

Technische Universität München

Fakultät für Maschinenwesen

Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik

**Thermische Vorauslegung hochbelasteter
Batteriesysteme für Elektrofahrzeuge
in der Konzeptphase**

Christoph Reiter, M. Sc.

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Wolfgang Polifke, Ph. D.

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp

2. Prof. Dr.-Ing. Andreas Jossen

Die Dissertation wurde am 23. Juni 2020 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 30. September 2020 angenommen.

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird ein Vorgehen zur thermischen Vorauslegung von Lithium-Ionen Batteriesystemen für Elektrofahrzeuge unter Berücksichtigung aller, in der Konzeptphase relevanten Anforderungen, Einflussgrößen und Rückkopplungen vorgeschlagen. Der Auslegungsprozess umfasst die Auswahl, geometrische Anordnung und elektrische Verschaltung geeigneter Batteriezellen zu einem in Module unterteilten Batteriepack sowie den Entwurf des Thermomanagementkonzepts auf Batterie- und Fahrzeugebene. Die Absicherung der Konzepte erfolgt mittels gekoppelter elektrischer und thermischer Simulation ihres Verhaltens im späteren Fahrzeugeinsatz.

Abstract

In this work, a procedure for the thermal pre-dimensioning of lithium-ion battery systems for electric vehicles is proposed, considering all requirements, influencing factors and interactions relevant in the concept phase. The design process includes the selection, geometrical arrangement, and electrical connection of suitable battery cells to form a battery pack divided into modules as well as the design of the thermal management concept at battery and vehicle level. The concepts are validated by means of a coupled electrical and thermal simulation of their behavior in subsequent vehicle use.

Für meine Eltern.

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 der Arbeit erfolgte durch das bayerische Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie im Rahmen des Forschungsprojektes *EEBatt – Interdisziplinäre Energiespeicherforschung*, die Bayerische Forschungsförderung im Rahmen des Projektes *NEmo – Nutzerorientierte Elektromobilität* und eine durch den Freistaat Bayern finanzierte Landesstelle.

An erster Stelle bedanke mich bei Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp für die Betreuung, das entgegengebrachte Vertrauen und die Freiheiten, die ich bei der Bearbeitung des Themas genießen durfte und den wertvollen fachlichen, konzeptionellen und persönlichen Rat, auf den ich mich jederzeit verlassen konnte. Prof. Dr.-Ing. Andreas Jossen danke ich für das Interesse an meinem Forschungsthema und die Bereitschaft zur Übernahme des Zweitgutachtens. Weiterhin bedanke ich mich bei Prof. Wolfgang Polifke, Ph. D. für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl, allen voran denen meiner Forschungsgruppe *Elektrische Antriebssysteme*, danke ich für die tolle Zusammenarbeit und Atmosphäre, aber vor allem für die schöne, humorvolle und kollegiale Zeit, an die ich mich immer mit Freude zurückerinnern werde. Ein besonderer Dank gilt meinen Kollegen Dr. Jörn Adermann, Dr. Michael Baumann und Nikolaos Wassiliadis, deren Expertise und gemeinsamen Diskussionen mir sehr geholfen haben, meine Arbeit in die richtige Richtung zu lenken. Ein mindestens genauso großer Dank gilt den Studentinnen und Studenten, deren Begeisterung, Kreativität und hoher persönlicher Einsatz in unzähligen Studienarbeiten entscheidend zu den Ergebnissen dieser Arbeit beigetragen haben. Weiterhin danke ich den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Sekretariats, der Buchhaltung und der Werkstätten des Lehrstuhls.

Ich danke meinen Korrekturleserinnen und -lesern Nikolaos Wassiliadis, Fabian Ebert, Leo Wildfeuer, Britta Isermann sowie Martin und Britta Reiter für ihre wertvolle Anregungen und ihre Unterstützung darin, die Arbeit inhaltlich und sprachlich auf das vorliegende Niveau zu bringen.

Meiner Partnerin Britta Isermann danke ich für ihren Rückhalt, die Motivation, ihre Geduld mit mir, ihre Hilfe bei der wichtigen wiederkehrenden Entscheidung, die Diss auch mal Diss sein zu lassen, dass sie mich in guten wie in schlechten Zeiten erträgt und mir stets zur Seite steht.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern, die mich mein ganzes Leben bedingungslos unterstützt und stets an mich geglaubt haben, und immer für mich da sind. Ich danke euch von ganzem Herzen!

München, im Juni 2020

Christoph Reiter

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	III
Formelzeichen	V
1 Einleitung	1
1.1 Aktuelle Herausforderungen der Elektromobilität.....	1
1.2 Aufbau der Arbeit.....	3
2 Batteriesysteme in Elektrofahrzeugen	5
2.1 Grundlagen der Lithium-Ionen Technologie.....	5
2.2 Typen und Formate von Lithium-Ionen-Batterien.....	7
2.3 Anforderungen und Leistungsprofile.....	8
2.4 Einflüsse von Umwelt, Fahrer und Fahrzeug.....	9
2.5 Betriebsgrößen und deren Überwachung.....	10
2.6 Ableitung zulässiger Betriebsfenster.....	12
3 Ableitung der Themenstellung	15
3.1 Einordnung in den Entwicklungsprozess elektrischer Antriebsstränge.....	15
3.2 Bewertung bestehender Auslegungsansätze.....	15
3.3 Ziele und Vorgehen der Arbeit.....	17
4 Elektrische Auslegung von Batteriesystemen	19
4.1 Verschaltung von Lithium-Ionen-Zellen.....	19
4.2 Modellierung des elektrischen Systemverhaltens.....	21
4.3 Validierung des elektrischen Systemmodells.....	23
4.4 Zellauswahl und elektrische Verschaltung.....	24
5 Thermische Auslegung von Batteriesystemen	27
5.1 Grundlagen des Thermomanagements.....	27
5.2 Anforderungen an das Thermomanagement von Batteriesystemen.....	29
5.3 Modellierung des thermischen Systemverhaltens.....	31
5.4 Validierung des thermischen Systemmodells.....	34
5.5 Bewertung der Zellbelastung.....	36
5.6 Auswahl des thermischen Batteriekonzepts.....	38

6	Integration in das Thermomanagement des Gesamtfahrzeugs	41
6.1	Thermomanagement von Elektrofahrzeugen.....	41
6.2	Bestimmung der thermischen Eigenschaften elektrischer Antriebsstränge.....	43
6.3	Modellierung des Fahrzeugthermomanagements	45
6.4	Validierung des Fahrzeugthermomanagements	47
6.5	Einflüsse unterschiedlicher Systemarchitekturen	49
6.6	Auswahl des Fahrzeugthermomanagements	52
7	Ergebnisse des Auslegungsprozesses	55
7.1	Definition der Anforderungen	55
7.2	Definition der Rahmenbedingungen.....	57
7.3	Ergebnisse der Packageauslegung	59
7.4	Ergebnisse der elektrischen Auslegung	61
7.5	Ergebnisse der thermischen Auslegung	63
7.6	Ergebnisse der Integration in das Gesamtfahrzeug	67
7.7	Wechselwirkungen zwischen den Systemebenen.....	73
7.8	Diskussion der Ergebnisse	74
8	Diskussion des Auslegungsprozesses	79
8.1	Benötigte Parameter und Informationen	79
8.2	Vereinfachungen, Limitationen und Entwicklungspotentiale der Modelle	81
8.3	Ablauf der Systemauslegung.....	85
8.4	Bewertung der Auslegungsempfehlungen	88
9	Zusammenfassung und Ausblick	89
9.1	Problemstellung der Arbeit	89
9.2	Auslegungsprozess	90
9.3	Absicherung des Auslegungsprozesses	91
9.4	Abgeleitete Auslegungsempfehlungen	91
9.5	Vorgehen für die Auslegung von Thermomanagementsystemen	93
9.6	Nutzung und Weiterentwicklung des Auslegungsprozesses	94
	Abbildungsverzeichnis.....	i
	Tabellenverzeichnis	v
	Literaturverzeichnis	vii
	Vorveröffentlichungsliste	xxi
	Betreute Studienarbeiten.....	xxv
	Anhang	xxvii

Abkürzungsverzeichnis

AC	Wechselstrom (<i>engl. alternating current</i>)
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club
BEV	Batterieelektrifahrzeug (<i>engl. battery electric vehicle</i>)
BMS	Batteriemanagementsystem
BTMS	Batteriethermomanagementsystem
CADC	Artemis-Fahrzyklus (<i>engl. Common Artemis Driving Cycle</i>)
CCCV	Konstantstrom, Konstanzspannung (<i>engl. constant current, constant voltage</i>)
CFD	numerische Strömungsmechanik (<i>engl. computational fluid dynamics</i>)
CO ₂	Kohlendioxid
CV	Konstanzspannung (<i>engl. constant voltage</i>)
DC	Gleichstrom (<i>engl. direct current</i>)
DST	Dynamischer Stromzyklus für Zelltests (<i>engl. Dynamic Stress Test</i>)
ECM	elektrisches Ersatzschaltkreismodell (<i>engl. equivalent circuit model</i>)
EM	elektrische Maschine
EOL	Ende der Lebensdauer (<i>engl. end of life</i>)
FV	finites Volumen
FVM	Finite-Volumen-Methode
HEV	Hybridelektrifahrzeug (<i>engl. hybrid electric vehicle</i>)
HT	Hochtemperatur
HVAC	Klimatisierungssystem (<i>engl. heating, ventilation, and air conditioning</i>)
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
KK	Kühlkreislauf
LA	Lastkollektivanalyse
LE	Leistungselektronik
LIB	Lithium-Ionen-Zelle (<i>engl. lithium-ion battery</i>)
MEG	Monoethylenglycol
NT	Niedertemperatur
OCV	Ruhespannung (<i>engl. open-circuit voltage</i>)
OEM	Automobilhersteller (<i>engl. original equipment manufacturer</i>)

PCM	Phasenwechselmaterial (<i>engl. phase-change-material</i>)
PEP	Produktentstehungsprozess
PHEV	Plug-in-Hybridelektrofahrzeug (<i>engl. plug-in hybrid electric vehicle</i>)
Pkw	Personenkraftwagen
PTC	Widerstandsheizgerät (<i>engl. positive temperature coefficient heater</i>)
SEI	Passivierungsschicht (<i>engl. solid electrolyte interphase</i>)
SOC	Ladungszustand (<i>engl. state of charge</i>)
SOH	Alterungszustand (<i>engl. state of health</i>)
SOP	verfügbare Leistung (<i>engl. state of power</i>)
TMS	Thermomanagementsystem
VTMS	Fahrzeugthermomanagementsystem (<i>engl. vehicle thermal management system</i>)
VW	Volkswagen
WLTC	WLTP-Fahrzyklus (<i>engl. Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle</i>)
WLTP	Verfahren zur Messung von Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen von Pkw (<i>engl. Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure</i>)
WS	Wärmesenke

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
A	m^2	Teil-, bzw. gesamte Oberfläche eines Körpers
A_{Zelle}	m^2	(Für den Wärmeaustausch mit der Umgebung relevante) Oberfläche einer Zelle
$A_{Zelle, BTMS, j}$	m^2	Oberfläche einer Zelle, die mit dem Kühlkanal j eines BTMS im thermischen Kontakt steht
α	$\frac{W}{m^2 K}$	Wärmeübergangskoeffizient
α_{ges}	$\frac{W}{m^2 K}$	Zusammengefasster Wärmeübergangskoeffizient
a_{max}	$\frac{m}{s^2}$	Maximale Beschleunigung eines Fahrzeugs
α_{mod}	$\frac{W}{m^2 K}$	Wärmeübergangskoeffizient zwischen den einzelnen Modulen innerhalb eines Batteriesystems
α_x	$\frac{W}{m^2 K}$	Wärmeübergangskoeffizient zwischen den LIB innerhalb eines Batteriesystems in x-Richtung
α_y	$\frac{W}{m^2 K}$	Wärmeübergangskoeffizient zwischen den LIB innerhalb eines Batteriesystems in y-Richtung
α_z	$\frac{W}{m^2 K}$	Wärmeübergangskoeffizient zwischen den LIB innerhalb eines Batteriesystems in z-Richtung
$\alpha_{Zelle, \infty}$	$\frac{W}{m^2 K}$	Wärmeübergangskoeffizient zwischen einer Zelle und ihrer Umgebung
$\alpha_{Zelle, BTMS, j}$	$\frac{W}{m^2 K}$	Wärmeübergangskoeffizient zwischen einer Zelle und dem Kühlkanal j eines BTMS
α_{∞}	$\frac{W}{m^2 K}$	Wärmeübergangskoeffizient zwischen einem Batteriesystem und der Umgebung (ohne Berücksichtigung von BTMS und VTMS)
Bi	–	Biot-Zahl
$\beta_{Hysterese}$	$\frac{1}{C}$	Hysteresekoeffizient einer LIB
c	$\frac{J}{kg K}$	Spezifische Wärmekapazität eines Körpers
C_A	A h	Nutzbare Kapazität einer LIB
C_n	F	Kapazität des n-ten RC-Gliedes eines ECM
C_N	A h	Nennkapazität einer LIB
c_p	$\frac{J}{kg K}$	Spezifische Wärmekapazität eines Fluids
c_{Zelle}	$\frac{J}{kg K}$	Spezifische Wärmekapazität einer LIB

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
$d_{\text{KK, Wand}}$	m	Wandstärke eines BTMS Kühlkanals
d_{KK}	m	Breite eines Kühlkanals
e	–	Anzahl von Ebenen, in denen Zellen parallel verschaltet werden
ϵ	–	Emissionsgrad (Wärmestrahlung)
$I_{\text{Balancing}}$	A	Balancingstrom
$I_{\text{Bal, Limit}}$	A	Maximaler Zellstrom bei dem Balancing aktiviert werden darf
I_{Zelle}	A	Strombelastung einer LIB
$I_{\text{Zelle, ext}}$	A	Durch externe Strombelastung hervorgerufener Anteil von I_{Zelle}
$I_{\text{Zelle, int}}$	A	Durch interne Ausgleichsströme innerhalb einer Parallelschaltung hervorgerufener Anteil von I_{Zelle}
k	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$	Wärmedurchgangskoeffizient
l	m	Strecke bzw. Entfernung
$l_{\text{KK, ratio}}$	–	Anteil der Länge eines Kühlkanals an einer Referenzlänge bzw. -höhe
λ	$\frac{\text{W}}{\text{mK}}$	Wärmeleitfähigkeit
$\lambda_{\perp, \text{Zelle}}$	$\frac{\text{W}}{\text{mK}}$	Wärmeleitfähigkeit einer Zelle senkrecht zu den Elektrodenschichten
$\lambda_{\text{KK, Wand}}$	$\frac{\text{W}}{\text{mK}}$	Wärmeleitfähigkeit der Wand eines BTMS Kühlkanals
m	kg	Masse
\dot{m}	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	Massestrom
m_{Zelle}	kg	Masse einer Zelle
ν	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	Kinematische Viskosität
p	–	Anzahl parallel verschalteter Zellen
pe	–	Anzahl parallel verschalteter Zellen in einer Ebene
p_{ref}	Pa	Referenzdruck
P_{el}	W	Elektrische Leistung
P_{mech}	W	Mechanische Leistung
\dot{q}	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	Wärmestromdichte
\dot{Q}	W	Wärmestrom
$\dot{Q}_{\text{Zelle, irr}}$	W	Wärmestrom durch irreversible Wärmegeneration einer LIB
$\dot{Q}_{\text{Zelle, rev}}$	W	Wärmestrom durch reversible Wärmegeneration einer LIB
$\dot{Q}_{\text{Zelle, VL}}$	W	Gesamte thermische Verlustleistung einer Zelle
\dot{Q}_{λ}	W	Von Temperaturunterschieden hervorgerufener Wärmestrom zwischen zwei Zellen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
\dot{Q}_∞	W	Wärmestrom zwischen einem Körper und seiner Umgebung
R_{Ableiter}	Ω	Elektrischer Widerstand der Stromableiter innerhalb eines Batteriesystems
R_{Bal}	Ω	Balancing Widerstand für jedes serielle Element innerhalb eines Batteriesystems
R_{gesamt}	Ω	Aus den einzelnen Anteilen zusammengefasster elektrischer Gesamtwiderstand
R_i	Ω	Ohm'scher Innenwiderstand einer LIB
R_{Kontakt}	Ω	Kontaktierungs- bzw. Übergangswiderstand bei der elektrischen Anbindung einer LIB
R_n	Ω	Elektrischer Widerstand des n-ten RC-Gliedes eines ECM
R_λ	$\frac{\text{K}}{\text{W}}$	Wärmeleitwiderstand
ρ	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Dichte
s	–	Anzahl seriell verschalteter Zellen
S	m	Spaltbreite des Kühlkanals eines BTMS
σ	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$	Stefan-Boltzmann-Konstante (im Kontext der Wärmestrahlung)
σ	–	Standardabweichung (im Kontext statistischer Betrachtungen)
Δt	s	Zeitschritt zwischen zwei Iterationen einer zeitdiskreten Berechnung bzw. Simulation
T	K/°C	Temperatur
ΔT	K/°C	Unterschied zwischen zwei Referenztemperaturen
$T_{\text{BTMS},j}$	K/°C	Temperatur des Kühlmittels innerhalb des Kühlkanals j eines BTMS
T_{Fluid}	K/°C	Temperatur des Kühlfluids (BTMS oder VTMS)
T_{FV}	K/°C	Temperatur eines FV
T_{Zelle}	K/°C	Temperatur einer Zelle
T_∞	K/°C	Umgebungstemperatur eines Körpers
ΔU_{Bal}	V	Spannungsdifferenz zwischen LIB innerhalb eines Batteriepacks ab der Balancing aktiviert wird
$U_{\text{Bal, Limit}}$	V	Untere Grenze der Zellspannung für das Balancing innerhalb eines Batteriesystems
U_{Diff}	V	Durch Diffusionseffekte hervorgerufener Anteil der elektrischen Spannung einer LIB
$U_{\text{Hysterese}}$	V	Durch Hystereseeffekte hervorgerufener Anteil der elektrischen Spannung einer LIB
U_{LD}	V	Durch Ladungsdurchtritt und Doppelschichtkapazität hervorgerufener Anteil der elektrischen Spannung einer LIB

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
U_{OCV}	V	Ruhespannung einer LIB
$U_{\text{Potenzial}}$	V	Elektrisches Potenzial einer LIB ohne Berücksichtigung eines Stromflusses
U_{RCn}	V	Spannung des n-ten RC-Gliedes eines ECM
U_{SEI}	V	Durch die SEI hervorgerufener Anteil der elektrischen Spannung einer LIB
U_{Zelle}	V	Aus den einzelnen Anteilen zusammengefasste Gesamtspannung einer LIB
$\Delta U_{\text{Zelle}, \Omega}$	V	Durch Stromfluss hervorgerufene Spannungsänderung einer LIB
U_{Ω}	V	Ohm'scher Anteil der elektrischen Spannung einer LIB
$\frac{\partial U_{OCV}}{\partial T_{\text{Zelle}}}$	$\frac{mV}{K}$	Entropiekoeffizient
UA	$\frac{W}{K}$	Empirisch bestimmte Ersatzgröße zusammengefasst aus Wärmeübergangs-/durchgangskoeffizient und Oberfläche der wärmeübertragenden Fläche
\dot{V}	$\frac{m^3}{s}$	Volumenstrom
w	$\frac{m}{s}$	Strömungsgeschwindigkeit eines Fluids
ζ	–	Faktor für die Skalierung von ECM Parametern auf andere Zellgrößen

1 Einleitung

Nachdem das Bedürfnis nach Mobilität über Jahrzehnte als selbstverständlich erachtet wurde, wird dies durch das wachsende Klimabewusstsein zunehmend infrage gestellt. Urlaubs- und Dienstreisen werden nicht mehr nur anhand des Preises, sondern zusätzlich mit dem Kriterium des ökologischen Fußabdrucks ausgewählt [1], und auch der Verkehr als Verursacher von ca. 20 % der gesamten Treibhausgas-Emissionen in Deutschland [2] rückt stärker in den Fokus. Hierbei sieht sich der Personenkraftwagen (Pkw) angesichts verstopfter Städte und hoher Kohlendioxid (CO₂)- und Feinstaubbelastung immer stärkeren politischem und gesellschaftlichem Druck ausgesetzt [3, 4]. Aufgrund der daraus resultierenden Verschärfungen der Verbrauchs- und Abgasnormen [5] und dem Wunsch nach nachhaltiger Fortbewegung [6, S. 38-40] gewinnt die Elektromobilität zunehmend an Bedeutung. Für eine Beschleunigung der Etablierung ist jedoch noch eine deutliche Steigerung der Kundenakzeptanz erforderlich [7, S. 23].

Betrachtet man jedoch die Vorteile batterieelektrischer Fahrzeuge (BEV), darunter die lokale – und beim Laden mit regenerativen Energiequellen globale – Emissionsneutralität [8, S. 18-19], die sofortige Bereitstellung des Antriebsmoments und die geringe Geräuschbelastung [8, S. 17-18], verwundert diese Diskrepanz zwischen Wunsch und tatsächlicher Kundenakzeptanz zunächst. Bis BEV einen ähnlichen Komfort bieten und bei allen Kundenschichten auf die gleiche Akzeptanz stoßen können wie konventionell angetriebene Fahrzeuge, gilt es, noch einige Herausforderungen zu meistern.

