten:

- das Interesse des Flottenbetreibers an dem Thema Elektromobilität
- die Bereitschaft, durch die Technische Universität Berlin ein DAS in ein Fahrzeug verbauen zu lassen
- die Bereitschaft, die Daten zur Nutzung im Rahmen der Forschungstätigkeit des Fachgebiets FVB freizugeben

Auf diesem Weg wurden bei zwei mittelständischen Unternehmen Daten über einen Zeitraum von jeweils ca. vier Wochen erhoben. Beispielhaft wird hier die die Betrachtung eines Elektroinstallationsbetriebes vorgestellt und damit die letzte Forschungsfrage beantwortet.

4.2.1 Vorbereitung

Im Q1/2015 werden vier konventionelle Fahrzeuge eines Elektroinstallationsbetriebs in Berlin für vier Wochen mit Datenloggern ausgerüstet, um deren Nutzungsverhalten zu erfassen. Bei den Fahrzeugen handelt es sich um zwei Renault Traffic, einen Renault Kangoo und einen Dacia Logan. Im Folgenden wird analysiert, inwieweit der Stadtlieferwagen Renault Kangoo durch den Stadtlieferwagen e-Caddy ersetzt werden kann. Dafür werden Modell und Parametrisierung wie im Kapitel 3 beschrieben verwendet.

Tabelle 4.3 zeigt die über Datenlogger oder Sekundärquellen zu erfassenden Daten. Zum Einsatz kommt im Fahrzeug Renault Kangoo ein GPS-basierter Datenlogger vom Typ TU-veLOG. Diese Logger wurden im Rahmen eines Forschungsprojekts am Fachgebiet FVB entwickelt und zeichnen mit einer Frequenz von 1Hz auf (Linssen et al. 2012, S. 29). Darüber hinaus kommt ein einfacher Temperaturdatenlogger im Fahrzeuginnenraum zum Einsatz, der mit einer Frequenz von 1/60 Hz loggt und in der Nähe der Instrumententafel platziert ist.

Domäne	Größe	Einheit	Quelle
	GPS-Position (Breite, Länge)	0	Datenlogger veLOG (GPS)
N	Geschwindigkeit	km/h	Datenlogger veLOG (GPS)
Nutzung	Strecke	km	Datenlogger veLOG (GPS)
	Innentemperatur Fahrerkabine	°C	Temperaturlogger EasyLog
	Außentemperatur	°C	Sekundärdaten (Deutscher
	Relative Feuchte	%	Wetterdienst 2020)
			Sekundärdaten (Bundesamt
Umgebung	Höhe ü. NN	m	für Kartographie und
			Geodäsie o. J.)
	Fahrbahnsteigung	0	Sekundärdaten (Deutscher
	solare Globalstrahlung	W/m ²	Wetterdienst 2020)

Tabelle 4.3: Übersicht Nutzungs- und Umweltdaten

4.2.2 Fahrzeugeinsatz zur Datenaufnahme

Die Datenlogger werden wöchentlich manuell ausgelesen und der interne Speicher wieder gelöscht. Abbildung 4-2 zeigt beispielhaft den Verlauf der geloggten bzw. extern zugeordneten Daten eines Fahrabschnitts. In diesem Beispiel ist auch zu erkennen, dass das GPS-System wenige Minuten benötigt, um nach dem Start die Geschwindigkeit korrekt zu bestimmen. Der dadurch entstehende Fehler wird als vernachlässigbar nicht vertieft betrachtet. Abbildung 4-3 zeigt die Verteilung zentraler Messwerte, Tabelle 4.4 eine Zusammenfassung der geloggten Nutzungsdaten des Elektroinstallations-Profils.



Abbildung 4-2: Nutzungs- und Umgebungsprofil Elektroinstallationsbetrieb vom 18.02.2015 in Berlin



Abbildung 4-3: Vo	erteilung der	wichtigen	Einflussparameter	beim	geloggten	Elektroinstallations-Profil üb	er den
Messzeitraum							

Größe	Einheit	Wert
erster Tag Datenaufzeichnung	-	Fr, 06.02.2015
letzter Tag Datenaufzeichnung	-	Di, 10.03.2015
Kalendertage	d	32
Betriebstage	d	23
anteilig vom Jahr	%	8,8
Betriebsstunden	h	39,6
zurückgelegte Strecke	km	847,5
mittlere Tagesstrecke	km	36,8
mittlere Geschwindigkeit	km/h	21,4
mittlere Innentemperatur	°C	12,0
mittlere Außentemperatur	°C	4,0
mittlere solare Globalstrahlung	W/m^2	82,0

Tabelle 4.4: Übersicht Elektroinstallations-Profil aufbereitet

4.2.3 Auswertung

Energetische Simulation Stadtlieferwagen

Um den Einsatz eines Elektrofahrzeugs über einen praxisnahen Zeitraum zu simulieren, werden die Daten so aufbereitet, dass ein realistisches Jahresnutzungsprofil erzeugt wird. Die Voraussetzung dafür ist, dass der erfasste Nutzungszeitraum für den Einsatz des Fahrzeugs repräsentativ ist. Zunächst werden die erfassten Tages-Streckenprofile ab dem ersten Erfassungstag so lange wiederholt, bis ein ganzes Jahr erreicht ist. Dabei wird berücksichtigt, ob z.B. am Wochenende gefahren wird oder nicht. Im zweiten Schritt werden die Wetterparameter über die Sekundärdatenanreicherung (s. Abschnitt 2.3.3) entsprechend des realen Aufkommens angereichert und damit saisonale Umgebungsbedingungen erzeugt. Tabelle 4.5 und Abbildung 4-4 geben einen Überblick über das so

erzeugte Jahresnutzungs- und Umgebungsprofil.

Größe	Einheit	Wert
Brofil		Stadtlieferwagen
FIOIII	-	Elektroinstallationsbetrieb - Jahr
erster Tag Betrachtungszeitraum	-	Fr, 06.02.2015
letzter Tag Betrachtungszeitraum	-	Fr, 05.02.2016
Kalendertage	d	365
Betriebstage	d	261
anteilig vom Jahr	%	100
Betriebsstunden	h	451,2
zurückgelegte Strecke	km	10030,4
mittlere Tagesstrecke	km	38,4
mittlere Geschwindigkeit	km/h	22,2
mittlere Innentemperatur	°C	- (keine Zuordnung aus
mittiere mientemperatur	C	Wetterdaten möglich)
mittlere Außentemperatur	°C	11,5
mittlere solare Globalstrahlung	kW/m ²	169,8

Tabelle 4.5: Übersicht Jahresprofil Stadtlieferwagen Elektroinstallationsbetrieb als Eingangswerte für Simulation und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung



Abbildung 4-4: Histogramme zum Jahresprofil Elektroinstallationsbetrieb

Es wird deutlich, dass sich bei den Einflussparametern lediglich die Temperaturverteilung verändert. Alle anderen Werte steigern lediglich die Häufigkeit beim Jahresprofil.

Für das erzeugte Profil wird simulativ der Energiebedarf bei Nutzung des e-Caddy je Tag bestimmt. Es zeigt sich, dass bei einer angenommen gewünschten Reserve von 10% SoC an 32 von 261 Betriebstagen im Jahr das simulierte Fahrzeug nicht die erforderliche Reichweite besitzt, um das Nutzungsprofil zu bedienen. An 19 Tagen im Jahr wäre sogar das komplette Entleeren der Batterie nicht ausreichend, um das Nutzungsprofil zu bedienen. (s. Tabelle 4.6 und Abbildung 4-5). Hierbei ist eine bei längerer Laufzeit auftretende alterungsbedingte Kapazitätsreduktion der Batterie noch nicht berücksichtigt. Dies erfolgt bei der Kapazitätsoptimierung im Abschnitt 4.2.3.2.

Größe	Einheit	Wert
mittlerer Gesamtenergieverbrauch	kWh/100km	24,2
mittlerer Energieverbrauch Antrieb	kWh/100km	16,0
mittlerer Energieverbrauch NA	kWh/100km	8,1
Energieverbrauch Antrieb (min – max)	kWh/100km	13,6 – 19,1
Energieverbrauch NA (min – max)	kWh/100km	2,2-20,1
Tage mit SoC<= 10%	#	32
Tage mit SoC<= 0%	#	19

Tabelle 4.6: Simulationsergebnis Jahresnutzungsprofil Stadtlieferwagen Handwerk



Abbildung 4-5: Histogramm der Gesamttagesenergieverbräuche des Jahresnutzungsprofils

Aus dieser Erkenntnis ergibt sich der Bedarf, Fahrzeug- oder Fahrzeugnutzung anzupassen, um die geforderte Nutzung zu realisieren. Mögliche Handlungsoptionen werden in den folgenden Abschnitten diskutiert.

Auswertung des Elektrifizierungspotenzials und Ableitung von Handlungsoptionen

Anhand des vorliegenden Beispiels soll praxisnah verdeutlicht werden, wie einer zentralen Herausforderung begegnet werden kann, die sich bei vielen Anwendungsfällen der Elektromobilität stellt: der begrenzten Reichweite. Wie Tabelle 4.6 verdeutlicht, kann das Elektrofahrzeug an 32 von 261 Tagen im betrachteten Jahr die gewünschte Nutzung nicht ohne Weiteres sicherstellen. Um dennoch ein Elektrofahrzeug für diesen Einsatz zu verwenden, bestehen unterschiedliche Optionen, die im Folgenden diskutiert werden:

Ansatz I: Anpassung/Verkürzung der Tour an kritischen Tagen

Die Verkürzung von Tagestouren stellt zunächst in jedem Falle einen organisatorischen Aufwand dar, der bei Neudisposition von Touren gegenüber dem Status quo entsteht. Zudem entsteht weiterer Aufwand, da die nicht angefahrenen Ziele nun durch andere Fahrzeuge bedient werden müssen. Zur Einordnung dieses letzteren Aufwands ist eine Unterscheidung in zwei Fälle sinnvoll: Bei der Betrachtung eines einzelnen Fahrzeuges ist die Tourenverkürzung in der Regel als kritisch anzusehen. Dies liegt daran, dass die Transportaufgabe von Personen oder Gütern der eigentliche Kern des Nutzungszweckes des Fahrzeugs ist. Zum Erreichen dieses Nutzungszwecks wird damit der Einsatz eines zusätzlichen Fahrzeugs notwendig, was in jedem Fall zusätzlichen operativen Aufwand bedeutet. Bei der Betrachtung von Fahrzeugflotten hingegen kann dies durch intelligente Disposition von Transportaufgaben auf verschiedene Fahrzeuge in Abhängigkeit der Rahmenbedingungen eine aufwandsneutrale bzw. nur mit geringem operativem Zusatzaufwand verbundene Option sein. Die Vermeidung von solchem operativen Zusatzaufwand setzt voraus, dass die Umdisposition strategisch im Voraus erfolgen kann und nicht kurzfristig in eine bestehende Planung eingreift.

Ansatz II: Anpassung des Komfortanspruchs an kritischen Tagen

Aus der starken Spreizung des Nebenaggregate-Energieverbrauchs (vgl. Tabelle 4.6) geht hervor, dass dieser an bestimmten Tagen einen erheblichen Anteil am Gesamtenergieverbrauch ausmacht. Abbildung 4-6 zeigt, dass die mittlere Außentemperatur an allen kritischen Tagen unterhalb von 15°C liegt. Dies lässt sich neben erhöhten Fahrwiderständen und geringeren Wirkungsgeraden bei kalten Temperaturen vor allem auf den Leistungsbedarf der Kabinenheizung zurückführen.



Abbildung 4-6: Gesamttagesenergieverbräuche eines Jahres nach Außentemperaturen

Um den Energieverbrauch der Heizung zu verringern, kann die Heizleistung reduziert werden. Zur Veranschaulichung wird bei der Energiesimulation die Soll-Innentemperatur am Tag mit dem höchsten Gesamtenergiebedarf stufenweise von 22°C abgesenkt bzw. die PTC-Heizung komplett ausgeschaltet. Das Ergebnis ist in Tabelle 4.7 zusammengefasst.

Größe	Einheit	Wert				
Strecke	km	65,1				
Fahrtdauer	hh:mm:ss	02:59:08	3			
Einsatzdauer	hh:mm:ss	12:44:45	12:44:45			
mittlere Außentemperatur	°C	-8,5°C				
Soll-Innenraumtemperatur	°C	22	14	8	2	PTC aus
Gesamtenergieverbrauch	kWh	23,7	19,9	17,6	15,5	13,0
Energieverbrauch Antrieb	kWh	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7
Energieverbrauch NA	kWh	11,9	8,1	5,9	3,7	1,3
Energieverbrauch PTC	kWh	10,6	6,9	4,5	2,4	0,0

Tabelle 4.7: Vergleich Energieverbrauch bei unterschiedlichen Soll-Innentemperaturen (verbrauchskritischer Tag)

Zu bemerken ist, dass bei Verzicht auf Aufheizung des Innenraums neben der Abnahme des Insassenkomforts, auch sicherheitskritische Situationen entstehen können. So ist bei niedrigen Innenraumtemperaturen z.B. schneller mit Scheibenbeschlag zu rechnen. Dem ist durch geeignete Maßnahmen, wie z.B. eine beheizte Windschutzscheibe, zu begegnen. Dem Komfortbedarf der Insassen wiederum kann zusätzlich durch Sitz- und Lenkradheizung Rechnung getragen werden. Diese Kompensationsmaßnahmen sind wesentlich energieeffizienter als die Beheizung des Innenraums (s. Abschnitt 2.1.3 und Stütz et al. 2016, S. 53–54). Am betrachteten Beispieltag führt nur die komplette Abschaltung der PTC-Heizung dazu, dass die Elektrofahrzeug-Reichweite ohne weitere Maßnahme für die Tagestour ausreichend ist.

Ansatz: III Einplanung von Zwischenladungen an kritischen Tagen

Durch Zwischenladungen an kritischen Tagen kann das Elektrofahrzeug auch Profile bewältigen, deren Tagesenergiebedarf die Batteriekapazität überschreitet. Hier kommt es darauf an, ob Zeiten zum Aufladen im Streckenprofil vorhanden sind und ob entsprechende Ladeinfrastruktur zur Verfügung steht. Wie Tabelle 4.7 zeigt, liegt der Anteil der Fahrt- an der Einsatzdauer am oben dargestellten verbrauchskritischen Tag bei weniger als 25%. Das Fahrzeug steht demnach einen großen Teil der Einsatzdauer. Zu diesen Zeiten ist grundsätzlich Zwischenladen möglich. Aus Abbildung 4-7 ist für den Beispieltag ersichtlich, dass zwei längere Standzeiten vorliegen, eine mittags, eine nachmittags. Die Auswertung der GPS-Daten zeigt, dass die längere Nachmittagspause (ca. 14:30 Uhr bis 19:00 Uhr) am Betriebsstandort erfolgt. Dies legt die Annahme nahe, dass dort auch eine Lademöglichkeit bereitgestellt werden kann. Um einen normalen Betrieb ohne Komforteinschränkungen (Soll-Innentemperatur 22°C) zu erlauben, sind an diesem Tag 23,7 kWh elektrische Energie nötig (s. Tabelle 4.7). Um das 90% Kapazitätskriterium (13,4 kWh) nicht zu unterschreiten, müssen demnach mindestens 10,3 kWh untertägig nachgeladen werden. Bei einer 4,5-stündigen Pause kann dies über einen einfachen 3,7 kW-Ladeanschluss, z.B. einphasige Wallbox, erfolgen. Bei Ausnutzung des im eCaddy verbauten dreiphasigen Ladegeräts mit 11kW, wäre das Nachladen auch in ca. einer Stunde möglich.



Abbildung 4-7: Geschwindigkeitsprofil verbrauchskritischster Tag

Analoge Überlegungen können für die anderen verbrauchskritischen Tage erfolgen. Ist das zeit- und kostenneutrale Zwischenladen am Firmenstandort nicht in allen Fällen möglich, kann auch die öffentliche Ladeinfrastruktur bzw. das Nachladen auf Baustellen, die angefahren werden, mit einbezogen werden. Die wirtschaftlichen Auswirkungen hierdurch werden bei der Batteriekapazitätsoptimierung in Abschnitt 4.2.3.2 betrachtet.

Ansatz IV: Verwendung von alternativen Elektrofahrzeug-Modellen mit größerer Batteriekapazität bzw. höheren Wirkungsgraden

Das hier betrachtete eNfz, der e-Caddy von Volkswagen, bildet nicht mehr den aktuellen Stand der Technik ab. Dies betrifft auch die durchschnittlich verfügbare Batteriekapazität, die seit dem Einsatz der e-Caddy-Erprobungsflotte stark gestiegen ist. Damit ist auch die Reichweite der heutigen eNfz deutlich gestiegen (s. auch Abschnitt 2.6). Alle hier betrachteten Nutzungsfälle ließen sich beispielsweise mit den in Tabelle 4.8 gelisteten, am Markt verfügbaren Fahrzeugen ohne Einschränkungen (Komfort, Zwischenladungsbedarf) bewältigen. Hierbei ist unterstellt, dass die gelisteten Elektrofahrzeuge vergleichbare Realverbrauchswerte besitzen wie das hier betrachtete e-Caddy-Vorserienmodell. Bei anderen Nutzungsprofilen mit längeren Fahrzeugmodellen relevant, um Reichweitenbedarf und real verfügbare Reichweite im Sinne der Wirtschaftlichkeit aufeinander abzustimmen.

