

Technische Universität München

TUM School of Engineering and Design

**Optimierte Integration vom Hochvolt-Heizgerät
im Elektrofahrzeug**

Matthias Steinsträter, M.Sc.

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigten Dissertation.

Vorsitz:

Prof. Dr. Wolfgang Polifke

Prüfer*innen der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp

2. Prof. Malte Jaensch, Ph.D.

Die Dissertation wurde am 04.10.2022 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die TUM School of Engineering and Design am 16.11.2022 angenommen.

„Weiter, immer weiter“

„Da ist das Ding“
(Oliver Kahn, 2001 in Hamburg)

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik an der Technischen Universität München unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp. Die Finanzierung des zu Grunde liegenden Projekts „Potentialanalyse überlastbarer, elektrischer Hochvoltheizer (HVH) im Elektrofahrzeug“ erfolgte durch die Webasto Thermo & Comfort S.E.

In besonderem Maße bedanke ich mich bei Prof. Markus Lienkamp für die Betreuung meiner Promotion und die wertvollen fachlichen und konzeptionellen Diskussionen, die sehr zur Bearbeitung beigetragen haben. Darüber hinaus bedanke ich mich insbesondere für das Vertrauen, den Rückhalt und die großen Freiheiten am Lehrstuhl. Prof. Malte Jaensch danke ich für das Interesse an meinem Forschungsthema und die Übernahme des Zweitgutachtens. Ich bedanke mich weiterhin bei Prof. Wolfgang Polifke für die Übernahme des Prüfungsvorsitz.

Für den zahlreichen Input und fachlichen Austausch im Rahmen des Forschungsprojekts bedanke ich mich stellvertretend für alle Ansprechpartner der Webasto S.E. bei Katarzyna Jagiello, Tino Jungbauer und Tobias Hentrich. Darüber hinaus gilt mein großer Dank Karsten Reiss für die Unterstützung des Projekts und die Bereitstellung von Ressourcen, die besonders den praktischen Teil dieser Arbeit gefördert haben.

Meinen Kollegen am Lehrstuhl, insbesondere meiner Forschungsgruppe *Elektrische Antriebssysteme*, danke ich für die ausgezeichnete Zusammenarbeit und die wunderbare Zeit, die wir zusammen am Lehrstuhl verbracht haben. Für die zahlreichen fachlichen Diskussionen und den kreativen, interdisziplinären Austausch bedanke ich mich stellvertretend bei Nikolaos Wassiliadis und Leo Wildfeuer. Dem Brauteam, insbesondere Lukas Merkle, Julian Kreibich, Nikolaos Wassiliadis und Ferdinand Schockenhoff, danke ich für den Teamgeist und den humorvollen Austausch. Mein großer Dank gilt Florian Bichl und dem Werkstattteam für die tatkräftige Unterstützung bei vielen experimentellen Versuchen. Weiterhin danke ich den Studentinnen und Studenten, die mit ihrer Kreativität und Tatkraft in zahlreichen Studienarbeiten zu dieser Arbeit beigetragen haben. Ich danke meinen Korrekturlesenden Svenja Kalt, Katharina Minnerup, Lukas Merkle und Julian Kreibich für ihre wertvollen Anregungen und ihr Feedback.

Mein größter Dank gilt meiner Familie. Meinen Eltern danke ich für ihre fortwährende Unterstützung und die Freiheit, die sie mir gewährt haben. Bei meinem Bruder Daniel bedanke ich mich für das Korrekturlesen und das stets offene Ohr. Meiner Partnerin Caro danke ich für die Motivation, wenn es Motivation gebraucht hat, und die Geduld, wenn es Geduld gebraucht hat.

München, im September 2022

Matthias Steinsträter

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abkürzungsverzeichnis	V
Formelzeichen.....	VII
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation und Zielsetzung	1
1.2 Aufbau der Arbeit	2
2 Stand der Wissenschaft und Technik.....	5
2.1 Thermomanagement im Elektrofahrzeug.....	5
2.2 Aufbau des Klimatisierungssystems	6
2.2.1 Fahrzeuginnenraum.....	6
2.2.2 Heizgeräte	8
2.2.3 Wärmepumpe	12
2.2.4 Reichweiteneinbußen bei geringen Temperaturen.....	13
2.3 Rekuperation.....	14
2.3.1 Begrenzung der elektrischen Rekuperation.....	14
2.3.2 Elektrothermische Rekuperation (ETR)	15
2.4 Lastspitzenglättung.....	17
2.4.1 Allgemeine Anwendung	17
2.4.2 Lastspitzenglättung durch das Thermomanagement.....	17
2.5 Batteriealterung durch pulsweitenmodulierte Nebenverbraucher	19
2.5.1 Elektrochemische Grundlagen.....	19
2.5.2 Aktuelle Forschungsergebnisse.....	20
2.5.3 Fazit	21
3 Definition der Themenstellung.....	25
3.1 Kritik am Stand der Technik und Wissenschaft	25
3.2 Abgeleitete Forschungsfragen.....	26
3.3 Gesamtvorgehen	26
4 Potentialanalyse	29

4.1	Datenbasis	29
4.1.1	Fahrzeuge.....	29
4.1.2	Fahrten	30
4.2	Analysemethodik.....	32
4.2.1	Analyse der Heizenergie.....	32
4.2.2	Analyse der Rekuperation	32
4.3	Ergebnisse der Potentialanalyse	36
4.3.1	Einfluss der Innenraumbeheizung	36
4.3.2	Einfluss der Rekuperationslimitierung.....	37
4.4	Anforderungen zur elektrothermischen Rekuperation.....	41
4.5	Vergleich der Heizgeräte.....	43
5	Modellbildung und Validierung	45
5.1	Längsdynamikmodell.....	45
5.1.1	Modellierung	45
5.1.2	Validierung.....	46
5.2	Batteriemodell.....	48
5.2.1	Grundlagen	48
5.2.2	Modellierung	48
5.2.3	Validierung.....	51
5.3	Batteriealterungsmodell	52
5.4	Heizkreislaufmodell.....	54
5.4.1	Grundlagen der Wärmeübertragung.....	54
5.4.2	Modellierung	55
5.4.3	Parametrierung und Validierung	56
5.4.4	Zeitlich-elektrisches Verhalten	59
6	Entwicklung von Betriebsstrategien	61
6.1	Regelbasierte Strategien	61
6.2	Fuzzy-Logik.....	62
6.3	Heizgerät-interne Strategie.....	63
7	Batteriealterungsversuche zur Quantifizierung des PWM Einflusses	65
7.1	Batteriezellen	65
7.2	Versuchsdesign.....	66
7.3	Prüfstand.....	66
7.4	Check-up-Tests.....	67

8	Ergebnisse	69
8.1	Simulierte Szenarien	69
8.1.1	Fahrzyklen und Umgebungsbedingungen	69
8.1.2	Jahreszyklus	70
8.2	Steigerung der Reichweite	71
8.2.1	Analyse des Heizverhaltens.....	72
8.2.2	Vergleich zum Stand der Wissenschaft	74
8.3	Steigerung der Batterielebensdauer.....	75
8.3.1	Analyse der Stressfaktoren.....	75
8.3.2	Lastkollektivanalyse der Batterieströme	76
8.3.3	Auswertung des Kapazitätsverlusts	78
8.3.4	Vergleich zum Stand der Wissenschaft	80
8.4	Einfluss der Pulsweitenmodulation auf die Batteriealterung.....	80
8.4.1	Kapazität und DC-Widerstand	80
8.4.2	Differentielle Spannungsanalyse (DVA).....	82
8.4.3	Elektrochemische Impedanzspektroskopie	85
8.4.4	Vergleich zum Stand der Wissenschaft	86
9	Diskussion und Ausblick.....	89
9.1	Relevanz der Themenstellung.....	89
9.2	Diskussion des Vorgehens.....	89
9.3	Ausblick.....	92
9.4	Resümee	92
10	Zusammenfassung.....	95
	Abbildungsverzeichnis	i
	Tabellenverzeichnis.....	v
	Literaturverzeichnis.....	vii
	Vorveröffentlichungsliste	xxiii
	Anhang	xxvii

Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating current (dt. Wechselstrom)
ASM	Asynchronmaschine
BEV	Battery Electric Vehicle (dt. Batterieelektrisches Fahrzeug)
BMS	Batteriemanagementsystem
CAN	Controller Area Network
CCCV	Constant Current Constant Voltage (dt. Konstantstrom-Konstantspannung)
CFD	Computational Fluid Dynamics (dt. Numerische Strömungsdynamik)
COP	Coefficient of Performance (dt. Leistungszahl)
DAC	Digital-Analog Converter (dt. Digital-Analog Konverter)
DC	Direct current (dt. Gleichstrom)
DOD	Depth of Discharge (dt. Entladetiefe)
DVA	Differential Voltage Analysis (dt. Differentielle Spannungsanalyse)
ECM	Equivalent Circuit Model (dt. Ersatzschaltkreismodell)
ECU	Electronic Control Unit (dt. Elektronisches Steuergerät)
EIS	Elektrochemische Impedanzspektroskopie
EM	Elektrische Maschine
EMS	Energiemanagementsystem
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
ETR	Elektrothermische Rekuperation
FEM	Finite Elemente Methode
FSM	Fremderregte Synchronmaschine
HC	Halfcycles (dt. Halbzyklen)
HESS	Hybrid Electric Storage System (dt. Hybrides Energiespeichersystem)
HiL	Hardware in the Loop
HP	Hochpassfilter
HVAC	Heating, Ventilation, Air Conditioning (dt. Klimatisierungssystem)
HVH	Hochvolt-Heizer
HWT	Heizwärmetauscher
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor (dt. Bipolartransistor)

LAM	Loss of Active Material (dt. Verlust an aktivem Material)
LE	Leistungselektronik
LFP	Lithium-Eisenphosphat
LIN	Local Interconnect Network
LLI	Loss of Lithium Inventory (dt. Verlust an zyklisierbaren Lithium-Ionen)
LMO	Lithium-Manganoxid
LPTN	Lumped Parameter Thermal Network (dt. Thermisches Netzwerk)
LSG	Lastspitzenglättung
MIMO	Multi-Input Multi-Output
NEFZ	Neuer europäischer Fahrzyklus
NMC	Nickel-Mangan-Kobalt
OCV	Open Circuit Voltage (dt. Ruhespannung)
OEM	Original Equipment Manufacturer (dt. Automobilhersteller)
Pkw	Personenkraftwagen
PSM	Permanentmagneterregte Synchronmaschine
PTC	Positive Temperature Coefficient (dt. Kaltleiter)
PWM	Pulsweitenmodulation
RMSE	Root Mean Square Error (dt. Mittlere quadratische Abweichung)
SC	Supercap (dt. Superkondensatoren)
SEI	Solid Electrolyte Interphase (dt. Festkörper-Elektrolyt-Grenzfläche)
SOC	State of Charge (dt. Ladezustand)
SOH	State of Health (dt. Alterungszustand)
SORT	Standardised On-Road Test (dt. Standardisierter Straßentest)
WLTC	Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
A	m^2	Fläche
A_{Fzg}	m^2	Stirnfläche
α	$W/(m^2 K)$	Wärmeübergangskoeffizient
α_{konv}	$W/(m^2 K)$	Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
$a_{x,Fzg}$	m/s^2	Längsbeschleunigung
C	F	Kapazität
c_{Bat}	$kJ/(kg K)$	Spezifische Wärmekapazität der Batterie
C_{DL}	F	Doppelschichtkapazität
c_i	$kJ/(kg K)$	Spezifische Wärmekapazität
COP	–	Leistungszahl
c_p	$kJ/(kg K)$	Spezifische Wärmekapazität der Luft
$c_{p,D}$	$kJ/(kg K)$	Spezifische Wärmekapazität von Wasserdampf
$c_{p,L}$	$kJ/(kg K)$	Spezifische Wärmekapazität trockener Luft
C_{th}	J/K	Wärmekapazität
$c_{w,Fzg}$	-	Luftwiderstandsbeiwert
E_A	kWh	Antriebsenergie
ε	-	Emissionsgrad (Wärmestrahlung)
E_{RP}	kWh	Potentielle Rekuperationsenergie
f_g	Hz	Grenzfrequenz
f_s	Hz	Abtastfrequenz
h	m	Höhe
$h_{L,zu}$	J/kg	Spezifische Enthalpie der Zuluft
$h_{L,Abluft}$	J/kg	Spezifische Enthalpie der Abluft
Δh_V	J/kg	Spezifische Verdampfungsenthalpie von Wasser
HA	%	Heizenergieanteil

Formelzeichen

\dot{H}_{zu}	W	Zuluftenthalpiestrom
\dot{H}_{Abluft}	W	Abluftenthalpiestrom
I_{An}	A	Antriebsstrom
I_{Bat}	A	Batteriestrom
$I_{Bat,Entl}$	A	Batterieentladestrom
$I_{Bat,Lad}$	A	Batterieladestrom
I_{CT}	A	Ladungsdurchtrittsstrom
I_{DL}	A	Strom über der Doppelschicht
I_{Heiz}	A	Heizgerätestrom
I_{zelle}	A	Zellstrom
$k \cdot A$	W/K	Wärmedurchgang der Karosserie
k_{cal}	-	Koeffizient der kalendarischen Alterung
k_{cyc}	-	Koeffizient der zyklischen Alterung
λ	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit
m	kg	Masse
m_{Bat}	kg	Batteriemasse
m_{Fzg}	kg	Fahrzeugmasse
\dot{m}_{KM}	kg/s	Kühlmittelmassenstrom
\dot{m}_L	kg/s	Luftmassenstrom
MRR	%	Gemessene Reichweitenreduktion
P_{An}	W	Antriebsleistung
P_B	W	Beschleunigungswiderstandsleistung
P_{el}	W	Elektrische Leistung
P_{Heiz}	W	Heizleistung
P_L	W	Luftwiderstandsleistung
P_R	W	Rollwiderstandsleistung
PRA	%	Potentieller Rekuperationsanteil
P_{RP}	W	Rekuperationspotential
P_{St}	W	Steigungswiderstandsleistung
\dot{Q}	W	Wärmestrom
Q_A	Ah	Anodenspezifische Speicherfähigkeit
\dot{Q}_α	W	Konvektiver Wärmestrom
Q_B	-	Elektrodenbalancierung

Q_C	Ah	Kathodenspezifische Speicherfähigkeit
Q_{ges}	Ah	Gesamte spezifische Speicherfähigkeit
\dot{Q}_{irr}	W	Irreversibler Verlustwärmestrom der Batterie
$\dot{Q}_{Karosserie}$	W	Konvektiver Verlustwärmestrom durch die Karosserie
\dot{Q}_{konv}	W	Konvektiver Wärmestrom
Q_{loss}	Ah	Kapazitätsverlust
\dot{Q}_{net}	W	Netto-Wärmestrom der Batterie
Q_{net}	Ws	Netto-Wärmeenergie der Batterie
\dot{Q}_{rev}	W	Reversibler Verlustwärmestrom der Batterie
\dot{Q}_{σ}	W	Wärmestrom durch Strahlung der Batterie
\dot{Q}_{WP}	W	Wärmestrom einer Wärmepumpe
R	Ω	Elektrischer Widerstand
RA	%	Rekuperationsanteil
R_{AC}	Ω	Wechselstromwiderstand
RA_{Ref}	%	Referenz-Rekuperationsanteil
R_{CT}	Ω	Ladungsdurchtrittswiderstand
r_{dyn}	m	Dynamischer Reifenradius
ρ_L	kg/m ³	Luftdichte
RN	%	Rekuperationsnutzungsgrad
E_{Reku}	kWh	Rekuperationsenergie
R_s	Ω	Serieller Widerstand
R_{th}	K/W	Thermischer Widerstand
s	m	Strecke
SOC_{start}	%	Ladezustand zu Fahrtbeginn
T	K, °C	Temperatur
t	s	Zeit
τ_{max}	s	Maximale Zeitkonstante
τ_{min}	s	Minimale Zeitkonstante
$T_{Bat,start}$	K, °C	Batterietemperatur zu Fahrtbeginn
T_{Bat}	K, °C	Batterietemperatur
θ_{An}	kg m ²	Antriebsträgheitsmoment
T_{Innen}	K, °C	Innenraumtemperatur

Formelzeichen

$T_{Innen,Soll}$	K, °C	Innenraumsolltemperatur
$T_{Innen,Start}$	K, °C	Innenraumtemperatur zu Fahrtbeginn
T_{KM}	K, °C	Kühlmitteltemperatur
$T_{KM,HWT}$	K, °C	Kühlmitteltemperatur am Austritt des Heizwärmetauschers
t_{Mess}	s	Messdauer
T_{Umg}	K, °C	Umgebungstemperatur
T_{Zelle}	K, °C	Zelltemperatur
T_{zu}	K, °C	Zulufttemperatur
U_{Massen}	J	Innere Energie
U_{Heiz}	V	Heizgerätespannung
URP	%	Ungenutztes Reichweitenpotential
\dot{V}_{KM}	l/h	Kühlmittelvolumenstrom
v_L	m/s	Luftgeschwindigkeit
$v_{x,Fzg}$	m/s	Fahrzeuggeschwindigkeit
x	-	Wassergehalt

1 Einleitung

Zur Begrenzung des weltweiten Temperaturanstiegs auf ein Maximum von 2 °C haben sich 195 Staaten im Pariser Klimaabkommen auf eine Reduktion ihrer CO₂-Emissionen geeinigt [1]. Im Verkehrssektor bieten alternative Antriebe ein hohes Potential, die Emissionen zu senken. Im Pkw-Bereich haben sich in den letzten Jahren batterieelektrische Fahrzeuge (engl. Battery Electric Vehicles – BEV) dank ihres hohen Wirkungsgrads durchgesetzt. Die Emissionen verschieben sich dadurch in den Energieerzeugungssektor. Schon jetzt reduziert ein BEV über eine Laufleistung von 150.000 km im globalen Strommix die CO₂-Emissionen von 34 t CO₂-eq eines Verbrennerfahrzeugs auf 23 t CO₂-eq [2]. Weiteres Potential bietet die Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien.

1.1 Motivation und Zielsetzung

Die Zulassungszahlen von BEV steigen in den letzten Jahren stark an und liegen lokal über denen von Dieselfahrzeugen [3]. Auch das breite Produktportfolio der Automobilhersteller (engl. Original Equipment Manufacturer - OEM) und staatliche Kaufprämien tragen zum Erfolg der Elektromobilität bei. Dennoch bleibt neben den hohen Kosten vor allem die geringe Reichweite im Vergleich zu Verbrennerfahrzeugen ein kundenrelevanter Nachteil [4, 5]. Abbildung 1.1 zeigt, dass sich die Reichweite insbesondere bei geringen Temperaturen deutlich reduziert [6–8]. Zusätzlich wird die Reichweite durch die Batteriealterung um bis zu 30 % bezogen auf die Nennkapazität gesenkt [9, 10].

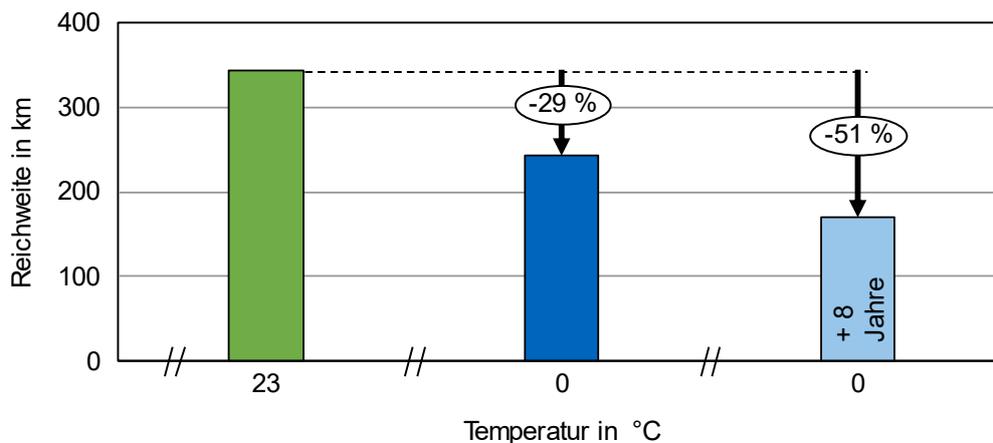


Abbildung 1.1: Reichweitenverlust durch geringe Temperatur und durch Batteriealterung. Berechnungsgrundlage: Tesla Model 3 SR mit sich wiederholender Fahrt von 20,1 km nach [8]. Batteriegarantie nach [10].

Die Reduktion der Reichweite bei geringen Umgebungstemperaturen entsteht wesentlich durch die drei folgenden Ursachen:

- Erhöhter Leistungsbedarf der Innenraum- und Batteriebeheizung
- Reduzierter Wirkungsgrad der Batterie
- Reduzierte Rekuperationsenergie infolge der begrenzten Batterieladefähigkeit

Durch die Begrenzung der Rekuperation wird die Verzögerungsenergie von den Reibbremsen abgebaut und geht durch Konvektion verloren. Die direkte Nutzung der Rekuperationsenergie als Heizenergie und die Zwischenspeicherung im Kühlmittelkreislauf kann die Reichweitenreduktion bei geringen Temperaturen reduzieren. Diese technische Umsetzung wird als elektrothermische Rekuperation (ETR) bezeichnet [11]. Durch die adaptiv an die Traktionsleistung angepasste Steuerung des Heizgeräts kann zudem die Batteriebelastung und damit deren Alterung reduziert werden.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung von Betriebsstrategien für Hochvoltheizgeräte, um die Reichweiteneinschränkung bei geringen Temperaturen zu minimieren und die Batterielebensdauer zu steigern. Das Ziel ist folglich nicht, die Reichweite von Elektrofahrzeugen unter Idealbedingungen zu erhöhen. Vorausgesetzt wird der Einsatz von Serienheizgeräten und auf Steuergeräten umsetzbaren Regelalgorithmen, um realistische und belastbare Ergebnisse zu erzeugen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in 10 Kapitel. Auf diesen Abschnitt folgend, werden im Stand der Wissenschaft die Reichweitenreduktionen durch die Fahrzeug-Klimatisierung und die beschränkte Ladefähigkeit beschrieben. Untersuchungen zur ETR stellen das Potential der Technologie vor und werden durch Ansätze der Lastspitzenglättung ergänzt. Bisherige Forschungsergebnisse zur Batteriealterung durch hochfrequente Lasten werden dargelegt. Aufbauend werden im dritten Kapitel Forschungslücken identifiziert und daraus Forschungsfragen abgeleitet. Das Gesamtverfahren verdeutlicht den kapitelübergreifenden Handlungsstrang und dessen Motivation.

Eine Potentialanalyse in Kapitel 4 dient der isolierten Quantifizierung der Klimatisierung und der Begrenzung der Ladefähigkeit auf die Reichweite. Aus Fahrdaten werden zusätzlich Anforderungen der ETR an das Heizsystem abgeleitet. Ein Vergleich der Anforderungen mit Serienheizgeräten grenzt den Lösungsraum ein.

In Kapitel 5 wird das umfangreiche Modell, bestehend aus Längsdynamik-, Batterie- mit Alterungs- und Heizkreislaufmodell, als Basis dieser Arbeit vorgestellt. Die Validierung orientiert sich abschnittsweise an den Teilmodellen. Zur Steigerung der Reichweite und der Batterielebensdauer werden in Kapitel 6 Strategien vorgestellt. Diese beinhalten zwei regelbasierte Heuristiken, eine Fuzzy-Logik sowie eine Heizgeräte-interne Strategie. Zur Beurteilung des Alterungseinflusses von Heizgeräten auf die Batterie werden Zellversuche durchgeführt und in Kapitel 7 vorgestellt.

Die Ergebnisse bilden das Kapitel 8, in dem zu Beginn die simulierten Szenarien vorgestellt werden. Die Steigerungen der Reichweite und der Batterielebensdauer werden getrennt beurteilt. Des Weiteren wird der Einfluss der Leistungssteuerung des Heizers durch

Pulsweitenmodulation auf die Batteriealterung dargelegt. In Kapitel 9 werden die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Relevanz und des Vorgehens diskutiert und daraus ein Ausblick auf offene Fragestellungen abgeleitet. Kapitel 10 fasst diese Arbeit mit Antworten auf die Forschungsfragen zusammen.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Dieses Kapitel bildet die Grundlage für die weitere Arbeit, indem das Thermomanagement und insbesondere das Klimatisierungssystem von Elektrofahrzeugen grundlegend beschrieben werden. Die Reichweitenverluste durch die Leistungsanforderung der Heizung und durch die begrenzte Rekuperationsfähigkeit werden verdeutlicht. Aufbauend werden die Forschungsstände bezüglich der elektrothermischen Rekuperation (ETR) und der Lastspitzenglättung des elektrischen Bordnetzes vorgestellt. Abschließend werden Studien zur Batteriealterung durch hochfrequente Lasten präsentiert.

2.1 Thermomanagement im Elektrofahrzeug

Die Aufgabe des Thermomanagement im BEV liegt grundsätzlich in der Temperierung der drei Antriebskomponenten, Batterie, Leistungselektronik und Elektromaschine, sowie des Fahrzeuginnenraums. Die Komplexität ergibt sich u. a. aus den unterschiedlichen Soll-Temperaturbereichen dieser vier Wärmesenken bzw. -quellen.

Dieser Temperaturbereich beträgt für die Batterie zwischen 20 °C und 40 °C [12, S. 291] und sollte im Antriebs- als auch im Lademodus eingehalten werden. Im Stillstand bzw. während der Lagerung sollten 60 °C nicht überschritten werden. Oberhalb dieser Grenzen beschleunigen sich Alterungsprozesse der Batterie signifikant [13]. Eine weitere Steigerung über 100 °C stellt indes ein Sicherheitsrisiko dar, weil ein thermisches Durchgehen (engl. Thermal Runaway) und Explodieren der Batterie auftreten kann [14, S. 91]. Unterhalb von 0 °C steigt der Innenwiderstand der Batterie deutlich an, was zu einer Reduktion der Leistung auf bis zu 70 % führen kann [15, S. 166]. Die Spannungsabfälle durch den Innenwiderstand der Batterie bewirken ebenso eine Verringerung des Wirkungsgrades um bis zu 8 % [16, S. 55, 17, S. 14, 18]. Die Herausforderung an das Thermomanagement seitens der Batterie ist weniger die Bereitstellung des Wärmestroms zum Heizen oder Kühlen als vielmehr das Einhalten des engen Temperaturbereichs und die homogene Temperaturverteilung [19, S. 5]. Neben Luftkühlungen werden vor allem Kühl- und Kältemittelkreisläufe eingesetzt [13], deren Temperatur zwischen 25 °C und 35 °C liegt [20].

Die Leistungselektronik (LE) kann zwischen -40 °C und 150 °C betrieben werden [17, S. 14]. Die empfindlichen Halbleiterbauelemente definieren die obere Temperaturgrenze. Durch unterschiedliche, stoffschlüssig verbundene Materialien mit individuellen Ausdehnungskoeffizienten treten zusätzlich mechanische Spannungen auf, die zu Materialermüdungen oder -beschädigungen führen können. Daher sollten hohe Temperaturgradienten vermieden werden.

Der Betriebsbereich der elektrischen Maschine (EM) ist nach unten durch die Eigenschaften der Lagerschmierung und des Kühlmittels begrenzt. Bei negativen und hohen Temperaturen sinkt der Wirkungsgrad [11, S. 46] erheblich; mit Schäden ist jedoch nicht zu rechnen. Nach oben

hängt das Temperaturlimit vom Maschinentyp ab. Während bei permanentmagneterregten Synchronmaschinen (PSM) über 140 °C eine Entmagnetisierung der Permanentmagnete auftreten kann, können Asynchronmaschinen (ASM) und fremderregte Synchronmaschinen (FSM) mit bis zu 180 °C betrieben werden [17, S. 14]. Aufgrund ihrer ähnlichen Temperaturbereiche werden LE und EM meist durch denselben Kühlmittelkreislauf gekühlt. Das Kühlmittel mit einer Vorlauf-temperatur von ca. 60 °C durchströmt dabei zunächst die LE, weil diese dank ihres hohen Wirkungsgrads weniger Wärme emittiert als die EM und die für den Wärmestrom relevante Temperaturdifferenz somit höher liegt [21].

2.2 Aufbau des Klimatisierungssystems

Durch den hohen Wirkungsgrad des Antriebsstrangs beim BEV reicht die Energie und das Temperaturniveau der Komponentenabwärme nicht aus, um den Innenraum zu erwärmen. Neben dem Insassenkomfort ist die Beheizung vor allem eine sicherheitskritische Aufgabe, um bspw. eine Sichtbeeinträchtigung durch gefrorenes Kondensat auf den Scheiben zu verhindern und die Konzentration des Fahrers sicherzustellen. Gesetzlich ist das Enteisen von 80 % der Windschutzscheibe innerhalb von 20 min vorgeschrieben. Zusätzlich ist ab einem Ausgangszustand von -20 °C innerhalb von 30 min eine Innenraumtemperatur von 10 °C zu erreichen [22]. Folgend werden die Heizkreislaufkomponenten erläutert. Teile dieses Abschnitts wurden in [23] veröffentlicht.

2.2.1 Fahrzeuginnenraum

Die Anforderungen der Heizleistung ergeben sich im Wesentlichen aus der Energiebilanz des Fahrzeuginnenraums. Grundsätzlich kann diese Bilanz in den stationären und den transienten Heizfall unterschieden werden. Liegt die Innenraumtemperatur über der Außentemperatur, treten Verluste durch den Karosseriedurchgang $\dot{Q}_{\text{Karosserie}}$ und durch die Entlüftung \dot{H}_{Abluft} auf. Zur Kompensation ist ein Zuluftenthalpiestrom \dot{H}_{Zu} erforderlich. Für den transienten Aufheizvorgang muss zusätzlich der Energieeintrag zur Aufheizung der thermischen Massen $\frac{d}{dt} U_{\text{Massen}}$ berücksichtigt werden. Die Energiebilanz, dargestellt in Abbildung 2.1, ergibt sich unter Vernachlässigung der Wärmeeinflüsse des Antriebs, der Insassen und der Sonneneinstrahlung zu Gleichung (2.1) [24, S. 517].

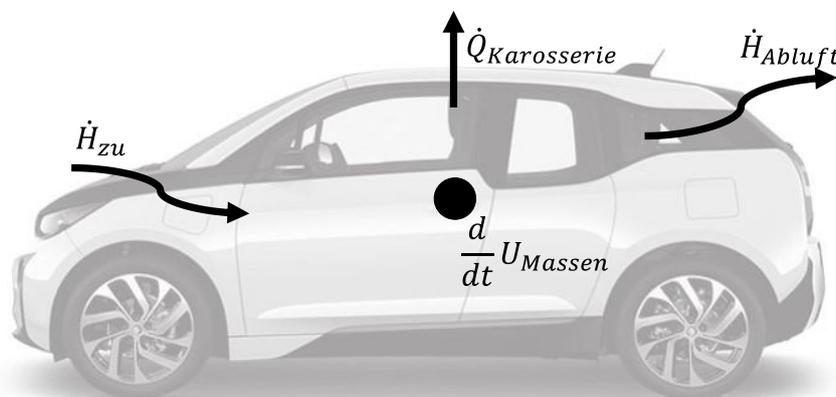


Abbildung 2.1: Verlustwärmeströme des Fahrzeuginnenraums nach [25]

$$\dot{H}_{zu} = \dot{H}_{Abluft} + \dot{Q}_{Karosserie} + \frac{d}{dt} U_{Massen} \quad (2.1)$$

Der Zuluftenthalpiestrom \dot{H}_{zu} bestimmt sich aus dem eingebrachten Luftmassenstrom des Gebläses \dot{m}_L und der spezifischen Enthalpie der Zuluft $h_{L,zu}$ (Gleichung (2.2)).

$$\dot{H}_{zu} = \dot{m}_L \cdot h_{L,zu} \quad (2.2)$$

Die spezifische Enthalpie von ungesättigter feuchter Luft h_L wird mit Hilfe der spezifischen Wärmekapazität trockener Luft c_{pL} , der spezifischen Wärmekapazität von Wasserdampf c_{pD} , der Lufttemperatur T_{zu} , des Wassergehalts x und der spezifischen Verdampfungsenthalpie von Wasser Δh_V berechnet (Gleichung (2.3)). Letztere kann näherungsweise als temperaturunabhängig angenommen werden [26, S. 136].

$$h_{L,zu} = c_{pL} \cdot T_{zu} + x \cdot (c_{pD} \cdot T_{zu} + \Delta h_V) \quad (2.3)$$

Ein Überdruck im Fahrzeuginnenraum ist zu vermeiden, um den Passagierkomfort zu gewährleisten und das Schließen der Türen zu ermöglichen. Daher werden seitlich Entlüftungsgitter in die Kofferraumkarosserie montiert, durch die der Abluftenthalpiestrom \dot{H}_{Abluft} entweicht. Entsprechend beeinflussen der Luftmassenstrom \dot{m}_L und die spezifische Enthalpie der Luft $h_{L,Abluft}$ den Abluftenthalpiestrom \dot{H}_{Abluft} (Gleichung (2.4)). Analog zu Gleichung (2.3) berechnet sich die spezifische Enthalpie der Abluft $h_{L,Abluft}$ bei einer angenommenen vollständigen Durchmischung der Luft im Fahrzeuginnenraum mit Hilfe der Innenraumtemperatur T_{Innen} (Gleichung (2.5)).

$$\dot{H}_{Abluft} = \dot{m}_L \cdot h_{L,Abluft} \quad (2.4)$$

$$h_{L,Abluft} = c_{pL} \cdot T_{Innen} + x \cdot (c_{pD} \cdot T_{Innen} + \Delta h_V) \quad (2.5)$$

Die Verlustwärme durch die Karosserie $\dot{Q}_{Karosserie}$ wird aus dem spezifischen Wärmedurchgangskoeffizienten k , der Oberfläche A und der Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Umgebungsluft $T_{Innen} - T_{Umg}$ berechnet (Gleichung (2.6)). Dabei wird das Produkt $k \cdot A$ oft gemeinsam empirisch bestimmt.

$$\dot{Q}_{Karosserie} = k \cdot A \cdot (T_{Innen} - T_{Umg}) \quad (2.6)$$

Für den Wärmedurchgangskoeffizienten der Karosserie k wurde von Nitz und Hucho [27] in Windkanalversuchen ein empirischer Zusammenhang mit der Fahrzeuggeschwindigkeit v_{Fzg} und der Strömungsgeschwindigkeit des Heizwärmetauschers v_L hergestellt.

$$k \cdot A = (0,025 v_{x,Fzg}^{0,7} + 0,156 v_L^{0,5} + 0,607) A \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (2.7)$$

Bei transienten Aufheizvorgängen werden neben der Innenraumluft auch die Bauteile, im Wesentlichen die Sitze und die Instrumententafel, erwärmt. Diese werden als thermische Massen mit der inneren Energie U_{Massen} zusammengefasst und ergeben sich als Produkt aus den individuellen Massen m_i und der spezifischen Wärmekapazität c_i (Gleichung (2.8)).

$$\frac{d}{dt} U_{Massen} = \sum m_i \cdot c_i \cdot \frac{dT_i}{dt} \quad (2.8)$$

Der Wärmeübergang zwischen der Innenraumlufte und den Einzelbauteilen entsteht durch freie und durch den Luftmassenstrom erzwungene Konvektion \dot{Q}_{konv} . Die individuelle Bauteiltemperatur T_i folgt verzögert der Innenraumtemperatur T_{Innen} und lässt sich unter Vernachlässigung der Wärmestrahlung und basierend auf der Bauteiltemperatur zu Beginn des Heizvorgangs $T_{i,Start}$ wie folgt bestimmen.

$$T_i = \frac{1}{m_i \cdot c_i} \int \dot{Q}_{konv} dt + T_{i,Start} \quad (2.9)$$

Der konvektive Wärmestrom \dot{Q}_{konv} lässt sich aus den Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_{konv,i}$ den Wärmeübertragungsflächen A_i und der Temperaturdifferenz zwischen Innenraumlufte T_{Innen} und Bauteiloberfläche T_i berechnen.

$$\dot{Q}_{konv} = \alpha_{konv,i} \cdot A_i \cdot (T_{Innen} - T_i) \quad (2.10)$$

Die detaillierte Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_{konv,i}$ mit Hilfe der Nußeltzahl wird in Baumgart [26, S. 128] beschrieben. Alternativ zur Berechnung der Bauteiltemperaturen der thermischen Massen kann empirisch der zeitliche Versatz zwischen Innenraum- und Bauteiltemperatur ermittelt oder abgeschätzt werden.

Um die Innenraumtemperatur T_{Innen} zu bestimmen, werden der Zuluftenthalpiestrom \dot{H}_{zu} , der Abluftenthalpiestrom \dot{H}_{Abluft} , der Wärmestrom durch die Karosserie $\dot{Q}_{Karosserie}$ und die Summe der thermischen Massen der Bauteile $\sum m_i \cdot c_i$ in die Energiebilanz (2.1) eingesetzt. Die resultierende Differentialgleichung kann mit einem geschlossenen oder iterativen Verfahren gelöst werden. Eine iterative Lösung mit einer Ausgangstemperatur $T_{i,Start}$ kann mit Gleichung (2.11) erhalten werden.

$$T_{Innen} = T_{Innen,Start} + \int \frac{\dot{H}_{zu} - (\dot{H}_{Abluft} + \dot{Q}_{Karosserie})}{\sum m_i \cdot c_i} dt \quad (2.11)$$

2.2.2 Heizgeräte

Der Zuluftwärmestrom \dot{Q}_{zu} wird über die Defrost-, Personen- und Fußausströmer in den Fahrzeuginnenraum geleitet. Zuvor wird die Luft im Klimatisierungssystem (engl. Heating, Ventilation, Air Conditioning – HVAC) gekühlt oder erwärmt, zusätzlich ggf. entfeuchtet und gemischt. Der schematische Aufbau des HVAC Systems mit einem Kühlmittelheizgerät ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

Aufgrund des inhaltlichen Fokus dieser Arbeit werden folgend die Technologien zur elektrischen Beheizung des Innenraums detailliert beschrieben. Aufgrund ihrer hohen Leistung von bis zu 10 kW [28] werden die Heizgeräte an das Hochvoltsystem angeschlossen. Grundsätzlich werden die Heizgeräte in Widerstandsheizgeräten und Wärmepumpen unterschieden. Widerstandsheizgeräten werden zusätzlich in Luft- und Kühlmittelheizgeräten eingeteilt. Verfügt das Fahrzeug statt des Kühlmittelheizgeräts über einen Luftheizgeräten, befindet sich dieser in Abbildung 2.2 an der Stelle des Wärmetauschers und ist nur elektrisch angeschlossen. Luftheizgeräten bieten eine schnellere und effizientere Erwärmung des Innenraums, weil keine thermischen Trägheiten des Kühlmittelkreislaufs und nahezu keine konvektiven Verluste auftreten. Von Nachteil gegenüber Kühlmittelheizgeräten sind die hohen auftretenden Temperaturen, die hitzebeständige Materialien an den Anbindepunkten voraussetzen und die Einbringung von Hochvolttechnik in den

Innenraum des Fahrzeugs. Letzteres kann in Unfallsituationen zu gefährdenden Kontakten zu den Insassen führen [29, S. 17, 30].

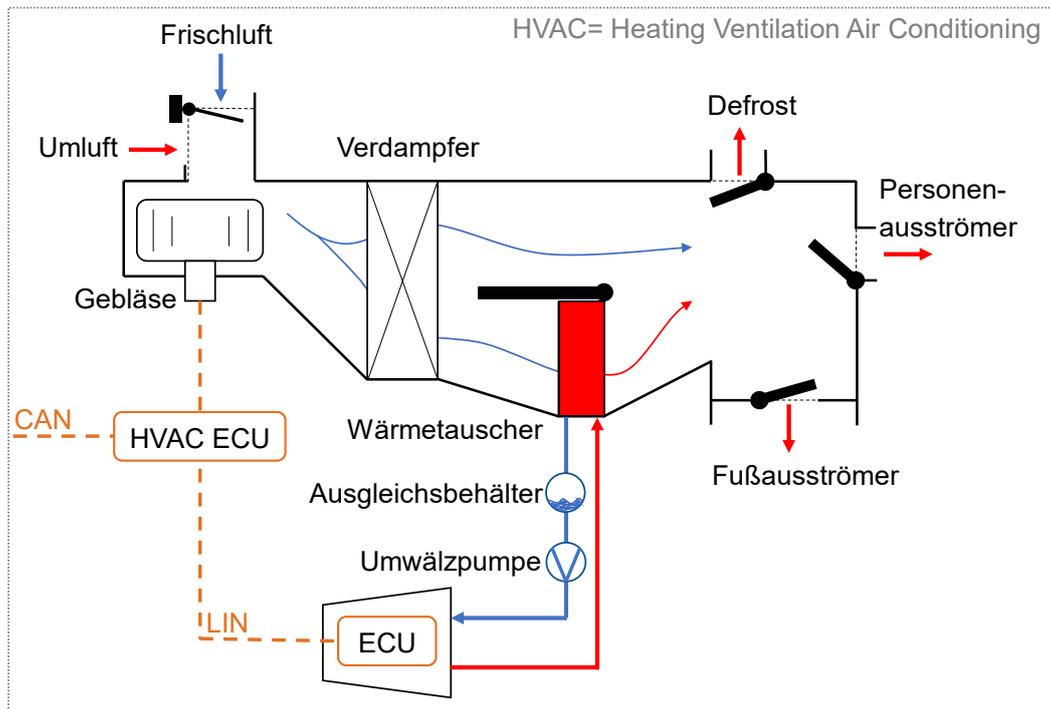


Abbildung 2.2: HVAC System (ohne Klimaanlage) im Heizmodus. Auf eine detaillierte Darstellung der Klimaanlage wurde aufgrund des Fokus dieser Arbeit auf die Heizung verzichtet.

Der wirtschaftliche Vorteil des fehlenden Kühlmittelkreislaufs wird durch die kostenintensiveren Materialien des Luftheizers und den hohen Gleichteileanteil beim Kühlmittelheizkörper kompensiert [24, S. 285]. Während Luftheizer überwiegend auf dem physikalischen Kaltleiterprinzip (engl. Positive Temperature Coefficient – PTC) beruhen, kommen bei Kühlmittelheizern verschiedene Technologien zum Einsatz. Diese werden folgend vorgestellt.

PTC – Heizer

PTC-Elemente, die in Heizgeräten auch als PTC-Steine bezeichnet werden, besitzen bei geringen Temperaturen einen geringen Widerstand und ermöglichen damit einen hohen Stromfluss. Mit steigender Temperatur steigt auch der Widerstand des PTC-Elements an und limitiert den fließenden Strom. Dieser Schutzmechanismus wird als Selbstregelreflex oder intrinsische Sicherheit bezeichnet [31, S. 174]. PTC-Elemente werden aus einer Bariumtitanat-Keramik (BaTiO_3) hergestellt und durch Dotieren mit dem Schwermetall Blei (Pb) in ihrer Temperaturabhängigkeit beeinflusst [31, S. 173]. Die hohen Kosten der PTC-Elemente wirken sich auch nachteilig auf den Gesamtgerätepreis aus [24, S. 290].

Bei PTC-Kühlmittelheizern werden die PTC-Elemente gemeinsam mit einer elektrischen Kontaktschicht, einer Isolierschicht und einer Schutzschicht in die Heizrippen des Aluminium-Wärmeübertragers eingepresst [32]. Ein Aluminiumkeil sorgt für einen optimalen Wärmeübergang zum Wärmeübertrager. Das Kühlmittel durchfließt serpentinförmig das Heizgerät, um eine möglichst große Fläche zur Wärmeübertragung zu generieren [24, S. 289]. Die vergleichsweise hohe Anzahl und Dicke der Materialschichten (Abbildung 2.3) zwischen den PTC-Elementen und dem Wärmeübertrager erzeugt einen hohen Wärmewiderstand, der durch die hohe Temperatur von bis zu 180 °C der PTC-Elemente überwunden werden muss [24, S. 288].

Die Leistungssteuerung von PTC-Heizern erfolgt entweder in Stufen durch das Ansteuern einzelner PTC-Elemente oder stufenlos durch eine Pulsweitenmodulation (PWM) [24, S. 292].

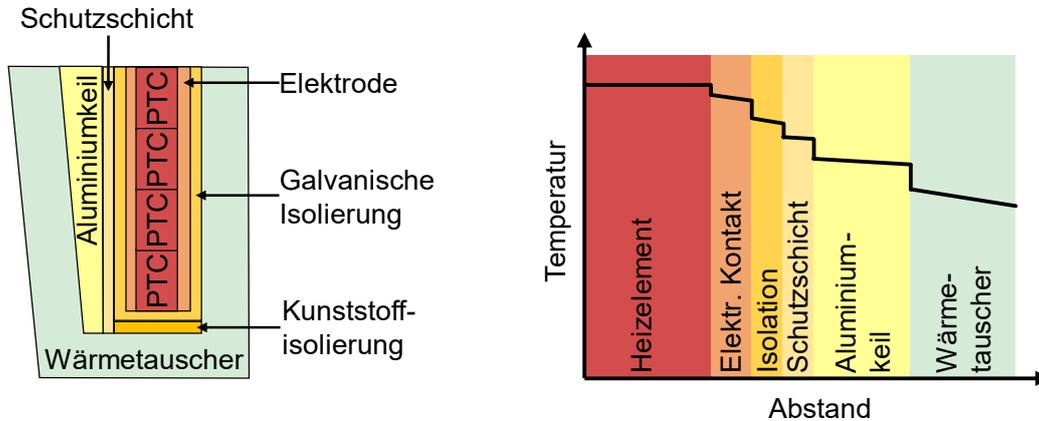


Abbildung 2.3: Prinzipieller Aufbau eines PTC Hochvoltheizgeräts. Links: Schematischer Aufbau. Rechts: Temperaturverlauf über die unterschiedlichen Schichten. Nach [33, S. 15, 34]

Drahtheizer

Bei Kühlmittel-Drahtheizern wird die Wärmeenergie durch einen spiralförmig gewickelten Draht auf Kupferbasis erzeugt. Der elektrische Widerstand ist über die Temperatur nahezu konstant und erfordert eine Schutzabschaltung im Fehlerfall [35]. Zum Kurzschlusschutz wird der Drahtwickel von einer keramischen Isolationsschicht und einem Gehäuse umgeben (Abbildung 2.4), was zu einem negativen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit führt. Das Kühlmittel umfließt die sogenannten Heizwendel geradlinig und erfährt dadurch einen vergleichsweise geringen Druckverlust. Ähnlich zu PTC-Heizern, werden zur Leistungssteuerung auch bei Drahtheizern Heizwendel unabhängig voneinander aktiviert. Drahtheizer sind wirtschaftlich mit PTC-Heizern vergleichbar. Die günstigeren Materialien werden durch den aufwändigeren Fertigungsprozess kompensiert [24, S. 290].

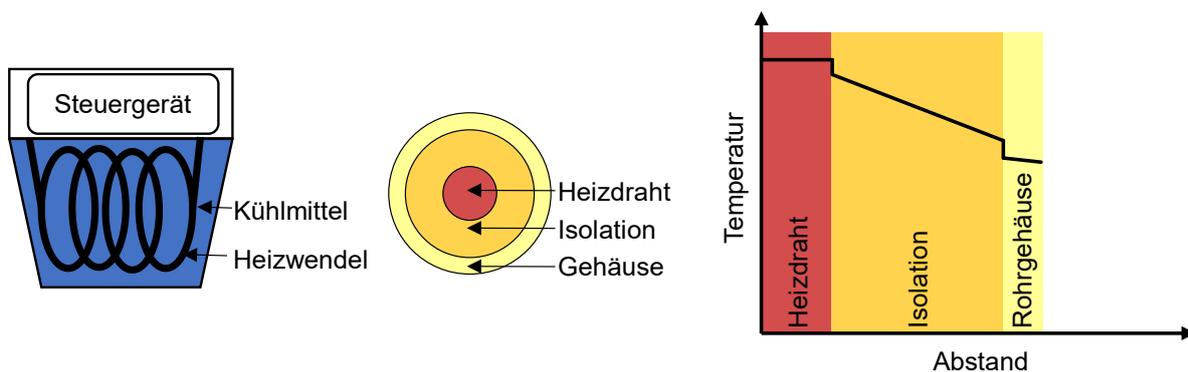


Abbildung 2.4: Prinzipieller Aufbau eines Drahtheizgeräts. Links: Schematischer Aufbau. Mitte: Querschnitt des Heizwendels. Rechts: Temperaturverlauf über die unterschiedlichen Schichten. Nach [24, S. 290, 33, S. 14]

Schichtheizer

In der Herstellung von Schichtheizern werden dünne Schichten (< 1 mm) aus verschiedenen Materialien per Spritzverfahren stoffschlüssig auf einen Wärmeübertrager aus Aluminium

aufgebracht [34]. Die Schichten unterteilen sich in die Heizschicht, eine Isolationsschicht und eine Sensorschicht (Abbildung 2.5). In die Heizschicht werden nach dem Auftragen die Leiterbahnen mit einem Laser eingeschnitten. Das Kühlmittel durchströmt mäandierend den Wärmeübertrager. Die geringen Schichtdicken im Vergleich zum PTC- und Drahtheizer garantieren eine bessere Wärmeleitfähigkeit, sind aber empfindlich gegen Vibrationen, was eine gefederte Anbringung erfordert [24, S. 291]. Der Widerstand verhält sich analog zum Drahtheizer nahezu temperaturkonstant und erfordert wiederum eine Sicherheitsabschaltung bei Überhitzung, die beispielsweise über eine redundante Leistungssteuerung per PWM realisiert werden kann. Die hohen Kosten der Halbleiterelemente des Steuergeräts spiegeln sich im höheren Gesamtpreis im Vergleich zum PTC-Heizer wider.

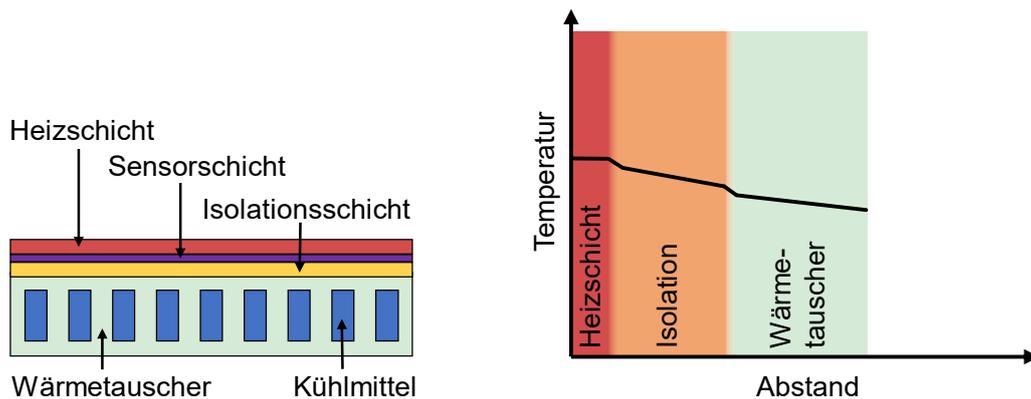


Abbildung 2.5: Aufbau des Webasto Hochvoltschichtheizgeräts. Links: Schematischer Aufbau. Rechts: Temperaturverlauf über die unterschiedlichen Materialschichten. Nach [28, 33, S. 15, 34]

Hainzmaier et al. [34, 36] führen Benchmarkversuche mit einem Schicht-Hochvoltheizer (HVH) von Webasto [28] und einem PTC-Heizgerät von Eberspächer/Catem [37] durch. Abbildung 2.6 zeigt die Leistungsaufnahme nach dem Einschaltvorgang. Beim HVH ist eine schnellere und präzisere Regelung auf die Nennleistung von 5 kW zu beobachten, während die einzelne Aktivierung der PTC-Elemente zu Stromspitzen führt. Ebenfalls ist die fortlaufende Leistungsreduktion des PTC-Heizgeräts zu erkennen, während der HVH die Nennleistung hält. Darüber hinaus beobachteten Hainzmaier et al. [34] aufgrund der geringeren thermischen Masse des HVH ein schnelleres Erreichen der Kühlmittel-Solltemperatur.

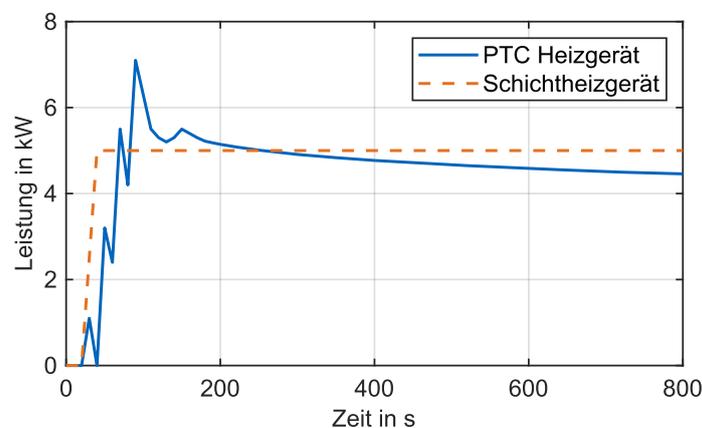


Abbildung 2.6: Vergleich des zeitlichen Verlaufs der elektrischen Leistung eines Schicht- und eines PTC-Heizers bei einem Einschaltvorgang nach [34]

2.2.3 Wärmepumpe

Wärmepumpen nutzen die Wärme der Außenluft oder die Abwärme der Antriebskomponenten zur Beheizung des Innenraums. Ihre Leistungszahl (engl. Coefficient of Performance – COP) wird nach Gleichung (2.12) berechnet und kann größer als eins sein, sprich der abgegebene Wärmestrom \dot{Q}_{WP} ist größer als die eingesetzte elektrische Energie P_{el} [38]. Im Bestpunkt kann der COP bis zu 3 betragen [39, S. 44, 40]. Damit können Wärmepumpen den Gesamtenergieverbrauch während einer Fahrt bei geringen Außentemperaturen um bis zu 30 % im Vergleich zu Widerstandsheizern reduzieren [41, 42].

$$COP = \frac{\dot{Q}_{WP}}{P_{el}} \quad (2.12)$$

Wärmepumpen werden entsprechend der zuerst genannten Wärmequelle und der folgenden Wärmesenke eingeteilt in [29, S. 25]:

- Luft / Luft-Wärmepumpen
- Luft / Kühlmittel-Wärmepumpen
- Kühlmittel / Kühlmittel-Wärmepumpen
- Luft + Kühlmittel / Luft-Wärmepumpen

Abbildung 2.7 stellt den schematischen Aufbau einer Luft / Kühlmittel-Wärmepumpe dar. Grundsätzlich entsprechen die Komponenten denen einer Klimaanlage, weshalb das System zum Heizen und Kühlen genutzt werden kann [29, S. 32]. Die Funktionsweise folgt dem Carnotschen Kreisprozess.

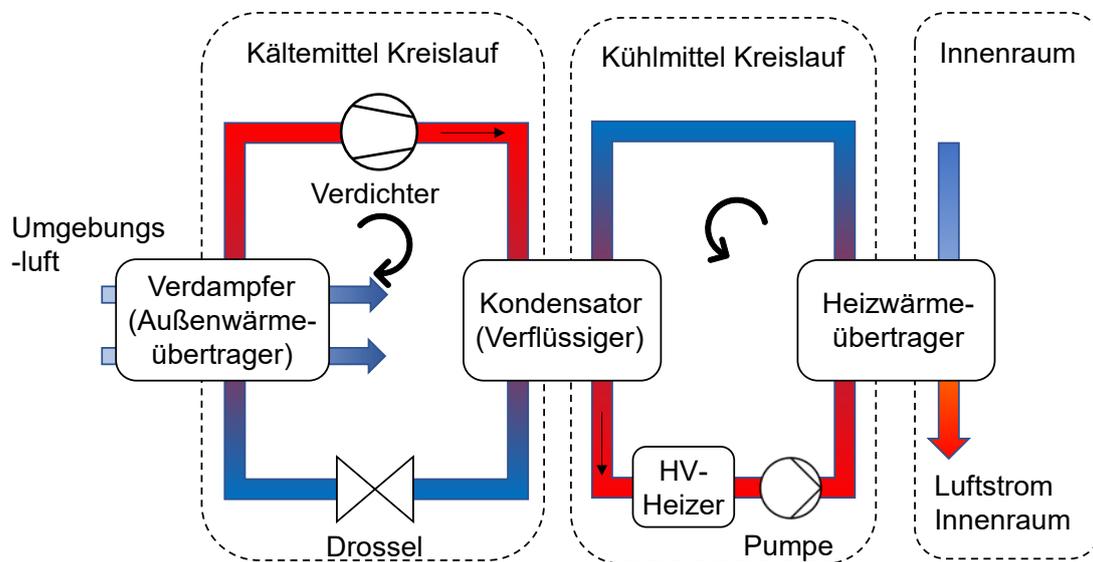


Abbildung 2.7: Schematischer Aufbau einer Luft / Kühlmittel-Wärmepumpe nach [43, 44, S. 23]

Im Außenwärmeübertrager verdampft das Kältemittel (häufig Fluorcarbone oder CO_2), weil es kälter als die Umgebungs-luft ist. Das gasförmige Kältemittel wird vom Verdichter angesaugt und per Kompression erhitzt. Der Verdichter steuert über seine Drehzahl den Kältemittel-Volumenstrom und damit die Leistung der Wärmepumpe. Im Kondensator wird die Wärme an den Kühlmittelkreislauf abgegeben, das Kältemittel wechselt in den flüssigen Aggregatzustand. Die Drossel sorgt für eine Expansion und damit eine weitere Abkühlung des Kältemittels unter die

Umgebungstemperatur [24, S. 98]. Wärmepumpen, deren Wärmequelle das Kühlmittel der Antriebskomponenten ist, verfügen anstelle des Außenwärmeübertragers über einen Kühlmittel/Kältemittel-Wärmeübertrager, einem sogenannten Chiller. Der Aufbau des Kühlmittelkreislaufs entspricht dem Aufbau mit elektrischem Heizgerät.

Bei Außentemperaturen unter -10 °C sinkt die Effizienz von Wärmepumpen erheblich. Lajunen [40] beobachtet eine Reduktion des COP von 2,9 bei 0 °C auf 2 bei -20 °C . Die Viskosität des Kältemittels steigt und schränkt den Volumenstrom und die Schmierung des Verdichters ein [43]. Zusätzlich sinkt der Wärmeübergangskoeffizient zwischen der Umgebungsluft und dem Kältemittel [24, 296f]. Bei -10 °C Außentemperatur darf die Temperatur des Kältemittels im Verdampfer maximal 20 °C betragen. In diesem Temperaturbereich und insbesondere bei nassem Bedingungen kann es aufgrund der Kondensation am Verdampfer zur Vereisung der Wärmepumpe führen, was praktisch einem Ausfall gleichkommt. Aus diesem Grund werden Wärmepumpen üblicherweise mit einem elektrischen Zusatzheizer ergänzt [43].