1.1 Aktuelle Herausforderungen der Elektromobilität

Werden potenzielle Kunden über die Gründe ihres Zögerns beim Kauf eines BEV befragt, finden zwei Punkte besondere Erwähnung: Der hohe Anschaffungspreis und die begrenzte Reichweite [9, S. 464-465]. Der erste Kritikpunkt lässt sich direkt auf die verwendeten Lithium-Ionen Zellen (LIB) zurückführen, die aktuell etwa 35 % bis 50 % der Gesamtkosten eines BEV verursachen [10, S. 47]. Der zweite Kritikpunkt hingegen verdeutlicht ein grundsätzliches Dilemma. Dem Wunsch nach höherer Reichweite steht eine notwendige Vergrößerung der Batterie entgegen, was letztlich die Gesamtkosten des Fahrzeugs weiter steigen lässt. Zusätzlich ist der Bauraum, der im Fahrzeug für die Batterie zur Verfügung gestellt werden kann und deren Gewicht begrenzt. Über die Batteriegöße allein ist die Reichweitenproblematik daher nicht vollständig lösbar, zumal dies angesichts des hohen Rohstoffbedarfs dem Nachhaltigkeitsgedanken widerspricht. Auch der Nutzen bliebe fraglich, weil in Abhängigkeit der Entfernung des Fahrtzieles andere Mobilitätskonzepte sinnvoller sein können: So fuhr ein deutscher Pkw im Jahr 2018 im Schnitt 38 km pro Tag [11, S. 8], was bereits durch BEV der ersten Generation problemlos abdeckbar ist. Für die wenigen längeren Fahrten, die statistisch eine Ausnahme darstellen, erscheint eine pauschale Erhöhung der Reichweite aller BEV daher nicht gerechtfertigt.

Aktuell ist jedoch ein Großteil der Kunden nicht bereit, die geringere Reichweite von Elektrofahrzeugen in Kauf zu nehmen [9, S. 465]. Daher beschreiten viele Automobilhersteller (OEM) den Weg der Nachbildung des gewohnten Reichweitenverhaltens und sehen damit ein groß dimensioniertes Batteriesystem vor. Neben den bereits erwähnten hohen Kosten erschwert dies die Überwachung des Systems, weil in der Regel eine höhere Anzahl von Einzelzellen verbaut wird. Das steigende Gewicht steigert gleichzeitig die thermische Masse, wodurch sich der Aufwand erhöht, das System auf einem gleichmäßigen Temperaturniveau zu halten. Eine weitere Möglichkeit bietet die Vergrößerung der nutzbaren Kapazität durch eine Verkleinerung der Sicherheitsreserven bei den Betriebsgrenzen der LIB oder die Verwendung neuer Zelltechnologien. Hierdurch ändert sich jedoch das Langzeitverhalten der Zellen, und die Gefahr einer unzulässig starken Alterung im Betrieb steigt. Wird dieses Risiko in Kauf genommen und unterschätzt, werden unter Umständen Nachbesserungen nötig, wie im Falle des Tesla Model S85, dessen Batteriepacks nach einem möglicherweise durch Überlastung ausgelösten Brand softwareseitig stark limitiert wurden [12]. Oder aber es entstehen für den Hersteller teure Garantiefälle, wie im Falle des Nissan Leaf, dessen Batterien durch unzureichendes Thermomanagement teils unerwartet schnell alterten [13, S 119-122].

Eine weitere Möglichkeit für die Lösung des Reichweitenproblems besteht in der Verringerung der Ladezeit. Erfordert der Ladevorgang ähnlich wenig Zeit wie der Tankstopp eines konventionellen Pkw, wird der Kunde dies nicht als Nachteil ansehen und ein entscheidendes Manko des BEV wäre beseitigt [7, S. 24, 14]. Zur Erreichung der gleichen „Reichweite pro Minute“ des Ladens verglichen mit einem Tankvorgang ist eine Leistung von über 400 kW erforderlich [15]. Trotz Maßnahmen wie der Erhöhung der Nennspannung des Batteriesystems auf 800 V [16] – mit den Nachteilen des höheren Isolationsaufwandes und einer schlechteren elektromagnetischen Verträglichkeit [16] – ist die Belastung der Batterie durch den Schnellladevorgang beträchtlich und übersteigt die des Fahrens bei Weitem. Schnellladen erfordert daher passend ausgelegte Batteriesysteme, sowohl hinsichtlich der verwendeten Zellen als auch deren Kühlung [14].

Nicht direkt erkennbar sind die Vorgänge im Inneren der Batterie, die Einfluss auf Lebensdauer, Reichweite und verfügbare Leistung (SOP) ausüben. LIB reagieren empfindlich auf hohe und niedrige Temperaturen und der SOP muss reduziert werden, sobald der ideale Temperaturbereich verlassen wird, um Schäden und vorzeitige Alterung zu vermeiden. Für die Kunden äußert sich dieses *Derating* durch ein verringertes Beschleunigungsvermögen sowie eine eingeschränkte Maximalgeschwindigkeit und Ladeleistung. Die Probleme verstärken sich bei hohen oder niedrigen Umgebungstemperaturen und damit in Betriebsbedingungen, in denen zusätzlich ein erhöhter Leistungsbedarf für die Komfortfunktion der Innenraumklimatisierung herrscht [17]. Da im BEV nur wenig überschüssige thermische und mechanische Leistung vorhanden ist, hat dieser Klimatisierungs- und damit konkurrierende Leistungsbedarf einen hohen und unmittelbaren Einfluss auf die Fahrzeugreichweite; in Extremsituationen betragen die Einbußen bis zu 50 % [17]. Soll ein BEV als Erstfahrzeug alle Jahreszeiten abdecken, stellt sich daher die Frage, inwieweit diese Einschränkungen für den Kunden noch akzeptabel sind.

Der thermische Betriebszustand des Batteriesystems nimmt folglich direkten Einfluss auf das kundenrelevante Fahrzeugverhalten und die Lebensdauer eines BEV, weshalb der thermischen Auslegung ein hoher Stellenwert während des Entwicklungsprozesses eingeräumt werden muss. Hierfür ist es erforderlich, die Zusammenhänge zwischen den elektrischen und thermischen Effekten innerhalb des Batteriepacks sowie die Interaktion mit dem Gesamtfahrzeug zu berücksichtigen, um eine ganzheitliche Auslegung ohne Unter- oder Überdimensionierung sicherzustellen. Liegt dieses Verständnis vor, kann das Betriebsverhalten der Batterie und des gesamten Antriebsstrangs eines Fahrzeugs vor dem Hintergrund verschiedenen Anfor-

derungen überprüft und zielgerichtet ausgelegt werden. Aus diesem Grund wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein neuartiger Auslegungsprozess des thermischen Verhaltens von Batteriesystemen in Elektrofahrzeugen unter extremen Betriebsbedingungen entwickelt und exemplarisch angewendet.

1.2 Aufbau der Arbeit

Wie im vorigen Abschnitt diskutiert, wird im Rahmen dieser Arbeit ein Vorgehen zur optimalen thermischen Auslegung und Fahrzeugintegration von Batteriesystemen entwickelt. Als Anwendungsfall dient allein das BEV, die Besonderheiten der Hybridelektrofahrzeuge (HEV) und Plug-in-Hybridelektrofahrzeuge (PHEV) werden nicht betrachtet. In diesem Abschnitt wird der Aufbau der Arbeit vorgestellt und in Abbildung 1.1 visualisiert. Teile der Arbeit wurden bereits auf internationalen Konferenzen [18, 19, 20, 21] und Zeitschriften [22] vorveröffentlicht. Eine umfassende Vorstellung und Diskussion der Inhalte der Vorveröffentlichungen erfolgt in den jeweiligen Fachkapiteln. Der kapitelweise Aufbau der Arbeit wird im Folgenden erläutert.

Zur Herleitung der Anforderungen an den Entwicklungsprozess werden in Kapitel 2 zunächst die theoretischen Grundlagen der Lithium-Ionen Technologie und die zusätzlichen Effekte, die sich bei der Verschaltung von LIB zu einem Batteriesystem und dessen Fahrzeugintegration ergeben, erläutert. In diesem Rahmen werden mögliche Auslegungsziele sowie relevante Einflussgrößen und Stellhebel zur sicheren Erfüllung der Leistungsanforderungen und der geforderten Lebensdauer diskutiert. Darauf aufbauend wird in Kapitel 3 der Stand der Technik der Systemauslegung für Batteriesysteme vorgestellt. Im Rahmen einer Diskussion dieser Ansätze wird die bestehende Forschungslücke identifiziert und daraus Problemstellung und Vorgehen der Arbeit abgeleitet. Die anschließende Einordnung in den Entwicklungsprozess elektrischer Antriebsstränge erlaubt eine Identifizierung der Ziele der Arbeit.

Im nächsten Schritt werden die einzelnen Auslegungsstufen der Arbeit entwickelt. Hierbei erfolgt ein schrittweiser Aufbau von der elektrischen (Kapitel 4) über die thermische Auslegung des Batteriesystems (Kapitel 5) bis zur Integration des Batteriesystems in das Thermomanagement des Gesamtfahrzeugs (Kapitel 6). Jedes Kapitel beinhaltet eine Diskussion der theoretischen Grundlagen und der relevanten Effekte innerhalb der jeweiligen Systemebene. Die Auslegung wird an mehreren Stellen durch Simulationen unterstützt. Zu diesem Zweck erfolgt in jedem Kapitel eine Herleitung, Beschreibung der Implementierung und Validierung des jeweiligen Modells. Anhand dieser Ergebnisse werden zum Abschluss der Kapitel Möglichkeiten zur Auswahl und Bewertung von Konzeptvorschlägen aus dem jeweiligen Entwicklungsschritt aufgezeigt und diese hinsichtlich Erfüllung der eingangs definierten Anforderungen bewertet.

Der vollständige Entwicklungsprozess wird in Kapitel 7 exemplarisch durchlaufen. Hierfür werden zunächst Anforderungen unterschiedlicher Fahrzeugklassen, Fahr- und Ladeleistungen und Umweltbedingungen definiert. Anschließend werden anhand dieser Ausgangssituationen Batteriekonzepte ausgelegt und diskutiert. Dabei wird auf die Einflüsse unterschiedlicher Auslegungsziele auf die einzelnen Systemebenen eingegangen, relevante Wechselwirkungen zwischen den Systemebenen aufgezeigt und daraus allgemeine Auslegungsempfehlungen abgeleitet. Zusätzlich wird betrachtet, inwieweit die Ergebnisse den Erwartungen und Erfahrungen aus realen Batteriesystemen entsprechen und etwaige Unterschiede untersucht.

In der abschließenden Diskussion in Kapitel 8 wird der entwickelte Ansatz und die daraus hervorgegangenen Auslegungsempfehlungen nochmals umfassend kritisch bewertet, um mögliche

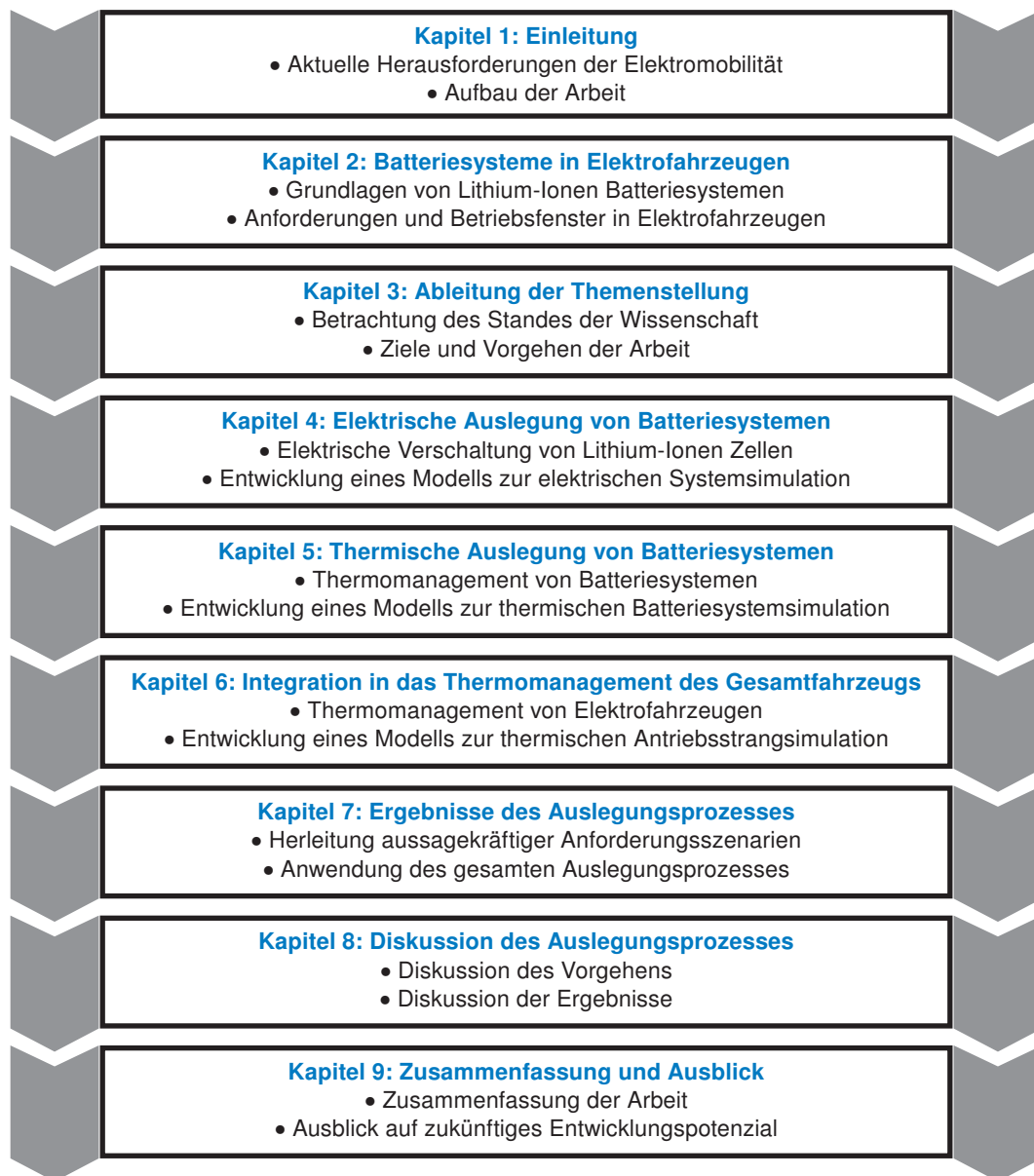


Abbildung 1.1: Aufbau der Arbeit

Schwächen und weiteres Entwicklungspotential aufzuzeigen. Eine Zusammenfassung der Arbeit und ihrer Ergebnisse erfolgt in Kapitel 9.

2 Batteriesysteme in Elektrofahrzeugen

Bevor mit der eigentlichen Entwicklung des Auslegungsprozesses begonnen wird, sollen zunächst die Motivation und die erwarteten Herausforderungen dieser Arbeit diskutiert werden. Als teuerster [23] und sicherheitskritischer [24] Komponente des elektrischen Antriebsstrangs kommt der Auslegung der Traktionsbatterie besonderer Stellenwert zu. In BEV stellen Traktionsbatterien auf Basis der Lithium-Ionen Technologie aufgrund ihrer hohen Energie- und Leistungsdichte aktuell [25, S. 428] und auch mittel- bis langfristig die Referenztechnologie dar [26, 27], weshalb sich diese Arbeit ausschließlich auf diese Technologie beschränkt. In diesem Kapitel werden zunächst die Grundlagen von LIB, deren Typen und Bauformen vorgestellt. Anschließend werden die Anforderungen und besonderen Einflüsse im Kontext der Fahrzeuganwendung betrachtet und anhand der im Betrieb relevanten Zustandsgrößen und der Möglichkeit ihrer Überwachung die zulässigen Betriebsfenster abgeleitet.

2.1 Grundlagen der Lithium-Ionen Technologie

Als elektrochemische Zellen folgen LIB einem schichtweisen Aufbau aus Anode, Kathode mit dazwischenliegendem Separator und einem ionenleitfähigen Elektrolyten [28, S. 14]. Die für Anode und Kathode verwendeten Aktivmaterialien definieren die Chemie und damit auch die Eigenschaften der Zelle [29]. Auf den detaillierten Zellaufbau und die elektrochemischen Vorgänge im Inneren soll an dieser Stelle aufgrund der gesetzten Schwerpunkte der Arbeit nicht weiter eingegangen und das elektrisch/thermische Verhalten in den Vordergrund gestellt werden. Dieses wird anhand eines, in Abbildung 2.1 dargestellten, exemplarischen Entladevorgangs näher erläutert.

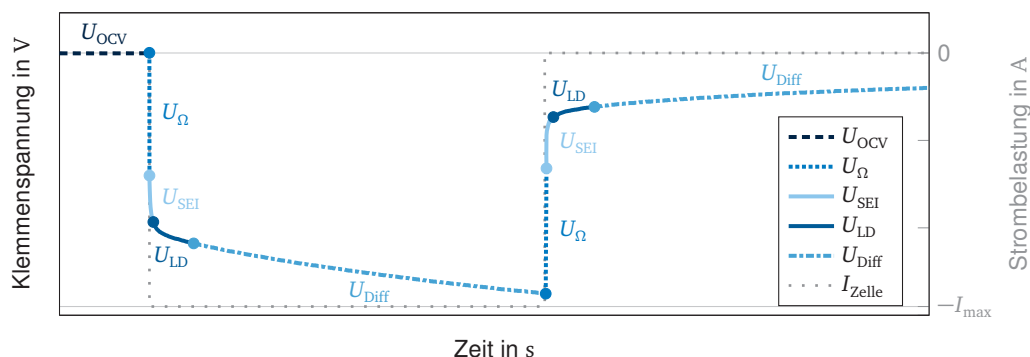


Abbildung 2.1: Dynamische Spannungsantwort einer Lithium-Ionen Zelle (nach [30])

Abhängig von ihrem Ladungszustand (SOC) besitzen LIB eine charakteristische Ruhespannung (OCV), die nach hinreichend langer Wartezeit – in der Regel einige Stunden, bis hin zu Tagen im unteren SOC-Bereich – ohne Stromfluss erreicht wird [31]. Werden LIB mit einem negativen Strom I_{Zelle} belastet, kommt es zu einem annähernd unmittelbaren, nur durch die

Induktivität der LIB limitierten, zur Belastung direkt proportionalen Spannungseinbruch U_{Ω} [32]. Dieser wird durch den ohm'schen Innenwiderstand der Zelle hervorgerufen. Im weiteren Verlauf der Belastung sinkt die Zellspannung durch Einflüsse der Passivierungsschicht (SEI) (U_{SEI}), Ladungsdurchtritt und Doppelschichtkapazität (U_{LD}) sowie Diffusionseffekte (U_{Diff}) mit abnehmender Geschwindigkeit weiter ab [32]. Nach Wegnahme der Belastung werden diese Vorgänge in gleicher Reihenfolge mit entgegengesetztem Vorzeichen durchlaufen, bis die Zellspannung wieder der OCV, unter Berücksichtigung des durch die Entladung geänderten SOC, entspricht. Zusätzlich tritt eine, von der Belastungsrichtung abhängige, Hysteresespannung auf, die die OCV überlagert, nach langer Zeit allerdings ebenfalls abklingt [33]. Diese Beschreibung gilt analog auch für den Fall des Ladens der LIB.

Das dynamische Verhalten einer LIB ist abhängig von ihrem Betriebszustand. Zur Vorhersage des Verhaltens einer Zelle sind daher mindestens Kenntnisse über ihren SOC, die Stromstärke, die Temperatur und den Alterungszustand (SOH) notwendig [34]. Eine detaillierte Betrachtung der Einflüsse auf den Innenwiderstand der Zellen wurde vorab in [30] vorgenommen. Bereits ohne den Alterungseinfluss ändert sich das dynamische Verhalten durch SOC- und Temperaturänderungen laufend während des Betriebs. Zusätzlich sind LIB durch ihren komplexen Herstellungsprozess Produktionsschwankungen unterworfen, die zu zusätzlichen Variationen des dynamischen Verhaltens führen [35]. Durch den ohm'schen Anteil des Spannungsabfalls setzen LIB während ihres Betriebs Verlustleistung frei. Dies wird als *irreversible* oder *joul'sche Wärmeleistung* bezeichnet [36, S. 13, 14]. Zusätzlich kommt es durch chemische Vorgänge in den Aktivmaterialien und dem Elektrolyten zu weiteren thermischen Effekten. Diese sind je nach Stromrichtung entweder exo- oder endotherm, weshalb dieser Aspekt des thermischen Verhaltens als *reversible Wärmeleistung* bezeichnet wird [36, S. 13, 15].

Bei der Alterung, oder *Degradation*, von LIB handelt es sich um eine komplexe Mischung mehrerer Mechanismen, die an unterschiedlichen Stellen innerhalb der Zelle angreifen und ihre elektrochemischen Eigenschaften verschlechtern [28, S. 17]. Eine detaillierte Diskussion der unterschiedlichen Degradationsprozesse erfolgt im Rahmen dieser Arbeit nicht; die Zusammenfassung der entscheidenden Effekte wurde in [37] veröffentlicht. Grundsätzlich wird zwischen kalendarischer und zyklischer Alterung unterschieden [38]. Erstere läuft unabhängig von der Strombelastung der Zelle ab, wird jedoch durch ungünstige Lagerungsbedingungen wie hohe Temperaturen oder SOC Werte nahe der zulässigen Grenzen begünstigt [38]. Letztere wird direkt durch die Belastung der Zelle beeinflusst [38]. Abhängig von der Ausprägung unterschiedlicher Betriebsparameter und der Kombination der *Stressfaktoren* wird die Stärke der Alterung beeinflusst [38]. Im Umkehrschluss kann durch eine geeignete Auslegung des Batteriesystems der Betrieb der LIB in Zonen besonders starker Alterung vermieden und die Lebensdauer gesteigert werden. Im Betrieb zeigt sich die Alterung vorrangig durch eine Zunahme des Innenwiderstands und Abnahme der nutzbaren Kapazität [39]. Im Fahrzeugkontext bedeutet dies eine Reduzierung der möglichen Maximalleistung, des SOP, sowie der Effizienz und Reichweite. Dies wird mittels des SOH in einen Zahlenwert überführt [40, S. 360-361]. Bei Unterschreitung eines vorher definierten SOH wird ein Batteriepack als nicht mehr geeignet für seinen Einsatzzweck erachtet; das Ende der Lebensdauer (EOL) ist erreicht [40, S. 361].