Fahrzeug	Batteriekapazität (kWh)	Markteinführung (Jahr)	Verbrauchsangabe Hersteller (kWh/100km)
VW ABT e-Caddy	37,3 (brutto)	2019	23,3 bis 27,3
Mercedes e-Vito	35 (netto)	2019	20,5 bis 24,9
Nissan e-NV200	40 (netto)	2018	25,9

Tabelle 4.8: Auswahl verfügbarer elektrischer Stadtlieferwagen (Bönnighausen 2020; Mercedes Benz 2020; Nissan 2020)

Alternativ zum Einsatz von Fahrzeugen mit größeren Batteriekapazitäten, wäre noch eine Senkung des Verbrauchs durch effizientere Technologien zu betrachten. Hier besteht insbesondere Potenzial den Heizenergieverbrauch durch den Einsatz einer Wärmepumpe zu reduzieren. Die Effizienz von Wärmepumpensystemen hängt von einer Vielzahl von Parametern, insbesondere aber der Außentemperatur, ab. Studien (Konz et al. 2011, S. 54; Tschöke et al. 2019, S. 291) zeigen, dass der Heizenergiebedarf durch Einsatz einer Wärmepumpe im Vergleich zum PTC-Heizer im Mittel etwa halbiert werden kann. Insbesondere an sehr kalten und damit potenziell reichweitekritischen Tagen fällt der Effizienzgewinn jedoch geringer aus.

4.2.3.1 Gesamtkostenvergleich Elektrofahrzeug mit Diesel-Fahrzeug

In Abweichung vom betrachteten Elektroinstallations-Anwendungsfalls mit einem Renault Kangoo wird in diesem Abschnitt das eNfz e-Caddy mit seinem konventionellen Pendant, einem Caddy mit Dieselmotor vergleichen. Dadurch sollen mögliche Kosten- und Nutzbarkeitsunterscheide, die sich auf Basis von Fzg-Geometrie, Ausstattung, Markenimage und Ähnlichem ergeben, möglichst eliminiert werden und der Fokus auf dem Vergleich des Antriebs liegen.

Abbildung 4-8 zeigt die Eingabemaske des in Abschnitt 2.5.1 eingeführten TCO-Tools zum Vergleich von Elektro- und Dieselnutzfahrzeugen anhand realer Fahrprofile. Für den betrachteten e-Caddy liegen keine Preise vor, da es sich nicht um ein Serienfahrzeug handelt und dieses Modell nicht erhältlich ist. Kürzlich hat Volkswagen jedoch in Zusammenarbeit mit ABT den ABT-e-Caddy vorgestellt und Preise hierfür genannt (Bönnighausen 2020). Zur Anschauung wird der veröffentlichte Preis des ABT-e-Caddy hier verwendet, auch wenn sich Ausstattung und Batteriekapazitäten vom hier betrachteten e-Caddy unterscheiden. Da es sich beim ABT e-Caddy um eine Variante mit langem Radstand handelt, wird auch als Diesel-Vergleichsfahrzeug ein aktuelles Caddy-Modell mit langem Radstand (2.0 TDI, 75kW, 6-Gang-DSG, Trendline, ohne Sonderausstattung) betrachtet. Eine Ausstattungsbereinigung findet nicht statt. Es wird keine Ladeinfrastrukturinvestition betrachtet. Die von der Bundesregierung gewährte Umweltprämie für den Kauf von Elektrofahrzeugen findet in Höhe von 9000 EUR Berücksichtigung (BAFA 2020). Weitere potenzielle Förderungen für den Erwerb des Elektrofahrzeugs werden nicht betrachtet. Alle Preise sind Netto-Preise.

Elektrofahrzeug	VW eCaddy
Kaufpreis Kaufpreis 	29.900,00 €
monatl. Leasingrate	0,00 €
zGG.	2.250 kg
Fahrzeugtyp	Kastenwagen
vergleichbares Diesel-Fzg.	2,2t VW Caddy 75kW

Dieselfahrzeug		2,3t VW Caddy Maxi Kasten 75kW	
Kaufpreis	۲	23.534,00	€
monatl. Leasingrate	0	0,00	€
zGG.		2.346	kg
Fahrzeugtyp		Kastenwagen	

Fahrprofil	Elektriker Berlin (Kangoo)			
Zeitraum von	06.02.2015	bis	06.02.2016	
Gesamtfahrleistung			10.030 km	
gemittelte Jahresfahrleistung			10.030 km	
Mautstreckenanteil			0%	

Allgemeine Einstellungen				
Nutzungsdauer E-Fzg [Jahre]	5			
maximale ND. Diesel [Jahre]	5			
Anhänger wählen	kein Anhänger	Kaufpreis	0,00	€
Ladeinfrastruktur wählen	keine	Kaufpreis	0,00	€
Förderung E-Fahrzeug				
Anteil Mehrkostenförderung	0 %	zusätzl. Förderbetrag	9.000,00	€
Förderung Ladeinfrastruktur				
Anteil Mehrkostenförderung	0 %	zusätzl. Förderbetrag		€

Abbildung 4-8: Deckblatt TCO-Vergleich Elektro/Diesel Stadtlieferwagen für Elektroinstallations-Profil

Die zentralen Annahmen sind in Tabelle 4.9 zusammengestellt. Diesen liegen folgende Überlegungen zugrunde, die im Rahmen des EN-WIN-Projekts im Zeitraum 2017 bis 2020 im Projektkonsortium erarbeitet wurden:

Zu künftigen Energiepreisen (Diesel und Strom) gibt es unterschiedliche Studien und Prognose-Ansätze. Auch über die Laufzeit des Forschungsprojekts EN-WIN wurden starke Preisschwankungen bei Dieselkraftstoff beobachtet (Statistisches Bundesamt 2020). Daher wurden im Projekt EN-WIN Erfahrungswerte der Praxispartner für die Wirtschaftlichkeitsrechnungen festgelegt. Diese werden auch hier verwendet und mit 2% pro Jahr inflationiert. Für den Kraftstoff- und AdBlue-Verbrauch des Dieselfahrzeugs werden Realverbrauchswerte von Spritmonitor.de auf das Nutzungsprofil angewendet. Der netzbezogene elektrische Energiebedarf des eNfz wird über die vorgestellte Simulation anhand des Nutzungsprofils und eines konstanten Ladewirkungsgrads bestimmt. Die anderen laufenden Kosten werden anhand von Literaturangaben abgeschätzt. Die Steuern werden anhand des zulässigen Gesamtgewichts des Fahrzeugs und der Schadstoffklasse nach Vorgaben des Zoll bestimmt. Das Elektrofahrzeug ist bis auf Weiteres von der Kraftfahrzeugsteuer befreit (Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz 2002, §§ 3d,9).

Zur Bestimmung des Batterierestwerts wird anhand der Nutzung eine erwartete Alterung berechnet und zu der erwarteten Lebensdauer ins Verhältnis gesetzt. Sodann wird der um die Alterung, einen "gebraucht"-Faktor und die Wiederaufbereitungskosten reduzierte prognostizierte Batterie-Marktpreis als Restwert für die gebrauchte Batterie in einem Second-Life-Szenario angesetzt. Zu beachten ist, dass die bei Fahrzeugkauf fälligen Kosten für die Batterie aufgrund von Integrationskosten und Herstellermarge über dem Preis für die reine Batteriekapazität liegen. In der aktuellen Situation des Jahres 2020 ergibt sich durch das Zusammenspiel dieser wertreduzierenden Faktoren mit den in Zukunft weiter stark fallend erwarteten Batterieneupreisen ein vergleichsweise geringer Restwert für die Batterie. Der jeweilige Restwert des Elektrofahrzeugs ohne Batterie bzw. des kompletten Dieselfahrzeugs wird vereinfachend über die Bestimmungen der AfA-Tabelle für Lkw angesetzt durch lineare Abschreibung über neun Jahre. Hierbei sind keine zukünftigen Erwartungen zur Restwertentwicklung berücksichtigt. So ist bei Dieselfahrzeugen ggf. damit zu rechnen, dass z.B. lokale Fahrverbote die Restwertentwicklung beeinflussen. Bei Elektrofahrzeugen stellen z.B. die weitere Entwicklung der allgemeinen Akzeptanz, technologische Weiterentwicklungen und auch auf Neuwagen bezogene staatliche Kaufprämien Einflussfaktoren auf den Restwert aktueller Fahrzeuge dar. Weitere Details zur Restwertberücksichtigung finden sich in Jerratsch et al. 2020.

	Bezeichnung	Wert	Quelle	
	Dieselpreis [EUR/Liter]	1,06	Annahme	
	Preis AdBlue [EUR/Liter]	0,60	Annahme	
	Verbrauch AdBlue [l/100 km]	0,09	https://www.spritmonitor.de/	
el)	Reifenkosten [EUR/100 km]	1,38	Lastauto Omnibus-Katalog 2018(VW T6)	
Dies	Wartungskosten [EUR/100 km]	653	Lastauto Omnibus-Katalog 2018(VW T6)	
n (D	Schmierstoffkosten [EUR/100 km]	0,22	Lastauto Omnibus-Katalog 2018(VW T6)	
ïiscl	Fahrzeugpreis [EUR]	25507	https://www.volkswagen-nutzfahrzeuge.de	
ezif	Wertverlust pro Jahr [%]	11,1	Bundesministerium der Finanzen 2000, S. 11	
ds-2	zGG [kg]	2161	https://www.volkswagen-nutzfahrzeuge.de	
seug	Achsanzahl	2	https://www.volkswagen-nutzfahrzeuge.de	
hrz	Schadstoffklasse	Euro6	https://www.volkswagen-nutzfahrzeuge.de	
Fa	gewöhnl. JFL dieser Typ [km]	15000	Annahme	
	Steuern pro Jahr [EUR]	125	KraftStG (Bundesministeriums der Justiz	
			und für Verbraucherschutz 2002, § 9)	
	Versicherungskosten EUR pro Jahr	900	Erfahrungswert EN-WIN, Stand 2018	
ektro)	Gewerbestrompreis [EUR/kWh]	0,18	Annahme EN-WIN-Projekt (Jerratsch et al.	
			2020)	
lekt	Reifenkosten [EUR/100 km]	1,79	+30% ggu. Diesei Annahme EN-WIN-Projekt	
h (E			-30% ggü Diesel Propfe et al. 2012; Palmer	
fisc	wartungskösten [EOR/Jahr]	457	et al. 2018	
Fahrzeug-spezi	Schmierstoffkosten [EUR/100 km]	0,00	kein Verbrauch von Motorenöl	
	Ladewirkungsgrad [%]	90	Annahme	
	kalend. Batterieverschleiss [%/Jahr]	2,8	Kairies und Sauer 2019, S. 22	
	Zyklenfestigkeit bei 100%-DOD	2044	Annahme, abgeleitet bei Batteriegarantie über 160.000km	
	genutztes SoC-Fenster [%]	84,5	Auswertung Nutzungsdaten e-Caddy	

	Bezeichnung	Wert	Quelle
	(technische) Batteriekapazität [kWh]	17,6	Volkswagen Nutzfahrzeuge
	Batteriepreis für Käufer [EUR/kWh]	324	Jerratsch et al. 2020, S. 95
	Fahrzeugpreis [EUR]	29900	Bönnighausen 2020
	Wertverlust (ohne Batterie) [%/Jahr]	11,1	Bundesministerium der Finanzen 2000, S. 11
	gewöhnl. JFL dieser Typ [km]	15000	Annahme EN-WIN-Projekt (Jerratsch et al. 2020)
	Versicherungskosten [EUR/Jahr]	900	Annahme EN-WIN-Projekt (Jerratsch et al. 2020)
Sonstige Angaben	gemittelte Jahresfahrleistung [km]	10030	Hochrechnung von geloggtem Fahrprofil
	Batteriepreis in 2030 [EUR/kWh]	70	Trend aus Horváth & Partners 2019, S. 14
	Batteriepreis für Käufer 2030	100	Annahme EN-WIN-Projekt, Marge OEM
	[EUR/kWh]	100	von 30 EUR/kWh
	Batteriepreis in 2019 [EUR/kWh]	105	Horváth & Partners 2019
	Diesel Verbrauch in [l/100km]	6,14	https://www.spritmonitor.de/
	Elektro Verbrauch in [kWh/100km]	26,76	Simulation inkl. Ladewirkungsgrad
	Kalkulationszinssatz [%]	2	Annahme

Tabelle 4.9: Parametrisierung des TCO-Vergleichs für den e-Caddy

Die Ergebnisse des TCO-Vergleichs zeigt Abbildung 4-9. Nach einer Nutzung von fünf Jahren und dem Verkauf der Fahrzeuge zu prognostizierten Restwerten entsteht eine Gesamtkostendifferenz von über 3700 EUR zugunsten des Elektrofahrzeugs. Das mittig angeordnete Säulendiagramm gibt Aufschluss über die Kostendifferenzen in den einzelnen Faktoren der Gesamtkostenbetrachtung. Auffällig ist, dass aufgrund der hohen gewährten Kaufprämie von 9000 EUR die Anschaffungskosten des Elektrofahrzeugs bereits unter denen des Dieselfahrzeugs liegen, was sich in den geringeren Abschreibungen niederschlägt. Entscheidend für die Gesamtkostendifferenz sind aber die beim Elektrofahrzeug geringeren Betriebskosten. Diese gehen vor allem auf die geringeren Energie- und Wartungskosten zurück. Zudem ist das Elektrofahrzeug von der Kfz-Steuer befreit und es entstehen keine Schmierstoffkosten, da kein Motorenöl gewechselt werden muss. Bei den Versicherungsprämien ist Kostenparität unterstellt, auch wenn aktuelle Auswertungen zeigen, dass Elektrofahrzeuge trotz höherer Kaufpreise teilweise günstiger versichert werden können (verivox 2020). Durch Maut entstehen im betrachteten Fall keine Kosten, da erst für Fahrzeuge ab 7,5t zGG Maut erhoben wird. Aufwand für Ladeinfrastruktur wird nicht betrachtet.



Abbildung 4-9: Ausgabe TCO-Vergleich Elektro/Diesel für Stadtlieferwagen mit Handwerkerprofil

TCO-Vergleichsstudien im Bereich Pkw kommen ebenfalls zu Ergebnissen, in denen Elektrofahrzeuge unter Berücksichtigung der aktuellen Förderlandschaft in bestimmten Anwendungsbereichen bereits wirtschaftliche Vorteile gegenüber Verbrenner-Fahrzeugen ausweisen können (z.B. Runkel und Stubbe 2019). Zu bemerken ist, dass sich ohne die berücksichtigte Förderung ein TCO-Nachteil des Elektrofahrzeugs von knapp 2.800 EUR über die Nutzungsdauer von fünf Jahren ergibt.

4.2.3.2 Wirtschaftliche Optimierung der Batteriegröße am Nutzungsprofil

Anhand des in Abschnitt 2.5.2 vorgestellten Vorgehens, wird auf Basis der verfügbaren Realdaten und der Energiesimulation geprüft, welche Batteriegröße aus wirtschaftlicher Sicht optimal für die Fahrzeug-Nutzungsprofil-Kombination ist. Hierbei kommen die im Projekt EN-WIN ermittelten und in folgender Tabelle 4.10 zusammengestellten Parameter zum Einsatz.

Parameter	Wert	Quelle	
Batteriepreis für Lkw-Anwendungen, 2019 [EUR/kWh]	324	EN-WIN-Projekt, Vergleich Fzg- Angebote mit modularer Batterie	
Stromkosten bei Ladung am Unternehmensstandort (Gewerbestrom) [EUR/kWh]	0,18 €	EN-WIN-Projekt	
Stromkosten an öffentlicher Ladeinfrastruktur [EUR/kWh]	0,40€	EN-WIN-Projekt	
Ladeeffizienz [%]	90	EN-WIN-Projekt	
durchschnittlicher Umweg zum Aufsuchen einer öffentlichen Ladesäule (Innenstadtbereich Berlin) [km]	2	Analyse Ladesäulendichte	
durchschnittlicher Zeitaufwand (reine Fahrzeit) für diesen Umweg (Innenstadtbereich Berlin) [min]	5 min	Berlin im EN- WIN-Projekt 2019	
Fahrerpersonalkosten [EUR/h]	17,16	EN-WIN-Projekt	

Tabelle 4.10: Übersicht der Prämissen für den Batteriekapazitäts-Optimierungsalgorithmus

Es wird vorausgesetzt, dass die Fahrzeugnutzung durch Zwischenladestopps unterbrochen werden kann, dies aber Zusatzkosten mit sich bringt. Ferner wird in diesem Anwendungsfall von einer eingangs größeren nutzbaren Batteriekapazität von 22,4 kWh bzw. technischen Kapazität von 27 kWh ausgegangen bei konstantem Preis und Gewicht. Dies begründet sich darin, dass bereits im ersten Jahr mehrere Tage ermittelt wurden, an denen die kleine, ursprüngliche Batterie des e-Caddy von 14,9 kWh nutzbarer Kapazität nicht ausreicht, um das Fahrprofil vollständig zu durchfahren. Zum anderen trägt dies der technischen und wirtschaftlichen Entwicklung Rechnung, aufgrund derer sich Kosten, Energiedichten und damit Batteriekapazitäten seit Entwicklung der e-Caddy-Batterie stark positiv entwickelt haben (s. Ergebnisse der Marktrecherche in Anhang A). Gleichzeitig sind 27 kWh eine technische realisierbare Lösung, da die betrachtete e-Caddy-Batterie um einen weiteren parallel geschalteten 9kWh-Batteriestrang ergänzt werden könnte ohne die Zell-/Modulstruktur oder die Systemspannung grundsätzlich zu verändern. Diese größere Batterie wurde auch tatsächlich in der e-Caddy-Version mit langem Radstand in der Testflotte verwendet.