2.2.4 Reichweiteneinbußen bei geringen Temperaturen

Unabhängig vom eingesetzten Heizgerät sind die Klimaanlage und die Heizung die leistungsstärksten Nebenverbraucher im Elektrofahrzeug. Während die Niedervoltnebenverbraucher, wie das Licht oder das Infotainment, nur einige hundert Watt benötigen [45, S. 517, 46], verbraucht die Heizung bis zu 5 kW [46]. Der HVH von Webasto wird sogar mit bis zu 10 kW in Pkw verbaut [28]. Zwangsläufig wirkt sich dieser Mehrverbrauch stark reduzierend auf die Reichweite aus. Diesbezügliche Untersuchungen lassen sich in experimentelle und simulative Studien einteilen.

Taggart [6] untersucht Realfahrdaten von über 10.000 Tesla Model S und beobachtet bei kalten Umgebungsbedingungen um -10 °C einen durchschnittlichen Energiemehrverbrauch von 20 % im Vergleich zu Fahrten bei 20 °C . Bei kurzen Fahrten unter 5 Meilen erhöht sich dieser Wert durch den höheren Anteil der Aufheizenergie auf 45 %. Extreme Reichweitenreduktionen von bis zu 70 % beobachten Delos Reyes et al. [47]. Bei -26 °C führen sie Fahrversuche mit einem Nissan Leaf durch und vergleichen die Reichweiten mit dem Datenblatt des Fahrzeugs. Hierbei sollte beachtet werden, dass die Reichweiten der Datenblätter mit undynamischen Zyklen auf Rollenprüfständen bestimmt werden. Folglich ist die Reichweitenreduktion anteilig aufgrund der anderen Vergleichszyklen entstanden. Darüber hinaus werden in beiden Studien die Einflüsse der Heizenergie und der verringerten Rekuperation nicht getrennt voneinander betrachtet. Es ist wahrscheinlich, dass eine eingeschränkte Rekuperation zum Reichweitenverlust beiträgt.

In einer simulativen Untersuchung von Ramsey et al. [48] wird ein PTC-Heizer modelliert. Die Reichweite des modellierten Fahrzeugs, eines Renault Zoe, beträgt bei 0 °C 40 % weniger als im Referenzszenario bei 20 °C . Eine Umstellung auf Umluftbetrieb würde den Reichweitenverlust auf 20 % reduzieren. An dieser Untersuchung gibt es mehrere Kritikpunkte. Als Fahrzyklus dient der Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ), der aufgrund seiner geringen Dynamik einen geringen Verbrauch des Antriebssystems bedeutet. Der Anteil der Heizenergie wäre folglich höher als bei dynamischen Zyklen. Des Weiteren wird der Umluftbetrieb mit einer vollständigen Rezirkulation der Innenraumluft simuliert, obwohl laut DIN1946 [22] eine Frischluftzufuhr von 4 kg/min einzuhalten ist. Auch Horrein et al. [7] und Michaelidis [49] führen simulative Untersuchungen zum Einfluss der Innenraumbeheizung auf die Reichweite von Elektrofahrzeugen durch. Die Autoren beobachten für einen PTC-Heizer einen Reichweitenverlust von ca. 35 %. Michaelidis [49] ersetzt den PTC-Heizer in weiteren Simulationen durch eine Wärmepumpe. Der Reichweitenverlust reduziert sich auf 12,5 %. Zu ähnlichen Beobachtungen kommen Ayoubi et al. [50, 83f]. Sie simulieren eine Fahrt bei 0 °C und vergleichen eine vollständig deaktivierte

Heizung mit der Beheizung durch einen PTC-Heizer bzw. einer Wärmepumpe. Die Reichweite reduziert sich um 45 % durch den PTC-Heizer bzw. um 14 % durch die Wärmepumpe, bei der der COP mit 4,5 allerdings hoch angenommen wird. Insgesamt ermitteln die vorgestellten simulativen Untersuchungen den Reichweiteneinfluss durch die Innenraumbeheizung, jedoch nicht die Reichweitenverluste bei geringen Außentemperaturen, weil im Gegensatz zu den experimentellen Studien die Rekuperationseinschränkungen nicht berücksichtigt werden.

2.3 Rekuperation

Durch den Betrieb der EM im Generatormodus sind BEV in der Lage, kinetische Energie beim Verzögern zurückzugewinnen und sie in die Batterie einzuspeisen. Dieser Vorgang wird als regeneratives Bremsen oder Rekuperation bezeichnet. Adermann et al. [51] beobachten in ihren Versuchen mit einem VW eGolf einen Rekuperationsanteil von bis zu 18 %, der bei geringen Temperaturen auf 14 % sank. Spichartz et al. [52] und Ferraris et al. [53] stellen mit 14 % bzw. 30 % Rekuperationsanteile in einer ähnlichen Größenordnung fest. Jedoch ist die Rekuperation nicht in jeder Fahrsituation vollständig ausnutzbar, weshalb zusätzlich Reibbremsen zur Verfügung stehen [54]. Folgend werden diese Einschränkungen vorgestellt, die teilweise im *MDPI World Electric Vehicle Journal* vorveröffentlicht wurden [55]. Aufbauend wird die elektrothermische Rekuperation erläutert.

2.3.1 Begrenzung der elektrischen Rekuperation

Die Komponenten mit wesentlichem Einfluss auf die Rekuperation sind die EM und die Batterie. Die LE als AC/DC Wandler reduziert die Rekuperation hingegen nur durch ihren Wirkungsgrad zwischen 90 % und 96 % [56]. Abbildung 2.8 zeigt die Begrenzung der Rekuperation durch die EM und die resultierende Bremsmomentenverteilung (engl. Brake blending) zwischen der Rekuperation und der Reibbremse.

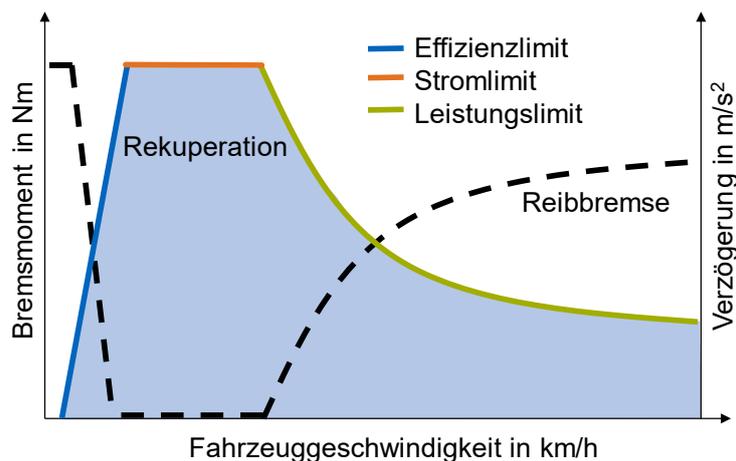


Abbildung 2.8: Bremsmomentenverteilung und Einschränkung der elektrischen Rekuperation durch die EM. Entnommen aus [55] nach [57].

Das Bremsmoment entsteht durch die Induktion des sich drehenden Rotormagnetfeldes in den Stator und hängt linear von der Drehzahl ab. Bei geringen Drehzahlen sind die auftretenden Maschinenverluste dadurch hoch [58]. Zwar könnte ein Gegenmagnetfeld bei einer ASM durch eine umgekehrte Drehrichtung bzw. bei einer PSM durch einen negativen Polradwinkel induziert

werden, jedoch müsste dazu Energie aus der Batterie entnommen werden. Im unteren Drehzahl- bzw. Geschwindigkeitsbereich wird der Rekuperationswirkungsgrad daher so gering, dass die Reibbremsen zur Verzögerung aktiviert werden. Im darüber liegenden Drehzahlbereich wirkt die charakteristische Momentenbegrenzung im Ankerstellbereich der EM limitierend auf die Rekuperation. Ursächlich ist die maximale Stromtragfähigkeit der Leiterwicklungen, weshalb dies als Stromgrenze bezeichnet wird [12]. Im Feldschwächebereich limitiert die maximale Leistung der EM die Rekuperation durch die Spannungsgrenze der Versorgungsspannung [12, 59]. Über die Kennlinie hinaus können in Extremfällen auch thermische Grenzen der EM, die vor schmelzenden Drähten und Entmagnetisierung der Permanentmagnete schützen, die Rekuperation einschränken [60]. Weithin wird ein solcher Zustand durch das Kühlsystem der EM verhindert [12]. Insgesamt beträgt der Wirkungsgrad der EM im Generatorbetrieb zwischen 82 % und 95 % [61].

Auch die Batterie hat durch ihre Ladefähigkeit entscheidenden Einfluss auf die Rekuperation. Der trivialste Fall ist eine vollständig geladene Batterie, die keine weitere Energie aufnehmen kann. Weil jedoch durch das Beschleunigen auf eine Geschwindigkeit mehr Energie eingesetzt wird als durch die Verzögerung rekuperiert werden kann, tritt dieser Fall nur bei einer Bergabfahrt mit vollständig geladener Batterie auf. Insbesondere bei hohen SOC und geringen Temperaturen treten merkliche Begrenzungen auf. Ein hoher Ladezustand bedeutet durch die charakteristische Ruhespannungskennlinie (engl. Open Circuit Voltage – OCV) der Zellchemie eine höhere Spannung, deren Differenz zur sicherheits- und alterungsrelevanten Ladeschlussspannung gering ist [62]. Die zum Laden erforderliche Überspannung fällt folglich geringer aus, was auch die Ladeleistung begrenzt [63]. Bei geringen Temperaturen besitzt die Batterie einen höheren Innenwiderstand, wodurch die Überspannung bei vergleichbaren Strömen zum Warmzustand größer ausfallen. Die Spannungsbegrenzung wird folglich verstärkt. Der Rekuperationswirkungsgrad der Batterie beträgt temperaturabhängig 90 % bis 99 % [11, 64]. Darüber hinaus wird die Rekuperation bei kalten Batterietemperaturen aufgrund der beschleunigten Alterung durch Lithium-Plating [64–66] mit Hilfe des Batterie-Management-Systems (BMS) begrenzt. Einer vollständigen Deaktivierung der Rekuperation steht neben dem Effizienzgedanken auch der Einfluss der Entladetiefe (engl. Depth of Discharge – DOD) als Stressfaktor auf die Batteriealterung entgegen [64].

2.3.2 Elektrothermische Rekuperation (ETR)

Die ETR beschreibt den Leistungstransfer von rekuperierter Leistung von der EM zum Heizgerät (Abbildung 2.9). Aufgrund der hohen Wirkungsgrade der Batterie bei gemäßigten Temperaturen ist eine Einspeisung in diese jedoch energetisch sinnvoller. Grundsätzlich finden die ETR bei jeder Verzögerung statt, bei der auch der Heizer aktiviert ist.

Vereinfacht beschrieben, bestimmt das BMS anhand der Zustandsdaten der Batterie deren Ladefähigkeit und gibt die maximale Rekuperationsleistung der EM vor, die sich nach der LE zwischen der Batterie und dem Heizer aufteilt. Sollte, wie zuvor beschrieben, die Ladefähigkeit der Batterie eingeschränkt sein, kann die ETR Energie nutzen, die andernfalls durch die Reibbremsen abgebaut würde und verloren ginge. Dadurch sinkt der Gesamtenergieverbrauch der Fahrt und die Reichweite steigt. Besonders bei geringen Temperaturen zeigt die ETR große Potentiale, weil die Energiemenge zum Heizen steigt [11] während der Batteriewirkungsgrad deutlich reduziert ist. Von Vorteil sind Wasserheizgeräte aufgrund des energiepuffernden Kühlmittels.

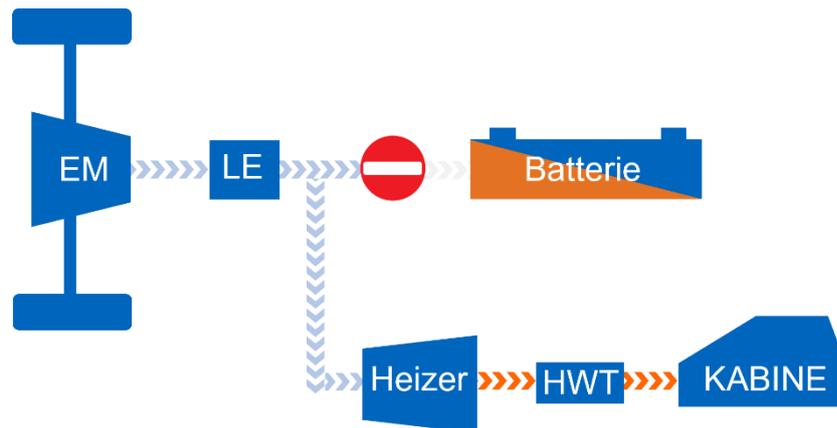


Abbildung 2.9: Funktionsprinzip der Elektrothermischen Rekuperation (ETR). EM=Elektrische Maschine, LE=Leistungselektronik, HWT=Heizwärmetauscher.

Lieb et al. [11, 63, 67] simulieren in ihrer Analyse eine Kombination aus den drei Fahrzeuggrößen Klein-, Kompakt- und Oberklassewagen und den drei Fahrzyklen des Artemis Zyklus Stadt-, Überland- und Autobahnprofil. Das Serienheizgerät eines Kühlmittelkreislaufs wird durch einen Bremswiderstand ersetzt. Bremswiderstände werden vor allem in Schienenfahrzeugen eingesetzt und ermöglichen eine kurzweilige Überlastung zur Leistungsaufnahme der Rekuperationsspitzen. Lieb et al. [11, 63, 67] legen den Bremswiderstand je nach Fahrzeugklasse auf eine Dauerleistung zwischen 6 kW und 10 kW und auf eine Spitzenleistung zur vollständigen Abdeckung der Rekuperationsleistung aus. Die Regelung erfolgt auf eine konstante Kühlmitteltemperatur von 50 °C am Eingang des Heizwärmetauschers (HWT), der über die Bilanz des zugeführten und des abgegebenen Wärmestroms (Gleichung (2.1)) die Innenraumtemperatur hält. Die Batterietemperatur wird identisch zur Umgebungstemperatur angenommen, die zwischen -20 °C und 20 °C variiert wird. Die Begrenzung der Rekuperation erfolgt spannungsbasiert, d. h. je geringer die Differenz zwischen OCV und Entladeschlussspannung ist, desto geringer ist die Ladeleistung. Die Batterietemperatur beeinflusst, wie oben beschrieben, den Innenwiderstand und reduziert somit diese Ladeüberspannung. Ein zusätzlicher Alterungsschutz der Batterie wird nicht berücksichtigt [11, S. 67, 67]. Die Heizleistung wird linear abhängig von der Umgebungstemperatur festgelegt. Die Autoren beobachten für den Artemis Urban Zyklus eine maximale Reduktion des Energiebedarfs von 15 % bei einer zu Fahrtbeginn vollständig geladenen Batterie mit einer Ausgangstemperatur zwischen -5 °C und 10 °C. Im Überlandzyklus reduziert sich der Vorteil auf 4 % bis 7 %. Allerdings zeigt Lieb [11, S. 128] auch, dass bei unbegrenzter Rekuperation die hohe thermische Masse des Bremswiderstands zu einem Energiemehrbedarf zum Aufheizen des Kühlmittelkreislaufs führt und damit den Gesamtenergiebedarf um bis zu 4 % steigert. In einer Jahreszyklussimulation kann für den Standort Deutschland eine Energiereduktion von 4 % bis 7 % ermittelt werden.

Aufbauend auf ihrer Zusammenarbeit mit Lieb übertragen Sawazki et al. [68] die Ansätze des Bremswiderstands auf den Fahrzyklus WLTC (Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle). Sie legen die Spitzenleistung des Bremswiderstands auf 30 kW fest. Die Rekuperationslimitierung wird über den kompletten Fahrzyklus konstant angenommen. Der Erwärmung der Batterie während der Fahrt wird folglich nicht Rechnung getragen. Die Ergebnisse zeigen ein Energieeinsparungspotenzial von etwa 5 % bei einer vollständig limitierten Rekuperation und einer Umgebungstemperatur von -20 °C. Bei höheren Umgebungstemperaturen steigt das Einsparpotential aufgrund der geringeren Heizleistung auf 7,8 % für 10 °C. Eine Erhöhung der Kapazität der Antriebsbatterie führt zu einer Verringerung des Energieeinsparpotentials.

Gemeinsam mit Ramakrishnan et al. [69] nimmt Sawazki auch die Problematik der hohen thermischen Masse des Bremswiderstands auf und ersetzt diesen in einer groben Kalkulation durch einen Schichtheizer mit 15 kW Dauer- bzw. 30 kW Spitzenleistung. Als Fahrzyklus dient der FTP-75 bei einem SOC von 90 %. Das Energieeinsparpotential beträgt 11 %. Zusätzlich wird eine schnellere Aufheizung des Fahrzeuginnenraums beobachtet.

2.4 Lastspitzenglättung

Die Lastspitzenglättung (LSG) dient der zeitlichen Verteilung von hohen elektrischen Lasten und ist als solche eine Teilstrategie des Energiemanagementsystems (EMS) [70, S. 323]. Die Ziele von EMS sind meist die Energieverbrauchsreduktion, die Lebensdauererhöhung einzelner Komponenten oder das Sicherstellen der erforderlichen Höhe und Konstanz der Versorgungsspannung. Folgend wird ein Überblick über die Lastspitzenglättung dargestellt. Relevante Publikationen zur LSG durch das Thermomanagement-System werden detailliert beschrieben.

2.4.1 Allgemeine Anwendung

Insbesondere in der Energieversorgung und im Gebäudesektor werden die fluktuierenden erneuerbaren Energien durch LSG Strategien mit den oft zeitversetzten Verbrauchern gekoppelt [71, 72]. Im BEV treten durch die hohe Dynamik viel kurzfristige Lastschwankungen auf. Während starke Beschleunigungen zu hohen Entladeströmen der Batterie führen, verursachen Verzögerungen Rekuperationsströme. Die wechselnde Belastung der Batterie verursacht hohe Schwankungen der Spannung. Nach Klötzl und Gerling [73] ist jedoch eine hohe Stabilität der Spannung für die Funktionalität zahlreicher Verbraucher wichtig und muss durch Glättungskondensatoren hergestellt werden. Vielfach wurden in der Literatur Ansätze der Lastspitzenglättung durch hybride Energiespeicher (engl. Hybrid Electric Storage Systems – HESS), bestehend aus Hochenergiezellen und Superkondensatoren (engl. Supercaps), vorgestellt [74–80]. HESS können dank des geringen Innenwiderstands der Superkondensatoren zur Steigerung der Effizienz [75] und Batterielebensdauer [76, 78] dienen. Allerdings können Shin et al. [74] auch zeigen, dass ein gleichgroßes Batteriepack aus Hochenergiezellen ähnlich effizient ist wie das Gesamtsystem aus Batterie und Kondensatoren und dabei einen größeren Energiegehalt besitzt. Die Vorteile der Energieeffizienz können den Bauraumnachteil von HESS folglich nicht kompensieren [79] und bedeuten zusätzlichen einen Kosten- und Komplexitätsnachteil [79, 80].

2.4.2 Lastspitzenglättung durch das Thermomanagement

Die Anpassung des trägen Heizsystems an die hohe Dynamik des elektrischen Antriebssystems bietet die Möglichkeit, ähnlich wie bei HESS, die Leistungsflüsse zeitlich zu entkoppeln. Die Betriebsstrategien dafür unterteilen sich nach Abbildung 2.10 in optimierungsbasierte und heuristische Ansätze. Eine weitere Einteilung kann zwischen prädiktiven Strategien, bei denen die Fahrzeuggeschwindigkeit vorab bekannt ist, und kausalen Strategien, die auf Basis aktuell verfügbarer oder aufgezeichneter Fahrdaten steuern, erfolgen [81, S. 291].

Zur Senkung des Energieverbrauchs verwenden Minnerup et al. [82, 83] ein optimierungsbasiertes EMS, das mit Hilfe eines genetischen Algorithmus die Fahrzeuggeschwindigkeit und die Leistung des HVAC Systems steuert. Die prädiktive Optimierung der Geschwindigkeit erfolgt in diskretisierten Streckenabschnitten. Die Ergebnisse zeigen eine Reduktion des

Gesamtenergieverbrauchs von 3 %, erfordern allerdings auch eine hohe Rechenzeit. Suchan-eck [84] definiert die Batteriealterung, den thermischen Insassenkomfort und die Reichweite als Zielgrößen und nutzt die Leistung der Nebenverbraucher und die Rekuperationsleistung als Op-timierungsparameter. Die Optimierung erfolgt prädiktiv mittels stochastischer dynamischer Programmierung. Eine Aufteilung der Optimierung in die Komponentensteuerung und einen fahrverlaufsunabhängigen Teil kann den Rechenaufwand reduzieren.

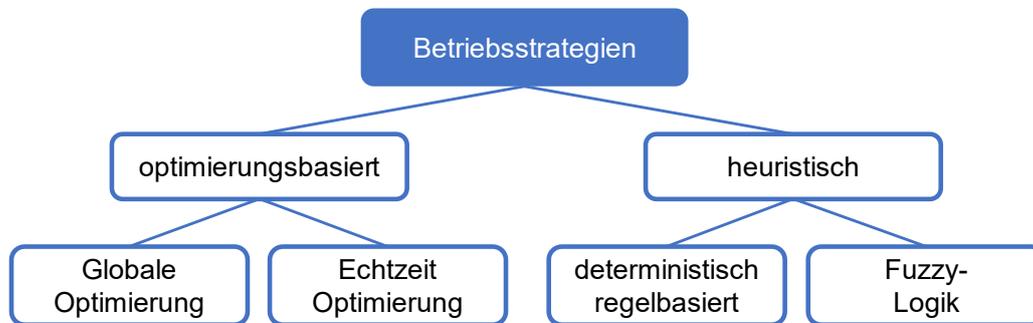


Abbildung 2.10: Klassifizierung von Betriebsstrategien nach [85]

Sakhdari und Azad [86] nutzen für die Steuerung des Heizsystems eine prädiktive, globale Op-timierung mit drei Kostenfunktionen. Die erste Kostenfunktion bewertet die Abweichung von der Solltemperatur, die zweite die Schwankungen des Batteriestroms und die dritte den Energiever-brauch. Die Optimierung über dynamische Programmierung erfolgt prädiktiv anhand des FTP-75 Zyklus. Die Ergebnisse zeigen Reduktionen der Stromschwankungen als auch des Energie-verbrauchs. Jedoch werden auch Innenraumtemperaturschwankungen über 10 °C innerhalb von Sekunden beobachtet, die aufgrund der thermischen Trägheit als unrealistisch eingestuft werden und auf ein ungenaues Heizkreislaufmodell hindeuten. Eine vergleichbare Strategie durch dynamische Programmierung wenden Lahlou et al. [87] an, nutzen als Zielgröße allerdings direkt den Insassenkomfort und nicht die Innenraumtemperatur. Der Einsatz im Fahrzeug wird aufgrund der fehlenden Echtzeitfähigkeit bezweifelt.

Die hauptsächliche Optimierungsgröße von Pham et al. [88] ist nicht der Energieverbrauch bzw. die Reichweite, sondern die Batterielebensdauer. Simuliert wird ein Bus, der den synthetischen SORT- (Standardised On-Road Test) Fahrzyklus fährt. Der Fahrzyklus ist folglich bekannt und das Heizsystem kann prädiktiv gesteuert werden. In Verzögerungsphasen soll der Heizer zwischen 5 kW und 10 kW betrieben und in Beschleunigungsphasen möglichst deaktiviert werden. Die Kabinentemperatur wird in vordefinierten Limits gehalten. Die Ergebnisse zeigen eine identische Energiebilanz zum Vergleichsszenario. Die Amplituden der Lastspitzen werden in Beschleunigungsphasen um bis zu 7 % und in Verzögerungsphasen um bis zu 20 % reduziert, was zu einer Reduktion der zyklischen Alterung von bis zu 30 % führt. Dabei wird die kalendarische Alterung nicht betrachtet. Weil ebenfalls keine Informationen zum genutzten Alterungsmodell vorliegen, können die Verbesserungen nicht beurteilt werden, erscheinen jedoch zu hoch.

Sowohl Sakhdari und Azad [86] als auch Pham et al. [88] simulieren eine direkte Verbindung zwischen der Heizleistung und der Innenraumtemperatur. Thermische Trägheiten und Verluste werden nicht berücksichtigt und die Modelle wurden nicht validiert. Im Gegensatz dazu stellen Min et al. [89] eine Validierung ihres Fahrzeugmodells samt Heizkreislauf vor. Sie untersuchen den Einfluss des Thermomanagements auf die Batterielebensdauer bei geringen Umgebungstemperaturen. Die entwickelte Betriebsstrategie regelt die Heizleistung anhand der Temperaturdifferenz von der Solltemperatur des Innenraums. Sie beobachten eine

Verschiebung der Lastspitzen in Bereichen mit hoher Batteriebelastung um bis zu 8 %. Die Batteriealterung wird bei einer Umgebungstemperatur von $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ um 3 % reduziert. Diese Größenordnung lässt die 30 % von Pham et al. [88] als zweifelhaft dastehen.

Eine heuristische Betriebsstrategie verfolgen Roscher et al. [90]. Zur Reduktion der Batterieleistung wird die Kühlleistung bei hohen Batterieentladeleistungen reduziert. Die Steuerung basiert auf einer Look-up Tabelle, die anhand der Fahrzeuggeschwindigkeit die HVAC Leistung linear limitiert. Wird eine vordefinierte Leistungsgrenze überschritten, wird die HVAC deaktiviert. Die Ergebnisse zeigen eine Reduktion des Energieverbrauchs um 1 %.

Xie et al. [91] nutzen für die Verbesserung der Energieeffizienz und des Insassenkomforts eine Kombination aus einer Fuzzy-Logik und eines PID-Reglers. Anhand der Solltemperaturabweichung und deren Ableitung bestimmt die Fuzzy-Logik die entsprechenden PID-Kontrollparameter. Damit kann eine hohe Regelgenauigkeit und Recheneffizienz erzielt werden [92]. Zusätzlich wird ein selbstlernender Algorithmus zur Bestimmung der Zieltemperatur des Innenraums anhand der thermischen Komfortpräferenzen der Passagiere implementiert. Im Vergleich zu einem binären Regler wird der HVAC-Verbrauch so um 32 % reduziert. Nachteilig an diesem Ansatz sind die hohe Auslegungskomplexität durch die Wechselwirkungen zwischen Fuzzy-Logik und PID-Regler und der Trainingsaufwand durch den selbstlernenden Algorithmus.

Die Veröffentlichungen von Xu et al. [93] und Maia et al. [94] fokussieren sich auf das optimale Bremsenblending mittels Fuzzy-Logik. 27 Fuzzy-Regeln verarbeiten die Eingangsgrößen Geschwindigkeit, Bremspedalstellung, Batterietemperatur und SOC zur Reduktion des Energieverbrauchs [93]. Im Ansatz von Maia et al. [94] dienen stattdessen die Fahrzeugbeschleunigung und die Steigung der Fahrbahn als Eingangsgrößen. Die Fuzzy-Logik besteht aus 770 Knotenregeln, was eine hohe Komplexität mit sich bringt und durch Optimierungsmethoden vereinfacht werden könnte.

2.5 Batteriealterung durch pulsweitenmodulierte Nebenverbraucher

Die Vorstellung gängiger Heizgeräte in Elektrofahrzeugen in Abschnitt 2.2.2 zeigt, dass sowohl Schicht- als auch einige PTC-Heizgeräte durch eine Pulsweitenmodulation leistungsgesteuert werden können. Eine solche hochfrequente Taktung des Batteriestroms wird in vielen Batteriealterungsuntersuchungen nicht einbezogen. Um eine etwaige Teilkompensation der durch eine Lastspitzenglättung erzielbaren Lebensdauervorteile auszuschließen oder zu quantifizieren, wird im Folgenden der Stand der Wissenschaft bezüglich des Frequenzeinflusses auf die Batteriealterung vorgestellt. Tabelle 2.1 fasst die Literaturrecherche zusammen. Große Teile dieser Recherche wurden im *Journal of Energy Storage* vorveröffentlicht [95].

2.5.1 Elektrochemische Grundlagen

Beim Laden und Entladen einer Batteriezelle entsteht durch die unterschiedliche Polarisierung der Ladungsträger an den Grenzflächen der Elektroden zum Elektrolyten die sogenannte Doppelschichtkapazität [96]. Diese verhält sich wie ein Zeitglied erster Ordnung bzw. wie ein Tiefpassfilter mit Zeitkonstanten zwischen einigen Millisekunden und wenigen Sekunden. Hohe Frequenzen werden folglich geglättet, indem nur die Doppelschicht ge- und entladen wird und

dabei kein Ladungsübertritt stattfindet. Oberhalb der sogenannten Grenzfrequenz f_g (Gleichung (2.13)) ist die Doppelschicht dominierend gegenüber dem Ladungsdurchtritt. Abbildung 2.11 zeigt das Ersatzschaltbild der Doppelschicht und die Aufteilung des Stromflusses.

$$f_g = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.13)$$

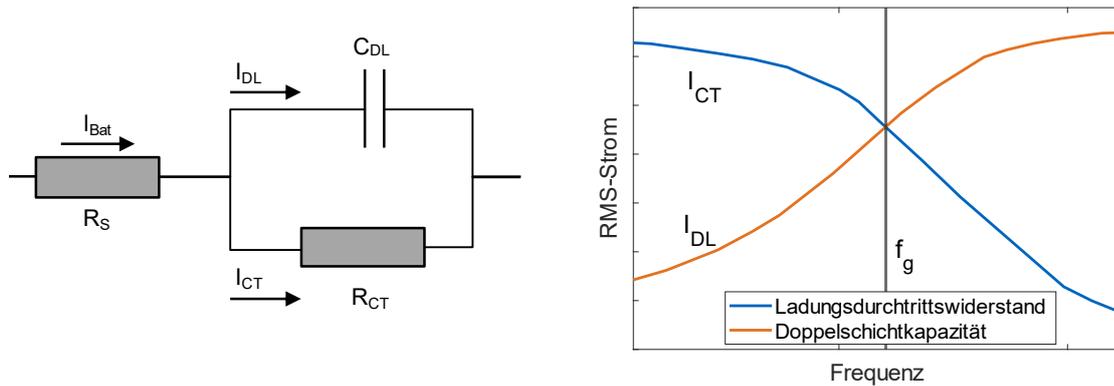


Abbildung 2.11: Doppelschichtkapazität mit Ladungsdurchtritt einer Elektrode. Links: Ersatzschaltbild. Rechts: Stromfluss. Nach [95].

2.5.2 Aktuelle Forschungsergebnisse

Uddin et al. [97] entladen 18650-Batteriezellen mit einem AC-Rippel überlagerten Gleichstrom und beobachten für 14,8 kHz einen 2,4 % höheren Kapazitätsverlust im Vergleich zu DC entladenen Zellen. In einer weiteren Veröffentlichung [98] bekräftigen die Autoren den Effekt durch eine Röntgen-Photoelektronenspektroskopie, die ein verstärktes Wachstum der Festkörper-Elektrolyt-Grenzfläche (engl. Solid Electrolyte Interphase - SEI) zeigt. Durch Modellberechnungen kann dieses Wachstum auf die höhere Wärmedissipation bei hohen Frequenzen zurückgeführt werden, was durch Bala et al. [99] und Qin et al. [100] bestätigt wird. Im Gegensatz dazu stellen Uno und Tanaka [101], Brand et al. [102] sowie Ghassemi et al. [103] keine beschleunigte Alterung bei hohen, sehr wohl aber bei geringen Frequenzen fest. Uno und Tanaka [101] stellen Stromrippel um einen Nulldurchgang, die durch Spannungsausgleicher im BEV entstehen, nach. Bei einer Frequenz von 10 Hz zeigt sich ein Kapazitätsverlust von 14 % bereits nach 147 Tagen Zyklisierung. Durch Simulationen zeigen die Autoren, dass bei geringen Frequenzen nur ein geringer Anteil des Stroms durch die Doppelschichtkapazität gefiltert wird, während ein Großteil ungefiltert passiert und zum Ladungsdurchtritt führt (vgl. 2.5.1). Die entstehenden Nebenreaktionen, wie das Wachstum der Passivierungsschichten und Lithiumablagerung auf den Elektroden, sind letztlich ursächlich für die beschleunigte Degradation. Brand et al. [102] bestätigen den Einfluss von geringen Frequenzen auf die Batteriealterung und die Unbedenklichkeit hoher Frequenzen. In ihrer Studie zyklisieren sie 18650 Zellen mit einem AC überlagerten Gleichstrom zwischen 1 Hz und 30 kHz. Der Kapazitätsverlust ist bei niedrigfrequent belasteten Zellen um ca. 2 % höher. Anders als bei Uno und Tanaka [101], die einen steigenden Kapazitätsunterschied feststellen, entsteht die Differenz jedoch bereits nach 50 Zyklen und bleibt folgend konstant. Daher wird eine Beeinflussung des AC-Rippels auf die Formierungsprozesse der Zellen vermutet. Darüber hinaus stellen Brand et al. [102] eine Abhängigkeit der Grenzfrequenz f_g vom SOC und Alterungszustand (engl. State of Health -SOH)

fest. Bei einem SOC von 10 % beträgt diese 155 Hz und bei 70 % 304 Hz. Bei einem SOH von 80 % sinkt die Grenzfrequenz um ca. 40 %. Ghassemi et al. [103] testen ebenfalls einen mit einem AC-Rippel überlagerten Gleichstrom und variieren die Frequenz zwischen 0 Hz und 1 kHz. Die zylindrischen K2123 Zellen zeigen bei geringen Frequenzen einen beschleunigten Verlust von zyklisierbarem Lithium (engl. Loss of Lithium Inventory- LLI) und von Aktivmaterial (engl. Loss of Active Material - LAM). Hohe Frequenzen hingegen führen sogar zu einer Reduktion des Kapazitätsverlustes. Die Auswirkungen von 100 Hz AC-Wellen, die eine Sinushalbwellen überlagern, untersuchen Chang et al [104]. Sie beobachten einen um 2 % erhöhten Kapazitätsverlust, dessen Ursache sie im einhergehenden höheren Ladungsdurchsatz vermuten.

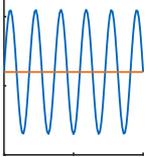
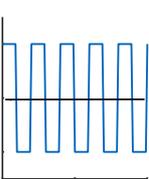
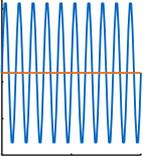
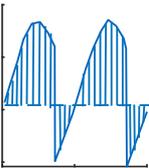
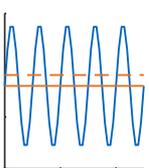
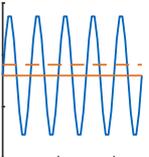
Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Ergebnissen zeigen einige Veröffentlichungen weder einen Einfluss von hohen noch von niedrigen Frequenzen auf die Batteriealterung. So untersuchen Juang et al. [105] 14500-Zellen mit einem Gleichstrom und einem überlagerten Wechselstrom. Die Frequenz und die Wellenform zeigen keinen Einfluss auf die Kapazität. Ferraz et al. [106] stellen die hochfrequenten Schaltvorgänge von Leistungselektroniken mit einer Frequenz von 5 kHz nach. Eine beschleunigte Alterung wird nicht mit statistischer Sicherheit festgestellt. Auch DeBreucker et al. [107] beobachten bei ihrer Zyklisierung zweier Batteriepacks mit 8 kHz keinen Alterungseinfluss und begründen dies wiederum mit der Filterung durch die Doppelschichtkapazität. Dem widersprechen die Beobachtungen von Bessman et al. [108, 109], die Frequenzen von 1 Hz, 100 Hz und 1 kHz superponiert mit einem Gleichstrom testen. Obwohl die Grenzfrequenz der getesteten prismatischen Zellen mit 10 Hz über der ersten Versuchsfrequenz lagen, wird keine beschleunigte Alterung beobachtet. Die Autoren weisen aber auf eine mögliche beschleunigte Alterung durch die abweichende Temperaturentwicklung hin, die in ihrem Experiment durch eine aktive Kühlung unterbunden wird.

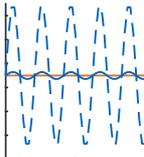
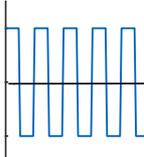
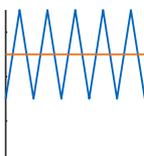
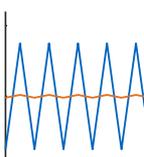
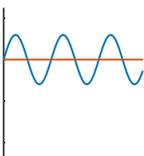
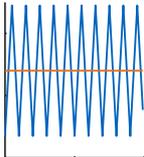
2.5.3 Fazit

Trotz zahlreicher Veröffentlichungen aus den vergangenen Jahren ist eine eindeutige Aussage zum Einfluss von PWM Signalen auf die Batteriealterung nicht möglich. Die Aussagen von Uddin et al. [97, 98] und Qin et al. [100] auf der einen Seite und Uno und Tanaka [101], Brand et al. [102] und Ghassemi et al. [103] auf der anderen Seite widersprechen sich grundlegend. Die differierenden Ergebnisse können auch aus den Versuchsaufbauten entstehen, bei denen teilweise nur das Entladen oder andererseits auch das Laden durch hochfrequente Signale überlagert wird. Zusätzlich unterscheiden sich die Zellbauformen und -chemien deutlich, sodass die Versuchsreihen kaum miteinander zu vergleichen sind.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Tabelle 2.1: Zusammenfassung des Stands der Wissenschaft zum Alterungseinfluss durch hochfrequente Belastung. Entnommen aus [95].

Erstautor	Stromprofil	Entladen		Frequenz in Hz	Temp. in °C	Zelltyp	Ergebnisse
		in C	in C				
		Laden	SOC			Dauer	
		in C	in %				
Uddin [97, 98]		0,8 (DC) ± 0,6 (AC)		10	25	15x 18650 NCA 3 Ah/3,6 V	• 2,4% Kapazitätsverlust und 5% Leistungsverlust bei 14,8 kHz nach 1.200 EFC
		0,3 (DC)		55 254 14.800	95-65	1.200 EFC	• Verstärktes SEI Wachstum und Wärmegeneration bei hohen Fre- quenzen • Höhere Standardabweichung bei Rippelströmen
Uno, Tanaka [101]		± 0,5 (Nulldurchgang)		1 ...	20-25	12x Prisma. LCO 2 Ah/3,7 V	• 14% Kapazitätsverlust bei 10 Hz • Hohe Frequenzen ohne Einfluss
				100.000	50	147 d	
Brand [102]		0,225 (DC) ± 0,2 (AC)		1 6 35 225	25	20x 18650 NMC 2 Ah/3,67 V	• 1-2% höhere Impedanz und Kapazi- tätsverlust bei geringen Frequenzen
				1.000 6.500 30.000	70-10	> 1.500 EFC 290 d	
Chang [110]		∅ 0,8 (AC)		100	21	5x 18650 NMC 3 Ah/3,6 V	• Höherer Kapazitätsverlust von 2,1 % bei Rippelströmen • Vermutung: Erhöhter Ladungs- durchsatz ursächlich
		1 (DC)		überlagert mit 2.000 & 10.000	100-0	500 EFC 3 m	
Ghassemi. [103]		1) 0,5 (DC) ± 0,5 (AC)		0	22-24	27x K2123A (zy- lind.), LFP 600 mAh/ 3,2 V	• Hohe Frequenzen (100 Hz - 1 kHz) beeinflussen Alterung nicht, können diese sogar verlangsamen
		2) ± 0,87 (AC)		0,1 100 1.000	1) 100-0 2) 1.000 50-0	200 d 1.000 Zyklen	• Geringe Frequenzen (0,1 Hz) be- schleunigen LAM and LLI
Juang. [105]		1,05 (DC) ± 0,79 (AC)		20	30	16x 14500 LCO 0,76 Ah/3,6V	• Frequenz, Stromprofil und Amplitude beeinflussen Alterung nicht
		1		1.000	100-0 DOD va- riert	300 EFC 3 m	• Mittlerer Strom beschleunigt Alte- rung durch verstärkte Wärmegeneration

Bala [99]		1) 0,5 (DC) ± 0,025 (AC) 2) 0,5 (DC) ± 0,5 (AC)	120	Keine Regelung	Prisma. LFP	<ul style="list-style-type: none"> • Geringfügig höhere Temperatur durch Rippleströme • Temperaturen werden durch Amplituden verstärkt
Qin [100]		1) ± 2 2) ± 4 Amplitudenverhältnis (pos:neg): 3:1, 2:1, 1:1, 1:2, 1:3	0,05 0,025 0,125 0,25 0,625 1,25 2,5 5 10 16,67	0-10 50 10	10x Prisma. NMC 50 Ah/3,67 V	<ul style="list-style-type: none"> • Höhere Frequenzen verursachen geringerer Wärmedissipation • Beschleunigte Alterung bei geringen Frequenzen • Übergreifend maximaler Kapazitätsverlust von < 3,5 %
Ferraz [106]		1 (DC) ± 0,22 ... 0,32 (AC)	5.000	35 100-0 55-45	13x 18650 NMC 2,5 Ah/3,7 V 1.700 EFC	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Verstärkung des Kapazitätsverlustes bei Ripplestrom und 10 % DOD, aber statistisch uneindeutig • Unauffällige Temperaturen
DeBruecker. [107]		1) 2,5 (DC) ± 0,025 (AC) 2) 2,5 (DC) ± 0,9375 (AC) 0.1	8.000	20-25 82,5-25	2x Pack Pouch NMC 40 Ah/3,7 V	<ul style="list-style-type: none"> • Kein Alterungseinfluss durch Ripplestrom beobachtbar • Temperatureinfluss ist wesentlich größer
Amamra. [111]		1 (DC) ± 0,0024 (AC) 0,7 (DC) ± 0,0024 (AC)	3.900	25 95-5	6x 21700 NMC 5 Ah/3,67 V 300 Zyklen	<ul style="list-style-type: none"> • Kein Einfluss der Rippelfrequenz statistisch eindeutig • Kein Vergleich mit DC Belastung
Bessmann [108]		1.) ± 0,75 (AC) 2.) 1 (DC) ± 0,75 (AC)	1 100 1.000	40 100-0	12x Prisma. NMC 28 Ah/3,67 V Bis EoL 1 a	<ul style="list-style-type: none"> • Kein Einfluss der Stromripple auf Kapazitätsverlust, Innenwiderstand oder Leistung beobachtbar

3 Definition der Themenstellung

In diesem Kapitel wird der Stand der Wissenschaft kritisiert und es werden Forschungslücken beschrieben, um daraus Forschungsfragen abzuleiten. Die Forschungsfragen dienen zur Detaillierung der Themenstellung aus der Kritik am Stand der Wissenschaft. Das Gesamtverfahren verdeutlicht den logischen Aufbau zur Beantwortung der Forschungsfragen. Es werden Wegpunkte mit unterschiedlichen Handlungsoptionen aufgezeigt und insbesondere die Motivation der gewählten Vorgehensweise kapitelübergreifend beschrieben.

3.1 Kritik am Stand der Technik und Wissenschaft

Grundsätzlich lässt sich die Kritik am Stand der Technik und die Kritik am Stand der Wissenschaft unterscheiden. Erstere befasst sich mit dem Thermomanagement verfügbarer Elektrofahrzeuge. In vielen Modellen orientiert sich das HVAC System an denen eines konventionell angetriebenen Pkw mit der Ergänzung eines elektrischen Heizgeräts. Trotz einiger Weiterentwicklungen [112] ist die Innenraumklimatisierung prinzipiell mit deutlich weniger Intelligenz ausgestattet als das Batterie-Thermomanagement. Ursächlich hierfür scheinen gewachsene Industriestrukturen der Automobilbranche zu sein. Während die Batterieentwicklung ein Kernthema der OEM ist, liegt die Entwicklung der Innenraumklimatisierung bei Zulieferern mit Expertenwissen. Durch die strikte Definition von Mindestanforderungen in Lastenheften und die hohe Preissensibilität entstehen nur wenige innovative Lösungen zum Energiemanagement, die das HVAC System einschließen.

Der erste Kritikpunkt am Stand der Wissenschaft ist die fehlende differenzierende Betrachtung der Ursachen für die Reichweitenreduktion bei geringen Umgebungstemperaturen. Viele Autoren sehen die Reduktion einzig durch die Heizleistung begründet [7, 48]. Den Einfluss der Ladefähigkeit der Batterie schließen nur wenige mit ein [11, 63]. Die Vorgabe einer Ladestrombegrenzung [68] ist unrealistisch, weil sich während der Fahrt der SOC verringert, die Batterietemperatur steigt und sich dadurch die Ladefähigkeit erhöht.

In Kapitel 2 wurde eine Vielzahl von Forschungsansätzen für die Steigerung der Reichweite und der Batterielebensdauer vorgestellt. Der wesentliche Kritikpunkt daran ist, dass diese Zielgrößen oft nicht gemeinsam betrachtet werden. Die ETR und die Lastspitzenglättung sind beide für sich genommen keine neuartigen Entwicklungen, werden bisher allerdings nicht kombiniert. Thematisch am nächsten kommt dieser Arbeit die Dissertation von Lieb [11], der die ETR mit Bremswiderständen untersucht. Neben der thematischen Ausrichtung auf die Betriebsstrategien und der Definition der Batterielebensdauer als Zielgröße werden in dieser Arbeit Serienheizgeräte betrachtet.

Ein weiterer Kritikpunkt am Stand der Wissenschaft sind die oftmals ungenauen Modelle [67, 86] und deren fehlende Validierung [69, 88], die die Ergebnisgüte infrage stellen. Zudem entwickeln

viele Wissenschaftler Energiemanagementsysteme und Betriebsstrategien, deren Umsetzung in BEV als unrealistisch erscheint oder eine Anbindung an ein Back-End benötigen [82, 87]. Die zuvor beschriebene Preissensibilität lässt die Weiterentwicklung solcher Forschungsansätze zur Marktreife als zweifelhaft vermuten.

3.2 Abgeleitete Forschungsfragen

Aus der Kritik am Stand der Technik und Wissenschaft ergeben sich die folgenden Forschungsfragen, die das Thema detaillieren:

- 1) Wie groß sind die Reichweitenreduktionen, die durch die zusätzliche Leistungsanforderung der Kabinenbeheizung und durch die verminderte Rekupe-
rationsfähigkeit entstehen?
- 2) Welche Heizgeräte eignen sich zur Umsetzung der ETR und der Lastspitzenglä-
tung?
- 3) Wie können die ETR und die Lastspitzenglättung in Betriebsstrategien miteinander
kombiniert werden?
- 4) Wie hoch sind die Steigerungen der Reichweite und der Batterielebensdauer durch
diese Betriebsstrategien?
- 5) Welchen Einfluss hat die PWM des Heizgeräts auf die Batteriealterung?

3.3 Gesamtverfahren

Das Gesamtverfahren lässt sich in sechs Schritte einteilen, wie Abbildung 3.1 aufzeigt. Die Ein-
zelschritte und die übergreifende Motivation werden im Folgenden dargelegt.

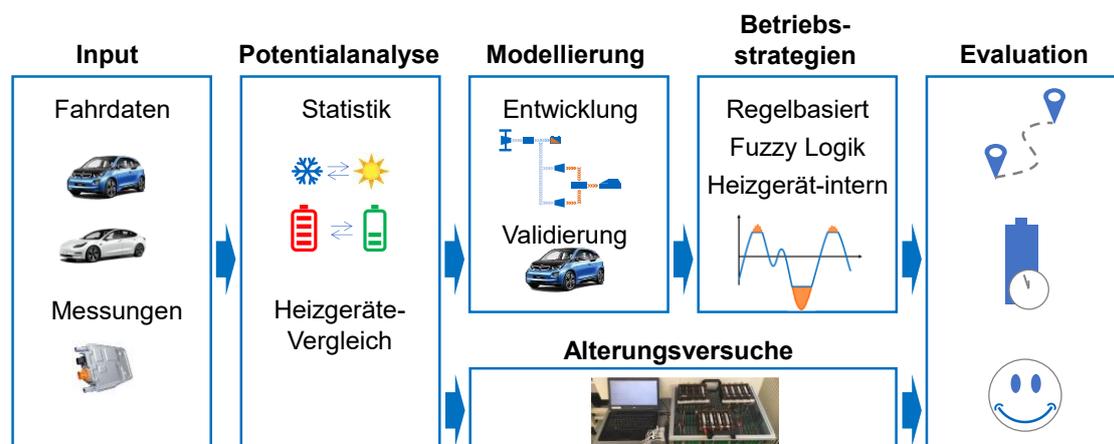


Abbildung 3.1: Übersicht des Gesamtverfahrens

Input

Für eine eingehende Analyse und weitere Modellierungsschritte ist eine adäquate Datenbasis unabdingbar. Die Auswahl der Inputdaten erfolgt anhand der verfügbaren Parameter. Neben den detaillierten Antriebs- und Batteriedaten sind vor allem Messdaten des Heizkreislaufs erforderlich. Am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik stehen vor allem Mobilitätsdaten zur Verfügung, die diese Kriterien nicht erfüllen. Datensätze eines zum BEV umgerüsteten Smart ForTwo [113], eines VW eGolfs [51] und eines Nissan Leafs [114] bieten darüber hinaus Aufzeichnungen der Antriebsparameter, die anfangs analysiert werden, jedoch kein Teil dieser Arbeit mehr sind. Stattdessen wird mit dem Projektfahrzeug BMW i3 und dem Lehrstuhlfahrzeug Tesla Model 3 eine eigene Messdatenaufzeichnung umgesetzt, die in der Auswahl der Messgrößen und der Messfrequenz definiert werden kann. Der Stand der Technik aus dem Jahr 2021 kann anhand des Model 3 untersucht werden. Der BMW i3 bietet hingegen höher aufgelöste und umfangreichere Daten. Zusätzlich zu den Fahrdaten werden zahlreiche Hardware in the Loop (HiL)-Tests mit Heizgeräten durchgeführt, deren Zweck im weiteren Text erläutert wird.

Potentialanalyse

Um vor weiteren Untersuchungen zu bestimmen, ob die Reichweitenreduktion weiterhin eine akute Herausforderung für BEV darstellt, wird eine Potentialanalyse durchgeführt. In der Potentialanalyse werden die Fahrdaten zweckgebunden ausgewertet. Die Reichweiteneinflüsse der Heizung und der Rekuperationsbegrenzung (Forschungsfrage 1) werden quantifiziert und es werden Anforderungen zur ETR an Heizgeräte formuliert. Der Vergleich mit den HiL-Tests der Heizgeräte ermöglicht so eine Vorauswahl des Heizgeräts (Forschungsfrage 2), um einerseits den Lösungsraum einzugrenzen und damit andererseits durch eine Best-Case Analyse die maximalen Verbesserungen zu bestimmen.

Modellierung

Für eine konkrete Umsetzung von Strategien, die ETR und Lastspitzenglättung kombinieren, bieten sich eine modellbasierte Simulation und eine Umrüstung am Realfahrzeug an. Die Entscheidung fällt auf die Simulation, weil sie reproduzierbare Bedingungen ermöglicht, vor allem hinsichtlich der Außen- und Systemtemperaturen und der Geschwindigkeitsprofile. Zwei Simulationen sind daher besser vergleichbar als zwei Realfahrten. Dennoch würde eine Umrüstung am Projektfahrzeug eine höhere Realitätsnähe liefern, die jedoch aufgrund des begrenzten Zugriffs auf die Steuergeräte der Batterie und des Motors eingeschränkt wäre. Zusätzlich wird dieser Nachteil durch die umfangreiche Validierung aller Einzelsysteme und des Gesamtsystems anhand der Inputdaten abgeschwächt. Aus diesem Grund wird zur Modellierung ein spezifisches Fahrzeug gewählt.

Alternativ wäre eine Betrachtung mit Hilfe eines skalierbaren Fahrzeugmodells möglich, was aber eine geringere Validität mit sich bringen würde. Die Auswahl des BMW i3 als Simulationsmodell begründet sich durch den detaillierteren und größeren Datensatz, der sich vor allem durch den Zugriff auf den Heizkreislauf auszeichnet. Dieser ist beim Tesla Model 3 nicht gegeben. Hinzu kommt die höhere zeitliche Verfügbarkeit des BMW i3.

Betriebsstrategien

Aufgrund der höheren Relevanz für den Kunden und des erwarteten höheren Potentials wird der Reichweite die höhere Priorität gegenüber der Batterie-Lebensdauer bei der Entwicklung der Betriebsstrategien eingeräumt. Das Konzept der ETR und der Lastspitzenglättung verspricht jedoch signifikante Verbesserungen in beiden Zielgrößen und erfordert keinerlei Änderungen an der Hardware im Fahrzeug. Lediglich die Steuerungen der Antriebskomponenten und des Heizgeräts müssten angepasst werden. Die Umsetzbarkeit bzw. die Rechenintensität ist aus diesem Grund ein Kriterium bei der Festlegung der Strategien auf heuristische Ansätze (Forschungsfrage 3).

Alterungsversuche

Um sicherzustellen, dass die erzielbaren Steigerungen der Batterie-Lebensdauer nicht durch einen negativen Effekt der PWM in der Leistungsregelung des Heizgeräts abgeschwächt oder sogar überkompensiert werden, erfolgt eine Batteriealterungsstudie parallel zum Simulationsanteil. Die Parametrierung der PWM des Experiments orientiert sich an der des ausgewählten Heizgeräts.

Evaluation

Letztlich werden die entwickelten Strategien anhand ihrer Zielgrößen Reichweite und Batterie-Lebensdauer evaluiert (Forschungsfrage 4). Die Reichweite wird zwischen zwei geschwindigkeitsidentischen Fahrten und variierten Strategien zum Ausgangszustand bewertet. Die Evaluation der Batterie-Lebensdauer umfasst die Beurteilung aus dem simulativen Teil unter Berücksichtigung der Versuchsergebnisse der Alterungsstudie (Forschungsfrage 5). Es wird ein zweistufiger Ansatz gewählt, der zunächst objektiv die Stressfaktoren vergleicht und folgend die Degradation mit Hilfe eines rezipierten Alterungsmodells bewertet. Als dritte Bewertungsgröße fungiert die Nutzerzufriedenheit, die durch die Temperatur im Innenraum bewertet wird. Diese ist im Vergleich zu den Zielgrößen Reichweite und Batterie-Lebensdauer eine Randbedingung, die nicht verletzt werden sollte.

4 Potentialanalyse

Der Stand der Wissenschaft zeigt eine deutliche Einschränkung der Reichweite bei niedrigen Umgebungstemperaturen. Als ursächlich wird im Allgemeinen der Zusatzverbrauch zur Beheizung des Innenraums und der Batterie betrachtet. Die reduzierte Rekuperationsfähigkeit wird nicht im Detail analysiert. In diesem Kapitel werden Fahrdaten eines Tesla Model 3 und eines BMW i3 ausgewertet, um eine getrennte Ursachenbetrachtung zwischen Heizung und Rekuperation durchzuführen. Zusätzlich werden die auftretenden Rekuperationen analysiert, um Anforderungen an ein ETR System abzuleiten. Diese Inhalte wurde im *MDPI World Electric Vehicle Journal* vorveröffentlicht [8].

4.1 Datenbasis

Die Datenbasis der Potentialanalyse kann anhand der Fahrzeuge und der gefahrenen Strecken unterschieden werden. Die zu Grunde liegenden Daten werden an einem BMW i3 (60 Ah) [115] und einem Tesla Model 3 Standard-Range (LFP Batterie) aufgezeichnet.

4.1.1 Fahrzeuge

Die detaillierten Fahrzeugeigenschaften sind in Tabelle 4.1 dargestellt. Die Fahrten erfolgen in und um München und werden von demselben Fahrer durchgeführt, was den Einfluss der Fahrweise minimiert. Die Innenraumklimatisierung wird auf eine Solltemperatur von 22 °C und Automatikmodus eingestellt.

Im BMW werden die Daten über ein CAN Y-Kabel und ein Vector VN1611 Interface an einen Laptop übermittelt und mit Hilfe der Software Vector CANoe aufgezeichnet. Im Tesla wird ebenfalls ein Y-Kabel angeschlossen, das die Daten an einen selbstentwickelten Datenlogger überträgt [116]. Die Datensätze enthalten folgende Signale:

- Längsdynamik: Geschwindigkeit und Höhe
- Batterie: Strom, Spannung, Temperatur und SOC
- HVAC: Strom, Spannung, Innenraum-, Kühlmittel- und Umgebungstemperatur

In beiden Datensätzen wird ein negativer Strom als Ladung bzw. Rekuperation definiert. Beide Datensätze decken einen großen Temperatur- und SOC-Bereich ab und eignen sich daher zur Analyse des Heizungs- und Rekuperationseinflusses auf die Reichweite. Tabelle 4.2 fasst den Datenumfang zusammen.

Tabelle 4.1: Fahrzeugeigenschaften [117–125]

Eigenschaft	BMW i3	Tesla Model 3
Maximalleistung in kW	125	239
Batteriekapazität brutto/netto in kWh	22/18,8	55/50
Batteriezellchemie	NMC	LFP
Fahrzeugmasse in kg	1195	1750
Luftwiderstandsbeiwert	0,29	0,23
Rollwiderstandsbeiwert	0,008	0,011
Fahrzeugquerschnitt (frontal) in m ²	2,38	2,37
Dynamischer Reifenradius in m	0,336	0,325
Trägheitsmoment Antrieb in kgm ²	10,42	10,42
Getriebeübersetzung	9,7	9,0
Reifen	175/60 R19	235/45 R18
Heizgerät	Schicht	PTC

Tabelle 4.2: Eigenschaften der Datensätze

Eigenschaft	BMW i3	Tesla Model 3
Fahrtanzahl	68	44
Distanz in km	1340,8	637,8
Umgebungstemperaturbereich in °C	-3,5 ... 33,5	-6,0 ... 24,0
Batterietemperaturbereich in °C	-1,5 ... 32,0	-9,5 ... 26,0
SOC-Bereich in %	15,4 ... 88,5	15,5 ... 99,5

4.1.2 Fahrten

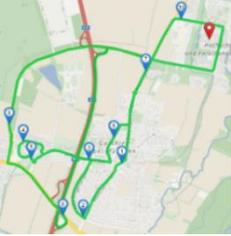
Die Analyse der Fahrdaten erfolgt grundsätzlich in zwei Schritten. Eine Betrachtung aller Fahrten liefert einen Aufschluss über die Heiz- und Rekuperationsleistung bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen und über den SOC-Bereich. Für eine detaillierte Analyse werden wiederholte Fahrten auf einer ausgewählten Überland-Route genutzt. Weil die Daten aus unterschiedlichen Projekten stammen, ist die Anzahl der wiederholten Fahrten stark unterschiedlich. Diese werden folgend vorgestellt.