Neben den fortlaufenden, unvermeidlichen Degradationsprozessen können bei Verlassen des zulässigen Betriebsbereichs von LIB auch unmittelbare und zerstörende Zersetzungsreaktionen innerhalb der Zellen auftreten. Beispiele hierfür sind die Tiefentladung und Überladung, sowie die thermische Zersetzung bis hin zum Thermal Runaway [41]. Da es sich bei diesen Ereignissen um Fehlerfälle handelt, die bei geeigneter Auslegung und unbeschädigten Zellen keinesfalls auftreten, werden sie im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

2.2 Typen und Formate von Lithium-Ionen-Batterien

Unter dem Oberbegriff LIB wird eine Vielzahl von Ausprägungen dieser Technologie zusammengefasst. Ein Unterscheidungskriterium ist die im letzten Abschnitt bereits erwähnte Zellchemie. Je nach Zellchemie ergeben sich unterschiedliche Eigenschaften des elektrisch/thermischen Verhaltens, der Energiedichte, der Belastbarkeit und des Alterungsverhaltens der Zelle [29]. Fokus dieser Arbeit ist die grundsätzliche Systemauslegung. Daher tritt die Zellchemie einer LIB in den Hintergrund und es erfolgt keine weitere Diskussion der individuellen Eigenschaften und Besonderheiten. Relevanter für diese Arbeit sind die unterschiedlichen Zelltypen, die in Abbildung 2.2 visualisiert werden.

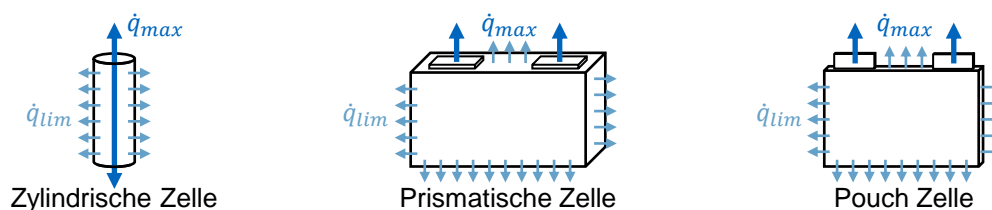


Abbildung 2.2: Gängige Bauformen von Lithium-Ionen-Zellen und ihre Pfade maximaler und limitierter Wärmeabgabe \dot{q}_{max} und \dot{q}_{lim}

Je nach Zelltyp und der damit verbundenen äußeren Form ergibt sich ein abweichender innerer Aufbau und daher auch unterschiedliche thermische Eigenschaften [42, S. 231]. Der schichtweise Aufbau aus Anode, Kathode und Separator leitet Wärme besonders gut parallel zu den Schichten, senkrecht zu den Schichten ist die Wärmeleitung deutlich schlechter [43]. Die sich daraus ergebenden Pfade maximaler Wärmeleitung sind ebenfalls in Abbildung 2.2 eingezeichnet. Bei *zylindrischen Zellen* wird eine Lage des Schichtaufbaus aufgewickelt und in die Zelle eingebracht. Man spricht vom Zellwickel, der Wärme besonders gut in axialer Richtung leitet. In radialer Richtung zeigt die Zelle nur geringe Wärmeleitung, weshalb die Kühlung als schwierig einzuschätzen ist [44, S. 12]. Bei *prismatischen Zellen* wird ebenfalls ein Zellwickel verwendet, der jedoch, um der Bauform Rechnung zu tragen, flach ausgeführt ist. Die schlechte Wärmeleitfähigkeit zu den Seitenflächen wird zum Teil durch die großen Querschnitte und kurzen Wege der Wärmeleitung ausgeglichen [44, S. 12]. *Pouch-Zellen* besitzen in der Regel keinen Zellwickel, stattdessen werden mehrere Elektroden-Separator-Schichten übereinandergestapelt. Durch die überstehende Schweißnaht der Kunststoffolie, die das Aktivmaterial umgibt, leitet dieser Zelltyp theoretisch ausschließlich über die Ableiter besonders gut Wärme, die in der Regel flache Bauweise mit großer Oberfläche bietet in der Realität jedoch trotzdem von allen Zelltypen die besten thermischen Eigenschaften [44, S. 13]. Neben den thermischen Eigenschaften besitzen die verschiedenen Bauformen auch unterschiedliche mechanische Eigenschaften und Anforderungen an die elektrische Kontaktierung. Weil der Fokus dieser Arbeit jedoch auf der thermischen Auslegung liegt, werden diese nicht weiter behandelt.

Als letztes Unterscheidungskriterium wird im Kontext dieser Arbeit die Zellgröße verwendet. Diese nimmt zum einen Einfluss auf die zur Erreichung der gewünschten Systemkapazität notwendige Anzahl an parallel verschalteten Zellen und beeinflusst zum anderen auch die thermischen Eigenschaften. Je nach thermischer Anbindung verlängern sich bei größeren LIB die Wege, die ein Wärmestrom bis zum Gehäuse zurücklegen muss. Dies vergrößert den Temperaturgradienten im Inneren [45] und kann zusätzlich zu beschleunigter Alterung durch ungleiche Stromverteilung über das Aktivmaterial der Zelle führen [46].

2.3 Anforderungen und Leistungsprofile

Für den Großteil der Käufer eines BEV sind die Details der technischen Umsetzung des Antriebsstrangs wohl irrelevant, solange ihre Erwartungen an das Fahrzeug erfüllt werden [47, S. 146-149]. Die Kundenanforderungen Beschleunigung, Höchstgeschwindigkeit und Ladezeit lassen sich direkt in eine Leistungsanforderung an den Antriebsstrang überführen. Komfortbedürfnisse, wie die Innenraumklimatisierung, werden vom thermischen Verhalten des Antriebsstrangs bedingt und lassen sich folglich ebenfalls über technische Kriterien formulieren. Die für diese Arbeit relevanten Kundenanforderungen und ihre technischen Entsprechungen sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Tabelle 2.1: Kundenanforderungen an Elektrofahrzeuge und technische Entsprechung

Kundenanforderung	Technische Entsprechung
Reichweite	Kapazität, Effizienz
Beschleunigung/Höchstgeschwindigkeit	Spitzen-/Dauerleistung
Ladezeit/-leistung	Spitzen-/Dauerleistung
Innenraumtemperatur	Klimatisierungsleistung/verfügbare Abwärme
Lebensdauer/Reichweitendegradation	Batteriebelastung, Alterungsverhalten
Fahrzeugklasse	Batterieabmessungen/-gewicht

Im Hinblick auf die Batterie steht, neben der vollständigen Vermeidung kritischer Betriebszustände, vor allem das langfristige Alterungsverhalten im Vordergrund. Die Belastungen, die sich aus den Kundenanforderungen ergeben, müssen den Fähigkeiten der verwendeten Zellen und der gewählten Systemauslegung gegenübergestellt werden. Ist die Belastung und dadurch Alterung der Batterie zu hoch, muss die Dimensionierung entsprechend angepasst werden, um die Stressfaktoren auf Zellebene zu reduzieren. Von Relevanz ist einerseits die Höhe und Einwirkdauer der Stressfaktoren [38], andererseits hat auch deren Kombination großen Einfluss auf das Alterungsverhalten [48]. So kann bei niedrigen Temperaturen und hohem SOC bereits bei verhältnismäßig geringer Ladeleistung der Schadensmechanismus Lithium-Plating auftreten und die Batterie nachhaltig schädigen [49]. Es ist folglich essenziell, das vollständige elektrische und thermische Verhalten im späteren Fahrzeugeinsatz abzuschätzen, um das Auftreten kritischer und besonders alterungsrelevanter Betriebszustände vollumfänglich bewerten und nach Bedarf Gegenmaßnahmen treffen zu können.

Neben dem Verhalten der Zelle an sich, sind auch die zusätzlichen Effekte innerhalb des Batteriepacks zu betrachten. Aufgrund der Parameterschwankungen zwischen den Zellen und inhomogenem Temperaturverhalten wird potenziell jede Zelle anders belastet [50] und dadurch auch unterschiedlich altern. Es ist folglich nicht ausreichend, die Auslegung des Batteriesystems ausschließlich über die Einzelzelle durchzuführen, weil innerhalb des Batteriesystems und über die Lebensdauer Quellen zusätzlicher Belastung – beispielsweise durch zusätzliche Ströme innerhalb der Parallelschaltung – zu erwarten sind.

Im Blick auf das Fahrzeug ergeben sich weitere Anforderungen an das Batteriesystem. Einerseits gilt es, gesetzliche Grundlagen und Anforderungen durch Produktion und Wartung zu erfüllen, was aber nicht Teil dieser Arbeit ist. Wichtiger ist an dieser Stelle die Erfüllung der Fahr-, Lade- und Reichweitenanforderungen, auch vor dem Hintergrund weiterer großer Nebenverbraucher wie der Fahrzeugklimatisierung. Hierdurch entsteht eine signifikante Zusatzbelastung in der Größenordnung mehrerer Kilowatt [51, S. 93-94]. Deren Einfluss auf Reichweite, verfügbare Antriebsleistung und Batteriealterung ist daher nicht zu vernachlässigen. Aus konstruktiver Sicht

bestimmt das Gesamtfahrzeug auch den Bauraum und die Form des Batteriesystems sowie seine elektrischen Randbedingungen und die thermische Anbindung des Batteriepacks.

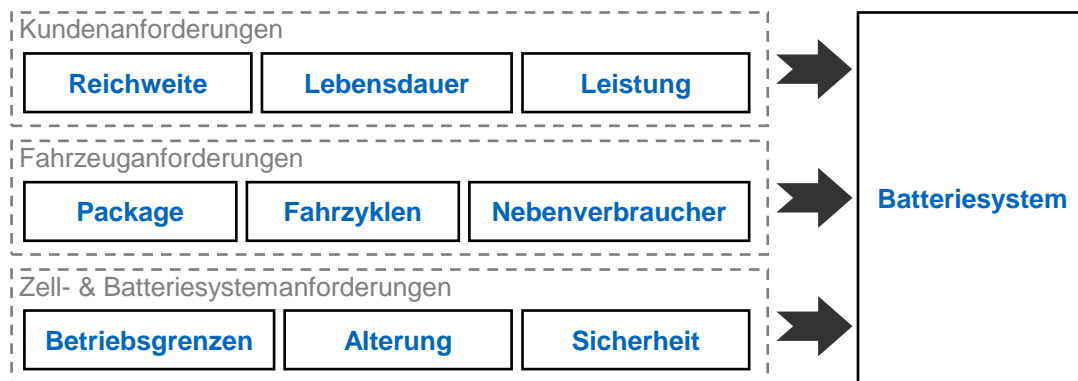


Abbildung 2.3: Quellen der Anforderungen an Batteriesysteme

Die Anforderungen an das Batteriesystem setzen sich somit aus einer Mischung unterschiedlicher Bedürfnisse des Kunden, der LIB, bzw. des Batteriesystems und des Gesamtfahrzeugs zusammen. Diese unterschiedlichen Quellen der Anforderungen sind in Abbildung 2.3 visualisiert. Mindestens eine dieser drei Anforderungsarten stellt immer einen Zielkonflikt dar, auf den das Konzept angepasst werden muss. Daher werden in dieser Arbeit alle Anforderungen in technische und physikalische Systemparameter sowie Geschwindigkeits- oder Leistungsanforderungen überführt. Die Fahrplananforderungen werden über repräsentative Fahrzyklen abgebildet, die gemeinsam mit der Längsdynamik des Gesamtfahrzeugs, den Nebenverbrauchern und Ladevorgängen eine Strombelastung ergeben. Die Umgebungstemperaturen, die Strombelastung und die thermische Auslegung des Batteriesystems, das zusätzlich die Packageanforderungen des Gesamtfahrzeugs erfüllen muss, bedingen die Zelltemperaturen. In Abhängigkeit der verwendeten LIB kann so eine detaillierte Aussage über deren Belastung getroffen werden.

2.4 Einflüsse von Umwelt, Fahrer und Fahrzeug

Mit der Umgebungstemperatur, der Innenraumklimatisierung und der thermischen Auslegung des Antriebsstrangs wurden bereits Einflussgrößen auf das Batteriesystem genannt, die sich nicht unmittelbar aus den reinen Leistungsanforderungen ergeben. Trotzdem haben diese Größen entscheidenden Einfluss auf die Systemauslegung [52] und werden daher an dieser Stelle diskutiert.

Die Umgebungstemperatur wirkt auf zweierlei Weisen. Ohne aktive Temperaturregulierung gleicht sich ein Fahrzeug und dessen Komponenten mit der Zeit der Umgebungstemperatur an. Zusätzlicher Energieeintrag kann sich durch Sonneneinstrahlung und sonstige Wärmestrahlung, beispielsweise über den Asphalt, ergeben. Bei niedrigen Temperaturen hat dies positive Auswirkungen, weil ein starkes Auskühlen des Fahrzeugs verhindert wird, bei hohen Temperaturen wird das Aufheizen jedoch zusätzlich verstärkt. Bei extremen Umgebungstemperaturen gerät das Batteriesystem tendenziell schneller an die Grenzen seines erlaubten Betriebsbereichs. Um übermäßige Alterung oder gar Schäden zu vermeiden, muss die verfügbare Leistung daher stark reduziert werden [53, S. 167-168]. Um diese Leistungsreduktionen möglichst zu verhindern, wird häufig ein aktives Thermomanagement vorgesehen [54]. Einerseits werden durch die Temperaturregulierung Betriebsbedingungen hergestellt, in denen die Batterie ihre volle Leistung erbringen kann, andererseits muss hierfür Klimatisierungsleistung erbracht werden,

die sich negativ auf die Reichweite auswirkt [55, S. 74, 56, S. 13-15]. Einbau, Leistungsfähigkeit und Effizienz eines Batteriethermomanagementsystems (BTMS) haben folglich signifikanten Einfluss auf das Fahrzeugverhalten, weil sowohl die Möglichkeit als auch die Geschwindigkeit, die Batterie in thermisch günstige Betriebsbereiche zu bringen, beeinflusst werden.

Der zweite Pfad der Einflussnahme der Umgebungstemperatur ergibt sich durch das Komfortbedürfnis des Fahrers über die Klimatisierung des Fahrzeuginnenraums. Der zusätzliche Leistungsbedarf durch die Klimatisierung kann dabei in Extremfällen wie massiver Kurzstreckenfahrt bis zu 50 % im Heiz- und 30 % im Kühlfall des gesamten Energieverbrauchs betragen [17]. Weil die Batterie einen ähnlichen bevorzugten Temperaturbereich wie der Mensch besitzt [13, S. 130], treten die Leistungsbedarfe zur Batterie- und Innenraumklimatisierung tendenziell zum gleichen Zeitpunkt auf, wodurch sich die durch die ungünstigen Betriebsbedingungen der Batterie ohnehin schon limitierte Antriebsleistung noch weiter reduziert. Zusätzlich genügt im Vergleich zum verbrennungsmotorischen Fahrzeug beim BEV weder die Menge noch das Temperaturniveau der Abwärme des Antriebsstrangs zur Deckung des Heizbedarfs des Innenraums [57]. Daher muss, neben der Energie zur Kühlung, auch die zum Heizen aus der Batterie entnommen werden, sofern auf Vorkonditionierung [57] und fossil betriebene Zuheizter [58, S. 39] verzichtet wird.

Weitere Einflüsse ergeben sich durch zusätzliche Wärmequellen im Batteriesystem, wie Überwachungselektronik, Sicherungen und Kontaktstellen [59, S. 103-110], die zu lokal erhöhten Temperaturen führen. Im Rahmen dieser Arbeit soll der Fokus jedoch auf das Fahrzeugthermomanagementsystem (VTMS) gelegt werden, durch welches das BTMS mit der Umgebungstemperatur in Kontakt gebracht wird. Zusätzlich kann, sofern das VTMS einen Kältemittelkreislauf beinhaltet, die Batterietemperatur unter die Umgebungstemperatur abgesenkt werden, was einerseits eine hohe Flexibilität gegenüber der Außentemperatur erzeugt, andererseits jedoch deutlichen Mehraufwand bedeutet. Darüber hinaus können durch das VTMS thermische Kopplungen zwischen den Antriebsstrangkomponenten und der Batterie hergestellt werden [55, S. 90], wodurch die Batterietemperatur beeinflusst und das VTMS daher zur Bewertung der Batteriebelastung in Erwägung gezogen werden muss.

2.5 Betriebsgrößen und deren Überwachung

Um eine Beschädigung oder beschleunigte Alterung des Batteriesystems zu vermeiden, ist eine stetige Überwachung aller relevanten Betriebsgrößen notwendig [60, S. 177]. Ein Verlassen des zulässigen Betriebsbereichs muss sofort detektiert und geeignete Gegenmaßnahmen eingeleitet, oder in besonders kritischen Fällen eine Notabschaltung durchgeführt werden [60, S. 179]. Kritische Zustände können sowohl bei einzelnen Zellen als auch über Wechselwirkungen zwischen einzelnen LIB auf der Systemebene innerhalb des Batteriesystems auftreten. Dies macht die Erkennung und den Umgang mit kritischen Betriebszuständen herausfordernd, weil Effekte wie Ausgleichsströme in der Parallelschaltung – sofern überhaupt detektierbar – steuerungstechnisch nur schwer abzufangen sind. Die Überwachung des Batteriesystems während des Betriebs ist Aufgabe des Batteriemanagementsystems (BMS).

Der schematische Aufbau eines BMS und eine Übersicht seiner überwachten Größen sind in Abbildung 2.4 dargestellt. Direkt messbar sind lediglich Ströme, Spannungen und Temperaturen, alle weiteren relevanten Betriebsgrößen wie SOC und, sofern möglich, SOH müssen aus diesen Größen berechnet werden [61]. Abbildung 2.4 zeigt einige Limitationen: Der Strom wird in der

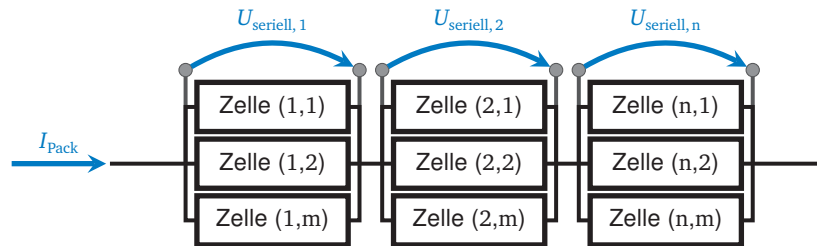


Abbildung 2.4: Überwachte elektrische Größen gängiger Batteriemanagementsysteme

Regel nur auf System-, maximal auf Modulebene gemessen [60, S. 179]. Eine Strommessung jeder einzelnen Zelle innerhalb der Parallelschaltung ist mit hohem Aufwand verbunden und wird daher nur unter Laborbedingungen realisiert [35, 62]. Sollte sich durch inhomogene Zellparameter eine ungleiche Stromverteilung bis hin zur Überlastung einzelner Zellen ergeben, ist dies im Betrieb nicht feststellbar. Ein ähnliches Bild ergibt sich bei den Spannungen, die für alle Zellen innerhalb einer Parallelschaltung gleich sind und daher keinen Rückschluss auf den SOC einzelner Zellen zulassen. Eine Über- oder Tiefentladung einzelner Zellen kann somit nicht direkt erkannt werden. Die Temperaturen können im Fahrzeugeinsatz nur an der Zelloberfläche gemessen werden. Bei großen Zellen besteht daher die Gefahr der Unter- oder Überschätzung der inneren Zelltemperatur und dadurch der Nichterkennung kritischer Betriebszustände [46]. Zusätzlich ist es in vielen Fällen zu aufwendig, die Temperatur jeder einzelnen LIB zu messen, weshalb nur Zellen an vermeintlichen *Hot Spots* mit Temperatursensorik ausgestattet werden. Diese Temperatursensoren müssen an den kältesten und wärmsten Stellen im Batteriepack angebracht werden, um eine zuverlässige Einschätzung des Systemzustands zu ermöglichen.

Aus der Betrachtung des letzten Abschnitts ergeben sich bereits mehrere Unsicherheiten bei der Messung der Betriebsgrößen des Batteriesystems. Diese sind in Tabelle 2.2 zusammengefasst. Die Unschärfe kann verringert werden, wenn, wie in Abbildung 2.5 gezeigt, auf eine Parallelschaltung von Zellen verzichtet, oder diese zumindest reduziert wird, also weniger Zellen zu einem Messwert zusammengefasst werden. Dadurch steigt der Überwachungsaufwand jedoch stark an [63, S. 96-98]. Weitere Unsicherheiten ergeben sich durch die Berechnung der sekundären Betriebsgrößen, selbst wenn hochgenaue Verfahren wie Kalman-Filter [64] oder die Einbeziehung mechanischer Größen vorgesehen werden [65]. Trotzdem muss das BMS den Zustand des Batteriesystems ausreichend genau einschätzen können, um plötzliche, unerwartete Leistungsreduzierungen zu vermeiden.

Tabelle 2.2: Grenzen der Messgrößenerfassung von Batteriemanagementsystemen

Messgröße	Systemebene der Messung
Spannung	Seriellschaltung
Strom	Batteriepack (bzw. Batteriemodul)
Temperatur	Zellaußentemperatur
SOC, SOH, SOP	Seriellschaltung, Genauigkeit Zustandsschätzalgorithmen

Die genannten Limitationen des BMS bedingen mehrere Implikationen für die Batteriesystemauslegung. Das Batteriesystem muss so gestaltet sein, dass entweder alle kritischen Größen überwachbar sind, oder Fehler bei nicht überwachbaren Größen in jeden Fall ausgeschlossen werden können. Ein Beispiel hierfür ist die nicht messbare Stromverteilung innerhalb der Parallelschaltung. Die Anforderungen an die Homogenität der Zellparameter und die Temperatur müssen hoch genug sein, um eine Überlastung durch inhomogene Stromverteilung zu vermeiden. Besonders im Hinblick auf die Temperatur gilt der Grundsatz, dass die Zonen maximaler

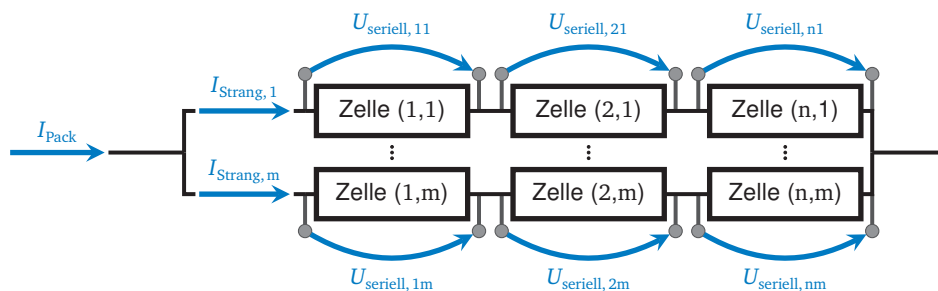


Abbildung 2.5: Verbesserung der elektrischen Überwachbarkeit durch Verzicht auf Parallelschaltung

und minimaler Temperaturen im Batteriepack bekannt und mit Temperatursensorik ausgestattet sein müssen. Da auch bei höchstem Messaufwand stets Unsicherheiten verbleiben, die durch die Zelldegradation noch verstärkt werden [64], können die theoretischen Betriebsgrenzen eines Batteriesystems nicht voll ausgereizt und Sicherheitsreserven müssen eingeplant werden [66]. Kann beispielsweise der SOC nur mit einer Genauigkeit von 5 % bestimmt werden, muss diese Unsicherheit an der oberen und unteren Ladungsgrenze als Reserve vorgehalten werden.