Abbildung 4-10: Optimale Batteriegröße für betrachtetes Nutzungsprofil Elektroinstallationsbetrieb

Eingang in diesen Optimierungsansatz findet das in Abschnitt 4.2.3 vorgestellte Jahresnutzungsprofil und dessen modellbasiert ermittelter täglicher Gesamtenergiebedarf. Abbildung 4-10 zeigt das Ergebnis der Optimierungsbetrachtung. Das theoretische Kostenoptimum liegt bei einer Batteriekapazität von 22 kWh, die beste technische Näherung befindet sich bei der Ausgangskapazität von 27 kWh. Die nächstkleinere realisierbare Batterie mit 18 kWh liegt aufgrund der Vielzahl an notwendigen, mit Zusatzkosten verbundenen Zwischenladungsvorgängen aus Gesamtkostenperspektive schlechter als die bei der Anschaffung teurere 27-kWh-Batterie. Wichtige Kenngrößen der beiden Optimierungspunkte sind in Tabelle 4.11 zusammengestellt.

Vergleichsgröße	Einheit	theoretisches Kostenoptimum	beste technische Näherung
Kapazität neu (technisch)	kWh	22	27
Kapazität gealtert (technisch) nach ND	kWh	17,9	23,0
Nutzbarer SoC-Bereich	%	84,5	84,5
Vorgesehene Reserve am Ende des Tages	%	10	10
Nötige Zwischenladestopps über ND	#/ND	119	29
Ø nötige Zwischenladestopps p.a.	#/Jahr	23,8	5,8
Zus. Arbeitszeit für Zwischenladestopps in ND	h	49,4	10,9
Maximale Tages-Ø-Temperatur bei kritischen	°C	16,2	6,3
Fahrten			
Minimale Tagesstrecke bei kritischen Fahrten	km	39,3	53,1
TCO-Potenzial ggü. Ausgangskapazität von 27	FUR	-827	0
kWh	LUK	-027	V

Tabelle 4.11: Ergebnisse der Batterieoptimierung Profil Elektroinstallationsbetrieb

Aufgrund der abgebildeten Batteriealterung steigt in den späten Nutzungsjahren die Anzahl an aus energetischer Sicht kritischen Tagen, an denen ein Zwischenladungsstopp eingeplant werden muss, an. Den Stand des letzten Jahres der Nutzungsdauer, als jenes mit den häufigsten Zwischenstopps, zeigt die Abbildung 4-11: oben für das theoretische Optimum, unten für die beste technisch umsetzbare Lösung. Deutlich wird, dass je kleiner die Batterie ist, mehr Fahrten kritisch und Zwischenstopp notwendig werden. Dies gilt mit abnehmender Kapazität auch schon für Fahrten mit vergleichsweise geringen Fahrleistungen und hohen mittleren Umgebungstemperaturen. Die Batteriealterung ist auch der Grund, weshalb Abbildung 4-11 (oberer Teil) wiederum 32 verbrauchskritische Tage mit Zwischenladungsstopps ausweist. Aufgrund der Alterung, der SoC-Einschränkung und des Reserve-Vorhalts bei der Berechnung ist die im letzten Jahr verfügbare Energiemenge annähernd gleich groß wie bei der im Abschnitt 4.2.3 betrachteten, kleineren Batterie.



Abbildung 4-11: Energetisch kritische Tage im letzten Jahr der Nutzungsdauer theoretisches Optimum (oben): beste technische Näherung (unten) rot: Zwischenladung nötig, grün: keine Zwischenladung nötig

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass die betrachtete 27-kWh-Batterie unter den zugrunde liegenden Rahmenbedingungen und Annahmen zwar etwas überdimensioniert, jedoch die aus Kostensicht optimale, mit dem betrachteten Batteriesystem realisierbare Lösung ist. Ein stärker modularisiertes Batteriekonzept hätte darüber hinaus das Potenzial, die Gesamtkosten für diesen Einsatzfall zu senken.

5. Zusammenfassung, Diskussion, und Perspektiven



5.1 Zusammenfassung und Beantwortung der Forschungsfragen

Entlang der eingangs formulierten Forschungsfragen fassen die nachstehenden Absätze die zentralen Ergebnisse der Dissertation zusammen.

1. Wie setzt sich der Energieverbrauch im eNfz zusammen und welches sind die relevanten Verbraucher?

Abschnitt 2.1.3.1 listet die Nebenverbraucher im eNfz auf. Anhand einer Literaturrecherche wurde eingegrenzt, welche elektrischen Leistungen und Einschaltdauern diesen jeweils zuzuordnen sind. Durch die Unterscheidung in Antriebsverbrauch, HV- und NV-Nebenaggregate wird die weitere Strukturierung der Energieverbrauchsanalyse vorgegeben. Im Ergebnis stellen Antriebs- und HV-NA den Schwerpunkt des energetischen Bedarfs und daher auch der weiteren Analysen der Dissertation dar. Durch summarische Zusammenfassung der NV-NA am DCDC-Wandler finden diese vereinfacht in der gesamtenergetischen Betrachtung Berücksichtigung.

2. Wie genau lässt sich der Energieverbrauch für Antrieb und Nebenverbraucher eines elektrischen Nutzfahrzeugs für spezifische Einsatzprofile mithilfe eines Simulationsmodells bestimmen? Im Vergleich zu einfachen statistischen Verfahren (Mittelwert / univariate lineare Regression) verbessert die implementierte Simulation die Ergebnisse deutlich wie in Abschnitt 3.5.5 ausgeführt. Z.B. sinkt auf der Gesamtfahrzeugebene beim implementierten Stadtlieferwagen e-Caddy der Interquartilsabstand der Abweichungen von berechnetem zu geloggtem Energieverbrauch aller betrachteter Tagen von 13,2 kWh/100km bei der Regression auf 3,1 kWh/100km bei der implementierten Simulation. Die maximale auftretende Abweichung sinkt im absoluten Betrag von 16,2 kWh/100km auf 5,5 kWh/100km. Damit zeigt sich, dass die Berechnung des Energiebedarfs insbesondere an Tagen mit extremen Bedingungen (Temperatur,

Geschwindigkeit, lange Fahrstrecke oder -dauer) durch die Verwendung der Simulation deutlich verbessert wird.

- 3. Wie lässt sich die optimale Batteriekapazität für ein spezifisches Nutzungsprofil bestimmen? Für die Bestimmung der aus wirtschaftlicher Sicht optimalen Batteriekapazität wurde ein Berechnungstool erstellt (s. Abschnitte 2.5.2 und 4.2.3.2). Als Simulationsergebnis stehen die Energiebedarfe für die betrachteten Einsatzfälle tagesgenau zur Verfügung. Diese können mit der verfügbaren Batteriekapazität abgeglichen werden. Überschreitet der Energiebedarf die Batteriekapazität innerhalb eines Tages, so wird ein Stopp zum Zwischenladen eingeplant und mit Zusatzkosten für Ladestrom, Arbeitszeit und Energiemehrverbrauch für den Umweg zum Ladepunkt bewertet. Zusätzlich werden nutzungsprofilbasierend Batteriealterungseffekte kalendarisch und zyklisch berücksichtigt. Durch Iteration unterschiedlicher Batteriekapazitäten und Abgleich der Kosten von Batteriebeschaffung und notwendigen Zwischenladungsvorgängen bestimmt sich das Kostenoptimum für den betrachteten Einsatzfall. Anschließend wird die technische Realisierbarkeit der Ergebnisse (nur Änderung der Anzahl der parallel geschalteten Batteriestränge, keine Anpassungen in der Batteriezelle) überprüft und zusätzlich ein technisch realisierbares Optimum ausgegeben.
- 4. Wie ist die entwickelte Methodik in der Praxis anwenden?

Die Anwendung der Energiesimulation und wirtschaftlichen Bewertung des Einsatzes von eNfz am nutzungsspezifischen Einsatzfall erfolgt entlang der im Kapitel 4 vorgestellten Schritte Vorbereitung, Fahrzeugeinsatz und Auswertung. Das Beispiel elektrischer Stadtlieferwagen zeigt, dass die Methodik aufgrund des simulativen Ansatzes schon mit wenigen Wochen Messdaten aus einem konventionellen Fahrzeug Ergebnisse liefert. Diese sollten jedoch die Bandbreite des Fahrzeugeinsatzes vom Nutzungsprofil beinhalten. Durch die Verwendung von Sekundärdaten finden saisonale Effekte trotz zeitlich kurzer Messkampagne Berücksichtigung.

5.2 Diskussion der Ergebnisse und Ansätze für weitere Forschungsarbeiten

Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über die wichtigsten Erkenntnisse aus dieser Dissertation. Zudem liefern sie Anregungen für neue oder erweiterte Forschungsfragestellungen, die im Rahmen dieser Arbeit aufgrund des inhaltlichen Fokus, wegen mangelhafter Datenverfügbarkeit oder wegen zeitlicher Restriktion nicht weiterverfolgt wurden.

Physikalische Simulation und datengestützte Verfahren

Zielsetzung der Arbeit ist die energetische Bewertung von Anwendungsszenarien mit Hilfe der physikalischen Simulation. Zentrale Argumente für die Anwendung der physikalischen Simulation sind die Abbildung von physikalischen Ursache-Wirkungs-Beziehungen und damit die Möglichkeit gezielt die Effekte bei Änderungen der Einflussparameter zu betrachten und zu erklären. In der Umsetzung zeigt sich, dass in den einzelnen Teilmodellen unterschiedliche Detaillierungsgrade sinnvoll sind. Letztlich ist je Teilmodell jeweils Aufwand und Nutzen, um die nächste Detaillierungsstufe mithilfe eines physikalischen Modells oder mithilfe mathematischer Kennfelder bzw. Kenngrößen zu beschreiben, gegenüberzustellen. Im Falle von Klimaanlage oder DCDC-Wandler wurde aufgrund der verfügbaren Datenlage und des hohen Aufwands, diese zu ergänzen, bereits auf der Systemebene auf Kennfelder zurückgegriffen. Beim Antriebsenergieverbrauch und der Heizung geschieht dies erst auf Ebene einzelner Komponenten (z.B. Bauteile PTC, HWT) bzw. zur Beschreibung von Phänomenen (z.B. Luftwiderstand, Wärmeübergänge). Dieses Vorgehen versucht die Komplexität im Gesamtmodell zu reduzieren und dennoch die Möglichkeit zu erhalten, an den relevanten Komponenten Sensitivitätsanalysen zu ermöglichen (z.B. Variation der Soll-Innentemperatur, Tabelle 4.7). Zur Reduktion des dennoch hohen Implementierungsaufwands des vorgestellten Ansatzes, insbesondere bei der Anpassung des Modells auf andere eNfz, erscheinen komplexere datengestützte Ansätze wie Methoden des maschinellen Lernens interessant. Diese bieten viel Raum für die weitere Forschung und Anwendung. Dies gilt vor allem auch, da sich die Verfügbarkeit von hierfür nötigen Datensätzen aufgrund der immer rasanter steigenden Verbreitung von eNfz und ePkw aktuell deutlich verbessert.

Verwendung von Sekundärdaten zur Konkretisierung der Umgebungsbedingungen

Wie in Absatz 2.4 beschrieben, werden erforderliche Umgebungsdaten, die nicht oder nur unzureichend durch die genutzte Sensorik erfasst werden können (Wetter, Fahrbahnsteigung), mithilfe von externen Datenbanken angereichert. Dies bringt den großen Vorteil mit sich, dass mit einem kleinen Nutzungsdatensatz dennoch saisonales Verhalten abgebildet werden kann. Auf der anderen Seite stellt sich die Frage nach der Genauigkeit. In Jerratsch et al. 2018 konnte gezeigt werden, dass das gewählte Vorgehen im Mittel geringe Abweichungen von Vergleichsmessungen Vorort liefert. Dennoch besteht insbesondere bei der Betrachtung einzelner Tage und lokaler Gegebenheiten die Gefahr, dass damit eine Abweichung von den Realwerten in die Datenbasis gelangt, die sich auch im berechneten Energieverbrauch niederschlägt. So ist bei Werten sowohl für Wetter wie auch Steigung damit zu rechnen, dass die Abweichungen hier zunehmen, wenn Fahrten durch komplexere Topografie analysiert werden sollen. Da diese Arbeit Fahrten im norddeutschen Raum betrachtet, wird dieser Fehler hier nicht betrachtet.

Modellgüte des energetischen Simulationsansatzes

In Abschnitt 3.5.5 wird gezeigt, dass der vorgestellte Ansatz in den betrachteten Fällen besser die realen Messwerte annähert als einfache statistische Verfahren wie Mittelwertbildung oder univariate lineare Regression. Dennoch besteht vielfältiges Potenzial, das beschriebene Modell zu verbessern, bzw. erweitern, um die Simulationsgüte zu steigern. Folgende Bereiche bieten dazu insbesondere Möglichkeiten:

- Detaillierung der vorhandenen Komponentenmodelle, z.B. anhand zusätzlich zu vermessender Fahrzeugparameter, insbesondere:
 - o Wirkungsgrade von Antriebsstrang, HVAC, DCDC-Wandler

- o Geometrien und Stoffeigenschaften der Kabine
- o Druck- und Temperaturverhältnisse sowie Wärmeübergänge im Klimakreis
- o Massenstromverhältnisse im Heizkreis
- o Steuerungsphilosophien von HVAC, Rekuperation, Bremse, DCDC-Wandler
- Ergänzung weiterer Teilmodellen, insbesondere:
 - o Batterie mit Thermomanagement
 - o NV-Verbraucher
- Aufnahme weiterer Nutzungs- und Umgebungsdaten, insbesondere
 - Solltemperaturvorgabe
 - o Fahrzeug- / Beladungsmasse
 - o Status Fenster und Türen

Die Vornahme dieser Weiterentwicklungen sollten immer im Zusammenhang mit einer Kosten-Nutzenabschätzung für die Anwendung am Einzelfall einerseits und Überlegungen zur Allgemeingültigkeit und Übertragbarkeit andererseits einhergehen. Insbesondere in der Aufnahme des Fahrzeuggewichts besteht ein großes Potenzial für die Verbesserung der Simulationsgüte, vor allem bei schweren Nutzfahrzeugen, bei denen sich der Energiebedarf zwischen leerem und beladenem Fahrzeug stärker unterscheidet als bei den hier betrachteten leichten Nutzfahrzeugen oder Pkw.

Auswahl der Validierungsdaten e-Caddy

Aufgrund der großen Anzahl an verfügbaren Tagen mit Fahrten des e-Caddy wurde der Betrachtungsumfang nach Datenqualität und Relevanz klassifiziert und reduziert (s. Abschnitt 3.5.2). Durch die Fokussierung auf energetisch kritische Tage mittels der zehn beschriebenen Kriterien wird akzeptiert, dass

- unerwartete Effekte, die an anderen Tagen als den ausgewählten auftreten, nicht validiert werden.
- der Energieverbrauch an Tagen mit mittleren Bedingungen (Temperaturen) bzw. kurzen Fahrten (Strecke, Dauer, geringe Durchschnittsgeschwindigkeit) nicht korrekt durch das Simulationsmodell abgebildet werden.

Beide Aspekte stellen für die Verwendung des Energiemodells in dieser Dissertation keine Einschränkung dar, da das Ziel die Identifikation und Betrachtung von energetisch kritischen Tagen dennoch erreicht wird. Bei anderen Anwendungen kann die Betrachtung der hier ausgeblendeten Tage jedoch relevant werden. Insbesondere bei Anwendung in der Praxis kann eine geringere Modellgüte auch an energetisch weniger relevanten Tagen zu einem Vertrauensverlust in das Modell führen. Dies ist insbesondere im Zusammenhang mit weiterhin bestehender Reichweitenangst von Fahrzeugnutzenden kontraproduktiv, da es der anvisierten, gesteigerten Ausnutzung der Batteriekapazität entgegenwirken kann.

Wirtschaftlicher Vergleich mit konventionellen Fahrzeugen

Die Darstellung in Abschnitt 4.2.3.1 zeigt, dass sich das eNfz im Vergleich zum konventionellen Dieselfahrzeug unter den zugrundeliegenden Rahmenbedingungen wirtschaftlich betreiben lässt. Dabei beruht der Vergleich auf mehreren, teilweise die Zukunft betreffenden Annahmen. Deren Relevanz wird hier kurz diskutiert. Wie Abbildung 4-9 zeigt, entfällt der mit Abstand größte Teil des für das betrachtete Fahrprofil ermittelten finanziellen Aufwands auf die Abschreibungen. Damit stellen sowohl die unterstellten Anschaffungspreise, die finanziellen Förderungen und die prognostizierten Restwerte zentrale Annahmen dar. Erweisen sich die erwarteten Trends zu sinkenden Preisen bei Elektrofahrzeugen (insbesondere auch bei Batterien) als richtig, wirkt sich dies entsprechend stark auf die TCO-Bewertung aus.

Bei der Versicherung der Fahrzeuge wird aktuell eine Kostengleichheit zwischen Elektrofahrzeug und Dieselfahrzeug unterstellt. Die Auswertung zeigt, dass die Kosten für die Vollkaskoversicherung in der angesetzten Höhe die zweitgrößte Position bilden, noch vor den Energiekosten. Dadurch ergeben sich bei Abweichungen ebenfalls deutliche Auswirkungen auf die Gesamtbewertung.