BMW i3

Die sogenannte FTM-Route wurde von Adermann et al. [51] entwickelt, um die Verbrauchsschwankungen auf Pendler Routen zu beurteilen. Weil diese Route in der Zusammensetzung aus

Stadt-, Überland und Autobahnanteil Standardzyklen wie dem WLTP ähnelt, wird diese auch für diese Studie genutzt. Für den Datensatz wird die FTM Route (Tabelle 4.3) neun Mal gefahren.

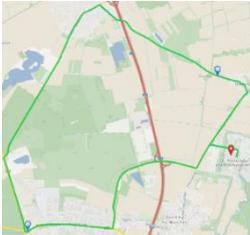
Tabelle 4.3: FTM Route im BMW-Datensatz (*Bild von Grashopper Maps). Entnommen aus [8].

Eigenschaft	FTM Route
Strecke*	
Anzahl	9
Distanz in km	19,2
Durchschnittliche Dauer in min	26
Durchschnittliche Geschwindigkeit	43,8
Batterietemperaturbereich in °C	-1,5 ... 32
SOC-Bereich	20,0 ... 86,1

Tesla Model 3

Die Tesla-Fahrten entstammen einem laufenden Benchmarking-Projekt zur Bestimmung der Reichweite, Effizienz und Lebensdauer von Elektrofahrzeugen und derer Komponenten [126]. Für diese Arbeit werden aufgrund der großen Abdeckung des Temperatur- und des SOC-Bereichs die Überlandfahrten genutzt (Tabelle 4.4).

Tabelle 4.4: Überlandrunde im Tesla Datensatz (*Bild von Grashopper Maps). Entnommen aus [8].

Eigenschaft	Überlandrunde
Strecke*	
Anzahl	5
Distanz in km	20,1
Durchschnittliche Dauer in min	24
Durchschnittliche Geschwindigkeit	51,4
Batterietemperaturbereich in °C	-2,5 ... 24,0
SOC-Bereich	27,8 ... 99,2

4.2 Analysemethodik

Die Einflüsse auf die Reichweite durch die Heizleistung und die verminderte Rekuperationsfähigkeit werden getrennt betrachtet. Zudem werden die charakteristischen Eigenschaften der Rekuperation ermittelt, um die Auswahl geeigneter Heizgeräte für diese Arbeit einzugrenzen.

4.2.1 Analyse der Heizenergie

Die Analyse der Heizenergie erfolgt in zwei Schritten. Eine Betrachtung aller Fahrten zeigt den Anteil der Heizenergie am Gesamtenergieverbrauch und lässt damit auf die reduzierte Reichweite unabhängig von der Rekuperation schließen [127]. Im zweiten Schritt wird die Analyse nur für die wiederholten streckenidentischen Fahrten durchgeführt, um den Reichweiteneinfluss detaillierter zu beobachten.

Zur rekuperationsunabhängigen Analyse wird der Heizenergieanteil HA jeder Fahrt auf den Entladestrom der Batterie bezogen. Dadurch kann der HA als direktes Pendant zur Reduktion der Reichweite betrachtet werden.

$$HA = \frac{\int_0^t I_{Heiz} U_{Heiz} dt}{\int_0^t I_{Bat,Entl} U_{Bat} dt} \quad (4.1)$$

4.2.2 Analyse der Rekuperation

Die Ladefähigkeit der Batterie wird durch ihre Temperatur und ihren SOC begrenzt. Folgend wird die Analysemethodik zur Feststellung der Rekuperationsgrenzen und der Auswirkungen auf die Reichweite beschrieben.

Begrenzung der Rekuperation durch die Batterie

Wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben, schützt das BMS durch die Rekuperationsbegrenzung vor beschleunigter Alterung der Batterie. Die Einflüsse der beiden relevanten Einflussfaktoren auf die Begrenzung der Rekuperation, nämlich die geringe Batterietemperatur und der hohe SOC, lassen sich nicht isoliert betrachten. Dazu müssten Verzögerungsmanöver durchgeführt werden, bei denen ein Einflussfaktor im definierten und unkritischen Bereich die Rekuperation nicht einschränkt, während der andere Faktor variiert wird. Dies ist aufgrund der projektübergreifenden Datengrundlage und der nur kompliziert einzustellenden Batterietemperatur nicht möglich.

Um den Einfluss eines Faktors zu eliminieren und damit die Grenzen des anderen Faktors aus den Datensätzen zu ermitteln, werden jeweils die höchsten Rekuperationsleistungen bei einem Zustand des zu eliminierenden Faktors als Grenzwert erfasst. Die aufgezeichneten Fahrten werden mit einer Schrittweite von 1 °C Batterietemperatur bzw. 1 % SOC geclustert. Abbildung 4.1 zeigt die Korrelation der Einflussfaktoren bei Fahrtbeginn für alle Fahrten beider Datensätze. Es wird deutlich, dass die Fahrten in den relevanten Bereichen begrenzter Rekuperation gleichmäßig verteilt sind. Eingeschränkt ist die Aussagekraft im SOC-Bereich zwischen 65 und 70 %, weil hier ausschließlich Fahrten mit geringer Batterietemperatur vorliegen und es somit zu einer Wechselwirkung kommen wird. Entsprechende Auswirkungen werden in Abschnitt 4.3.2 diskutiert.

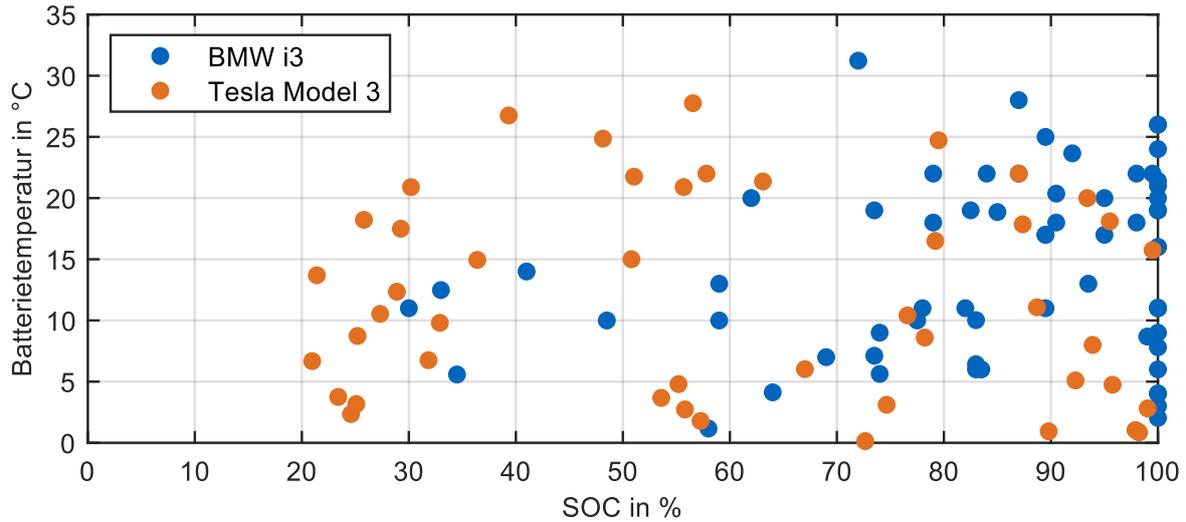


Abbildung 4.1: Korrelation zwischen Batterietemperatur und angezeigtem SOC jeweils zu Fahrtbeginn

Rekuperationsanteil

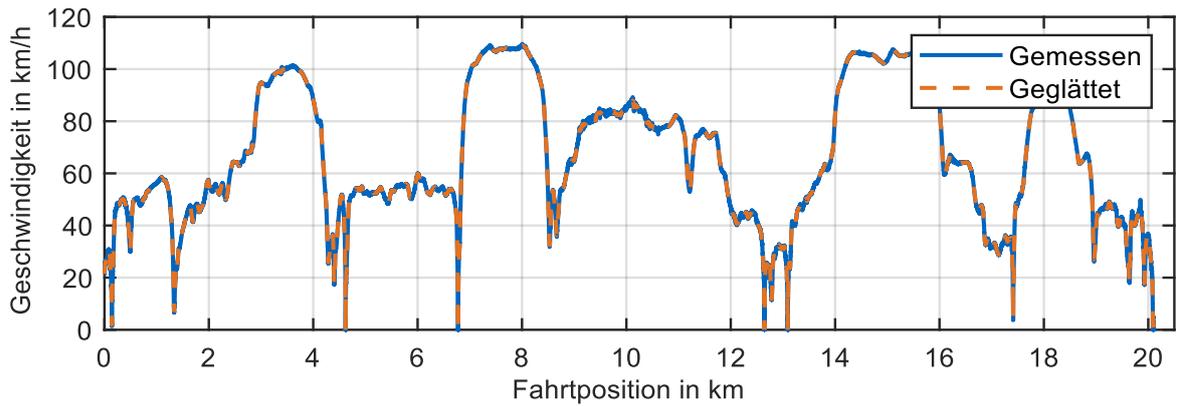
Analog zum Heizenergieanteil kann der Anteil der Rekuperation RA am Gesamtenergiebedarf der Fahrten bestimmt werden. Um wiederum eine von der Heizenergie unabhängige Ermittlung durchzuführen, wird die Rekuperationsenergie nur auf die Traktionsenergie bezogen. RA kann somit als Reichweitensteigerung einer Fahrt mit Rekuperation gegenüber einer Fahrt ohne Rekuperation verstanden werden. Ein Rückschluss auf den Reichweitenverlust kann durch den Vergleich zweier Datenpunkte gezogen werden.

$$RA = \frac{\int_0^t I_{Bat,Lad} U_{Bat} dt}{\int_0^t I_{Bat,Entl} U_{Bat} - I_{Heiz} U_{Heiz} dt} \quad (4.2)$$

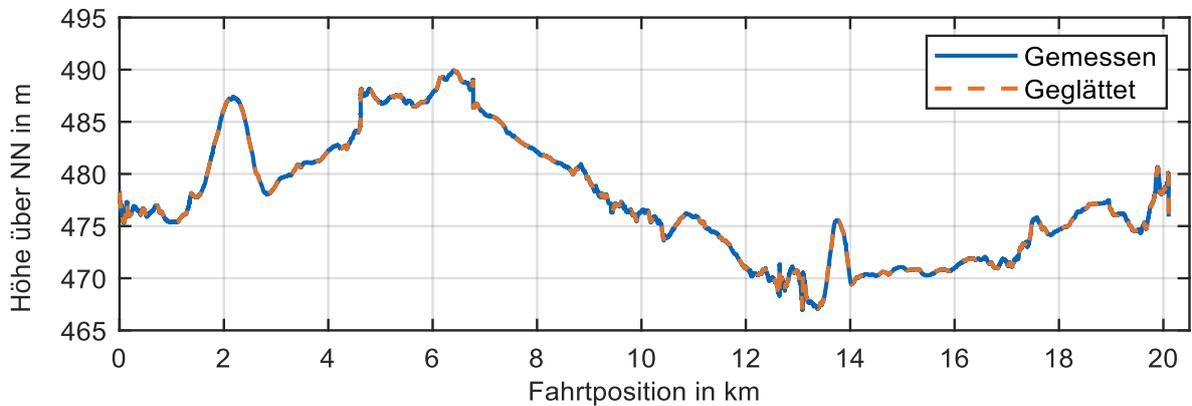
Rekuperationspotential

In diesem Teil der Analyse werden die streckenidentischen Fahrten genutzt, um einen detaillierteren Aufschluss über den Einfluss der Batterietemperatur und des SOC zu geben. Das aufgezeichnete Signal des Batteriestroms wird mit den Ergebnissen einer Längsdynamiksimulation verglichen, deren Input die Fahrzeuggeschwindigkeit und das Höhenprofil sind. Wirkungsgrade des Antriebsstrangs werden nicht berücksichtigt. Durch den Quervergleich zweier Messung-Simulation-Kombinationen lassen sich die Ladefähigkeitsgrenzen der Batterie beobachten.

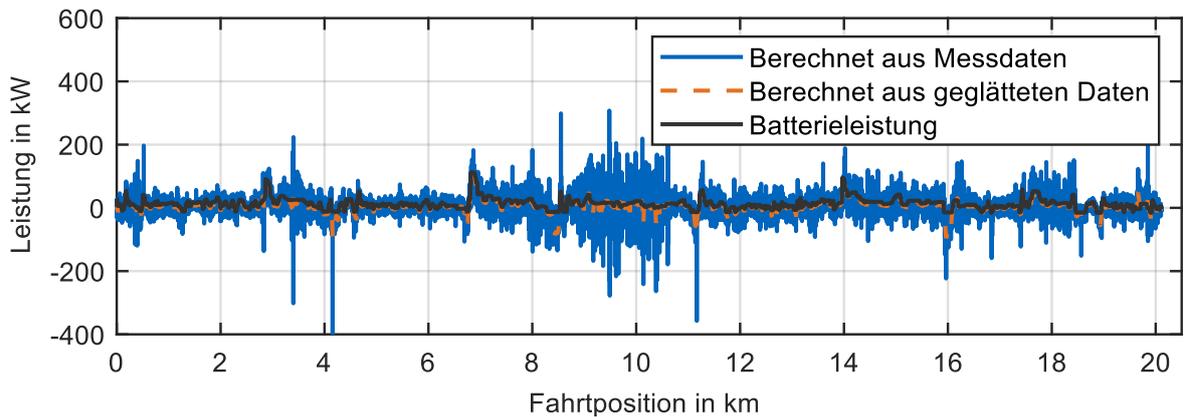
Die diskrete Aufzeichnung des Geschwindigkeits- und des Höhensignals obliegt einem Messrauschen, das durch einen Tiefpassfilter geglättet wird. Ohne die Filterung würden eine Vielzahl kurzer und starker Verzögerungs- und Steigungsphasen in der Simulation auftreten, die zu einem hochdynamischen und physikalisch unplausiblen Fahrwiderstand führen würden. Als Glättungsverfahren wird eine Gaußglättung per gleitendem Mittelwert durchgeführt. Die Festlegung der Bandbreite auf 16 erfolgt heuristisch unter Vergleich mit der gemessenen Batterieleistung. Abbildung 4.2 zeigt die Glättung und die resultierende Fahrwiderstandsleistung.



(a) Geschwindigkeitsprofil



(b) Höhenprofil



(c) Fahrwiderstandsleistung

Abbildung 4.2: Glättung des Geschwindigkeits- und Höhenprofils der Fahrt T-L04 des Tesla Model 3. Entnommen aus [8].

Die Längsdynamiksimulation bildet die Fahrwiderstände ab. Rekuperationspotentiale P_{RP} entsprechen der Fahrwiderstandsleistung, wenn die Summe der Fahrwiderstandsleistungen kleiner als Null ist und der Antriebsstrangstrom kleiner oder gleich Null ist:

$$P_{RP} = \begin{cases} P_{An}, & P_{An} < 0 \cup I_{An} \leq 0 \\ 0, & P_{An} \geq 0 \cap (P_{An} < 0 \cup I_{An} > 0) \end{cases} \quad (4.3)$$

$$I_{AN} = I_{Bat} - I_{Heiz} \quad (4.4)$$

$$P_{An} = P_B + P_L + P_R + P_{St} \quad (4.5)$$

Die Widerstandleistungen des Beschleunigungs-, des Luft- und des Rollwiderstands berechnen sich wie folgt:

$$P_B = \left(m_{Fzg} + \frac{\theta_{An}}{r_{dyn}^2} \right) a_{x,Fzg} v_{x,Fzg} \quad (4.6)$$

$$P_L = 0.5 \rho_L c_{w,Fzg} A_{Fzg} v_{x,Fzg}^3 \quad (4.7)$$

$$P_{St} = m_{Fzg} g \frac{\Delta h}{\Delta s} v_{x,Fzg} \quad (4.8)$$

Die Parametrierung erfolgt durch die Fahrzeugdaten in Tabelle 4.1. Zur Fahrzeugleermasse m_{Fzg} werden 85 kg für den Fahrer und das Messequipment addiert. Das Trägheitsmoment der rotierenden Antriebsstrangkomponenten θ_{An} wird in der Vorveröffentlichung [8] ausführlich zu 10,42 kgm² berechnet.

Die potentielle Rekuperationsenergie E_{RP} berechnet sich als Integral der potentiellen Rekuperationsleistung P_{RP} .

$$E_{RP} = \int_0^t P_{RP} \quad (4.9)$$

Die Relation zwischen der tatsächlichen Rekuperationsleistung und dem Rekuperationspotential P_{RP} ergibt die Rekuperationsnutzung RN .

$$RN = \frac{\int_0^t I_{Bat,Lad} U_{Bat} dt}{\int_0^t P_{RP} dt} \quad (4.10)$$

Als weiterer Beurteilungsparameter wird der potentielle Rekuperationsanteil PRA definiert. Analog zum gemessenen Rekuperationsanteil RA gibt der PRA an, welcher Anteil der Traktionsenergie potentiell rekuperiert werden könnte. Weil im Modell keine Wirkungsgrade berücksichtigt werden, handelt es sich um einen theoretischen Wert, der zum Vergleich zwischen Fahrten dient.

$$PRA = \frac{\int_0^t P_{RP} dt}{\int_0^t I_{Bat,Entl} U_{Bat} - I_{Heiz} U_{Heiz} dt} \quad (4.11)$$

Die gemessene Reichweitenreduktion MRR beschreibt die Reduktion der Reichweite durch die verringerte Rekuperation im Vergleich zu einer streckenidentischen Referenzfahrt. Es gilt zu berücksichtigen, dass Fahrten aufgrund der Verkehrslage in ihrem Geschwindigkeitsprofil variieren und der MRR daher keinen präzisen Aufschluss gibt. Aufgrund der Normierung des Rekuperationsanteils RA und der Tatsache, dass die Fahrten vom selben Fahrer durchgeführt werden, kann der Wert dennoch ein Indikator für Reichweiteneinschränkungen sein.

$$MRR = RA_{Ref} - RA_x \quad (4.12)$$

Die Differenz des potentiellen Rekuperationsanteils PRA und des gemessenen Rekuperationsanteils RA ergibt das ungenutzte Reichweitenpotential URP . Das URP unterliegt Ungenauigkeiten aufgrund des nicht berücksichtigten Wirkungsgrads und dient daher dem Vergleich zweier Fahrten statt einer exakten quantitativen Bewertung.

$$URP = PRA - RA \quad (4.13)$$

4.3 Ergebnisse der Potentialanalyse

Analog zur Methodik ist dieser Abschnitt in die Analyse der Reichweitenreduktion durch die Innenraumbeheizung bzw. durch die verringerte Rekuperationsfähigkeit unterteilt. Die Rekuperation wird zusätzlich in ihrem zeitlichen und leistungsspezifischen Auftreten betrachtet, um eine Auswahl einsetzbarer Heizgeräte zu treffen.

4.3.1 Einfluss der Innenraumbeheizung

Der berechnete Heizenergieanteil HA in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur zu Fahrtbeginn ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Jeder Punkt entspricht einer Fahrt. Es wird deutlich, dass der HA mit sinkender Temperatur ansteigt. Die maximalen Werte betragen 31,9 % (Tesla) bzw. 30,0 % (BMW). Folglich kann die Innenraumbeheizung die Reichweite um fast ein Drittel reduzieren. Die Größenordnung bestätigt viele Ergebnisse aus dem Stand der Wissenschaft [7, 48, 49, 128]. Ursächlich für den geringfügig geringeren HA dieser Ergebnisse ist der höhere Traktionsenergiebedarf durch die Verwendung dynamischerer Fahrzyklen. Die weitaus höheren Reichweitenverluste von 45 % durch Taggart [6] bzw. 70 % durch Delos Reyes et al. [47] können zum einen durch den zusätzlichen und nicht getrennt betrachteten Einfluss der reduzierten Rekuperation erklärt werden. Zudem untersuchten Delos Reyes et al. [47] den Reichweitenverlust bei extremen -26 °C .

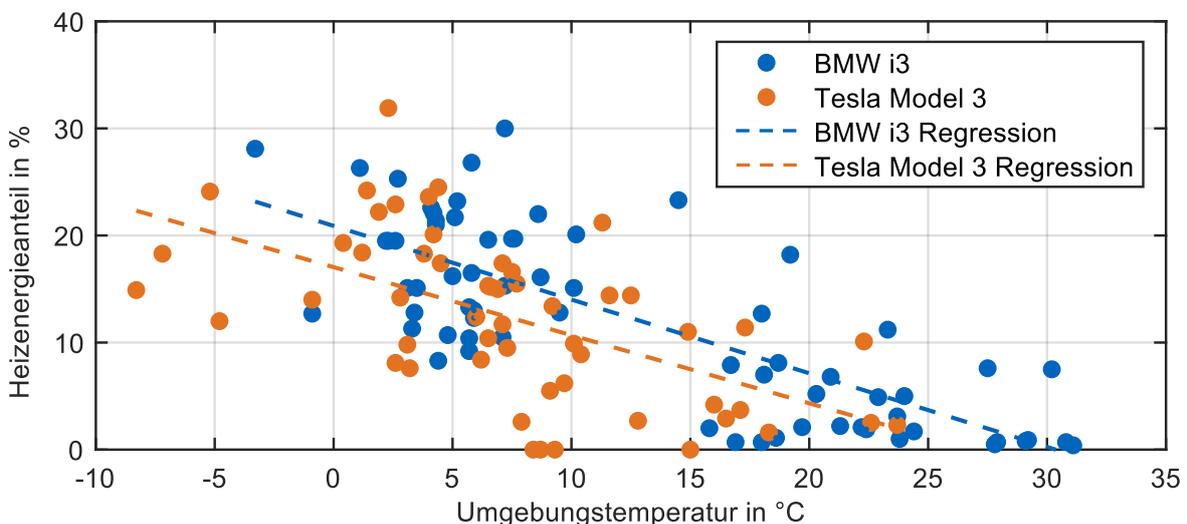


Abbildung 4.3: Heizenergieanteil (HA) abhängig von der Umgebungstemperatur. Entnommen aus [8].

Für die detaillierte Betrachtung werden pro Fahrzeug jeweils drei streckenidentische Fahrten bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen ausgewählt. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 4.5. Es wird deutlich, dass neben der Umgebungstemperatur auch die Wetterbedingungen einen Einfluss auf den *HA* haben. Der Vergleich der Fahrten FTM01 und FTM06 des BMW bzw. R01 und R02 des Tesla zeigt einen höheren *HA* bei höheren Temperaturen, der durch die unterschiedliche Sonneneinstrahlung bzw. die verbesserte Karosserie-Wärmeleitfähigkeit durch Nässe erklärt werden kann.

Tabelle 4.5: Energieverbrauch streckenidentischer Fahrten

Eigenschaft	BMW i3			Tesla Model 3		
	FTM07	FTM06	FTM01	R01	R02	R05
Fahrtnummer	FTM07	FTM06	FTM01	R01	R02	R05
Umgebungstemperatur in °C	1	3,5	8,5	-5	2	23,5
Wetter	sonnig	bedeckt	wolkig	sonnig	Schneefall	wolkig
Gesamtenergie in kWh	4,52	4,30	4,23	4,27	4,43	3,41
Heizenergie in kWh	0,88	0,55	0,58	0,60	1,05	0,09
HA in %	19,45	12,79	13,71	14,05	23,70	2,64

4.3.2 Einfluss der Rekuperationslimitierung

Die maximale Rekuperationsleistung abhängig von der Batterietemperatur zeigt Abbildung 4.4. Die maximale Rekuperation der aufgezeichneten Fahrdaten beträgt beim Tesla 68 kW, beim BMW 51 kW. Über 10 °C zeigen beiden Fahrzeuge ein nahezu konstantes Rekuperationsvermögen. Schwankungen sind auf die variierende Fahrdynamik zurückzuführen. Es wird deutlich, dass das BMS die Rekuperation unter 10 °C deutlich limitiert. Ab -4 °C abwärts ist beim Tesla keine Rekuperation mehr möglich. Beim BMW zeigt sich eine vergleichbare Tendenz, die Datenbasis reicht jedoch nur bis -1,5 °C.

Abbildung 4.5 illustriert die Abhängigkeit der Rekuperationsleistung vom SOC. Bei geringen SOC zeigt sich eine Reduktion auf 37 kW (Tesla) bzw. 26 kW (BMW). Der Tesla erreicht seine maximale Rekuperationsleistung bei 50 % SOC, der BMW bei ca. 76 %. Besonders relevant ist die signifikante Leistungsreduktion bei hohen SOC, die bei beiden Fahrzeugen ab ca. 85 % eintritt. Beim Tesla sinkt die maximale Rekuperation auf 20 kW, beim BMW auf 33 kW.

Zwischenfazit: Eine Reduktion der Rekuperationsleistung wird sowohl durch geringe Temperaturen als auch durch hohe SOC erzeugt. Der Einfluss der Temperatur tritt deutlich stärker auf und kann die Rekuperation nahezu gänzlich ausschließen.

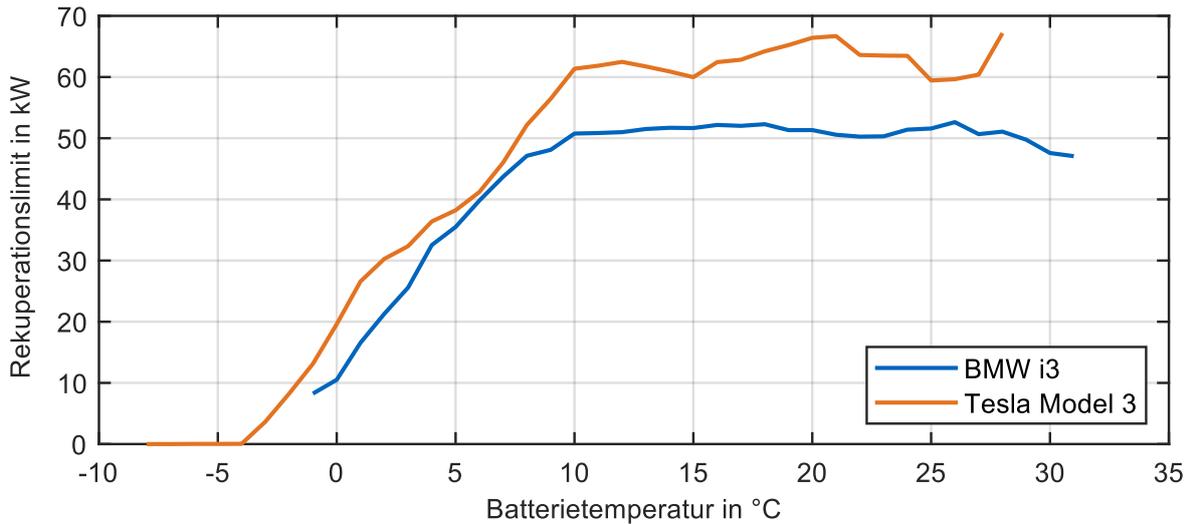


Abbildung 4.4: Begrenzung der Rekuperation durch die Batterietemperatur. SOC variiert. Entnommen aus [8].

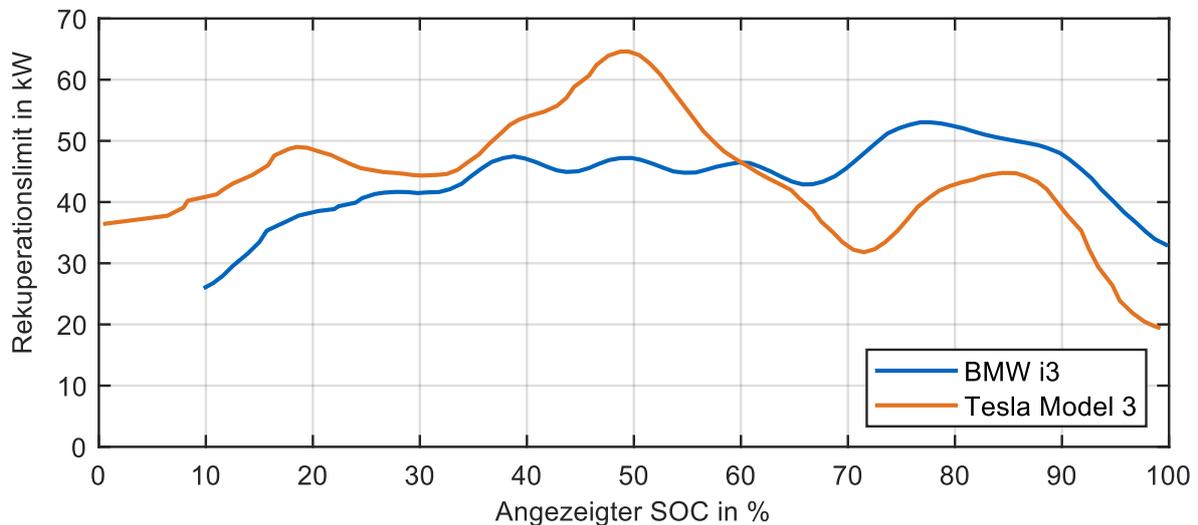


Abbildung 4.5: Begrenzung der Rekuperation durch den SOC. Batterietemperatur variiert.

Angemerkt sei an dieser Stelle, dass sich auch das Verhalten des Fahrpedals stark ändert. Bei geringen Temperaturen und hohem SOC ist kein regeneratives Bremsen und folglich keine One-Pedal Fahrweise möglich. Dieses unterschiedliche Verhalten kann zu sicherheitskritischen Fahr-situationen führen, wenn sich der Fahrer auf das regenerative Bremsen verlässt.

Der Anteil der Rekuperationsenergie an der Traktionsenergie wird in Abbildung 4.6 dargestellt. Der maximale RA beträgt 42,2 % (Tesla) bzw. 38,6 % (BMW). Bei einer komplett unterbundenen Rekuperation würden diese Werte die Reichweitenverluste allein durch die Rekuperationslimitierung ausdrücken. Allerdings tritt eine solche Einschränkung aufgrund des sinkenden SOC und der steigenden Batterietemperatur während der Fahrt in den Datenbasen nicht auf. Die Regressionsgeraden zeigen einen höheren RA beim Tesla, der durch die höhere maximale Rekuperationsleistung (vgl. Abbildung 4.4) zu erklären ist. Bei 20 °C entspricht der RA des Tesla im Durchschnitt ca. 30 %, bei 0°C noch ca. 15 %. Das bedeutet, die Differenz von 15 % entspricht dem durchschnittlichen Reichweitenverlust, der durch die Rekuperationslimitierung entsteht.

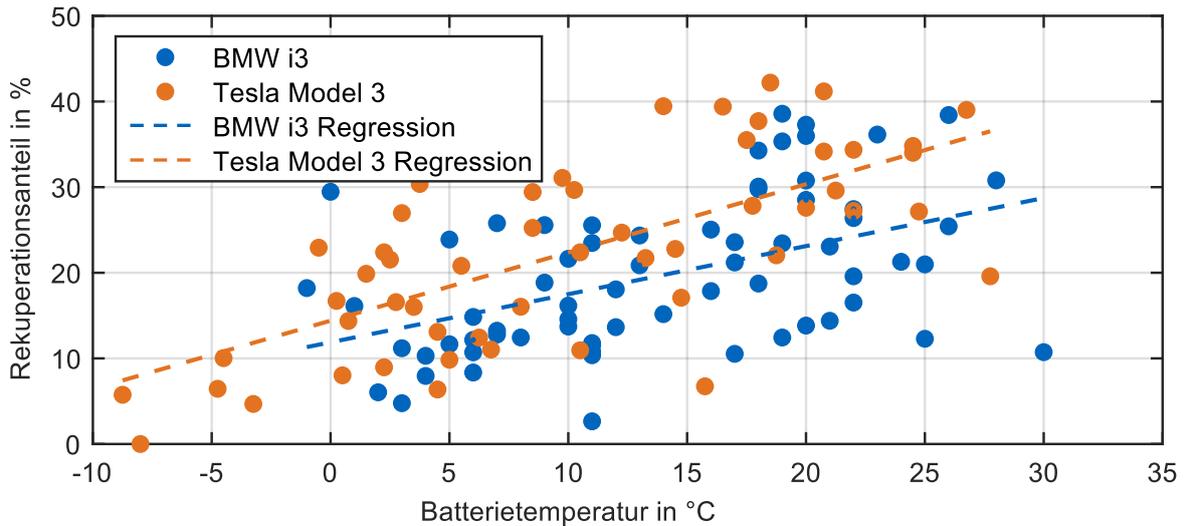


Abbildung 4.6: Rekuperationsenergieanteil an der Traktionsenergie abhängig von der Batterietemperatur. Entnommen aus [8].

Analog zur Analyse der Heizleistung wird folgend ein Detailvergleich zwischen streckenidentischen Fahrten vorgestellt. Um die Übersichtlichkeit zu wahren, beschränkt sich die Analyse an dieser Stelle auf den Datensatz des Tesla. Die Analyse des BMW wird in [8] dargestellt. Der Einfluss der Temperatur wird mit Hilfe von drei Fahrten durchgeführt. Diese werden aufgrund ihrer vergleichbaren Dynamik bei unterschiedlichen Batterietemperaturen ausgewählt. Der SOC variiert zwar ebenfalls stark, liegt aber mit 28 % bis 78 % in einem Bereich, in dem wenig Rekuperationslimitierung auftritt. Daher wird folgend der Einfluss der Batterietemperatur analysiert, die sich deutlich unterscheidet. Abbildung 4.7 zeigt den Geschwindigkeits-, den Batterietemperatur- und den SOC-Verlauf in Abhängigkeit der Fahrtposition für drei Überlandfahrten. Diese Darstellung statt der üblichen Zeitabzisse ermöglicht einen Vergleich, insbesondere bei den Geschwindigkeits- und den folgenden Leistungsverläufen.

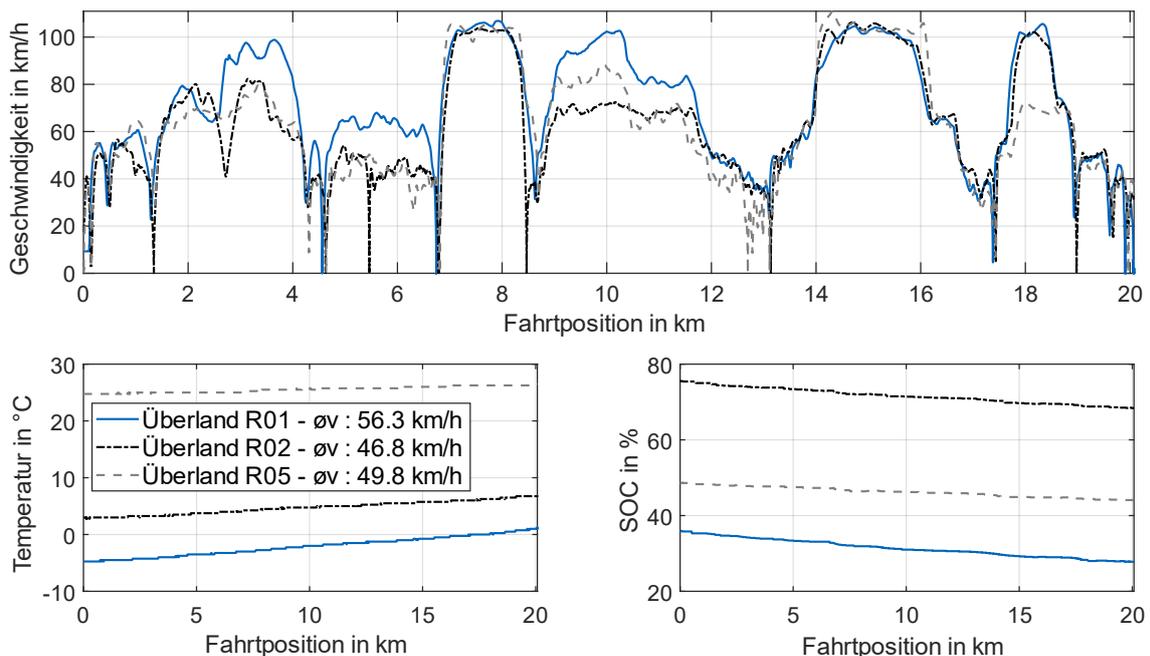
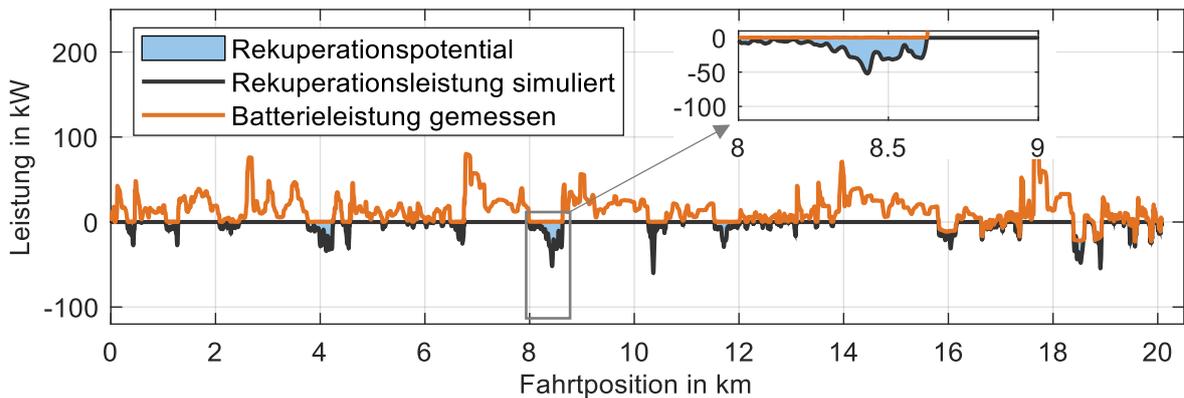
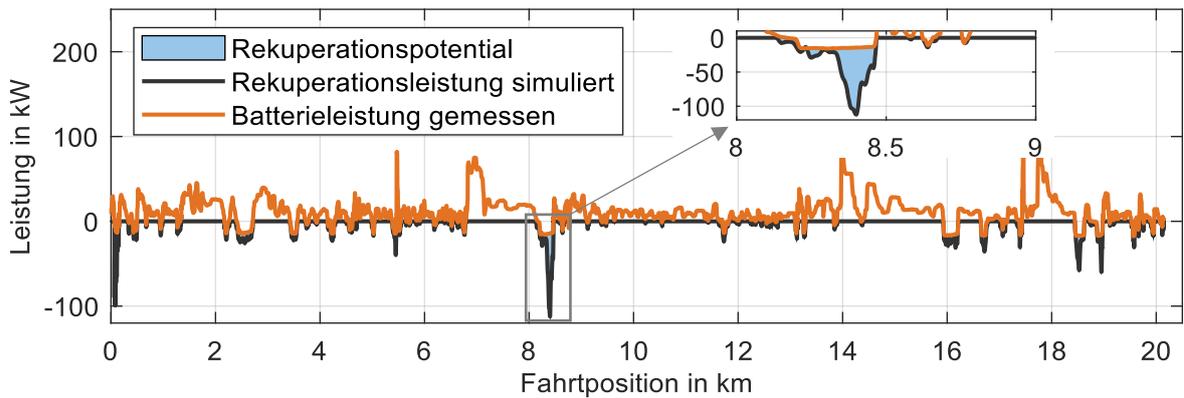


Abbildung 4.7: Geschwindigkeit, Batterietemperatur und Ladezustand der Tesla Model 3 Überlandfahrten R01, R02 und R05.

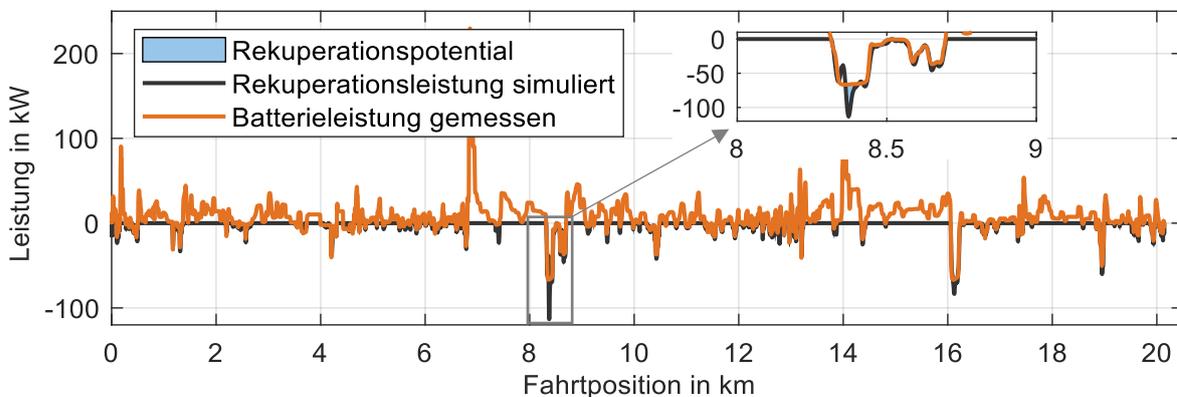
Während die Batterietemperatur in Fahrt R01 größtenteils negativ ist, beträgt die Durchschnittstemperatur der Fahrt R05 25 °C. In Abbildung 4.8 werden die gemessenen und die simulierten Batterieleistungsverläufe dargestellt. Die blau markierten Flächen bilden die Differenz und damit die ungenutzte Rekuperationsenergie. Während bei der kältesten Fahrt R01 bis zu Kilometer 16 kaum rekuperiert wird, deckt die Rekuperation diese vergleichbaren Leistungen bei der wärmsten Fahrt R05 nahezu vollständig ab. Bei Fahrt R02 zeigt sich eine geringere Rekuperationslimitierung als bei Fahrt R01, wie in den Vergrößerungen erkannt werden kann.



(a) Leistungsvergleich für Fahrt R01 ($T_{Bat} = -5\text{ °C}$, $SOC = 36\%$)



(b) Leistungsvergleich für Fahrt R02 ($T_{Bat} = 3\text{ °C}$, $SOC = 76\%$)



(c) Leistungsvergleich für Fahrt R05 ($T_{Bat} = 25\text{ °C}$, $SOC = 49\%$)

Abbildung 4.8: Vergleich Rekuperationslimitierung des Tesla Model 3 auf Überlandfahrten

Mit Hilfe der in Abschnitt 4.2.2 definierten Parameter werden die beobachteten Effekte in Tabelle 4.6 quantifiziert. Die Antriebsenergie E_A und die potentielle Rekuperationsenergie E_{RP} befinden sich für alle drei Fahrten in einer vergleichbaren Größenordnung, während die rekuperierte Energie mit steigender Batterietemperatur um den Faktor 4 steigt. Der sich ergebende RA beträgt bei der warmen Landrunde R05 28,3 % und sinkt für die Fahrt R01 auf 6,6 %.

Tabelle 4.6: Quantifizierende Auswertung der streckenidentischen Fahrten des Tesla

Kennwert	R01	R02	R05
Batterietemperatur Fahrtbeginn T_{Bat} in °C	-8,8	3,4	23,5
Antriebsenergie E_A in kWh	3,51	3,21	3,18
Rekuperierte Energie E_{Reku} in kWh	0,23	0,55	0,90
Potentiell rekuperierbare Energie E_{RP} in kWh	1,02	1,25	1,01
Rekuperationsenergieanteil RA in %	6,60	17,13	28,30
Rekuperationsnutzungsgrad RN in %	22,55	44,00	89,11
Potenzielle Rekuperationsenergieanteil PRA in %	29,06	38,94	31,76
Ungenutztes Reichweitenpotenzial URP in %	21,70	21,81	3,46
Gemessener Reichweiteneinfluss MRR in %	22,46	11,17	Referenz

4.4 Anforderungen zur elektrothermischen Rekuperation

Die vorhergehende Analyse zeigt, dass die Batterie bei geringen Temperaturen und hohem SOC nicht in der Lage ist, die Verzögerungsenergie aufzunehmen. Stattdessen muss diese Energie durch die Reibbremsen umgesetzt werden. Ein System zur ETR könnte diese Energie als Heizenergie nutzbar machen. Um die Anforderungen eines solchen Systems abzuleiten, werden die Datensätze des BMW i3 und des Tesla Model 3 hinsichtlich der Rekuperationscharakteristika, konkret Leistung und Dauer, untersucht. Die Fahrten werden anhand der Batterietemperatur zu Fahrtbeginn klassifiziert, um Fehler durch Rekuperationslimitierungen auszuschließen. Eine Einteilung anhand des SOC wird aufgrund des weitaus geringeren Einflusses auf die Rekuperation (Abbildung 4.5) nicht vorgenommen. Die relative Häufigkeit der Leistungs- und Dauerklassen wird in Abbildung 4.9 für den BMW bzw. in Abbildung 4.10 für den Tesla gezeigt.

Die Dauer von über 50 % der Rekuperationsphasen beträgt weniger als 3 s, was durch das One-Pedal-Feeling erklärt werden kann. Schon kleine Reduktionen der Kraft auf das Fahrpedal führen zu unmittelbaren Rekuperationsphasen. Der größte Anteil der Rekuperationsphasen tritt in der Klasse zwischen 1 s und 3 s auf. Bei negativen Batterietemperaturen treten beim BMW nur zwischen 1 s und 3 s und zwischen 5 s und 10 s Rekuperationen auf. Ursächlich ist die geringe Datenbasis in diesem Bereich. Im Gegensatz zeigt der Tesla in diesem Bereich für jede Dauerklasse Rekuperationsphasen. Ein Einfluss der Temperatur auf die Rekuperationsdauer kann hingegen aus dieser Analyse nicht abgeleitet werden. Insgesamt dauern 95 % der Rekuperationsphasen weniger als 20 s.

Bei der Analyse der Rekuperationsleistungen wird der Einfluss des One-Pedal-Feelings durch den hohen Anteil von Rekuperationsphasen geringer Leistung deutlich. Folglich bremst der Fahrer oft nur leicht. Beim BMW treten ca. 10 % der Rekuperationsphasen zwischen 2,5 kW und 5 kW auf. Rekuperationen mit höherer Leistung finden kaum statt. Beim Tesla werden gleichbleibend Rekuperationen bis 20 kW beobachtet. Stärkere Rekuperationsphasen sind auch hier selten.

Aus dieser Analyse werden folgende Anforderungen an ein ETR System abgeleitet:

- Die Reaktionszeit sollte ca. 1 s nicht überschreiten, um die vielen kurzen Rekuperationsphasen aufnehmen zu können.
- Zur Umwandlung des Großteils der Rekuperationsleistung sollte die maximale Leistung ca. 20 kW betragen. Ein System mit mehr Leistung würde durch seinen hohen Preis in diesem kostensensiblen Bereich keine Akzeptanz finden.

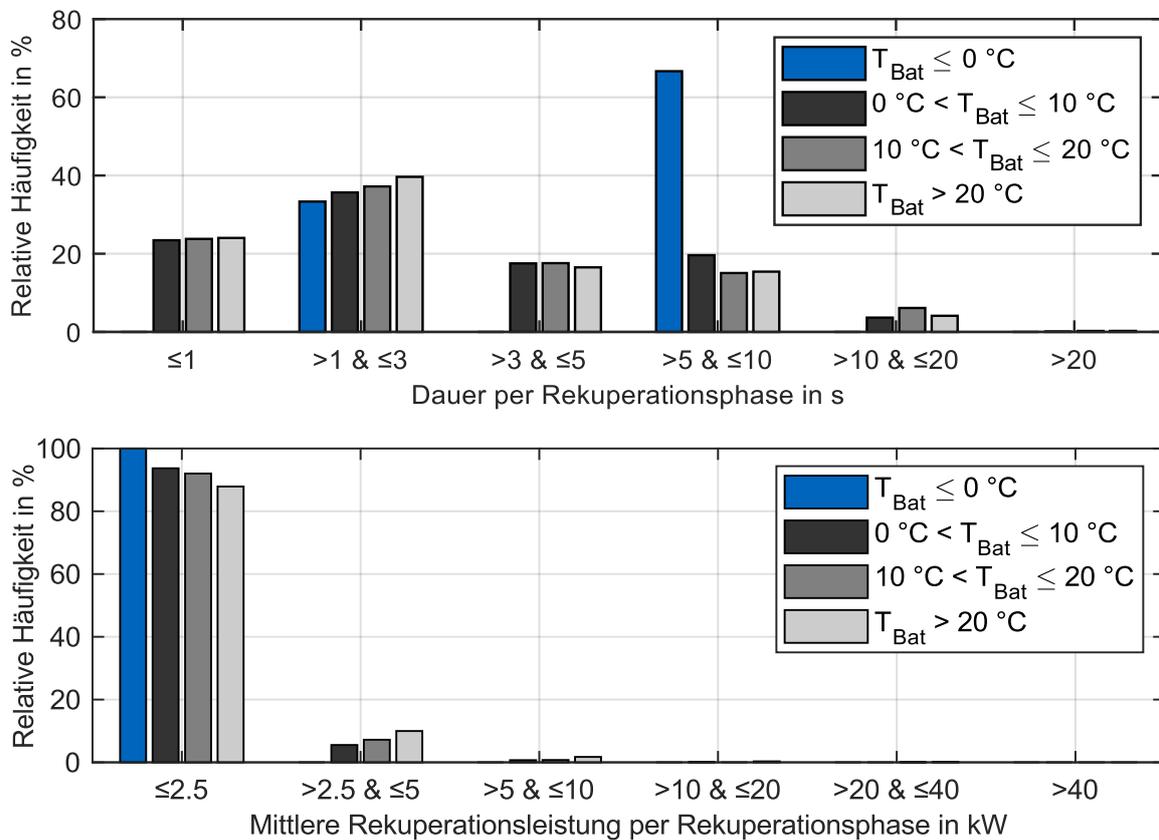


Abbildung 4.9: Rekuperationscharakteristika – BMW. Entnommen aus [8].

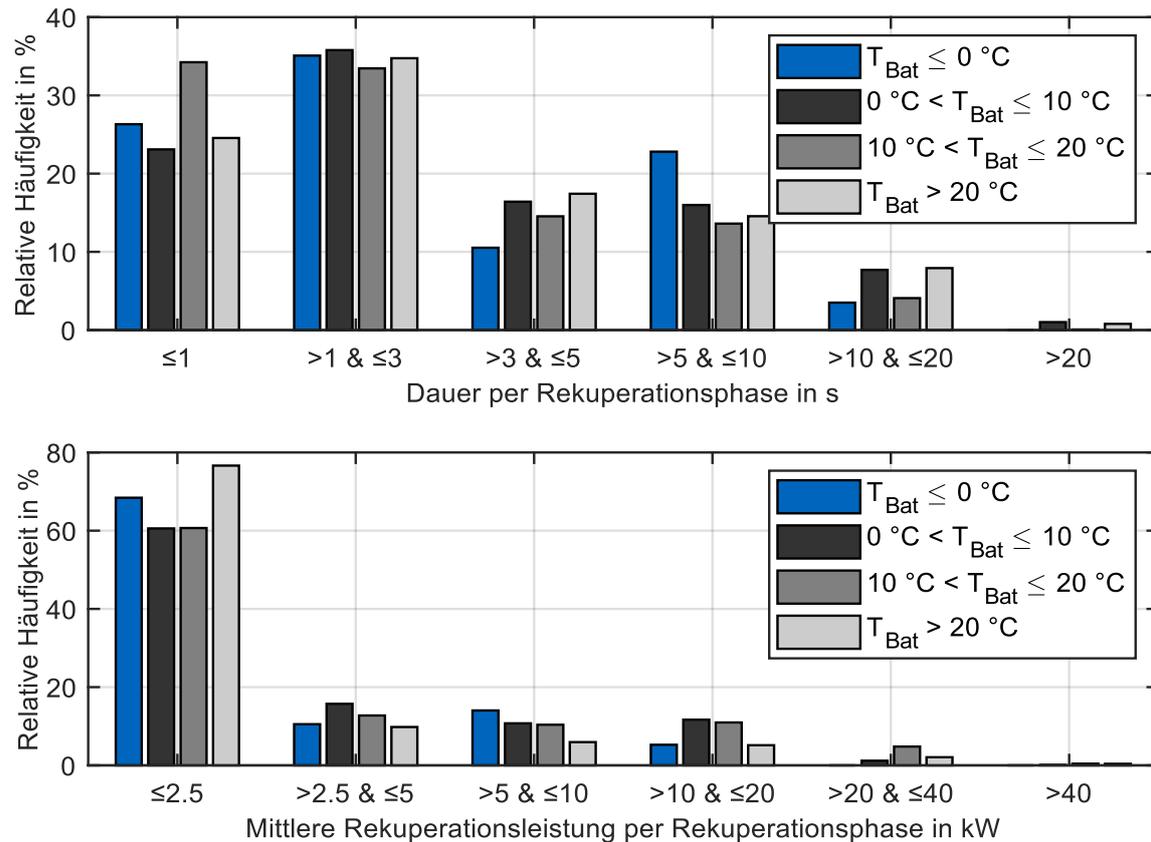


Abbildung 4.10: Rekuperationscharakteristika – Tesla. Entnommen aus [8].

4.5 Vergleich der Heizgeräte

Mit diesem Unterkapitel wird beschrieben, welche Heizgeräte die zuvor formulierten Anforderungen erfüllen. Weil in der aktuellen Fahrzeuggeneration hauptsächlich PTC- und Schichtheizer zum Einsatz kommen, werden aufeinanderfolgend ein Webasto HVH Gen1.5 [28] als Schichtheizer und ein Eberspächer Catem Gen3 [129] als PTC-Heizer getestet. Beide Heizgeräte besitzen eine Heizleistung von bis zu 7 kW. Drahtheizer werden vernachlässigt, weil sie aufgrund ihres Aufbaus ein träges Verhalten besitzen, das der Anforderung der Leistungsspontanität nicht gerecht wird.

Der Vergleich der Heizgeräte erfolgt in Zusammenarbeit mit Hermann [130] auf einem von Seitz [33] konzipierten Prüfstand. Der Aufbau des Prüfstands wird dem realen Heizkreislauf im Versuchsfahrzeug BMW i3 nachempfunden. Die Kühlmittelschläuche besitzen einen Innendurchmesser von 20 mm und bestehen aus textilverstärktem Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM). Der Heizwärmetauscher (HWT) stammt von DENSO (Teilenummer: 3C0.819.031.A). Weil dieser nicht in der Lage ist, dem System die eingebrachte Wärme durch Vollast des Heizgeräts zu entziehen, wird zusätzlich ein Kühler verbaut. Im Gesamtsystem befinden sich 2,3 l eines Gemisches aus Wasser und 50 % Glysantin und damit mehr Kühlmittel als mit 1,8 l im Kleinwagen Chevrolet Bolt EV [131]. Die Kühlmitteltemperaturen werden mit Hilfe von Pt100 Sensoren vor und nach dem Heizgerät und dem HWT erfasst. Der Volumenstrom des Kühlmittels wird über einen Volumenstromsensor (Danfoss MAG 1100) gemessen. Die Luftströme werden durch ein steuerbares Radialgebläse erzeugt, gleichgerichtet und die Temperaturen durch Messgitter vor und nach dem HWT gemessen und gemittelt. Der Prüfstand

wird in einer Klimakammer bei 0 °C betrieben. Die Versuchsdurchführung erfolgt vollfaktoriell bei einem Kühlmittelvolumenstrom von $\dot{V}_{KM} = [200,400,600] \text{ l/h}$ und einem Luftmassenstrom von $\dot{m}_L = [150,300,450] \text{ kg/h}$.

Die Ergebnisse der Prüfstandsversuche dienen u. a. der späteren Validierung des Modells in Abschnitt 5.4.3. An dieser Stelle ist das Anlaufverhalten relevant. Beide Geräte werden initialisiert und mit einer sprunghaften Leistungsanforderung von 5 kW beaufschlagt. Gemessen wird der Strom, der multipliziert mit der konstanten Prüfstandsspannung von 350 V die Leistungsreaktionen in Abbildung 4.11 ergibt. Im Realfahrzeug würde die Spannung der Batterie kurzfristig geringfügig einbrechen, was im Versuch unberücksichtigt bleibt.

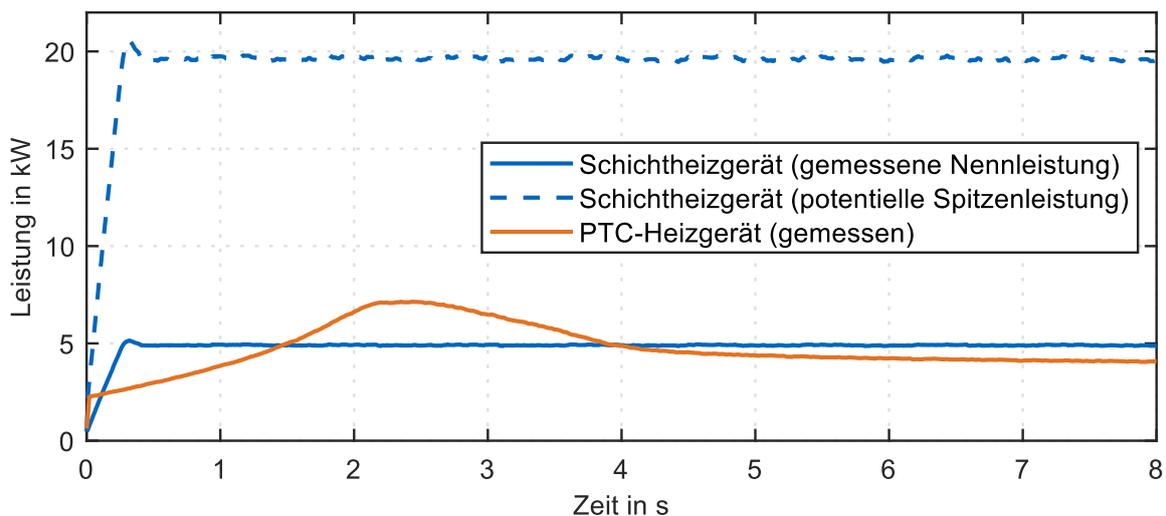


Abbildung 4.11: Vergleich des Anlaufverhaltens zwischen Schicht- und PTC-Heizer

Das Schichtheizgerät erreicht die angeforderten 5 kW nach ca. 0,3 s, zeigt ein geringes Überschwingen der Leistung und hält folgend die Leistung nahezu konstant. Im Gegensatz dazu tritt beim PTC-Heizgerät zunächst ein Sprung auf 2,3 kW auf und die anschließende Leistungssteigerung nimmt stark ab, sodass erst nach 1,4 s die geforderte Leistung erreicht wird. Es folgt ein starkes Überschwingen der Leistung und die PTC-typische Reduktion der Leistung durch den Anstieg des Widerstands in Folge des Temperaturanstiegs. Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass nur das Schichtheizgerät die Anforderungen einer Reaktionszeit von unter 1 s erfüllt.