2.6 Ableitung zulässiger Betriebsfenster

Die Betriebsgrenzen eines Lithium-Ionen Batteriesystems lassen sich grundsätzlich auf das physikalisch-chemische Verhalten der in den LIB verwendeten Materialien zurückführen. Beim Überschreiten dieser Grenzen kommt es zur irreversiblen Schädigung der Zellen. Zusätzlich beschleunigt sich die Alterung, je häufiger und näher das System an den Grenzen betrieben wird [67]. Aus den Sicherheits- und Alterungsanforderungen und den in Unterkapitel 2.5 diskutierten Unsicherheiten der Zustandsbestimmung ergeben sich die im realen Betrieb tolerierbaren Betriebsfenster [68, S. 16-22]. Diese Untersuchung wurde in [21] vorveröffentlicht und wird an dieser Stelle zusammengefasst.

Die in LIB verwendeten Materialien sind nur unter bestimmten Bedingungen stabil. Beim Verlassen der sicheren Spannungs- und Temperaturbereiche kommt es zu schädlichen Reaktionen, die Anode, Kathode und Separator irreversibel beschädigen [14]. Hieraus ergeben sich die für den „Alltagsgebrauch“ als absolut zu betrachtenden Betriebsgrenzen, die dem Herstellerdatenblatt entnommen werden können. Im Folgenden werden die Betriebsfenster im realen Betrieb hinsichtlich Spannungsgrenzen, Strombelastung und Temperatur diskutiert. Die Spannungsgrenzen sind aufgrund der in Unterkapitel 2.1 erwähnten OCV-Abhängigkeit mit dem SOC der Zellen gleichzusetzen. Wird nicht der gesamte, theoretisch mögliche SOC-Bereich eingesetzt, so verringert sich gleichzeitig auch die nutzbare Kapazität C_A bei einer theoretischen Nennkapazität C_N der Zelle. Weil sich die Alterung an den Rändern des SOC-Bereichs beschleunigt, wirkt sich eine Reduzierung von C_A positiv auf das Alterungsverhalten der Zellen aus [69]. Trotz möglicher Ungenauigkeiten des BMS muss daher ein Kompromiss zwischen maximal nutzbarer Kapazität und Alterung gefunden werden. Zusätzlich muss an den Rändern des zulässigen SOC-Bereichs die Leistung des Batteriesystems reduziert werden [53, S. 166-167], um ein Verlassen des Betriebsfensters durch den Einfluss der dynamischen Spannungsanteile zu verhindern. Die Bestimmung der Einflüsse der nutzbaren Kapazität auf die Alterung im Kontext des Elektrofahrzeugs ist komplex, weil einerseits, anders als in vielen Studien, die Batteriealterung nicht über Vollzyklen erfolgt [70, S. 107-108], andererseits durch die geringe durchschnittliche tägliche Fahrleistung von Pkw [71] und die vorherrschende Angst vor dem Liegenbleiben

von BEV-Fahrern davon ausgegangen werden kann, dass die untere Spannungsgrenze nur selten voll ausgenutzt wird [72]. Die jeweils gewählten Betriebsgrenzen werden in Kapitel 7 vorgestellt. Für eine weitere Diskussion der Auswirkung der Spannungsgrenzen sei auf die Vorveröffentlichung [21] verwiesen.

Analog ist diese Betrachtung für den Zellstrom durchführbar. Bei gleicher Kühlung führt ein höherer Zellstrom durch höhere thermische Verlustleistung zu höheren Zelltemperaturen und damit zu beschleunigter Alterung. Zusätzlich muss die möglicherweise heterogene Stromverteilung in der Parallelschaltung betrachtet werden, durch die einzelne Zellen höher belastet werden und bereits ihre Stromgrenze überschreiten können, wenn die rechnerische Stromgrenze des Zellverbundes noch gar nicht erreicht ist. Zusätzlich müssen eventuelle Temperaturinhomogenitäten und die Alterung der Zellen, bis hin zu ihrem theoretischen EOL, miteinbezogen werden, die Auswirkungen auf die Kapazität und den Innenwiderstand der Zellen haben.

Im Rahmen dieser Betrachtung muss zwischen der Spitzen- und Dauerleistung des Batteriesystems unterschieden werden. Im Fahrbetrieb werden hohe Leistungen hauptsächlich zum Beschleunigen benötigt; sobald nach kurzer Zeit die Zielgeschwindigkeit erreicht ist, nimmt der Leistungsbedarf stark ab. Es ist folglich unnötig, den Antriebsstrang derart auszulegen, dass die zur Beschleunigung nötige Leistung dauerhaft bereitgestellt werden kann. Die Bestimmung der notwendigen Wärmeabfuhr aus dem Batteriesystem erfolgt anhand der erwarteten Maximalleistung und der Angabe, wie lange diese mindestens bereitgestellt werden muss, bis es zur Limitierung des Stromes durch eine zu hohe Systemtemperatur kommt. Anschließend reduziert sich der SOP des Batteriesystems auf die Dauerleistung. Folglich erfordert die Auslegung auf Spitzen- und Dauerleistung die Betrachtung unterschiedlicher Systemgrößen. Die Spitzenleistung stellt ihre Ansprüche hauptsächlich an die Stromfestigkeit der verwendeten LIB und die Homogenität der Stromverteilung innerhalb des Batteriesystems. Bei Dauerleistung hingegen tritt der Strom in den Hintergrund und die Leistungsfähigkeit des BTMS wird zur entscheidenden Größe. Einen signifikanten Einfluss auf diese Dauerleistung nimmt das Schnellladen, dessen Leistungen je nach Standard weit über denen des normalen Fahrbetriebs liegen und zusammen mit der starken Erwärmung der Zellen [73, S. 45] daher die höchste Belastung für das Batteriesystem darstellen [14]. Die Lade-Dauerleistung rückt dadurch in den Bereich der Spitzenleistung. Sollen diese Ladeleistungen dauerhaft gehalten werden können, muss das zulässige Betriebsfenster des Dauerstromes durch eine Verbesserung des Thermomanagements erhöht werden. Auch hier ist der Anstieg des Innenwiderstandes durch Alterung einzubeziehen, der die Verlustleistung bei gleichen Lastzyklen im Laufe des Fahrzeuglebens erhöht.

3 Ableitung der Themenstellung

Auf Basis der im letzten Kapitel vorgestellten Einflüsse der Batteriesystemauslegung und der daraus entstehenden Herausforderungen wird nun die wissenschaftliche Fragestellung und das Vorgehen dieser Arbeit abgeleitet. Hierfür wird die Arbeit zunächst in den Entwicklungsprozess elektrischer Antriebsstränge eingeordnet und bestehende Studien und Auslegungsansätze aus dem Stand der Wissenschaft analysiert und bewertet. Diese Untersuchungen und das Vorgehen wurden für den gesamten Ansatz in [18] und mit besonderem Fokus auf das BTMS in [22] vorveröffentlicht und werden daher an dieser Stelle lediglich verkürzt wiedergegeben.

3.1 Einordnung in den Entwicklungsprozess elektrischer Antriebsstränge

Zur Festlegung des notwendigen Detaillierungsgrades der in dieser Arbeit entwickelten Methode ist eine Einordnung in den Produktentstehungsprozess (PEP) elektrischer Antriebsstränge erforderlich. Grundsätzlich lässt sich ein PEP in die in Abbildung 3.1 dargestellten übergeordneten Schritte einteilen. Diese Arbeit deckt den Schritt *Entwicklung* ab, in dem die Erarbeitung, Bewertung und Auswahl der Lösung der in der vorangegangenen Planungsphase festgelegten Anforderungen stattfindet. In den darauffolgenden Schritten erfolgt schließlich die Detaillierung der ausgewählten Lösung [74, S. 22-23]. Übertragen auf die von deutschen OEM verfolgte Entwicklungsstrategie, ist diese Arbeit in der Planungs- und Konzeptphase und damit in der Vorentwicklung angeordnet [75, S. 1258].

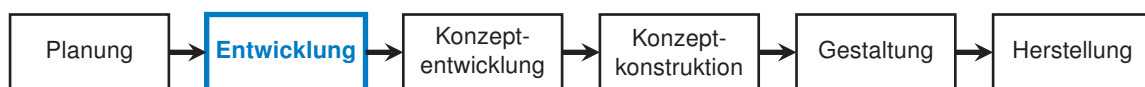


Abbildung 3.1: Produktentstehungsprozess nach [74, S. 22-23] und Einordnung der Arbeit

Dieses Vorgehen deckt sich mit dem von Burda [76, S. 69-71] vorgeschlagenen Vorgehen zur Batteriesystemauslegung. In der Konzeptphase erfolgt eine Bewertung unabhängig der technischen Detaillösung, weshalb die Betrachtung aufgrund der noch unvollständigen Informationsslage mit einigen Vereinfachungen erfolgen muss. Nichtsdestotrotz muss die Lösung unter belastbaren Annahmen erstellt werden, weshalb die Notwendigkeit besteht, bereits in dieser Phase möglichst umfangreiche Aussagen über das spätere Systemverhalten treffen zu können.

3.2 Bewertung bestehender Auslegungsansätze

Für die Bewertung bestehender Ansätze der Batteriesystemauslegung wird zwischen den jeweils im Mittelpunkt stehenden Systemebenen unterschieden. Zusätzlich wird in Erwägung

Tabelle 3.1: Fokus bestehender Arbeiten (Erweiterung von [18, 22])

Autor	<i>Schwerpunktmäßig betrachtete Systemebenen</i>			
	Zelle (el./th.)	Pack (el.)	Pack (th.)	Fahrzeug (th.)
Tourani et al. [77]	■			
Fleckenstein [44]	■			
Keil [70]	■			
Hosseinzadeh et al. [78]	■			
Nieto et al. [79]			■	
Karimi et al. [80]			■	
Paul [81]	■	■	■	
Xia et al. [82]	■	■	■	
Zhou [83]	■	■	■	
Auer [55]	■			■
Hopp [84]	■	■	■	■

gezogen, ob elektrische und/oder thermische Aspekte betrachtet wurden und ob die in den Arbeiten vorgeschlagenen Vorgehen allgemeingültig, zugeschnitten auf spezifische Konzepte oder bestehende Systeme sind. Die Ergebnisse der durchgeführten Literaturstudie sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst, für Details sei auf die Vorveröffentlichungen [18, 22] verwiesen.

Im Bereich des Alterungsverhaltens von LIB im Fahrzeugeinsatz untersuchten Tourani et al. [77] die Auswirkungen realistischer Fahrzyklen auf das elektrische und thermische Zellverhalten und leiteten daraus Empfehlungen bezüglich der optimalen Betriebsbedingungen ab. Fleckenstein [44] betrachtete schwerpunktmäßig den Einfluss inhomogener Temperaturverteilungen im Inneren von LIB unterschiedlicher Typen und Formate. Hierbei konnten die Auswirkungen verschiedener thermischer Anbindungen an das BTMS beleuchtet werden, es wurden jedoch keine Aussagen bezüglich der idealen BTMS-Architektur getroffen. Hosseinzadeh et al. [78] fokussierten sich auf die detaillierte thermische Vermessung und Modellierung einer großformatigen Pouch-Zelle und konnten daraus Aussagen über die Auswirkungen unterschiedlicher thermischer Betriebspunkte ableiten. Keil [70] untersuchte das reale Alterungsverhalten von LIB anhand umfangreicher experimenteller Untersuchungen und konnte daraus die Einflüsse unterschiedlicher Betriebsbedingungen nachweisen. Auf dieser Basis konnten Empfehlungen bzgl. der optimalen Betriebsstrategie und Zieltemperaturen der LIB gegeben werden. Der Fokus aller genannter Studien lag auf dem Zelllevel.

Der Schwerpunkt auf die Systemebene wurde unter anderem von Nieto et al. [79] gelegt. In der Untersuchung wurde eine Methode zur thermischen Batteriesystemauslegung inklusive detaillierter thermischer Modelle hergeleitet. Hierbei wurde sich jedoch auf bestehende Konzepte oder Zelltypen spezialisiert, weshalb dieser Ansatz auf andere Technologien nicht direkt übertragbar ist. Bei Karimi et al. [80] stand der Vergleich der thermischen Eigenschaften unterschiedlicher BTMS Architekturen im Vordergrund, das elektrische LIB Verhalten wurde nur stark vereinfacht betrachtet. Eine Betrachtung sowohl der elektrischen als auch thermischen Seite erfolgte in den Arbeiten von Paul et al. [81] und Xia et al. [82]. Beide Studien analysieren allerdings bereits bestehende Konzepte, vernachlässigen den Einfluss des VTMS und erfordern durch ihren hohen Detaillierungsgrad umfassende Systemkenntnis, was im Konflikt zu dem für diese Arbeit gewählten Entwicklungsschritt steht, in dem derartige Detailinformationen noch nicht vorhanden sind. Eine Konzeptentwicklungs- und Auslegungsmethodik unter Berücksichtigung des elektrischen und thermischen Verhaltens wurde von Zhou [83] vorgestellt. Auch hier wird der Einfluss des VTMS jedoch nur am Rande betrachtet, zudem ist aufgrund der detaillierten Modellierung eine hohe Systemkenntnis erforderlich.

Fokus auf das Gesamtfahrzeug und damit auch das VTMS legten die Untersuchungen von Auer [55] und Hopp [84]. Auer stellte das VTMS in den Vordergrund, weshalb das Batteriesystem nur stark vereinfacht betrachtet wurde. Hopp führte eine detaillierte Betrachtung aller Systemebenen, inklusive BTMS und elektrischen Zellverhalten durch. Das Ziel dieser Arbeit war jedoch die Analyse und Optimierung eines bestehenden Systems, weshalb viele detaillierte Systeminformationen notwendig sind.

In Kapitel 2 wurde bereits nachgewiesen, dass es für die optimale Auslegung eines Batteriesystems erforderlich ist, alle Teilaspekte gemeinsam zu berücksichtigen, weil nur so das tatsächliche Verhalten im späteren Fahrzeugeinsatz und damit die Belastung und Lebensdauer beurteilt werden können. Ein komplex konstruiertes Batteriesystem mit einem BTMS mit vielen Wärmesenken wird bei isolierter Betrachtung möglicherweise als zu aufwendig bewertet. Kann dadurch jedoch auf Gesamtfahrzeugebene auf eine leistungsfähige VTMS Architektur mit hohem Energieverbrauch verzichtet werden, ist der hohe Aufwand beim BTMS durch die Ersparnisse beim VTMS und der gewonnenen Reichweitenvorteile möglicherweise überkompensiert. Aus diesen Gründen ist es erforderlich, die umfassenden Erkenntnisse innerhalb der einzelnen Systemebenen und die konzeptspezifischen Betrachtungen derart zu kombinieren, dass möglichst allgemeingültige und bezüglich der zugrundeliegenden Systemarchitekturen flexible Aussagen und Auslegungsempfehlungen abgeleitet werden können.

Die Analyse des Stands der Wissenschaft zeigt, dass, während die Einflüsse, Anforderungen und Auslegungsansätze innerhalb der einzelnen Systemebenen bereits umfassend untersucht wurden, bislang kein allgemeingültiger Ansatz existiert, der die komplette Konzeptauswahl und Auslegung des Batteriesystems über alle Systemebenen hinweg unterstützt. Zusätzlich fokussieren sich die Arbeiten meist stark auf einzelne Systemebenen. Elektrische oder thermische Aspekte und können daher das komplexe Zusammenspiel zwischen den verschiedenen Systemebenen und Teildisziplinen nicht vollumfänglich darstellen. Selbst wenn bestehende Ansätze alle Systemebenen betrachten, so sind sie häufig auf bestimmte, bestehende Konzepte spezialisiert und lassen sich daher nur schwer auf andere LIB Typen sowie BTMS und VTMS Architekturen anpassen. An dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an.

3.3 Ziele und Vorgehen der Arbeit

Das übergeordnete Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines ganzheitlichen Prozesses zur thermischen Auslegung von Batteriesystemen für BEV. Hierfür muss das elektrische und thermische Verhalten auf der Zell-, System- und Gesamtfahrzeugebene inklusive aller Wechselwirkungen modelliert und eine Schnittstelle zur effizienten Konzeptentwicklung geschaffen werden. Aufgrund der in den frühen Entwicklungsphasen des PEP noch wenig vorhandenen Detailinformationen und der Forderung nach einer möglichst allgemeinen Betrachtung ergibt sich der in Abbildung 3.2 mittels Beispielen visualisierte Betrachtungshorizont.

Die untere Systemgrenze stellt die Zelle mit ihrem elektrischen und thermischen Verhalten dar. Die Vorgänge im Inneren der LIB werden nicht betrachtet, weil diese nur mit hohem Aufwand vermessen und simuliert werden können und sich im Fahrzeugbetrieb nur schwer überwachen und beeinflussen lassen. Aus diesen Gründen wird das thermische Verhalten als Punktmasse aufgelöst und das elektrische Verhalten mittels eines elektrischen Ersatzschaltkreises (ECM) angenähert. Auf der Batteriesystemebene wird die elektrische und thermische Interaktion von parallel und seriell verschalteten Zellen berücksichtigt. Dies erlaubt einerseits die Bewertung des

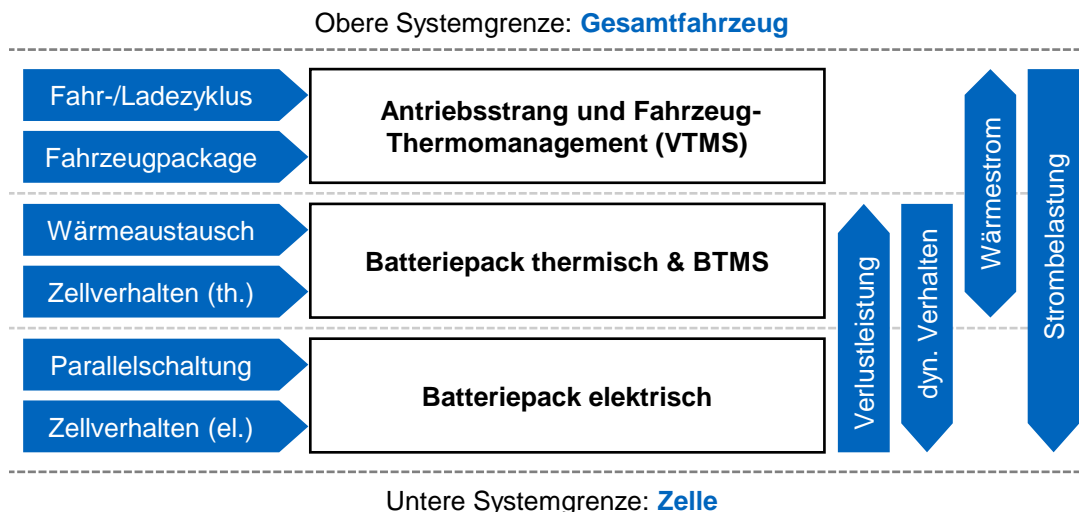


Abbildung 3.2: Betrachtete Systemebenen, Effekte und Wechselwirkungen

Einfluss von statistischen Streuungen zwischen den Zellen, andererseits kann der Einfluss von Temperaturgradienten zwischen den einzelnen Zellen auf das elektrische Systemverhalten beurteilt werden. Für die Entwicklung des BTMS wird der Wärmetransport innerhalb des Batteriepacks zwischen den Zellen, externen Wärmequellen und -senken und der Umgebung berücksichtigt. Zur Bestimmung der BTMS Konfiguration wird zusätzlich der Einfluss unterschiedlicher thermischer Anbindungen an die Zellen und die thermischen Eigenschaften des verwendeten Kühlmediums abgebildet. Die Beschreibung der elektrischen LIB und Batterie-systemauslegung erfolgt in Kapitel 4, die der thermischen Systemmodellierung und der BTMS Auslegung in Kapitel 5.

Zur Integration des Batteriesystems in das Gesamtfahrzeug wird der für das Batteriesystem verfügbare Bauraum mit den notwendigen Abmessungen des Batteriesystems abgeglichen. Durch eine Längsdynamiksimulation des Fahrzeugs kann die Auswirkung unterschiedlicher Fahrzyklen auf die Batteriebelastung ermittelt werden. Zusätzlich werden die thermischen Verlustleistungen der weiteren Antriebsstrangkomponenten berücksichtigt. Eine Simulation des VTMS erlaubt die Bewertung des Einflusses unterschiedlicher Umgebungstemperaturen und VTMS Konzepte auf die Einlauftemperaturen und Volumenströme des BTMS und damit auf das Batterieverhalten. Dies wird in Kapitel 6 umfassend erläutert.