Wartungs- und Energiekosten stellen ebenfalls größere Kostenblöcke in der TCO Betrachtung dar. Bei den Wartungskosten ist die angesetzte Reduktion beim Umstieg auf den elektrischen Antriebsstrang durch geringeren erwarteten Verschleiß begründet. Erfahrungen im Projekt EN-WIN deuten darauf hin dass die angesetzten -30% ein realistischer Wert sind (Jerratsch et al. 2020). Unberührt davon ist, dass sich aufgrund der geringeren technischen Reife und des teilweisen Prototypenstatus der aktuell erhältlichen Fahrzeuge hier unplanmäßige Zusatzkosten ergeben können, die nur teilweise auf den Hersteller übertragen werden können.

Die Energiekosten stellen, bei Profilen mit hohen Fahrleistungen noch mehr als im betrachteten Fall, einen weiteren großen Kostenblock dar. Da hier die Berechnung auf komplett unterschiedlichen Energieträgern und Antriebsmechanismen beruht, können Änderungen in den Annahmen das Vergleichsergebnis besonders stark beeinflussen. Aufgrund der in die Zukunft projizierten Lade- bzw. Tankvorgänge stellen die Preise der Energieträger Diesel und Elektrizität im Besonderen einen Unsicherheitsfaktor dar. Zusätzlich bestehen durch veränderte Nutzung der Fahrzeuge in der Zukunft trotz der zugrundeliegenden Erfahrungen und der energetischen Simulation Unsicherheiten bei den angesetzten Energiebedarfen. Gerade da die Energiekosten oft als zentraler Vorteil der Elektromobilität genannt werden, ist es wichtig, diese Abhängigkeit zu betrachten. Beispielsweise kann der weitere Preisverfall am Ölmarkt oder Steigungen der Strompreise der Wirtschaftlichkeit der Elektromobilität empfindlich schaden. Gleichzeitig stellen Maßnahmen wie z.B. CO₂-Bepreisung, Entfall der steuerlichen Privilegierung von Diesel oder die Senkung der EEG-Umlagen politische Handlungsmöglichkeiten dar, um die Gesamtwirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen gegenüber konventionellen Fahrzeugen weiter zu verbessern.

Zusammenfassend sind die Aussagen zur Wirtschaftlichkeit sehr stark von den angesetzten Rahmenbedingungen abhängig, die im Zeitablauf auch nicht konstant sind. Dies erklärt die unterschiedlichen Ergebnisse in der Literatur bei Wirtschaftlichkeitsvergleichen von konventionell und elektrisch angetriebenen Fahrzeugen.

Optimierung der Batteriekapazität am Nutzungsprofil

Die Auslegung der benötigten Batteriegröße am tatsächlichen Bedarf zielt darauf ab, die Überdimensionierung des Hauptkostentreibers im eNfz, der Traktionsbatterie, zu vermeiden. Abschnitt 4.2.3.2 zeigt, dass dies grundsätzlich bei ausreichend modularisierter Batterie möglich ist. Gleichzeit ist zu beachten, dass die Eingangsgrößen der gezeigten Auswertung für jeden Einzelfall gezielt hinterfragt und verifiziert werden müssen. Dazu zählen vor allem die Kosten und der zeitliche Aufwand für das untertägige Zwischenladen sowie die Annahmen zu Neupreis und Restwert der Batterie. Bei der betrachteten Fahrzeug-Batterie-Nutzungs-Kombination ergibt sich zudem über die Laufzeit von fünf Jahren ein eher geringes TCO-Einsparpotenzial. Gleichzeitig steht dem ein nicht bewerteter organisatorischer Aufwand insbesondere für die administrative Planung von zusätzlichen Ladestopps und die bei mehreren Fahrzeugen mit unterschiedlichen Batteriegrößen entstehende Heterogenität der Fahrzeugflotte entgegen. Aus diesen Gründen kann argumentiert werden, dass sich dieses Vorgehen entgegen der bisherigen Annahme unter den hier abgebildeten Prämissen weniger für Pioniere der Elektromobilität eignen wird, sondern erst mit zunehmender Marktdurchdringung von eNfz in die Anwendung finden könnte. Letztes ist zu erwarten, insoweit dann Voraussetzungen wie die Verfügbarkeit von Ladestationen und modularen Batteriesystemen, die weite Verbreitung von automatisierten Planungstool für den Einsatz von Elektrofahrzeugen und die Stabilisierung der Batteriepreise in höherem Maße erfüllt sein werden. Zudem sind Sekundäreffekte wie die Reduktion des Streckenverbrauchs aufgrund eines geringeren Gewichts vereinfachend nicht berücksichtigt. Dadurch ergeben sich über die vorliegenden Ergebnisse hinaus zusätzliche Potenziale zur Reduktion der Batteriekosten bzw. Steigerung der Reichweite und entsprechende Forschungsarbeiten.

Allgemeingültigkeit und Übertragbarkeit der Energiesimulation auf andere Anwendungsfälle/Fahrzeuge

Durch die Implementierung des physikalischen Simulationsmodells ist grundsätzlich eine Übertragbarkeit auf vergleichbare Fahrzeugsysteme möglich, wie Abschnitt 3.6 zeigt. Gleichzeitig besteht bei Anwendung auf andere Systeme oder Nutzungsfälle zunächst Anpassungsbedarf am Modell. Um die Allgemeingültigkeit des Modells zu steigern und damit den Vergleich von tatsächlich am Markt verfügbaren, alternativen eNfz unterschiedlichen Aufbaus für einen beschriebenen Anwendungsfall durchführen zu können, wurde das Modell modular implementiert. So können Teilmodelle ersetzt (z.B. PTC-Modell durch Wärmepumpenmodell) oder ein weiteres NA-Modell (z.B. Laderaumkühlung) als additiver Verbraucher an das HV-Batteriemodell angeschlossen werden. Komplexere Änderungen (z.B. die Anpassung der Antriebsstrang-Topologie auf ein Modell mit mehreren E-Maschinen oder eine Mehrzonen-Klimaanlage) bedürfen dagegen deutlich tiefgreifenderer Änderungen im Modell, da hierbei mehrere einzelne Modellkomponenten und deren Schnittstellen betroffen sind (E-Maschine, Leistungselektronik, Getriebe bzw. HVAC- und thermisches Fahrgastraummodell).

Der eingangs postulierte Vorteil der physikalischen Simulation gegenüber den datengestützten Verfahren, die Übertragbarkeit auf andere Anwendungsfälle bzw. Fahrzeuge, ohne dass das Modell insgesamt neu aufgebaut werden muss, kann nach den Erfahrungen in dieser Arbeit nur teilweise bestätigt werden. Zwar ist eine generelle Übertragbarkeit auf ähnliche Anwendungen (z.B. anderes leichtes Nfz) möglich, jedoch schon in dem beschriebenen Beispiel nur mit größerem Aufwand zielführend, insbesondere durch den Ersatz des Heizungsmodells und die nötige umfangreiche Neuparametrierung. Dabei wird die Güte des e-Caddy-Modells dennoch nicht erreicht. Dadurch wird deutlich, dass die Übertragung des Simulationsmodells auf ein Fahrzeug anderer Größenklasse und mit sich unterscheidendem Aufbau nicht ohne weiteres möglich ist. Aufgrund des Detaillierungsgrades des Modells sind sehr viele technische Daten zum Fahrzeug für die Modellparametrierung notwendig. Zudem bedarf es für die Validierung umfangreicher und möglichst heterogener Umgebungs- und Nutzungsdaten. Aufgrund dieses Implementierungs- und Validierungsaufwands bei der Übertragung von einem auf ein anderes Fahrzeugmodell stellt sich die Frage, inwieweit bei der physikalischen Modellierung gegenüber den datenbasierten Verfahren tatsächlich ein Vorteil diesbezüglich besteht.

Anpassungen im Nutzungsverhalten

Die Arbeit zeigt, dass sowohl Nutzungsverhalten wie auch Umgebungsbedingungen den Energiebedarf beeinflussen. Wie dargelegt, kann, die quantitative Kenntnis dieser Zusammenhänge vorausgesetzt, durch die gezielte Anpassung von Nutzungsverhalten an die Umgebungsbedingungen erreicht werden, dass energetisch bzw. aus Reichweitensicht kritische Tage vermieden werden. Dies erlaubt den Einsatz von kleineren, günstigeren und die Umwelt weniger belastenden Batterien, bzw. erweitert den Einsatzradius von Fahrzeugen mit definierter Batteriegröße. Aufgrund der herausgearbeiteten, herausragenden Energieintensität im Vergleich zu anderen Nebenverbrauchern kommt hier, wie beispielhaft an Außentemperatur und Klimakomfort / Sollinnentemperatur gezeigt, der HVAC eine besondere Stellung zu. Wichtige weitere Einflussfaktoren, die weitergehender Untersuchung bedürfen, sind daneben:

- Beladung bzw. Fahrzeuggewicht
- Luftfeuchte
- Fahrstil bzw. Geschwindigkeits- / Beschleunigungsprofil
- Nutzung von untertägigem Zwischenladen

Erste Untersuchungen zu diesen Faktoren erfolgen in Jerratsch et al. 2020. So wird z.B. anhand einer Stichprobe von 103 Fahrten mit einem 18t-eNfz ein Mehrverbrauch von im Mittel 2,5kWh/100km je 1000kg Mehrgewicht ermittelt. Dieser Wert schwankt jedoch stark, je nach Charakteristik der Tour und fällt z.B. bei hohem Autobahnanteil deutlich geringer aus. Analoge Betrachtungen werden entlang mittlerer Geschwindigkeiten und Beschleunigungen angestellt. Hieran sollte weitere Forschung anschließen, um die Ergebnisse zu validieren und sich darüber hinaus mit den Einstellungen und Voraussetzungen zu beschäftigen, die notwendig sind, um die abgeleiteten Verhaltensänderungen zu begünstigen bzw. herbeizuführen.

Verfügbarkeit von (Schnell-) Ladeinfrastruktur

Wesentliches Ziel bei Verwendung der vorgestellten Simulation in Beschaffungs- oder Planungs-Prozessen ist die Reduktion der Reichenweitenangst bzw. -unsicherheit. Insbesondere bei geringer oder unsicherer Verfügbarkeit von schnellen Lademöglichkeiten entlang der Route stellt dies einen großen Vorteil dar. Das Netz von Ladeinfrastruktur befindet sich in Deutschland aktuell noch im Aufbau. Inwieweit ein perspektivisch verfügbares, flächendeckendes Ladenetz mit ausreichend Kapazitäten für spontane und schnelle Ladevorgänge, den Bedarf einer realistischen Reichweitenprognose kompensiert, kann mittelfristig eine zu betrachtende Fragestellung darstellen.

Betrachtung von Langstreckenverkehren

Aktuelle elektrische Pkw besitzen Norm-Reichweiten von ca. 200 bis 600 km. Dies ist deutlich mehr als die allermeisten, täglichen Wegstrecken, die zurückgelegt werden. Damit rückt für viele Anwendungen die Reichweitenunsicherheit in den Hintergrund und steht der Anschaffung und dem Einsatz nicht weiter im Wege. Anders verhält es sich bei Langstreckenverkehren, wie z.B. dem Güterfernverkehr mit schweren Nutzfahrzeugen. Hier wird weiterhin intensiv diskutiert, inwieweit batterieelektrische Antriebe eine wirtschaftliche, emissionsfreie Alternative zum Dieselantrieb darstellen, insbesondere mit Verweis auf die verfügbare Reichweite. Bei Anpassung auf schwere Nutzfahrzeuge mit Nutzungsprofilen im Fernverkehr kann der vorgestellte Simulationsansatz wichtige Hinweise liefern, um diese reichweitenkritische Anwendung weitergehend zu analysieren. Unter anderem mit dieser Fragestellung befasst sich das Forschungsprojekt eHaul unter Leitung des Fachgebiets FVB der Technischen Universität Berlin im Zeitraum 2020 bis 2023 (Technische Universität Berlin 2021).

5.3 Gesamtfazit

Insgesamt wird in der Arbeit festgestellt, dass der Gesamtenergiebedarf für Antriebs- und Nebenaggregate von elektrischen Nutzfahrzeugen für reale Nutzungsprofile mit Hilfe der physikalischen Simulation grundsätzlich genauer berechnet werden kann als mit einfachen statistischen Verfahren. Um eine hohe Modellgüte für unterschiedliche Fahrzeugmodelle und Anwendungsfälle zu erreichen, steht dem jedoch ein umfangreicher Implementierungs- und Validierungsaufwand gegenüber. Die Verwendung der energetischen Simulation mit Berücksichtigung von Antrieb, HVAC und Niedervolt-Nebenverbrauchern stellt sowohl bei der Beschaffung wie auch bei der Disposition von elektrischen Nutzfahrzeugen eine sinnvolle Möglichkeit dar, wirtschaftliche Potenziale durch eine gegenseitige Abstimmung von Nutzung und Fahrzeug zu heben und damit die Elektromobilität attraktiver zu machen. Vor dem Hintergrund des schnell voranschreitenden Klimawandels müssen Transportaufgaben durch Elektrifizierung sehr zeitnah klimaneutral realisiert werden. Hierzu leistet die vorgestellte Methode durch Aufzeigen der energetischen Abhängigkeiten, Reduktion von Reichweitenangst und sinnvolle wirtschaftliche Dimensionierung der Traktionsbatterie einen Beitrag. Perspektivisch ist zu prüfen, ob ähnliche oder sogar bessere Ergebnisse mit einfacher zu automatisierenden, datenbasierten Verfahren , z.B. jenen des maschinellen Lernens, erreichbar sind. Damit könnte die Anwendbarkeit der Verbrauchsprognose mit geringem Aufwand auf eine Vielzahl von elektrischen Fahrzeugmodellen und Fahrsituationen übertragen werden und damit für eine Vielzahl von Anwendungsfällen zum Einsatz kommen.

Literaturverzeichnis

- Adamczyk, Dirk (2018): Technik für die Elektrifizierung des Antriebsstrangs. In: *ATZ* (Automobiltechnische Zeitschrift) 120 (S3), S. 80–85. DOI: 10.1007/s35148-018-0107-3.
- Alpaydın, Ethem (2014): Introduction to machine learning. Third edition. Cambridge, Massachusetts, London, England: The MIT Press (Adaptive computation and machine learning).
- Argonne National Laboratory (Hg.) (2019): AFLEET-Tool. Alternative Fuel Life-Cycle
 Environmental and Economic Transportation (AFLEET) Tool. Argonne National Laboratory.
 Online verfügbar unter https://greet.es.anl.gov/afleet_tool, zuletzt geprüft am 17.08.2020.
- Arndt, Wulf-Holger; Döge, Norman; Marker, Stefanie (2016): Elektrifizierungspotential kommerzieller Kraftfahrzeug-Flotten im Wirtschaftsverkehr als dezentrale Energie-Ressource in städtischen Verteilnetzen. komDRIVE. Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin.
- BAFA (Hg.) (2020): Elektromobilität Fördersätze für Elektrofahrzeuge. Online verfügbar unter https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Elektromobilitaet/Neuen_Antrag_stellen/neu en_antrag_stellen_node.html, zuletzt geprüft am 17.08.2020.
- Basshuysen, Richard van; Schäfer, Fred (Hg.) (2017): Handbuch Verbrennungsmotor. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven. 8. überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg (ATZ / MTZ-Fachbuch).
- Baumgart, Rico (2010): Reduzierung des Kraftstoffverbrauches durch Optimierung von Pkw-Klimaanlagen. Dissertation. Auerbach: Verl. Wiss. Scripten.
- Beetz, Klaus; Kohle, Uwe; Eberspach, Günther (2010): Beheizungskonzepte für Fahrzeuge mit Alternativen Antrieben. In: *ATZ (Automobiltechnische Zeitschrift)* 112 (4), S. 246–249.
- BMWi; BMU (Hg.) (2011): Erste Verordnung zur Änderung der Pkw-Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung. Online verfügbar unter https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&bk=Bundesanzeiger_ BGBl&start=//*[@attr_id=%2527bgbl111s1756.pdf%2527]#_bgbl_%2F%2F*%5B%40attr_i d%3D%27bgbl111s1756.pdf%27%5D_1601886154479, zuletzt geprüft am 05.10.2020.
- Bönnighausen, Daniel (2020): Abt e-Caddy wird nun auch zum Kauf angeboten. Hg. v. electrive.net. Online verfügbar unter https://www.electrive.net/2020/05/18/abt-e-caddy-wird-nun-auch-zum-kauf-angeboten/, zuletzt geprüft am 17.08.2020.
- BorgWarner (Hg.) (2017): High Voltage Air Heaters. for Cabin Heating in xEV Vehicles. Online verfügbar unter https://cdn.borgwarner.com/docs/default-source/default-document-library/product-sheet-hv-air-heater.pdf?sfvrsn=61d4b13c_18, zuletzt geprüft am 23.10.2020.