Aus Abschnitt 4.4 wird als weitere Anforderung eine Spitzenleistung von 20 kW abgeleitet. Weder das Schicht- noch das PTC-Heizgerät erfüllen diese Anforderungen in ihrem Nennbetrieb mit 7 kW. Während das PTC-Heizgerät aufgrund seiner auf die Nennleistung ausgelegten Widerstandscharakteristik nicht in Überlast betrieben werden kann, kann die Einschaltzeit der Pulsweitenmodulation beim Schichtheizgerät dies erreichen. In weiteren Tests auf einem HiL-Prüfstand wird die maximale Leistung des Schichtheizgeräts getestet. Die elektronische Steuerungseinheit (engl. Electronic Control Unit - ECU) wird deaktiviert, sodass die Leistung direkt über die Einschaltzeit der PWM gesteuert werden kann. Es zeigt sich, dass mit der aktuellen Geräteausführung Gen1.5 bis zu 14 kW abrufbar sind. Die Reaktionszeit bleibt im Vergleich zur 5 kW Anforderung identisch. Durch eine Anpassung des Heizwiderstands kann diese Leistung theoretisch erhöht werden, was auch bei neueren Generationen mit Nennleistungen bis 10 kW beobachtet wurde. Damit erfüllt der Schichtheizgerät prinzipiell auch die Leistungsanforderung von bis zu 20 kW.

5 Modellbildung und Validierung

Das Modell des Projektfahrzeugs BMW i3 bildet die Grundlage für die Implementierung der Betriebsstrategien, die im folgenden Kapitel 6 beschrieben werden. Das Ziel der Modellierung ist eine ausreichend exakte Abbildung des Realfahrzeugs in den relevanten Modellteilen Längsdynamik, Batterie und Heizkreislauf. Differenzen in Signalverläufen zwischen Simulation und Messdaten, die zwangsläufig durch die hohe Komplexität und hohe Anzahl der Einflussgrößen entstehen, spielen in der Ergebnisbeurteilung eine untergeordnete Rolle, weil sie sich durch den Vergleich von Simulationen aufheben. Folgend wird die Modellierung und Validierung der Teilmodelle beschrieben, die im *MDPI World Electric Vehicle Journal* [55] und dem *Journal eTransportation* [132] vorveröffentlicht wurden.

5.1 Längsdynamikmodell

Das Längsdynamikmodell basiert auf der Open-Source Bibliothek *sim2gether* von Danquah et al. [133]. Die Anpassung auf den BMW i3 erfolgte im Wesentlichen durch die Fahrzeugdaten in Tabelle 4.1. Es handelt sich um eine geschwindigkeitsgeregelterte Vorwärtssimulation (Abbildung 5.1), deren Schrittweite von 1 s auf 0,1 s angepasst wurde, um die dynamischen Prozesse im elektrischen Antriebsstrang besser abzubilden.

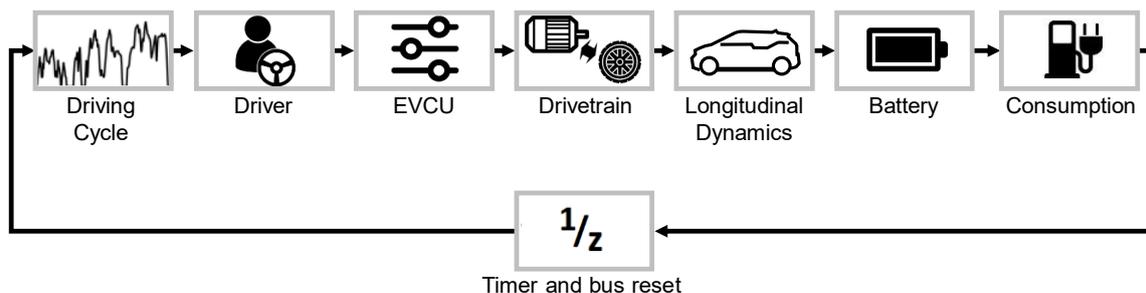


Abbildung 5.1: Struktur und Signalfluss des Längsdynamikmodells nach [132, 133].

5.1.1 Modellierung

Dem im Submodell *Driving Cycle* vorgegebenen Geschwindigkeitsprofil folgt das Fahrzeug über eine PI-Regelung der Pedalstellung im *Driver* Submodell. Die Pedalstellungen werden vom Steuergerätemodell *EVCU* in angeforderte Drehmomente umgerechnet. Im Verzögerungsfall wird die Rekuperationsleistung abhängig von der Batterietemperatur und dem SOC durch das Kennfeld, dargestellt in Abbildung 5.2, begrenzt [134]. Zur Kennfelderstellung wurde die Rekuperationsleistung der aufgezeichneten Realfahrdaten [115] ausgewertet. Zusätzlich wurden Bremsmanöver auf einem klimatisierten Zwei-Achs-Rollenprüfstand durchgeführt, um die Datenbasis um Batterietemperaturen bis -10 °C zu berücksichtigen.

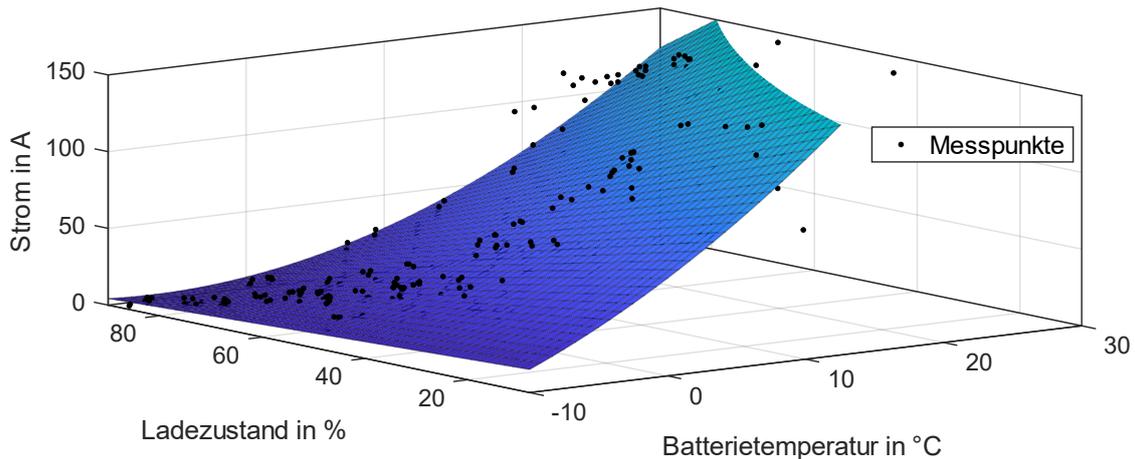


Abbildung 5.2: Begrenzung der Rekuperation. Entnommen aus [55].

Das Submodell *Drivetrain* berechnet die Antriebs- und Verzögerungskräfte durch hinterlegte PSM-Wirkungsgradkennfelder, die mit Hilfe des Tools nach Kalt et al. [135] erstellt werden, sowie anhand von verlustberücksichtigenden Getriebe- und Bremssystemmodellen. Über die Fahrwiderstandsgleichungen (4.6) - (4.8) wird die Fahrzeuggeschwindigkeit bestimmt. Der Antriebsstrom wird durch Division der Leistung durch die vorliegende Batteriespannung (siehe das folgende Unterkapitel 5.2) bestimmt und ergibt in Summe mit den Strömen der Nebenverbraucher den Batteriestrom. Letztlich dient das *Consumption* Subsystem der Auswertung u. a. des Energieverbrauchs. Der *Delay* Block dient zur Berechnung des Geschwindigkeitsunterschieds zwischen dem aktuellen und dem vorherigen Schritt, um Modellschleifen auszuschließen.

5.1.2 Validierung

Zur Validierung der Teilmodelle werden aus den Fahrdaten [115] einzelne Fahrten ausgewählt, um eine hohe Modellgenauigkeit in den relevanten Bereichen hoher SOC und geringer Batterietemperaturen zu erzielen. Zusätzlich wird eine Standzeit von 12 h vor Fahrtbeginn vorausgesetzt, um Restwärme zu vermeiden. Tabelle 5.1 zeigt die gewählten Einzelfahrten.

Tabelle 5.1: Gemittelte Umgebungstemperatur T_{Umg} , SOC und Batterietemperatur $T_{Bat,Start}$ zu Fahrtbeginn, sowie Innenraumstart- und Innenraumsolltemperatur $T_{Innen,Start}$ bzw. $T_{Innen,Soll}$ für die ausgewählten Fahrten zur Validierung der Teilmodelle

Realfahrt	T_{Umg} in °C	SOC_{Start} in %	$T_{Bat,Start}$ in °C	$T_{Innen,Start}$ in °C	$T_{Innen,Soll}$ in °C
A10	24,0	69,6	22,0	38,0	25,0
B01	9,6	86,1	7,0	12,7	25,0
B08	10,6	67,3	7,0	6,5	23,5
B14	3,7	85,5	3,0	7,5	25,0
B15	2,9	85,1	9,0	3,4	23,5
B27	3,4	52,9	1,0	2,4	23,0

Der Übersichtlichkeit halber werden die Verläufe der Geschwindigkeit v_{Fzg} , des Motormoments T_M und des Batteriestrom I_{Bat} von Trip B08, jeweils simuliert und gemessen, diskutiert. Diese Fahrt bildet mit vielen Beschleunigungen und Verzögerungen sowie Geschwindigkeiten bis zu 112 km/h einen breiten Validierungsbereich ab. In Abbildung 5.3 (a) wird deutlich, dass die Geschwindigkeitsregelung der Vorgabe folgt. Die mittlere absolute Abweichung beträgt 0,3 km/h über alle Validierungsfahrten.

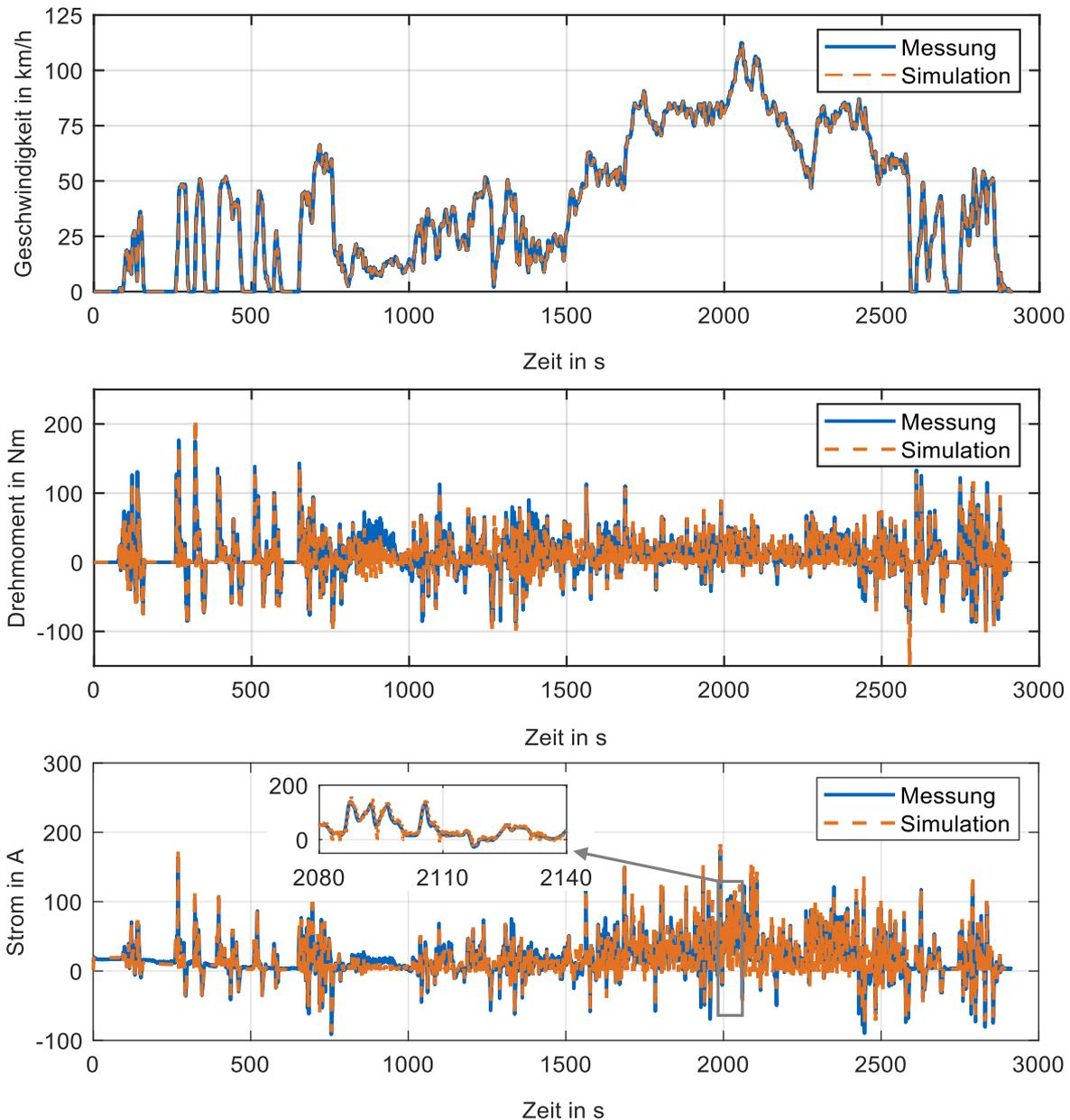


Abbildung 5.3: Validierung des Längsdynamikmodells für Fahrt B08. Oben: Geschwindigkeit. Mitte: Drehmoment der Maschine. Unten: Batteriestrom. Entnommen aus [132].

Die motorischen und generatorischen Drehmomentspitzen werden vom Modell ebenso gut angenähert (Abbildung 5.3 (b)). Allerdings entsteht nach ca. 700 s Fahrzeit eine konstante Abweichung, die nachträglich durch ein falsch erfasstes Höhenprofil der Strecke erklärt werden kann. Die gesamte Validierung der Längsdynamik inklusive der elektrischen Maschine und der Leistungselektronik ergibt sich in der Betrachtung des Batteriestroms. In der Vergrößerung des Batteriestroms von Abbildung 5.3 (c) zeigt sich, dass das Modell größere Schwankungen als das Realfahrzeug aufweist. Die systemischen Trägheiten können durch komplexe mechanische

Verlustmechanismen bis hin zu Glättungseigenschaften von kapazitiven Komponenten verursacht werden und sind modellseitig nicht abgebildet. Über alle Fahrten weist der Batteriestrom eine mittlere absolute Differenz von 6,02 A zwischen der Simulation und den Messdaten auf, was bezogen auf den mittleren absoluten Batteriestrom der Messung einer Abweichung von 9,3 % entspricht. Zusammenfassend wird die Validierung anhand der quantitativen Abweichungen der Geschwindigkeit, des Motormoments und des Batteriestroms sowie der Abbildung der Dynamik durch das Modell unter Berücksichtigung des Herauskürzens des Fehlers durch den Simulationsvergleich im Ergebniskapitel als hinreichend genau betrachtet.

5.2 Batteriemodell

Das Batteriemodell aus der *sim2gether* Bibliothek stammt von Reiter et al. [136] und wurde für zylindrische NCR18650PF Zellen von Panasonic entwickelt und auf Packlevel skaliert. Im BMW i3 sind prismatische Zellen mit einer Mischung aus Lithium-Manganoxid (LMO) und Nickel-Mangan-Kobalt (NMC) verbaut. In der Modellentwicklung zeigen sich erhebliche Differenzen der Spannungsantwort, die eine Neuentwicklung des Batteriepackmodells erforderlich machten. Dieser Abschnitt basiert auf den Semesterarbeiten von Protschka [137] und Horner [138].

5.2.1 Grundlagen

Die Ansätze zur Modellierung von Batterien können grundsätzlich in drei Kategorien eingeteilt werden. Erstens bieten White-box Modelle, wie z. B. elektrochemische Modelle eine hohe Genauigkeit, unterliegen allerdings auch einer zeit- und rechenintensiven Parametrierung und Simulation [139]. Black-box Modelle bilden die zweite Kategorie. Sie bilden lediglich Ein- und Ausgänge ab, deren Verknüpfung durch z. B. neuronale Netze entsteht. Vorteilhaft ist die hohe Performance. Sie erfordern allerdings umfangreiche Trainingsdaten und bilden die physikalischen Zusammenhänge nicht ab [140]. Ein häufiger Kompromiss zwischen Genauigkeit, Parametrierungsaufwand und Rechenintensität ist das elektrische Ersatzschaltkreismodell (engl. Equivalent Circuit Model - ECM) [140, 141]. Durch Basis-Schaltelemente der Elektrotechnik wird das statische und dynamische Verhalten der Lithium-Ionen Batterie abgebildet. Eine ideale Spannungsquelle gibt die maßgeblich vom SOC abhängige OCV wieder. Ein elektrischer Widerstand bildet die ohmschen Überspannungen durch die Ableiter, den Elektrolyten und des Aktivmaterials ab. RC-Glieder, eine Parallelschaltung aus Widerstand und Kapazität, zeichnen das dynamische Batterieverhalten nach. Grundsätzlich gilt, je mehr RC-Glieder, desto genauer ist das Modell. Allerdings steigt auch der Parametrierungsaufwand [142]. Häufig werden daher, wie auch in dieser Arbeit, zwei RC-Glieder genutzt, um das Diffusionsverhalten und den Ladungsdurchtritt abzubilden.

5.2.2 Modellierung

Im Rahmen dieser Arbeit standen keine Einzelzellen aus dem Versuchsfahrzeug zur Verfügung, wodurch keine Charakterisierung im Labor und die Skalierung des Modells von Zell- auf Packlevel möglich war. Stattdessen wurden die Fahrdaten und weitere Tests genutzt, um das Batteriemodell auf Packlevel zu entwickeln. Das Versuchsfahrzeug BMW i3 verfügt über ein 96s1p verschaltetes Batteriepack mit einer Brutto-Kapazität von 21,8 kWh und einer Nennspannung von 360 V. Der nutzbare SOC-Bereich liegt zwischen 8 % und 88,6 %.

Aufgrund der vorhandenen Datenlage und der erforderlichen Genauigkeit wird ein ECM mit zwei RC-Gliedern entwickelt [136, 143, 144]. Zur Bestimmung der OCV dienen zusätzliche Lade- und Entladeversuche am Fahrzeug, bei denen über die in Abschnitt 4.1 beschriebene Messtechnik der Strom, die Spannung und die Temperatur der Batterie aufgezeichnet werden. Letztere beträgt ca. 21 °C, wobei ein Messpunkt ausreicht, weil die Temperatur keinen Einfluss auf die Korrelation zwischen SOC und OCV hat [145, S. 223]. Mit einem geringen Strom kleiner als C/20 können die dynamischen Effekte der Batterie so klein gehalten werden, dass die Mittelung aus Lade- und Entladekurve die OCV annähert [146–148]. Der SOC wird über eine Amperestundenbilanzierung bestimmt. Über die fahrzeugseitige Einstellung wird der Ladestrom auf 2,8 A an einer einphasigen Schutzkontaktsteckdose reduziert. Die Entladung erfolgt im Stillstand durch Aktivieren des Fernlichts, der Lüftung und der Sitzheizung bei 2,5 A. Der geringfügige Unterschied der Ströme wird als unwesentlich für die OCV Bestimmung eingestuft. Die Entladung unterliegt fahrzeugseitigen Unregelmäßigkeiten, wie z. B. einer Leistungsreduktion der Sitzheizung nach 30 min, und wird aus diesem Grund in Intervallen durchgeführt, die anschließend kombiniert werden. Abbildung 5.4 zeigt die Lade- und Entladekurve und die daraus berechnete OCV. Die Bereiche außerhalb des Netto SOC werden linear extrapoliert.

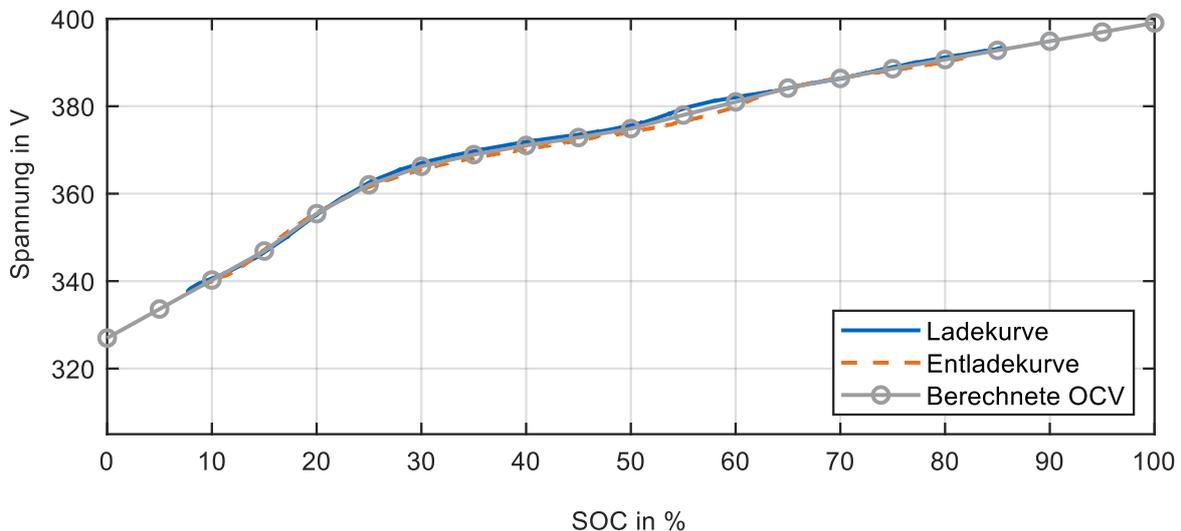


Abbildung 5.4: Ermittlung der OCV des Batteriepacks aus der Lade- und Entladekurve. Entnommen aus [132].

Die Parametrierung von Batteriemodellen geschieht in den meisten Studien durch eine Vermessung per EIS oder durch das Aufprägen von Strompulsen und Auswertung derer Spannungsantwort [149]. Weil im Rahmen dieser Arbeit keine Batteriezellen des Versuchsfahrzeugs zur Verfügung standen, erfolgte die Parametrierung mit Hilfe einer Optimierung anhand der aufgezeichneten Fahrdaten. Die Einzelwiderstände und Kapazitäten weisen eine Abhängigkeit von der Temperatur und dem SOC auf [144, 150]. Die Implementierung erfolgt anhand von Look-Up Tabellen für die Widerstände und die Zeitkonstanten τ nach Gleichung (5.1).

$$\tau = RC \quad (5.1)$$

Vor der Optimierung werden die Fahrdaten entsprechend der Batterietemperatur und des SOC geclustert [132]. Die Batterietemperatur wird zwischen 0 °C und 30 °C in 5 °C-Schritten eingeteilt. Der SOC erstreckt sich von 20 % bis 87,5 % in 10 %-Schritten bzw. einem 7,5 %-Schritt im letzten Bereich. Umfasst eine Fahrt mehrere Bereiche, wird der Datensatz geteilt und den Clustern zugeordnet. Für jedes Cluster wird der längste Fahrtabschnitt zur Optimierung genutzt.

Der initiale Wert der Widerstände für die Optimierung beträgt jeweils 1Ω . Auf Basis des Nyquist-Shannon Abtasttheorems [151] wird der minimale Wert der Zeitkonstanten τ aus der Abtastfrequenz f_s bestimmt, die in diesem Fall 10 Hz beträgt.

$$\tau_{min} = \frac{100}{\pi f_s} \quad (5.2)$$

Der maximale Wert der Zeitkonstanten wird nach Schindler [152, S. 32] durch die Dauer der Messung t_{Mess} begrenzt.

$$\tau_{max} = \frac{t_{Mess}}{2\pi} \quad (5.3)$$

Die Optimierung erfolgt durch den Non-Recursive-Least-Square-Algorithmus in Form der lsqnonlin-Funktion von MATLAB [153]. Zur Optimierung wird das Batteriemodell einzeln, also nicht im Gesamtfahrzeugmodell, betrachtet. Der SOC bestimmt die OCV. Der gemessene Strom I_{Bat} ist die Eingangsgröße, die resultierende Spannung U_{Bat} ist die Referenzgröße, die per RMSE mit den Messdaten verglichen wird. Das Optimum, das innerhalb der vordefinierten Grenzen der Schrittweite, des RMSE und der Anzahl der Iterationen liegt, wird in der Look-Up Tabelle gespeichert. Die Daten dienen als Initialparameter der Optimierung des anliegenden Clusters. Abschließend erfolgt eine zweite Optimierung über alle Messungen, um leere Cluster und Randbereiche mit Hilfe der Interpolation des Optimierers zu glätten, sodass die Look-Up Tabellen vollständig ausgefüllt sind. Abbildung 5.5 zeigt die ermittelten Werte für den Innenwiderstand R_Ω über den SOC und abhängig von der Temperatur. Der steigende Widerstand bei niedrigem und hohem SOC sowie bei sinkender Temperatur entsprechen den Erkenntnissen anderer Studien [154–156]. Die weiteren Parameter des Batteriemodells sind in Abbildung B.1 dargestellt.

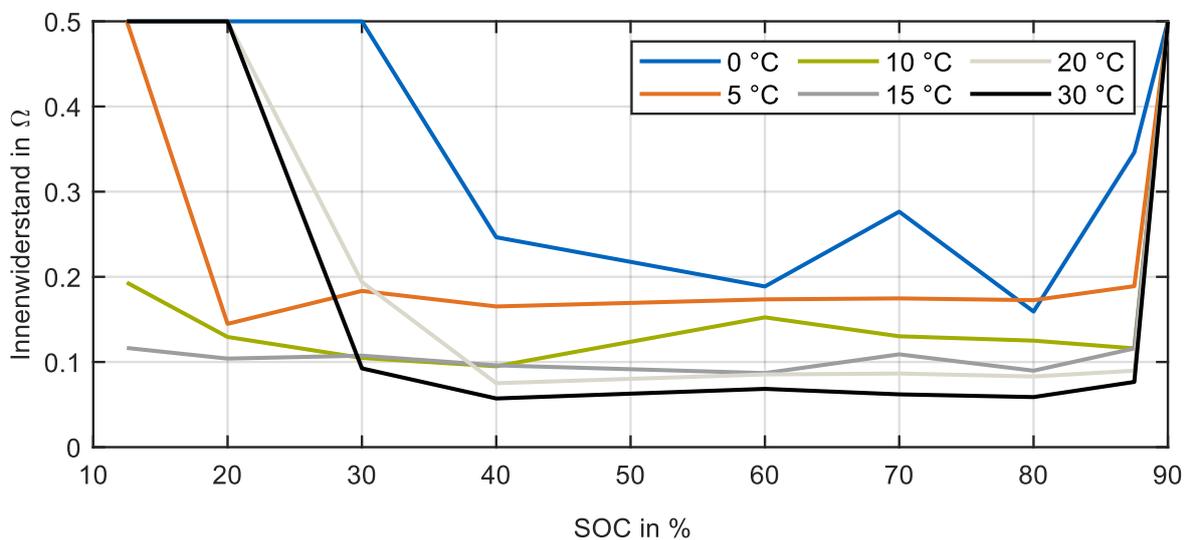


Abbildung 5.5: Innenwiderstand des Batteriepacks. Entnommen aus [132].

Neben der elektrischen ist die thermische Modellierung der Batterie von entscheidender Bedeutung, weil die Batterietemperatur einen signifikanten Einfluss auf die Rekuperationsfähigkeit der Batterie besitzt. Die Erwärmung der Batterie geschieht durch die immanenten Leistungsverluste der Batterie, weil das Versuchsfahrzeug nicht über eine aktive Batterieheizung verfügt. Die thermische Modellierung basiert auf der Semesterarbeit von Protschka [137] und wurde in der Veröffentlichung im Journal *eTransportation* [132] vorveröffentlicht.

Für das Modell wird die Batterie als Punktmasse mit homogener Temperaturverteilung betrachtet. Die Verlustwärmeleistung der Batterie \dot{Q}_{Bat} setzt sich aus dem reversiblen Anteil \dot{Q}_{rev} und dem irreversiblen Anteil \dot{Q}_{irr} zusammen. Der Wärmeaustausch mit der Umgebung besteht aus einem konvektiven Wärmestrom \dot{Q}_α und einem Wärmestrom durch Strahlung \dot{Q}_σ . Zusammengefasst entsteht dadurch die Wärmebilanz.

$$\dot{Q}_{net} = \dot{Q}_{irr} + \dot{Q}_{rev} + \dot{Q}_\alpha + \dot{Q}_\sigma \quad (5.4)$$

Für die detaillierte Darstellung der Berechnung der Wärmeströme sei auf Protschka [137, S. 34-36] verwiesen. Mit dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik wird die Batterietemperatur T_{Bat} auf Basis des vorherigen Zeitschritts sowie der Masse m_{Bat} und der spezifischen Wärmekapazität c_{Bat} bestimmt. Letztere wurde aus anderen Studien übernommen [157, 158].

$$T_{Bat} = T_{Bat}(t-1) + \frac{Q_{net}}{m_{Bat}c_{Bat}} \quad (5.5)$$

5.2.3 Validierung

Für die Validierung des Batteriemodells werden alle aufgezeichneten Fahrten genutzt. Als Referenz (Abbildung 5.6) dient das Modell von Reiter, das in einer Vorveröffentlichung genutzt wurde [55].

Für die Validierung wird das Batteriemodell freigeschnitten und isoliert betrachtet. Der gemessene Strom dient als Eingangsgröße. Aus Gründen der Übersicht wird in Abbildung 5.6 nur ein beispielhafter Spannungsverlauf präsentiert. Dafür wird mit Trip A01 eine vergleichsweise kurze Fahrt gewählt, um die dynamischen Spannungsverläufe sichtbar zu machen. Die gute Annäherung der simulierten an die gemessene Spannung im Vergleich zur Referenz wird durch die dargestellten Abweichungen unter 2 V unterstrichen. Nur zu Fahrtbeginn überschätzt das Modell die Spannung geringfügig. Über alle Fahrten beträgt die mittlere Differenz 3,17 V, was 6,7 % entspricht und als hinreichende Genauigkeit eingestuft wird.

Für die Validierung des thermischen Verhaltens wird die Fahrt B09 gewählt, um das Aufheizverhalten der Batterie über eine lange Fahrt analysieren zu können. Die Auflösung der gemessenen Temperatur beträgt 1 °C, was zu dem stufigen Verlauf in Abbildung 5.6 führt. Es zeigt sich eine gute Annäherung der gemessenen Temperatur, bei der auch hohe Gradienten wie nach 2500 s simuliert werden. Letztlich wird die Temperatur für diese Fahrt als zu hoch simuliert, in anderen Fahrten wiederum wird sie leicht unterschätzt. Ein möglicher Grund könnte die komplexen Luftströmungen an der Front und am Unterboden sein. Über alle Fahrten beträgt der RMSE 1,02 °C.

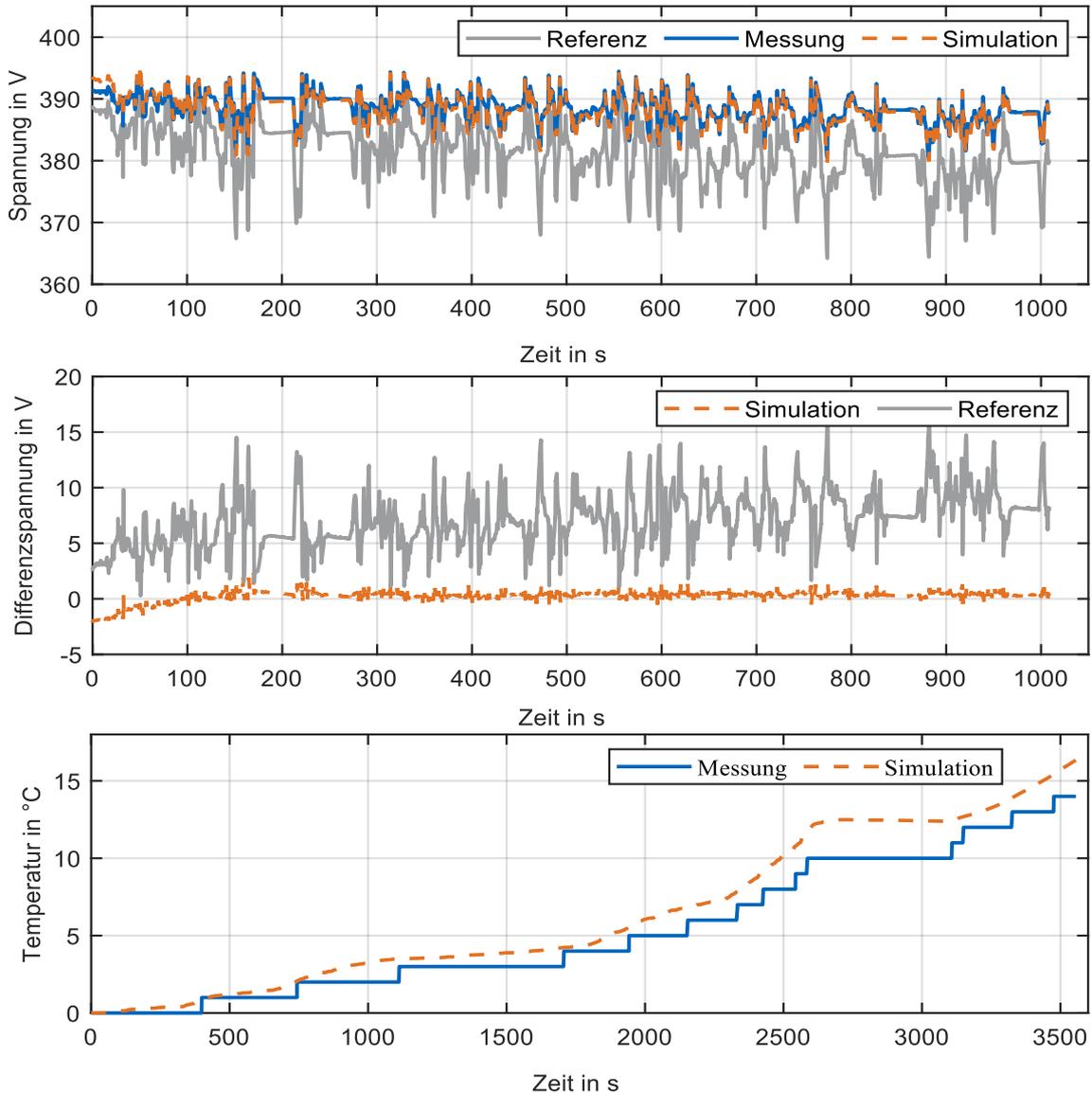


Abbildung 5.6: Validierung des Batteriepackmodells. Oben: Batteriespannung für Fahrt A01. Mitte: Differenzspannung zur Messung für Fahrt A01. Unten: Batterietemperatur für Fahrt B09. Entnommen aus [132].

5.3 Batteriealterungsmodell

Die Auswirkungen der Betriebsstrategien auf die Batteriealterung werden in zwei Schritten analysiert. Zunächst werden die Stressfaktoren der Batterie Strom, Stromdurchsatz, DOD und Batterietemperatur erfasst. Somit kann eine objektive Beurteilung der Wirksamkeit der Betriebsstrategien erfolgen, die nicht vom Alterungsmodell abhängt. Für die Beurteilung des Faktors Strom sind insbesondere die Entlade- und Ladespitzen relevant. Deren quantitative Erfassung erfolgt durch ein Lastkollektiv, das die Häufigkeit bestimmter Stromstärkebereiche erfasst. Diese Bereiche werden auf 20 A festgelegt. Die anderen Stressfaktoren werden in ihren Absolutwerten ausgewertet.

Der zweite Schritt der Alterungsbeurteilung erfolgt durch ein Alterungsmodell, das den Kapazitätsverlust berechnet. Für das Alterungsmodell wird aufgrund der nicht vorliegenden

Batteriezellen auf die Literatur zurückgegriffen. Auf Basis einer Analyse reproduzierbarer Alterungsmodelle in der Semesterarbeit von Weiß [159, S. 23] wird entschieden, ein Alterungsmodell bestehend aus der kalendarischen Alterungsmodellierung nach Baghdadi et al. [160] und der zyklischen Alterungsmodellierung nach Wang et al. [161] aufzubauen. Ein wesentlicher Grund ist die ähnliche Zellchemie zum Versuchsfahrzeug. Beide Studien basieren auf NMC Zellen, das Versuchsfahrzeug nutzt eine Mischung aus NMC und LMO. Zum anderen bildet das zyklische Alterungsmodell von Wang et al. [161] mit der Temperatur, dem Strom und dem Stromdurchsatz die Stressfaktoren ab, die durch die Betriebsstrategien dieser Arbeit wesentlich beeinflusst werden. Die DOD hingegen wird potenziell nur geringfügig verändert. Ein weiterer Grund für die Auswahl des Modells ist der weite Temperaturbereich von 10 °C bis 46 °C, in dem das Modell validiert wurde. Somit können die Berechnungen dieser Arbeit bis -10 °C extrapoliert werden, während in vielen anderen Alterungsmodellen die Validität erst bei höheren Temperaturen beginnt [162].

Die Berechnung des Kapazitätsverlusts Q_{loss} ergibt sich aus den Koeffizienten der Alterungsgeschwindigkeit für die kalendarische Alterung k_{cal} bzw. für die zyklische Alterung k_{cyc} .

$$Q_{loss}(t_n) = \begin{cases} \sum_{i=0}^n k_{cyc,i} t_i & \text{for } I_{c,i} \neq 0 \\ 1 - \prod_{i=0}^n e^{k_{cal,i} t_i} & \text{for } I_{c,i} = 0 \end{cases} \quad (5.6)$$

In dieser Arbeit wird nur die zyklische Alterung beeinflusst, daher wird die Modellierung folgend kurz vorgestellt. Für die Modellierung der kalendarischen Alterung sei auf Baghdadi et al. [160] und Weiß [159, S. 33-36] verwiesen. Die zyklische Alterungsgeschwindigkeit wird nach Wang et al. [161] aus Gleichung (5.7) abgeleitet.

$$k_{cyc,i} = (aT_{c,i}^2 + bT_{c,i} + c) e^{(dT_{c,i}+e)I_{rate,i}} \frac{I_{c,i}}{3600} \quad (5.7)$$

Die Parametrierung erfolgt analog nach Wang et al. [161]. Die entsprechenden Parameter werden in Tabelle 5.2 dargestellt.

Tabelle 5.2: Parametrierung des zyklischen Alterungsmodells nach [161]

Parameter	Wert / Variable
a	9,4696x10-6 [1/Ah-K ²]
b	-5,6341x10-3 [1/Ah-K]
c	0,8383 [1/Ah]
d	-0,0067 [1/K-(C-rate)]
e	2,35 [1/(C-rate)]
$T_{zelle,i}$	Zelltemperatur
$I_{rate,i}$	C-rate
$I_{zelle,i}$	Zellstrom

Weil keine Batteriezellen des Versuchsfahrzeugs zur Verfügung stehen, ist eine Validierung des Alterungsmodells nicht möglich. Aufgrund der Reproduktion aus dem Stand der Wissenschaft wird die Anwendbarkeit jedoch angenommen.

5.4 Heizkreislaufmodell

Das Heizkreislaufmodell bildet den standardmäßigen Kühlmittelkreislauf in BEV, bestehend aus einem Heizgerät und einem Wärmetauscher samt Verbindungsschläuchen und Lüfter, ab. Zusätzlich wird der Fahrzeuginnenraum eingebunden.

5.4.1 Grundlagen der Wärmeübertragung

Zwischen zwei Medien mit unterschiedlicher Temperatur erfolgt durch einen Wärmestrom \dot{Q} eine Energieübertragung. Die Übertragung von Wärme lässt sich in die drei Übertragungsmechanismen Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung einteilen. Wärmeleitung beschreibt den Energietransport in einem Festkörper oder Fluid durch mikroskopische Atom- und Molekülbewegungen oder Gitterschwingungen, ausgelöst durch einen Temperaturgradienten [163, S. 28]. Einfluss nimmt neben dem Temperaturdelta ΔT , der Querschnittsfläche A und der Übertragungslänge l vor allem die materialspezifische Wärmeleitfähigkeit λ (Abbildung 5.7). Den Wärmeübergang von einem Festkörper zu einem Fluid, das sich mit einer Relativgeschwindigkeit bewegt, wird als Konvektion beschrieben [163, S. 30]. Während diese Bewegung bei der sogenannten freien Konvektion lediglich durch die Temperaturdifferenz entsteht, werden bei der erzwungenen Konvektion Gebläse oder Pumpen zur Aufprägung der Bewegung durch einen Druckunterschied eingesetzt. Das Temperaturdelta ΔT , die Übertragungsfläche A und der Wärmeübergangskoeffizient α , der im wesentlichen durch die geometrischen Randbedingungen bestimmt wird, beeinflussen den Wärmestrom. Der Übergangskoeffizient wird üblicherweise empirisch angenähert [164, S. 11]. Wärmestrahlung bezeichnet den Energieaustausch zweier Körper über elektromagnetische Strahlung und ohne Trägermedium [163, S. 135]. Beeinflusst wird die Übertragung durch die Komponententemperaturen in vierter Potenz, die abstrahlende und die absorbierende Oberfläche A und die Stefan-Boltzmann-Konstante σ . Die Wärmeübertragungsmechanismen im Heizkreislauf eines BEV beschränken sich auf die Wärmeleitung und die Konvektion [165, S. 656].

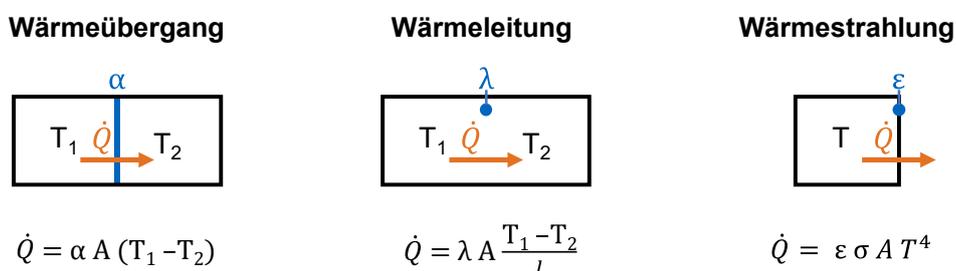


Abbildung 5.7: Wärmeübertragungsmechanismen nach [19, S. 15-18, 166, S. 28]

Zur Beschreibung transienter Aufheiz- oder Abkühlvorgänge dient die Wärmekapazität C_{th} als Produkt der materialabhängigen spezifischen Wärmekapazität c und der Masse m .

$$C_{th} = c m \quad (1)$$

Zur Modellierung der beschriebenen physikalischen Phänomene dienen folgende drei Ansätze. Die numerische Strömungsmechanik (engl. Computational Fluid Dynamics - CFD), die Finite Elemente Methode (FEM) und die thermischen Netzwerke (engl. Lumped Parameter Thermal Network - LPTN) unterscheiden sich in ihrem Vereinfachungsgrad und ihrem Rechenaufwand. Die CFD nutzt zur Berechnung feine Auflösungen der Geometrie in Einzelvolumina, deren Erhaltungsgrößen über numerische Interpolation mit benachbarten Volumina ausgeglichen werden. Die FEM vereinfacht die Berechnungen, indem ein kartesisches 2D-Rechengitter statt des 3D-Gitters genutzt wird. Die Simulationsparameter werden als konstant über die dritte Koordinate angenommen [167, S. 57]. Durch den hohen Detailgrad dieser Verfahren können lokale Temperatur- und Druckdifferenzen bei nahezu beliebigen Geometrien analysiert werden. Jedoch sind die Methoden rechenintensiv. Daher werden CFD und FEM vorwiegend bei der Simulation von Einzelkomponenten eingesetzt, weniger bei Thermomanagementsystemen [168, S. 871-882]. In dieser Arbeit wird die Methode der LPTN angewendet, bei der die Einzelkomponenten in thermische Punktmassen zerlegt werden und für diese eine homogene Temperaturverteilung angenommen wird. Analog zu elektrischen Schaltungen werden, wie in Abbildung 5.8 dargestellt, zwischen den Punktmassen thermische Widerstände zur Modellierung der Wärmeübertragung implementiert. Jede Punktmasse wird durch die Zustandsgrößen Temperatur T_i und Wärmekapazität C_i beschrieben. Bei einer Temperaturdifferenz zwischen zwei Knoten fließt der Ausgleichswärmestrom \dot{Q}_{i-i+1} [168, S. 872].

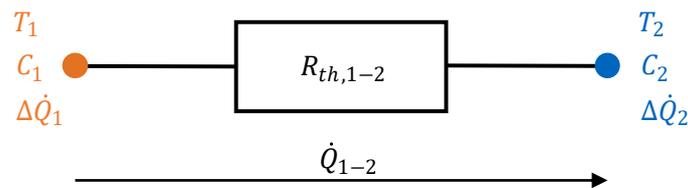


Abbildung 5.8: Thermisches Netzwerk aus zwei Punktmassen und einem thermischen Widerstand nach [169, S. 1045]

5.4.2 Modellierung

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Kühlmittel-Heizkreislauf mit einem Schichtheizgerät modelliert. Auf die Modellierung des Kältemittelkreislaufs wird verzichtet. Dieses Modell wurde in der Zeitschrift *Forschung im Ingenieurwesen* [23] und im Journal *eTransportation* [132] vorveröffentlicht. Die wesentlichen Elemente des Modells in Abbildung 5.9 sind darüber hinaus der HWT, die Verbindungsschläuche sowie der Fahrzeuginnenraum. Entsprechend der LPTN Methode wurden die Komponenten zu Blockkapazitäten vereinfacht.

Das Heizgerät erwärmt entsprechend der zugeführten elektrischen Leistung das Kühlmittel zwischen Ein- und Ausgang. Die Regelung erfolgt durch einen PI-Regler auf eine konstante Kühlmitteltemperatur von 50 °C am Heizgeräteausgang, die aus den Fahrzeugmessdaten bestimmt wird [115]. Das Heizgerät wird als adiabat modelliert und weist folglich keine Verluste an die Umgebung auf, deren thermische Kapazität als unendlich parametrisiert wird. Die Austrittstemperatur des Heizgeräts entspricht der Eingangstemperatur des Zuführschlauchs zum HWT. Die Strömung des Kühlmittels wird als konstante 1D Strömung modelliert. Thermische Grenzschichten oder Rezirkulationen werden vernachlässigt. Entsprechend der Messdaten werden für die Schläuche Verlustwärmeströme berücksichtigt, wodurch das Kühlmittel leicht abkühlt. Zusätzlich wird die Durchlaufzeit durch einen zeitlichen Versatz zwischen Ein- und Auslass berücksichtigt. Der HWT wird als ungemischter Kreuzstrom-Wärmeübertrager modelliert, was bedeutet, dass sich das Kühlmittel und die Luft orthogonal bewegen und dabei keine

Durchmischung stattfindet. Auf eine Modellierung der thermischen Masse des HWT wird verzichtet, um Simulationsfehler durch die inkonstante Wandtemperatur aufgrund des Angleichens der unterschiedlichen Temperaturniveaus zu vermeiden. Wie das Heizgerät, wird auch der HWT als adiabat angenommen. Den Kreislauf schließt der Rückführschlauch, der analog zum Zuführschlauch modelliert ist.

Der Fahrzeuginnenraum wird ebenfalls als Blockkapazität modelliert. Der ausgehende Wärmestrom setzt sich aus dem Verlustwärmestrom des Karosseriedurchgangs nach Gleichung (2.6) und des Abluftenthalpiestroms nach Gleichung (2.4) zusammen. Ebenso werden die thermischen Massen des Innenraums berücksichtigt. Der Zuluftwärmestrom wird anhand der Differenz zur Solltemperatur durch den geregelten Luftmassenstrom \dot{m}_{Luft} eingestellt.

5.4.3 Parametrierung und Validierung

Die Parametrierung und Validierung des Heizkreislaufmodells erfolgt in einem zweistufigen Verfahren, bestehend aus einer komponentenweisen Validierung durch Prüfstandsversuche und einer Systemvalidierung durch Realfahrzeugdaten. Dieses Vorgehen bietet einen hohen Genauigkeitsgrad, weil einerseits die hohe Anzahl der Messstellen des Prüfstands genutzt wird. Andererseits bildet der Prüfstand nicht das exakte Systemverhalten im Fahrzeug ab.

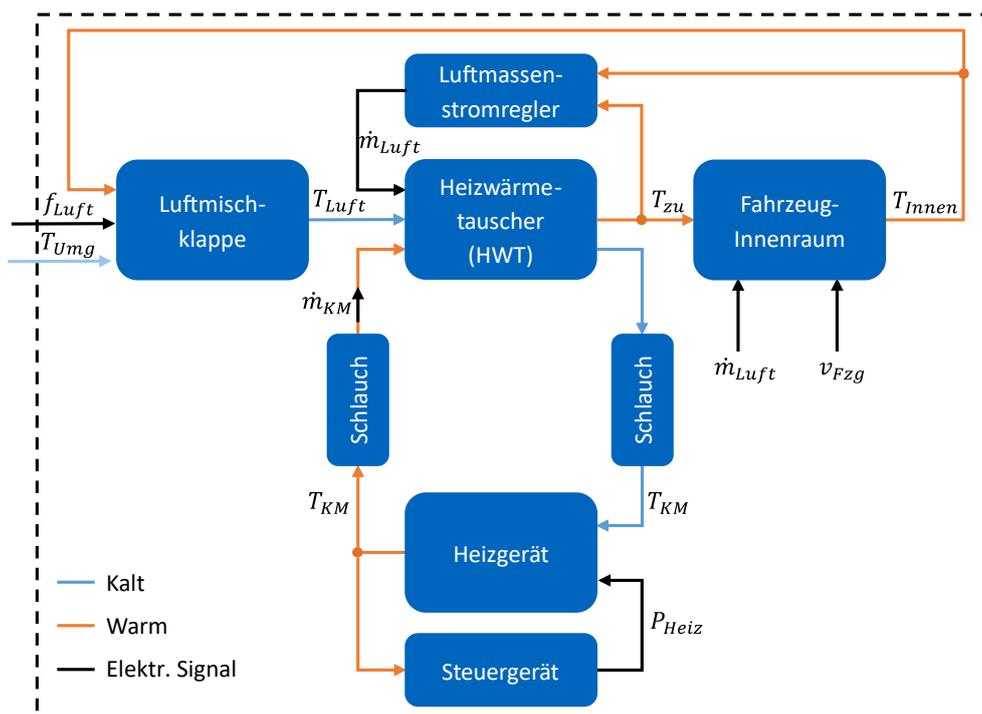


Abbildung 5.9: Aufbau des Heizkreislaufmodells. Entnommen aus [132]

Zur komponentenweisen Parametrierung und Validierung dienen die Prüfstandsdaten von Seitz [33], die den gewählten Webasto Schichtheizer getestet hat. Der Versuchsaufbau wird in Kapitel 4.5 bereits dargelegt. Die mittlere Kühlmittellaufänge des Schichtheizergeräts wird durch die Summe der Kantenlängen bestimmt (Tabelle A.1). Die Masse m_H und die spezifische Wärmekapazität $c_{p,H}$ werden aus dem Materialaufbau der Heizschichten unter Vernachlässigung der Elektronik und der Verbindungselemente bestimmt [28]. Das Wärmeübertragungsverhalten kA_H wird iterativ anhand der Prüfstandsmessungen ermittelt. Die Bestimmung der Lauflänge des HWT erfolgt analog zum Heizgerät (Tabelle A.2). Die Wärmeübertragung geht als Funktion des

Kühlmittelvolumenstroms \dot{m}_{KM} aus dem Datenblatt hervor [19]. Die Parametrierung der Schläuche in Tabelle A.3 erfolgt mit Hilfe des Datenblatts [19]. Für die detaillierte Berechnung sei auf Stohwasser [19] verwiesen.

Die Validierung des gesamten Heizkreislaufmodells erfolgt mit Hilfe der aufgezeichneten Fahrdaten [115] im Gesamtfahrzeugmodell. Darin sind folgende Messstellen enthalten:

- Heizleistung P_{Heiz}
- Kühlmitteltemperatur am Ein- und Austritt des Heizers $T_{KM,i}$ bzw. $T_{KM,o}$
- Kühlmitteltemperatur am Austritt des HWT $T_{KM,HWT}$
- Kühlmittelvolumenstrom \dot{m}_{KM}
- Umgebungstemperatur T_{Umg}
- Temperaturen an Ausströmern, im Fußraum und an den Kopfstützen T_{xy}

Aus den Messdaten werden die wesentlichen Parameter des Heizkreislaufmodells wie in Tabelle 5.3 bestimmt. Die Festlegung der Spitzenleistung auf 20 kW geht aus der Potentialanalyse in Kapitel 4 hervor. Der maximale Luftmassenstrom geht auf Erfahrungswerte von Seitz [33] zurück, während der Kühlmittelvolumenstrom bzw. -massenstrom sich durch die Messungen als weitgehend temperaturunabhängig zeigt. Die Begrenzung der Kühlmitteltemperatur erfolgt, um den Komfort der Fahrzeuginsassen durch zu heiße, ausströmende Luft nicht zu reduzieren. Die Oberfläche des Fahrzeuginnenraums wurde durch Ausmessungen bestimmt. Die Wärmekapazität C_{Innen} wurde iterativ mit einem Startwert nach Schüppel [170, S. 108] und Konz [171, S. 82] zu $C_{Innen} = 65 \frac{kJ}{K}$ bestimmt. Die Differenz zwischen dem Startwert und dem Ergebnis kann durch die Innenraumbeschaffenheit erklärt werden. Während bei Schüppel ein konventionelles Fahrzeug der Klasse C untersucht wurde, wird vorliegend mit einem Kompaktwagen mit energieoptimiertem Innenraum durch z. B. dünnere Sitze getestet.

Tabelle 5.3: Parameter des Heizkreislaufs. Entnommen aus [132].

Komponente/Fluid	Parameter	Wert
Heizgerät	Nennleistung in kW	7
	Spitzenleistung in kW	20
Luft	Luftmassenstrombegrenzung in $\frac{kg}{h}$	300
	Konstanter Massenstrom in $\frac{kg}{h}$	522
Kühlmittel	Temperaturbegrenzung in °C	70
	Gesamtoberfläche in m ²	15,23
Innenraum	Wärmekapazität in $\frac{kJ}{K}$	65

Die Validierung erfolgt anhand der gleichen Fahrdatensätze wie beim Längsdynamikmodell. Nur Trip A10 wird ausgeschlossen, weil die Heizung bei der Umgebungstemperatur T_{Umg} von 24 °C

obsolet ist. Zur Übersichtlichkeit werden die Verläufe der Mess- und Simulationsdaten für Fahrt B08, dargestellt in Abbildung 5.10, diskutiert. Eine Übersicht aller Fahrten erfolgt in Tabelle 5.4.

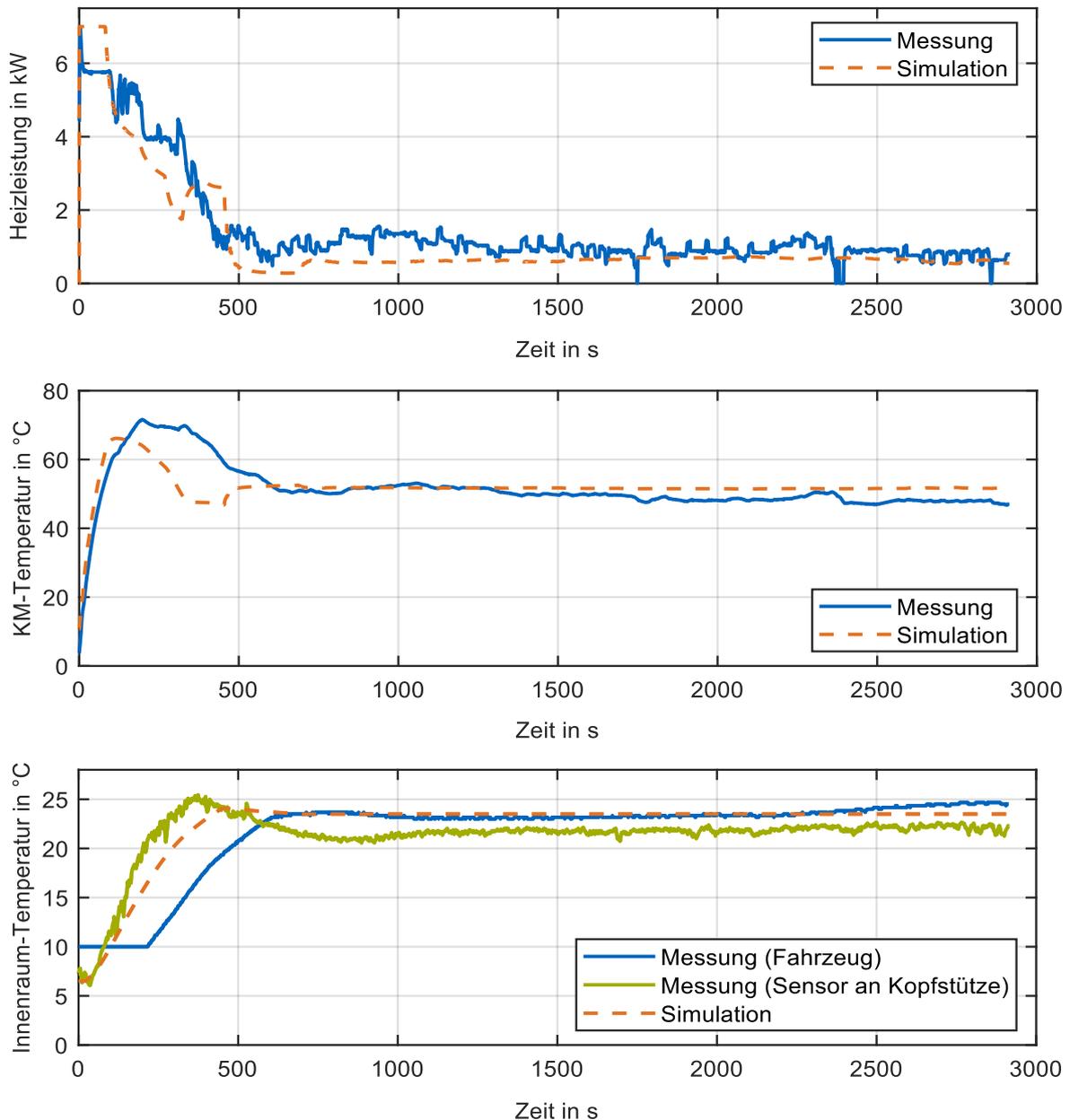


Abbildung 5.10: Validierung des Heizkreislaufmodells für Trip B08. Oben: Elektrische Heizgeräteleistung. Mitte: Kühlmitteltemperatur am Heizgeräteausgang. Unten: Innenraumtemperatur. Entnommen aus [132].