Die notwendige gleichzeitige Betrachtung mehrerer Systemebenen führt zu einem hohen Modellierungs- und Rechenaufwand. Aus diesem Grund sind die in dieser Arbeit entwickelten Simulationsmodelle modular gestaltet, um bei Bedarf eine vereinfachte Betrachtung einzelner Systemebenen zu ermöglichen. Dies erlaubt ein schrittweises Vorgehen, in dem zuerst eine grobe Auslegung auf den unteren Systemebenen erfolgt und die Komplexität der Betrachtung sukzessive erhöht wird. Dieses Vorgehen wird anhand eines Beispiels in Kapitel 7 erläutert, bevor die Ergebnisse der Arbeit in Kapitel 8 diskutiert und in Kapitel 9 zusammengefasst werden.

4 Elektrische Auslegung von Batteriesystemen

Dieses Kapitel behandelt die elektrische Auslegung des Batteriesystems. Zur Erfüllung der Anforderungen bzgl. Spannungslage, Kapazität und Stromfestigkeit werden einzelne LIB seriell und parallel miteinander verschaltet. Zur Bestimmung des späteren Betriebsverhaltens müssen das dynamische Verhalten von LIB und die zusätzlichen Effekte bei serieller und paralleler Verschaltung modelliert werden. Zunächst erfolgt eine theoretische Betrachtung des Problems. Anschließend werden die Modellierung auf Zell- und Systemebene und die Ergebnisse der Modellvalidierung vorgestellt. Zum Abschluss werden die Auswahlkriterien für die Bestimmung der elektrischen Verschaltung diskutiert. Die Untersuchungen dieses Kapitels wurden in [19] vorveröffentlicht und werden daher an dieser Stelle zusammengefasst wiedergegeben.

4.1 Verschaltung von Lithium-Ionen-Zellen

Werden LIB miteinander verschaltet, gewinnen die in Unterkapitel 2.1 bereits dargelegten Schwankungen der Betriebsparameter zwischen einzelnen Zellen an Relevanz. Die Untersuchung dieser durch Fertigungstoleranzen hervorgerufenen Abweichungen und ihre Zusammenhänge sind nicht Teil dieser Arbeit. Das Betriebsverhalten steht im Vordergrund. Dieses wird maßgeblich durch die Schwankungen von Kapazität, Innenwiderstand und dem Verhalten der dynamischen Spannungsanteile [35] beeinflusst und muss für eine exakte Wiedergabe des Systemverhaltens miteinbezogen werden [50]. Grundsätzlich können die Parameterschwankungen als normalverteilt angenommen werden [35, 62] und sind daher über ihren Erwartungswert sowie ihre Varianz bzw. Standardabweichung beschreibbar [85, S. 9].

Der Aufbau eines Batteriesystems aus Einzelzellen entspricht einer zufälligen Stichprobe aus einer Menge an LIB, weshalb jede Verschaltung ein anderes Verhalten zeigen kann. Folglich muss die Erfüllung der Anforderungen an das Batteriesystem auch bei besonders ungünstigen LIB Kombinationen sichergestellt werden. Dies muss sowohl im Neuzustand als auch bei EOL gegeben sein, weshalb für die finale Konzeptbewertung auch das Alterungsverhalten – im Zweifel als Worst Case Betrachtung – miteinbezogen werden muss. Zusätzlich zeigen Studien, dass sich die Alterung bei parallel verschalteten Zellen mit steigender Inhomogenität beschleunigt [62]. Im Rahmen dieser Arbeit werden diesbezüglich keine allgemeinen Aussagen getroffen und rein die Belastung zum aktuellen Zeitpunkt betrachtet.

Neben dem Zellverhalten an sich treten bei der Verschaltung von Zellen weitere Effekte auf, die das Systemverhalten beeinflussen. Diese sind vorrangig auf zusätzliche ohm'sche Widerstände zurückzuführen [86]. Einen Überblick der Effekte gibt Abbildung 4.1. Durch die elektrische Kontaktierung kommt es pro Zelle zu zwei Übergangswiderständen R_{Kontakt} , die ebenfalls Prozessschwankungen unterliegen und hier vereinfacht als normalverteilt angenommen werden.

4 Elektrische Auslegung von Batteriesystemen

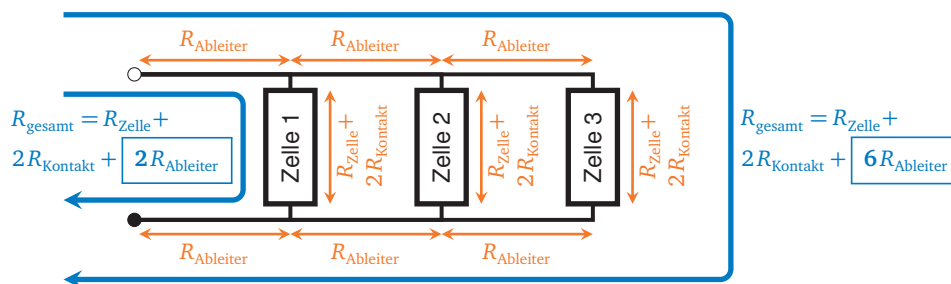
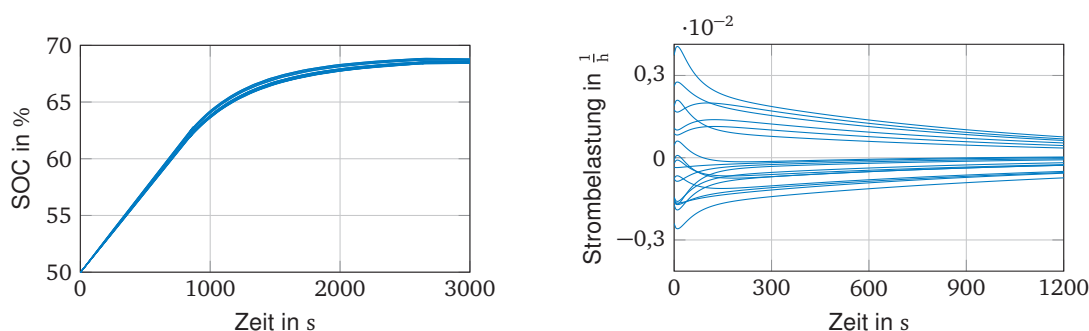


Abbildung 4.1: Weitere Widerstände in Batteriesystemen

Zusätzlich kommt es zu Einflüssen durch die Widerstände der Ableiter R_{Ableiter} [86]. Diese Effekte führen zu unterschiedlichen Widerständen R_{gesamt} der einzelnen Zellen innerhalb des Batteriesystems, beeinflussen die Stromverteilung zusätzlich und müssen für die finale elektrische Auslegung berücksichtigt werden. Weil hierfür jedoch bereits detaillierte Informationen über die Gestaltung der Stromableiter und das gewählte Verfahren zu Zellkontaktierung bekannt sein müssen, werden diese Effekte im Kontext dieser, in einem früheren Entwicklungsschritt des PEP angesiedelten Arbeit, nicht weiter berücksichtigt. Nach einer Studie von Barai et al. [86] sind die Auswirkungen dieser Effekte als klein gegenüber denen der Zellauswahl zu betrachten. Daher ist die Aussagekraft der grundsätzlichen Zellauswahl durch die genannte Vereinfachung nicht entscheidend beeinträchtigt.



- (a) Drift der SOC seriell verschalteter Zellen während eines CCCV-Ladevorgangs durch unterschiedliche Kapazitäten. Initialzustand aller Zellen: $SOC = 50\%$. (b) C-Rate der Ausgleichsströme zwischen parallelen Zellen nach Wegnahme der externen Strombelastung bei $t = 0\text{ s}$ durch unterschiedliche Innenwiderstände.

Abbildung 4.2: Elektrische Effekte in Seriell- (links) und Parallelschaltungen (rechts) von LIB (Simulation von jeweils 18 Panasonic NCR18650PF Zellen. Elektrische Parameter siehe Anhang A.1, angenommene Parameterstreuungen siehe Anhang B.2.)

Als Folge der schwankenden Kapazitäten und Innenwiderstände der Zellen und der zusätzlichen Widerstände durch die Kontaktierung und Verschaltung ergibt sich das in Abbildung 4.2 dargestellte inhomogene Verhalten. Die SOC der seriellen Elemente driften mit der Zeit auseinander (Abbildung 4.2a) und müssen durch Balancing-Maßnahmen wieder angeglichen werden [60, S. 182]. Abgesehen von den zusätzlichen Strömen durch das Balancing ist die Strombelastung aller seriellen Elemente jedoch grundsätzlich gleich. Deutlich komplexer sind die Vorgänge innerhalb der Parallelschaltung (Abbildung 4.2b). Einerseits treten durch die unterschiedlichen Innenwiderstände ungleiche Strombelastungen der einzelnen Zellen auf. Andererseits führen die SOC Unterschiede zu abweichenden OCV der Zellen, wodurch Ausgleichsströme innerhalb der Parallelschaltung hervorgerufen werden, die auch nach Wegnahme der externen Strombelastung noch andauern [62]. Diese zusätzlichen Stromflüsse addieren sich für die Empfängerzellen zur äußeren Belastung und führen daher potenziell zu zusätzlicher Alterung bis hin zur Überlastung einzelner Zellen innerhalb der Parallelschaltung. Wie in Unterkapitel 2.5 erwähnt, sind diese

Vorgänge innerhalb der Verschaltung mit für den Fahrzeugeinsatz vertretbarem Aufwand nicht mess- und steuerbar und müssen daher durch die Auslegung berücksichtigt und soweit möglich vermieden werden.

Für die elektrische Auslegung des Batteriesystems muss folglich zumindest die Größenordnung der Parameterschwankungen zwischen den Zellen bekannt sein, um deren Auswirkung auf das Systemverhalten beurteilen zu können. Weil sich Schwankungen zwischen den Zellen und dem Kontaktierungswiderstand in der Realität kaum vermeiden lassen, muss der maximale Strom so weit limitiert werden, dass keine Überlastung und Über- und Tiefentladung einzelner Zellen auftreten kann. Dies ist durch die komplexen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Einflüssen und der statistischen Schwankungen der Zellparameter, die zu einem unterschiedlichen Verhalten jeder einzelnen Parallelschaltung führen, mit großen Schwierigkeiten verbunden [85, S. 68-69] und wird daher in dieser Arbeit durch Simulation der Belastung jeder einzelnen Zelle innerhalb des Batteriesystems gelöst.

4.2 Modellierung des elektrischen Systemverhaltens

Nach der vorhergegangenen theoretischen Betrachtung wird nun das elektrische Batteriesystemmodell auf Zell- und Systemebene hergeleitet. Die Details der Implementierung sind in [19] veröffentlicht und das Simulationsmodell ist unter einer Open Source Lizenz frei zugänglich [87].

Für die Abbildung des dynamischen Verhaltens auf Zellebene sind ECM eine häufig gewählte Herangehensweise [88]. Der grundlegende Aufbau eines ECM ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Die einzelnen Spannungsanteile des statischen und dynamischen Zellverhaltens werden durch Spannungsquellen, Widerstände und Kondensatoren angenähert [89]. Die Zellspannung U_{Zelle} ergibt sich anschließend aus der Summe der einzelnen Spannungsanteile. Entscheidend für die korrekte Wiedergabe des dynamischen Verhaltens sind die RC-Glieder, die jeweils aus der Parallelschaltung eines Kondensators und eines Widerstands bestehen. Das dadurch entstehende dynamische Verhalten wird genutzt, um die veränderlichen, nicht ohm'schen Spannungsanteile darzustellen. Jedes RC-Glied bildet dabei eine Zeitkonstante ab; durch eine unendliche Anzahl an RC-Gliedern ließe sich daher das dynamische Zellverhalten theoretisch exakt abbilden [90]. Die Hysteresespannung $U_{\text{Hysterese}}$ wird in dieser Arbeit mittels einer von Verbrugge [91] vorgeschlagenen Methode berechnet. Für eine detaillierte Diskussion des Aufbaus von ECM und weitere Möglichkeiten der Modellierung des dynamischen Zellverhaltens sei auf die umfassenden Untersuchungen von Baumann verwiesen [92, S. 9-13].

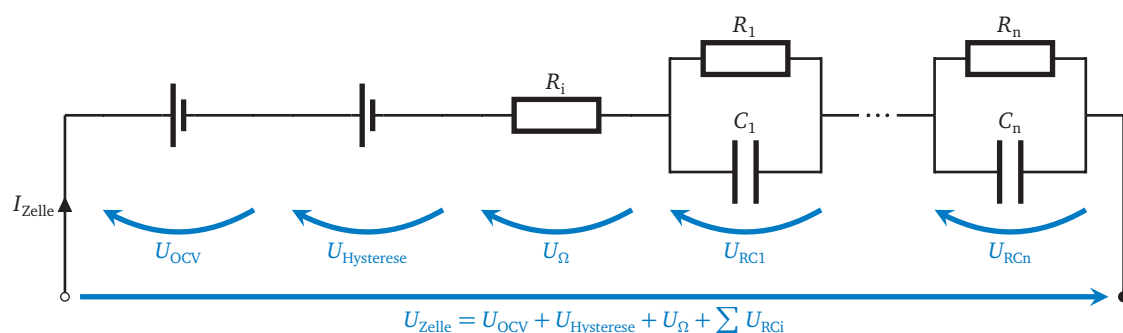


Abbildung 4.3: Grundprinzip elektrischer Ersatzschaltkreise (nach [19])

In der Praxis wird aus Gründen des Implementierungs-, Parametrierungs- und Rechenaufwands die Anzahl der RC-Gliedern limitiert. Die in [19] vorveröffentlichte Untersuchung ergab eine bevorzugte Verwendung von ECM mit zwei RC-Glieder als Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenaufwand. Dieser ECM wird in der vorliegenden Arbeit für Simulationen auf Gesamtfahrzeugebene verwendet. Für höchste Genauigkeitsanforderungen, beispielsweise der detaillierten Analyse einzelner Parallelschaltungen, verwendet diese Arbeit einen ECM mit vier RC-Gliedern. Unter dieser Voraussetzung und zeitdiskreter Berechnung wird ein ECM über den Zusammenhang

$$\begin{bmatrix} U_{RC1} \\ \vdots \\ U_{RC4} \\ SOC \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \exp\left(-\frac{\Delta t}{R_1 C_1}\right) & & & 0 \\ & \ddots & & \vdots \\ & & \exp\left(-\frac{\Delta t}{R_4 C_4}\right) & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{RC1} \\ \vdots \\ U_{RC4} \\ SOC \end{bmatrix}_{k-1} + \begin{bmatrix} R_1 \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{R_1 C_1}\right)\right) \\ \vdots \\ R_4 \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{R_4 C_4}\right)\right) \\ \frac{\Delta t}{C_N} \end{bmatrix} I_{Zelle} \quad (4.1)$$

beschrieben. Hierbei beschreibt U_{RCn} die abfallende Spannung und R_n und C_n Widerstand und Kapazität des n -ten RC-Glieds, C_N die Nennkapazität und I_{Zelle} die Strombelastung der Zelle. Das Subskript k beschreibt die aktuellen Zustandsgrößen, die in Abhängigkeit der Schrittweite Δt iterativ aus denen des letzten Zeitschritts $k - 1$ berechnet werden.

Im Simulationsmodell wird jede Zelle durch ein individuelles ECM repräsentiert. Im nächsten Schritt erfolgt die Erweiterung auf die Parallel- und Seriellschaltung, um die zusätzlichen Einflüsse auf die Zellen auf der Systemebene darstellen zu können. Nach Berechnung der Eigenschaften der Parallelschaltung kann über die einzelnen Spannungen der seriell verschalteten Elemente die Packspannung berechnet werden. Im Folgenden wird der Ablauf dieser Berechnungen erläutert. Die Berechnung der Parallelschaltung folgt einem analytischen Ansatz, der unabhängig zu dieser Arbeit ebenfalls in [93] und [94] vorgeschlagen wurde. Die formelmäßigen Zusammenhänge sind in der Vorveröffentlichung [19] aufgeführt.

Zur Berechnung der Stromverteilung innerhalb der Parallelschaltung muss der momentane Gesamtwiderstand jeder Zelle bekannt sein. Hierzu wird zunächst der statische Fall, ohne externe Strombelastung, betrachtet. Die einzige Einflussgröße ist in diesem Fall das elektrische Potential $U_{Potential}$ der Zellen, bestehend aus OCV, Hysteresespannung und den dynamischen Spannungsanteilen der RC-Glieder. Der in Abbildung 4.3 dargestellte ECM vereinfacht sich dadurch zu einer Spannungsquelle und dem ohm'schen Innenwiderstand. Aus den Innenwiderständen der Einzelzellen kann anschließend der Gesamtwiderstand der Parallelschaltung berechnet werden. Hieraus lässt sich der theoretische Kurzschlussstrom des Systems berechnen. Der repräsentative Gesamtstrom des Systems ergibt sich aus der Summe der Kurzschlussströme und der externen Strombelastung. Aus diesen Größen ergibt sich durch das ohm'sche Gesetz die Spannung der Parallelschaltung, die identisch mit den Zellspannungen U_{Zelle} innerhalb der Parallelschaltung ist. Aus den jeweiligen Unterschieden zu den Zellpotentialen lässt sich gemeinsam mit dem Innenwiderstand der Zelle der individuelle Zellstrom I_{Zelle} bestehend aus den internen und externen Anteil $I_{Zelle,int}$ beziehungsweise $I_{Zelle,ext}$ berechnen, der als Eingangsgröße für den ECM zur Berechnung des Zellzustandes des nächsten Zeitschritts gilt [95, S. 24-29].

Der gesamte Ablauf der elektrischen Simulation ist in Abbildung 4.4 dargestellt. Zur Darstellung der Parameterschwankungen wird jedem ECM-Parameter innerhalb des Systems über normalverteilte Zufallszahlen eine statistische Schwankung zugewiesen. Mögliche Zusammenhänge zwischen einzelnen Parameterschwankungen [96] und Einflüsse der Zellkontaktierung sind nicht abgebildet, können aber durch den modularen Aufbau des Modells jederzeit extern vorgegeben werden. Um einen dauerhaften Betrieb des simulierten Batteriesystems darstellen zu können, ist

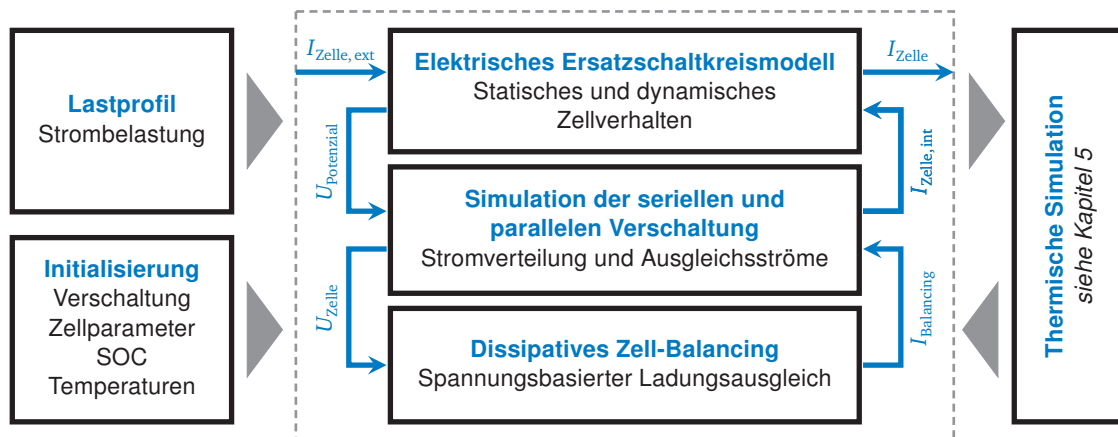


Abbildung 4.4: Ablauf der elektrischen Simulation (nach [19])

ein dissipatives Balancing der seriellen Elemente vorgesehen, das in der Realität durch das BMS gesteuert wird. Das Balancing an sich wird über eine Strombelastung $I_{\text{balancing}}$ der jeweiligen seriellen Elemente dargestellt. Weitere Einflüsse auf das elektrische Verhalten, wie Schütze, Sicherungen oder erweiterbare BMS Funktionalitäten, sind, aufgrund ihrer fehlenden Relevanz für die Kernaussagen dieser Arbeit, nicht implementiert.

4.3 Validierung des elektrischen Systemmodells

Für die Validierung des elektrischen Systemmodells muss zuerst das Verhalten der Einzelzelle mit hoher Genauigkeit abgesichert werden. Fehler auf Zellebene würden sich auf der Systemebene fortpflanzen und zu einer falschen Berechnung von Stromverteilung und Ausgleichsströmen führen; die Belastung der Zellen würde also falsch eingeschätzt. Die Ergebnisse der Validierung auf Zellebene sind in der Vorveröffentlichung [19] detailliert diskutiert, weshalb für weiterführende Informationen auf diese Veröffentlichung verwiesen wird. Es wurde deutlich, dass dynamische Belastungen, repräsentiert durch den Dynamic Stress Test (DST), durch das Modell exakter wiedergegeben werden können als der Betrieb mit konstanten Strömen. Dies liegt an der Schwierigkeit, die Diffusion über einen ECM korrekt abzubilden. Die höchsten Abweichungen von bis zu 200 mV treten bei konstanter Strombelastung bei geringem SOC auf, ein Bereich, der für ECM grundsätzlich herausfordernd ist [19]. Bei höherem SOC und dynamischer Belastung durch den DST liegen die Abweichungen im niedrigen Millivolt-Bereich.

Für die Validierung auf Systemebene wurden zwei Zellen mit einem Aufbau zur Messung der individuellen Strombelastung ergänzt und parallel verschaltet. Zur gezielten Ausbildung starker inhomogener Effekte und Ausgleichsströme wurden LIB unterschiedlichen Alterungszustands genutzt und als Belastung erneut ein statischer und ein dynamischer Zyklus verwendet. Auch in dieser Konfiguration kann das elektrische Verhalten, inklusive der Effekte innerhalb der Parallelschaltung, zuverlässig wiedergegeben werden, zumal für die Validierung Zellen mit in der Praxis unrealistisch hohen Parameterunterschieden verwendet wurden. Wie bereits auf Zellebene treten die größten Abweichungen bei statischer Belastung und niedrigem SOC auf und sind daher vermutlich auf die Zellmodellierung zurückzuführen. Weil die theoretischen SOC-Grenzen einer Zelle im realen Fahrzeugbetrieb nicht ausgenutzt werden [21], kann das Systemmodell daher im Rahmen der in der vorliegenden Arbeit gestellten Anforderungen als valide angesehen werden.