- Braess, Hans-Hermann; Seiffert, Ulrich (Hg.) (2011): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. 6. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag (ATZ/MTZ-Fachbuch).
- Buchal, Christoph; Karl, Hans-Dieter; Sinn, Hans-Werner (2019): Kohlemotoren, Windmotoren und Dieselmotoren: Was zeigt die CO2-Bilanz? Hg. v. ifo-Schnelldienst. Online verfügbar unter https://www.hanswernersinn.de/dcs/sd-2019-08-sinn-karl-buchal-motoren-2019-04-25_0.pdf, zuletzt geprüft am 01.09.2020.
- Büchner, Stefan (2008): Energiemanagement Strategien für elektrische Energiebordnetze in Kraftfahrzeugen. Dissertation. 1. Aufl. Göttingen: Culliver.
- Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (o. J.): Digitale Geländemodelle. Online verfügbar unter https://www.bkg.bund.de/DE/Produkte-und-Services/Shop-und-Downloads/Digitale-Geodaten/Gelaendemodelle/gelaendemodelle.html, zuletzt geprüft am 13.08.2019.
- Bundesministerium der Finanzen (2000): AfA-Tabelle für allgemein verwendbare Anlagegüter, vom 15.12.2000. Online verfügbar unter
 https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere
 Steuerthemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/Ergaenzende-AfA-Tabellen/AfA-Tabelle AV.html, zuletzt geprüft am 18.06.2021.
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2013): Elektromobilität: Das Auto neu Denken. Bonn.
- Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz (2002): Kraftfahrzeugsteuergesetz. KraftStG, vom 2002. Online verfügbar unter http://www.gesetze-im-internet.de/kraftstg, zuletzt geprüft am 09.12.2020.
- Bundesregierung (Hg.) (2011): Regierungsprogramm Elektromobilität. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung;
 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Bundesministerium für Bildung und Forschung.
- Bundesregierung (Hg.) (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. Online verfügbar unter https://www.bundesregierung.de/bregde/themen/klimaschutz/klimaschutzprogramm-2030-1673578, zuletzt geprüft am 08.07.2020.
- Cauwer, Cedric de; Verbeke, Wouter; Coosemans, Thierry; Faid, Saphir; van Mierlo, Joeri (2017): A Data-Driven Method for Energy Consumption Prediction and Energy-Efficient Routing of Electric Vehicles in Real-World Conditions. In: *Energies* 10 (5), S. 608. DOI: 10.3390/en10050608.
- Continental (Hg.) (2018): Technischer Ratgeber. PKW, 4x4, Van. Online verfügbar unter https://blobs.continental-

tires.com/www8/servlet/blob/378072/54e7a489d672184f4bc32d6c6195c20b/technischerratgeber-pkw-2018-2019-data.pdf, zuletzt geprüft am 11.10.2019.

- Deutscher Wetterdienst (2020): Climate Data Center. Online verfügbar unter ftp://ftp-cdc.dwd.de/, zuletzt geprüft am 14.08.2020.
- DIN 1946-3, 2006: Raumlufttechnik Klimatisierung von Personenkraftwagen und Lkw.
- DIN 70010, 2001: Systematik der Straßenfahrzeuge.
- DIN EN ISO 7730, 2006: Ergonomie der thermischen Umgebung.
- Dobmann, Michael (2018): Kostenoptimale Auslegung von thermischen Eigenschaften in Elektrofahrzeugen. Dissertation. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden (AutoUni Schriftenreihe, 131).
- Doppelbauer, Martin (2020a): Grundlagen der Elektromobilität. Technik, Praxis, Energie und Umwelt. 1. Auflage.
- Doppelbauer, Martin (2020b): Strategiepapier elektrische Pkws –aktueller Stand und zukünftige Entwicklung. V 1.5. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Online verfügbar unter http://www.eti.kit.edu/img/content/Strategiepapier%20Elektroautos%20Stand%202019-10%20V1.5.pdf, zuletzt geprüft am 27.08.2020.
- Drage, Peter; Seebald, Frank; Paul, Christian; Hinteregger, Markus (2017): Klimatisierungskonzepte für Fahrzeuge der Zukunft. In: *ATZ Automobiltech Z* 119 (9), S. 46–51. DOI: 10.1007/s35148-017-0089-6.
- Eberle, Ulrich; Helmolt, Rittmar von (2010): Sustainable transportation based on electric vehicle concepts: a brief overview. In: *Energy Environ. Sci.* 3 (6), S. 689. DOI: 10.1039/c001674h.
- ecomento.de (Hg.) (2020): Maxus EV80. Online verfügbar unter https://ecomento.de/modelle/maxusev80/, zuletzt geprüft am 27.10.2020.
- Ersoy, Metin; Heißing, Bernd (Hg.) (2008): Fahrwerkhandbuch. Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner; Springer Fachmedien (ATZ-MTZ-Fachbuch).
- EU transport in figures. Statistical pocketbook (2018). Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Europäische Kommission (2011): Verordnung (EU) Nr. 678/2011 zur Ersetzung des Anhangs II und zur Änderung der Anhänge IV, IX und XI der Richtlinie 2007/46/EG, vom 14.07.2011. In: Amtsblatt der Europäischen Union. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011R0678&from=EN, zuletzt geprüft am 31.08.2020.

- Europäisches Parlament (2019): Parlament bestätigt neue CO2-Emissionsgrenzwerte für Lkws. Pressemitteilung. Online verfügbar unter http://www.europarl.europa.eu/news/de/pressroom/20190412IPR39009/parlament-bestatigt-neue-co2-emissionsgrenzwerte-fur-lkws, zuletzt geprüft am 23.04.2019.
- Focus (2014): Deutschland macht bei der E-Mobilität nicht mit. Drei Fragen an: Professor Ferdinand Dudenhöffer. Online verfügbar unter https://www.focus.de/auto/news/drei-fragen-an-professorferdinand-dudenhoeffer-deutschland-macht-bei-der-e-mobilitaet-nicht-mit_id_4177314.html, zuletzt geprüft am 23.04.2019.
- Follmer, Robert; Gruschwitz, Dana; Jesske, Birgit; Quandt, Silvia; Lenz, Barbera; Claudia Nobis et al. (2010): Mobilität in Deutschland 2008. Abschlussbericht. MiD 2008. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. infas; DLR. Bonn, Berlin.

FOTNET (2014): FESTA-Handbook. Version 5.

- Franke, Thomas; Neumann, Isabel; Bühler, Franziska; Cocron, Peter; Krems, Josef F. (2012):
 Experiencing Range in an Electric Vehicle: Understanding Psychological Barriers. In: *Applied Psychology* 61 (3), S. 368–391. DOI: 10.1111/j.1464-0597.2011.00474.x.
- Fraunhofer ISI (2019): Elektroautos, die heute gekauft und in Deutschland genutzt werden, haben eine deutlich bessere Klimabilanz als Diesel und Benziner. Wietschel, Martin. Online verfügbar unter https://www.isi.fraunhofer.de/de/presse/2019/presseinfo-07-elektroautos-klimabilanz.html, zuletzt geprüft am 01.09.2020.
- Füßel, Andreas (2017): Technische Potenzialanalyse der Elektromobilität. Stand der Technik, Forschungsausblick und Projektion auf das Jahr 2025. Wiesbaden: Springer Vieweg (Research).
- Futuricum (2020a): Futuricum 26E Collect Elektrolastwagen. Nicht Alternative, sondern Lösung:
 Leistungsstärke, Ökologie und Wirtschaftlichkeit kombiniert. Hg. v. Designwerks Products AG.
 Online verfügbar unter https://www.futuricum.com/wpcontent/uploads/Factsheet_26E_Futuricum_Elektrolastwagen_DE.pdf, zuletzt geprüft am
 28.08.2020.
- Futuricum (2020b): Futuricum Sweeper 18E Elektrolastwagen. Hg. v. Designwerks Products AG. Online verfügbar unter https://www.futuricum.com/wpcontent/uploads/Factsheet_Sweeper18E_DE.pdf, zuletzt geprüft am 28.08.2020.
- Grell, Jan Florian (2019): Validierung und Optimierung eines Energie-Simulationsmodells zur
 Abbildung von elektrischen Nutzfahrzeugen anhand von realen Fahrzeugdaten. Masterarbeit.
 Technische Universität Berlin.
- Großmann, Holger (2013): Pkw-Klimatisierung. Physikalische Grundlagen und technische Umsetzung. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI-Buch).

- Grube, Thomas (2014): Potentiale des Strommanagements zur Reduzierung des spezifischen Energiebedarfs von Pkw. Jülich: Forschungszentrum Jülich (Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energie & Umwelt, 216).
- Hacker, Florian; Kasten, Peter (2017): Handlungsbedarf und -optionen zur Sicherstellung des Klimavorteils der Elektromobilität. Endbericht zum "Wissenschaftlichen Analyse- und Dialogvorhaben zur Sicherstellung des Klimavorteils der Elektromobilität". Hg. v. Öko-Institut.
- Hajek, Stefan (2019): Was Hans-Werner Sinn bei seiner Elektroauto-Studie übersehen hat. Ist das E-Auto ein Rückschritt? In: *Wirtschaftswoche* 2019, 19.04.2019. Online verfügbar unter https://www.wiwo.de/technologie/mobilitaet/ist-das-e-auto-ein-rueckschritt-was-hans-wernersinn-bei-seiner-elektroauto-studie-uebersehen-hat/24237236.html, zuletzt geprüft am 08.10.2020.
- Haken, Karl-Ludwig (2011): Grundlagen der Kraftfahrzeugtechnik. 2., aktualisierte und erw. Aufl. München: Hanser (Fahrzeugtechnik).
- Hanselka, Holger; Jöckel, Michael (2010): Elektromobilität Elemente, Herausforderungen,
 Potenziale. In: Reinhard F. Hüttl, Bernd Pischetsrieder und Dieter Spath (Hg.): Elektromobilität.
 Potenziale und wissenschaftlich-technische Herausforderungen. Berlin: Springer (acatech Diskutiert).
- Harendt, Bertram; Schumann, Setlef; Wirth, Matthias (2015): Begleit- und Wirkungsforschung Schaufenster Elektromobilität. Fortschrittsbericht. Ergebnispapier Nr. 16.
- Haupt, Christian (2013): Ein multiphysikalisches Simulationsmodell zur Bewertung von Antriebs- und Wärmemanagementkonzepten im Kraftfahrzeug. Dissertation. Technische Universität München, München. Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen.
- He, Hongwen; Xiong, Rui; Fan, Jinxin (2011): Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit
 Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach. In: *Energies* 4 (4), S.
 582–598. DOI: 10.3390/en4040582.
- Heinemann, Detlef (2007): Strukturen von Batterie- und Energiemanagementsystemen mit Bleibatterien und Ultracaps. Dissertation. Technische Universität Berlin, Berlin. Fakultät IV -Elektrotechnik und Informatik.
- Helma, Hinrich; Kämpfer, Claudia; Biemann, Kirsten; Lambrecht, Udo; Jöhrens, Julius; Meyer,
 Kerstin (2019): Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenziale.
 Hg. v. Agora Verkehrswende. ifeu; Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg
 GmbH.

- Hesse, Benjamin (2011): Wechselwirkung von Fahrzeugdynamik und Kfz-Bordnetz unter Berücksichtigung der Fahrzeugbeherrschbarkeit. Dissertation. Universität Duisburg-Essen. Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik.
- Hill, Nikolas; Amaral, Sofia; Morgan-Price, Samantha; Nokes, Tom; Bates, Judith; Helms, Hinrich et al. (2020): Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA. Final report. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Hoekstra, Auke; Steinbuch Maarten (2020): Vergleich der lebenslangen Treibhausgasemissionen von Elektroautos mit den Emissionen von Fahrzeugen mit Benzin- oder Dieselmotoren. TU Eindhoven.
- Hoepke, Erich; Breuer, Stefan (Hg.) (2016): Nutzfahrzeugtechnik. Grundlagen, Systeme,
 Komponenten. 8., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg (ATZ / MTZ-Fachbuch). Online verfügbar unter http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-09537-6.
- Hofemeier, Florian (2013): Ansatz zur Gesamtfahrzeugsimulation für E-Fahrzeuge zur ganzheitlichen Energieeffizienzanalyse. Dissertation (AutoUni-Schriftenreihe, 55).
- Hofmann, Peter (2014): Hybridfahrzeuge. Ein alternatives Antriebssystem für die Zukunft. 2. Aufl. Wien: Springer.
- Hopp, Hannes (2016): Thermomanagement von Hochleistungsfahrzeug-Traktionsbatterien anhand gekoppelter Simulationsmodelle. Dissertation. Wiesbaden: Springer Vieweg (Research). Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-14247-6_3, zuletzt geprüft am 10.12.2020.
- Horváth & Partners (Hg.) (2019): Faktencheck E-Mobilität 2018/2019. Status quo der E-Mobilität in Deutschland. Online verfügbar unter https://www.horvath-partners.com/fileadmin/horvathpartners.com/assets/05_Media_Center/PDFs/Infografiken/191009_Infografik_Faktencheck_E-Mobilitaet_g.pdf, zuletzt geprüft am 10.01.2020.
- Hüttl, Reinhard F.; Pischetsrieder, Bernd; Spath, Dieter (Hg.) (2010): Elektromobilität. Potenziale und wissenschaftlich-technische Herausforderungen. acatech. Berlin: Springer (acatech Diskutiert).
- I SEE (Hg.) (2019): e-Vivaro-und e-Movano. Online verfügbar unter https://www.i-see.plus/isee-files/I-SEE-e-VIVARO-e-MOVANO.pdf, zuletzt geprüft am 03.09.2020.
- IMPARGO GmbH (2018): LKW Fahrzeugkostenkalkulation einfach gemacht. Online verfügbar unter https://impargo.de/fahrzeugkostenkalkulation/, zuletzt aktualisiert am 15.05.2019, zuletzt geprüft am 08.07.2019.
- International Energy Agency (Hg.) (2020): Global EV Outlook 2020. IEA. Online verfügbar unter https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020, zuletzt geprüft am 27.08.2020.

- Iveco Magirus AG (o.J.): Total Cost of Ownership. Online verfügbar unter https://www.iveco.com/germany/Pages/tco.html, zuletzt aktualisiert am 11.06.2019, zuletzt geprüft am 08.07.2019.
- Jerratsch, Jens-Olav; Herzlieb, Thomas; Kilian, Oliver; Bitzker, David; Kexel, Jannik; Marker, Stefanie (2020): EN-WIN: Abschlussbericht der TU Berlin. -in Druck-. Technische Universität Berlin.
- Jerratsch, Jens-Olav; Herzlieb, Thomas; Marker, Stefanie (2018): Weather Data Mapping to enrich Naturalistic Driving Data and enhance Energetic Simulation. In: Fisita (Hg.): FISITA 2018 World Automotive Congress Proceedings. Disruptive Technologies for Affordable and Sustainable Mobility. WAC. Chennai, 2. - 5.10.2018. Fisita, F2018-STN-053.
- Jung, Matthias; Kemle, Andreas; Strauss, Thomas; Wawzyniak, Markus (2011): Innenraumheizung von Hybrid- und Elektrofahrzeugen. In: *ATZ* 113 (5), S. 396–401.
- Kairies, Kai-Philipp; Sauer, Dirk Uwe (2019): Alterungsmechanismen von Lithium-Ionen Batterien. Präsentation. Elektrotechnisches Kolloquium an der TU Paderborn. Paderborn.
- Kampker, Achim; Vallée, Dirk; Schnettler, Armin (2018): Elektromobilität. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Karle, Anton (2015): Elektromobilität. Grundlagen und Praxis. 1. Aufl. München: Fachbuchverl. Leipzig im Hanser-Verl.
- Köll, Lorenz; Mezger, Tomas; Rasilier, Thomas; Fischhaber, Sebastian (2011): Fahrzeugmessung im Rahmen des Projekts AZE. Hg. v. Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE). Analysezentrum für Elektromobilität (AZE).
- Komarnicki, Przemyslaw; Haubrock, Jens; Styczynski, Zbigniew A. (2018a): Physikalisch-technische Beschreibung des E-Kraftfahrzeugs. In: Przemyslaw Komarnicki, Jens Haubrock und Zbigniew A. Styczynski (Hg.): Elektromobilität und Sektorenkopplung. Infrastruktur- und Systemkomponenten. Berlin: Springer Vieweg (SpringerLink Bücher), S. 39–60.
- Komarnicki, Przemyslaw; Haubrock, Jens; Styczynski, Zbigniew A. (Hg.) (2018b): Elektromobilität und Sektorenkopplung. Infrastruktur- und Systemkomponenten. Berlin: Springer Vieweg (SpringerLink Bücher).
- Konz, Martin; Lemke, Nicholas; Försterling, Sven; Egtessag, Marjam (2011): Spezifische Anforderungen an das Heiz-Klimasystem elektromotorisch angetriebener Fahrzeuge. Hg. v. Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT-Schriftenreihe, 233).
- Kott, Sandro (2016): Energetische Betrachtung von Nebenverbrauchern in leichten und mittelschweren Nutzfahrzeugen. Studienarbeit. Technische Universität Berlin.