Abbildung 5.10 zeigt die gemessene und die simulierte Heizleistung. Die mittlere absolute Abweichung beträgt 0,4 kW. Der qualitative Verlauf der simulierten Leistung folgt dem stärker schwankenden Verlauf der Messung. Die wesentlichen Differenzen entstehen zu Fahrtbeginn, die maximale Abweichung beträgt 2,6 kW. Dieses ist vor allem durch die Annahme der auf die Umgebungstemperatur konditionierten Einzelkomponenten zurückzuführen. Zwar wurde eine Standzeit von mindestens 12 h vor den Validierungsfahrten eingehalten, jedoch können thermische Massen oder Sonneneinstrahlung zu einer Aufheizung führen, wodurch die Messung eine geringere Leistung zur Aufheizung benötigt. Darüber hinaus werden die Wetterverhältnisse in der Simulation nicht berücksichtigt. Sonneneinstrahlung oder Niederschlag würden sich auf die Innenraumtemperatur auswirken und die Ergebnisse beeinflussen. Der Verlauf der Heizleistung

wird trotz der geringen Abweichungen als hinreichend genau eingestuft. Auch hier gilt wie beim Längsdynamikmodell, dass in dieser Arbeit Simulationen miteinander verglichen werden. Geringfügige Abweichungen zur Realität kürzen sich daher raus. Zur detaillierteren Analyse wird in Abbildung 5.10 die Kühlmitteltemperatur am Heizgeräteaustritt dargestellt. Das anfängliche Überschwingen der Solltemperatur von 50 °C kann modellseitig bedingt durch die Reglereinstellungen nicht vollständig reproduziert werden. Die Messung zeigt eine höhere maximale Temperatur von 68 °C und ein längeres Verweilen oberhalb der Solltemperatur. Mit zunehmender Fahrdauer reduziert sich die Differenz. Über die gesamte Fahrt beträgt die mittlere absolute Abweichung 3,6 °C, was als ausreichend genau gewertet wird. Weil der Temperatursensor der Kabine keine Temperaturen unter 10 °C anzeigt, wird die Darstellung durch den Temperatursensor der Beifahrerkopfstütze ergänzt. Der zeitliche Versatz in der Aufheizung des Kabinentemperatursensors lässt auf eine verdeckte Anbringung im Klimabedienelement schließen, die durch den Verlauf der Kopfstützentemperatur belegt wird. Die Annäherung der Simulation an den Kabinensensor ergibt eine Abweichung von 1,1 °C und wird als geeignet bewertet. Die Differenz zur Kopfstützentemperatur im stationären Bereich wird als üblich bewertet. Die Lufttemperatur am Kopf sollte stets unter der mittleren Lufttemperatur liegen, die Lufttemperatur im Fußraum hingegen darüber [24, S. 56].

Tabelle 5.4: Gemittelte absolute Differenz zwischen Messdaten und Simulation

Realfahrt	Heizleistung in kW	Kühlmittel- temperatur nach HVH in °C	Kühlmittel- temperatur vor HVH in °C	Innenraum- temperatur in °C
B01	0,35	3,46	3,85	1,07
B08	0,40	3,59	3,61	1,11
B14	0,46	3,46	3,65	0,95
B15	0,78	3,20	3,78	0,94
B27	0,58	5,21	5,51	2,01

5.4.4 Zeitlich-elektrisches Verhalten

Die Ansteuerung des Heizgeräts im Versuchsfahrzeug erfolgt über das Bordnetzsteuergerät und die Verbindung per Local Interconnect Network (LIN) -Bus. Das Bordnetzsteuergerät wiederum ist per Controller Area Network (CAN) -Bus u. a. mit dem Motorsteuergerät verbunden. Durch die Bussysteme entstehen für die ETR Latenzzeiten, die die Effizienz beeinflussen. Zusätzlich gilt es Verzögerungen aufgrund des Anlaufverhaltens des Heizgeräts zu berücksichtigen. In Zusammenarbeit mit Freitag [172] wurde das zeitliche Verhalten der Bussysteme berechnet und das Anlaufverhalten des Heizgeräts durch Versuche bestimmt.

Die Latenzzeit des CAN-Bus setzt sich aus der Dauer der Übertragung und der Wartezeit zusammen. Mit einer Worst Case Annahme der Wartezeit und einer Bitrate von $f_{Bit} = 500$ kBit/s ergibt sich eine summierte CAN-Übertragungszeit von 9,04 ms [172, S. 45]. Die Übertragung per LIN ist mit $f_{Bit} = 9,6$ kBit/s langsamer. In der zyklischen LIN Kommunikation ist jeder Botschaft ein bestimmter Zeitslot zugeordnet, sodass im ungünstigsten Fall ein kompletter Zyklus durchlaufen werden muss, bis die Botschaft gesendet wird. Die Latenzzeit beträgt maximal 274,3 ms [172, S. 46]. Die Latenzzeiten werden durch Verzögerungen im Modell berücksichtigt.

Für die Reproduktion des zeitlichen-elektrischen Anlaufverhaltens des Heizgeräts wird das Heizgerät Webasto HVH Gen1.5 auf einem Entwicklungsprüfstand getestet. Als Eingangssignal werden Leistungssprünge auf 3 kW, 5 kW und 7 kW vorgegeben. Die Datenaufzeichnung erfolgt mit Hilfe der Software CANoe von Vector mit einer Aufzeichnungsrate von 31,25 Hz. Die Einschaltzeit bis zur maximalen Leistung beträgt 197,8 ms. Durch die Interpolation der Messdaten und der Identifikation des Systemverhaltens wird die folgende Übertragungsfunktion (Gleichung (5.8)) bestimmt und im Modell implementiert.

$$G_{Modell}(s) = \frac{1}{(1 + 0,0414 s)^2} \tag{5.8}$$

Zur Visualisierung des zeitkritischen Anlaufverhaltens des Heizgeräts zeigt Abbildung 5.11 die Heizleistung und eine beispielhafte Rekuperationsspitze aus einer Stadtfahrt. Der Eingangssprung als Startsignal des Heizgeräts erfolgt mit der Reduktion der Kraft auf dem Fahrpedal. Es wird deutlich, dass die Latenzzeit durch den LIN-Bus ungefähr zu einer Halbierung (47 %) der nutzbaren Rekuperationsenergie führt. Um in der Simulation die maximalen Reichweitensteigerungen zu bestimmen, wird daher von einem direkten Anschluss des Heizgeräts an den CAN-Bus ausgegangen.

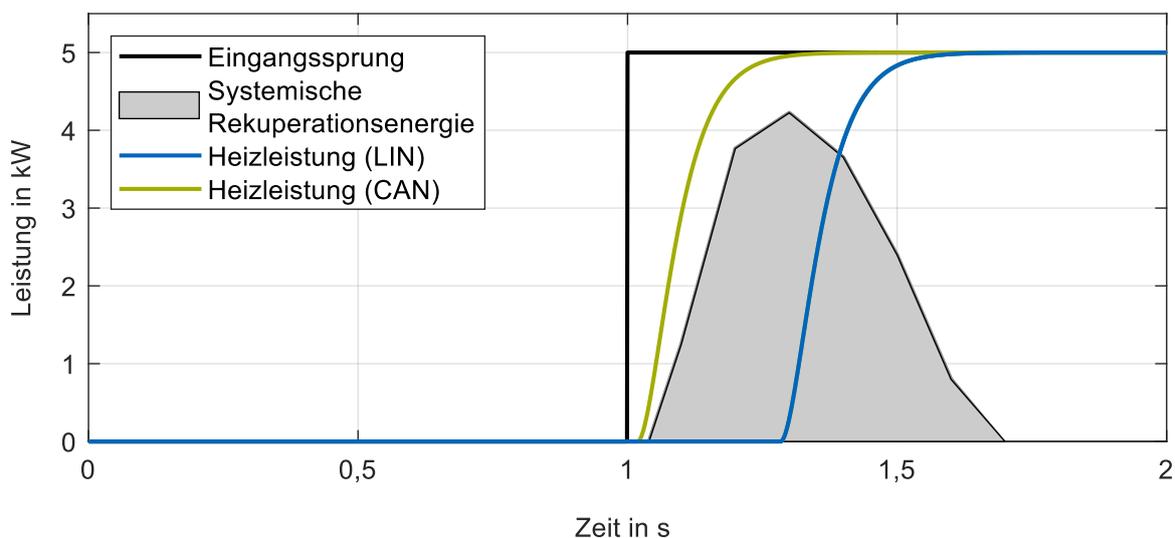


Abbildung 5.11: Anlaufverhalten des Heizgeräts bei LIN- bzw. CAN-Ansteuerung

6 Entwicklung von Betriebsstrategien

Das Ziel der Betriebsstrategien ist kurzfristig die Steigerung der Reichweite bei geringen Umgebungstemperaturen und langfristig eine Steigerung der Batterielebensdauer. Während die Reichweitenreduktion bei Kälte einen unmittelbaren Nutzereinfluss nimmt, erzielen aktuelle BEV bereits Laufleistungen, die mit Verbrennerfahrzeugen vergleichbar sind. Aus diesen Gründen wird die Steigerung der Reichweite priorisiert. Die Strategien bilden eine Kombination aus ETR und Lastspitzenglättung. Bei Verzögerungsvorgängen soll möglichst viel Energie zurückgewonnen werden. Bei Beschleunigungsvorgängen soll die Heizgeräteleistung reduziert werden, um den Gesamtstrom zu minimieren. Zur Umsetzung dieser simplen Regeln im BEV sind heuristische Verfahren geeignet. Die Regelgrößen sind aufgrund ihrer schnellen Reaktionsfähigkeit die Heizleistung, die die Gesamtrekuperationsleistung beeinflusst, und der Luftmassenstrom des Gebläses. Die kurzzeitige Überlast des Heizgeräts wird nach Kapitel 4 auf 20 kW für 30 s festgelegt. Als Randbedingung wird eine maximale Kühlmitteltemperatur von 70 °C definiert, um die Fahrzeuginsassen nicht durch zu warme, anströmende Luft zu beeinträchtigen. Zum Vergleich der Ergebnisse dient die Standard-Strategie, die die vorhandenen Regelmechanismen des Versuchsfahrzeugs widerspiegelt. In der Standard-Strategie wird die Gesamtrekuperationsleistung durch die Ladefähigkeitsgrenze der Batterie nach Abbildung 5.2 und unabhängig von der Heizleistung bestimmt. Letztlich wird jedoch auch das Heizgerät bei Verzögerungen aus dieser Leistung gespeist, womit nur der verbleibende Anteil in die Batterie geladen wird. Abbildung 6.1 verdeutlicht anhand einer schematischen Rekuperationsphase die Leistungsverteilung zwischen Batterie und Heizgerät. Folgend werden die entwickelten Strategien vorgestellt, beginnend mit zwei regelbasierten Strategien gefolgt von einer Fuzzy-Logik.

6.1 Regelbasierte Strategien

Zwei regelbasierte Strategien sollen den beschriebenen Nachteil der nicht vollständig ausgenutzten Ladefähigkeit der Batterie auflösen. In der Laden-priorisierenden (Laden-prio) Strategie entspricht die Gesamtrekuperationsleistung daher der Summe aus der Ladefähigkeit der Batterie und der möglichen Spitzenleistung der Batterie. Letztere kann dabei durch die maximale Kühlmitteltemperatur von 70 °C reduziert werden. Somit nehmen sowohl das Heizgerät als auch die Batterie Leistung auf, die zuvor von den Reibbremsen dissipiert wurde. Abbildung 6.1 verdeutlicht das Wirkprinzip. Die höhere Heizenergie in Rekuperationsphasen erhitzt das Kühlmittel über die Solltemperatur von 50 °C. Im weiteren Fahrtverlauf wird der Heizer bei Entladung der Batterie so lange deaktiviert, bis das Kühlmittel auf die Solltemperatur abgekühlt ist.

Die Heizen-priorisierende (Heizen-prio) Strategie kehrt die Priorisierung in der Leistungsverteilung um. Dieser Effekt führt zur identischen Leistungsverteilung, wenn die Gesamtrekuperationsleistung die Aufnahmefähigkeit von Batterie und Heizer übersteigt. Sollte sie jedoch geringer sein, würde die Laden-prio Strategie die Leistung des Heizers begrenzen,

während die Heizen-prio Strategie die Batterieleistung limitiert. Die Priorisierung der Batterie verspricht durch den hohen Wirkungsgrad der Batterie einen Effizienzvorteil auch bei geringen Temperaturen, weil die starke Überhitzung des Kühlmittels durch das Zwischenspeichern der Energie eine hohe Temperaturdifferenz zu umliegenden Bauteilen und der Umgebung mit sich bringt. Je höher diese Differenz ist, desto größer sind die Verluste des Heizkreislaufs. Andererseits reduziert die Heizen-prio Strategie die Ladeströme der Batterie und führt potenziell zu einer Reduktion der Batteriealterung. Jedoch steht diesem Effekt die minimal höhere DOD durch die Verlusteffekte entgegen [173].

Bei beiden regelbasierten, wie auch bei der Standard-Strategie wird der Luftmassenstrom \dot{m}_{Luft} des Gebläses anhand der Temperaturdifferenz des Innenraums zur Solltemperatur durch einen P-Regler bestimmt. Der P-Regler ermöglicht eine schnelle Reaktion auf sich ändernde Kühlmitteltemperaturen. Dadurch ist der Wärmestrom in den Innenraum und damit die Innenraumtemperatur trotz der variablen Kühlmitteltemperatur identisch.

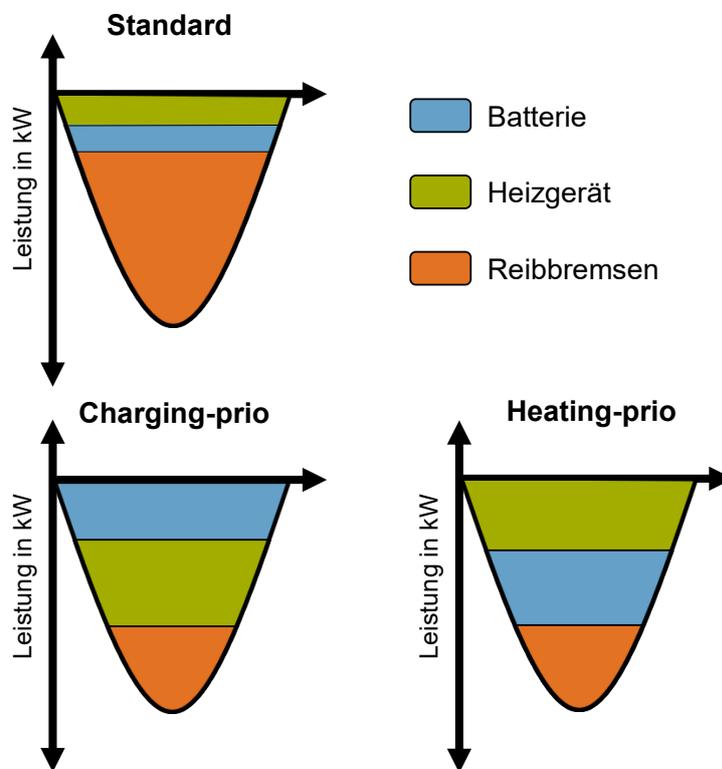


Abbildung 6.1: Heuristik der Leistungsaufteilung für die regelbasierten Strategien bei eingeschränkter Rekuperationsfähigkeit der Batterie. Entnommen aus [132].

6.2 Fuzzy-Logik

Um die Heizkreislaufregelung durch die Einbeziehung weiterer Eingangsparameter effizienter und robuster zu gestalten, wird als weitere Strategie eine Fuzzy-Logik implementiert. Die größtenteils binäre Regelung der Heizleistung durch die regelbasierten Strategien zeigt starke Schwankungen in den Regelgrößen Heizleistung P_{Heiz} und Luftmassenstrom \dot{m}_{Luft} , die durch eine höhere Variabilität der Fuzzy-Logik reduziert werden können.

Für beide Regelgrößen werden zwei separate Regler konzipiert. Auch wenn Fuzzy-Regler in der Lage sind, MIMO-Systeme (Multi-Input Multi-Output) darzustellen, bietet die geteilte Umsetzung eine übersichtlichere und nachvollziehbarere Reglergestaltung. Abbildung 6.2 zeigt die Eingänge der Fuzzy-Regler. Die Einbindung der Antriebsleistung P_{An} ermöglicht eine gezielte Reduktion der Heizleistung bis hin zur Deaktivierung bei Beschleunigungsvorgängen über 45 kW. Durch die Kenntnis der maximalen Ladeleistung der Batterie $P_{Bat,Ch}$ realisiert die Fuzzy-Logik die Aufteilung der Gesamtrekuperationsleistung, die analog zu den regelbasierten Strategien aus der Summe der Batterieladefähigkeit und der Heizleistung besteht. Die Einstellung der Heizleistung erfolgt u. a. auf Basis der Kühlmitteltemperatur T_{KM} , sodass bei einer geringen Differenz zur Maximaltemperatur von 70 °C nicht mit der vollständigen Spitzenleistung des Heizgeräts weitergeheizt wird. Im Gegensatz zum P-Regler der regelbasierten Strategien lässt die Fuzzy-Regelung eine variable Regelung des Luftmassenstroms zu. Durch das Zulassen einer Abweichung der Innenraumtemperatur von $\pm 0,5$ °C von der Solltemperatur kann somit der thermische Zwischenspeicher vergrößert werden. Es wird angenommen, dass eine derart geringe Abweichung keinen Einfluss auf den Nutzerkomfort nimmt [24]. Zusätzlich ermöglicht die Einbindung der Umgebungstemperatur T_{Umg} eine generelle Steigerung des Luftmassenstroms \dot{m}_{Luft} linear zur Temperaturdifferenz zwischen Innenraum und Umgebung.

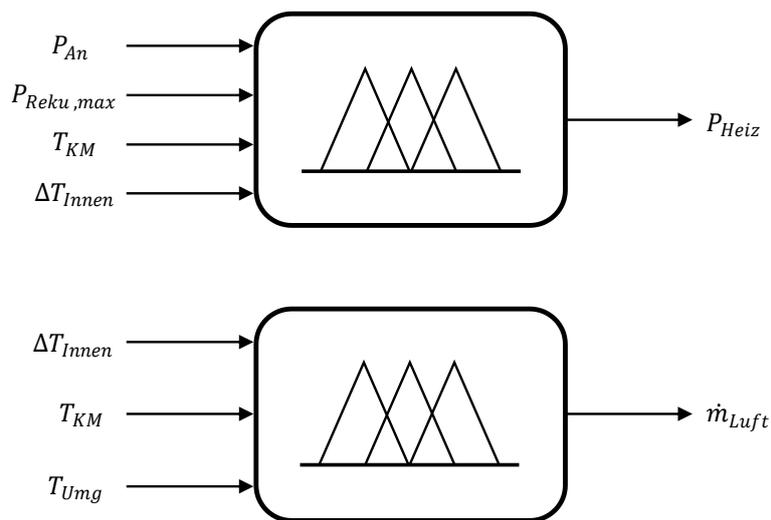


Abbildung 6.2: Ein- und Ausgänge der Fuzzy-Logik Strategie nach [174, S. 60]

Die iterative Reglerauslegung erfolgt mit Hilfe der Fuzzy Logic Toolbox von MATLAB/Simulink. Als Zugehörigkeitsfunktionen zwischen den Fuzzy Mengen der Ein- und Ausgänge werden aufgrund ihrer dynamischen Eigenschaften [175, S. 25] Dreiecks- und Trapezfunktionen definiert. Die Regler umfassen insgesamt 174 Regeln für die Heizleistung P_{Heiz} und 26 Regeln für den Luftmassenstrom \dot{m}_{Luft} . Die hohe Anzahl entsteht durch die große Menge der kumulierten Fuzzy-Mengen. Die Defuzzifizierung der Ausgänge erfolgt durch die Schwerpunktmethod [175, S. 26].

6.3 Heizgerät-interne Strategie

Beide zuvor beschriebenen Strategien betrachten das Heizgerät als einen Aktuator, der von einem zentralen Energiemanagementsystem unter Berücksichtigung der Maschinenleistung und der Batteriezustände gesteuert wird. Alternativ soll die Heizgerät-interne Strategie von einer

eigenen Intelligenz im Gerät ausgehen, die eine schnellere Reaktion durch die nicht erforderliche Buskommunikation verspricht. Ein weiterer Vorteil ist die Unabhängigkeit zwischen der Heizgeräte- und Fahrzeugentwicklung, die sich zwischen Zulieferer bzw. OEM aufteilt. Diese Strategie wurde in Zusammenarbeit mit Kraus [176] erarbeitet und wird folgend zusammenfassend vorgestellt.

Neben den Heizkreislaufzuständen, die dem Steuergerät des Heizgeräts ohnehin bekannt sind, ist die Bordnetzspannung die wesentliche Regelgröße, die den Fahrzustand des Fahrzeugs anzeigt. Rekuperationsströme führen zu Überspannungen und damit zu einem Anstieg der Bordnetzspannung. Entladeströme durch Beschleunigungen lassen die Spannung hingegen einbrechen. Durch den Vergleich mit einem laufenden Mittelwert kann das Heizgerät seine Leistung abhängig vom Fahrzustand regeln. Die Berechnung des Mittelwerts geschieht über einen Hochpassfilter, der die dynamischen Lasten durch den Antrieb von der SOC-Abhängigkeit der Spannungsantwort der Batterie trennt. Übersteigt die Spannung eine zu definierende Schwelle, wird das Heizgerät mit der definierten Überlast aktiviert, bis eine unterschrittene Ausschaltswelle die Deaktivierung auslöst. Die Ausschaltswelle sollte kleiner als die Einschaltswelle definiert sein, um ein oszillierendes Aktivieren des Heizgeräts zu vermeiden, das als Folge der Reduktion der Überspannung durch das Heizgerät entstehen würde.

Aus ersten manuellen Parametervariationen der Ein- und Ausschaltswelle sowie des Koeffizienten des Hochpassfilters zeigte sich, dass der Zusammenhang nicht konvex ist und stattdessen mehrere lokale Optima vorliegen. Die Definition erfolgt daher durch Monte-Carlo-Simulationen, die eine zufällige Wahl der Parameter treffen. Als Zielgrößen werden die DOD bzw. der Energieverbrauch und der Kapazitätsverlust definiert. Aus dem Lösungsraum werden die Parameter in Tabelle 6.1 grafisch ermittelt. Die Heizgeräte-interne Strategie wird aufgrund des Hochpassfilters mit Interner HP abgekürzt.

Tabelle 6.1: Parameter der Heizgerät-internen Strategie nach [176, S. 48]

Parameter	Wert
Koeffizient des Filters	14
Einschaltswelle	5 V
Ausschaltswelle	3 V

7 Batteriealterungsversuche zur Quantifizierung des PWM Einflusses

Um Fragestellungen aus der realen Fahrzeuganwendung isoliert und statistisch sicher betrachten zu können, müssen Experimente in einem kleineren Maßstab ins Labor übertragen werden. Aus diesem Grund werden die Alterungsversuche auf Zelllevel in einer Klimakammer durchgeführt. Die Versuchsbedingungen orientieren sich an den im Folgenden beschriebenen Zellspezifikationen. Die Versuche wurden gemeinsam mit Everken [177] und Gandlgruber [178] ausgeführt und vorveröffentlicht [95].

7.1 Batteriezellen

Für die Alterungstests werden zylindrische INR21700 Batteriezellen mit einer NMC Zellchemie ausgewählt. Die Nennkapazität von 5 Ah reduzierte sich durch kalendarische Alterung über ca. 13 Monate auf 4,79 Ah mit 0,02 Ah Standardabweichung zwischen den Zellen.

Tabelle 7.1: Zellspezifikationen. Entnommen aus [95].

Eigenschaft	Wert
Nennkapazität in Ah	5
Nennenergie in Wh	18,2
Nennspannung in V	3,63
Ladeschlussspannung in V	4,2
Entladeschlussspannung in V	2,5
Lade C-Raten	0,3 @ 0 ... 25 °C 0,7 @ 25 ... 45 °C
Entlade C-Raten	0,5 @ -20 ... 10 °C 3 @ 10 ... 25 °C 1,5 @ 25 ... 55 °C
AC Widerstand in mΩ	25 @ 1 kHz (nach dem Laden)

7.2 Versuchsdesign

Um die Auswirkungen der PWM Leistungssteuerung des Heizers auf die Alterung der Batterie zu bestimmen, werden die PWM-Rippel nur beim Entladen appliziert. Das Laden erfolgt mit Gleichstrom. Außerdem werden die Zellen direkt mit den Rippeln belastet. Eine Glättung durch systemische Induktivitäten im Fahrzeug wird nicht berücksichtigt.

Der erste Testpunkt von 400 Hz und 50 % Einschaltzeit (engl. duty cycle) entspricht den Charakteristika des Webasto HVH. Als weiterer Testpunkt wird mit 10 Hz eine deutlich unter der Grenzfrequenz von 70 Hz liegende Einstellung gewählt, um die Beobachtung der beschleunigten Alterung durch niedrige Frequenzen von Uno und Tanaka [101] und Brand et al. [102] auf das Anwendungsgebiet des Heizens zu übertragen. Als Pendant dient ein Testpunkt bei 5.000 Hz. Weil die Schaltverluste von Bipolartransistoren mit isolierter Gate-Elektrode (engl. Insulated-Gate Bipolar Transistor - IGBT) proportional von der Schaltfrequenz abhängen, würden geringere Frequenzen einen höheren Wirkungsgrad bedeuten. Allerdings gehen damit problematische elektro-magnetische Störeinflüsse auf andere Bauteile einher. Als Referenz fungieren Zellen, die mit einem Gleichstrom des PWM Mittelwerts entladen werden.

Um die Zellen innerhalb ihrer Spezifikation maximal laden zu können und damit die Versuchszeit zu minimieren, wird die Temperatur der Klimakammer Vötsch VC4100 auf 25 °C eingestellt. Allerdings wird der Ladestrom auf 0,65 C bzw. 3,26 A reduziert, um Überschwinger beim Laden zu vermeiden und mögliche andere Alterungsmechanismen wie Lithium-Plating zu minimieren. Der Entladestrom wird gleich dem Ladestrom gewählt, weil der entwickelte Prüfstand maximal 7 A entladen kann und der maximale Strom bei 50 % Einschaltzeit dem doppelten des Mittelwerts entspricht. Zudem konnte damit ein Kompromiss aus der geringen maximalen Heizleistung von 10 kW und der Testdauer erzielt werden.

Durch die Zyklisierungsgrenzen von 25 % und 75 % SOC wird sichergestellt, dass der Einfluss geringer und hoher SOC [179] minimiert wird. Folglich werden die Zellen mit Halbzyklen (engl. half cycles - HC) beaufschlagt, was auch eine Belastung mit konstantem Strom ermöglicht. Das Laden wird spannungsbasiert durch die Messung im stromlosen Zustand gestoppt. Das Entladen hingegen geschieht stets abhängig von der Ladungsmenge, um den realistischen Fall der Energieversorgung des Heizers unabhängig vom Alterungszustand der Zelle konstant zu halten. Allerdings werden gealterte Zellen dadurch tiefer entladen, was eine zusätzliche Beschleunigung verursachen kann.

7.3 Prüfstand

Weil standardmäßiges Batterietestequipment nicht in der Lage ist, hochfrequente Lasten zu applizieren, wurde ein Prüfstand auf Basis von Chang et al. [110] entwickelt. Jede Zelle wird durch einen Arduino Uno Microcontroller gesteuert und überwacht, weshalb die Zellen als A1 bis A9 betitelt werden. Die Controller sind gemeinsam mit vier Stromplatinen auf einer Basisplatine angebracht. Die Basisplatine wird über ein 5 V Netzteil betrieben. Die Stromplatinen verfügen über einen Digital-Analog-Konverter (DAC), der das Inputsignal des Controllers über eine Komparatorfunktion in einen Strom bis 1,75 A zum Laden oder Entladen wandelt. Eine Rückführung des Zellstroms über einen Shunt Widerstand limitiert den Stromregelfehler auf ± 10 mA, was zu einem maximalen Stromfehler von 80 mA der parallel geschalteten Stromplatinen führen kann.

Die Batteriezellen befinden sich in Zellhaltern und sind über ein Relay mit der Basisplatine verbunden. Zur Überwachung der Zyklierung werden die Zellspannung, der Zellstrom und die Zelltemperatur gemessen. Die Zellspannung wird direkt an den Polen der Batterie gemessen. Der Strom wird mit Hilfe von Hallsensoren mit einer Genauigkeit von 1,35 % erfasst. Die Messung der Temperatur erfolgt mit Hilfe von NTC Sensoren an der Zellmantelfläche. Die gemessenen Daten werden per USB an einen Laptop gesendet und von einem Pythonskript verarbeitet und aufgezeichnet. Neben der Überwachung dient das Skript auch zum Starten der Zyklierung nach den Check-up-Tests.

7.4 Check-up-Tests

Die Alterungsanalyse erfolgt nach jeweils 200 HC durch ein BaSyTec CTS Testsystem, ergänzt durch eine elektrochemische Impedanzspektroskopie alle 400 HC mit Hilfe eines Gamry Instruments 5000E Testsystems. Die Tests werden, wie die Zyklierung, in der Klimakammer bei 25 °C durchgeführt. Der Testprozess beginnt mit einem Konstantstrom-Konstantspannungs-Ladeverfahren (engl. Constant Current Constant Voltage - CCCV) mit einem Konstantstrom von 1,5 A und einem Ladeschlussstrom von 0,1 A. Der folgende Entladeprozess mit 2,5 A dient zur Kapazitätsbestimmung. Es folgt eine Differentielle Spannungsanalyse (engl. Differential Voltage Analysis - DVA), bei der die Zellen mit 0,1 C geladen werden. Durch das langsame Laden wird die OCV angenähert. Aus der Darstellung der differentiellen Zellspannung zur differentiellen Ladung (dV/dQ) über dem SOC können die charakteristischen Spitzen Phasenübergängen der Aktivmaterialien zugeordnet werden [180, S. 95, 181]. Die OCV der Gesamtzelle setzt sich auf den Ruhespannungskennlinien der Elektroden zusammen, sodass durch die sich wiederholenden Check-Up-Tests quantitative Rückschlüsse auf deren Alterung getätigt werden können [182]. Die charakteristischen Parameter in Abbildung 7.1 werden auf Basis relevanter Studien bestimmt [64, 183, 184].

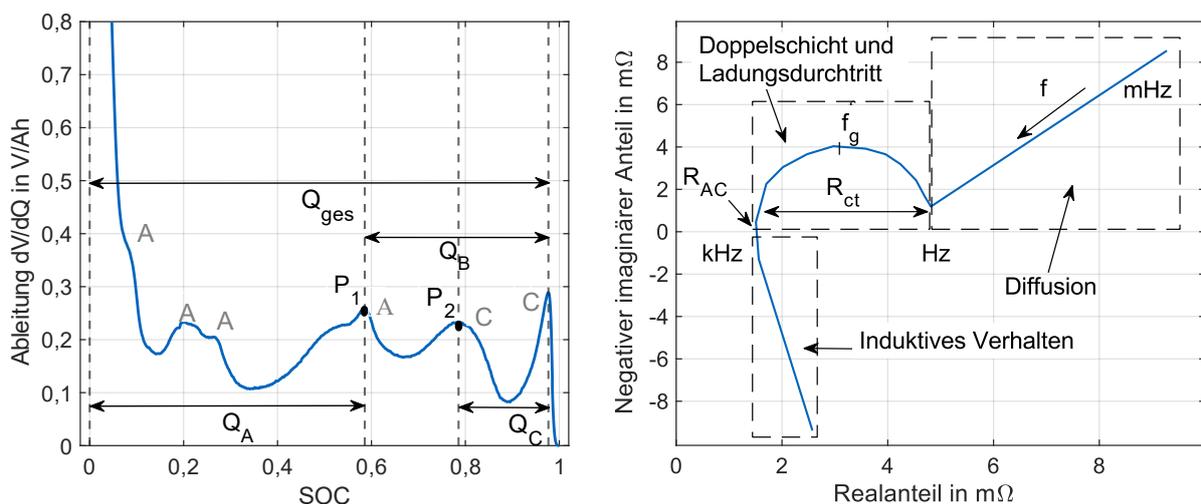


Abbildung 7.1: Ergebnisse der Zell Check-ups zur Quantifizierung der Ergebnisse. Links: DVA. Rechts: EIS. Nach [64, 66, 183]

Wenn die Anode über 50 % lithiiert ist, wechselt das Anodenpotential vom mittleren ins geringe Spannungsplateau, was durch Punkt P₁ beurteilt werden kann. Der Abstand zum Ladestartpunkt gibt somit Aufschluss über die anodenspezifische Speicherkapazität Q_A. Die Distanz zwischen Punkt P₂ und dem Ladeende ermöglicht die Beurteilung der kathodenspezifischen

Speicherfähigkeit Q_c , weil bei hohen SOC die Kathode den Potentialanstieg bestimmt. Der Abstand zwischen den Punkten P_1 und P_2 gibt Aufschluss über die Elektroden-Balancierung als Verhältnis der reversiblen Anodenkapazität zur reversiblen Kathodenkapazität.

Im Anschluss an die DVA erfolgt eine Ah-basierte Entladung auf 50 % SOC. Ein Ladepuls von 2,5 A und ein Entladepuls von 5 A werden appliziert, um den Gleichstromwiderstand zu bestimmen. Es folgt die elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS), die Aufschluss über das elektrodynamische Zellverhalten gibt [96]. Bei einer galvanostatischen EIS wird ein sinusförmiger Strom aufgeprägt und die Spannungsantwort ausgewertet. Abbildung 7.1 zeigt ein beispielhaftes ideelles Nyquist-Diagramm als Ergebnis einer EIS. Der Durchmesser des Halbkreises bestimmt den Ladungsdurchtrittswiderstand R_{ct} [185]. Die Grenzfrequenz f_G stellt sich am Scheitelpunkt des Halbkreises ein [64]. Mit Hilfe von Gleichung (2.13) kann die Doppelschichtkapazität bestimmt werden.

8 Ergebnisse

Dieses Kapitel unterteilt sich in vier Unterkapitel, beginnend mit der Vorstellung der Simulations-szenarien und -randbedingungen. Es folgt die Auswertung der Reichweitensteigerung, die die Analyse des Verhaltens des Heizkreislaufs einschließt. Die Bewertung der Batterielebensdauer erfolgt im zweistufigen Prozess aus der Analyse der Stressfaktoren und der Quantifizierung des Kapazitätsverlusts. Abschließend werden die Einflüsse der PWM analysiert.

8.1 Simulierte Szenarien

Im Rahmen dieser Arbeit wird sowohl der unmittelbare Einfluss der Strategien auf die Reichweite bei Einzelfahrten als auch die langfristige Verbesserung der Batterielebensdauer beurteilt. Folglich werden Simulationen für einzelne Geschwindigkeitsprofile und für einen Jahreszyklus durchgeführt.

8.1.1 Fahrzyklen und Umgebungsbedingungen

Bei dem Versuchsfahrzeug BMW i3 mit 60 Ah Batterie handelt es sich, mit der vom Hersteller angegebenen Reichweite von 130 bis 160 km im alltäglichen Gebrauch [186, S. 17], um ein Fahrzeug, das vorwiegend für Pendler und weniger für Langstreckenfahrer konzipiert ist. Für die Simulation werden drei Pendlerfahrten und eine Autobahnfahrt aus den aufgezeichneten Real-fahrzyklen [115] ausgewählt. Die Realfahrten ermöglichen im Vergleich zu synthetischen Geschwindigkeitszyklen eine realistische Beurteilung der Reichweiten- und der Batterielebens-dauersteigerungen. Um andere Forschungsergebnisse vergleichen zu können, wird darüber hinaus auch der WLTC simuliert.

Die Dauer der Fahrt und die währenddessen entladene Batterie haben einen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse. Prinzipiell bedeutet eine kürzere Fahrt höhere Verbesserungen, weil einerseits die Ladefähigkeit der Batterie durch den sinkenden SOC und die steigende Temperatur steigt und andererseits die Heizleistungsanforderung des Innenraums im stationären Betrieb absinkt. Folglich werden Fahrten mit variierenden Dauern und Distanzen ausgewählt, um den Einfluss der Fahrtcharakteristika diskutieren zu können. Tabelle 8.1 zeigt die ausge-wählten Fahrten. Die Geschwindigkeitsprofile werden zusätzlich in Anhang D dargestellt.

Für alle Simulationen wird der Start-SOC auf den maximalen Wert von 86,8 % eingestellt. Für sämtliche Komponenten und Medien wird die Umgebungstemperatur als Startwert angenom-men, Restwärme oder Vorkonditionierungen werden nicht betrachtet.

Tabelle 8.1: Ausgewählte Fahrzyklen

Fahrt	Kurzbezeichnung	Distanz in km	Dauer in min	Durchschnittsgeschwindigkeit in km/h	Maximalgeschwindigkeit in km/h
	B15	19,2	30,4	38,0	141,1
Pendlerfahrt	B08	32,2	48,6	39,8	112,5
	B36	38,7	47,5	48,9	109,5
Autobahnfahrt	B14	61,0	63,7	57,4	138,4
Prüfzyklus	WLTP Class 3	23,3	18,0	46,5	131,3

8.1.2 Jahreszyklus

Während die Steigerung der Reichweite in Einzelfahrten bei geringen Temperaturen von Relevanz für den Kunden ist, so ist die Batterielebensdauer in Einzelfahrten nur unzureichend zu bewerten. Von Interesse ist der SOH erst nach einer längeren Nutzungsdauer. Die Batterie altert nicht linear [187], sodass eine Hochrechnung aus Einzelfahrten nicht möglich ist. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher eine Jahreszyklus-Simulation durchgeführt, die das Pendelverhalten zwischen Wohnort und Arbeitsplatz abbildet. Abbildung 8.1 zeigt den schematischen Aufbau des Zyklus.

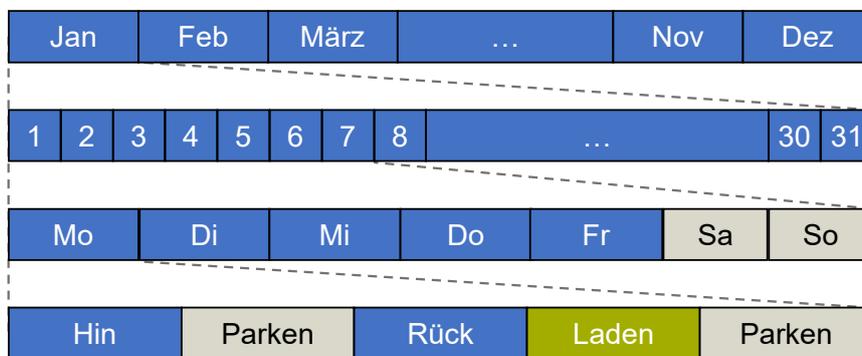


Abbildung 8.1: Aufbau des Jahreszyklus nach [176, S. 72]

Die Einteilung des Jahres in Monate ermöglicht die Einbindung variierender Umgebungstemperaturen. Die Anzahl der Tage eines Monats entspricht dem Kalender. Jede Woche beginnt mit fünf Arbeitstagen, gefolgt von zwei Wochenendtagen. Für die Arbeitstage wird eine Hinfahrt und Rückfahrt durch das Geschwindigkeitsprofil der Fahrt B15 simuliert. Die Temperaturen der Komponenten und des Kühlmittels entsprechen der Umgebungstemperatur. Nach der Rückfahrt wird ein Ladevorgang an einer Wallbox mit 11 kW simuliert. Für das Wochenende wird keine Fahrt simuliert. Daraus ergibt sich eine jährliche Fahrleistung von 9.984 km. Die durchschnittliche Fahrleistung in Deutschland beträgt 13.323 km [188]. Diese vergleichbare Größenordnung ermöglicht realistische Abschätzungen der Alterungsergebnisse.

Die Umgebungstemperaturen werden aus den täglichen Mittelwerten der Tagestemperaturen des Deutschen Wetterdiensts abgeschätzt [189]. Um extreme Temperaturen, die den größten

Einfluss auf die Batteriealterung besitzen [162, 190], zu berücksichtigen, werden nicht die Monatsdurchschnittstemperaturen gewählt. Tabelle E.1 im Anhang listet die simulierten Temperaturen auf.

Die Simulationen des Jahreszyklus sind rechenintensiv. Auf einem Desktop-PC mit 32 GB Arbeitsspeicher und Intel Xenon E3-1270 v5 Prozessor benötigen alle Strategien außer der Fuzzy-Logik ca. zwei Tage Rechenzeit. Die Fuzzy-Logik benötigt zehn Tage Rechenzeit.

8.2 Steigerung der Reichweite

Um die Darstellung der Ergebnisse kundennah zu gestalten, wird die Reichweite aus dem Verhältnis des Energieinhalts der Batterie zum Energieverbrauch bestimmt. Die prozentualen Steigerungen entsprechen damit den Reduktionen im Verbrauch. Abbildung 8.2 zeigt die Reichweiten der Standardstrategie und der in Kapitel 6 vorgestellten Strategien für den Fahrzyklus der Fahrt B15. Die Ergebnisse über alle Fahrzyklen sind in Tabelle F.1 bis Tabelle F.3 dargestellt.

Als Referenz dient die in blau dargestellte Reichweite der Standardstrategie, die im Vergleich zur Reichweite von 116 km bei 20 °C auf 73 % bei 0 °C bzw. 60 % bei -10 °C sinkt, was vergleichbar zum Stand der Technik ist [7, 48]. Für einen Durchlauf des Fahrzyklus steigt die Heizenergie zwischen 20 °C und -10 °C von 0,2 kWh auf 1,9 kWh, während die rekuperierte Energie von 0,8 kWh auf 0,1 kWh sinkt.

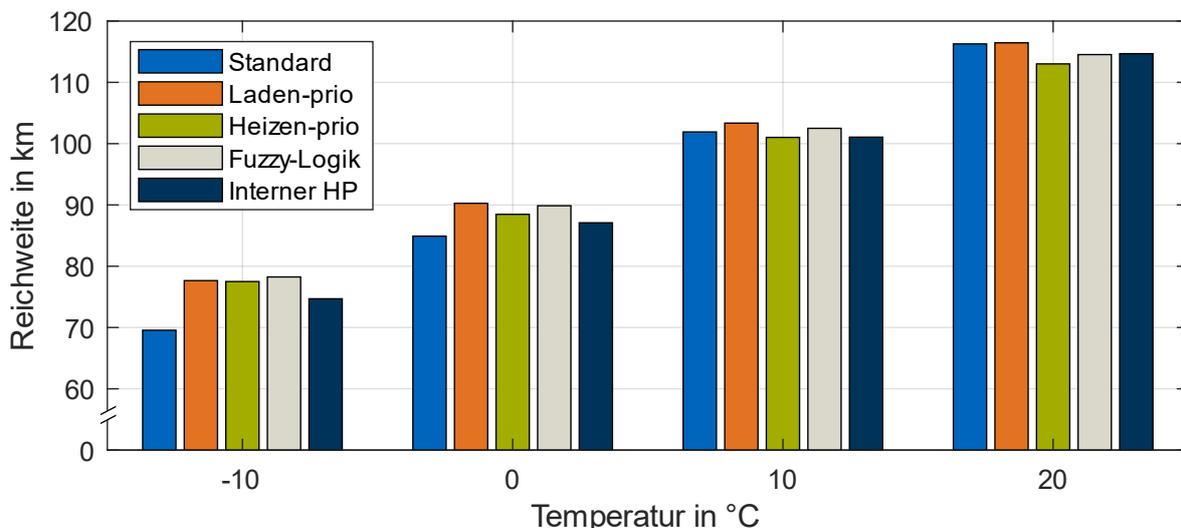


Abbildung 8.2: Reichweiten der entwickelten Strategien im Vergleich zur Standard-Strategie für Fahrt B15

Die Reichweitensteigerung durch die Strategien fällt erwartungsgemäß je deutlicher aus, desto kälter die Umgebungstemperatur gewählt wird. Bei -10 °C erzielt die Fuzzy-Logik eine Reichweite von ca. 78 km, was eine Steigerung von 12,5 % bedeutet. Eine andere Lesart wäre, dass von den 40 % Reichweitenverlust im Vergleich zu 20 °C Umgebungstemperatur 7 %P zurückgewonnen werden können. Die Steigerungen der beiden regelbasierten Strategien beträgt mit ca. 11,5 % geringfügig weniger. Die Heizgeräte-interne Strategie liegt mit 7,4 % Reichweitensteigerung deutlich hinter den anderen Strategien. Die prozentualen Steigerungen bei 0 °C werden in Tabelle 8.2 präsentiert. Der Übersichtlichkeit halber werden die Verbesserungen bei -10 °C und 10 °C in Tabelle F.1 und Tabelle F.3 gezeigt. Bei 0 °C und bei 10 °C erzielt die

Laden-prio Strategie den maximalen Reichweitengewinn von 6,3 % bzw. 1,4 %. Während bei 0 °C alle Strategien in der Lage sind die Reichweite zu verbessern, sinkt diese durch die Heizen-prio und die Heizgeräte-interne Strategie bei 10 °C.

Der Einfluss der Fahrdauer wird durch den Vergleich mit anderen simulierten Fahrten in Tabelle 8.2 deutlich. Die kürzeren Fahrten B15 und WLTC zeigen bei allen Strategien die größte Steigerung der Reichweite. Bei der Autobahnfahrt B14 hingegen beträgt die maximale Steigerung 1,9 % und ist damit um den Faktor 3 kleiner als der Vergleichswert bei Fahrt B15. Dieser Zusammenhang ist temperaturunabhängig auch in Tabelle F.1 und Tabelle F.3 zu beobachten.

Tabelle 8.2: Reichweiten und Reichweitensteigerung bei 0 °C

Trip	Reichweite in km		Steigerung in %			
	Standard		Laden-prio	Heizen-prio	Fuzzy-Logik	Interner HP
B15	84,9		6,3	4,2	5,8	2,6
B08	100,5		2,7	2,5	3,2	2,1
B36	99,9		1,9	1,7	2,2	1,7
B14	100,1		1,9	1,6	1,8	-0,2
WLTP	86,8		4,4	2,3	4,8	2,8
Mittelwert	94,4		3,5	2,5	3,6	1,8

8.2.1 Analyse des Heizverhaltens

Zur weiteren Analyse und Diskussion der Ergebnisse wird das Verhalten des Heizkreislaufs für Fahrt B15 betrachtet. Als Umgebungstemperatur wird 0 °C gewählt, weil es sich dabei einerseits um eine typische Temperatur in mitteleuropäischen Wintern handelt und andererseits die nachfolgenden beschriebenen Phänomene gut sichtbar werden. Abbildung 8.3 zeigt die simulierte Heizleistung für die fünf dargestellten Strategien. Die obere Darstellung der gesamten Fahrt dient zur Diskussion der Häufigkeiten der Heizleistungsspitzen durch ETR. Die Vergrößerung darunter liefert einen detaillierten Blick auf die Heizleistung während einer Heizleistungsspitze.

Mit der Standard-Strategie steigt die Heizleistung zunächst für ca. 100 s auf ihren maximalen Nennwert von 7 kW, sinkt folgend auf ca. 3,5 kW ab und fällt nach ca. 600 s auf ihren stationären Wert von ca. 2 kW. Die Fluktuationen entstehen durch den variierenden Heizbedarf, der sich aus dem geschwindigkeitsabhängigen konvektiven Verlustwärmestrom des Innenraums ergibt. Das kurzzeitige Absinken der Leistung nach ca. 600 s kann zusätzlich durch das Zusammenspiel des Heizleistungs- und des Luftmassenstromreglers erklärt werden. Letzterer regelt bis zu diesem Zeitpunkt auf den vollen Luftmassenstrom, um den Innenraum möglichst schnell aufzuheizen, was zu einem Überschwingen der Innenraumtemperatur führt, wie in Abbildung 8.5 zu sehen ist.

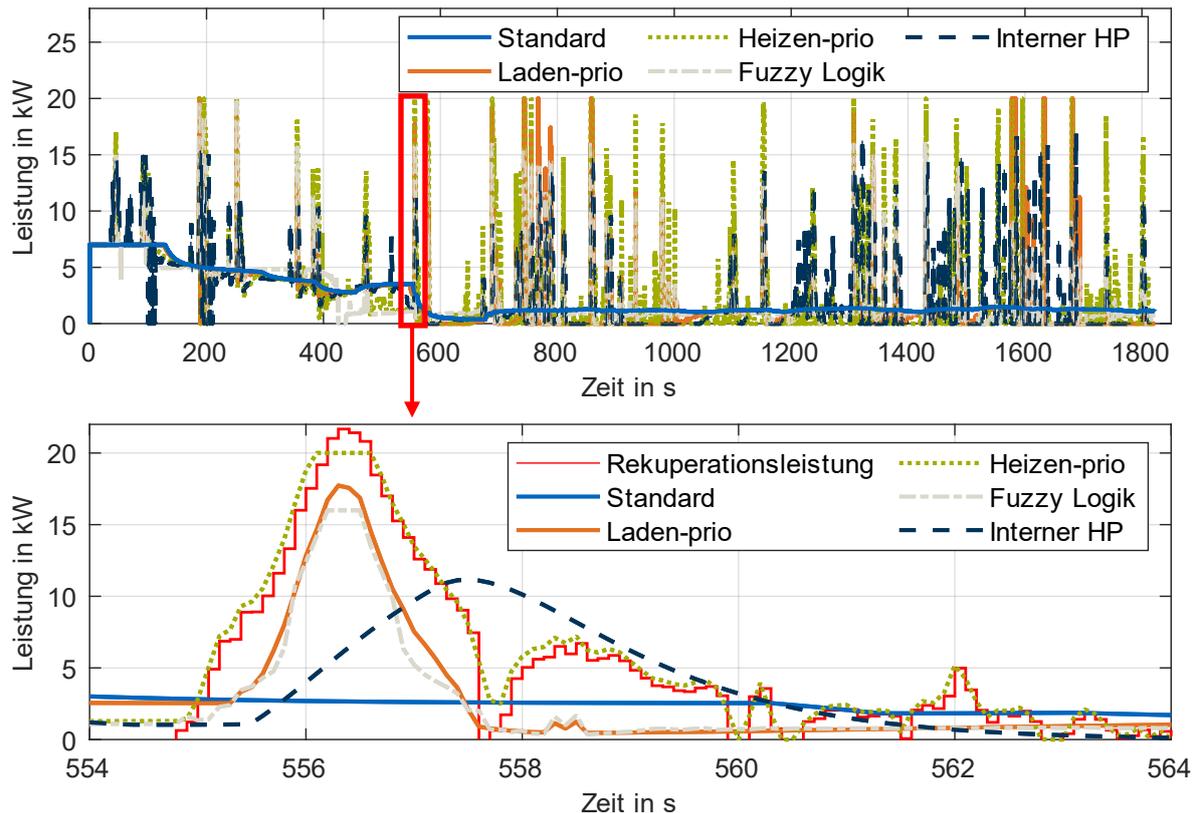


Abbildung 8.3: Heizleistung während Fahrt B15 bei 0 °C. Oben: Gesamtfahrt. Unten: Vergrößerung mit eingezeichneter Rekuperationsleistung.

Die Betriebsstrategien nutzen die ETR zum direkten Heizen mit Rekuperationsleistung. In Abbildung 8.3 wird deutlich, dass die Heizen-prio Strategie durch ihre Definition des bevorzugten Heizens die häufigsten Heizpeaks aufweist. Die Vergrößerung in Abbildung 8.3 veranschaulicht, dass die Heizleistungsspitze der Rekuperationsspitze exakt folgt, bis das Limit von 20 kW erreicht ist. Infolgedessen steigt die Kühlmitteltemperatur durchgehend über die Solltemperatur des Nennbetriebs von 50 °C und mehrmals an das Limit von 70 °C (Abbildung 8.4). In Phasen der Beschleunigung oder konstanten Geschwindigkeit wird das Heizgerät daher vollständig deaktiviert. Darüber hinaus verhindert das Temperaturlimit teilweise auch die ETR. Die Laden-prio Strategie nutzt die Rekuperationsenergie hingegen bevorzugt zum Laden der Batterie, was durch die konstante Differenz zwischen Rekuperationsleistung und Heizleistung deutlich wird. Daher steht weniger Rekuperationsenergie zum Heizen zur Verfügung und das Heizgerät wird über die Rekuperationsphasen hinaus aktiviert. Im Vergleich der regelbasierten Strategien wird der Einfluss der Systemwirkungsgrade deutlich. Die höhere Reichweite durch die Laden-prio Strategie entsteht durch den besseren Wirkungsgrad der Batterie, der trotz der geringen Temperatur über dem Wirkungsgrad des Heizsystems liegt, weil durch die höhere Temperaturdifferenz zwischen der Kühlmittel- und der Umgebungstemperatur auch der Verlustwärmestrom steigt. Dieser Zusammenhang wird in der Regelung der Fuzzy-Logik durch die Berücksichtigung der Kühlmitteltemperatur genutzt, indem die Leistungsspitzen bei hohen Kühlmitteltemperaturen geringer ausfallen, wodurch die Kühlmitteltemperatur nicht ihr Maximum erreicht und die ETR stets verfügbar bleibt.

Die Heizgeräte-interne Strategie ist nicht in der Lage, der hohen Dynamik zu folgen, sodass sie erst verspätet die Überlastung steuert und nach der Rekuperationsspitze das Heizgerät in Überlast betreibt. Folglich wird in diesem Fall nicht benötigte Energie aus der Batterie entladen, weil

die Kühlmitteltemperatur über dem Sollwert liegt. Der anvisierte Vorteil in der Reaktionsgeschwindigkeit der Heizgeräte-internen Strategie wird durch die Trägheit der Batteriespannung somit überkompensiert.

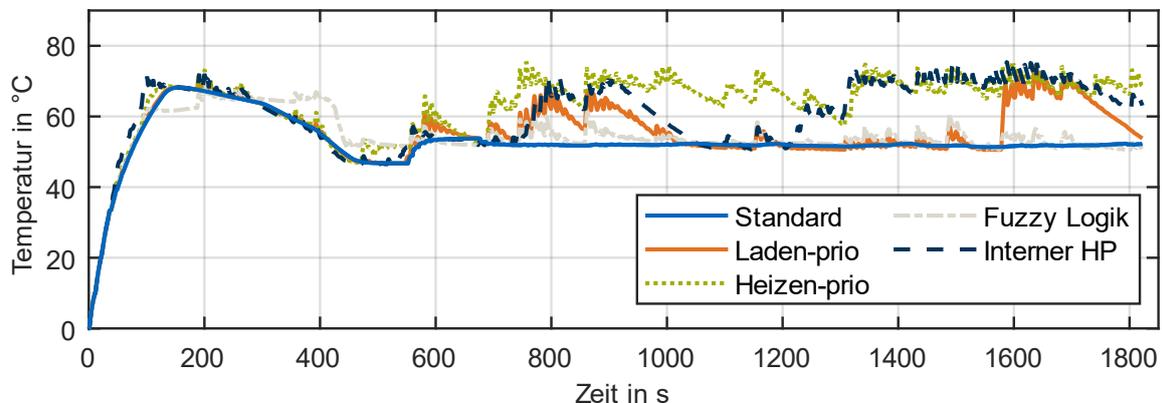


Abbildung 8.4: Kühlmitteltemperatur am Heizgeräteausgang. Fahrt B15 bei 0 °C

Der Verlauf der Innenraumtemperatur in Abbildung 8.5 zeigt, dass alle Strategien in der Lage sind, die Solltemperatur von 22 °C zu erreichen und zu halten. Bei allen Strategien außer der Fuzzy-Logik wird der Luftmassenstrom, der den Wärmestrom regelt, über den P-Regler gesteuert. Die Fuzzy-Logik regelt den Luftmassenstrom stattdessen eigenständig. Die zulässigen Abweichungen der Innenraumtemperatur führen zu gepufferten Energiereserven, die in der vorliegenden Fahrt durch den hohen Rekuperationsanteil allerdings kaum benötigt werden.

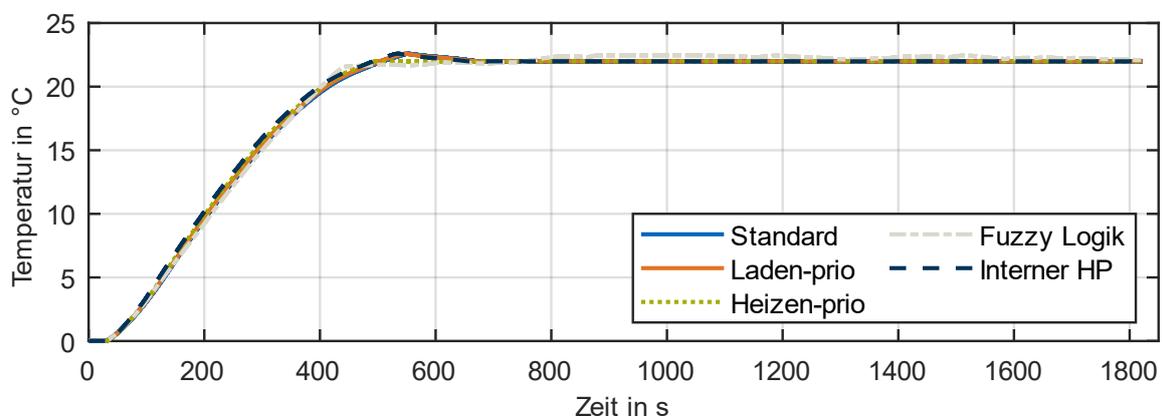


Abbildung 8.5: Innenraumtemperatur. Fahrt B15 bei 0 °C

8.2.2 Vergleich zum Stand der Wissenschaft

Sawazki et al. [68] begrenzen die Batterieladefähigkeit bei 0 °C auf 5 kW, was unter der Begrenzung dieser Arbeit liegt, die durchschnittlich 7,4 kW beträgt. Im WLTC erreichen sie eine Energiereduktion von 4,2 %, die vergleichbar ist mit den Ergebnissen dieser Arbeit von 2,8 % bis 4,8 %, je nach Betriebsstrategie. Die Ergebnisse von Lieb et al. [11, 63] sind aufgrund der unterschiedlichen Fahrzyklen nicht eindeutig vergleichbar. So erzielen sie bei -10 °C in einem Stadtzyklus 6 % und in einem Überlandzyklus 4 % Energieersparnis. Die Ergebnisse dieser Arbeit liegen mit 7,6 % bis 12,4 % für den Mischzyklus B15 darüber. Als wesentlicher Grund wird die geringe thermische Masse des Heizgeräts im Vergleich zum von Lieb simulierten Bremswiderstand vermutet. Das bestätigt die Untersuchung von Ramakrishnan et al. [69], die 11 % Energieersparnis beobachten.

8.3 Steigerung der Batterielebensdauer

Für die Betrachtung der Batterielebensdauer wird ein zweistufiger Ansatz gewählt. Einerseits werden im ersten Schritt die Auswirkungen durch die Strategien in einer objektiven Analyse der Stressfaktoren der Batteriealterung quantifiziert, um die Betriebsstrategien unabhängig vom rezipierten Alterungsmodell zu vergleichen. Die Stressfaktoren werden wiederum über die gesamte Fahrt analysiert. Der Lade- und Entladestrom wird detailliert durch eine Lastkollektivanalyse ausgewertet. Andererseits gibt das Alterungsmodell im zweiten Schritt eine Steigerung der Laufleistung zum kundennahen Vergleich untereinander und mit anderen Strategien aus.