Obwohl die Validierung ausschließlich für zwei parallel verschaltete Zellen durchgeführt wurde, ist davon auszugehen, dass das Systemmodell für alle Verschaltungen aussagekräftige Ergebnisse liefert. Es ist jedoch zu beachten, dass Ungenauigkeiten potenziell mit der Anzahl an simulierten Zellen skalieren. Durch den vollanalytischen Ansatz sind die zugrundeliegenden Simulationsmechanismen für jede Anzahl an parallel verschalteten Zellen gleich und das Verhalten der Seriellschaltung wird direkt daraus abgeleitet. Zusätzlich wurden ähnliche Ansätze bereits erfolgreich in Studien weiterer Autoren angewendet [93, 94]. Kritischer zu bewerten ist der große Einfluss der Zellparametrierung auf die berechneten Ausgleichsströme. Bereits kleine Änderungen der Zellparameter haben deutlichen Einfluss auf die Effekte auf Systemebene, was bei realen Aufbauten durch die nicht exakt kontrollierbaren zusätzlichen Widerstände durch Kontaktstellen und Ableiter noch verstärkt werden dürfte. Soll der Fokus einer Untersuchung allein auf die Ausgleichsströme gelegt werden, kann es daher zielführend sein, die ECM-Parameter nochmals anzupassen, bis das Verhalten eines realen Aufbaus exakt wiedergegeben wird. Hierdurch können die zusätzlichen Verschaltungseffekte berücksichtigt werden, allerdings geht teilweise der physikalische Bezug auf Zellebene verloren, weshalb im Rahmen dieser Arbeit auf dieses Vorgehen verzichtet und die Simulation mit den ursprünglichen ECM Parametern durchgeführt wird.

4.4 Zellauswahl und elektrische Verschaltung

Im Anschluss an die elektrische Simulation unterschiedlicher LIB kann eine Vorauswahl, der für das Batteriepack in Frage kommenden Verschaltungskonzepte durchgeführt werden. Für die finale Auswahl ist jedoch das in Kapitel 5 betrachtete thermische Verhalten miteinzubeziehen. An dieser Stelle erfolgt daher lediglich eine theoretische Betrachtung der Einflussgrößen. Diese Untersuchung wurde durch die Masterarbeit von Krahl [85] unterstützt.

Grundsätzlich ist das elektrische Verhalten des Batteriesystems das entscheidende Kriterium für den späteren Einsatz im Fahrzeug. Die relevanten Größen sind einerseits die Spannungslage, definiert durch die Größe der Seriellschaltung, andererseits die Kapazität und maximale Strombelastbarkeit, definiert durch Größe und Typ der verwendeten LIB und der Anzahl an parallel verschalteten Zellen. Diese Größen lassen sich anhand der Anforderungen und der Spezifikation der Zellen einfach herleiten; sie müssen anschließend jedoch noch auf ihre Eignung unter realen Betriebsbedingungen geprüft werden. Besonders kritische Systemzustände stellen der Betrieb nahe an den zulässigen Grenzen und auf dauerhaft hohem Leistungsniveau dar. Ein geeigneter Zyklus, um das Verhalten unter diesen Extremsituationen zu testen, ist das Laden und Entladen mit der maximalen im späteren Betrieb auftretenden Dauer- und Spitzenleistung. Als Regelgrößen zur Steuerung der Belastung müssen die Systemspannung und die Spannung der einzelnen Elemente der Seriellschaltung genutzt werden, weil im späteren Betrieb nur diese Größen tatsächlich überwachbar sind. Zusätzlich muss stets der gesamte, im späteren Betrieb genutzte SOC-Bereich bei Maximalleistung, abgedeckt werden, um zu überprüfen, ob die gewählten Betriebsgrenzen der LIB eingehalten werden.

Für die dauerhafte Sicherstellung zulässiger Betriebszustände muss untersucht werden, ob es zum Auftreten besonders ungünstiger Zellkombinationen kommen kann, bei denen einzelne Zellen bereits bei geringer Systembelastung ihre Betriebsgrenzen überschreiten. Allerdings ist auch die Wahrscheinlichkeit dieser Worst Case Kombinationen zu betrachten. Treten diese bei einer gegebenen Parameterschwankung und einer geplanten produzierten Stückzahl gar nicht auf, sind zusätzliche Maßnahmen der Vorauswahl und Vermessung unter Umständen

gar nicht notwendig, oder überschreiten Aufwand und Kosten des Austauschs der wenigen betroffenen Batteriesysteme beim Kunden erheblich, sofern sie nicht sicherheitskritisch werden. Für diese Überlegung ist die Anzahl der parallel verschalteten Zellen entscheidend, die bei einer gegebenen Batteriesystemkapazität von der Zellgröße bestimmt wird. Wird vereinfachend davon ausgegangen, dass eine Überlastung genau dann auftritt, wenn n_1 Zellen von den linken und n_2 Zellen von den rechten p_1 beziehungsweise p_2 Prozent der Ränder der Normalverteilung aufeinander treffen, kann die Wahrscheinlichkeit für den Worst Case p über den Zusammenhang

$$p = p_1^{n_1} p_2^{n_2} \frac{(n_1 + n_2)!}{n_1! n_2!} \quad (4.2)$$

berechnet werden [85, S. 32]. Abbildung 4.5 zeigt die Wahrscheinlichkeiten für den Fall $p_1 = p_2$ und $n_1 = n_2$. Es wird deutlich, dass die Wahrscheinlichkeit mit steigender Anzahl an parallel verschalteten Zellen stark abnimmt. Dies ist auch bei $n_1 \neq n_2$ der Fall.

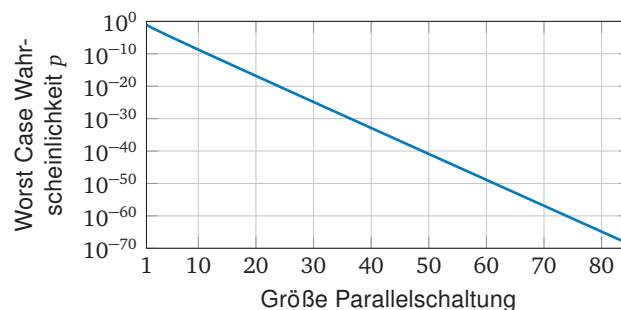


Abbildung 4.5: Wahrscheinlichkeit der Worst Case Kombination $p_1 = p_2 = 0,2$, $n_1 = n_2$ bei unterschiedlichen Größen der Parallelschaltung (nach [85, S. 32-33])

Aufgrund der komplexen Interaktion innerhalb der Parallelschaltung ist die in Abbildung 4.5 vorgestellte, rein analytische Betrachtung jedoch nicht ohne weiteres zulässig. Das Beispiel geht davon aus, dass Überlastungen nur dann auftreten, wenn die Parallelschaltung *ausschließlich* aus einer Kombination von besonders guten und schlechten Zellen besteht. In der Realität reichen jedoch unter Umständen auch schon einzelne positive oder negative Ausreißer in einer ansonsten von durchschnittlichen Zellen geprägten Parallelschaltung, um eine kritische Inhomogenität zu erzeugen. Wird daher in einer Simulation reales Zellverhalten zugrunde gelegt und der Einfluss der Größe der Parallelschaltung bei einer gegebenen Stärke der Parameterschwankungen von Innenwiderstand und Kapazität untersucht, kehrt sich das Bild um und die Inhomogenität ist bei der größeren Parallelschaltung deutlich höher. Tabelle 4.1 zeigt dies für die Strombelastung und den SOC, gemittelt über jeweils zehn Simulationsdurchläufe mit normalverteilten Parameterschwankungen (Anhang B.2). Auch wenn diese Betrachtung nur exemplarisch für eine Stärke der Streuung und einen Lastzyklus vorgenommen wurde und für eine finale Aussage weitere Untersuchungen erforderlich sind, zeigt sie doch die vielfältigen Einflüsse auf das elektrische Verhalten der Parallelschaltung, die bei der Auslegung in Erwägung gezogen werden müssen.

In realen Anwendungsfällen überlagern sich die in der vorangegangenen Betrachtung separat untersuchten Effekte und die höhere Belastung einzelner Zellen ist nur eine Momentaufnahme, weil diese schneller altern und sich ihr Verhalten dadurch unter Umständen an das der anderen Zellen angleicht. Zusätzlich muss vor allem bei größeren Zellen unter hoher Strombelastung von einer inhomogenen Temperaturverteilung im Inneren ausgegangen werden [97], was wiederum zu ungleicher Alterung und lokaler Überlastung, diesmal aber im Inneren der Zelle, führen kann.

Tabelle 4.1: Simulation des Einflusses der Größe der Verschaltung auf die Inhomogenität von Strom und SOC. (Zelle: Panasonic NCR18650PF, Schwankung R_i und C_A jeweils 3 %. Max. C-Rate auf Zellebene: $1,5 \frac{1}{h}$. Zellparameter siehe Anhang A.1, Informationen zur angenommenen Streuung und zum Vorgehen siehe Anhang B.2.)

Szenario	Verschaltung	ΔI_{\max}	ΔSOC
Schwankung Innenwiderstand R_i	5p	0,17 A	0,12 %
	25p	0,33 A	0,23 %
Schwankung Kapazität C_A	5p	0,03 A	0,37 %
	25p	0,06 A	0,65 %

Die finale Klärung der Frage nach der optimalen Kombination von Zellgröße und Verschaltung kann daher nur ein Alterungsmodell mit Betrachtung der Vorgänge im Inneren der Zelle klären. Diese Arbeit fokussiert sich auf die grundsätzliche Einhaltung der Betriebsgrenzen der Zelle, weshalb dieses Thema nicht weiter behandelt wird.

Die vorangegangene Betrachtung zeigt die hohe Komplexität der Beurteilung der tatsächlichen Eignung einer Zelle für eine gegebene Verschaltung. In Abbildung 4.5 wurde nur ein Parameter betrachtet. In der Realität sind mehrere Parameter von Schwankungen betroffen, die in komplexer Wechselwirkung zueinander stehen und gemeinsam mit dem thermischen Systemverhalten die Dynamik des Systems auf hochgradig nichtlineare Art und Weise beeinflussen. Zur Absicherung eines Batteriesystems müssen daher statistische Verfahren wie Monte-Carlo Simulationen [98, S. 39] herangezogen werden, um das Verhalten vollumfänglich absichern zu können. Dies ist in diesem Auslegungsschritt noch nicht sinnvoll, weil das thermische Verhalten, das Einfluss auf die elektrische Dynamik ausübt, noch nicht abgebildet ist; bislang wird in der Simulation von konstanten Zelltemperaturen ausgegangen. Deshalb muss vor der finalen Bewertung zuerst das BTMS ausgelegt und das thermische Systemverhalten inklusive der zusätzlichen Belastung durch die Ausgleichsströme analysiert werden, was im folgenden Kapitel vorgestellt wird. Trotzdem können Lösungen, die bereits bei alleiniger Prüfung des elektrischen Verhaltens die zulässigen Betriebsgrenzen überschreiten, schon zu diesem Zeitpunkt von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen werden.

5 Thermische Auslegung von Batteriesystemen

In diesem Abschnitt wird das Verfahren zur thermischen Auslegung des Batteriesystems entwickelt. Zur Vorbereitung werden zunächst die allgemeinen Grundlagen von Thermomanagementsystemen (TMS) zusammengefasst und anschließend näher auf das BTMS eingegangen. Anhand dieser Grundlagen wird das thermische Simulationsmodell hergeleitet und dessen Validierung diskutiert. Mit Hilfe dieses Modells sind alle alterungsrelevanten Belastungen des Batteriesystems innerhalb des Betrachtungshorizonts dieser Arbeit bekannt. Daher wird im Anschluss auf die Bewertung der Belastungen eingegangen und schließlich das Vorgehen zur Auswahl des thermischen Batteriekonzepts und des BTMS diskutiert. Grundlagen und Vorgehen zur thermischen Systemsimulation wurden in [19] sowie zur BTMS Auslegung in [22] veröffentlicht. Für weiterführende Details sei daher auf die jeweiligen Vorveröffentlichungen verwiesen.

5.1 Grundlagen des Thermomanagements

Grundsätzlich sind alle technischen Systeme verlustbehaftet und setzen ihre Verlustleistung in Form von Wärme frei [99, S. 13]. Unter dem Begriff *Thermomanagement* werden alle Maßnahmen zur Temperierung von Antriebsstrangkomponenten und des Innenraums zusammengefasst [57]. Diese beinhalten Abfuhr, Produktion und Umverteilung der Wärme sowohl aktiv, zum Beispiel mittels Klimakreisläufen beziehungsweise Heizgeräten oder passiv, z. B. mittels Einrichtungen zur gezielten Wärmeleitung oder Maßnahmen zur Oberflächenvergrößerung. Die Anwendungsbereiche von TMS erstrecken sich von der Komponentenebene, über die Systemebene, bis hin zum Gesamtfahrzeug. Aus technischer Sicht erfüllt das Thermomanagement die Aufgabe, alle Antriebsstrangkomponenten innerhalb ihrer zulässigen Betriebsbereiche zu halten und übermäßige Temperaturspitzen und -gradienten innerhalb der Komponenten zu vermeiden. Aus ergonomischer Sicht müssen TMS die Einhaltung des Komfortbereichs für die Insassen des Fahrzeugs sicherstellen.

Wärmeübertragung ist durch den Wärmestrom \dot{Q} definiert und erfolgt durch drei unterschiedliche Mechanismen [100, S. 19-22], die in Abbildung 5.1 skizziert sind. *Wärmeübergang* kann zwischen zwei Körpern oder einem Körper und seiner Umgebung stattfinden und ist definiert durch den Temperaturunterschied ΔT zwischen den beiden Partnern des Wärmeaustauschs, der Fläche A und dem Wärmeübergangskoeffizienten α [100, S. 20-22]. Die *Wärmeleitung* ist durch den Temperaturunterschied und den Querschnitt definiert, sowie zusätzlich durch eine Strecke l und der Wärmeleitfähigkeit des Materials λ [100, S. 20-22]. Die *Wärmestrahlung* ist durch die Oberflächentemperatur, bei Betrachtung des Körpers als Punktmasse gleichbe-

deutend mit der Komponententemperatur T in vierter Potenz, dem Emissionsgrad ϵ und der Stefan-Boltzmann-Konstante σ definiert [100, S. 22].

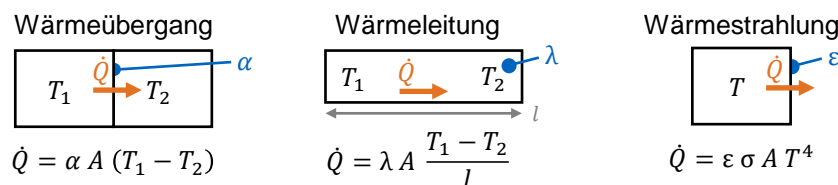


Abbildung 5.1: Mechanismen der Wärmeübertragung

Bei Wärmeübertragung zwischen zwei Körpern treten die genannten Wärmetransportphänomene häufig gemeinsam auf. Bei einer fluiddurchflossenen Rohrleitung findet beispielsweise ein Wärmeübergang vom Fluid auf die innere Wand des Rohres, danach Wärmeleitung in der Wand und schließlich ein Wärmeübergang von der äußeren Wand an die Umgebung statt. Dies wird als *Wärmedurchgang* bezeichnet [101, S. 32-34]. Es ist möglich, alle Effekte zu einem gemeinsamen Wärmedurchgangskoeffizienten k zusammenzufassen [101, S. 33]; eine Vereinfachung, die auch im Rahmen dieser Arbeit eingesetzt wird. Die Wärmestrahlung ist nur bei hohen Temperaturen, wie sie bei TMS im Kontext von Fahrzeugen nicht auftreten, von Relevanz [102, S. 656] und wird daher nicht weiter betrachtet.

Das Prinzip des Wärmedurchgangskoeffizienten wird auch in der Theorie der *thermischen Netzwerke* angewandt. Bei dieser Herangehensweise wird das zu betrachtende System in einzelne thermische Punktmassen i zerlegt, die jeweils durch eine Masse m_i , eine spezifische Wärmekapazität c_i und ihre Temperatur T_i bestimmt sind und über Wärmedurchgangskoeffizienten miteinander in Beziehung gebracht werden [103]. Diese in Abbildung 5.2 verdeutlichte Methode ist sowohl zur Berechnung der Temperaturen mehrerer miteinander verbundener Körper als auch zur Annäherung der Temperaturverteilung innerhalb eines einzelnen Körpers über Blockkapazitäten anwendbar. Im Rahmen dieser Arbeit wird grundsätzlich jeder Körper als Punktmasse angenähert und die innere Temperaturverteilung vernachlässigt. Für die Kriterien zur Anwendbarkeit dieser Vereinfachung sei auf die Vorveröffentlichung [22] verwiesen.



Abbildung 5.2: Prinzip der Methode der thermischen Netzwerke

Als Medien zur Wärmeübertragung werden in TMS entweder Luft, Kühl- oder Kältemittel eingesetzt [104, S. 34-37]. Die durch Verwendung dieser Medien erreichbaren Eigenschaften sind stark von den Betriebsbedingungen und der konstruktiven Auslegung des TMS und dessen thermischer Anbindung an die zu temperierenden Komponenten abhängig. Einen groben Überblick über die erreichbaren Leistungsdaten gibt Tabelle 5.1. Erkennbar ist die deutlich geringere Wärmeübertragungsfähigkeit von Luft gegenüber flüssigen Medien [105] bei gleichzeitig höheren Volumenströmen [106], was die Geräuschentwicklung während des Betriebs des TMS erhöht. Grundsätzlich sind Luft und Kühlmittel nicht dazu geeignet, ein System unter die Umgebungstemperatur zu kühlen; eine Unterkühlung ist nur bei Kältemitteln durch deren Phasenübergang möglich.

Tabelle 5.1: Vergleich gängiger Medien für Thermomanagementsysteme bei gleichem Massenstrom

Medium	Eigenschaften			
	\dot{m} in kg/s	\dot{V} in m ³ /s	α_{max} in W/m ² K	Phasenwechsel
Luft [54]	$50 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-2}$	25	–
Kühlmittel (Öl) [54]	$50 \cdot 10^{-3}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	57	–
Kühlmittel (Wasser) [54]	$50 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-5}$	390	–
Kältemittel (R1234yf) [107, S. 336]	$50 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2\dagger}$	– [‡]	✓

[†] bei $T = 20^\circ\text{C}$, $p = 1\text{ bar}$ [‡] kein Vergleich mit den anderen Werten möglich, da nicht im Rahmen der gleichen Studie [54] durchgeführt.

5.2 Anforderungen an das Thermomanagement von Batteriesystemen

Nach der allgemeinen Diskussion von TMS erfolgt nun die Fokussierung auf die speziellen Anforderungen an das BTMS. Die in Kapitel 2 genannten Anforderungen von LIB hinsichtlich ihrer Temperatur, die Auswirkungen beim Verlassen des Temperaturfensters und die notwendigen Gegenmaßnahmen sind in Abbildung 5.3 nochmals zusammengefasst. Generell ist eine Reduzierung der elektrischen Leistung des Batteriesystems notwendig, falls das optimale Temperaturfenster der LIB durch das BTMS nicht gehalten werden kann. Andernfalls steigen die Alterungsgeschwindigkeit und die Gefahr von Schädigungen.

Zelltemperatur	-20 °C	20 °C	60 °C
Leistungsfähigkeit	reduziert (Innenwiderstand)	voll	reduziert (Materialgrenzen)
Alterungsverhalten	beschleunigt	normal	beschleunigt
BTMS-Maßnahme	Heizen		Kühlen

Abbildung 5.3: Anforderungen von LIB und BTMS-Maßnahmen während des Betriebs (nach [108, S. 166, 109, S. 9-11])

Die Wirkung des BTMS innerhalb des Batteriesystems wird nicht allein durch die absoluten Leistungsdaten definiert; auch die Anzahl und Platzierung der Wärmesenken hat entscheidenden Einfluss [110]. Eine höhere Anzahl an Wärmesenken steigert – vor allem, wenn Kühlmaßnahmen innerhalb einzelner Module vorgesehen werden – die Komplexität und den Platzbedarf des BTMS, erlaubt jedoch eine homogenere Temperaturverteilung [111]. Zellen, die nur unzureichend an das BTMS angebunden sind, sind den ungünstigsten Betriebsbedingungen unterworfen. Hierdurch werden gemeinsam mit den temperaturinduzierten Abweichungen der dynamischen Eigenschaften die Belastungsinhomogenitäten innerhalb der Parallelschaltung verstärkt und die Alterung beschleunigt.

Bei den für BTMS verwendeten Maßnahmen kann zwischen externen und batterieinternen Maßnahmen unterschieden werden. Diese Einteilung wird in Abbildung 5.4 verdeutlicht. Als *externe Maßnahmen* werden im Rahmen dieser Arbeit alle Thermomanagementstrategien betrachtet, die einen Wärmeaustausch mit der Umgebung des Batteriesystems beinhalten. Diese beinhalten *passive* Systeme, die allein über natürliche Konvektion arbeiten. *Semi-aktive* Systeme erhöhen die Wärmeübertragung durch erzwungene Konvektion, haben jedoch keine Möglichkeit zur Regulierung der Temperatur des verwendeten Mediums. Dies ist nur bei *aktiven*

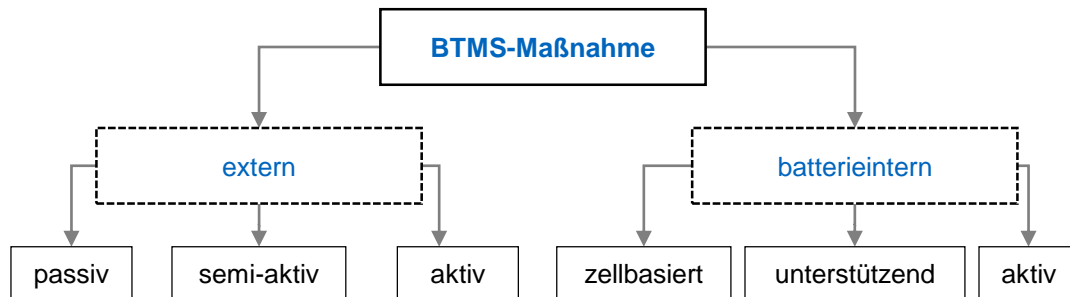


Abbildung 5.4: Einteilung der BTMS-Maßnahmen (aufbauend auf [104, S. 28-29])

Systemen möglich, die über zusätzliche Vorkonditionierung ein gezieltes Heizen und/oder Kühlen des Mediums vor Eintritt in die Batterie erreichen [104, S. 34].