- Kraftfahr-Bundesamt (2020): Fahrzeugzulassungen im Oktober 2020. Immen, Stephan. Online verfügbar unter
 https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2020/Fahrzeugzulassungen/pm26_2020_n_1
 0 20 pm komplett.html?nn=2562684, zuletzt geprüft am 09.11.2020.
- Langeheinecke, Klaus; Jany, Peter; Thieleke, Gerd; Kaufmann, Andre (2013): Thermodynamik für Ingenieure. Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Studium. 9., überarb. u. erw. Auflage. Wiesbaden, s.l.: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Lastauto Omnibus-Katalog. auf Basis der DEKRA-CARCOST-Datenbank (2018). 1. Auflage. Stuttgart: Motorbuch (2018).
- Linssen, J.; Schulz, A.; Mischinger, S.; Mass, H.; Günther, C.; Weinmann, O. et al. (2012):
 Netzintegration von Fahrzeugen mit elektrifizierten Antriebssystemen in bestehende und zukünftige Energieversorgungsstrukturen. NET-ELAN ; Endbericht ; Advances in Systems Analyses 1. Jülich: Forschungszentrum Jülich (Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energie & Umwelt, 150).
- Liu, Zhu; Ciais, Philippe; Deng, Zhu; Lei, Ruixue; Davis, Steven J.; Feng, Sha et al. (2020): Near-realtime monitoring of global CO2 emissions reveals the effects of the COVID-19 pandemic. In: *Nature communications* 11 (1), S. 5172. DOI: 10.1038/s41467-020-18922-7.
- Lunanova, Marco (2009): Optimierung von Nebenaggregaten. Maßnahmen zur Senkung der CO2-Emission von Kraftfahrzeugen. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (Vieweg & Teubner Research).
- Mardorf, Lutz; Menger, Peter (2010): Pkw-Klimaanlage mit Wärmepumpenmodus für Elektrofahrzeuge. Vergleich der Kältemittel R1234yf und 134a. Hochschule Osnabrück.
- Mareev, Ivan; Becker, Jan; Sauer, Dirk (2018): Battery Dimensioning and Life Cycle Costs Analysis for a Heavy-Duty Truck Considering the Requirements of Long-Haul Transportation. In: *Energies* 11 (1), S. 1–55. DOI: 10.3390/en11010055.
- Menken, Jan Christoph (2016): Thermomanagement im batteriebetriebenen Pkw unter Nutzung eines Kaltdampfprozesses mit Sekundärkreislaufsystem. Dissertation. 1st ed. Göttingen: Cuvillier Verlag (Audi Dissertationsreihe, v.115).
- Mercedes Benz (Hg.) (2020): Der eVito Kastenwagen: Ihre gesamtheitliche Lösung für Elektromobilität. Online verfügbar unter https://www.mercedes-benz.de/vans/de/vito/e-vitopanel-van, zuletzt geprüft am 17.08.2020.
- Mex, Paul (2019): Simulation des Energieverbrauchs der Klimaanlage in realen Nutzungsprofilen. Bachelorarbeit. Technische Universität Berlin.
- Mitsubishi Heavy Industries (Hg.) (2010): PTC Heater for Electric Vehicles and Plug-in Hybrid Vehicles Using Water Heat Carrier. Technical Review Vol. 46 No. 4. Online verfügbar unter https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e474/e474019.pdf, zuletzt geprüft am 03.09.2020.
- Mohaupt, Dietrich (2019): Die Wette auf das Elektroauto. Hauptversammlung bei VW. DLF. Online verfügbar unter https://www.deutschlandfunk.de/hauptversammlung-bei-vw-die-wette-auf-das-elektroauto.766.de.html?dram:article_id=448736, zuletzt aktualisiert am 14.05.2019, zuletzt geprüft am 14.06.2019.
- Nissan (Hg.) (2020): DER 100 % ELEKTRISCHE NISSAN E- NV200. Online verfügbar unter https://www.nissan.de/fahrzeuge/neuwagen/e-nv200.html, zuletzt geprüft am 17.08.2020.
- now GmbH (Hg.) (2020): Factsheet: Elektromobilität und Rohstoffe. Bedarfe, Verfügbarkeiten, Umweltauswirkungen. Online verfügbar unter https://www.now-gmbh.de/content/1-aktuelles/1presse/20200925-now-factsheet-elektromobilitaet-und-rohstoffe/nowfactsheet_elektrobomilitaet-und-rohstoffe.pdf, zuletzt geprüft am 05.10.2020.
- Öko-Institut e.V. (2017): Kostenrechner für Elektrofahrzeuge. Online verfügbar unter https://emobkostenrechner.oeko.de/#/, zuletzt aktualisiert am 11.07.2018, zuletzt geprüft am 08.07.2019.
- OpenStreetMap (o. J.): OpenStreetMap Deutschland. Online verfügbar unter https://www.openstreetmap.de/index.html, zuletzt geprüft am 13.08.2019.
- Orner, Markus (2017): Nutzungsorientierte Auslegung des Antriebsstrangs und der Reichweite von Elektrofahrzeugen. Dissertation (Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart).
- Palmer, Kate; Tate, James E.; Wadud, Zia; Nellthorp, John (2018): Total cost of ownership and market share for hybrid and electric vehicles in the UK, US and Japan. In: *Applied Energy* (209), S. 108–119. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.10.089.
- Paulke, Stefan; Köster, Daniel; Hass, regina; Bader, Viktor; Menzel, Stephan; Gubalke; Andreas (2014): Thermische Simulationen einer Volkswagen e-Golf-Fahrzeugkabine unter Einbezug von thermischen Menschmodellen. VDI-Wissensensforum. In: 17. Kongress SIMVEC Simulation und Erprobung in der Fahrzeugentwicklung 2014. Berechnung, Prüfstands- und Straßenversuch. Düsseldorf: VDI-Verl. (VDI-Berichte, 2224).
- Pokojski, Martin (2019): Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge. Bedeutung für die Elektromobilität. VDI/VDE-Studie.
- Proff, Heike (Hg.) (2019): Mobilität in Zeiten der Veränderung. Technische und Betriebswirtschaftliche Aspekte. Wiesbaden: Springer Gabler.

- Propfe, Bernd; Redelbach, Martin; Santini, Danilo; Friedrich, Horst (2012): Cost analysis of Plug-in Hybrid Electric Vehicles including Maintenance & Repair Costs and Resale Values. In: *World Electric Vehicle Journal* 5, S. 886–895.
- Qi, Zhang; Yang, Jie; Jia, Ruo; Wang, Fan (2018): Investigating Real-World Energy Consumption of Electric Vehicles: A Case Study of Shanghai. In: *Proceedia Computer Science* 131, S. 367–376. DOI: 10.1016/j.procs.2018.04.176.
- Quaschning, Volker (2015): Regenerative Energiesysteme. Technologie ; Berechnung ; Simulation. 9., aktualisierte und erw. Aufl. München: Hanser. Online verfügbar unter http://subhh.ciando.com/book/?bok_id=1914994.
- Reif, Konrad (Hg.) (2011): Bosch Autoelektrik und Autoelektronik. Bordnetze, Sensoren und elektronische Systeme. 6., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag (Bosch Fachinformation Automobil).
- Reif, Konrad; Noreikat, Karl-Ernst; Borgeest, Kai (Hg.) (2012): Kraftfahrzeug-Hybridantriebe. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag (ATZ / MTZ-Fachbuch).
- Reitberger, Josef (2019): Elektroautos doch umweltfreundlicher als gedacht: Forscher ändern ihre Meinung. Online verfügbar unter https://efahrer.chip.de/news/elektroautos-dochumweltfreundlicher-als-gedacht-forscher-aendern-ihre-meinung_101651, zuletzt geprüft am 25.12.2019.
- Renner, Markus; Koppe, Theresia (2010): Thermomanagement von Elektro-Fahrzeugen. In: Jörn Hofhaus (Hg.): PKW-Klimatisierung IV. Renningen: Expert-Verl. (Fachbuch / Haus der Technik, 107), S. 158–173.
- Roscher, Michael (2011): Zustandserkennung von LiFePO4-Batterien für Hybrid- und Elektrofahrzeuge. Aachen, Techn. Hochsch., Dissertation, 2010. Aachen: Shaker (Aachener Beiträge des ISEA, 54).
- Runkel, Matthias; Stubbe, Rouven (2019): Elektroautos und Verbrenner im Gesamtkostenvergleich. Policy Brief (12/2019). Online verfügbar unter http://www.foes.de/pdf/2019-12_FOES_Autovergleich.pdf, zuletzt geprüft am 07.01.2020.
- Sagberg, Fridulv; et al. (2011): Recommendations for a large-scale European naturalistic driving observation study. Deliverable D4.1. Unter Mitarbeit von PROLOGUE Consortium. Online verfügbar unter https://prologue.kfv.at/fileadmin/content/Dokumente/PROLOGUE D4.1 01.pdf, zuletzt geprüft

am 12.12.2020.

- Schack, Alfred (1969): Der industrielle Wärmeübergang : für Praxis und Studium. Mit grundlegenden Zahlenbeispielen. 7., neubearbeit. u. erw. Aufl. Düsseldorf: Stahleisen.
- Schmidt, Jan Philipp (2013): Verfahren zur Charakterisierung und Modellierung von Lithium-Ionen Zellen. Dissertation (Schriften des Instituts für Werkstoffe der Elektrotechnik, Karlsruher Institut für Technologie, Band 25).
- Schönfelder, Martin; Pathmaperuma, Daniel; Reiner, Ulrich; Fichtner, Wolf; Schmeck, Hartmut;
 Leibfried, Thomas (2009): Elektromobilität. Eine Chance zur verbesserten Netzintegration
 Erneuerbarer Energien. In: UnweltWirtschaftsForum (uwf) 17 (4), S. 373–380. DOI: 10.1007/s00550-009-0157-9.
- Schramm, Dieter; Hesse, Benjamin; Maas, Niko; Unterreiner, Michael (2017): Fahrzeugtechnik. Technische Grundlagen aktueller und zukünftiger Kraftfahrzeuge. Berlin, Boston: De Gruyter.
- Schulz, Alexandra; Schindler, Volker; Marker, Stefanie (2012): Elektrifizierung von Fahrzeugflotten. In: *ATZ (Automobiltechnische Zeitschrift)* 114 (1), S. 86–92. DOI: 10.1365/s35148-012-0255-9.
- Sorge, Nils-Viktor (2019): Toyota startet Elektroauto-Offensive. Rückschlag für Wasserstoff-Technik. Spiegel. Online verfügbar unter https://www.spiegel.de/auto/aktuell/toyota-setzt-verstaerkt-aufelektroautos-mit-batterie-a-1271332.html, zuletzt geprüft am 14.06.2019.
- Statistisches Bundesamt (Hg.) (2020): Durchschnittlicher Preis f
 ür Dieselkraftstoff in Deutschland in den Jahren 1950 bis 2020. Statista. Online verf
 ügbar unter https://de.statista.com/statistik/daten/studie/779/umfrage/durchschnittspreis-fuerdieselkraftstoff-seit-dem-jahr-1950/, zuletzt gepr
 üft am 04.11.2020.
- Stütz, Sebastian; Bernsmann, Arnd; Baltzer, Tim; Rogmann Benedikt; Hentschel, Nina; Wunderlin, Patrick; Pommerenke, Kurt (2016): ELMO – Elektromobiler Urbaner Wirtschaftsverkehr.
 Projektabschlussbericht. Hg. v. Fraunhofer IML. Dortmund. Online verfügbar unter https://www.iml.fraunhofer.de/content/dam/iml/de/documents/OE%20320/Infoseiten%20Abteil ung%20und%20Gruppen/ELMO-Abschlussbericht_(%C3%96ffentliche_Fassung).pdf, zuletzt geprüft am 05.10.2020.
- Surpure, J. S. (1982): Heat-Related Illness and the Automobile. In: Annals of Emergency Medicine, 11:5 1982, S. 263–265.
- Taefi, Tessa T.; Stütz, Sebastian; Fink, Andreas (2017): Assessing the cost-optimal mileage of medium-duty electric vehicles with a numeric simulation approach. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 56, S. 271–285. DOI: 10.1016/j.trd.2017.08.015.
- Technische Universität Berlin (Hg.) (2021): eHaul-Projektwebseite. Online verfügbar unter www.ehaul.eu, zuletzt geprüft am 16.06.2021.

- Tellier, Laurent; Pierron, Frederic; Raulin-Gestas, Letitia; Puzenat, Bertrand (2014): Entwicklung eines Hochvolt-Kühlmittel-Heizgerätes. In: ATZ (Automobiltechnische Zeitschrift) 116 (12), S. 66–71.
- Transport and Environment (Hg.) (2020): Misson (almost) accomplished. Carmakers' race to meet the 2020/21 CO2 targets and the EU electric cars market.
- Tschöke, Helmut (2015): Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Basiswissen. Wiesbaden: Springer Vieweg (ATZ / MTZ-Fachbuch).
- Tschöke, Helmut; Gutzmer, Peter; Pfund, Thomas (Hg.) (2019): Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Grundlagen - vom Mikro-Hybrid zum vollelektrischen Antrieb (ATZ/MTZ-Fachbuch).
- TÜV SÜD (2010): Normangaben bei Reichweiten von E-Cars nicht ausreichend. TÜV SÜD entwickelt neuen Standard zur Reichweitenermittlung von E-Cars. Online verfügbar unter https://www.presseportal.de/pm/38406/1735230, zuletzt geprüft am 17.05.2019.
- VDI (2013): VDI-Wärmeatlas. 11., bearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer Vieweg.
- verivox (Hg.) (2020): Elektroauto oder Benziner wo ist die Versicherung günstiger? Online verfügbar unter https://www.verivox.de/kfz-versicherung/nachrichten/elektroauto-oder-benziner-wo-ist-die-versicherung-guenstiger-1117148/, zuletzt geprüft am 09.11.2020.
- Volkswagen AG (Hg.) (2015): CO2-Emissionseinsparungen durch den Einsatz von E-Fahrzeugen in Nutzfahrzeugflotten. Ecargo. Abschlussbericht. Online verfügbar unter https://www.erneuerbarmobil.de/sites/default/files/2017-02/Ecargo_Abschlussbericht%20final.pdf, zuletzt geprüft am 10.11.2019.
- Wallentowitz, Henning; Freialdenhoven, Arndt (2011): Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges. Technologien, Märkte und Implikationen. 2., überarbeitete Auflage.
 Wiesbaden: Vieweg + Teubner (ATZ/MTZ-Fachbuch).
- Wallentowitz, Henning; Reif, Konrad (Hg.) (2006): Handbuch Kraftfahrzeugelektronik. Grundlagen, Komponenten, Anwendungen. 1. Aufl. s.l.: Vieweg (ATZ/MTZ Fachbuch).
- Webasto (Hg.) (2015): Webasto HVH Hochvoltheizer. Das innovative Heizsystem f
 ür Hybrid- und Elektrofahrzeuge. Online verf
 ügbar unter https://www.webasto.com/fileadmin/webasto_files/documents/international/hd/brochure/HVH_ Broschuere.pdf, zuletzt gepr
 üft am 13.10.2019.
- Westerloh, Malte (2019): Analyse des weltweiten Energiebedarfs zum Heizen und Kühlen von Elektrofahrzeugen. Dissertation. Wiesbaden: Springer (AutoUni Schriftenreihe, 138).
- Westerloh, Malte; Köhler, Jürgen (2014): Einfluss der regionalen Solarstrahlung auf den PKW. In: 17. Kongress SIMVEC - Simulation und Erprobung in der Fahrzeugentwicklung 2014. Berechnung, Prüfstands- und Straßenversuch. Düsseldorf: VDI-Verl. (VDI-Berichte, 2224).

Wittenbrink, Paul (2014): Transportmanagement. Kostenoptimierung, Green Logistics und Herausforderungen an der Schnittstelle Rampe. 2., vollst. neu bearb. u. erw. Aufl. 2014. Wiesbaden: Springer Gabler.