8.3.1 Analyse der Stressfaktoren

Die wesentlichen Stressfaktoren der zyklischen Batteriealterung sind die Entladetiefe DOD, die Batterietemperatur T , der Lade- und Entladestrom $I_{Bat,Lad}$ bzw. $I_{Bat,Entl}$ und der Stromdurchsatz Q [161, 191, 192]. Für einen konsistenten Vergleich zur Reichweitenanalyse wird folgend die Energie statt des Stromdurchsatzes betrachtet. Zudem wird diese unterschieden in die geladene und entladene Energie in bzw. aus der Batterie, um die Auswirkungen der Strategien zwischen negativen und positiven Lastfällen bewerten zu können. Tabelle 8.3 listet die Stressfaktoren DOD, Energie und Batterietemperatur nach Fahrtende für die Fahrt B15 für -10 °C , 0 °C und 10 °C auf. Eine detaillierte Analyse des Stroms schließt sich im folgenden Abschnitt 8.3.2 an.

Bei einer Temperatur von -10 °C ist eine absolute Reduktion der DOD um maximal 2,63 % durch die Fuzzy-Logik zu beobachten. Die Heizgeräte-interne Strategie reduziert die DOD nahezu gleichermaßen, während die regelbasierten Strategien geringfügig weniger Reduktion bewirken. Die Reduktion der DOD korrespondiert indes nicht mit der Steigerung der Reichweiten. Die Leistung der mechanischen Bremse, die durch die ETR genutzt wird, wird im Kühlmittelkreislauf zwischengespeichert. Weil dieser allerdings höheren Verlusten unterliegt als eine theoretisch ladefähige Batterie und weil die Batterieverluste beim Entladen zum Heizen teilweise entfallen, ist die Reduktion des DOD geringer als die Steigerung der Reichweite. Bei höheren Temperaturen fällt die Reduktion der DOD geringer aus, wobei die Laden-prio Strategie die besten Ergebnisse erzielt. Deutlich wird auch, dass der Effekt der Heizen-prio und der Heizgeräte-internen Strategie verglichen mit den anderen Strategien geringer ausfällt, sodass durch die interne Strategie, wie schon bei der Reichweite beobachtet, ein negativer Effekt auftritt.

Für die geladene Energie der Batterie zeigen sich die Effekte der ETR und der Lastspitzenglättung über die verschiedenen Temperaturen. Bei -10 °C führen die Strategien größtenteils zu einer Steigerung, weil die Batterie bis an ihre Ladegrenze belastet wird, ohne dass die Heizenergie subtrahiert wird. Einzig die Heizen-prio Strategie bedingt durch das bevorzugte Heizen eine Reduktion der Ladeenergie. Bei 10 °C hingegen sinkt die Energie durch alle Strategien, außer der Laden-prio Strategie, bei der sie gleichbleibt. Ursächlich ist die Lastspitzenglättung, die trotz ladefähiger Batterie einen Energieanteil der Rekuperation zum Heizen nutzt. Daher fällt dieser Effekt bei der Heizen-prio Strategie am deutlichsten aus.

Ebenso erzielt die Heizen-prio Strategie die größte Reduktion der Entladeenergie, indem sie die Heizenergie fast ausschließlich durch die Rekuperation aufbringt. Die zweithöchste Reduktion der entladenen Energie erzielt temperaturunabhängig die Fuzzy-Logik, die im Gegensatz zur

Heizen-prio Strategie allerdings mehr Energie zum Laden der Batterie einsetzt und damit eine größere Reduktion der DOD bewirkt.

Tabelle 8.3: Stressfaktoren der Batteriealterung für Fahrt B15. Grün markiert: Bestwert hinsichtlich Batteriealterung

Temperatur in °C	Strategie	DOD in %	Geladene Energie in kWh	Entladene Energie in kWh	Batterietemperatur in °C
-10	Standard	25,26	-0,11	5,29	2,22
	Laden-prio	22,83	-0,18	4,81	1,96
	Heizen-prio	22,83	-0,09	4,73	1,72
	Fuzzy Logic	22,63	-0,17	4,77	1,76
	Interner HP	23,64	-0,20	5,01	2,00
0	Standard	19,88	-0,37	4,61	7,06
	Laden-prio	18,70	-0,40	4,39	6,70
	Heizen-prio	19,05	-0,24	4,31	6,59
	Fuzzy Logic	18,76	-0,37	4,38	6,63
	Interner HP	19,37	-0,38	4,51	6,85
10	Standard	16,01	-0,66	4,19	13,75
	Laden-prio	15,79	-0,66	4,14	13,70
	Heizen-prio	16,13	-0,46	4,03	13,66
	Fuzzy Logic	15,90	-0,55	4,07	13,67
	Interner HP	16,13	-0,57	4,13	13,72

Durch die Reduktion des Energiedurchsatzes verringert sich einhergehend die Batterieverlustleistung, was im Vergleich zur Standardstrategie zu einer geringeren Temperatur der Batterie am Fahrtende führt, die auch der maximalen Temperatur entspricht. Im untersuchten Temperaturbereich ist von einer höheren Batteriealterung bei geringeren Temperaturen auszugehen [64], sodass eine Teilkompensation der Alterungsreduktion vermutet wird. Jedoch wird die Batterie nicht außerhalb ihrer Systemgrenzen ge- oder entladen, was keine signifikante Beschleunigung der Alterung bedeutet [64].

8.3.2 Lastkollektivanalyse der Batterieströme

Zur Untersuchung der Lade- und Entladeströme der Batterie über einen Fahrzyklus eignet sich die Lastkollektivanalyse mittels der Momentanwertzählung [9]. Der Verlauf wird in festen Intervallen abgetastet, die mit der Schrittweite von 0,1 s definiert sind, und in definierten Klassenbreiten aufsummiert. Als Klassenbreite wird ± 10 A mit dem Startpunkt von 0 A definiert. So werden die Reduktion der Lastspitzen und die Häufigkeitsverschiebung der auftretenden

Ströme im Bereich um 0 A beurteilt. Neben den Auswirkungen auf die Batteriealterung kann somit auch die Fluktuation der Bordnetzspannung, die andere Verbraucher beeinflussen kann, abgeschätzt werden. Prinzipiell führt eine gleichmäßigere Belastung der Batterie zu einer stabileren Spannung. Abbildung 8.6 zeigt die Lastkollektive für Fahrt B15 bei Temperaturen von -10 °C, 0 °C und 10 °C entsprechend der Auswertung der Reichweitensteigerungen. Zur Übersichtlichkeit werden die Entladeströme ab 110 A in einer Klasse aufsummiert.

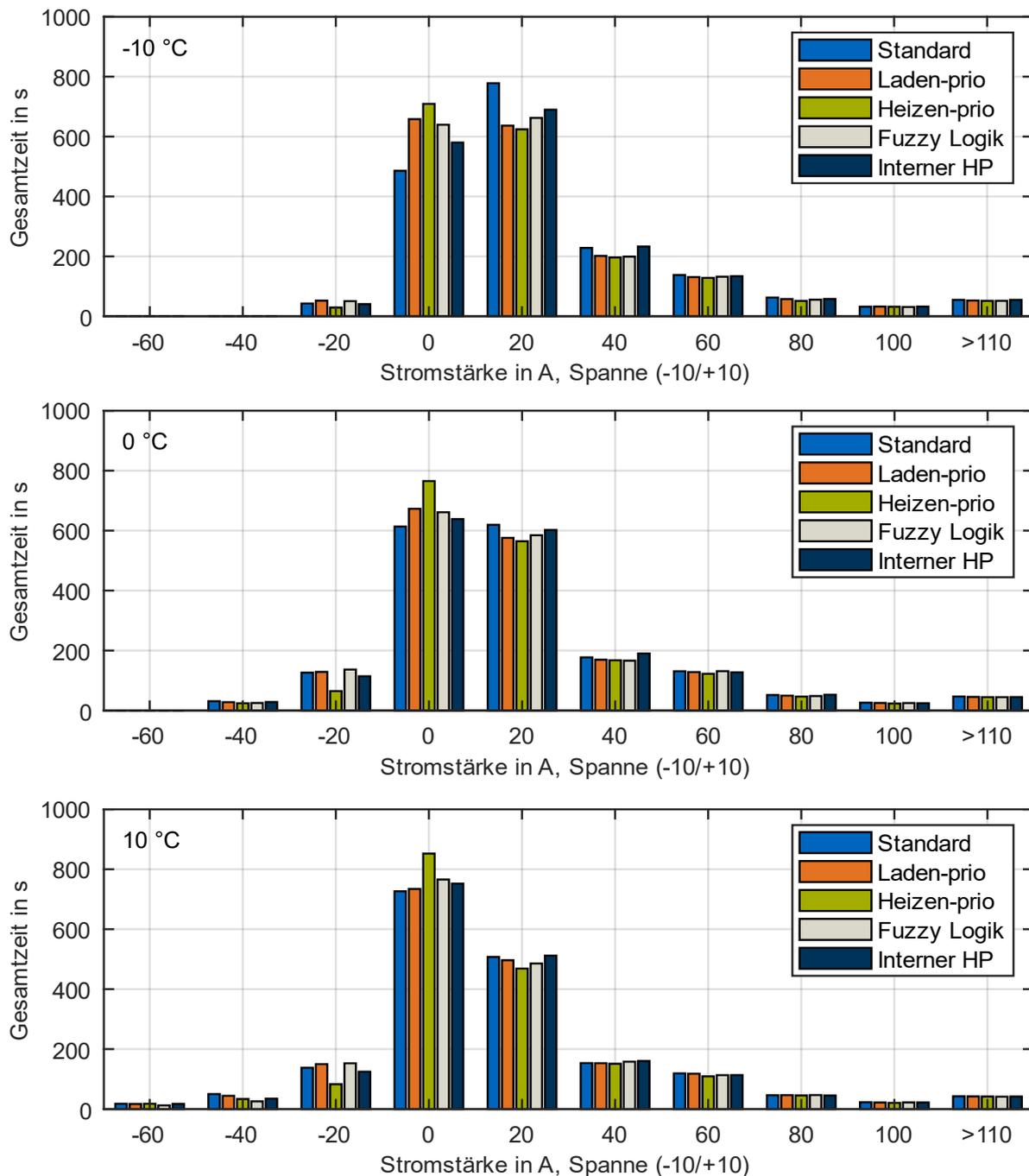


Abbildung 8.6: Lastkollektivanalyse für Fahrt B15 bei -10 °C, 0 °C und 10 °C

Die Batterieströme der Standardstrategie sind als Referenz in Blau dargestellt. Die generellen Unterschiede zwischen den Häufigkeiten für verschiedene Umgebungstemperaturen sind einerseits auf die begrenzte Rekuperationsfähigkeit bei geringen Temperaturen zurückzuführen. So sind in Abbildung 8.6a keine Rekuperationsströme um -10 A und eine geringere Anzahl bei -

20 A zu beobachten. Andererseits führt die höhere Heizleistung bei geringeren Temperaturen zu einer Verschiebung zu höheren Batterieströmen. Die Analyse der Strategien zeigt eine deutliche Verschiebung der Lastspitzen in das Intervall um 0 A. Die zuvor beschriebenen Auswirkungen auf die Stressfaktoren werden teilweise durch Abbildung 8.6 bestätigt. Zusätzliche Erkenntnisse werden folgend analysiert.

Bei -10 °C steigt die Häufigkeit der negativen Ströme, die den Ladeströmen entsprechen, bei allen Strategien geringfügig an, während die Heizen-prio Strategie diese um ca. die Hälfte reduziert. Die Fuzzy-Logik hingegen führt zu einer minimalen Reduktion der Lastspitzen, was in Zusammenhang mit Tabelle 8.3 bedeutet, dass zwar mehr Energie geladen wird, die Spitzenströme aber geringer sind. Dieser Effekt wird auch bei 0 °C und bei 10 °C beobachtet. Zusätzlich wird festgestellt, dass die Lastspitzen im Bereich um -60 A und -40 A gesenkt werden können. Der Anstieg bei der Laden-prio Strategie bei -20 A kann also auch durch eine größere Verschiebung von -40 A zu -20 A als von -20 A zu 0 A verursacht sein.

Die Reduktion der positiven Lastspitzen fällt bei -10 °C für den Bereich um 20 A am deutlichsten aus. Die regelbasierten Strategien senken diesen Bereich um ca. 20% , die Fuzzy-Logik um ca. 12% , die Heizgeräte-interne Strategie liegt dazwischen. Diese signifikante Reduktion lässt sich durch den geringen Lastbereich erklären, der einer Batterieleistung von ca. $7,5\text{ kW}$ entspricht. Die Heizleistung beträgt nach Abbildung 8.3 initial 7 kW und stationär ca. 2 kW . Der folglich hohe Anteil der Heizleistung kann durch die direkte Beheizung der ETR stark reduziert werden, was zu der beschriebenen Verschiebung führt. Gleichsam erklärt sich der geringe Anteil bei höheren Strömen durch die unveränderte Antriebsleistung.

Die Fuzzy-Logik reduziert die positiven Lasten am geringfügigsten, was einen Widerspruch in den Zielgrößen zeigt und durch die Priorisierung der Reichweite erklärt werden kann. Wie in Abschnitt 8.2.1 erklärt, nutzt das Heizgerät durch die Fuzzy-Logik in Rekuperationsphasen weniger Maximalleistung zum Heizen, um das Kühlmittel wegen des schlechteren Wirkungsgrads und des Puffers zu Maximaltemperatur nicht zu stark zu erwärmen. In folgenden Fahrsituationen, in denen die Batterie entladen wird, muss folglich mit Energie aus der Batterie geheizt werden.

8.3.3 Auswertung des Kapazitätsverlusts

Die Batteriealterung wird als Kapazitätsverlust durch das rezipierte Alterungsmodell (Unterkapitel 5.3) berechnet. Zur Visualisierung sind die Verluste abhängig von der Temperatur und der Strategie in Abbildung 8.7 als Säulendiagramm für Fahrt B15 dargestellt. Beim Vergleich des Kapazitätsverlusts zwischen -10 °C und 10 °C bei der Standard-Strategie wird die um Faktor 10 verstärkte Alterung bei der geringeren Temperatur deutlich, die vor allem durch den höheren Energiedurchsatz entsteht. Der Einfluss der Strategien ist im Vergleich zur Reichweitensteigerung gering. Bei -10 °C kann die Heizgeräte-interne Strategie die maximale Reduktion des Kapazitätsverlusts von ca. 5% erzielen. Bei 0 °C und 10 °C hingegen reduziert die Heizen-prio Strategie den Kapazitätsverlust mit jeweils ca. 3% am deutlichsten.

Im Anhang quantifizieren Tabelle G.1, Tabelle G.2 und Tabelle G.3 die Kapazitätsverluste und deren Änderung durch die Strategien für -10 °C , 0 °C bzw. 10 °C über alle Fahrten. Es wird deutlich, dass der Kapazitätsverlust bei längeren Fahrten weniger reduziert wird oder sogar steigt. Ursächlich sind die geringeren Batterieverluste und folgend die reduzierte Erwärmung, die sich negativ auf die Alterung auswirkt. Letztlich gilt es, diesen Effekt in der Anwendung zu vermeiden. Dazu könnte der Einsatz der Betriebsstrategien auf kurze Fahrten begrenzt werden. Vorteilhafter

wäre hingegen die aktive Beheizung der Batterie, wie sie in Elektrofahrzeugen auf dem Stand der Technik [126] üblich ist, zu nutzen, um den Effekt auszugleichen.

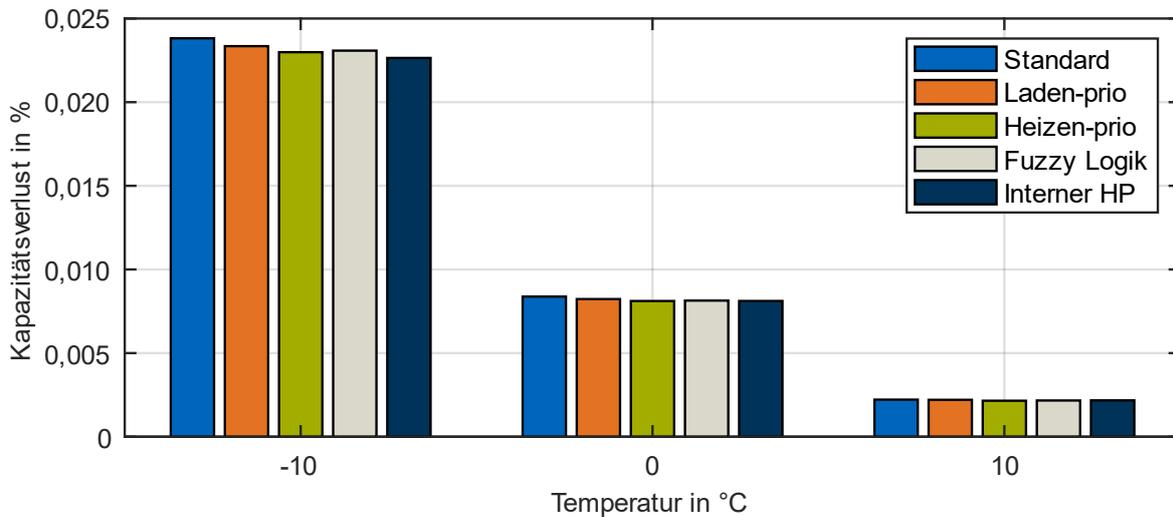


Abbildung 8.7: Kapazitätsverlust B15

Der Kapazitätsverlust im Jahreszyklus, dargestellt in Tabelle 8.4, erscheint hoch auszufallen. Wird die Laufleistung linear abgeschätzt, beträgt diese mit der Standard-Strategie für ein definiertes Lebensdauerende bei einem SOH von 70 % ca. 66.900 km nach ca. 7 Jahren und damit weniger als die von BMW garantierten 100.000 km nach 8 Jahren [118]. Als wesentliche Ursachen wird eine Überschätzung des Alterungsmodells vermutet. Wie in Abschnitt 5.3 beschrieben, entspricht das Alterungsmodell in seiner Zellchemie zwar den Zellen des BMW i3, jedoch ist es nicht dafür validiert worden. Zusätzlich werden durch die Berücksichtigung extremer Temperaturen die Alterungsergebnisse als Worst-Case Szenario betrachtet. Weil der Fokus dieser Arbeit auf dem Vergleich der Betriebsstrategien liegt, wird eine Analyse dennoch als aussagekräftig betrachtet.

Tabelle 8.4: Simulierter, jährlicher Kapazitätsverlust

Strategie	Kapazitätsverlust in %		
	Gesamt	Kalendarisch	Zyklisch
Standard	4,48	1,86	2,62
Laden-prio	4,46	1,87	2,59
Heizen-prio	4,41	1,87	2,55
Fuzzy-Logik	4,42	1,87	2,55
Interner HP	4,40	1,87	2,53

Der Gesamt-Kapazitätsverlust kann durch alle Strategien gesenkt werden. Die maximale Reduktion erzielt die Heizgeräte-interne Strategie mit 1,8 %. Die Laden-prio Strategie erreicht hingegen lediglich 0,45 %. Dieser Effekt ist wie zuvor bereits beschrieben auf die Temperaturentwicklung der Batterie zurückzuführen. Die Differenzen ergeben sich vor allem durch die zyklische Alterung. Bei allen Strategien steigt die kalendarische Alterung geringfügig an. Die

Ursache liegt in der geringeren DOD, die zu einer verkürzten Ladezeit und damit zu einer längeren Standzeit führt.

8.3.4 Vergleich zum Stand der Wissenschaft

Der Vergleich zum Stand der Wissenschaft hinsichtlich der Batteriealterung unterliegt einigen Rahmenbedingungen, weshalb die zwei ähnlichsten Studien verglichen werden. Insbesondere der primäre Fokus auf der Reduktion der Batteriealterung führt zu deutlich besseren Ergebnissen. Zusätzlich unterscheidet sich die Auswertemethodik. Pham et al. [88] senken die Entladestromspitzen um 7 % und die Ladestromspitzen um 20 %, was in Summe zu einer Reduktion der zyklischen Alterung um 30 % führt. Bereits in Abschnitt 2.4.2 werden diese Ergebnisse angezweifelt. Im Rahmen dieser Arbeit werden nicht die Lastspitzen direkt ausgewertet, sondern deren Häufigkeit. Die maximale Reduktion von ca. 20 % bei Entladung und ca. 50 % bei Rekuperation (Heizen-prio Strategie) führt in Kombination mit der Änderung anderer Stressfaktoren zu einer maximalen Alterungsreduktion von 1,8 % (Heizgeräte-interne Strategie). Diese Größenordnung entspricht den Ergebnissen von Min et al. [89], die 8 % Lastspitzen- und 3 % Alterungsreduktion erzielen. Gemeinsam wird damit die Kritik an der Studie von Pham et al. [88] untermauert.

8.4 Einfluss der Pulsweitenmodulation auf die Batteriealterung

Folgend werden die Ergebnisse der Batteriealterungsversuche durch pulsweitenmodellerte Lasten vorgestellt. Wie auch die entsprechenden Abschnitte 2.5 im Stand der Wissenschaft und 7 im Methodikteil wurden diese im *Journal of Energy Storage* vorveröffentlicht [95].

8.4.1 Kapazität und DC-Widerstand

Die Verläufe der Kapazität und des Innenwiderstands sind in Abbildung 8.8 bzw. Abbildung 8.9 dargestellt. Die zugehörigen Messwerte sind im Anhang unter Tabelle G.1 bis Tabelle G.4 aufgeführt.

Bis zu den ersten Check-Up-Tests nach 200 Halbzyklen ist der Kapazitätsverlust bei acht Zellen ähnlich. Darauf folgend nimmt dieser bei allen Zellen außer Zelle A3, die mit 10 Hz entladen wurde, im geringen Umfang zu. Ursächlich könnte die Bildung der SEI durch die Zersetzung von Kathodenmaterial und Elektrolyt sein, die sich nach den ersten Zyklen stabilisiert. Zelle A3 zeigt hingegen einen stark ansteigenden Alterungsgradienten. Nach nur 800 Halbzyklen beträgt die Kapazität noch 75 %. Die Zelle A3 wurde nicht weiter zyklisiert, weil die definierten Stromdurchsatz- und Spannungsgrenzen sonst hätten angepasst werden müssen. Weitere Check-Up-Tests hätten keine objektiv beurteilbaren Ergebnisse geliefert. Auch die zweite 10 Hz Zelle zeigt einen beschleunigten Alterungsverlauf und erreicht das Lebensdauerende nach 1.200 Halbzyklen. Dagegen ist bei den Zellen, die mit Gleichstrom oder 400 Hz bzw. 5000 Hz entladen wurden, keine signifikant beschleunigte Alterung zu beobachten. Ähnliche Beobachtungen zeigt auch der Verlauf des Innenwiderstands in Abbildung 8.9. Die 10 Hz Zellen A3 und A4 zeigen eine beschleunigte Alterung, so beträgt der Anstieg bei Zelle A4 nach 800 Halbzyklen 33 %. Das Lebensdauerende, definiert als Verdopplung des Innenwiderstands, wird jedoch nicht erreicht.

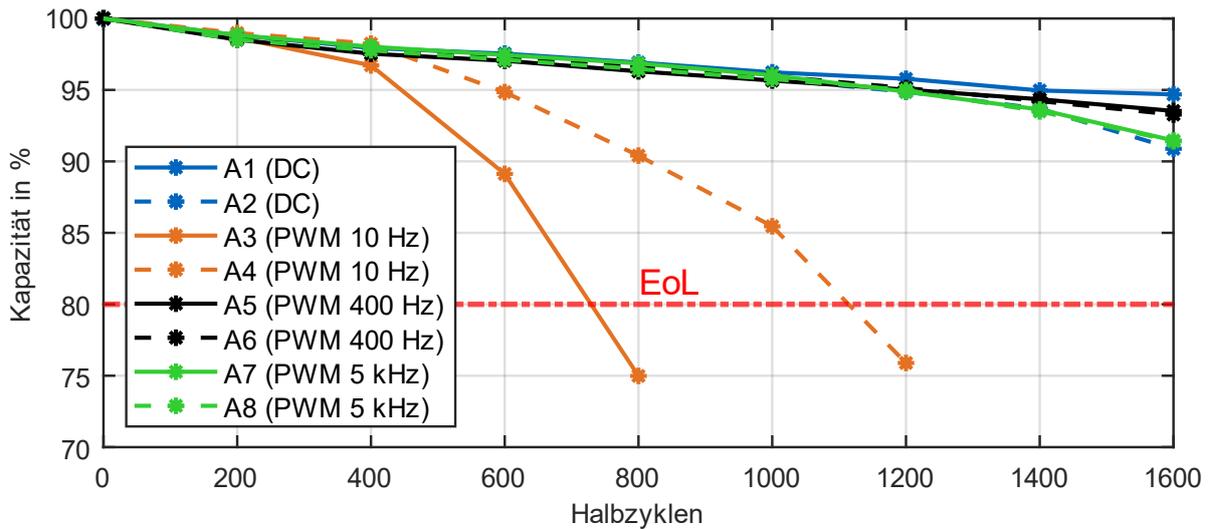


Abbildung 8.8: Normierte Kapazität über Halbzyklen. Entnommen aus [95].

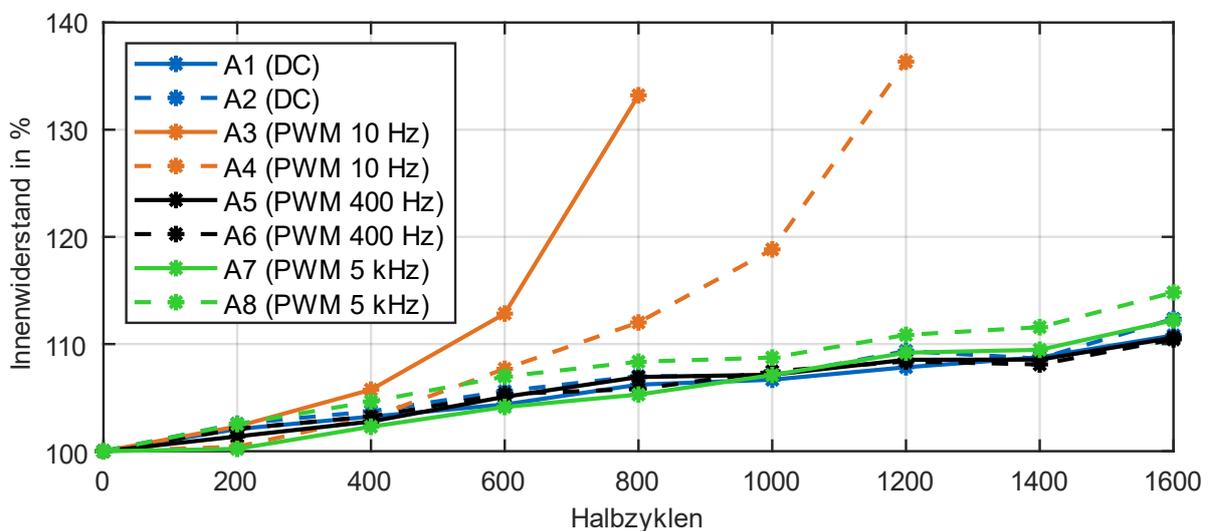


Abbildung 8.9: Normierter Innenwiderstand über Halbzyklen. Entnommen aus [95].

Als Ursache für die beschleunigte Alterung der 10 Hz Zellen kann die Temperatur ausgeschlossen werden. Die durchschnittlichen und die maximalen Temperaturen am Zellmantel während der Zyklisierung sind in Tabelle 8.5 aufgeführt. Die Zelltemperaturen der mit einer PWM entladenen Zellen zeigen zwar eine erhöhte Maximaltemperatur im Vergleich zu den Gleichstromzellen, dennoch weichen diese untereinander nicht voneinander ab. Bei einem Temperatureinfluss auf die Alterung müssten die Zellen A5 bis A7 ebenfalls beschleunigt altern. Darüber hinaus ist die maximale Temperatur der 10 Hz Zelle A4 mit 30,0 °C die geringste im Versuchsumfang. Angemerkt wird, dass die Zellen für die Check-Up-Tests in andere Zellhalter eingelegt werden mussten. Folglich können die Temperaturdaten zwar für grobe Aussagen dienen, jedoch lassen sie keine detaillierten Aussagen zur Temperaturentwicklung zu.

Zusammenfassend konnte für die 10 Hz Zellen eine beschleunigte Alterung beobachtet werden, was andere Studien bestätigt [102, 103]. Hohe Frequenzen führen nicht zu einem beschleunigten Kapazitätsverlust oder Innenwiderstandsanstieg, was gegensätzlich zu den Ergebnissen von Uddin et al. [98] ist, aber u. a. die Ergebnisse von Bessman et al. [109] bestätigt.

Tabelle 8.5: Gemessene Zelltemperaturen während der Zyklisierung. Entnommen aus [95].

Zelle	Durchschnittstemperatur in °C		Maximaltemperatur in °C	
	Einzel	Gruppe	Einzel	Gruppe
A1 (DC)	28.6		31.3	
A2 (DC)	28.9	28.7	31.7	31.7
A3 (10 Hz)	30.1		36.2	
A4 (10 Hz)	27.3	28.7	30.0	36.2
A5 (400 Hz)	31.2		36.6	
A6 (400 Hz)	30.4	30.8	35.7	36.6
A7 (5 kHz)	30.2		35.6	
A8 (5 kHz)	27.8	29.0	30.1	35.6C

8.4.2 Differentielle Spannungsanalyse (DVA)

Die Ergebnisse der DVA sind nach Frequenzen sortiert in Abbildung 8.10 dargestellt. Die Verläufe werden geglättet, um das Messrauschen herauszufiltern. Zum Ende des Ladevorgangs werden die Daten dennoch ungefiltert abgebildet, um die Messparameter (Abbildung 7.1) nicht zu beeinflussen. Zur übersichtlichen Darstellung wurden jeweils die anfänglichen und die letzten DVA Kurven gezeichnet, das bedeutet bei Zelle A3 den Verlauf nach 800 Halbzyklen, bei Zelle A4 nach 1200 Halbzyklen und bei den anderen Zellen nach 1600 Halbzyklen. Die zugehörigen Messwerte sind in Tabelle H.3 aufgeführt.

Die Verläufe vor Beginn der Versuche sind nahezu identisch. Nur die Zellen A7 und A8 zeigen geringe Abweichungen voneinander. Zelle A7 weist eine Gesamtkapazität von 4,76 Ah auf, Zelle A8 von 4,83 Ah. Diese Abweichung ist vor allem durch die Lagerung der Zellen vor den Versuchen zu begründen. Die Verläufe nach der Zyklisierung zeigen starke Unterschiede zum Initialzustand. Der zentrale Hochpunkt P_1 des Graphits wurde geglättet, was durch Ablagerungen von Zersetzungsprodukten der Solvatmoleküle innerhalb der Graphitschichten erklärt werden kann [183].

Zur quantitativen Untersuchung werden die markierten Punkte aus Abbildung 7.1 herangezogen und für jeden Check-Up-Test ausgewertet. Die Entwicklung der Gesamtspeicherfähigkeit Q_{ges} , der anoden-spezifischen Speicherfähigkeit Q_A , der kathoden-spezifischen Speicherfähigkeit Q_C und die Elektroden-Balancierung Q_B sind in Abbildung 8.11 dargestellt.

Die Gesamtspeicherfähigkeit entspricht weitestgehend der Kapazität aus Abbildung 8.8, wird hier jedoch zur Diskussion der Elektrodenalterung zusätzlich aufgeführt. Die anoden-spezifische Speicherfähigkeit Q_A ist für die Gleichstromzellen A1 und A2 sowie für die 400 Hz und 5000 Hz Zellen A5 bis A7 nahezu linear und beträgt nach 1600 Halbzyklen zwischen 80 % und 90 %. Dahingegen ist der Verlust der Speicherfähigkeit bei den 10 Hz beschleunigt zu beobachten. Diese sinkt auf ca. 60 %, bevor die Zellen aus den Versuchen ausgeschlossen werden. Somit wird eine beschleunigte Alterung durch den Verlust von Aktivmaterial (engl. loss of active material - LAM) an der Anode LAM_A nachgewiesen. Als Ursache wird das Wachstum der SEI vermutet

[193, 194]. Die hohen Abweichungen zwischen der Gesamtzelle und den Anoden lassen sich durch die Elektrodendimensionierung erklären. In der Zellauslegung wird die Anode meist überdimensioniert, um Lithium-Plating zu vermeiden [96, 195]. Daher kann hier die Auswirkung der Anodenalterung auf die Gesamtalterung nicht beurteilt werden. Nach Keil [64] wird die Anodenalterung erst ab ca. 50 % zum bestimmenden Faktor der Gesamtzellalterung, was in diesen Versuchen nicht erreicht wurde.

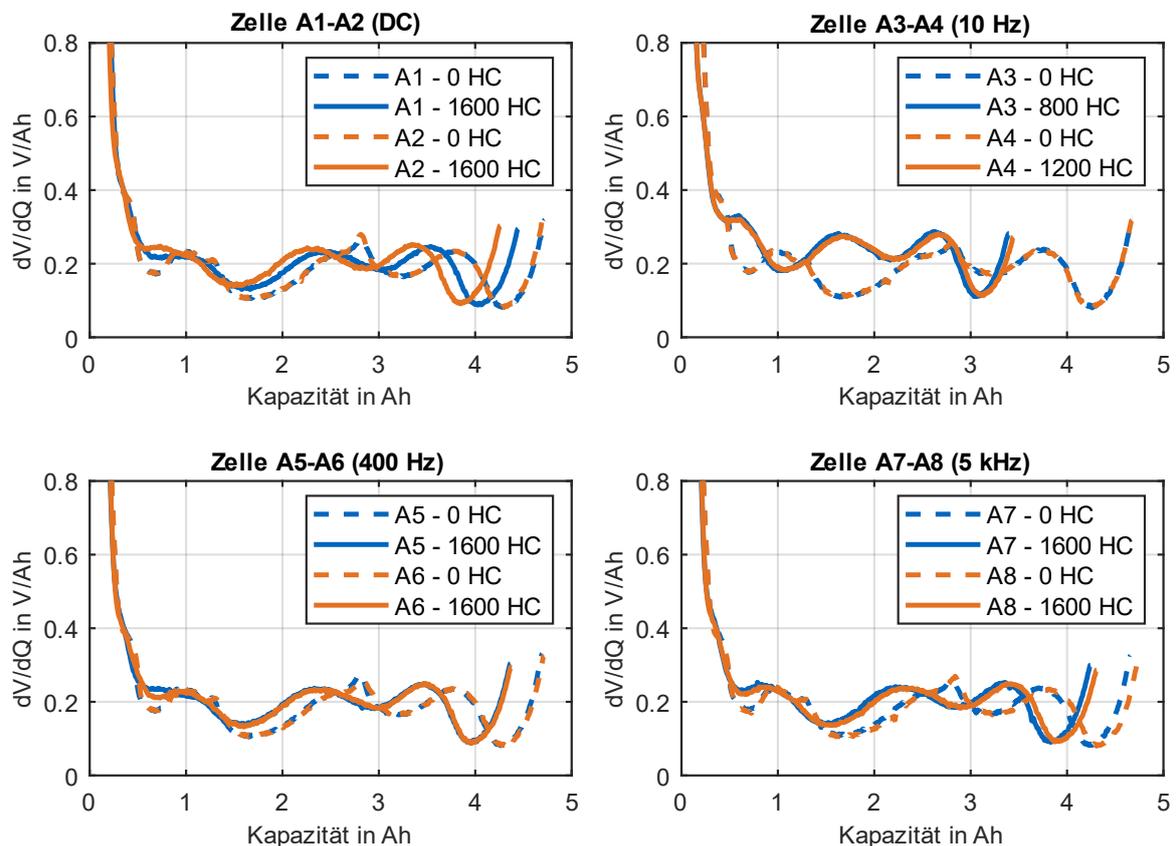


Abbildung 8.10: Ergebnisse der DVA. Entnommen aus [95].

Der Verlauf der kathoden-spezifischen Speicherfähigkeit Q_C zeigt zunächst einen geringen Anstieg um 1,5 %, der auf das Aufbrechen und Neuformieren der SEI nach der monatelangen Zelllagerung zurückzuführen ist [194]. Im weiteren Verlauf der Zyklisierung sinkt die Speicherfähigkeit für die Gleichstrom- und die 400 Hz bzw. 5000 Hz Zellen auf 97,8 % bis 99 %. Ein signifikanter Unterschied ist zwischen diesen Zellen nicht zu beobachten. Analog zu den bisherigen Ergebnissen wird auch eine beschleunigte Kathodenalterung der 10 Hz Zellen deutlich, die auf ca. 85 % kathoden-spezifische Speicherfähigkeit absinken. Der Verlust von Aktivmaterial an der Kathode LAM_C tritt bei den 10 Hz Zellen folglich beschleunigt auf, während er bei Gleichstrom und den höheren Frequenzen nur geringfügig beobachtet werden kann.

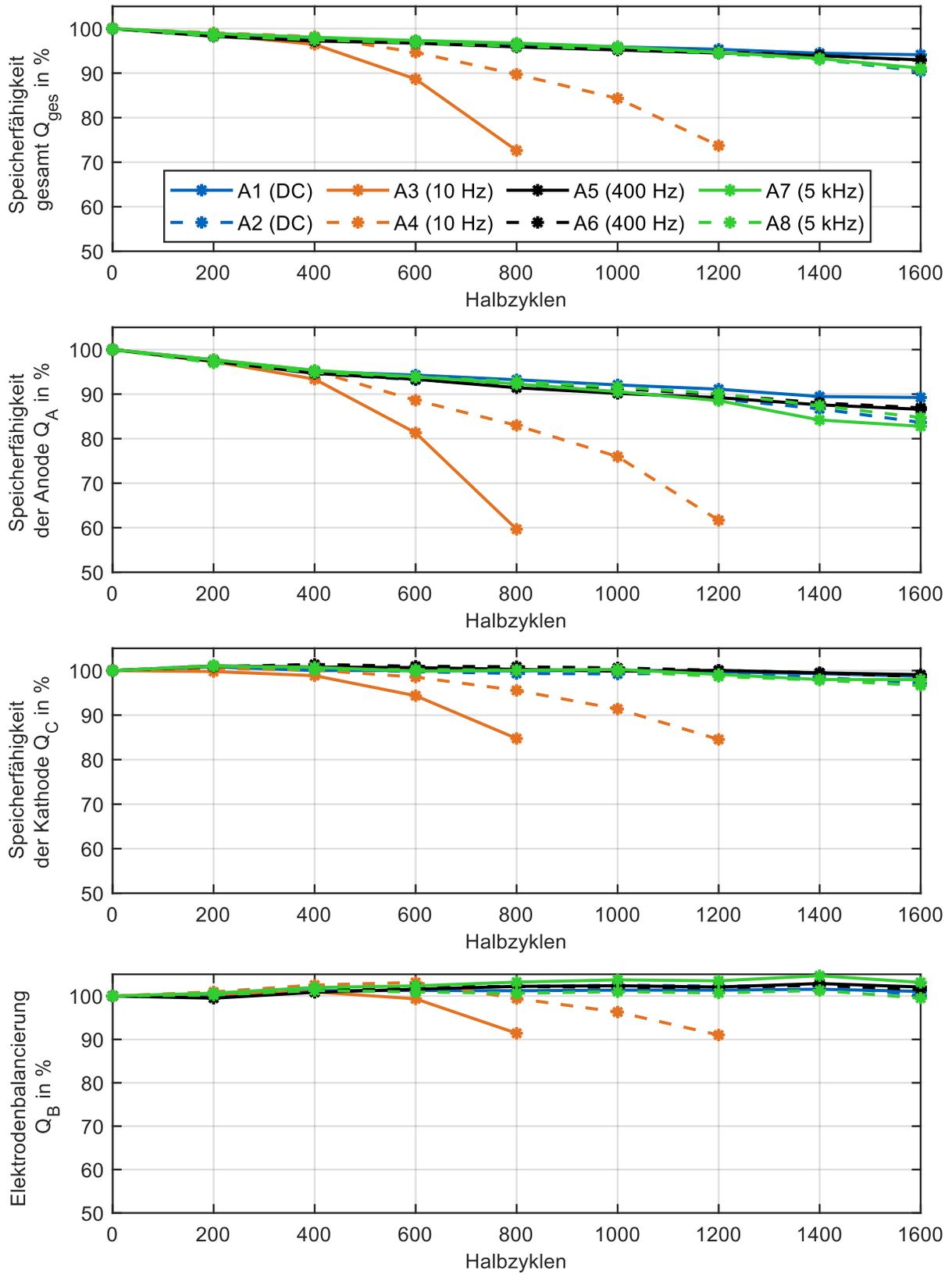


Abbildung 8.11: Auswertung der DVA über Halbzyklen. Erste Zeile: Gesamtspeicherkapazität Q_{ges} . Zweite Zeile: Anodenspezifische Speicherkapazität Q_A . Dritte Zeile: Kathodenspezifische Speicherkapazität Q_C . Vierte Zeile: Elektrodenbalancierung Q_B . Entnommen aus [95].

Die stark ausgeprägte Alterung der Anode im Vergleich zur Kathode wurde auch in Versuchen mit reinen Gleichstromzyklisierungen beobachtet [64, 184]. Anhand des geringen Stroms von 0,65 C und der Temperatur von 25 °C wird Lithium-Plating als Ursache ausgeschlossen. Durch das Entladen der Zellen mit PWM, sprich mit einer konstanten Stromrichtung, entstehen zwei Doppelschichtkapazitäten. An der Anode deinterkalieren die Li-Ionen vom Graphit in den Elektrolyten und an der Kathode interkalieren sie ins Aktivmaterial. Dadurch werden hohe Frequenzen geglättet, während geringe Frequenzen ungehindert passieren [103]. Die Elektroden der 10 Hz Zellen unterliegen folglich einem doppelt so hohen Strom wie die anderen Zellen. Dieser wiederum verursacht höhere Potentialdifferenzen, die zellintern zu mechanischen Spannungen und Temperaturgradienten führen können und dadurch die SEI Bildung beschleunigen können.

Die Elektroden-Balancierung wird durch die Elektrodenkapazität und ihre Ausrichtung zueinander bestimmt [195, 196]. Die höhere Streuung in Abbildung 8.11 ist auf den Analysealgorithmus zurückzuführen. Kleinste Abweichung in der Positionsbestimmung des Hochpunkts haben einen signifikanten Einfluss auf Q_B . Der Anstieg der Balancierung Q_B nach 400 Halbzyklen ist auf den geringen Anstieg von Q_C und die Reduktion von Q_A zurückzuführen. Bei beiden 10 Hz Zellen fällt Q_B auf 92 % nach 800 bzw. 1200 Halbzyklen, während die Elektroden-Balancierung der anderen Zellen über 99 % beträgt und erst zum Versuchsende ein negativer Gradient auftritt. Ursächlich wird ein Verlust von zyklisierbarem Lithium (engl. loss of cyclable lithium - LLI) vermutet. Wahrscheinlich hat sich das Betriebsfenster der beiden Elektroden und damit der Balancierung verschoben. Dennoch wird laut Delos Reyes et al. [46] eine Verschiebung der Balancierung in der Regel dann festgestellt, wenn sich Q_B geändert hat, Q_A und Q_C aber konstant bleiben würden. Daher können LAM und LLI nicht strikt voneinander getrennt werden [9]. Aufgrund des Verlusts an lithiiertem Aktivmaterial treten LAM und LLI in Kombination auf.

8.4.3 Elektrochemische Impedanzspektroskopie

Die dynamischen, zellinternen Prozesse werden unter Berücksichtigung der definierten Messgrößen in Abbildung 7.1 analysiert. Der relevante, kapazitive Anteil der Nyquist Diagramme ist in Abbildung 8.12 zellindividuell vor und nach den Tests dargestellt. Die zugehörigen Messwerte sind in Tabelle G.4 aufgeführt.

Vor Beginn der Zyklisierung ist die Abweichung zwischen den Zellen mit einem Variationskoeffizienten von 0,5 % des Ladungsdurchtrittswiderstands R_{ct} gering und vergleichbar mit anderen Studien [197, 198]. Der ohmsche Widerstand R_{AC} der Zellen A3 und A4, die mit 10 Hz entladen wurden, ist nach 800 Halbzyklen mit durchschnittlich 2,2 m Ω im Vergleich zu den anderen Zellen (durchschnittlich 0,17 m Ω) stark angestiegen. Nach 1.600 Halbzyklen ist nur ein geringfügig höherer Widerstand der durch die 400 Hz und 5.000 Hz entladenen Zellen zu beobachten. Aus diesen Messergebnissen wird ein Einfluss der geringen Frequenz auf den Elektrolytwiderstand, die Aktivmaterialwiderstände oder die Kontaktwiderstände [64] abgeleitet.

Die Analyse des Ladungsdurchtrittswiderstands R_{ct} zeigt ein ähnliches Bild. Bei den 10 Hz Zellen ist dieser nach 800 Halbzyklen um 148 % bei Zelle A3 bzw. um 71 % bei Zelle A4 angestiegen. Für die anderen Zellen beträgt der Anstieg in diesem Intervall durchschnittlich 53 % bei einer Standardabweichung von 6 %. Die beschleunigte Alterung der 10 Hz Zellen kann durch ein schnelleres Wachstum der SEI hervorgerufen werden. Durch die ungefilterte Zyklisierung lagern sich mehr Lithium-Ionen auf der SEI ab und beschleunigen ihr Wachstum. Zwischen den

Gleichstromzellen und den Zellen, die mit 400 Hz und 5.000 Hz entladen wurden, kann ebenfalls kein signifikanter Unterschied beobachtet werden.

Durch die Erhöhung der maximalen Temperatur R_{ct} sinken die Eckfrequenz f_c und die Kapazität der Doppelschicht C_{dl} . Dies bedeutet, dass die Fähigkeit der Doppelschicht, die Frequenzbelastung zu filtern, ebenfalls abnimmt. Folglich tritt ein selbstverstärkender Effekt auf, wenn sich die Eckfrequenz der Lastfrequenz nähert.

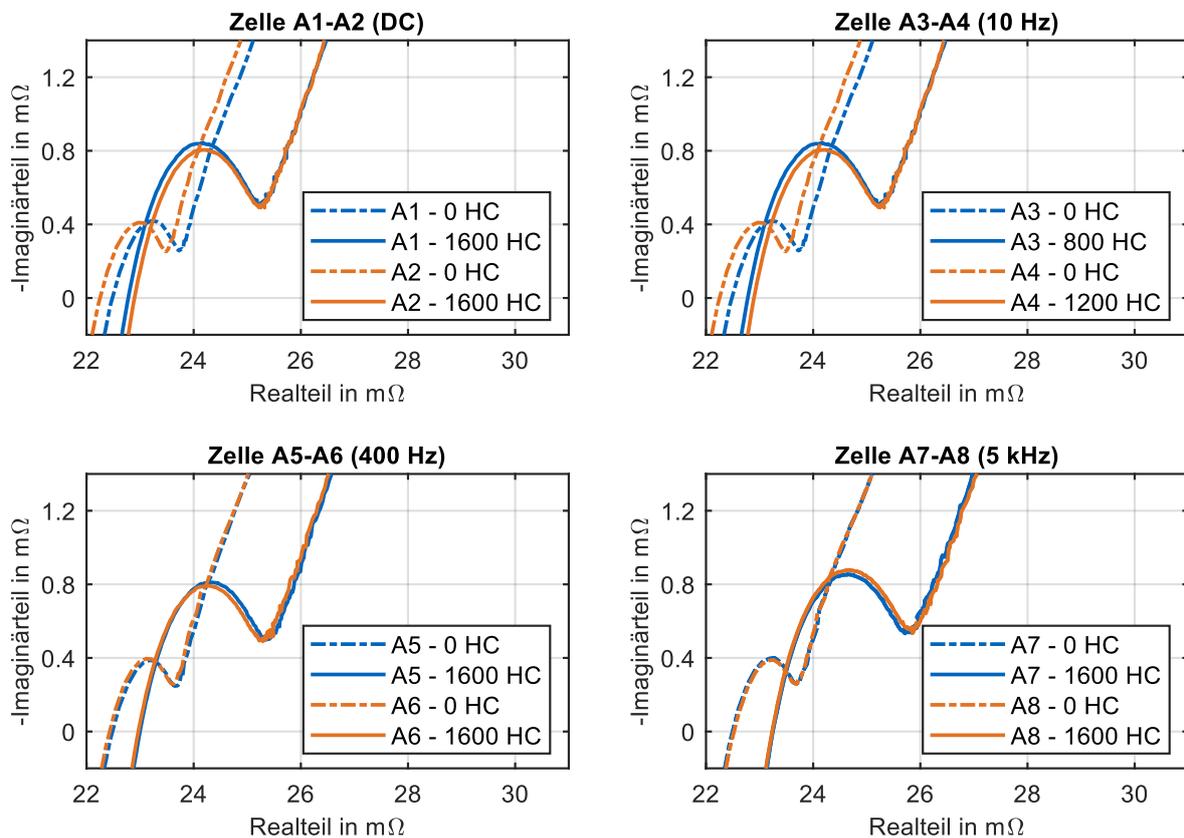


Abbildung 8.12: Ergebnisse des EIS. Vergrößerung des kapazitiven Anteils der Impedanzspektra. Entnommen aus [95].

8.4.4 Vergleich zum Stand der Wissenschaft

Viele Studien zur Batteriealterung sind aufgrund ihrer hohen Anzahl an Einflussparametern nicht eindeutig miteinander vergleichbar. Zur Zellchemie und den Zyklisierungseinstellungen kommen in diesem Feld das Design der Frequenz. Während andere Autoren überlagerte Gleichströme oder Wechselströme mit Nulldurchgang testeten, wird hier eine PWM durch das Heizgerät appliziert. Trotzdem soll ein Vergleich zum Stand der Wissenschaft eine Einordnung bieten.

Trotz der ähnlichen Frequenzen von 10 Hz bis 14,8 kHz, stehen die Ergebnisse von Uddin et al. [97] im klaren Widerspruch zu den Ergebnissen dieser Arbeit. Schon Bessman et al. [109] widerlegen die Signifikanz von Uddin et al. [97] durch einen t-Test. Jedoch können Uddin et al. [98] in einer anderen Veröffentlichung das stärkere Wachstum der SEI durch eine Röntgen-Photoelektronen-Spektroskopie nachweisen. Auch die erhöhten Zelltemperaturen, die auch bei Bala et al. [99] beobachtet werden, können nicht nachgewiesen werden. Der klare Widerspruch kann an dieser Stelle nicht aufgeklärt werden.

Im Gegensatz zu den vorhergenannten Veröffentlichungen belegt diese Studie die Ergebnisse von Uno und Tanaka [101], Brand et al. [102] und Ghassemi et al. [103]. Die Zyklisierung von Uno und Tanaka [101] weist einen wesentlichen Unterschied zur PWM-Entladung auf. Beide Versuche zeigen jedoch eine beschleunigte Alterung bei 10 Hz belasteten Zellen. Brand et al. [102] beobachten ebenfalls eine beschleunigte Alterung bei geringen Frequenzen. Diese treten jedoch vor allem zu Beginn der Zyklisierung auf. Die sich fortsetzende Degradation nach 200 Halbzyklen dieser Experimente stellen einen unterschiedlichen Verlauf dar. Der Einfluss anfänglicher Prozesse der SEI Bildung bzw. Neubildung wird als ursächlich vermutet, weil die Zellen in dieser Versuchsreihe zuvor über Monate gelagert wurden.

Die veröffentlichungs-übergreifende Analyse der EIS zeigt ebenfalls deutliche Unterschiede zu Uddin et al. [97], die einen nahezu konstanten ohmschen Widerstand R_{AC} und einen gestiegenen Ladungsdurchtrittswiderstand R_{ct} beobachten. Im Gegensatz dazu werden durch die Versuche im Rahmen dieser Arbeit Anstiege bei beiden Widerständen festgestellt. Uno und Tanaka [101] berechnen die Eckfrequenzen der Elektroden. Für die Anode beträgt diese bei ihren Zellen 156 Hz, für die Kathode 9 Hz. Diese Unterschiede werden u. a. durch Pritzl et al. [199] und Sabet et al. [196, 200] bestätigt. Daraus lässt sich schließen, dass die Doppelschicht der Kathode geringere Frequenzen filtert als die der Anode, was eine potentielle Erklärung für die starke Degradation der Anode ist. Des Weiteren weisen Brand et al. [102] eine lineare Abhängigkeit der Eckfrequenz vom SOC nach. In den Tests der vorliegenden Arbeit liegt die Eckfrequenz zwischen 45 Hz und 79 Hz bei 50 % SOC. Die Filtereigenschaft der Doppelschicht könnte bei 25 % SOC somit reduziert sein. Weil bei geringen SOC die Anode die dominante Elektrode ist, würde sie durch die 10 Hz Entladung stärker beeinflusst. Im Widerspruch zu dieser Vermutung steht die stärkere Alterung der Anode im Vergleich zur Kathode der Gleichstromzellen. Letztlich kann diese Diskussion durch die Ergebnisse nicht eindeutig untermauert werden und bedarf weiterer Tests.

9 Diskussion und Ausblick

In diesem Kapitel werden die erzielten Ergebnisse diskutiert. Eine einleitende Betrachtung der Relevanz wird gefolgt von der Diskussion des Vorgehens, aus der sich offene Punkte für den Ausblick ableiten.

9.1 Relevanz der Themenstellung

In der Potentialanalyse wird beobachtet, dass die Beheizung des Innenraums und die verminderte Ladefähigkeit der Batterie zu kundenrelevanten Einschränkungen der Reichweite führen. Beim Tesla Model 3 zeigt sich eine Reduktion von 17 % durch die Heizung und weiteren 15 % durch die Ladefähigkeitsbegrenzung, was die Relevanz und die Aktualität der Themenstellung unterstreicht. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Steigerung der Reichweite und moderate Verbesserungen der Batterielebensdauer. Je größer die Reichweitenreduktion durch die geringe Umgebungstemperatur ausfällt, desto größer sind die Verbesserungen der vorgestellten Strategien. Dieser abfedernde Mechanismus wirkt folglich seiner Ursache entgegen und vermindert einen der bedeutendsten Nachteile von Elektrofahrzeugen [5]. Die Relevanz des Themas wird untermauert durch die als hoch zu bewertende Umsetzbarkeit der simulierten Strategien. Einfache Änderungen an der fahrzeug-internen Leistungsregelung bewirken eine signifikante Verbesserung gegenüber dem Kunden, verursachen aber nur geringe Mehrkosten. Zwischen den OEM könnte somit ein Wettbewerbsvorteil entstehen.

9.2 Diskussion des Vorgehens

Das Gesamtverfahren wird in Kapitel 3 beschrieben und durch Abbildung 3.1 visualisiert. Grundsätzlich zeichnet sich die Arbeit durch den hohen Anteil praktischer Versuche und Experimente aus, die valide Modelle und letztlich realistische Ergebnisse garantieren.

Fahrzeugauswahl

Die Aufzeichnung von Fahrdaten mit zwei Elektrofahrzeugen ermöglicht eine solide Datenbasis, die jedoch nicht allumfassend für sämtliche Elektrofahrzeuge gelten kann. Insbesondere die Auswahl des BMW i3 60Ah ist diskutabel. Dieses Fahrzeug wurde im Jahr 2014 hergestellt und ist technisch überholt. Die größten Unterschiede zu modernen Fahrzeugen sind die gestiegene Energiedichte der Batterie und deren standardmäßige Beheizung. Daraus ergibt sich, dass höhere Leistungen rekuperiert werden können. Demgegenüber zu stellen ist die Tatsache, dass höhere Energiedichten auch dazu führen, dass der SOC langsamer sinkt. Zudem ist die Wärmekapazität vermutlich höher, was die Aufheizung durch Verluste verlangsamt. Die Batterie

verweilt dementsprechend länger in Zuständen, in denen sie nicht voll ladefähig ist. Dem wirkt die Batterieheizung entgegen. Durch den zusätzlichen Vergleich des Tesla Model 3 in der Potentialanalyse konnte die Vergleichbarkeit des Systemverhaltens sichergestellt werden.

Heiztechnologie

Aus der Potentialanalyse ergibt sich früh eine Reduktion des Lösungsraums durch die Begrenzung der Heizgeräte auf ein Schichtheizgerät, das zusätzlich in seinen Leistungsgrenzen definiert wird. Diese Einschränkung schließt PTC- und Drahtkühlmittelheizgeräte sowie Luftheizgeräte aus. Statt einer umfangreichen Untersuchung verschiedener Technologien wird die vielversprechendste detailliert simuliert und mit HiL-Versuchen validiert, um das maximale realistische Potential zu quantifizieren. Zur Abschätzung der Potentiale von PTC-Kühlmittel-Heizgeräten wird gemeinsam mit Mayer [44] ein solches modelliert. Die Validierung erfolgt durch die Prüfstandsversuche von Seitz [33]. Eine systemische Validierung im Gesamtfahrzeug wie bei dem Modell des Schichtheizers wurde nicht vorgenommen, was die Aussagekraft des Modells verringert. Dennoch kann ein Vergleich der Heiztechnologien vorgenommen werden. Tabelle 9.1 zeigt eine Reduktion des Reichweitengewinns von über 50 % für die Laden-prio Strategie. Die Auswirkungen auf die Batterielebensdauer reduzieren sich in der gleichen Größenordnung. Die Auswahl der Strategie hat keinen Einfluss auf den Vergleich der Heiztechnologien.

Tabelle 9.1: Vergleich Reichweitensteigerung durch Schichtheizgerät und PTC-Heizgerät mit Laden-prio Strategie

Umgebungstemperatur in °C	Reichweite in km (Standard Strategie)	Reichweitensteigerung durch Schichtheizgerät in %	Reichweitensteigerung durch PTC-Heizgerät in %
-10	69,6	11,6	5,2
0	84,9	6,3	2,3
10	101,9	1,4	0,9

Luftheizgeräte werden nicht simuliert. Die plötzliche Änderung der Heizleistung führt zu schwankenden Temperaturen der die Insassen anströmenden Luft, weil der Kühlmittelkreislauf nicht als Zwischenspeicher genutzt wird. Demzufolge würde der Insassenkomfort signifikant beeinflusst, was zu vermeiden ist.