Batterieinterne Maßnahmen finden rein in der Batterie statt, nutzen also keinen Wärmestrom über die Grenzen des Batteriesystems hinaus. Hierunter fallen *unterstützende Maßnahmen* wie Wärmerohre (engl. *Heat-pipes*), die den Wärmetransport im Inneren des Batteriesystems unterstützen und so zu einer Homogenisierung der Temperatur zwischen den Zellen und besserem Wärmeaustausch mit den externen BTMS Maßnahmen führen [112, 113]. Auch Phasenwechselmaterialien (PCM) [105, 114, 115] und thermoelektrische Module [57, 56, S. 19-20] fallen unter diese Einteilung. *Aktive batterieinterne Maßnahmen* wie Heizfolie oder Widerstandsheizter (PTC) dienen der zusätzlichen, zellnahen Wärmeenergieerzeugung. Werden diese Maßnahmen außerhalb des Batteriesystems vorgesehen, sind diese den externen Maßnahmen zuzurechnen. *Zellbasierte Maßnahmen* nutzen die Selbsterwärmung der Zellen bei Stromfluss durch besondere Ansteuerung [109, S.36]. Hierunter fallen beispielsweise das Laden mit überlagerter Wechselstrombelastung [116] und der wechselseitige Ladungsaustausch einer in zwei Hälften geteilten Batterie [117]. Der Fokus dieser Arbeit liegt ausschließlich auf den externen BTMS Maßnahmen, batterieinterne Maßnahmen werden nicht weiter behandelt.

Unabhängig der zugrundeliegenden Technologien ist es entscheidend, die Zellen thermisch bestmöglich an das BTMS anzubinden. Das Vorgehen unterscheidet sich daher aufgrund der in Unterkapitel 2.2 bereits diskutierten unterschiedlichen Arten der Wärmefreisetzung für jeden Zelltyp. Abbildung 5.5 verdeutlicht die grundlegenden Strategien zur thermischen Anbindung über Boden, Seitenflächen oder Ableiter der Zellen [108, S. 167-169]. Zusätzlich besteht die Möglichkeit der Direktkühlung, bei der die Zellen komplett mit einem zwingend nichtleitenden Medium umgeben werden [118]. Die thermische Anbindung der jeweiligen Flächen erfolgt entweder direkt über fluiddurchströmte Rohrleitungen oder Platten, oder mittels unterstützender Maßnahmen, wie *Heat-pipes* oder *Fins*, wärmeleitfähigen Blechen, die die Wärme von den Zellen zu den fluidd führenden Einrichtungen des BTMS führen [13, S. 124-125]. Ist nicht jede Zelle direkt mit dem BTMS verbunden, müssen Wärmeströme durch mehrere Zellen hindurchfließen, bis sie eine Wärmesenke des BTMS oder, sofern nicht thermisch isoliert, die äußeren Flächen des Batteriesystems erreichen. Dies ist der Hauptgrund für die Ausbildung von Temperaturgradienten innerhalb von Batteriesystemen und daher entscheidend für den Erfolg der vorgesehenen BTMS Lösung [111]. Auch die Temperaturänderung des Fluids während seines Wegs durch das Batteriesystem muss berücksichtigt werden. Zu lange Wege und Massenströme führen zu einer unzureichenden Temperierung der Zellen am Ende des jeweiligen Strömungsgebiets [119, S. 70]. In der Literatur existieren Vorschläge zur Reduzierung dieses negativen Einflusses durch wechselseitige Durchströmung [120], für eine praktische Anwendung erscheint der Aufwand und die Fehleranfälligkeit dieser Lösungen jedoch zu hoch. Für den Fall des Heizens sind diese Überlegungen mit umgedrehtem Vorzeichen der Wärmeströme ebenso valide.

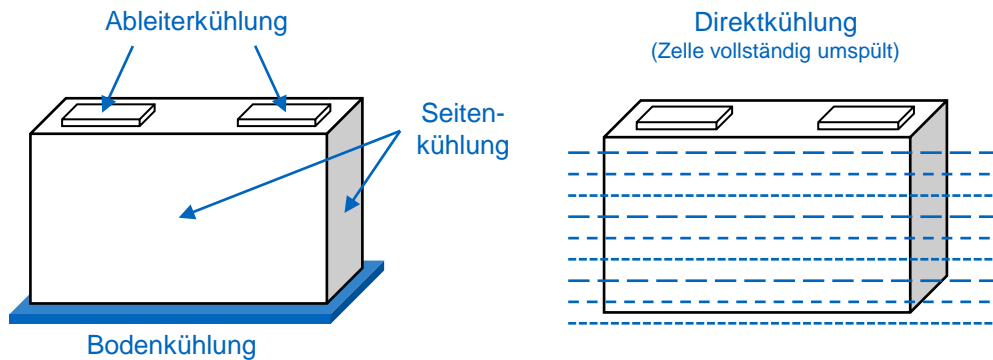


Abbildung 5.5: Möglichkeiten der thermischen Anbindung der Zellen

Anhand der vorangegangenen Betrachtungen lassen sich die für die Auslegung des BTMS Konzepts notwendigen Anforderungen an das Simulationsmodell ableiten. Die Verlustleistung jeder Zelle, deren elektrisch/thermische Wechselwirkungen sowie die Wärmeströme zwischen den LIB müssen bekannt sein. Für die Auslegung des BTMS müssen die im aktuellen Anwendungsfall möglichen Varianten der thermischen Anbindung an die Zellen unterschieden und beliebige geometrische Anordnungen der Wärmesenken innerhalb des Batteriesystems dargestellt werden können. Zusätzlich müssen die Wärmeübertragungseigenschaften unterschiedlicher Fluide und Strömungsbedingungen darstellbar sein, um die Auswirkungen dieser Auswahlmöglichkeiten darzustellen. In dem durch diese Arbeit abgedeckten Entwicklungsschritt sind vor allem die Leistungsfähigkeit des Systems vor dem Hintergrund der Absoluttemperatur und Temperaturgradienten entscheidend. Zusätzlich muss abschätzbar sein, ob mit den geplanten BTMS Maßnahmen die Packageanforderungen an das Batteriesystem erfüllt werden können. Weitere Anforderungen wie Sicherheit, Preis sowie Steuerungs- und Absicherungsaufwand sind stark von der Detailauslegung abhängig und müssen in dieser Phase anhand der verwendeten Technologien abgeschätzt werden.

5.3 Modellierung des thermischen Systemverhaltens

Für die Simulation des thermischen Systemverhaltens muss zunächst die Verlustleistung jeder Zelle bekannt sein. Anschließend können über die Wärmeströme zwischen den LIB und in die Wärmesenken des BTMS die Zelltemperaturen und deren Einfluss auf das elektrische Systemverhalten berechnet werden. Der Ablauf der thermischen Berechnung ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Die Erklärung des Simulationsmodells erfolgt im Folgenden aus Gründen der Übersichtlichkeit verkürzt und anhand der Betrachtung einer einzelnen Zelle. Für Details sei auf die Vorveröffentlichungen [19, 22] verwiesen. Das Simulationsmodell ist unter einer Open Source Lizenz veröffentlicht und frei zugänglich [121].

Die Entstehung und Modellierung der reversiblen und irreversiblen Verlustleistung von LIB wurden intensiv von Baumann [92, S. 13-15] untersucht und wird daher an dieser Stelle nicht im Detail diskutiert. Die Modellierung unterscheidet zwischen der irreversiblen Wärmegeneration $\dot{Q}_{\text{Zelle, irr}}$, berechnet über den gesamten Spannungsabfall $\Delta U_{\text{Zelle, } \Omega}$ bei der Strombelastung I_{Zelle} und der reversiblen Wärmegeneration $\dot{Q}_{\text{Zelle, rev}}$ durch chemische Reaktionen im Inneren der Zelle, berechnet über den Entropiekoeffizienten $\frac{\partial U_{\text{OCV}}}{\partial T_{\text{Zelle}}}$ und der Zelltemperatur T_{Zelle} mittels einer von Eddahech [122] hergeleiteten Methode. Dadurch ergibt sich die thermische Verlustleistung

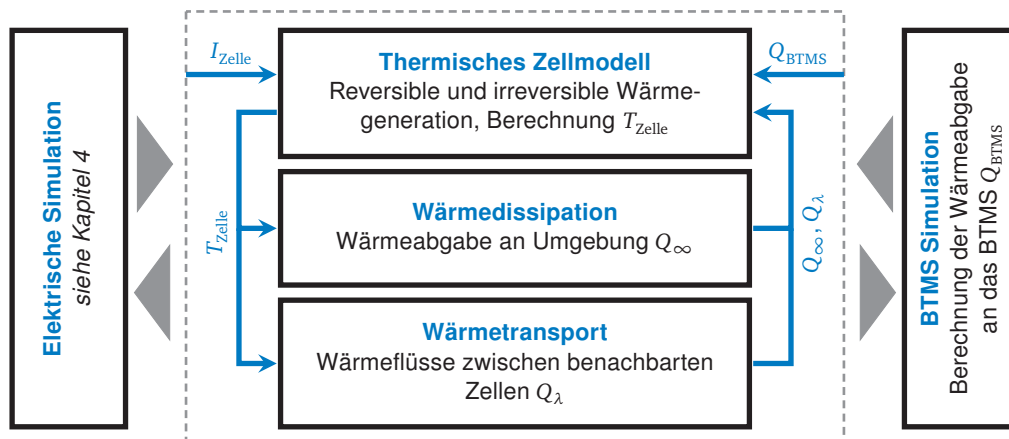


Abbildung 5.6: Ablauf der thermischen Simulation (nach [19, 22])

$\dot{Q}_{Zelle,VL}$ einer Zelle über folgenden Zusammenhang:

$$\dot{Q}_{Zelle,VL} = I_{Zelle} \Delta U_{Zelle,\Omega} + I_{Zelle} T_{Zelle} \frac{\partial U_{OCV}}{\partial T_{Zelle}} \quad (5.1)$$

Eine Dissipation der Wärme des Batteriesystems ist entweder an die Umgebung oder das BTMS möglich. Auch hier erfolgt die Berechnung für jede einzelne Zelle. Der Wärmestrom zwischen Zelle und Umgebung \dot{Q}_{∞} berechnet sich nach

$$\dot{Q}_{\infty} = \alpha_{Zelle,\infty} A_{Zelle} (T_{\infty} - T_{Zelle}) \quad (5.2)$$

über den Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Zelle und Umgebung $\alpha_{Zelle,\infty}$, der Oberfläche beziehungsweise der am Wärmeaustausch beteiligten Fläche der Zelle A_{Zelle} und der Umgebungstemperatur um die Zelle T_{∞} . Es ist zu beachten, dass sich je nach individueller Einbaulage und Betriebszustand unterschiedliche $\alpha_{Zelle,\infty}$ und T_{∞} für die einzelnen Zellen ergeben können, was bei der Modellparametrierung zu berücksichtigen ist.

Die Wärmedissipation über das BTMS für eine Zelle berechnet sich über den Zusammenhang

$$\dot{Q}_{BTMS} = \alpha_{Zelle,BTMS,j} A_{Zelle,BTMS,j} (T_{BTMS,j} - T_{Zelle}) \quad (5.3)$$

und damit analog zum in Gleichung (5.2) vorgestellten Vorgehen. Weil je nach thermischer Anbindung des BTMS nicht die komplette Fläche der Zelle am Wärmeaustausch beteiligt ist, beziehungsweise eine Zelle über unterschiedliche Kühlkanäle thermisch kontaktiert werden kann, muss unterschieden werden, welcher Kühlkanal j mit dem individuellen Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_{Zelle,BTMS,j}$, der Temperatur $T_{BTMS,j}$ und der wärmeübertragenden Fläche $A_{Zelle,BTMS,j}$ mit der Zelle in Kontakt steht.

Der Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{Zelle,BTMS,j}$ ist eine Funktion der Strömungsgeschwindigkeit w des Fluids und der Breite S des als ebener Spalt approximierten Kühlkanals [123, S. 8-10]. Zusätzlich müssen die kinematische Viskosität ν , die Dichte ρ , die spezifische Wärmekapazität c_p und die Wärmeleitfähigkeit λ des im BTMS verwendeten Mediums bekannt sein. Für die Bestimmung dieser Stoffeigenschaften wurde die freie Software *CoolProp* [124] in das Modell integriert, wodurch die physikalisch korrekte Abbildung aller in Fahrzeug-TMS gängigen Medien möglich ist. Die Berechnung von $\alpha_{Zelle,BTMS,j}$ und $T_{BTMS,j}$ erfolgt für jeden Kühlkanal einzeln unter

der Verwendung von strömungsmechanischen Korrelationsgleichungen. Dieses Vorgehen wird in der Vorveröffentlichung [22] näher erläutert.

Neben der Wärmedissipation an die Umgebung und das BTMS kommt es zu einem von Temperaturunterschieden zwischen den Zellen hervorgerufenen Wärmeaustausch \dot{Q}_λ , der über ein thermisches Netzwerk beschrieben werden kann. Für eine Zelle, die mit n weiteren Zellen im thermischen Kontakt steht, definiert über die individuellen Temperaturen $T_{Zelle,i}$ der Nachbarzellen und die Wärmeleitwiderstände $R_{\lambda,i}$ zwischen den verschiedenen Zellen, lässt sich die Wärmebilanz für die betrachtete Zelle aufstellen:

$$\dot{Q}_\lambda = -\frac{T_{Zelle}}{\sum_{i=1}^n R_{\lambda,i}} + \sum_{i=1}^n \frac{T_{Zelle,i}}{R_{\lambda,i}} \quad (5.4)$$

Hiermit sind alle Wärmequellen und -ströme für jede Zelle des Batteriesystems bekannt und die Zelltemperatur $T_{Zelle,k}$ des aktuellen Zeitschrittes k kann über die diskrete Rechenvorschrift

$$T_{Zelle,k} = \frac{\dot{Q}_{Zelle,VL} + \dot{Q}_\infty + \dot{Q}_{BTMS} + \dot{Q}_\lambda}{m_{Zelle} c_{Zelle}} \Delta t + T_{Zelle,k-1} \quad (5.5)$$

mit dem Zeitschritt Δt , in Abhängigkeit der Masse m_{Zelle} , der spezifischen Wärmekapazität c_{Zelle} und der Temperatur des vergangenen Zeitschrittes $T_{Zelle,k-1}$ berechnet werden.

Um die Wärmeströme sowie die Wirkung der BTMS Architektur und der Wärmedurchgangskoeffizienten zwischen den LIB korrekt einschätzen zu können, sind zusätzliche Informationen über die geometrische Anordnung und Orientierung der Zellen erforderlich. Hierfür wird zusätzlich zur Anzahl der seriell und parallel verschalteten Zellen s und p die Anzahl der Ebenen e und an parallelen Zellen pro Ebene $pe = \frac{p}{e}$ eingeführt. Dies ergibt die in Abbildung 5.7 dargestellte geometrische Repräsentation. Hierdurch ist die Anordnung der LIB zueinander bestimmt und die thermischen Wechselwirkungen innerhalb des Batteriesystems können definiert werden.

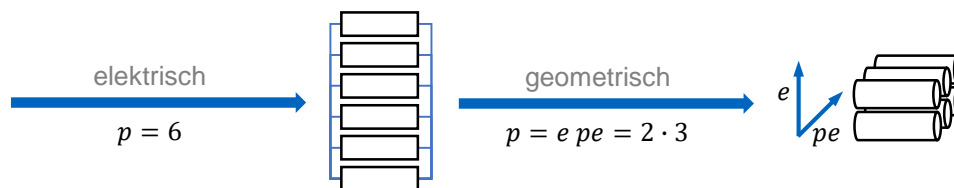


Abbildung 5.7: Beschreibung der geometrischen Anordnung der Zellen

Mit dem Simulationsmodell lassen sich folglich alle batteriesysteminternen Wärmeströme und der Wärmeaustausch mit der Umgebung und dem BTMS darstellen. Zum Abgleich mit Messwerten von realen Systemen kann der Einfluss der Platzierung der Temperatursensoren nachgestellt werden [125]. Für Zusatzkomponenten wie PTC oder Heizfolie, die nicht im Betrachtungshorizont der Arbeit liegen, besteht für nachfolgende Untersuchungen die Möglichkeit der einfachen Integration, weil die entsprechenden Schnittstellen für das thermische Verhalten bereits vorhanden sind. Zusätzlich ist der Ansatz der thermischen Simulation flexibel genug, beliebige Wärmeströme innerhalb des Packs zu modellieren. Somit kann nicht nur die reine Wechselwirkung zwischen den Zellen betrachtet werden, sondern auch Einflüsse wie Stromableiter und Modulgrenzen miteinbezogen werden. Das Vorgehen zur Parametrierung und Validierung des Simulationsmodells wird im folgenden Unterkapitel erläutert. Das Vorgehen zur thermischen Packauslegung wird in Unterkapitel 7.4 anhand eines Beispiels vorgestellt.

5.4 Validierung des thermischen Systemmodells

Für die Validierung des thermischen Modells müssen zunächst die Verlustleistungen und die Wärmekapazitäten der Zellen bekannt sein. Erst danach können die Effekte auf Systemebene validiert werden. Diese Betrachtungen wurden zum Teil in [19] vorveröffentlicht und werden an dieser Stelle zusammengefasst und teilweise ergänzt. Aufgrund der Entscheidung, die Zellen als thermische Punktmassen zu betrachten, wird deren innere Temperatur als konstant und identisch zur Oberflächentemperatur angenommen. Diese Vereinfachung ist mit geringem Fehler möglich, wenn das Biot-Kriterium

$$Bi = \frac{\alpha_{\infty, \max} l}{\lambda_{\perp, \text{Zelle}}} < 1 \quad (5.6)$$

erfüllt ist [126, S. 746-747]. Hierbei ist Bi die Biot-Zahl, $\alpha_{\infty, \max}$ der maximale Wärmeübergangskoeffizient zwischen Zelle und Umgebung in der späteren Anwendung, l der maximale Abstand zwischen Mittelpunkt und Oberfläche und $\lambda_{\perp, \text{Zelle}}$ die minimale Wärmeleitfähigkeit der Zelle senkrecht zu den Elektrodenschichten [127]. Es wird also die Wärmeleitfähigkeit eines Körpers mit dessen Fähigkeit zur Wärmeabgabe an die Umgebung in Beziehung gesetzt. Je schlechter die innere Wärmeleitung und je besser die Wärmeabgabe an die Umgebung, desto höher der Temperaturgradient zwischen Kern und Oberfläche. Wird dieser zu hoch, ist die Annahme einer homogenen Temperaturverteilung nicht mehr valide.

Wird das thermische Zellverhalten korrekt wiedergegeben, müssen im nächsten Schritt die Wärmeströme innerhalb des Batteriepacks korrekt dargestellt werden. Im vorgestellten Simulationsmodell sind alle relevanten Pfade der Wärmeleitung abgebildet und folgen allgemein anerkannten und bewährten Modellierungsmethoden. Weil das Simulationsmodell für die Konzeptauswahl verwendet werden soll, sind alle notwendigen Annahmen zu den Wärmepfaden so getroffen, dass die Wärmeabfuhr aus den Zellen und dem Batteriesystem tendenziell unterschätzt wird. Daher ist davon auszugehen, dass die Leistungsfähigkeit einer unter Verwendung des Simulationsmodells abgeleiteten BTMS Architektur in jedem Fall eine ausreichende Temperierung des Batteriesystems ermöglicht. Es kann daher eine Ergebnisqualität erwartet werden, die mindestens eine vergleichende Betrachtung unterschiedlicher Konzepte ermöglicht.

Eine durch Messungen belegte, allgemeine Validierung des gesamten thermischen Systemmodells gestaltet sich hingegen als schwierig und konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht erfolgreich abgeschlossen werden. Bereits die Parametrierung und Validierung des thermischen Zellmodells stellt eine große Herausforderung dar und ist trotz aller Sorgfalt stets mit Unsicherheiten behaftet. Weil die Wärmefreisetzung einer LIB ohne spezialisierte Messgeräte nicht direkt gemessen, sondern lediglich über deren Temperaturänderung abgeschätzt werden kann, verfälschen alle nicht exakt zu bestimmenden Wärmeströme zwischen Zelle und Umgebung das Ergebnis. Dies ist bei jeglicher Zyklisierung der Zelle der Fall, weil unabhängig der Güte der thermischen Abschirmung Wärmeströme über die Ableiter in die Kabel nicht verhindert werden können. Baumann führte im Rahmen seiner Dissertation ausführliche thermische Vermessungen auf Zellebene durch [92, S. 45-50], auf deren Ergebnisse im Rahmen dieser Arbeit zurückgegriffen wird.