A Anhang: Ergebnisse der Marktrecherche zu eNfz

			Volkeurgen		ART							
Fahrzeug		Nissan e-NV200	eCrafter	ABT e-Caddy	Transporter	Mercedes eSprinter	Mercedes eVito	FUSO eCanter	BYD T3	BYD T6	MAN eTGE	Renault Master
	Motor						Asynchronmotor	PSM	ermanentmagnet Synchronr	notor	Synchronmotor	
	Dauerleistung					70 kW	70 kW					
	max. Leistung	80 kW	100 kW	82 kW	82 kW	85 kW	85 kW	115 kW	70 kW	221 kW	100 kW	57 kW
Antrieb	Dauerdrehmoment	1									290 Nm	
	Max. Drehmomen	254 Nm	290 Nm	200 Nm	200 Nm	300 Nm	295 Nm	390 Nm	180 Nm	1800 Nm		
	Drehzahl											
	Vmax		90 km/h	120 km/h	120 km/h	80 oder 120 km/h	120 km/h	80 km/h	100 km/h	112 km/h		100 km/h
	Wirkungsgrad											
	Түр								BYD NCM Battery			
	Batteriechemie											
	Kapazität	40 kWh	35,8 kWh	37,3 kWh	7,3 oder 74,6 kW	55 (oder 41) kWh	35 kWh	82,8 kWh	50,3 kWh	221 kWh	36 kWh	33 kWh
	DoD (SOC-Fenster)							80%				
	Betriebsspannung		384 V				365 V	420 V				
	Ladezeit AC	17 h	5,33 h	5,16 h	5,16 oder 10,33 h	8 (oder 6) h	6 h	7 h	7,6 h	4,5 h	9 h	
Batterie	Ladezeit DC	80 % in 40 bis 60 Min	45 Min (80%)	49 Min (80%)	oder 98 Min (80	30 Min	7.21111	1,5 h (80%)	1,3 h	Zh	5,5 h	
	Ladeleistung AC	6,6 KW				7,2 KW AC	7,2 KW		0,0 KW			
	Ladeleistung DC	50 kW				80 kW			40 kW			
	Austauschbar		Nein			Nein		Nein			BL	
	Vechseidauer							600 ha				
	Gewicht							600 Kg				
	Ruckgewinnung	25.0 http://100.htm	21 E JAM/h /100km	17 JAM/h (100km	18.0 kWh /100km	20	05 24 0 hWh /100					
Verbrauch	Oberland/Stadt	25,9 KW// 100 KM	21,5 KW/I/100km	17 KWN/100km	18,0 KWN/100KM),05 - 24,9 kwn/100	km				
	Autobanni NEC7	275 km	172 km	220 km	208 oder 400 km	150 km	150 - 194 km	100 km	200 km	200 km	160 km	200 km
	Überland/Stadt	273 MII	173 MIT	220 KIII	208 Ouer 400 km	150 Kill	130 - 104 Kill	100 Km	300 MII	200 Km	100 Km	200 km
Reichweite	Autobahn											00 - 120 Km
	Realistisch					150 (oder 115) km						
Getriebe	Übersetzung					200 (0001 220) 1011		Singlespeed				
000000	Typ					MB Sprinter		EUSO Canter				
	Dimension (LxBxH	4560 x 2011 x 1755 mm	01 x 1832 x 1861 m	19 x 1532 x 1259 r	24 x 1627 x 1410	5932 x B x H mm	5140 x B x H mm	00 x 2250 x 2890 r	4460 x 1720 x 1875 mm	34 x 2251 x 2385 r	nm	
	Radstand	2725 mm				3924			2725 mm	4242/6300 mm	I	
Nutzlast	Gesamtgewicht	2.24 t	3.5 - 4.25 t			3.5 t	3.2 t	7.49 t	2.42 t	11.8 t	~3.5 t	3.1 t
	Leergewicht	1,573 - 1,678 t	2,54 t			2,6 t	2,185 t		1,7 t	4,7 t		
	Nutzlast	0,667 t	1,7 t	0,636 t	1,186 oder 0,695	0,9 (oder 1,04) t	1,015 t	3,5 t	0,7 t			1,3 t
	Ladevolumen	4,2 m ³	10,7 m ³	4,2 m ³	6,7 m ³	10,5 m ³	6,0 m ³		3,8 m ²			
Status	Preis	ab 31.000		29.000			44.990 €				69.500€	59.900€
Status	Projektstatus	Serie	Vorserie	Vorserie	Vorserie	Vorserie	Serie	Serie	Serie	Serie	Serie	Serie
		https://www-europe.nissan	https://www.volkswa	https://www.volks	https://www.volks	http://media.daimler.com/mar	https://www.merced	https://www.auto-	https://www.stengg.com/media	https://www.auto-	https://www.mantr	https://www.transport-
		cdn.net/content/dam/Nissa	gen-	wagen-	wagen-	sMediaSite/de/instance/ko/eS	es-	motor-und-	/617304/t3-brochure-stels.pdf	motor-und-	uckandbus.com/de	online.de/Transport-
		n/de/brochures/pkw/e- nv200.evalia.broschuere-	/modelle/e-	de/elektromobilita	de/elektromobilita	Flektrifizierung-der-	/e-vito-papel-	sport.de/fanrberich		o/byd-t3-t6-c1m-	/presse/presseueb ersicht/MAN-eTGE-	News/Fanrzeug- Technik/18099/Serienm
Quellen		preisliste.pdf	crafter.html	et/elektromodelle/	et/elektromodelle/	gewerblichen-Flotte-Ab-2019-	van/technical-data	erster-serien-		yard-tractor-	-emissionsfrei-	odell-Elektrischer-
				abt-e-caddy.html	abt-e-	erweitert-der-eSprinter-das-		elektro-lkw-erster-		europa/	zum-Kunden-	Renault-Master-Z-E-ab-
					transporter.html	Antriebsangebot.xhtml?oid=39		test/			323328.html	59-900-Euro
		24.44.2040	07.06.2017	12.05.2017	40.00.0047	32,920	43.05.3047	07.05.0047	12 02 2010	12.02.201-		
	Stand Recherche	21.11.2018	07.06.2019	13.06.2019	13.06.2019	07.06.2019	13.06.2019	07.06.2019	12.02.2019	12.02.2019	21.11.2018	21.11.2018

Fahrzeug		Goupil G4	Goupil G5	SAIC Maxus EV80	Renault Kangoo Z.E.	Renault Master Z.E.	CITROËN Berlingo Electric L1 (Niveau A)	CITROËN Berlingo Electric L1 (Niveau B)	CITROËN Berlingo Electric L2 (Niveau A)	CITROËN Berlingo Electric L2 (Niveau B)	Peugeot Partner Electric L1
	Motor		Asynchronmotor			F	Permanent Synchronmoto	Permanent Synchronmoto	Permanent Synchronmotor	Permanent Synchronmoto	Permanent Synchronmoto
	Dauerleistung			60 kW	44 kW	57 kW					
	max. Leistung	10 kW	6,8 kW	100 kW			49 kW	49 kW	49 kW	49 kW	49 kW
Antrieb	Dauerdrehmoment										
	Max. Drehmomen	57 Nm		320 Nm	225 Nm		200 Nm	200 Nm	200 Nm	200 Nm	200 Nm
	Drehzahl						1500 (Max. 8000) RPM	1500 (Max. 8000) RPM			
	Vmax				130 km/h	100 km/h	110 km/h	110 km/h	110 km/h	110 km/h	110 km/h
	Wirkungsgrad										
	Тур	LifePo4									
	Batteriechemie	Lit	thium-Eisen-Phosp	hat							
	Kapazität	kWh oder 12 k	11,5 kWh	56 kWh	33 kWh	33 kWh	22,5 kWh	22,5 kWh	22,5 kWh	22,5 kWh	22,5 kWh
	DoD (SOC-Fenster)										
	Betriebsspannung										
	Ladezeit AC		5,5 h		11 h	6 h	8-15 h	8-15 h	8-15 h	8-15 h	8,5 h
Batterie	Ladezeit DC				9 h	1 h (25 km)	30 Min	30 Min	30 Min	30 Min	30 Min
	Ladeleistung AC				3,7 kW		230 V	230 V	230 V	230 V	230 V
	Ladeleistung DC				43 kW		400 V	400 V	400 V	400 V	400 V
	Austauschbar										
	Wechseldauer										
	Gewicht										
	Rückgewinnung										
	Überland/Stadt				15,5 kWh/100 km	16 kWh/100 km	17,7 kWh/100 km	17,7 kWh/100 km	17,7 kWh/100 km	17,7 kWh/100 km	17,7 kWh/100 km
verbrauch	Autobahn										
	NEFZ	5 km oder 135 k	100 km	200 km	270 km	200 km	170 km	170 km	170 km	170 km	170 km
De Leherre In	Überland/Stadt										
Reichweite	Autobahn										
	Realistisch										
Getriebe	Übersetzung	14,87:1									
	Тур			Maxus							
	Dimension (LxBxH)				50	48 x 2070 x 2485 n	80 x 1810 x 1801-1862 m	4628 x 1810 x 1805-1834	4380 x 1810 x 1801-1862	628 x 1810 x 1805-1834 m	m
	Radstand		2100 mm	3850 mm	2697 mm						
Nutzlast	Gesamtgewicht	2,1 t	2,05 t	3,5	2,27 t	3,1 t	2,225 t	2,18 t	2,225 t	2,18 t	2,225 t
	Leergewicht	0,582 t	0,789 t				1,605 t	1,644 t	1,664 t	1,703 t	1,715 t
	Nutzlast	1,2 t	1 t	0,95 t	0,64 t	bis zu 1,377 t	0,695 t	0,636 t	0,611 t	0,552 t	0,51 t
	Ladevolumen				4,6 m ³	9 m ³	3,3 m ³	3,7 m ³	3,3 m ³	3,7 m ³	3,3 m ³
Chatrus	Preis				32.320€	59.900€	26.000 €	27.050 €	27.050 €	27.050 €	27.750 €
Status	Projektstatus	Serie	Serie	Serie	Serie	Serie	Serie	Serie	Serie	Serie	Serie
		http://www2.ise	http://www2.iseki.d	https://ecomento.	https://www.renaul	https://www.autoz	http://citroen-de-	http://citroen-de-	http://citroen-de-	http://citroen-de-	https://professional.peugeo
		ki.de/goupil-g4-	e/goupil-g5-	de/2018/09/04/ik	t.de/modellpalette/r	eitung.de/renault-	de.custhelp.com/euf/assets	de.custhelp.com/euf/assets/i	de.custhelp.com/euf/assets/images/alle	de.custhelp.com/euf/assets/i	t.de/elektroauto-peugeot-
		elektrotransporte	elektrotransporter.h	ea-flottet-erste-	enault-	master-ze-2018-	/images/allemagne/citroen	mages/allemagne/citroen/De	magne/citroen/Deutschland/Berlingo/BE	mages/allemagne/citroen/De	gewerblich/peugeot-partner-
Quellen		r.ntmi	tmi	elektro- transporter-maxus-	ngoo-ze.html	daten-193191.html	KA%20Flectric%20K4_03_0	OFlectric%20K4_03_04.pdf	_KA%20Electric%20K4_03_04.pdf	OFlectric%20K4_03_04.pdf	electric- elektroauto/technische-
quenell				ev80-ein/			4.pdf	(put		hpur	informationen.html
										/	
	Stand Recherche	21.11.2018	21.11.2018	21.11.2018	11.05.2019	13.06.2019	11.05.2019	12.05.2019	12.05.2019	12.05.2019	12.05.2019

		Peugeot Partner Electric				Iveco Daily Eletric 35 S 60	Streetscooter WORK			
Fahrzeug		L2	I SEE e-MOVANO	I SEE e-VIVARO	Saic Maxus EV80	EV 3000 L1H1	EV 3520 L2H2	EV 3520 L2H3	EV 4100	Box
	Motor	ermanent Synchronmoto	manent Synchronme	manent Synchronmo	otor				Permanen	terregte Synchronmaschi
	Dauerleistung									38 kW
	-									
	max. Leistung	49 kW	85 kW	85 kW	60 kW	60 kW	60 kW	60 kW	60 kW	48 kW
Antrieb	Dauerdrehmomen									
	Max. Drehmomen	200 Nm	270 Nm	270 Nm						200 Nm
	Drehzahl	1500 (Max. 8000) RPM								
	Vmax	110 km/h	90 km/h	90 km/h	100 km/h	80 km/h	80 km/h	80 km/h	80 km/h	85 km/h
	Wirkungsgrad									
	Typ									
	Batteriechemie									
	Kapazität	22.5 kWh	55 kWh	55 kWh	56 kWh	28.2 kWh	28.2 kWh	28.2 kWh	28.2 kWh	20 oder 40 kWh
	DoD (SOC-Fenster)	,				,		,		
	Betriebsspannung									
	Ladezeit AC	8.5 h			8 h	4-24 h	4-24 h	4-24 h	4-24 h	
Batterie	Ladezeit DC	31 Min	45 Min	45 Min	2h					
	Ladeleistung AC	230 V								
	Ladeleistung DC	400 V								
	Austauschbar									
	Wechseldauer									
	Gewicht									
	Rückgewinnung									
	Überland/Stadt	17,7 kWh/100 km	23 kWh/100 km	22,5 kWh/100 km	29,2 kWh/100km	35 kWh/100 km	35 kWh/100 km	35 kWh/100 km	35 kWh/100 km	
Verbrauch	Autobahn									
	NEFZ	170 km	170 km		200 km	84 km	84 km	84 km	84 km	101 oder 205 km
	Überland/Stadt									
Reichweite	Autobahn									
	Realistisch									
Getriebe	Übersetzung									
	Тур									
	Dimension (LxBxH	5	548 x 2070 x 2500 m	399 x 1956 x 1971 m	5700 x 1998 x 2345 mm	5038 x 2010 x 2220 mm	5558 x 2010 x 2620 mm	5963 x 2010 x 2780 mm	7128 x 2010 x 2900 mm	4709 x 2087 x 2039 mm
	Radstand									
Nutzlast	Gesamtgewicht	2,18 t	3,5 t	2,9 t		3,5	3,5 - 5,2	3,5	3,5	2,180 t
	Leergewicht	1,72 t	2,46 t	2,227 t						1,46 oder 1,595 t
	Nutzlast	0,46 t	1,04 t	0,793 t	0,950 t	1,316 t	1,277 t	1,225	1,111 t	0,720 oder 0,585 t
	Ladevolumen	3,7 m ³	10,3 m ³	6,0 m ³	10,2 m ³	7,3 m ³	10,8 m ³	13,4 m ³	18,0 m ³	4,3 m ³
Charles	Preis	27.750€	67.990€	61.990 €	48.500 €					
Status	Projektstatus	Serie	Serie	Serie	Serie	Serie	Serie	Serie	Serie	Serie
		https://professional.peugeo	https://www.i-	https://www.i-	https://www.firmenauto.de/	https://www.firmenauto.de/p	https://www.firmenauto.de/p	https://www.firmenauto.de/p	https://www.firmenauto.de/p	https://www.streetscooter.
		t.de/elektroauto-peugeot-	see.plus/isee-files/I-	see.plus/isee-files/I-	preise-daten-fotos-aller-	reise-daten-fotos-aller-elektro-	reise-daten-fotos-aller-elektro-	reise-daten-fotos-aller-elektro-	reise-daten-fotos-aller-elektro-	eu/de/modelle/work/
		gewerblich/peugeot-partner	SEE-e-VIVARO-e-	SEE-e-VIVARO-e-	elektro-transporter-e-	transporter-e-transporter-	transporter-e-transporter-	transporter-e-transporter-	transporter-e-transporter-	
Quellen		elektroauto/technische-	WOVANO.pdi	wovAwo.pu	uebersicht-	10059975.html#fotoshow_ite	10059975.html#fotoshow_ite	10059975.html#fotoshow_ite	10059975.html#fotoshow_ite	
quellen		informationen.html			10059975.html#fotoshow_it	m=0	m=0	m=0	m=0	
					em=0					
	Stand Recherche	12.05.2019	20.05.2019	20.05.2019	13.06.2019	13.06.2019	13.06.2019	13.06.2019	13.06.2019	13.06.2019

		Streets and a WORK I			Auguri (Nama	First Durante				EMOV/UMA E		
Fahrzeug		Box	Streetscooter WORK XI	Avevai Iona	Aveval (Name unbekannt)	Flat Ducato	EMOSS VAN	EMOSS EMS 10	EMOSS EMS 12	Ducato	ORTEN ET 30 V	ORTEN ET 35 M
- ann zeug	Motor	erregte Synchronmaschi	rerregte Synchronmaschi	ne (PMSM)	Synchron	Licenie 2020	LINOSS VAN	211000 21110 20	LINESS LINES IL	LO 160 P ASYN	Synchronmotor	Synchronmotor
	Dauerleistung	39 kW	terregte synemoninusen		30 kW					Eq 1001 / Diff.	Synchroninotor	Synchroninocor
	max. Leistung	48 kW	90 kW	100 kW	60 kW	90 kW	100 oder 190 kW	150 kW	200 kW	60 kW	90 kW	81 kW
Antrieb	Dauerdrehmomen	1										
	Max. Drehmomen	200 Nm		360 Nm		280 Nm	850 Nm	1000 Nm	2100 Nm	180 Nm	560 Nm	1150 nM
	Drehzahl											
	Vmax	85 km/h				100 km/h				105 km/h	130 km/h	80 km/h
	Wirkungsgrad						97%		97%			
	Тур						LiFePo4	LiFePo4	LiFePo4		LiFePo4	LiFePo4
	Batteriechemie			Lithium-Mangan						Li	thium-Eisenphospl	thium-Eisenphosph
	Kapazität	40 kWh	76 kWh	80 kWh		47 kWh oder 79 kW	42 - 84 kWh	60 - 120 kWh	120 - 200 kWh	26 - 76 kWh		38 kWh
	DoD (SOC-Fenster))										
	Betriebsspannung						DC: 400V AC: 750 V	DC: 400V AC: 750 V	C: 400V AC: 750	v		400 V
	Ladezeit AC			2 h			2-4 h	3 h	3-5 h	3-9 h	3 h	3 h
Batterie	Ladezeit DC									1,5 h		
	Ladeleistung AC			22 kW			22 or 44 kW	22 oder 44 kW	22 oder 44 kW			22 kW
	Ladeleistung DC											
	Austauschbar						Nein	Nein	Nein	Nein		Nein
	Wechseldauer											
	Gewicht											
	Rückgewinnung											
Verbrauch	Uberland/Stadt											
	Autobann	4071	2021	2201	2001	201 1 2001	440 4751		450,0001	45, 2201	4001	1001
	NEF2	187 KM	200 km	330 km	300 km	20 km oder 360 kr	110 - 175 KM		150-200 km	45 - 220 km	100 km	100 km
Reichweit	Oberland/Stadt											
	Replictical											
Getriebe	Übersetzung								Singlespeed			
Gettiebe	Typ								Singlespeed		VW Caravelle T5	Mercedes Sprinter
	Dimension (LyByH	5784 x 2087 x 2347 mm	7000 x 2140 x 2850 mm								VVV curuvene 15	merecues sprinter
	Radstand	5701 x 2007 x 2517 1111	7000 x 2110 x 2000 mm									
Nutzlast	Gesamtgewicht	2.6 t	4.05 t	4.25 t	2.65 t		4.25 t	10 t	12 t	3.5 t		4.25 t
	Leergewicht	1.695 t		2.6 t	1.6 t							
	Nutzlast	0,905 t	1,15 t	1,65 t		1,95 t				0,94 t	3 t	1,45 t
	Ladevolumen	8 m ³	20 m ³			10 - 17 m ³						
Status	Preis											
Status	Projektstatus	Serie	Serie	In Planung	In Planung	In Planung	Umbau	Umbau	Umbau	Umbau	Umbau	Umbau '>100 St.
		https://www.streetscooter.	https://www.streetscooter.	https://ecomento.d	https://www.profi-	https://www.firmen	http://www.emoss.nl/de	http://www.emoss.nl/de	http://www.emoss.	http://www.emovu	https://www.electri	https://www.electri
		eu/de/modelle/work-l/	eu/de/modelle/work-xl/	e/2018/11/21/aveva	werkstatt.net/de/ne	auto.de/fiat-ducato-	/electric-vehicles/	/electric-vehicles/	nl/de/electric-	m.com/de/e-	C-	C- truckr do/do/umruo
				transporter-soll-	avevai-stellt-e-van-	transporter-kommt-			venicies/	projekte.ntmi	stung/lkw-7-	stung/lkw-7-
Quellen				2019-nach-	vor-	2020-					5t/orten-e-75-	5t/orten-e-75-
				deutschland-	6767.html?page=1	10844390.html					at.html	at.html
				kommen/								
	Stand Recherche	13.06.2019	13.06.2019	21 11 2018	21 11 2018	04.07.2019	07.06.2019	07.06.2019	07.06.2019	07.06.2019	07.06.2019	07.06.2019