Die begründete Auswahl der Schichtheiztechnologie bezieht nicht die Bewertung der Lebensdauer des Heizgeräts mit ein. Durch die fluktuierende Last kann es zu mechanischen Spannungen durch Materialkombinationen mit unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten oder zu besonders heißen Stellen an den Umlenkpunkten der Heizschicht kommen. Durch das Fahrverhalten ist allerdings von einem standardmäßigen Aufheizverhalten des Heizgeräts auszugehen, weil nach dem Start des Fahrzeugs nicht direkt mit einer Rekuperation durch Verzögerung zu rechnen ist. Folglich werden extreme Belastungen ausgeschlossen. Zusätzlich kommt es zu einer fortwährenden Wärmeabfuhr durch das Kühlmittel.

Simulationseinstellungen

Die Simulationen stützen sich auf Annahmen, um den Lösungsraum einzugrenzen. Die Simulation von -10 °C als Umgebungstemperatur stellt für Mitteleuropa einen Extremfall dar, ist für andere Länder aber durchaus realistisch. Eine weitere Annahme ist ein vollständig auf die Umgebungstemperatur abgekühltes Fahrzeug, was nur für Fahrzeuge außerhalb von Garagen oder Parkhäusern gelten dürfte. Für die Batterietemperatur ist jedoch davon auszugehen, dass sie aufgrund der hohen thermischen Kapazität die Umgebungstemperatur nicht erreichen wird. Die höhere Ladefähigkeit wirkt sich ab ca. 8 °C auf den Reichweitengewinn durch die Strategien aus, weil die Rekuperationsleistung gegen das Maximum konvergiert (Abbildung 4.4). Die berechtigten Einschränkungen der Simulationsbedingungen reduzieren zwar die Verbesserungen durch die Strategien, jedoch minimieren sie auch das adressierte Problem dieser Arbeit, das in der Reduktion der Reichweite und Batterielebensdauer bei geringen Temperaturen und hohen SOC liegt.

Die Fahrzeugklimatisierung unterliegt in der Praxis zahlreicher Einflussgrößen. Neben den zentralen Parametern Kühlmittel-Volumenstrom und Luftmassenstrom beeinflussen die Stellungen der Dosierklappen der Zuführstrecke (Abbildung 2.2) die Klimatisierung. In der Modellierung wird von einem gleichmäßigen Luftstrom durch alle Ausströmöffnungen ausgegangen. Die Zusammensetzung der einströmenden Luft aus Frisch- und Umluft beeinflusst die Heizleistung. Die Ergebnisse beziehen sich auf die Standardeinstellung mit einem Frischluftanteil von 100 %. Nach DIN 1946-3 [22, S. 13] ist im Umluftbetrieb ein Frischluftanteil von 4 kg/min zuzuführen. Modellseitig wird dies durch einen variablen Frischluftanteil berücksichtigt, der die Temperatur der zuströmenden Luft bestimmt. Tabelle 9.2 zeigt beispielhaft die Reichweiten für die Standard- bzw. die Laden-prio Strategie bei einem Frischluftanteil von 100 % und 50 %. Allein die Umlufteinstellung führt zu einer Reichweitensteigerung von ca. 17 % und liegt damit über dem Effekt der Strategien. Durch die höhere Reichweite mit der Standardstrategie reduziert sich die Reichweitensteigerung mit Hilfe der Laden-prio Strategie auf ca. 7 %. Weil dem Kühlmittelkreislauf durch die wärmere einströmende Luft weniger Wärmeenergie entzogen wird, erreicht die Kühlmitteltemperatur häufiger seine Maximaltemperatur von 70 °C , was den Effekt der ETR zusätzlich schmälert. Die Auswahl der Strategie hat auf den Vergleich des Frischluftanteils keinen Einfluss.

Tabelle 9.2: Einfluss des Frischluftanteils. Fahrt B15. Starttemperatur: -10 °C

Frischluftanteil	Reichweite in km (Standard-Strategie)	Reichweite in km (Laden-prio Strategie)
100 %	69,6	77,7
50 %	81,3	87,1

Alterungsmodell

Das rezipierte Alterungsmodell entspricht nicht den im Versuchsfahrzeug verbauten Batteriezellen und ist zwischen 10 °C und 46 °C validiert. Die Extrapolation kann daher keine exakten Prognosen des Kapazitätsverlustes liefern. Im Jahreszyklus beträgt der Kapazitätsverlust ca. 4,4 %. Im Vergleich ist der Wert als hoch einzuschätzen. Keil [64, S. 121] bestimmt nach einer ähnlichen Distanz von 10.000 km bei 10 °C einen Verlust von 2,5 %. Schindler et al. [201] beobachten in ihren Versuchen eine um den Faktor 4,3 beschleunigte Alterung zwischen 25 °C

und 0 °C. Im Vergleich zeigt Fahrt B15 für diesen Temperaturbereich eine Beschleunigung von Faktor 20. Das Modell überschätzt folglich den Kapazitätsverlust. Die vergleichende Bewertung der Strategien ist dennoch möglich. Zudem werden die Strategien anhand ihrer Auswirkungen auf die Stressfaktoren objektiv verglichen.

9.3 Ausblick

Trotz der umfangreichen Aufarbeitung der Themenstellung und der detaillierten Modellierung und Analyse bleiben einige weniger zentrale Fragestellungen offen. Die Bewertung des Nutzerkomforts geschieht modellbasiert alleinig auf der Grundlage der Temperatur des Fahrzeuginnenraums, der als Punktmasse modelliert ist. Zwar wird die Kühlmitteltemperatur auf 70 °C begrenzt, um die den Insassen anströmende Luft nicht zu warm werden zu lassen, jedoch können die Fluktuationen als störend empfunden werden. Nach Fanger [202] wird der thermische Komfort entscheidend durch sechs Einflussgrößen bestimmt. Die Stoffwechselrate und die Kleidung sind individuelle Eigenschaften, die vorliegend nicht beeinflusst werden. Hinzu kommen die externen Einflüsse der Lufttemperatur und der Luftgeschwindigkeit sowie der Strahlungstemperatur und der Luftfeuchte. Während die beiden Letztgenannten konstant bleiben, werden die Lufttemperatur und -geschwindigkeit durch die Strategien gesteuert. In einem detaillierten Komfortmodell analog zu Schlowak [203] könnten örtliche Temperatur- und Luftgeschwindigkeitsunterschiede zu einer gesamtheitlichen Komfortbewertung zusammengetragen werden. Voraussetzung dafür ist ein validiertes CFD-Modell des Innenraums, in dem die Temperaturen und Luftgeschwindigkeiten örtlich aufgelöst sind. Weil in dieser Arbeit der Fokus auf den Betriebsstrategien liegt, wurde die umfangreiche Analyse des Nutzerkomforts nicht durchgeführt.

Neben der Weiterentwicklung am Modell sollte der nächste Schritt die praktische Umsetzung der Betriebsstrategien am Fahrzeug sein. Trotz der validierten Modelle und des hohen Versuchsumfangs, können nicht alle Unwägbarkeiten, die im Realtest auftreten, ausgeschlossen werden. Die Umsetzung am Serienfahrzeug erfordert den Zugriff auf die Steuergeräte des Motors, der Batterie und des Heizgeräts und sollte daher in Zusammenarbeit mit einem OEM durchgeführt werden. Denkbar ist auch die Erweiterung der Strategien auf das gesamte Thermomanagement, um die Batterie aus der Leistung der ETR zu erwärmen und schneller rekuperationsfähig zu sein.

9.4 Resümee

Im Rahmen der Potentialanalyse in Kapitel 4 wird der erhebliche Einfluss der Batterietemperatur und des SOC auf die Reichweite durch Analysen von Fahrdaten eines BMW i3 und eines Tesla Model 3 quantifiziert. Durch instationäre Aufheizevorgänge des Fahrzeuginnenraums reduziert sich die Reichweite um ca. 30 %. Durchschnittlich reduziert sich die Reichweite durch die Rekuperationlimitierung zusätzlich um 15 %. Während die Batterietemperatur zu einer vollständigen Deaktivierung der Rekuperation ab - 4°C führt, reduziert sich die Rekuperationsleistung bei einer vollständig geladenen Batterie auf ca. 50 %. Die in dieser Arbeit entwickelten Strategien sind in der Lage diese Verluste signifikant zu minimieren. Die maximale Reichweitensteigerung für die Fahrt B15 bei 0 °C beträgt 6,3 % durch die Laden-prio Strategie. Die Steigerungen der Batterie-lebensdauern bzw. der Reduktion der Batteriealterung sind im Vergleich zur

Reichweitenverbesserung gering. Die besten Ergebnisse der jährlichen Alterungsreduktion von 0,08 % werden durch die Heizgeräte-interne Strategie erzielt.

Die Gewichtung der beschriebenen Zielvariablen, Reichweite und Batterielebensdauer, bei der Auswahl einer Betriebsstrategie obliegt letztlich dem OEM, der diese Entscheidung an den Nutzer weitergeben könnte. Aus mehreren Gründen wird die Umsetzung der Laden-prio Strategie empfohlen:

1. Die Reichweite betrifft den Kunden unmittelbar. Auch in modernen BEV führt eine geringe Umgebungstemperatur zu erheblichen Reichweiteneinbußen. Die Minimierung dieses Effekts steigert die Nutzerzufriedenheit direkt.
2. Der Vergleich der Ergebnisse zwischen den Zielvariablen zeigt den weitaus größeren Effekt auf die Reichweite. Es gilt folglich den größeren Vorteil der Reichweitenoptimierung zu nutzen, während sich die Batterielebensdauer nur geringfügig steigert.
3. Die Umsetzung der Laden-prio Strategie kann auf Gesamtfahrzeugebene und durch die Entwicklungsabteilungen des OEM erfolgen. Im Vergleich zur komplizierteren Fuzzy-Logik erfordert die einfache Funktionsentwicklung der Laden-prio Strategie für die Steuergeräte einen vertretbaren Mehraufwand im Abgleich mit den erzielbaren Ergebnissen. Eine gemeinsame Umsetzung einer Heizgeräte-internen Strategie zwischen OEM und Heizgeräte-Lieferanten wird aufgrund der Strukturen als langwierig und kostenintensiv eingeschätzt.

Für zukünftige BEV ist aufgrund des schlechten COP eine reduzierte Rolle des Heizgeräts zu erwarten. Auch in niedrig- und mittelpreisigen Fahrzeugsegmenten werden Wärmepumpen eingeplant, um die Reichweiten zu maximieren. Die Verknüpfung komponentenspezifischer Kühl- und Kältemittelkreisläufe bietet Wärmepumpen eingangsseitig die nötige Wärme zur Beheizung der Batterie und des Innenraums. Beim Tesla Model Y entstehen durch die Verschaltung der Kreisläufe mit Hilfe von Chillern und i-Kondensatoren 12 unterschiedliche Heizmodi [204]. Durch die direkte Beheizung des Innenraums mit dem Kältemittelkreis und eine gezielte Verschlechterung des Wirkungsgrads am Verdichter soll die benötigte Wärmeenergie erzeugt werden. Dennoch sind auch in diesem BEV zwei Heizgeräte verbaut, um in Extremsituationen elektrisch heizen zu können. Dieses Beispiel zeigt, dass elektrische Heizgeräte zwar in moderaten Bedingungen nicht aktiviert werden, jedoch nicht vollständig entfallen können. Ihre Aufgabe verschiebt sich vom Nennbetrieb zum kurzfristigen Aufheizen mit Maximalleistungen. In die Auslegung von elektrischen Heizgeräten sollten folglich eine höhere Spitzenlast und eine schnellere Reaktionszeit bei einer geringeren Dauerfestigkeit einfließen. Diese Eigenschaften werden auch für die Umsetzung der Betriebsstrategien in dieser Arbeit vorausgesetzt und können die Umsetzung erleichtern.

10 Zusammenfassung

Zwei Nachteile von Elektrofahrzeugen im Vergleich zu konventionell angetriebenen Pkw sind die geringere Reichweite und die begrenzte Lebensdauer der Hochvolt-Batterie. Bei geringen Umgebungstemperaturen sinkt die Reichweite durch die erforderliche Heizleistung und die begrenzte Ladefähigkeit der Batterie. Eine Möglichkeit, diesen Effekt zu minimieren, bietet die elektrothermische Rekuperation (ETR), bei der das Heizgerät mit Rekuperationsleistung gezielt überlastet wird. Die Energie, die sonst durch die Reibbremsen dissipiert würde, wird im Kühlmittelkreislauf zwischengespeichert, sodass während der weiteren Fahrt weniger aus der Batterie geheizt werden muss. Durch die gezielte Überlastung des Heizgeräts bei Verzögerungen und der Reduktion der Heizleistung bei Beschleunigungen kann zusätzlich die Belastung der Batterie reduziert werden, was zu einer Steigerung der Lebensdauer führt. Folgend werden die in Kapitel 3 aufgestellten Forschungsfragen zusammenfassend beantwortet.

1 Wie groß sind die Reichweitenreduktionen, die durch die zusätzliche Leistungsanforderung der Kabinenbeheizung und durch die verminderte Rekuperationsfähigkeit entstehen?

In einer Potentialanalyse werden Fahrdaten eines BMW i3 und eines Tesla Model 3 hinsichtlich der Heizleistung und der Ladefähigkeitsbegrenzung ausgewertet. Es zeigt sich, dass die Heizenergie die Reichweite um bis zu einem Drittel minimieren kann. Die begrenzte Rekuperationsleistung führt zusätzlich zu einer Reduktion von ca. 20 %. In Summe ergeben sich also Reichweiteneinbußen von bis zu 50 %.

2 Welche Heizgeräte eignen sich zur Umsetzung der ETR und der Lastspitzenglättung?

Die Auswertung der Fahrdaten zeigt zusätzlich, dass über 90 % der Rekuperationen mit Leistungen bis 20 kW und Dauern unter 20 s auftreten. Viele Rekuperationen dauern nur 5 s. Als Anforderungen werden daraus eine Überlastbarkeit des Heizgeräts bis 20 kW und eine Reaktionszeit unter 1 s abgeleitet. Im Vergleich zwischen einem PTC- und einem Schichtheizgerät zeigte sich durch HiL Tests, dass nur das Schichtheizgerät die Anforderungen erfüllt. Luftheizgeräte werden aufgrund des fehlenden Kühlmittelkreislaufs als Energiezwischenspeicher ausgeschlossen. Die weitere Modellierung erfolgt basierend auf dem Webasto HVH Gen1.5.

3 Wie können die ETR und die Lastspitzenglättung in Betriebsstrategien miteinander kombiniert werden?

Diese Arbeit stellt vier Betriebsstrategien vor, die das Heizverhalten an der Antriebsleistung adaptieren, um die Zielgrößen Reichweite und Batterielebensdauer zu steigern. Eine

unveränderte Nutzerzufriedenheit in Form einer konstanten Innenraumtemperatur wird als Rahmenbedingungen vorausgesetzt. Zwei regelbasierte Strategien definieren die Priorisierung der Rekuperationsleistung zwischen Batterie und Heizgerät. Eine Fuzzy-Logik bezieht weitere Regelgrößen mit ein und nutzt den Innenraum durch eine um $\pm 0,5$ °C schwankende Innenraumtemperatur als zusätzlichen Energiespeicher. Eine Heizgeräte-interne Strategie regelt auf Basis der Batteriespannung die Heizleistung, um unabhängig von der Fahrzeugkommunikation zu sein.

4 Wie hoch sind die Steigerungen der Reichweite und der Batterielebensdauer durch diese Betriebsstrategien?

Zur Bestimmung der Steigerung der Reichweite und der Batterielebensdauer wird ein Modell eines BMW i3 60 Ah entwickelt, das im Wesentlichen aus einem Längsdynamikmodell, einem Batteriemodell mit rezipiertem Alterungsmodell und einem Heizkreislaufmodell besteht. Mit Hilfe von HiL-Tests des Schichtheizgeräts, Prüfstandsversuchen eines gesamten Heizkreislaufs und Fahrdaten aus dem Versuchsfahrzeug wird das Modell validiert. Um realistische Ergebnisse zu erzielen, werden zusätzlich reale Geschwindigkeitsprofile genutzt und zu Vergleichszwecken durch den WLTC ergänzt. Für die drei simulierten Temperaturen -10 °C, 0 °C und 10 °C sind die besten Strategien und die maximalen Vorteile in Tabelle 10.1 dargestellt. Es zeigt sich, dass die regelbasierte Laden-prio Strategie ähnlich gute Ergebnisse wie die komplexere Fuzzy-Logik erzielt. Daraus sollte schlussgefolgert werden, dass die Umsetzung der vergleichsweisen einfachen Regeln deutliche Verbesserungen der Reichweite bedeutet. Dahingegen zeigt die Heizgeräte-interne Strategie nur geringfügige Verbesserungen, die in der zeitlichen Verzögerung aufgrund der Batteriedynamik begründet sind. Bei der Bewertung der Alterung ist zu beachten, dass die Strategien bei längeren Fahrten zu einer verstärkten Alterung führen können, weil sich die Batterie weniger erwärmt. Dem könnte durch eine Batterieheizung entgegengewirkt werden.

Tabelle 10.1: Vergleich der maximalen Verbesserungen für Fahrt B15.

Temperatur in °C	Strategie mit maximaler Reichweitensteigerung in %		Strategie mit maximaler Reduktion des Kapazitätsverlusts in %	
-10	Fuzzy-Logik	12,5	Heizgeräte-intern	4,9 %
0	Laden-prio	6,3	Heizen-prio	3,1 %
10	Laden-prio	1,4	Heizen-prio	3,0 %

5 Welchen Einfluss hat die PWM des Heizgeräts auf die Batteriealterung?

In Alterungstests werden Batteriezellen mit 0 Hz, 10 Hz, 400 Hz und 5.000 Hz entladen. Für die PWM-Frequenz des Heizers von 400 Hz und für 5.000 Hz wird keine Beeinflussung der Alterungsgeschwindigkeit im Vergleich mit den mit Gleichstrom entladenen Zellen beobachtet. Bei 10 Hz wird hingegen eine Beschleunigung der Batteriealterung nachgewiesen. Weil der Trend in der Heizgeräteentwicklung zu Frequenzen im Bereich von ein- bis zwei-stelligen kHz geht, ist zukünftig nicht von einer beschleunigten Alterung auszugehen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Reichweitenverlust durch geringe Temperatur und durch Batteriealterung. Berechnungsgrundlage: Tesla Model 3 SR mit sich wiederholender Fahrt von 20,1 km nach [8]. Batterieggarantie nach [10].	1
Abbildung 2.1:	Verlustwärmeströme des Fahrzeuginnenraums nach [25].	6
Abbildung 2.2:	HVAC System (ohne Klimaanlage) im Heizmodus. Auf eine detaillierte Darstellung der Klimaanlage wurde aufgrund des Fokus dieser Arbeit auf die Heizung verzichtet.	9
Abbildung 2.3:	Prinzipieller Aufbau eines PTC Hochvoltheizgeräts. Links: Schematischer Aufbau. Rechts: Temperaturverlauf über die unterschiedlichen Schichten. Nach [32, S. 15, 33].	10
Abbildung 2.4	Prinzipieller Aufbau eines Drahtheizgeräts. Links: Schematischer Aufbau. Mitte: Querschnitt des Heizwendels. Rechts: Temperaturverlauf über die unterschiedlichen Schichten. Nach [24, S. 290, 32, S. 14].	10
Abbildung 2.5:	Aufbau des Webasto Hochvoltschichtheizgeräts. Links: Schematischer Aufbau. Rechts: Temperaturverlauf über die unterschiedlichen Materialschichten. Nach [27, 32, S. 15, 33].	11
Abbildung 2.6:	Vergleich des zeitlichen Verlaufs der elektrischen Leistung eines Schicht- und eines PTC-Heizers bei einem Einschaltvorgang nach [33].	11
Abbildung 2.7:	Schematischer Aufbau einer Luft / Kühlmittel-Wärmepumpe nach [42, 43, S. 23].	12
Abbildung 2.8:	Bremsmomentenverteilung und Einschränkung der elektrischen Rekuperation durch die EM. Entnommen aus [54] nach [56].	14
Abbildung 2.9:	Funktionsprinzip der Elektrothermischen Rekuperation (ETR). EM=Elektrische Maschine, LE=Leistungselektronik, HWT=Heizwärmetauscher.	16
Abbildung 2.10:	Klassifizierung von Betriebsstrategien nach [84].	18
Abbildung 2.11:	Doppelschichtkapazität mit Ladungsdurchtritt einer Elektrode. Links: Ersatzschaltbild. Rechts: Stromfluss. Nach [94].	20
Abbildung 3.1:	Übersicht des Gesamtvorgehens	26
Abbildung 4.1:	Korrelation zwischen Batterietemperatur und angezeigtem SOC jeweils zu Fahrtbeginn.	33
Abbildung 4.2:	Glättung des Geschwindigkeits- und Höhenprofils der Fahrt T-L04 des Tesla Model 3. Entnommen aus [8].	34

Abbildung 4.3:	Heizenergieanteil (HA) abhängig von der Umgebungstemperatur. Entnommen aus [8].	36
Abbildung 4.4:	Begrenzung der Rekuperation durch die Batterietemperatur. SOC variiert. Entnommen aus [8].	38
Abbildung 4.5:	Begrenzung der Rekuperation durch den SOC. Batterietemperatur variiert.	38
Abbildung 4.6:	Rekuperationsenergieanteil an der Traktionsenergie abhängig von der Batterietemperatur. Entnommen aus [8].	39
Abbildung 4.7:	Geschwindigkeit, Batterietemperatur und Ladezustand der Tesla Model 3 Überlandfahrten R01, R02 und R05.	39
Abbildung 4.8:	Vergleich Rekuperationslimitierung des Tesla Model 3 auf Überlandfahrten	40
Abbildung 4.9:	Rekuperationscharakteristika – BMW. Entnommen aus [8].	42
Abbildung 4.10:	Rekuperationscharakteristika – Tesla. Entnommen aus [8].	43
Abbildung 4.11:	Vergleich des Anlaufverhaltens zwischen Schicht- und PTC-Heizer	44
Abbildung 5.1:	Struktur und Signalfuss des Längsdynamikmodells nach [131, 132].	45
Abbildung 5.2:	Begrenzung der Rekuperation. Entnommen aus [54].	46
Abbildung 5.3:	Validierung des Längsdynamikmodells für Fahrt B08. Oben: Geschwindigkeit. Mitte: Drehmoment der Maschine. Unten: Batteriestrom. Entnommen aus [131].	47
Abbildung 5.4:	Ermittlung der OCV des Batteriepacks aus der Lade- und Entladekurve. Entnommen aus [131].	49
Abbildung 5.5:	Innenwiderstand des Batteriepacks. Entnommen aus [131].	50
Abbildung 5.6:	Validierung des Batteriepackmodells. Oben: Batteriespannung für Fahrt A01. Mitte: Differenzspannung zur Messung für Fahrt A01. Unten: Batterietemperatur für Fahrt B09. Entnommen aus [131].	52
Abbildung 5.7:	Wärmeübertragungsmechanismen nach [19, S. 15-18, 165, S. 28]	54
Abbildung 5.8:	Thermisches Netzwerk aus zwei Punktmassen und einem thermischen Widerstand nach [168, S. 1045]	55
Abbildung 5.9:	Aufbau des Heizkreislaufmodells. Entnommen aus [131].	56
Abbildung 5.10:	Validierung des Heizkreislaufmodells für Trip B08. Oben: Elektrische Heizgeräteleistung. Mitte: Kühlmitteltemperatur am Heizgeräteausgang. Unten: Innenraumtemperatur. Entnommen aus [131].	58
Abbildung 5.11:	Anlaufverhalten des Heizgeräts bei LIN- bzw. CAN-Ansteuerung	60
Abbildung 6.1:	Heuristik der Leistungsaufteilung für die regelbasierten Strategien bei eingeschränkter Rekuperationsfähigkeit der Batterie. Entnommen aus [131].	62
Abbildung 6.2:	Ein- und Ausgänge der Fuzzy-Logik Strategie nach [173, S. 60].	63

Abbildung 7.1:	Ergebnisse der Zell Check-ups zur Quantifizierung der Ergebnisse. Links: DVA. Rechts: EIS. Nach [63, 65, 182]	67
Abbildung 8.1:	Aufbau des Jahreszyklus nach [175, S. 72]	70
Abbildung 8.2:	Reichweiten der entwickelten Strategien im Vergleich zur Standard- Strategie für Fahrt B15	71
Abbildung 8.3:	Heizleistung während Fahrt B15 bei 0 °C. Oben: Gesamtfahrt. Unten: Vergrößerung mit eingezeichneter Rekuperationsleistung.....	73
Abbildung 8.4:	Kühlmitteltemperatur am Heizgeräteauegang. Fahrt B15 bei 0 °C.....	74
Abbildung 8.5:	Innenraumtemperatur. Fahrt B15 bei 0 °C	74
Abbildung 8.6:	Lastkollektivanalyse für Fahrt B15 bei -10 °C, 0 °C und 10 °C.....	77
Abbildung 8.7:	Kapazitätsverlust B15.....	79
Abbildung 8.8:	Normierte Kapazität über Halbzyklen. Entnommen aus [94].....	81
Abbildung 8.9:	Normierter Innenwiderstand über Halbzyklen. Entnommen aus [94].	81
Abbildung 8.10:	Ergebnisse der DVA. Entnommen aus [94].....	83
Abbildung 8.11:	Auswertung der DVA über Halbzyklen. Erste Zeile: Gesamtspeicherkapazität Q_{ges} . Zweite Zeile: Anodenspezifische Speicherkapazität Q_A . Dritte Zeile: Kathodenspezifische Speicherkapazität Q_C . Vierte Zeile: Elektrodenbilanzierung Q_B . Entnommen aus [94].	84
Abbildung 8.12:	Ergebnisse des EIS. Vergrößerung des kapazitiven Anteils der Impedanzspektra. Entnommen aus [94].....	86
Abbildung B.1:	Batteriemodellparameter der RC-Glieder. Entnommen aus [131].....	xxix
Abbildung D.1:	Simulierte Geschwindigkeitsprofile	xxxiii

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Zusammenfassung des Stands der Wissenschaft zum Alterungseinfluss durch hochfrequente Belastung. Entnommen aus [94].	22
Tabelle 4.1:	Fahrzeugeigenschaften [116–124]	30
Tabelle 4.2:	Eigenschaften der Datensätze	30
Tabelle 4.3:	FTM Route im BMW-Datensatz (*Bild von Grashopper Maps). Entnommen aus [8].	31
Tabelle 4.4:	Überlandrunde im Tesla Datensatz (*Bild von Grashopper Maps). Entnommen aus [8].	31
Tabelle 4.5:	Energieverbrauch streckenidentischer Fahrten	37
Tabelle 4.6:	Quantifizierende Auswertung der streckenidentischen Fahrten des Tesla	41
Tabelle 5.1:	Gemittelte Umgebungstemperatur T_{Umg} , SOC und Batterietemperatur T_{Bat} , Start zu Fahrtbeginn, sowie Innenraumstart- und Innenraumsolltemperatur $T_{Innen,Start}$ bzw. $T_{Innen,Soll}$ für die ausgewählten Fahrten zur Validierung der Teilmodelle	46
Tabelle 5.2:	Parametrierung des zyklischen Alterungsmodells nach [160]	53
Tabelle 5.3:	Parameter des Heizkreislaufs. Entnommen aus [131].	57
Tabelle 5.4:	Gemittelte absolute Differenz zwischen Messdaten und Simulation	59
Tabelle 6.1:	Parameter der Heizgerät-internen Strategie nach [175, S. 48]	64
Tabelle 7.1:	Zellspezifikationen. Entnommen aus [94].	65
Tabelle 8.1:	Ausgewählte Fahrzyklen	70
Tabelle 8.2:	Reichweiten und Reichweitensteigerung bei 0 °C	72
Tabelle 8.3:	Stressfaktoren der Batteriealterung für Fahrt B15. Grün markiert: Bestwert hinsichtlich Batteriealterung	76
Tabelle 8.4:	Simulierter, jährlicher Kapazitätsverlust	79
Tabelle 8.5:	Gemessene Zelltemperaturen während der Zyklisierung. Entnommen aus [94].	82
Tabelle 9.1:	Vergleich Reichweitensteigerung durch Schichtheizgerät und PTC-Heizgerät mit Laden-prio Strategie	90
Tabelle 9.2:	Einfluss des Frischluftanteils. Fahrt B15. Starttemperatur: -10 °C	91
Tabelle 10.1:	Vergleich der maximalen Verbesserungen für Fahrt B15	96

Tabelle A.1:	Parametrierung des Heizgeräts [19].....	xxviii
Tabelle A.2:	Parametrierung des Heizwärmetauschers [19].....	xxviii
Tabelle A.3:	Parametrierung der Schläuche [19, 32].....	xxviii
Tabelle C.1:	Kapazität über 1.600 Halbzyklen Entnommen aus [94].	xxx
Tabelle C.2:	Innenwiderstand über 1.600 Halbzyklen. Entnommen aus [94].	xxx
Tabelle C.3:	DVA-Ergebnisse: Gesamtkapazität, Anodenkapazität, Elektrodenbilanz und Kathodenkapazität gemessen zu Beginn, nach 800 Halbzyklen und am Ende der Studie (*Zelle A4 wurde nach 1.200 HC gestoppt). Entnommen aus [94].	xxxix
Tabelle E.1:	Gemittelte Monatstemperaturen über 30 Jahre in Deutschland und Monatstemperaturen für den Jahreszyklus	xxxiv
Tabelle F.1:	Reichweite durch die Standard-Strategie und Steigerung durch die anderen Strategien bei -10 °C.....	xxxv
Tabelle F.2:	Reichweite durch die Standard-Strategie und Steigerung durch die anderen Strategien bei 0 °C.....	xxxv
Tabelle F.3:	Reichweiten und Reichweitensteigerungen bei 10 °C	xxxvi
Tabelle G.1:	Kapazitätsverlust und dessen Reduktion durch die Strategien aller Fahrten bei -10 °C.....	xxxvii
Tabelle G.2:	Kapazitätsverlust und dessen Reduktion durch die Strategien aller Fahrten bei 0 °C.....	xxxvii
Tabelle G.3:	Kapazitätsverlust und dessen Reduktion durch die Strategien aller Fahrten bei 10 °C	xxxviii
Tabelle G.4:	EIS results: Ohmscher AC- Widerstand (1 kHz), Ladungsdurchtrittswiderstand, Doppelschichtkapazität und Eckfrequenz gemessen initial, nach 800 Halbzyklen und nach Beendigung der Versuche. (Die Bereiche der Eckfrequenz ergibt sich aus der zunächst geringen Anzahl der Testfrequenzen, die später verdoppelt wurde.).....	xxxix
Tabelle H.1:	Kapazität über 1.600 Halbzyklen Entnommen aus [94].	xl
Tabelle H.2:	Innenwiderstand über 1.600 Halbzyklen. Entnommen aus [94].	xl
Tabelle H.3:	DVA-Ergebnisse: Gesamtkapazität, Anodenkapazität, Elektrodenbilanz und Kathodenkapazität gemessen zu Beginn, nach 800 Halbzyklen und am Ende der Studie (*Zelle A4 wurde nach 1.200 HC gestoppt). Entnommen aus [94].	xli

Literaturverzeichnis

- [1] Y. Gao, X. Gao und X. Zhang, „The 2 °C Global Temperature Target and the Evolution of the Long-Term Goal of Addressing Climate Change—From the United Nations Framework Convention on Climate Change to the Paris Agreement,“ *Engineering*, Jg. 3, Nr. 2, S. 272–278, 2017, doi: 10.1016/J.ENG.2017.01.022.
- [2] International Energy Agency, *Global EV Outlook 2019: Scaling-up the transition to electric mobility*. Paris: OECD Publishing, 2019.
- [3] Spiegel. „Autozulassungen: Elektro überholt Diesel.“ <https://www.spiegel.de/auto/elektro-autos-2021-schon-mehr-zulassungen-als-diesel-a-1b23b5f7-2dd3-4ded-85ed-347ef1a513c5> (Zugriff am: 10. März 2022).
- [4] DEKRA e.V. „Wenig Vertrauen in Elektromobilität: Bundesweite DEKRA Umfrage.“ <https://www.dekra.de/de/wenig-vertrauen-in-elektromobilitaet/> (Zugriff am: 25. Februar 2022).
- [5] L. Noel, G. Zarazua de Rubens, B. K. Sovacool und J. Kester, „Fear and loathing of electric vehicles: The reactionary rhetoric of range anxiety,“ *Energy Research & Social Science*, Jg. 48, S. 96–107, 2019, doi: 10.1016/j.erss.2018.10.001.
- [6] J. Taggart, „Ambient Temperature Impacts on Real-World Electric Vehicle Efficiency & Range,“ *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2017, doi: 10.1109/ITEC.2017.7993269.
- [7] L. Horrein, A. Bouscayrol, W. Lhomme und C. Depature, „Impact of Heating System on the Range of an Electric Vehicle,“ *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Jg. 66, Nr. 6, S. 4668–4677, 2017, doi: 10.1109/TVT.2016.2615095.
- [8] M. Steinstraeter, T. Heinrich und M. Lienkamp, „Effect of Low Temperature on Electric Vehicle Range,“ *World Electric Vehicle Journal (WEVJ)*, Jg. 12, Nr. 3, S. 115, 2021, doi: 10.3390/wevj12030115.
- [9] T. Gewalt *et al.*, „Characterization and Concept Validation of Lithium-Ion Batteries in Automotive Applications by Load Spectrum Analysis,“ *31st International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, Kobe*, 2018.
- [10] Tesla Germany GmbH. „Fahrzeuggarantie: Neuwagengarantie.“ https://www.tesla.com/de_DE/support/vehicle-warranty (Zugriff am: 10. März 2022).
- [11] J. Lieb, „Effizienzsteigerung durch Bremswiderstände in batterieelektrischen Fahrzeugen,“ Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugmechatronik, Dresden, 2015.
- [12] H. Tschöke, Hg. *Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs: Basiswissen* (ATZ/MTZ-Fachbuch). Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.

- [13] D. Neumeister, A. Wiebelt und T. Heckenberger, „Systemeinbindung einer Lithium-Ionen-Batterie in Hybrid- und Elektroautos,“ *ATZ Automobiltech Z*, Jg. 112, Nr. 4, S. 250–255, 2010, doi: 10.1007/BF03222156.
- [14] H. Wallentowitz, *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges: Technologien, Märkte und Implikationen*, 2. Aufl. (SpringerLink Bücher). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011. [Online]. Verfügbar unter: <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz351085637cov.htm>
- [15] M. G. Zeyen und A. Wiebelt, „Thermisches Management der Batterie,“ in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, R. Korthauer, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 165–175.
- [16] D. Naunin, *Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge: Technik, Strukturen und Entwicklungen ; mit 8 Tabellen*, 4. Aufl. (Kontakt & Studium 255). Renningen: expert-Verl., 2007. [Online]. Verfügbar unter: http://deposit.dnb.de/cgi-bin/dokserv?id=2754730&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm
- [17] M. Auer, *Ein Beitrag zur Erhöhung der Reichweite eines batterieelektrischen Fahrzeugs durch prädiktives Thermomanagement*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.
- [18] A. Nazari, R. Esmaeeli, S. R. Hashemi, H. Aliniagerdroudbari und S. Farhad, „The Effect of Temperature on Lithium-Ion Battery Energy Efficiency With Graphite/LiFePO₄ Electrodes at Different Nominal Capacities,“ in *Proceedings of the ASME Power Conference - 2018: Presented at ASME 2018 Power Conference, June 24-28, 2018, Lake Buena Vista, Florida, USA*, Lake Buena Vista, Florida, USA, 2018, doi: 10.1115/POWER2018-7375.
- [19] M. Stohwasser, „Entwicklung und Validierung eines Heizkreislaufmodells für Elektrofahrzeuge,“ Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2019.
- [20] G. Suck und C. Spengler, „Lösungen für das Wärmemanagement von Batteriefahrzeugen,“ *Automobiltechnische Zeitung*, Nr. 116, S. 12–19, 2014.
- [21] J. Doerr, G. Fröhlich, A. Stroh und M. Baur, „Das elektr. Antriebssystem mit 3-Motor-Layout im neuen Audi e-tron S-Modell,“ *Motortechnische Zeitschrift (MTZ)*, 7-8, S. 18–27, 2020.
- [22] *DIN 1946-3: Raumluftechnik - Teil 3: Klimatisierung von Personenkraftwagen und Lastkraftwagen*, DIN 1946-3, Normenausschuss Kraftfahrzeuge (FAKRA), Berlin, 2006.
- [23] D. Wagner, M. Steinsträter, M. Förth, M. Stohwasser, J. Hoffmann und M. Lienkamp, „Battery independent regenerative braking using model predictive control with auxiliary power consumers,“ *Forschung im Ingenieurwesen*, Jg. 83, Nr. 4, S. 843–852, 2019.
- [24] H. Großmann, *Pkw-Klimatisierung: Physikalische Grundlagen und technische Umsetzung*, 2. Aufl. (VDI-Buch). Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg, 2013. [Online]. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-39841-4>
- [25] Christiane Brünglinghaus. „Fahrzeugkonzepte: Conversion versus Purpose Design.“ <https://www.springerprofessional.de/fahrzeugtechnik/elektrofahrzeuge/fahrzeugkonzepte-conversion-versus-purpose-design/6561908> (Zugriff am: 1. Januar 2019).
- [26] R. Baumgart, „Reduzierung des Kraftstoffverbrauches durch Optimierung von Pkw-Klimaanlagen,“ Dissertation, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz, 2010.

- [27] J. Nitz und W. H. Hucho, „The Heat Transfer Coefficient of a Passenger Car Body: Volkswagenwerk AG,“ *SAE Technical Paper Series*, 1979, doi: 10.4271/790399.
- [28] Webasto Thermo&Comfort SE, „Webasto HVH Hochvolt-Heizer: Das innovative Heizsystem für Hybrid- und Elektrofahrzeuge,“ Gilching, 2019. Zugriff am: 7. Dezember 2021.
- [29] G. Homann, „Energieeffizientes Heizen eines E-Fahrzeugs,“ Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2015.
- [30] I. Morris, D. Riordan, J. Walsh und A. Maher, „Evaluation of requirements for the development of a bench test system to test PTC heater in-situ automotive HVAC case units,“ in *2016 27th Irish Signals and Systems Conference (ISSC): Ulster University, Derry, June 21-22, 2016*, Londonderry, United Kingdom, 2016, S. 1–6, doi: 10.1109/ISSC.2016.7528447.
- [31] E. Ivers-Tiffée und W. von Münch, *Werkstoffe der Elektrotechnik*, 10. Aufl. (SpringerLink Bücher). Wiesbaden: Teubner, 2007. [Online]. Verfügbar unter: <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz282655018cov.htm>
- [32] F. Bohlender und H. Reiss, „Elektrische Innenraumheizung von E-Fahrzeugen Per PTC-System,“ *ATZ Automobiltech Z*, Jg. 115, Nr. 2, S. 120–125, 2013, doi: 10.1007/s35148-013-0033-3.
- [33] V. Seitz, „Entwicklung eines Modells zum Vergleich elektrischer Heizsysteme,“ Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2018.
- [34] C. Hainzmaier, A. S. Regueiro und M. Lappe, „New Methods of Heating Hybrid and Electric Vehicles,“ in *SAE Technical Paper Series*, 2015, doi: 10.4271/2015-01-1711.
- [35] DBK Industrial | Deutschland. „Drahtheiztechnik | Heizen mit traditionellem Widerstandsdraht — Industrie Heizer & Kühler - DBK Industrial | Deutschland.“ <https://www.industrial-de.dbk-group.com/drahtheiztechnik> (Zugriff am: 7. Dezember 2021).
- [36] C. Cap und C. Hainzmaier, „Layer Heater for Electric Vehicles,“ *ATZ Worldw*, Jg. 115, Nr. 6, S. 16–19, 2013, doi: 10.1007/s38311-013-0068-9.
- [37] Eberspächer Climate Control Systems, „Eberspächer startet Produktion neuer Hochvolt-Heizer,“ Esslingen, 2017. Zugriff am: 7. Dezember 2021.
- [38] B. Halil, S. Gokhan und K. Muhsin, „Advances on heat pump applications for electric vehicles,“ *Advances in Automotive Engineering*, Jg. 1, Nr. 1, S. 79–104, 2018, doi: 10.12989/AE.2018.1.1.079.
- [39] N. Lemke, J. Mildenerger und M. Graz, „Unterstützung der Markteinführung von Pkw-Klimaanlagen mit dem Kältemittel CO₂ (R744),“ Dessau-Roßlau, 2011. Zugriff am: 8. Dezember 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_64_2011_unterstuetzung_der_markteinfuehrung_von_pkw_klimaanlagen.pdf
- [40] A. Lajunen, „Energy Efficiency and Performance of Cabin Thermal Management in Electric Vehicles,“ in *SAE Technical Paper Series*, 2017, doi: 10.4271/2017-01-0192.
- [41] S. Chowdhury, L. Leitzel und M. Zima, „Thermomanagementsystem für E-Fahrzeuge mit kühlmittelbasierter Wärmepumpe,“ *ATZ Automobiltech Z*, Jg. 121, Nr. 5, S. 52–57, 2019, doi: 10.1007/s35148-019-0028-9.

- [42] G. Suck und C. Spengler, „Lösungen für das Wärmemanagement von Batteriefahrzeugen,“ *ATZ Automobiltech Z*, Jg. 116, 7-8, S. 12–19, 2014, doi: 10.1007/s35148-014-0443-x.
- [43] M. Jung, A. Kemle, T. Strauss und M. Wawzyniak, „Innenraumheizung von Hybrid- und Elektrofahrzeugen,“ *Automobiltechnische Zeitschrift ATZ*, Jg. 113, Nr. 5, S. 396–402, 2011, doi: 10.1365/s35148-011-0093-1.
- [44] L. Mayer, „Beurteilung des Reichweitengewinns und der Batteriealterung unter dem Einfluss von Heiztechnologien im Elektrofahrzeug,“ Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021.
- [45] K. Reif, *Bosch Autoelektrik und Autoelektronik: Bordnetze, Sensoren und elektronische Systeme*, 6. Aufl. (SpringerLink Bücher). Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011. [Online]. Verfügbar unter: <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz343190303cov.htm>
- [46] Schaufenster Elektromobilität, Hg., „Fragen rund um das Elektrofahrzeug:: Wie kommen die Angaben über den Stromverbrauch und die Reichweite von Elektrofahrzeugen zustande?,“ 2015. Zugriff am: 9. Dezember 2021.
- [47] J. R. M. Delos Reyes, R. V. Parsons und R. Hoemsen, „Winter Happens: The Effect of Ambient Temperature on the Travel Range of Electric Vehicles,“ *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Jg. 65, Nr. 6, S. 4016–4022, 2016, doi: 10.1109/TVT.2016.2544178.
- [48] D. Ramsey, A. Bouscayrol, L. Boulon und A. Vaudrey, „Simulation of an electric vehicle to study the impact of cabin heating on the driving range,“ *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*, 2020, doi: 10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9129169.
- [49] E. E. Michaelides, „Thermodynamics and energy usage of electric vehicles,“ *Energy Conversion and Management*, Jg. 203, S. 112246, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2019.112246.
- [50] H.-H. Braess und U. Seiffert, Hg. *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik: Fahrzeugphysik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. Zugriff am: 9. Dezember 2021.
- [51] J. Adermann, J. Kreibich und M. Lienkamp, „Experimental Study of Energy Consumption Variation in Recurring Driving Trips,“ *JEE*, Jg. 5, Nr. 5, 2017, doi: 10.17265/2328-2223/2017.05.004.
- [52] P. Spichartz, L. Bubmann und C. Sourkounis, „Comparison of recuperation strategies for electric vehicles regarding energy efficiency,“ in *IECON 2014: 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society : proceedings : Sheraton Hotel Dallas, Dallas, TX, U.S.A., 30 October - 01 November 2014*, Dallas, TX, USA, 2014, S. 2984–2990, doi: 10.1109/IECON.2014.7048934.
- [53] A. Ferraris, A. G. Airale, A. Messana, S. Xu und M. Carello, „The Regenerative Braking for a L7E Range Extender Hybrid Vehicle,“ in *Conference proceedings 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I & CPS Europe): 12-15 June 2018, Palermo, Italy*, Palermo, 2018, S. 1–7, doi: 10.1109/EEEIC.2018.8494000.
- [54] T. Helfrich und M. Lienkamp, „Perceptible changes in driving dynamics due to regenerative braking: Analysis and reduction through active chassis systems,“ in *Advanced vehicle*

- control: AVEC'16*, Bd. 208, J. Edlmann, M. Plöchl und P. E. Pfeffer, Hg., London: Taylor & Francis Group, 2017, S. 573–578.
- [55] M. Steinstraeter, M. Lewke, J. Buberger, T. Hentrich und M. Lienkamp, „Range Extension via Electrothermal Recuperation,“ *World Electric Vehicle Journal (WEVJ)*, Jg. 11, Nr. 2, S. 41, 2020, doi: 10.3390/wevj11020041.
- [56] A. Albatayneh, M. N. Assaf, D. Alterman und M. Jaradat, „Comparison of the Overall Energy Efficiency for Internal Combustion Engine Vehicles and Electric Vehicles,“ *Environmental and Climate Technologies*, Jg. 24, Nr. 1, S. 669–680, 2020, doi: 10.2478/rtuct-2020-0041.
- [57] B. Breuer und K. H. Bill, *Bremsenhandbuch*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017. Zugriff am: 2. Dezember 2021.
- [58] W. Pengyu, W. Qingnian, Wangwei und Z. Naiwei, „The Affect of Motor Efficiency on Regenerative Braking at Low-Speed Stage,“ in *2009 International Conference on Energy and Environment Technology: ICEET 2009 ; Guilin, China, 16 - 18 October 2009*, Guilin, China, 2009, S. 388–391, doi: 10.1109/ICEET.2009.100.
- [59] T. Helfrich und M. Lienkamp, „Perceptible changes in driving dynamics due to regenerative braking: Analysis and reduction through active chassis systems,“ in *Advanced vehicle control: AVEC'16*, Bd. 208, J. Edlmann, M. Plöchl und P. E. Pfeffer, Hg., London: Taylor & Francis Group, 2017, S. 573–578.
- [60] J. Teigelkötter, *Energieeffiziente elektrische Antriebe: Grundlagen, Leistungselektronik, Betriebsverhalten und Regelung von Drehstrommotoren ; mit 4 Tabellen*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2013.
- [61] M. Trzesniowski, *Antrieb*, 2. Aufl. (Handbuch Rennwagentechnik Ser v.3). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://e-bookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6000190>
- [62] Y. Gao, J. Jiang, C. Zhang, W. Zhang, Z. Ma und Y. Jiang, „Lithium-ion battery aging mechanisms and life model under different charging stresses,“ *Journal of Power Sources*, Jg. 356, S. 103–114, 2017, doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.04.084.
- [63] J. Lieb, E. Sawazki, M. Brüll und B. Bäker, „Potential of an electric brake resistor to increase the efficiency of electric vehicles,“ *EVS27 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*, 2013, doi: 10.3390/wevj6010165.
- [64] Dipl.-Ing. Univ. Peter Keil, „Aging of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles,“ Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Technische Universität München, München, 2017.
- [65] R. Bednorz und T. Gewalt, „Investigation of the Effects of Charging Processes on Lithium-Ion Cells with SiC Anodes at Low Temperatures,“ *MDPI Batteries*, Nr. 2, 2020, doi: 10.3390/batteries6020034.
- [66] V. Zinth *et al.*, „Lithium plating in lithium-ion batteries at sub-ambient temperatures investigated by in situ neutron diffraction,“ *Journal of Power Sources*, Jg. 271, S. 152–159, 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.07.168.
- [67] J. Lieb, F. Czuppa, J. Schröder und B. Bäker, „Simulating low temperature behavior of high voltage traction batteries– The challenge of real time efficiency estimation,“ 2013.

- [68] E. Sawazki, M. Brüll, S. Deinhard und C. Baumgärtner, „Potenziale zur Reichweitensteigerung von Elektrofahrzeugen im Winter,“ *Automobiltechnische Zeitung*, Jg. 2015, Nr. 01, S. 36–41, doi: 10.1007/s35148-015-0354-5.
- [69] A. Ramakrishnan, A. Akram, E. Sawazki und B. McKay, „Regenerative Braking Efficiency Improvement through an ETR,“
- [70] J. Liebl, *Energiemanagement Im Kraftfahrzeug: Optimierung Von CO2-Emissionen und Verbrauch Konventioneller und Elektrifizierter Automobile*, 1. Aufl. (ATZ/MTZ-Fachbuch Ser). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2014. [Online]. Verfügbar unter: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=1802762>
- [71] V. Kalkhambkar, R. Kumar und R. Bhakar, „Energy loss minimization through peak shaving using energy storage,“ *Perspectives in Science*, Jg. 8, S. 162–165, 2016, doi: 10.1016/j.pisc.2016.04.022.
- [72] J. Leadbetter und L. Swan, „Battery storage system for residential electricity peak demand shaving,“ *Energy and Buildings*, Jg. 55, S. 685–692, 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.09.035.
- [73] J. Klötzl und D. Gerling, „Prüfstand zur Untersuchung der Bordnetzstabilität Konzept, Aufbau und Ergebnisse,“ *ATZ Elektron*, Jg. 6, Nr. 4, S. 34–39, 2011, doi: 10.1365/s35658-011-0060-3.
- [74] R. A. Dougal, S. Liu und R. E. White, „Power and life extension of battery-ultracapacitor hybrids,“ *IEEE Trans. Comp. Packag. Technol.*, Jg. 25, Nr. 1, S. 120–131, 2002, doi: 10.1109/6144.991184.
- [75] D. Shin, Y. Kim, J. Seo, N. Chang, Y. Wang und M. Pedram, „Battery-Supercapacitor Hybrid System for High-Rate Pulsed Load Applications: Grenoble, France, 14 - 18 March 2011,“ in *2011 Design Automation & Test in Europe*. Zugriff am: 31. Mai 2021.
- [76] s. Pay und Y. Baghouz, „Effectiveness of Battery-Supercapacitor Combination in Electric Vehicles,“ in *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*. Zugriff am: 31. Mai 2021.
- [77] I. Oukkacha, M. B. Camara und B. Dakyo, „Electric vehicles energy management using lithium-batteries and ultracapacitors,“ in *2017 Twelfth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monte-Carlo, Monaco, 2017, S. 1–8, doi: 10.1109/EVER.2017.7935900.
- [78] J. Ruan, Q. Song und W. Yang, „The application of hybrid energy storage system with electrified continuously variable transmission in battery electric vehicle,“ *Energy*, Jg. 183, S. 315–330, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.06.095.
- [79] L. Zhang, X. Hu, Z. Wang, F. Sun und D. G. Dorrell, „A review of supercapacitor modeling, estimation, and applications: A control/management perspective,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 81, S. 1868–1878, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.283.
- [80] W. Martinez, C. Cortes und L. Munoz, „Sizing of ultracapacitors and batteries for a high performance electric vehicle,“ in *2012 IEEE International Electric Vehicle Conference*, Greenville, SC, USA, Mrz. 2012 - Mrz. 2012, S. 1–6, doi: 10.1109/IEVC.2012.6183242.
- [81] M. Doppelbauer, *Grundlagen der Elektromobilität: Technik, Praxis, Energie und Umwelt / Martin Doppelbauer*, 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020.

- [82] K. Minnerup, T. Herrmann, M. Steinstraeter und M. Lienkamp, „Holistic Energy Management System for Battery Electric Vehicles using Sliding Window Optimization,“ in *The 31st International Electric Vehicles Symposium Kobe, Japan*. Zugriff am: 20. November 2021.
- [83] K. Minnerup, T. Herrmann, M. Steinstraeter und M. Lienkamp, „Concept for a Holistic Energy Management System for Battery Electric Vehicles Using Hybrid Genetic Algorithms,“ in *2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall): Chicago, IL, USA, 27-30 August 2018 : proceedings*, Chicago, IL, USA, 2018, S. 1–6, doi: 10.1109/VTCFall.2018.8690563.
- [84] A. Suchaneck, „Energiemanagement-Strategien für batterieelektrische Fahrzeuge,“ Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2018.
- [85] F. Ruf, „Auslegung und Topologieoptimierung von spannungsstabilen Energiebordnetzen,“ Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Technische Universität München, München, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1220402/1220402.pdf>
- [86] B. Sakhdari und N. L. Azad, „An Optimal Energy Management System for Battery Electric Vehicles,“ *IFAC-PapersOnLine*, Jg. 48, Nr. 15, S. 86–92, 2015, doi: 10.1016/j.ifacol.2015.10.013.
- [87] A. Lahlou, F. Ossart, E. Boudard, F. Roy und M. Bakhouya, „Optimal Management of Thermal Comfort and Driving Range in Electric Vehicles,“ *Energies*, Jg. 13, Nr. 17, S. 4471, 2020, doi: 10.3390/en13174471.
- [88] T. H. Pham, B. Rosea und S. Wilkins, „Battery Peak Power Shaving Strategy to Prolong Battery Life for Electric Buses,“ *IFAC-PapersOnLine*, Jg. 49, Nr. 11, S. 77–83, 2016, doi: 10.1016/j.ifacol.2016.08.012.
- [89] H. Min, Z. Zhang, W. Sun, Z. Min, Y. Yu und B. Wang, „A thermal management system control strategy for electric vehicles under low-temperature driving conditions considering battery lifetime,“ *Applied Thermal Engineering*, Jg. 181, S. 115944, 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115944.
- [90] M. A. Roscher, W. Leidholdt und J. Trepte, „High efficiency energy management in BEV applications,“ *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Jg. 37, Nr. 1, S. 126–130, 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2011.10.022.
- [91] Y. Xie *et al.*, „A Self-learning intelligent passenger vehicle comfort cooling system control strategy,“ *Applied Thermal Engineering*, Jg. 166, S. 114646, 2020, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114646.
- [92] G. I. Mann, B. G. Hu und R. G. Gosine, „Analysis of direct action fuzzy PID controller structures,“ *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. Part B, Cybernetics : a publication of the IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society*, Jg. 29, Nr. 3, S. 371–388, 1999, doi: 10.1109/3477.764871.
- [93] G. Xu, W. Li, K. Xu und Z. Song, „An Intelligent Regenerative Braking Strategy for Electric Vehicles,“ *Energies*, Jg. 4, Nr. 9, S. 1461–1477, 2011, doi: 10.3390/en4091461.

- [94] R. Maia, M. Silva, R. Araújo und U. Nunes, „Electrical vehicle modeling: A fuzzy logic model for regenerative braking,“ *Expert Systems with Applications*, Jg. 42, Nr. 22, S. 8504–8519, 2015, doi: 10.1016/j.eswa.2015.07.006.
- [95] M. Steinstraeter, J. Gndlgruber, J. Everken und M. Lienkamp, „Influence of pulse width modulated auxiliary consumers on battery aging in electric vehicles,“ *Journal of Energy Storage*, Jg. 48, S. 104009, 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104009.
- [96] A. Jossen und W. Weydanz, *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen*, 2. Aufl., 2019.
- [97] K. Uddin, A. D. Moore, A. Barai und J. Marco, „The effects of high frequency current ripple on electric vehicle battery performance,“ *Applied Energy*, Jg. 178, S. 142–154, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.06.033.
- [98] K. Uddin *et al.*, „The impact of high-frequency-high-current perturbations on film formation at the negative electrode-electrolyte interface,“ *Electrochimica Acta*, Jg. 233, S. 1–12, 2017, doi: 10.1016/j.electacta.2017.03.020.
- [99] S. Bala, T. Tengner, P. Rosenfeld und F. Delince, „The effect of low frequency current ripple on the performance of a Lithium Iron Phosphate (LFP) battery energy storage system,“ in *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012: 15 - 20 Sept. 2012, Raleigh Convention Center, Raleigh, NC, Raleigh, NC, USA, 2012*, S. 3485–3492, doi: 10.1109/ECCE.2012.6342318.
- [100] Y. Qin *et al.*, „A rapid lithium-ion battery heating method based on bidirectional pulsed current: Heating effect and impact on battery life,“ *Applied Energy*, Jg. 280, S. 115957, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115957.
- [101] M. Uno und K. Tanaka, „Influence of High-Frequency Charge–Discharge Cycling Induced by Cell Voltage Equalizers on the Life Performance of Lithium-Ion Cells,“ *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Jg. 60, Nr. 4, S. 1505–1515, 2011, doi: 10.1109/TVT.2011.2127500.
- [102] M. J. Brand, M. H. Hofmann, S. S. Schuster, P. Keil und A. Jossen, „The Influence of Current Ripples on the Lifetime of Lithium-Ion Batteries,“ *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Jg. 67, Nr. 11, S. 10438–10445, 2018, doi: 10.1109/TVT.2018.2869982.
- [103] A. Ghassemi, P. Chakraborty Banerjee, A. F. Hollenkamp, Z. Zhang und B. Bahrani, „Effects of alternating current on Li-ion battery performance: Monitoring degradative processes with in-situ characterization techniques,“ *Applied Energy*, Jg. 284, S. 116192, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116192.
- [104] F. Chang, „Improving the Partial Load Efficiency of Electric Powertrains by Silicon MOSFET Multilevel Inverters,“ Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, München, 2019.
- [105] L. W. Juang, P. J. Kollmeyer, A. E. Anders, T. M. Jahns, R. D. Lorenz und D. Gao, „Investigation of the influence of superimposed AC current on lithium-ion battery aging using statistical design of experiments,“ *Journal of Energy Storage*, Jg. 11, S. 93–103, 2017, doi: 10.1016/j.est.2017.02.005.
- [106] P. Korth Pereira Ferraz und J. Kowal, „A Comparative Study on the Influence of DC/DC-Converter Induced High Frequency Current Ripple on Lithium-Ion Batteries,“ *Sustainability*, Jg. 11, Nr. 21, S. 6050, 2019, doi: 10.3390/su11216050.