				2	2	EFORCE One (Vorgänger		EFORCE E44 (Vorgänger			
Fahrzeug		ORTEN E 75 AT	ORTEN E 120 LF	VOLTIA 6m ³	VOLTIA 8m ³	EF18)	EFORCE EF18SZM	EF26)	EFORCE EF26	Volkswagen eDelivery	MAN eTGM
	Motor	Synchronmotor	Synchronmotor		2x Hybr	id Synchron Motoren Wasse	Hybridsynchronmotor	Hybridsynchronmotor	Hybridsynchronmotor		
	Dauerleistung					2x93 kW / 252 PS		350 kW / 475 PS			
	max. Leistung	90 kW	81 kW	80 kW	80 kW	2x150 kW / 408 PS	440 - 550 kW	550 kW / 747 PS	440 - 550 kW	260 kW	2650 kW
Antrieb	Dauerdrehmomen					2x195 Nm					
	Max. Drehmomen	1150 Nm	1150 Nm	254 Nm	254 Nm	2x315 Nm		4060 Nm	4050 Nm	2150 Nm	3100 Nm
	Drehzahl					4650 (Max. 13000) RPM	2500 Rpm	2500 RPM	2500 RPM		
	Vmax	80 km/h	80 km/h	123 km/h	123 km/h	87 km/h (elek. begrenzt)	85 km/h (elek. begrenzt)	85 km/h (elek. begrenzt	85 km/h (elek. begrenzt)	80 km/h	
	Wirkungsgrad					97%	91%	>91%	>91%		
	Тур	LiFePo4	LiFePo4			LiFePo4	NMC-C. 800 V	NMC - C	NMC - C		
	Batteriechemie	thium-Eisenphosph	thium-Eisenphosph	nat to the first	401144	Lithium-Eisenphosphat	NMC	NMC	NMC 105 coo Luit	00.470.000	
	Kapazitat	87 kWh	145 kWh	40 kWh	40 kWh	2x120 kWh	105 - 630 kWh	120-310 kWh	105-630 kWh	80-170 kWh	
	DoD (SOC-Fenster)	400.11				400.14	-	00011		20414	
	Betriebsspannung	400 V	71	471	471	400 V	400 V	800 V	01	384 V	
Detterio	Ladezeit AC	4 n	/ n	1/n	1/ n	6 N	8 n	6 N	8 N	45 M (0000)	
batterie	Ladezeit DC	22 144	22 1011	50 % IN 40 bis 60 M	0 % IN 40 bis 60 M	in aa law	10	<2 n	<1 n	45 IVIIN (80%)	
	Ladeleistung AC	22 KVV	22 KVV	0,0 KW	0,0 KW	44 KVV	44 KVV	44 KW	44 KW		
	Ladeleistung DC	Note	Note	50 KW	50 KW	1-	350 KW	150 KW	350 KW	Note	
	Austauschbar	Nein	Nein			Ja		Ja E Minuter		Nein	
	Vvecnseidauer					3 winuten		5 Winuten			
	Bückeewinnung					Über Kunnlungenedel					
	Übeelend/Gende					70.100 JAN/h (100 Jan	80.120 JAM/b /100Jum	80,120 JAM/h (100 Jam	80.120 JAM/h /100lum		200 lum
Verbrauch	Autobahn					100-120 kWh/100km	120-120 kWh/100km	120-120 kWh/100km	120-120 kWh/100km		200 KIII
	NEC7	100 km	120 km	170 220 km	170 220 km	200 km	150-160 KWII/ 100KIII	200 km	150-160 KWII/ 100KIII	200 km	
	Überland/Stadt	100 Kill	120 KIII	170-230 Kill	170-230 Kill	200 km	300 KIII	200 km	200 km	200 KIII	
Reichweite	Autobahn					200 km	400 km	180 km	180 km		
	Pealistisch					200 Mill	400 Kill	100 km	100 km		
Getriebe	Übersetzung					Singlespeed	Singlesneed	2 Gang-Getriebe auto		l Allison-Wandlerautomati	k
Gettiebe	Typ	Mercedes Atego	DAFLE 210 FA	Nissan eNV200	Nissan eNV200	IVECO Stralis	Singlespeed	IVECO Stralis		VW Delivery	×
	Dimension (LxBxH	merecues mego	50	130 x 1760 x 2000 n	80 x 1760 x 2420 r	6700 x 2550 x 3800		TVECO Strails		vii benivery	
	Radstand			2725 mm	2725 mm	4100 - 6700		3800 - 6700			
Nutzlast	Gesamtgewicht	7.5 t	11.99 t	27201111	2720	18 t	18 - 44 t	26 - 40 t	26 - 44 t	13.5 t	26 t
	Leergewicht	.,	,			81		8-9t	8-9t		
	Nutzlast	2.3 t	4.8 t	0.58 t	0.58 t	61					
	Ladevolumen		.,	6 m ³	8 m ³						
	Preis	-		37.500 €	37,500€	~ 250.000 €					
Status	Projektstatus	Umbau >100 St.	Umbau	mbau Nissan eNV2	nbau Nissan eNV2	Vorserie	Vorserie	Vorserie	Vorserie	Vorserie	Vorserie
		https://www.electri	https://www.electri	https://www.voltia.	https://www.voltia.		https://www.kfz-	http://eforce.ch/wp/wp-	https://eforce.ch/products/	https://www.volkswagenag	https://www.truck.man.
		c-	c-	com/de/modelle	com/de/modelle		betrieb.vogel.de/schweizer-	content/uploads/2013/06/	ef26	.com/de/news/stories/201	eu/de/de/man-
		trucks.de/de/umrue	trucks.de/de/umrue				elektro-lkw-ef18szm-fuer-	E44_Fact_Sheet_D.pdf		8/09/e-commercial-	etruck.html
Quallan		stung/Ikw-/-	stung/lkw-7-				kurzstrecken-a-841154/			venicles.html	
Quellen		at.html	at.html								
	Stand Recherche	07.06.2019	07.06.2019	11.05.2019	11.05.2019		03.06.2019	20.11.2017	03.06.2019	09.07.2019	21.11.2018
				-							

Fahrzeug		EMOSS EMS 16	EMOSS EMS 18	Renault Truck D Z.E.	Renault Truck D Wide Z.E.	ORTEN E 180 AX	Volvo FL Electric	Volvo FE Electric	Mercecedes eActros
	Motor					Asynchronmotor			Dreiphasen-Asynchronmoto
	Dauerleistung			130 kW	260 kW		165 kW	260 kW	
					370 kW (Gesamtleistung				
	max. Leistung	200 - 250 kW	250 kW / 340 PS	185 kW	von zwei Motoren)	305 kW	200 kW	370 kW	2x125 kW
Antrieb	Dauerdrehmomen	1							
	Max. Drehmomen	2100 - 3400 Nm	3400 Nm	425 Nm	850 Nm	3500 Nm	425 Nm	850 Nm	2x485 Nm
	Drehzahl								
	Vmax	85 km/h	85 km/h			80 km/h			
	Wirkungsgrad	97%	97%						
	Тур	LiFePo4	LiFePo4			LiFePo4			
	Batteriechemie					Lithium-Eisenphosphat			
	Kapazität	120 - 200 kWh	120 - 240 kWh	200-300 kWh	200 kWh	122 kWh	100 - 300 kWh	200 - 300 kWh	240 kWh
	DoD (SOC-Fenster)								
	Betriebsspannung	DC:400V AC:750 V	DC:400V AC:750 V						
	Ladezeit AC	3-5 h	3-6 h	12 h	12 h	6 h	10 h (Nachtaufladung)		3-11 h
Batterie	Ladezeit DC			1-2 h	1-2 h		1-2 h	weniger als 1 h	
	Ladeleistung AC	22 oder 44 kW	22 oder 44 kW			22 kW	22 kW		20 kW
	Ladeleistung DC						150 kW		150 kW
	Austauschbar	Nein	Nein			Nein	Nein		
	Wechseldauer								
	Gewicht								
	Ruckgewinnung								
Verbrauch	Oberland/Stadt								
	Autobann	100 350 lum	100 250 lum	200 /	200 /	90 lun	200 lum	120, 200 lim	200 lum
	Überland (Stade	100-250 Km	100-250 Km	500 KM	200 KM	OU KITI	500 KM	120 - 200 km	200 Km
Reichweite	Autobaha								
	Realistisch								
Gatriaba	Übersetzung	Singlernood	Singlespeed	2 Cang Gatriaba	2 Gang Gatriaba				
Gettiebe	Typ	Singlespeed	Singlespeed	z dalig-detriebe	z dang-detriebe	Mercedes Avor			MB Actros
	Dimension (LyByH					WICHCOUGS PAKOT			WID ACT US
	Radstand			4400 und 5300 mm	3900 mm		4400 oder 5300 mm	3900	
Nutzlast	Gesamtgewicht	16 t	18 t	16 t	261	18 t	16 t	27 t	18 t
	Leergewicht								
	Nutzlast					7 t			
	Ladevolumen								
	Preis								
Status	Projektstatus	Umbau	Umbau	Vorserie	Vorserie		Vorserie	Vorserie	Vorserie
		http://www.emoss.nl/de/elect	http://www.emoss.nl/de/elect	https://www.renault-	https://www.renault-	https://www.electric-	https://www.volvotrucks.de/d	https://www.volvotrucks.de/d	https://www.daimler.com/dok
		ric-vehicles/full-electric-truck/	ric-vehicles/full-electric-truck/	trucks.de/pressemitteilungen/r	trucks.de/pressemitteilungen/r	trucks.de/de/umruestung/lkw-	e-	e-	umente/investoren/nachrichte
				enault-trucks-prasentiert-die-	enault-trucks-prasentiert-die-	7-5t/orten-e-75-at.html	de/trucks/electromobility/volv	de/trucks/electromobility/volv	n/kapitalmarktmeldungen/dai
Quellen				zweite-generation-von-elektro- lkw-eine.html	zweite-generation-von-elektro- lkw-eine html		o-n-electric.ntml	o-re-elèctric.ntml	mier-mercedes-benz-ir-release- de-20180221-1.ndf
Quellen									and the second second
	Stand Recherche	07.06.2019	07.06.2019	21.11.2018	21.11.2018	07.06.2019	09.07.2019	09.07.2019	21.11.2018

						Nikola Motors / Bosch		DAFCE	DAFIE		
Fahrzeug		Mercedes Urban eTruck	Tesla Semi-Truck	BYD T9	Toyota Project Portal	One One	Nikola Motors Tre	Electric	Electric	Einride T-Pod	Einride T-Log
	Motor	-		PSM	FCELL	FCELL	FCELL				
	Dauerleistung							210 kW / 286 P	195 kW		
Antrieb	max. Leistung	2 x 125 kW / 340 PS	4 x 192 kW	354 kW / 482 PS	492 kW / 670 PS	735 kW / 1000 PS	W / 507 PS - 746 kW / 10	240 kW / 326 P	250 kW		
	Dauerdrehmomen										
	Max. Drehmomen	2 x 500 Nm	4 x 525 Nm	3000 Nm							
	Drehzahl										
	Vmax		104 km/h	90 km/h							
	Wirkungsgrad										
	Тур	Lithium-Ionen		Lithium-Ionen							
	Batteriechemie			Lithium-Eisenphosphat							
	Kapazität	212 kWh		188 kWh	12 kWh	320 kWh		170 kWh	222 kWh	200 kWh	300 kWh
	DoD (SOC-Fenster										
	Betriebsspannung			480 V							
	Ladezeit AC			2,5 h			20 Minuten				
Batterie	Ladezeit DC		30 min (50%)					0,5-1,5 h	% in 70 Minut	ten	
	Ladeleistung AC			80 kW							
	Ladeleistung DC										
	Austauschbar										
	Wechseldauer										
	Gewicht			Automotionh							
	Übedand/Stadt		125 kW//100km	Automatisch							
Verbrauch	Autobahn		123 KW/ 100KIII								
	NEE7	200 km	400 oder 800 km	150 km	320 km	1600 km	500 - 1200 km	100 km	220 km	200 km	190 km
	Überland/Stadt	200 Kill	400 0001 000 km	130 Kill	520 Km	1000 Kill	300 - 1200 km	100 km	220 811	200 Km	150 Kill
Reichweite	Autohahn										
	Realistisch										
Getriebe	Übersetzung										
	Typ										
	Dimension (LxBxH			6135x2500x3640							
	Radstand			4500 mm							
Nutzlast	Gesamtgewicht	26 t	40 t	36 t (54 t)	40 t			37 t	19 t	26 t	
	Leergewicht			12 t							
	Nutzlast										16 t
	Ladevolumen										
Statue	Preis		\$150.000 - \$200.000								
Jtatus	Projektstatus	Vorserie	Vorserie	Serie	Vorserie	In Planung	In Planung	In Planung	In Planung	In Planung	In Planung
		http://media.daimler.com/mars	https://www.auto-motor-und-	http://www.byd.com/usa/wp-	https://www.electrive.net/20	https://www.auto-motor-	https://ecomento.de/2018	https://insideev	https://insideev	https://www.auto-	https://ecomento.
		Mediasite/de/instance/ko/Weltp	sport.de/elektroauto/tesla-	content/uploads/2016/08/T9- final odf	17/04/20/toyota-zeigt-h2-lkw- mit-mirai-technik-videc/	und-sport.de/news/nikola-	/11/06/nikola-motor-stellt-	s.com/daf-iaa-	s.com/daf-iaa-	motor-und-	de/2018/07/13/en
		eTruck-Guetertransport-in-der-	marktstart-des-elekto-lkw/	macpu	mit-milai-technik-video/	ps-1386899.html	europa-vor/	hybrid-trucks/	hybrid-trucks/	momer-elektro-lkw-	autonome-elektro-
Quellen		Cityemissionsfrei-leise-und-							.,,	einride-t-pod-	holzlaster/
		vernetzt.xhtml?oid=13667994								konkurrenz-fuer-	
										tesla/	
	Chand Dasharsha	20.11.2017	08.06.2010	20.11.2017	20.11.2017	20.11.2017	21.11.2019	21.11.2019	21 11 2019	21.11.2019	21.11.2019
	stand Recherche	20.11.2017	08.00.2019	20.11.2017	20.11.2017	20.11.2017	21.11.2010	21.11.2018	21.11.2018	21.11.2018	21.11.2018

			Terberg		
		Hyundai Fuel Cell	Zugmaschine YT202-	Futuricum SEMI	FRAMO
Fahrzeug		Eletric Truck	EV	40E	eTrucks
	Motor	E-Cell			
	Dauerleistung				220 oder 280 kV
	Dudeneistung				220 Ouci 200 kV
	max. Leistung	350 kW	202 kW	500 kW	250 oder 320 kV
Antrieb	Dauerdrehmomen	1			
	Max. Drehmomen	3400 Nm			
	Drehzahl				
	Vmax		40 km/h	86 km/h	87 km/h
	Wirkungsgrad				
	Typ				LiFePo4 / NMC
	Batteriechemie	Lithium	- I-lonen-Magnesium-Pl	hosphat	
	Kapazität		170 kWh	bis 340 kWh	245 kWh
	DoD (SOC-Fenster)				
	Betriebsspannung				750 V
	Ladezeit AC	7 Minuten		15 Stunden	2,45 h
Batterie	Ladezeit DC			2,2 Stunden	
	Ladeleistung AC				100 kW
	Ladeleistung DC				
	Austauschbar				Nein
	Wechseldauer				
	Gewicht			2,27 t	
	Rückgewinnung				Automatisch
Vorbrouch	Überland/Stadt				
verbrauci	Autobahn				
	NEFZ	400 km		380 km	250 km
Polchwolte	Überland/Stadt				
reichweite	Autobahn				
	Realistisch				
Getriebe	Übersetzung				Singlespeed
	Тур				MAN (EURO 6)
	Dimension (LxBxH	5	5705 x 2550 x 3184 mr	n	L x 2240 x H mm
	Radstand				3900 - 5700 mm
Nutzlast	Gesamtgewicht	34 t	41 t	18 - 44 t	18 t
	Leergewicht		10 t	ab 8,2 t	
	Nutzlast		31 t	bis 28 t	8,9 t
	Ladevolumen				
Status	Preis		265.000 €		
otatao	Projektstatus	In Planung		In Planung	Serie
		https://www.eurotransp	https://www.terberg-	https://www.futur	https://www.fra
		ort.de/artikel/laa-	deutschland.de/produk	icum.com/wp-	mo-
		elektrifizierte-lkw-im-	leistungen/fahrzeugmo	actsheet Futuricu	eway.com/de/
Quellen		rampenlicht-	delle.html	m_Sattelzug.pdf	
		10470513.html		- •.	
		24.44.2045	20.05.2046	20.05.2045	07.05.0047
	Stand Recherche	21.11.2018	20.05.2019	20.05.2019	07.06.2019