- [107] S. de Breucker, K. Engelen, R. D'hulst und J. Driesen, „Impact of current ripple on Li-ion battery ageing,“ in *World Electric Vehicle Symposium and Exposition (EVS 27), 2013: Barcelona, Spain, 17 - 20 Nov. 2013*, Barcelona, Spain, 2013, S. 1–9, doi: 10.1109/EVS.2013.6914791.
- [108] A. Bessman, R. Soares, O. Wallmark, P. Svens und G. Lindbergh, „Aging effects of AC harmonics on lithium-ion cells,“ *Journal of Energy Storage*, Jg. 21, S. 741–749, 2019, doi: 10.1016/j.est.2018.12.016.
- [109] A. Bessman *et al.*, „Investigating the Aging Effect of Current Ripple on Lithium-Ion Cells,“ *ECS Transactions*, Jg. 69, Nr. 18, S. 101–106, 2015, doi: 10.1149/06918.0101ecst.
- [110] F. Chang, F. Roemer und M. Lienkamp, „Influence of Current Ripples in Cascaded Multilevel Topologies on the Aging of Lithium Batteries,“ *IEEE Trans. Power Electron.*, S. 1, 2020, doi: 10.1109/TPEL.2020.2989145.
- [111] S.-A. Amamra, Y. Tripathy, A. Barai, A. D. Moore und J. Marco, „Electric Vehicle Battery Performance Investigation Based on Real World Current Harmonics,“ *Energies*, Jg. 13, Nr. 2, S. 489, 2020, doi: 10.3390/en13020489.
- [112] T. Anzenberger und P. Woltmann, *E-Mobilität im Winter: Intelligentes Thermomanagement bei Audi Modellen erhält Reichweite und Performance*. Ingolstadt. Zugriff am: 17. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.audi-mediacenter.com/de/pressemitteilungen/e-mobilitaet-im-winter-intelligentes-thermomanagement-bei-audi-modellen-erhaelt-reichweite-und-performance-14442>
- [113] P. Wacker, L. Wheldon, M. Sperlich, J. Adermann und M. Lienkamp, „Influence of active battery switching on the drivetrain efficiency of electric vehicles,“ in *2017 IEEE Transportation and Electrification Conference and Expo (ITEC): Chicago, Illinois, June 22-24, 2017*, Chicago, IL, USA, 2017, S. 33–38, doi: 10.1109/ITEC.2017.7993243.
- [114] A. Waclaw, J. Betz und M. Lienkamp, „Techno-Economical Implementation of Holistic Electromobility Solutions in Commercial Companies,“ in *2019 Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monte-Carlo, Monaco, 2019, S. 1–11, doi: 10.1109/EVER.2019.8813533.
- [115] M. Steinstraeter, J. Buberger und D. Trifonov, „Battery and Heating Data in Real Driving Cycles,“ 2020, doi: 10.21227/6JR9-5235.
- [116] L. Merkle, M. Pöthig und F. Schmid, „Estimate e-Golf Battery State Using Diagnostic Data and a Digital Twin,“ *Batteries*, Jg. 7, Nr. 1, S. 15, 2021, doi: 10.3390/batteries7010015.
- [117] All EV Canada, *Tesla Model 3 Motor Tear Down - ALL EV*, 2020. Zugriff am: 12. Juli 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=oVge8l6kxPY>
- [118] BMW AG, Hg., „Technische Daten - BMW i3,“ 2014. Zugriff am: 11. Juli 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.motornews.at/wp-content/uploads/2013/11/BMW_i3_Technische_Daten_ab_0314.pdf
- [119] M. Brand, „ADAC Autotest - BMW i3: Fünftüriger Kleinwagen mit Schrägheck (125 kW / 170 PS),“ 2013. Zugriff am: 11. Juli 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.adac.de/_ext/itr/tests/Autotest/AT5053_BMW_i3/BMW_i3.pdf

- [120] Bridgestone. „Next Generation Tire Technology for Fuel Efficiency “ologic™”: Improve fuel efficiency by means of new tire profile beyond conventional tire designs.” https://www.bridgestone.com/technology_innovation/ologic/ (Zugriff am: 11. Juli 2021).
- [121] Cars Garage. „E-transmission BMW i3 production.” <https://www.youtube.com/watch?v=wBcw0aLZcak> (Zugriff am: 12. Juli 2021).
- [122] Electric Vehicle Database. „Tesla Model 3 Standard Range Plus LFP.” <https://ev-database.org/car/1320/Tesla-Model-3-Standard-Range-Plus-LFP> (Zugriff am: 12. Juli 2021).
- [123] MotorXP, „Performance Analysis of the Tesla Model 3 Electric Motor using MotorXP-PM,” 2020. Zugriff am: 11. Juli 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://motorxp.com/wp-content/uploads/mxp_analysis_TeslaModel3.pdf
- [124] SimScale CAE Forum. „How to determine the coefficient drag in Paraview.” <https://www.simscale.com/forum/t/how-to-determine-the-coefficient-drag-in-paraview/64753/2> (Zugriff am: 11. Juli 2021).
- [125] The Engineering ToolBox. „Rolling Resistance: Rolling friction and rolling resistance.” https://www.engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d_1303.html (Zugriff am: 11. Juli 2021).
- [126] N. Wassiliadis *et al.*, „Quantifying the state of the art of electric powertrains in battery electric vehicles: Range, power, and lifetime from component to system level of the VW ID.3,” *eTransportation*, Jg. 12, 2022, doi: 10.1016/j.etrans.2022.100167.
- [127] T. G. P. Heinrich, „Potentialabschätzung elektrothermischer Rekuperation aus Fahrdaten,” Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021.
- [128] P. Iora und L. Tribioli, „Effect of Ambient Temperature on Electric Vehicles’ Energy Consumption and Range: Model Definition and Sensitivity Analysis Based on Nissan Leaf Data,” *WEVJ*, Jg. 10, Nr. 1, S. 2, 2019, doi: 10.3390/wevj10010002.
- [129] AUTOMOTIVE-TECHNOLOGY | Das Magazin für automobiler Technologien und KFZ-Technik. „Eberspächer: Neue Hochvolt-PTC-Heizer für Hybrid- und Elektro-Fahrzeuge | AUTOMOTIVE-TECHNOLOGY.” <https://automotive-technology.de/eberspaecher-neue-hochvolt-ptc-heizer-fuer-hybrid-und-elektro-fahrzeuge/> (Zugriff am: 2. Februar 2022).
- [130] A. Hermann, „Optimierung und Verifizierung eines Prüfstands zum Vergleich von Hochvolt-Heizgeräten unabhängig vom Heizmedium,” Bachelorarbeit, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Hochschule Augsburg, Augsburg, 2018.
- [131] F. Ligouri. „Chevrolet Bolt EV is 2017 North American Car of the year.” <https://media.chevrolet.com/media/us/en/chevrolet/news.detail.html/content/Pages/news/us/en/2017/jan/naias/0109-bolt.html> (Zugriff am: 4. Mai 2022).
- [132] M. Steinstraeter *et al.*, „Controlling cabin heating to improve range and battery lifetime of electric vehicles,” *eTransportation*, Jg. 13, 2022, doi: 10.1016/j.etrans.2022.100181.
- [133] B. Danquah, A. Koch, T. Weis, M. Lienkamp und A. Pinnel, „Modular, Open Source Simulation Approach: Application to Design and Analyze Electric Vehicles,” in *2019 Fourteenth International Conference 2019*, S. 1–8.

- [134] N. Gerner, „Analyse des elektrothermischen Rekuperationspotentials am Realfahrzeug,“ Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2019.
- [135] S. Kalt, J. Erhard, B. Danquah und M. Lienkamp, „Electric Machine Design Tool for Permanent Magnet Synchronous Machines,“ in *2019 Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monte-Carlo, Monaco, 2019, doi: 10.1109/EVER.2019.8813601.
- [136] C. Reiter, L. Wildfeuer, N. Wassiliadis, T. Krahl, J. Dirnecker und M. Lienkamp, „A Holistic Approach for Simulation and Evaluation of Electrical and Thermal Loads in Lithium-Ion Battery Systems,“ in *2019 Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monte-Carlo, Monaco, 2019, S. 1–17, doi: 10.1109/EVER.2019.8813640.
- [137] M. Protschka, „Entwicklung eines Batteriemodells auf Basis von Realfahrtdaten,“ Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2020.
- [138] P. Horner, „Optimierung eines Batteriemodells auf Basis von Realfahrtdaten,“ Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021.
- [139] W. He, M. Pecht, D. Flynn und F. Dinmohammadi, „A Physics-Based Electrochemical Model for Lithium-Ion Battery State-of-Charge Estimation Solved by an Optimised Projection-Based Method and Moving-Window Filtering,“ *Energies*, Jg. 11, Nr. 8, S. 2120, 2018, doi: 10.3390/en11082120.
- [140] Y. Wang *et al.*, „A comprehensive review of battery modeling and state estimation approaches for advanced battery management systems,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 131, S. 110015, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.110015.
- [141] J. Khalfi, N. Boumaaz, A. Soulmani und E. M. Laadissi, „An electric circuit model for a lithium-ion battery cell based on automotive drive cycles measurements,“ *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, Jg. 11, Nr. 4, S. 2798, 2021, doi: 10.11591/ijece.v11i4.pp2798-2810.
- [142] M. Schönleber und E. Ivers-Tiffée, „Approximability of impedance spectra by RC elements and implications for impedance analysis,“ *Electrochemistry Communications*, Jg. 58, S. 15–19, 2015, doi: 10.1016/j.elecom.2015.05.018.
- [143] M.-K. Tran, A. DaCosta, A. Mevawalla, S. Panchal und M. Fowler, „Comparative Study of Equivalent Circuit Models Performance in Four Common Lithium-Ion Batteries: LFP, NMC, LMO, NCA,“ *MDPI Batteries*, Jg. 7, Nr. 3, S. 51, 2021, doi: 10.3390/batteries7030051.
- [144] B. V. Rajanna und M. Kiran Kumar, „Comparison of one and two time constant models for lithium ion battery,“ *IJECE*, Jg. 10, Nr. 1, S. 670, 2020, doi: 10.11591/ijece.v10i1.pp670-680.
- [145] H. Witzenhausen, „Electrical battery models : modelling, parameter identification and model reduction,“ Dissertation, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, RWTH Aachen, Aachen, 2017.

- [146] H. He, X. Zhang, R. Xiong, Y. Xu und H. Guo, „Online model-based estimation of state-of-charge and open-circuit voltage of lithium-ion batteries in electric vehicles,“ *Energy*, Jg. 39, Nr. 1, S. 310–318, 2012, doi: 10.1016/j.energy.2012.01.009.
- [147] J. Jia *et al.*, „Multirate strong tracking extended Kalman filter and its implementation on lithium iron phosphate (LiFePO₄) battery system,“ *IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, Jg. 2015, S. 640–645, doi: 10.1109/PEDS.2015.7203572.
- [148] F. Zheng, Y. Xing, J. Jiang, B. Sun, J. Kim und M. Pecht, „Influence of different open circuit voltage tests on state of charge online estimation for lithium-ion batteries,“ *Applied Energy*, Jg. 183, S. 513–525, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.09.010.
- [149] L. Wildfeuer, N. Wassiliadis, C. Reiter, M. Baumann und M. Lienkamp, „Experimental Characterization of Li-Ion Battery Resistance at the Cell, Module and Pack Level,“ in *2019 Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monte-Carlo, Monaco, 2019, S. 1–12, doi: 10.1109/EVER.2019.8813578.
- [150] M. Chen und G. A. Rincon-Mora, „Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I–V Performance,“ *IEEE Trans. On Energy Conversion*, Jg. 21, Nr. 2, S. 504–511, 2006, doi: 10.1109/TEC.2006.874229.
- [151] J. P. Schmidt und E. Ivers-Tiffée, „Pulse-fitting – A novel method for the evaluation of pulse measurements, demonstrated for the low frequency behavior of lithium-ion cells,“ *Journal of Power Sources*, Jg. 315, S. 316–323, 2016, doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.03.026.
- [152] S. Schindler, *Diskrete elektrochemische Modellierung und experimentelle Identifikation von Lithium-Ionen-Zellen basierend auf Halbzellpotentialen*. Bayreuth, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://epub.uni-bayreuth.de/3818/>
- [153] Mathworks Deutschland. „Solve nonlinear least-squares (nonlinear data-fitting) problems - MATLAB lsqnonlin - MathWorks Deutschland.“ <https://de.mathworks.com/help/optim/ug/lsqnonlin.html> (Zugriff am: 10. September 2021).
- [154] D. Andre, M. Meiler, K. Steiner, C. Wimmer, T. Soczka-Guth und D. U. Sauer, „Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. I. Experimental investigation,“ *Journal of Power Sources*, Jg. 196, Nr. 12, S. 5334–5341, 2011, doi: 10.1016/j.jpowsour.2010.12.102.
- [155] J. Gomez, R. Nelson, E. E. Kalu, M. H. Weatherspoon und J. P. Zheng, „Equivalent circuit model parameters of a high-power Li-ion battery: Thermal and state of charge effects,“ *Journal of Power Sources*, Jg. 196, Nr. 10, S. 4826–4831, 2011, doi: 10.1016/j.jpowsour.2010.12.107.
- [156] L. Liao *et al.*, „Effects of temperature on charge/discharge behaviors of LiFePO₄ cathode for Li-ion batteries,“ *Electrochimica Acta*, Jg. 60, S. 269–273, 2012, doi: 10.1016/j.electacta.2011.11.041.
- [157] C. Lin, S. Xu und J. Liu, „Measurement of heat generation in a 40 Ah LiFePO₄ prismatic battery using accelerating rate calorimetry,“ *International Journal of Hydrogen Energy*, Jg. 43, Nr. 17, S. 8375–8384, 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.03.057.

- [158] P. Lima. „Samsung SDI 94 Ah battery cell full specifications.“ <https://pushevs.com/2018/04/05/samsung-sdi-94-ah-battery-cell-full-specifications/> (Zugriff am: 25. Januar 2022).
- [159] B. K. Weiß, „Simulative Untersuchung der Batteriealterung unter dem strategischen Einfluss eines HV-Heizers,“ Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2019.
- [160] I. Baghdadi, O. Briat, P. Gyan und J. M. Vinassa, „Lithium Battery Aging Model Based on Chemical Rate Approach,“ in *2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC): Proceedings : 17-20 October 2016, Hangzhou, China*, Hangzhou, China, 2016, doi: 10.1109/VPPC.2016.7791720.
- [161] J. Wang *et al.*, „Degradation of lithium ion batteries employing graphite negatives and nickel–cobalt–manganese oxide + spinel manganese oxide positives: Part 1, aging mechanisms and life estimation,“ *Journal of Power Sources*, Jg. 269, S. 937–948, 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.07.030.
- [162] M. Naumann, F. B. Spingler und A. Jossen, „Analysis and modeling of cycle aging of a commercial LiFePO₄/graphite cell,“ *Journal of Power Sources*, Jg. 451, Article 227666, 2020, doi: 10.1016/j.jpowsour.2019.227666.
- [163] W. Polifke und J. Kopitz, *Wärmeübertragung: Grundlagen, analytische und numerische Methoden*, 2. Aufl. (Always learning). München u.a: Pearson Studium, 2009. [Online]. Verfügbar unter: <http://lib.myilibrary.com/detail.asp?id=505990>
- [164] N. Karras, „Optimierung der Wärmeabfuhr eines Fahrzeug-Elektromotors und Auswirkungen auf den Gesamtkühlkreislauf,“ Dissertation, Lehrstuhl Kraftfahrwesen im Bereich Fahrzeugaerodynamik und Thermomanagement, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-17804-8>
- [165] C. Ullrich *et al.*, *VDI-Wärmeatlas*, 11. Aufl. (Springer eBook Collection). Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.
- [166] C. Reiter, „Thermische Vorauslegung hochbelasteter Batteriesysteme für Elektrofahrzeuge in der Konzeptphase,“ Dissertation, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2020.
- [167] Joseph Ferziger, *Numerische Strömungsmechanik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [168] A. Boglietti, A. Cavagnino, D. Staton, M. Shanel, M. Mueller und C. Mejuto, „Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of Electrical Machines,“ *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Jg. 56, Nr. 3, S. 871–882, 2009, doi: 10.1109/TIE.2008.2011622.
- [169] M. Bargende, H.-C. Reuss und J. Wiedemann, *16. Internationales Stuttgarter Symposium*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.
- [170] F. Schueppel, „Optimierung des Heiz- und Klimakonzepts zur Reduktion der Wärme- und Kälteleistung im Fahrzeug: Dissertation,“ 2015.
- [171] M. Konz, „Spezifische Anforderungen an das HeizKlimasystem elektromotorisch angetriebener Fahrzeuge: Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.,“ *Fat-Schriftreihe*.

- [172] N. Freitag, „Analyse des zeitlich-elektrischen Verhaltens eines schnell verfügbaren Hochvolt-Schichtheizgeräts,“ Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2019.
- [173] P. Keil und A. Jossen, „Aging of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles: Impact of Regenerative Braking,“ *World Electric Vehicle Journal (WEVJ)*, Jg. 7, Nr. 1, S. 41–51, 2015, doi: 10.3390/wevj7010041.
- [174] D. Trifonov, „Weiterentwicklung einer Betriebsstrategie zur Integration von Heizgeräten in Elektrofahrzeugen,“ Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021.
- [175] Y. Bai und D. Wang, „Fundamentals of Fuzzy Logic Control — Fuzzy Sets, Fuzzy Rules and Defuzzifications,“ *Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications*, S. 17–36, 2006, doi: 10.1007/978-1-84628-469-4_2.
- [176] S. Kraus, „Betriebsstrategie zur Lastspitzenglättung in Elektrofahrzeugen durch adaptive Regelung des Heizgeräts,“ Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021.
- [177] J. Everken, „Planung, Durchführung und Auswertung von Batteriealterungsversuchen mit hochfrequenten Lasten,“ Bachelorarbeit, Fakultät für Maschinenwesen, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2020.
- [178] J. Gandlgruber, „Versuchsdurchführung und Analyse des Einflusses von Pulsweitenmodulation auf die Alterung von Lithium-Ionen-Zellen,“ Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2020.
- [179] Y. Gao, J. Jiang, C. Zhang, W. Zhang, Z. Ma und Y. Jiang, „Lithium-ion battery aging mechanisms and life model under different charging stresses,“ *Journal of Power Sources*, Jg. 356, S. 103–114, 2017, doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.04.084.
- [180] R. Käbitz, „Untersuchung der Alterung von Lithium-Ionen-Batterien mittels Elektroanalytik und elektrochemischer Impedanzspektroskopie,“ Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Aachen.
- [181] C. R. Birkel, M. R. Roberts, E. McTurk, P. G. Bruce und D. A. Howey, „Degradation diagnostics for lithium ion cells,“ *Journal of Power Sources*, Jg. 341, S. 373–386, 2017, doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.12.011.
- [182] A. Jossen, „Fundamentals of battery dynamics,“ *Journal of Power Sources*, Jg. 154, Nr. 2, S. 530–538, 2006, doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.10.041.
- [183] I. Bloom *et al.*, „Differential voltage analyses of high-power, lithium-ion cells,“ *Journal of Power Sources*, Jg. 139, 1-2, S. 295–303, 2005, doi: 10.1016/j.jpowsour.2004.07.021.
- [184] I. Zilberman, J. Sturm und A. Jossen, „Reversible self-discharge and calendar aging of 18650 nickel-rich, silicon-graphite lithium-ion cells,“ *Journal of Power Sources*, Jg. 425, S. 217–226, 2019, doi: 10.1016/j.jpowsour.2019.03.109.
- [185] A. A. Franco, Hg. *Rechargeable lithium batteries: From fundamentals to applications* (Woodhead publishing series in energy Number 81). Amsterdam, Boston, Cambridge: WP Woodhead Publishing an imprint of Elsevier, 2015.

- [186] BMW Service, Hg., „I01 Product Presentation: Technical Training. Product Information.“ München, 2014.
- [187] A. Maheshwari, N. G. Paterakis, M. Santarelli und M. Gibescu, „Optimizing the operation of energy storage using a non-linear lithium-ion battery degradation model,“ *Applied Energy*, Jg. 261, S. 114360, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114360.
- [188] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Hg., „Verkehr in Zahlen 2020/2021,“ Krafftahrt Bundesamt, Flensburg, 49. Jahrgang, Sep. 2020.
- [189] Deutscher Wetterdienst, Hg., „Wetter und Klima aus einer Hand: Wetter 2015,“ Zugriff am: 16. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dwd.de/DE/leistungen/kvo/editorial/erlaeuterungen.html>
- [190] A. Barré, B. Deguilhem, S. Grolleau, M. Gérard, F. Suard und D. Riu, „A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications,“ *Journal of Power Sources*, Jg. 241, S. 680–689, 2013, doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.05.040.
- [191] T. Gewalt, A. Candussio, L. Wildfeuer, D. Lehmkuhl, A. Hahn und M. Lienkamp, „Accelerated Aging Characterization of Lithium-ion Cells: Using Sensitivity Analysis to Identify the Stress Factors Relevant to Cyclic Aging,“ *Batteries*, Jg. 6, Nr. 1, S. 6, 2020, doi: 10.3390/batteries6010006.
- [192] J. Schmalstieg, S. Käbitz, M. Ecker und D. U. Sauer, „A holistic aging model for Li(NiMnCo)O₂ based 18650 lithium-ion batteries,“ *Journal of Power Sources*, Jg. 257, S. 325–334, 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.02.012.
- [193] V. A. Agubra und J. W. Fergus, „The formation and stability of the solid electrolyte interface on the graphite anode,“ *Journal of Power Sources*, Jg. 268, S. 153–162, 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.06.024.
- [194] J. Xu, R. D. Deshpande, J. Pan, Y.-T. Cheng und V. S. Battaglia, „Electrode Side Reactions, Capacity Loss and Mechanical Degradation in Lithium-Ion Batteries,“ *J. Electrochem. Soc.*, Jg. 162, Nr. 10, A2026-A2035, 2015. doi: 10.1149/2.0291510jes. [Online]. Verfügbar unter: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.0291510jes/pdf>
- [195] M. Lewerenz, G. Fuchs, L. Becker und D. U. Sauer, „Irreversible calendar aging and quantification of the reversible capacity loss caused by anode overhang,“ *Journal of Energy Storage*, Jg. 18, S. 149–159, 2018, doi: 10.1016/j.est.2018.04.029.
- [196] P. S. Sabet, G. Stahl und D. U. Sauer, „RETRACTED: Non-invasive investigation of predominant processes in the impedance spectra of high energy lithium-ion batteries with Nickel-Cobalt-Aluminum cathodes,“ *Journal of Power Sources*, Jg. 406, S. 185–193, 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.10.024.
- [197] K. Rumpf, M. Naumann und A. Jossen, „Experimental investigation of parametric cell-to-cell variation and correlation based on 1100 commercial lithium-ion cells,“ *Journal of Energy Storage*, Jg. 14, S. 224–243, 2017, doi: 10.1016/j.est.2017.09.010.
- [198] M. Baumann, L. Wildfeuer, S. Rohr und M. Lienkamp, „Parameter variations within Li-Ion battery packs – Theoretical investigations and experimental quantification,“ *Journal of Energy Storage*, Jg. 18, S. 295–307, 2018, doi: 10.1016/j.est.2018.04.031.
- [199] D. Pritzl, S. Solchenbach, M. Wetjen und H. A. Gasteiger, „Analysis of Vinylene Carbonate (VC) as Additive in Graphite/LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄ Cells,“ *J. Electrochem. Soc.*, Jg.

- 164, Nr. 12, A2625-A2635, 2017. doi: 10.1149/2.1441712jes. [Online]. Verfügbar unter: <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.1441712jes/pdf>
- [200] P. Shafiei Sabet und D. U. Sauer, „Separation of predominant processes in electrochemical impedance spectra of lithium-ion batteries with nickel-manganese-cobalt cathodes,“ *Journal of Power Sources*, Jg. 425, S. 121–129, 2019, doi: 10.1016/j.jpowsour.2019.03.068.
- [201] M. Schindler, J. Sturm, S. Ludwig, A. Durdel und A. Jossen, „Comprehensive Analysis of the Aging Behavior of Nickel-Rich, Silicon-Graphite Lithium-Ion Cells Subject to Varying Temperature and Charging Profiles,“ *J. Electrochem. Soc.*, Jg. 168, Nr. 6, S. 60522, 2021, doi: 10.1149/1945-7111/ac03f6.
- [202] P. O. Fanger, „Assessment of man's thermal comfort in practice,“ *British journal of industrial medicine*, Jg. 30, Nr. 4, S. 313–324, 1973, doi: 10.1136/oem.30.4.313.
- [203] L. Schlowak, „Analyse der Beeinflussung des Nutzerkomforts durch elektrothermische Rekuperation,“ Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2020.
- [204] N. Mancini, J. S. M. Mardall, J. Kopitz, C. R. O'Donnell, D. Hanks und H. Li, “US020190070924A120190307 - Optimal source electric vehicle heat pump with extreme temperature heating capability and efficient thermal preconditioning,“ 16124285, Mrz 7, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://patentimages.storage.googleapis.com/58/eb/22/870827f4b9f611/US20190070924A1.pdf>
- [205] Deutscher Wetterdienst. „Wetter und Klima - Leistungen - Zeitreihen und Trends.“ <https://www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html#buehneTop> (Zugriff am: 6. November 2021).
- [206] Deutscher Wetterdienst. „Wetter und Klima - Erläuterungen - Erläuterungen der Klimagrafiken.“ <https://www.dwd.de/DE/leistungen/kvo/editorial/erlaeuterungen.html> (Zugriff am: 6. November 2021).

Vorveröffentlichungsliste

Während der Anfertigung dieser Dissertation entstanden Veröffentlichungen, Software und Studienarbeiten, in denen Teilaspekte dieser Arbeit vorgestellt wurden.

Zeitschriften; Scopus/ Web of Science gelistet (peer-reviewed)

- [8] M. Steinstraeter, T. Heinrich, und M. Lienkamp, "Effect of Low Temperature on Electric Vehicle Range," *World Electric Vehicle Journal (WEVJ)*, Bd. 12, Rn. 3, S. 115, 2021.
- [23] D. Wagner, M. Steinsträter, M. Förth, M. Stohwasser, J. Hoffmann, und M. Lienkamp, "Battery independent regenerative braking using model predictive control with auxiliary power consumers," *Forschung im Ingenieurwesen*, Bd. 83, Rn. 4, S. 843–852, 2019.
- [55] M. Steinstraeter, M. Lewke, J. Buberger, T. Hentrich, und M. Lienkamp, "Range Extension via Electrothermal Recuperation," *World Electric Vehicle Journal (WEVJ)*, Bd. 11, Rn. 2, S. 41, 2020, DOI: 10.3390/wevj11020041.
- [95] M. Steinstraeter, J. Gndlgruber, J. Everken, und M. Lienkamp, "Influence of pulse width modulated auxiliary consumers on battery aging in electric vehicles," *Journal of Energy Storage*, Bd. 48, S. 104009, 2022.
- [126] N. Wassiliadis, M. Steinstraeter, M. Schreiber, P. Rosner, L. Nicoletti, F. Schmid, M. Ank, O. Teichert, L. Wildfeuer, J. Schneider, A. Koch, A. König, A. Glatz, J. Gndlgruber, T. Kröger, X. Lin, und M. Lienkamp, "Quantifying the state of the art of electric powertrains in battery electric vehicles: Range, power, and lifetime from component to system level of the VW ID.3," *eTransportation*, Bd. 12, 2022, DOI: 10.1016/j.etrans.2022.100167.
- [132] M. Steinstraeter, J. Buberger, K. Minnerup, D. Trifonov, P. Horner, B. Weiss, und M. Lienkamp, "Controlling cabin heating to improve range and battery lifetime of electric vehicles," *eTransportation: Elsevier*, Bd. 13, 2022, DOI: 10.1016/j.etrans.2022.100181.

Konferenzen, Magazine, etc.; Scopus/ Web of Science gelistet (peer-reviewed)

- [83] K. Minnerup, T. Herrmann, M. Steinstraeter, und M. Lienkamp, "Holistic Energy Management System for Battery Electric Vehicles using Sliding Window Optimization," in *The 31st International Electric Vehicles Symposium Kobe, Japan*
- [84] K. Minnerup, T. Herrmann, M. Steinstraeter, und M. Lienkamp, "Concept for a Holistic Energy Management System for Battery Electric Vehicles Using Hybrid Genetic Algorithms," in *2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall): Chicago, IL, USA, 27-30 August 2018 : proceedings*, Piscataway, NJ: IEEE, 2018, S. 1–6.

Dissertationsrelevante Open-Source Software/Daten

- [115] M. Steinstraeter, J. Buberger, und D. Trifonov, "Battery and Heating Data in Real Driving Cycles," 2020.

Betreute Studienarbeiten

- [19] M. Stohwasser, "Entwicklung und Validierung eines Heizkreislaufmodells für Elektrofahrzeuge," Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2019
- [33] V. Seitz, "Entwicklung eines Modells zum Vergleich elektrischer Heizsysteme," Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2018
- [44] L. Mayer, "Beurteilung des Reichweitengewinns und der Batteriealterung unter dem Einfluss von Heiztechnologien im Elektrofahrzeug," Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021
- [127] T. G. P. Heinrich, "Potentialabschätzung elektrothermischer Rekuperation aus Fahrdaten," Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021
- [134] N. Gerner, "Analyse des elektrothermischen Rekuperationspotentials am Realfahrzeug," Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2019
- [137] M. Protschka, "Entwicklung eines Batteriemodells auf Basis von Realfahrtdaten," Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2020
- [138] P. Horner, "Optimierung eines Batteriemodells auf Basis von Realfahrtdaten," Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021
- [159] B. K. Weiß, "Simulative Untersuchung der Batteriealterung unter dem strategischen Einfluss eines HV-Heizers," Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2019
- [172] N. Freitag, "Analyse des zeitlich-elektrischen Verhaltens eines schnell verfügbaren Hochvolt-Schichtheizgeräts," Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2019
- [174] D. Trifonov, "Weiterentwicklung einer Betriebsstrategie zur Integration von Heizgeräten in Elektrofahrzeugen," Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021
- [176] S. Kraus, "Betriebsstrategie zur Lastspitzenglättung in Elektrofahrzeugen durch adaptive Regelung des Heizgeräts," Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2021
- [177] J. Everken, "Planung, Durchführung und Auswertung von Batteriealterungsversuchen mit hochfrequenten Lasten," Bachelorarbeit, Fakultät für Maschinenwesen, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2020

- [178] J. Gandlgruber, "Versuchsdurchführung und Analyse des Einflusses von Pulsweitenmodulation auf die Alterung von Lithium-Ionen-Zellen," Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2020
- [203] L. Schlowak, "Analyse der Beeinflussung des Nutzerkomforts durch elektrothermische Rekuperation," Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2020

Anhang

Anhang A	Parametrierung Heizkreislauf	xxviii
Anhang B	Parametrierung Batterie	xxix
Anhang C	Daten der PWM Versuche.....	xxx
Anhang D	Geschwindigkeitsprofile	xxxii
Anhang E	Monatstemperaturen im Jahreszyklus.....	xxxiv
Anhang F	Reichweitengewinn	xxxv
Anhang G	Kapazitätsverlust	xxxvii
Anhang H	Daten der PWM Versuche.....	xl

Anhang A Parametrierung Heizkreislauf

Tabelle A.1: Parametrierung des Heizgeräts [19]

Formelzeichen	Parameter	Wert
l_{Heiz}	Mittlere Kühlmittellauflänge in m	0,48
m_{Heiz}	Masse in kg	1,89
$c_{p,Heiz}$	Mittlere spezifische Wärmekapazität in $\frac{J}{kg K}$	866
kA_{Heiz}	Wärmeübertragungsverhalten in $\frac{W}{K}$	190

Tabelle A.2: Parametrierung des Heizwärmetauschers [19]

Formelzeichen	Parameter	Wert
l_{HWT}	Mittlere Kühlmittellauflänge in m	0,33
kA_{HWT}	Wärmeübertragungsverhalten in $\frac{W}{K}$	$kA_{HE} (\dot{m}_{coolant})$

Tabelle A.3: Parametrierung der Schläuche [19, 33]

Formelzeichen	Parameter	Wert
$l_{Schlauch1}$	Länge Schlauch 1 in m	2
$l_{Schlauch2}$	Länge Schlauch 2 in m	0,5
$\lambda_{Schlauch}$	Wärmeleitwert in $\frac{W}{m K}$	0,3
$d_{i,Schlauch}$	Innendurchmesser in mm	20
$d_{o,Schlauch}$	Außendurchmesser in mm	27
$c_{p,Schlauch}$	Spezifische Wärmekapazität in $\frac{J}{kg K}$	2100
$\alpha_{i,Schlauch}$	Konvektiver Wärmeübergang der Innenseite in $\frac{W}{m K}$	$\alpha_{i,Pipe} (\dot{m}_{coolant})$
$\alpha_{o,Schlauch}$	Konvektiver Wärmeübergang der Außenseite in $\frac{W}{m K}$	500

Anhang B Parametrierung Batterie

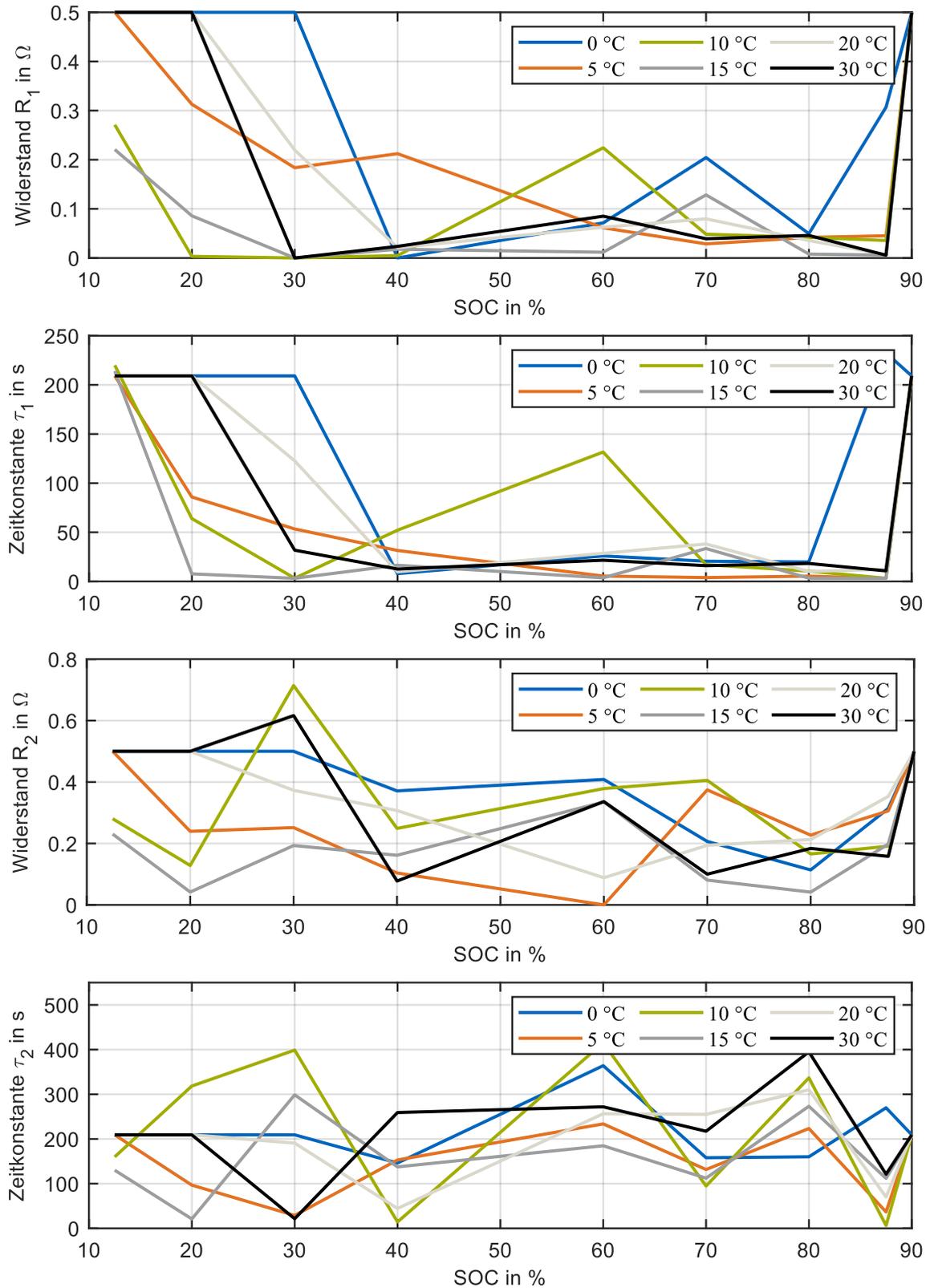


Abbildung B.1: Batteriemodellparameter der RC-Glieder. Entnommen aus [132].

Anhang C Daten der PWM Versuche

Tabelle C.1: Kapazität über 1.600 Halbzyklen Entnommen aus [95].

Zelle	Kapazität in Ah								
	C ₀	C ₂₀₀	C ₄₀₀	C ₆₀₀	C ₈₀₀	C ₁₀₀₀	C ₁₂₀₀	C ₁₄₀₀	C ₁₆₀₀
A1 (DC)	4,81	4,75	4,71	4,69	4,66	4,63	4,61	4,57	4,55
A2 (DC)	4,80	4,74	4,69	4,66	4,63	4,59	4,55	4,49	4,36
A3 (10 Hz)	4,77	4,71	4,62	4,25	3,58	/	/	/	/
A4 (10 Hz)	4,78	4,73	4,69	4,53	4,32	4,08	3,62	/	/
A5 (400 Hz)	4,78	4,71	4,66	4,64	4,60	4,57	4,54	4,51	4,47
A6 (400 Hz)	4,81	4,74	4,70	4,68	4,65	4,61	4,57	4,53	4,48
A7 (5 kHz)	4,76	4,70	4,66	4,64	4,61	4,57	4,51	4,45	4,35
A8 (5 kHz)	4,83	4,76	4,73	4,69	4,66	4,63	4,59	4,52	4,42

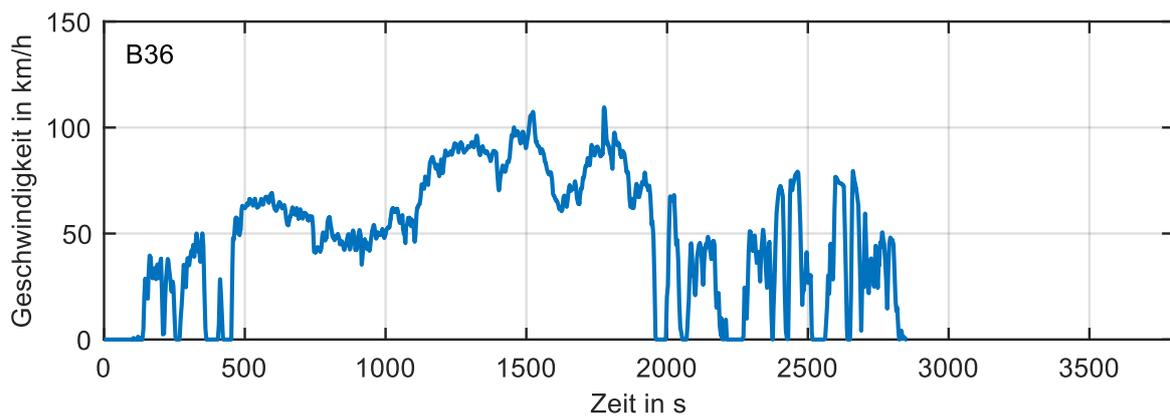
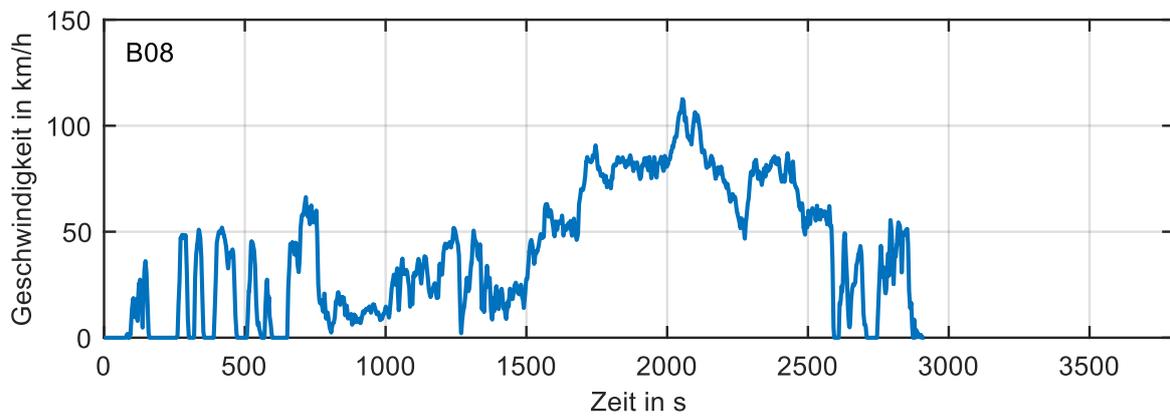
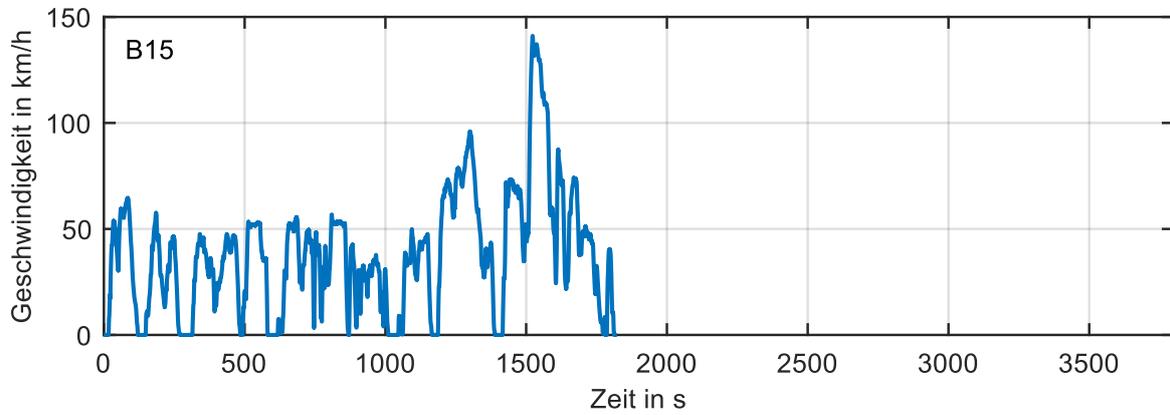
Tabelle C.2: Innenwiderstand über 1.600 Halbzyklen. Entnommen aus [95].

Zelle	Innenwiderstand in mΩ								
	R ₀	R ₂₀₀	R ₄₀₀	R ₆₀₀	R ₈₀₀	R ₁₀₀₀	R ₁₂₀₀	R ₁₄₀₀	R ₁₆₀₀
A1 (DC)	33,05	33,73	34,11	34,49	35,10	35,25	35,64	35,94	36,62
A2 (DC)	32,60	33,43	33,81	34,42	34,88	34,88	35,65	35,42	36,63
A3 (10 Hz)	33,35	34,12	35,26	37,63	44,42	/	/	/	/
A4 (10 Hz)	33,59	33,73	34,64	36,17	37,62	39,91	45,80	/	/
A5 (400 Hz)	32,98	33,43	33,89	34,65	35,26	35,33	35,79	35,80	36,47
A6 (400 Hz)	32,89	33,58	33,96	34,65	34,80	35,34	35,65	35,56	36,33
A7 (5 kHz)	33,12	33,20	33,88	34,49	34,87	35,48	36,17	36,26	37,17
A8 (5 kHz)	32,82	33,66	34,35	35,11	35,57	35,70	36,39	36,63	37,69

Tabelle C.3: DVA-Ergebnisse: Gesamtkapazität, Anodenkapazität, Elektrodenbilanz und Kathodenkapazität gemessen zu Beginn, nach 800 Halbzyklen und am Ende der Studie (*Zelle A4 wurde nach 1.200 HC gestoppt). Entnommen aus [95].

Zelle	Kapazität in Ah											
	Q _{total, 0}	Q _{A, 0}	Q _{B, 0}	Q _{C, 0}	Q _{total,800}	Q _{A, 800}	Q _{B, 800}	Q _{C, 800}	Q _{total,1600}	Q _{A,1600}	Q _{B,1600}	Q _{C,1600}
A1 (DC)	4,81	2,81	1,88	0,92	4,66	2,58	1,97	0,91	4,55	2,49	1,95	0,90
A2 (DC)	4,80	2,82	1,88	0,92	4,63	2,57	1,95	0,93	4,36	2,32	1,94	0,89
A3 (10 Hz)	4,77	2,82	1,85	0,91	3,58	1,62	1,76	0,76				
A4 (10 Hz)	4,78	2,80	1,86	0,91	4,32	2,30	1,88	0,88	3,62*	1,67*	1,77*	0,77*
A5 (400 Hz)	4,78	2,79	1,90	0,92	4,60	2,54	1,96	0,91	4,47	2,80	2,02	0,88
A6 (400 Hz)	4,81	2,83	1,87	0,91	4,65	2,57	1,97	0,90	4,48	2,84	2,03	0,89
A7 (5 kHz)	4,76	2,79	1,86	0,92	4,61	2,56	1,93	0,91	4,35	2,29	1,98	0,90
A8 (5 kHz)	4,83	2,84	1,89	0,91	4,66	2,58	1,97	0,90	4,42	2,38	1,91	0,88

Anhang D Geschwindigkeitsprofile



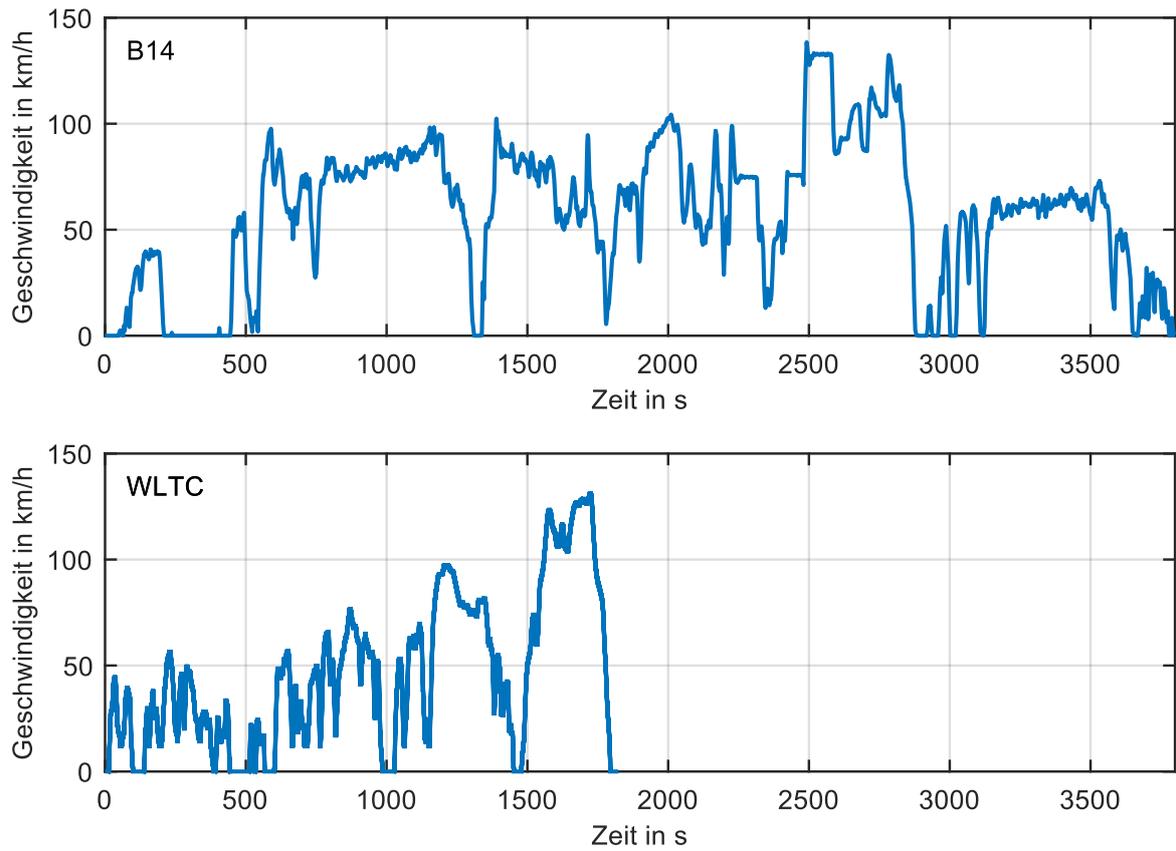


Abbildung D.2: Simulierte Geschwindigkeitsprofile

Anhang E Monatstemperaturen im Jahreszyklus

Tabelle E.1: Gemittelte Monatstemperaturen über 30 Jahre in Deutschland und Monatstemperaturen für den Jahreszyklus

Monat	Durchschnittstemperatur in °C (aus [205])	Temperatur Jahreszyklus in °C (anhand [206] ermittelt)
Januar	0,9	-10
Februar	1,5	-2
März	4,6	5
April	9,0	10
Mai	13,1	15
Juni	16,4	20
Juli	18,3	25
August	18,0	20
September	13,3	15
Oktober	9,4	10
November	4,8	5
Dezember	1,8	0
Jahresmittel	9,25	9,41

Anhang F Reichweitengewinn

Tabelle F.1: Reichweite durch die Standard-Strategie und Steigerung durch die anderen Strategien bei -10 °C

Fahrt	Reichweite in km		Steigerung in %		
	Standard	Laden-prio	Heizen-prio	Fuzzy-Logik	Heizgeräte-intern
B15	69,6	11,6	11,4	12,5	7,4
B08	83,0	4,7	5,1	5,1	6,2
B36	85,4	3,3	4,2	2,2	4,8
B14	87,2	3,6	3,3	0,7	0,8
WLTP	72,3	7,8	7,7	9,8	6,1
Mittelwert	79,5	6,2	6,4	6,1	5,1

Tabelle F.2: Reichweite durch die Standard-Strategie und Steigerung durch die anderen Strategien bei 0 °C

Fahrt	Reichweite in km		Steigerung in %		
	Standard	Laden-prio	Heizen-prio	Fuzzy-Logik	Heizgeräte-intern
B15	84,9	6,3	4,2	5,8	2,6
B08	100,5	2,7	2,5	3,2	2,1
B36	99,9	1,9	1,7	2,2	1,7
B14	100,1	1,9	1,6	1,8	-0,2
WLTP	86,8	4,4	2,3	4,8	2,8
Mittelwert	94,4	3,5	2,5	3,6	1,8

Tabelle F.3: Reichweiten und Reichweitensteigerungen bei 10 °C

Fahrt	Reichweite in km		Steigerung in %		
	Standard	Laden-prio	Heizen-prio	Fuzzy-Logik	Heizgeräte-intern
B15	101,9	1,4	-0,9	0,6	-0,8
B08	117,3	0,4	-0,9	0,3	-0,5
B36	112,8	0,3	-0,6	0,1	-0,3
B14	110,6	0,5	-0,2	0,5	0,1
WLTP	101,1	0,6	-0,8	0,5	-0,3
Mittelwert	108,7	0,6	-0,7	0,4	-0,4

Anhang G Kapazitätsverlust

Tabelle G.1: Kapazitätsverlust und dessen Reduktion durch die Strategien aller Fahrten bei -10 °C

Fahrt	Kapazitätsverlust in %		Verbesserung in %		
	Standard	Laden-prio	Heizen-prio	Fuzzy-Logik	Heizgeräte-intern
B15	0,0238	-2,0	-3,5	-3,1	-4,9
B08	0,0080	-0,9	-3,6	-2,8	-4,1
B36	0,0171	2,1	1,5	1,0	1,7
B14	0,0176	3,6	3,8	3,5	3,0
WLTP	0,0076	-2,4	-4,2	-6,4	-4,6
Mittelwert	0,0148	0,1	-1,2	-1,6	-1,8

Tabelle G.2: Kapazitätsverlust und dessen Reduktion durch die Strategien aller Fahrten bei 0 °C

Fahrt	Kapazitätsverlust in %		Verbesserung in %		
	Standard	Laden-prio	Heizen-prio	Fuzzy-Logik	Heizgeräte-intern
B15	0,0084	-1,8	-3,2	-2,9	-3,1
B08	0,0035	-1,4	-6,8	-2,8	-2,5
B36	0,0070	-1,0	-2,4	-2,5	-1,8
B14	0,0074	0,2	-1,8	-0,1	-0,4
WLTP	0,0032	-2,3	-5,0	-3,7	-4,2
Mittelwert	0,0059	-1,3	-3,8	-2,4	-2,4

Tabelle G.3: Kapazitätsverlust und dessen Reduktion durch die Strategien aller Fahrten bei 10 °C

Fahrt	Kapazitätsverlust in %		Verbesserung in %		
	Standard	Laden-prio	Heizen-prio	Fuzzy-Logik	Heizgeräte-intern
B15	0,0022	-0,5	-3,0	-2,3	-2,0
B08	0,0013	-0,4	-7,1	-2,9	-2,8
B36	0,0021	-0,4	-3,4	-2,0	-1,9
B14	0,0023	0,0	-3,0	-1,8	-1,9
WLTP	0,0011	-0,6	-5,8	-2,8	-3,8
Mittelwert	0,0018	-0,4	-4,5	-2,2	-2,5

Tabelle G.4: EIS results: Ohmscher AC- Widerstand (1 kHz), Ladungsdurchtrittswiderstand, Doppelschichtkapazität und Eckfrequenz gemessen initial, nach 800 Halbzyklen und nach Beendigung der Versuche. (Die Bereiche der Eckfrequenz ergibt sich aus der zunächst geringen Anzahl der Testfrequenzen, die später verdoppelt wurde.)

Zelle	f in Hz	Halbzyklen	R_{AC} in $m\Omega$	R_{ct} in $m\Omega$	C_{dl} in F	f_c in Hz
A1	0	0	22,48	1,27	1,58- 1,98	63,3 - 79,4
A2	0	0	22,25	1,27	1,58 - 1,98	63,3 - 79,4
A3	10	0	22,48	1,38	1,45 - 1,82	63,3 - 79,4
A4	10	0	22,45	1,43	1,40 - 1,76	63,3 - 79,4
A5	400	0	22,48	1,19	1,68 - 2,11	63,3 - 79,4
A6	400	0	22,43	1,23	1,63 - 2,04	63,3 - 79,4
A7	5,000	0	22,49	1,19	1,68 - 2,11	63,3 - 79,4
A8	5,000	0	22,51	1,20	1,67 - 2,10	63,3 - 79,4
A1	0	800	22,62	1,96	1,28 – 1,63	49,9 - 63,3
A2	0	800	22,47	1,88	1,34 – 1,70	49,9 - 63,3
A3	10	800	25,78	3,43	0,73 – 0,93	49,9 - 63,3
A4	10	800	23,49	2,44	1,03 – 1,31	49,9 - 63,3
A5	400	800	22,70	1,84	1,37 – 1,73	49,9 - 63,3
A6	400	800	22,51	1,79	1,40 – 1,78	49,9 - 63,3
A7	5,000	800	22,69	1,80	1,40 – 1,77	49,9 - 63,3
A8	5,000	800	22,64	1,96	1,28 – 1,63	49,9 - 63,3
A1	0	1,600	22,78	2,45	1,44	45,07
A2	0	1,600	22,90	2,42	1,32	49,87
A3	10	-	-	-	-	-
A4	10	1,200	26,00	4,32	0,82	45,07
A5	400	1,600	23,00	2,33	1,52	45,07
A6	400	1,600	22,97	2,35	1,50	45,07
A7	5,000	1,600	23,25	2,50	1,41	45,07
A8	5,000	1,600	23,22	2,59	1,36	45,07

Anhang H Daten der PWM Versuche

Tabelle H.1: Kapazität über 1.600 Halbzyklen Entnommen aus [95].

Zelle	Kapazität in Ah								
	C ₀	C ₂₀₀	C ₄₀₀	C ₆₀₀	C ₈₀₀	C ₁₀₀₀	C ₁₂₀₀	C ₁₄₀₀	C ₁₆₀₀
A1 (DC)	4,81	4,75	4,71	4,69	4,66	4,63	4,61	4,57	4,55
A2 (DC)	4,80	4,74	4,69	4,66	4,63	4,59	4,55	4,49	4,36
A3 (10 Hz)	4,77	4,71	4,62	4,25	3,58	/	/	/	/
A4 (10 Hz)	4,78	4,73	4,69	4,53	4,32	4,08	3,62	/	/
A5 (400 Hz)	4,78	4,71	4,66	4,64	4,60	4,57	4,54	4,51	4,47
A6 (400 Hz)	4,81	4,74	4,70	4,68	4,65	4,61	4,57	4,53	4,48
A7 (5 kHz)	4,76	4,70	4,66	4,64	4,61	4,57	4,51	4,45	4,35
A8 (5 kHz)	4,83	4,76	4,73	4,69	4,66	4,63	4,59	4,52	4,42

Tabelle H.2: Innenwiderstand über 1.600 Halbzyklen. Entnommen aus [95].

Zelle	Innenwiderstand in mΩ								
	R ₀	R ₂₀₀	R ₄₀₀	R ₆₀₀	R ₈₀₀	R ₁₀₀₀	R ₁₂₀₀	R ₁₄₀₀	R ₁₆₀₀
A1 (DC)	33,05	33,73	34,11	34,49	35,10	35,25	35,64	35,94	36,62
A2 (DC)	32,60	33,43	33,81	34,42	34,88	34,88	35,65	35,42	36,63
A3 (10 Hz)	33,35	34,12	35,26	37,63	44,42	/	/	/	/
A4 (10 Hz)	33,59	33,73	34,64	36,17	37,62	39,91	45,80	/	/
A5 (400 Hz)	32,98	33,43	33,89	34,65	35,26	35,33	35,79	35,80	36,47
A6 (400 Hz)	32,89	33,58	33,96	34,65	34,80	35,34	35,65	35,56	36,33
A7 (5 kHz)	33,12	33,20	33,88	34,49	34,87	35,48	36,17	36,26	37,17
A8 (5 kHz)	32,82	33,66	34,35	35,11	35,57	35,70	36,39	36,63	37,69

Tabelle H.3: DVA-Ergebnisse: Gesamtkapazität, Anodenkapazität, Elektrodenbilanz und Kathodenkapazität gemessen zu Beginn, nach 800 Halbzyklen und am Ende der Studie (*Zelle A4 wurde nach 1.200 HC gestoppt). Entnommen aus [95].

Zelle	Kapazität in Ah											
	$Q_{total, 0}$	$Q_{A, 0}$	$Q_{B, 0}$	$Q_{C, 0}$	$Q_{total, 800}$	$Q_{A, 800}$	$Q_{B, 800}$	$Q_{C, 800}$	$Q_{total, 1600}$	$Q_{A, 1600}$	$Q_{B, 1600}$	$Q_{C, 1600}$
A1 (DC)	4,81	2,81	1,88	0,92	4,66	2,58	1,97	0,91	4,55	2,49	1,95	0,90
A2 (DC)	4,80	2,82	1,88	0,92	4,63	2,57	1,95	0,93	4,36	2,32	1,94	0,89
A3 (10 Hz)	4,77	2,82	1,85	0,91	3,58	1,62	1,76	0,76				
A4 (10 Hz)	4,78	2,80	1,86	0,91	4,32	2,30	1,88	0,88	3,62*	1,67*	1,77*	0,77*
A5 (400 Hz)	4,78	2,79	1,90	0,92	4,60	2,54	1,96	0,91	4,47	2,80	2,02	0,88
A6 (400 Hz)	4,81	2,83	1,87	0,91	4,65	2,57	1,97	0,90	4,48	2,84	2,03	0,89
A7 (5 kHz)	4,76	2,79	1,86	0,92	4,61	2,56	1,93	0,91	4,35	2,29	1,98	0,90
A8 (5 kHz)	4,83	2,84	1,89	0,91	4,66	2,58	1,97	0,90	4,42	2,38	1,91	0,88