Für die Parametrierung auf Systemebene wurde ein Versuch auf Modulebene durchgeführt, mit dem Ziel, die Eignung der im thermischen Systemmodell modellierten Möglichkeiten der Wärmeübertragung zu überprüfen. Hierfür wurde der in Abbildung 5.8 visualisierte Versuchsaufbau verwendet. Ein Modul aus zwölf in direktem thermischen Kontakt zueinander stehenden PHEV 2 Zellen des Herstellers Samsung SDI wurde in einer auf konstante Temperatur eingestellten

Klimakammer so präpariert, dass Zelle 6, nahe der Mitte, mit einer Strombelastung beaufschlagt werden kann und alle weiteren Zellen nicht belastet werden. Weil in diesem Aufbau nur Zelle 6 Verlustleistung produziert, wird erwartet, dass Wärmeübertragung innerhalb des Moduls stattfindet und so die benachbarten Zellen erwärmt. Wärmeverluste über die freiliegenden Oberflächen der Zellen führen gleichmäßig Wärme aus dem System ab, wodurch sich nach längerer Zeit der Belastung das in Abbildung 5.8 exemplarisch skizzierte statische Temperaturprofil ergibt, das mittels an jeder zweiten Zelle angebrachten Temperatursensoren bestimmt werden kann. Zusätzlich werden die Lufttemperaturen $T_{\infty,1-2}$ nahe des Moduls gemessen, um eventuelle Temperaturschwankungen der Klimakammer und deren Einfluss auf das thermische Systemverhalten aufdecken zu können. Mittels eines Optimierungsverfahrens sollten anschließend die Werte für $\alpha_{Zelle,\infty}$ und R_{λ} bestimmt und mittels einer dynamische Strombelastung des kompletten Moduls validiert werden.

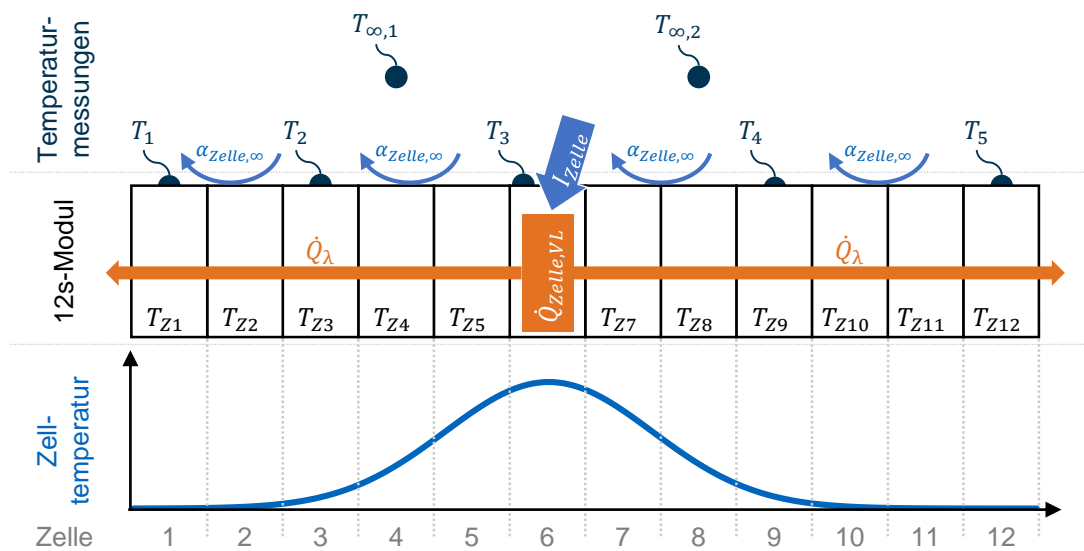


Abbildung 5.8: Versuchsaufbau zur Validierung des thermischen Systemmodells

Während ein simulativ durchgeführter Vorversuch die Brauchbarkeit des vorgeschlagenen Vorgehens zeigen konnte [128, S. 26-28], wurden bei der realen Versuchsdurchführung keine verwertbaren Ergebnisse erzielt. Dies liegt einerseits an der Temperaturregelung der eingesetzten Vötsch VC³ 4100 Klimakammer, deren Gebläse einen starken Luftstrom an der Moduloberseite erzeugte und deshalb von keinem konstanten Wert für $\alpha_{Zelle,\infty}$ über die komplette Oberseite des Moduls ausgegangen werden kann. Zusätzlich kann die Lufttemperatur T_{∞} in Modulnähe nicht konstant gehalten werden, weil sich durch das hohe Volumen der Klimakammer Messungenauigkeiten ergeben und nur ein einzelner Temperatursensor in der Kammer vorhanden ist, auf dessen Messwert geregelt wird. Das Gebläse ist jedoch zwingend notwendig, weil durch die hohe thermische Masse des Moduls eine lange Wartezeit notwendig ist, bis sich ein statisches Temperaturprofil einstellt und die abgegebene Verlustleistung die Kammer ansonsten unzulässig stark erwärmt. Zusätzlich zeigt sich ein starker Einfluss auf die Temperaturverteilung über die Wärmeabfuhr an den Seitenflächen des Moduls, wodurch auf eine signifikante Wärmeübertragung über diesen Weg geschlossen werden kann. Weil keine Einzelzellen des verwendeten Typs vorhanden waren, konnte keine isolierte Betrachtung ohne die negativen Einflüsse des Modulgehäuses durchgeführt werden. Aufgrund des durch den verwendeten Versuchsaufbau nicht quantifizierbaren Abweichungen werden die Temperaturmessungen verfälscht und sind daher unbrauchbar. Eine Optimierung der Modellparameter auf die Messwerte würde, sofern überhaupt möglich, einen Verlust des physikalischen Bezugs der Parameter bedeuten, wes-

halb hiervon abgesehen wurde und das thermische Verhalten im weiteren Verlauf der Arbeit konservativ abgeschätzt wird.

Wird die Validierung von der Modul- auf die Systemebene erweitert, ist mit weiteren Schwierigkeiten zu rechnen. Sobald eine Parallelschaltung oder schwankende Umgebungstemperaturen auftreten, beeinflussen die elektrisch/thermischen Wechselwirkungen Stromverteilung und Wärmegeneration des Systems, wodurch weitere Unsicherheiten bei der Bestimmung der zellspezifischen Verlustleistung und damit der verschiedenen Wärmeströme erwartet werden. Dieses Problem muss nach den Ergebnissen der Arbeit als nach wie vor ungelöst betrachtet werden. Eine vielversprechende Lösungsmöglichkeit ist der Aufbau von Referenz-Batteriesystemen auf Basis unterschiedlicher Zelltypen mit elektrisch und thermisch exakt vermessenen Einzelzellen. Durch gezielte Isolierung können nachvollziehbare Wärmepfade geschaffen werden, in die, beispielsweise über thermoelektrische Module, definierte Wärmeströme eingebracht werden können. Zusätzlich müssen Aufbauten für die Validierung unterschiedlicher BTMS Konzepte vorgesehen werden. Für die Validierung unter Strombelastung ist, sofern die für die globale Modellvalidität notwendige Parallelschaltung verwendet wird, zusätzlich eine Strommessung jeder Zelle notwendig, um die individuellen Verlustleistungen abschätzen zu können.

5.5 Bewertung der Zellbelastung

Nach der thermischen Auslegung des Batteriesystems kann die Belastung jeder Zelle für unterschiedliche Lastzyklen und BTMS Ansteuerungen simuliert werden. Der Aufbau eines Alterungsmodells und vor allem die zur Parametrierung nötigen Messreihen sind mit hohem Zeitaufwand verbunden [129, S. 412] und daher für einen ersten Vergleich unterschiedlicher Konzepte, wie er im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt werden soll, nicht zielführend. Aufgrund des direkten kausalen Zusammenhangs zwischen der über die Belastung auf die Batterie ausgeübten Stressfaktoren und der Alterung [130] kann jedoch eine erste vergleichende Abschätzung über das Schädigungspotential unterschiedlicher Auslegungen auf die Zellen durchgeführt und Systemkonzepte mit unzulässig hohen Belastungen aussortiert werden.

In einer Vorveröffentlichung [37] wurden die unterschiedlichen Stressfaktoren auf LIB diskutiert und kritische Betriebszustände im Hinblick auf die Alterung identifiziert. Befindet sich ein Batteriekonzept während des Betriebs häufig innerhalb dieser kritischen Zonen, muss folglich mit beschleunigter Alterung gerechnet werden. Die für die Bewertung der Belastung relevanten Betriebsparameter wie Spannung, Strom, Temperatur und SOC liegen nach der Simulation als Zeitreihen vor, was eine Einschätzung, vor allem für Alterungsmechanismen aufgrund einer Kombination mehrerer Stressfaktoren, kompliziert macht und mit den langen zu betrachtenden Zeiträumen zusätzlich zu hohem Datenaufkommen führt [19]. Zu Erleichterung der Belastungsbewertung wird daher das Prinzip der Lastkollektivanalyse (LA) eingesetzt.

Die LA wurde ursprünglich für die mechanische Bauteilauslegung entwickelt, wird jedoch auch erfolgreich für die Batteriesystemauslegung und Alterungsuntersuchungen verwendet [130, 131, 132, 133]. Das Grundprinzip wird in Abbildung 5.9 gezeigt. Bei der LA werden die zeitreihenbasierten Eingangssignale durch Klassierverfahren in ihre Frequenzanteile und deren Amplitude zerlegt und geordnet. Aus den möglichen Zählverfahren wird für diese Arbeit die auf der Momentanwertzählung basierende Verweildauerklassierung gewählt. Für die Diskussion weiterer Zählverfahren und ihrer Anwendung sei auf die Vorveröffentlichung verwiesen [37]. Mittels der Verweildauerklassierung wird bestimmt, wie lange sich ein Signal innerhalb unterschiedlicher,

vorher festzulegender Intervalle befindet [134, S. 13], wodurch eine Bewertung der Einwirkdauer der unterschiedlichen Stressfaktoren auf das Batteriesystem ermöglicht wird. Die Klassierung kann für einzelne Parameter oder Kombinationen hiervon durchgeführt werden. Wird ein einzelner Parameter klassiert, ergibt sich eine zweidimensionale Darstellung der Verweildauern. Die Abszisse zeigt hierbei die Intervalle des betrachteten Parameters an, die Ordinate die Verweildauer in diesen. Analog führt eine zweiparametrische Klassierung zu einer dreidimensionalen Darstellung. Theoretisch sind Lastkollektive beliebig hoher Parameteranzahl möglich, diese sind jedoch grafisch nicht mehr sinnvoll darstellbar und müssen über andere Herangehensweisen interpretiert werden. Dies ist beispielsweise bei dem dreiparametrischen Kollektiv der Fall, das zur Abschätzung des Auftretens von Lithium-Plating verwendet wird [135]. Hier bietet sich die Möglichkeit der Einführung einer Straffunktion, über die ein skalarer Wert iteriert wird, sobald sich das System in einer Zone kritischer Betriebsparameterkombinationen befindet [19].

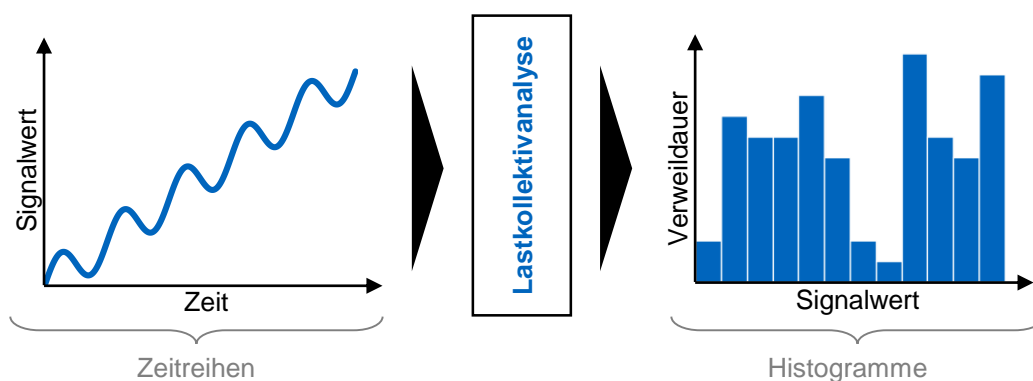


Abbildung 5.9: Ablauf der Lastkollektivanalyse (nach [85, S. 19])

Aufgrund der langen Betrachtungszeiträume, der hohen zeitlichen Auflösung und der großen Systeme ist es nicht zielführend, die LA erst nach Beendigung der Simulation aus den Zeitreihen zu erstellen, weil die entstehenden Datenmengen kaum noch sinnvoll zu handhaben sind. Aus diesem Grund sind die Verfahren derart implementiert, dass die Klassierung zur Laufzeit geschieht und am Ende der Simulation direkt die Lastkollektive ausgegeben werden. Hierdurch kann eine Reduzierung der anfallenden Datenmenge um bis zu 98 % [19] erreicht werden. Weil die Datenmenge der Lastkollektive bei einer Verlängerung der Betrachtungszeiträume nur unwesentlich steigt [19], besitzt der implementierte Ansatz zusätzlich das Potenzial in weiterführenden Arbeiten für den Einsatz im BMS von Fahrzeugen adaptiert zu werden.

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte LA-Ansatz erlaubt eine grundsätzliche, qualitative Abschätzung der Systembelastung, jedoch keine Aussage über das tatsächliche quantitative Alterungsverhalten. In einem möglichen nächsten Schritt können diesen Belastungsereignissen durch Alterungsreihen an realen Zellen jedoch korrespondierende Alterungsanteile zugeordnet werden, wodurch sich das tatsächliche Degradationsverhalten bestimmen lässt [133, S. 2]. Auch wenn der Ansatz um tatsächliche Alterungsinformationen ergänzt wird, kann die Batteriealterung nicht in letzter Konsequenz erfasst werden. Untersuchungen zeigen eine Abhängigkeit der Batteriealterung von der vorhergegangenen Reihenfolge der Belastungsereignisse [136]. Diese Information geht durch die LA konzeptbedingt verloren. Es ist jedoch festzuhalten, dass auch viele dedizierte Alterungsmodelle die Pfadabhängigkeit der Alterung nicht abbilden, daher kann erwartet werden, dass die durch die LA vorhergesagte grundsätzliche Alterungstendenz zutrifft.

5.6 Auswahl des thermischen Batteriekonzepts

Es wurde bereits gezeigt, dass die Auslegung des BTMS stark von den verwendeten Zellen, der elektrischen Verschaltung und den geometrischen Randbedingungen des Batteriesystems abhängt. Zusätzlich ergeben sich sekundäre Einflüsse des BTMS auf das Package: Unter Umständen benötigt die ideale BTMS Lösung zu viel Bauraum und lässt sich daher nicht mit dem Gesamtfahrzeug vereinbaren. Aus diesen Gründen ist die BTMS Auslegung eng mit der elektrischen und geometrischen Auslegung verzahnt und muss für jedes neue Batteriesystemkonzept durchlaufen werden. Dies bedeutet, dass für jede elektrische Systemauslegung, die auf Basis des in Kapitel 4 vorgestellten Vorgehens erstellt wurde, eine eigene BTMS Auslegung erfolgen muss. Das im Folgenden zusammengefasste Vorgehen wird durch ein Simulationsmodell unterstützt [121] und wurde in [19, 22] vorveröffentlicht.

Als höchste Belastung für Batteriesysteme in BEV wurde in Unterkapitel 2.6 bereits das Schnellladen identifiziert, weshalb dieses Leistungsprofil als Eingangsgröße für das Simulationsmodell dient. Hieraus wird über das elektrisch/thermische Simulationsmodell die zellindividuelle Strom- und Temperaturbelastung bestimmt, wodurch der Einfluss unterschiedlicher BTMS Auslegungen betrachtet werden kann. Neben der elektrischen Verschaltung und dem Package auf Systemebene wird auch die Modulebene betrachtet; die Modularisierung eines großen Batteriesystems ist aus Gründen der Montierbarkeit und Wartung ein essenzieller Bestandteil der Systemauslegung [63, S. 96]. Zusätzlich beeinflussen die Modulgrenzen die Wärmeleitung innerhalb des Batteriepacks stark und bieten einen hervorragenden Angriffspunkt für Thermomanagementmaßnahmen.

Tabelle 5.2: Zusammenhang zwischen den Verschaltungsvarianten und den Raumrichtungen

Verschaltung	Variable	Raumrichtung	Ebene
Seriell	s	x-Achse	Modul & System
Parallel (pro Ebene)	pe	y-Achse	Modul & System
Ebenen	e	z-Achse	Modul & System
Parallel (gesamt)	$p = epe$	y-z-Ebene	Modul & System

Zu Beginn der Systemauslegung werden anhand der bekannten Abmessungen und elektrischen Eigenschaften der verwendeten LIB Module erstellt, die anschließend innerhalb des Batteriesystems angeordnet werden. Die Logik zur Anordnung sowohl auf der Zell- als auch der Modulebene beruht auf der in Unterkapitel 5.3 vorgestellten $e-pe-s$ -Logik. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind den Verschaltungsvarianten auf Modul- und Systemebene stets dieselben, in Tabelle 5.2 aufgeführten Raumrichtungen zugeordnet. Die x-Achse beschreibt hierbei die Fahrtrichtung, die z-Achse steht senkrecht zur Straße. Bei Batteriesystemen hoher Spannungslage ist es häufig nicht möglich, die Seriellschaltung rein in einer Raumrichtung anzuordnen, vielmehr werden mehrere Seriellstränge neben- oder übereinander angeordnet. Aufgrund der dadurch entstehenden hohen Anzahl an Freiheitsgraden, die vor allem die BTMS Auslegung erheblich unübersichtlicher gestalten würde, verzichtet das Simulationsmodell auf die Repräsentation dieser Anordnung. Weil die seriellen Stränge ähnliches thermisches Verhalten zeigen, kann die Systemauslegung auf einen Strang beschränkt werden, dessen Randbedingungen aus denen des Gesamtsystems skaliert werden können. Ergeben sich besondere thermische Anforderungen, wie beispielsweise die Kühlung nur eines Modulstranges, können die Stränge mit unterschiedlichen Eigenschaften durch zwei getrennte Durchläufe im Simulationsmodell betrachtet werden. Die einzelnen Module und das Gesamtsystem werden anschließend auf die Erfüllung der Randbedingungen überprüft

und bei Erfolg der BTMS Auslegung zugeführt. Konzepte, die eine oder mehrere Bedingungen nicht erfüllen, werden von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Für die automatische Platzierung der BTMS Kühlkanäle werden mehrere Möglichkeiten unterstützt. Diese sind in Abbildung 5.10 aufgeführt. Es kann zwischen Kühlung an den äußeren Packgrenzen, zwischen den Modulen in allen Raumrichtungen und der Kühlung im Inneren der Module, ebenfalls in allen Raumrichtungen und an beliebigen Stellen, gewählt werden. Anschließend wird bestimmt, welche Zellen mit dem jeweiligen Kühlkanal in Kontakt stehen und anhand der Abmessungen und Strömungsbedingungen innerhalb des Kanals können die Wärmeübergangskoeffizienten zwischen den Zellen und dem Kühlkanal berechnet werden. Weil sich durch den Platzbedarf des BTMS die Abmessungen des Batteriesystems ändern, müssen die geometrischen Randbedingungen des Systems nochmals überprüft werden. Anschließend erfolgt die elektrisch/thermische Simulation und Belastungsbewertung des Batteriesystems inklusive BTMS. Im letzten Schritt können die unterschiedlichen Konzepte miteinander verglichen und bei Bedarf aussortiert oder nachgebessert werden.

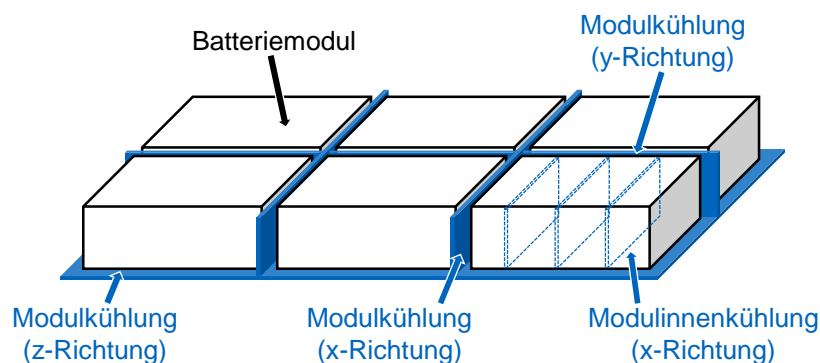


Abbildung 5.10: Möglichkeiten der automatischen BTMS Platzierung (nicht dargestellt: Wärmesenken an den Außenseiten des Batteriesystems, Modulinnenkühlung in y- und z-Richtung)

Der Algorithmus liefert Systemauslegungen, die die notwendigen Spezifikationen erfüllen. An dieser Stelle stellt sich zwangsläufig die Frage, welches dieser Konzepte das Optimum darstellt und in den nächsten Auslegungsschritten weiterverfolgt werden soll. Hinsichtlich der Erfüllung der Anforderungen für diese finale Konzeptauswahl liefern die Ergebnisse der Belastungsbewertung einen ersten Anhaltspunkt. Bei der Betrachtung der Simulationsergebnisse (Unterkapitel 7.5) wird schnell sichtbar, ab wann zusätzlicher Aufwand, etwa durch die Verwendung weiterer Kühlkanäle oder höherer Volumenströme, nur noch geringe Verbesserungen der Betriebsbedingungen erzeugt, beziehungsweise, das Weglassen eines Kühlkanals den Temperaturgradienten innerhalb des Systems unzulässig erhöht. Durch die hohe Anzahl an möglichen Freiheitsgraden hinsichtlich Zellauswahl, Modularisierung, BTMS Architektur, Auswahl des Fluids und Dimensionierung der Kühlkanäle, aber auch Kriterien wie Montierbarkeit, die über die reine Belastung hinausgehen und sich daher nur schwer quantifizieren und vergleichen lassen, ergibt sich in der Gesamtheit jedoch ein komplexes Kosten-Nutzen-Verhältnis. Die finale Konzeptauswahl kann daher nicht rein anhand der Belastung erfolgen. Aufgrund der vielen unterschiedlichen Rahmenbedingungen, unter denen die Auswahl getroffen werden kann, ist dieser letzte Auswahl-schritt nicht mehr Teil dieser Arbeit. Dies wird in der Diskussion in Unterkapitel 8.4 nochmals aufgegriffen.

Eine Möglichkeit, der Komplexität zu begegnen, besteht darin, den Lösungsraum bereits im Vorfeld durch eine Vorauswahl möglicher Technologien zu beschränken. Eine im Rahmen einer Studienarbeit durchgeführte Analyse zeigt einen signifikanten Zusammenhang der Fahrzeugklas-

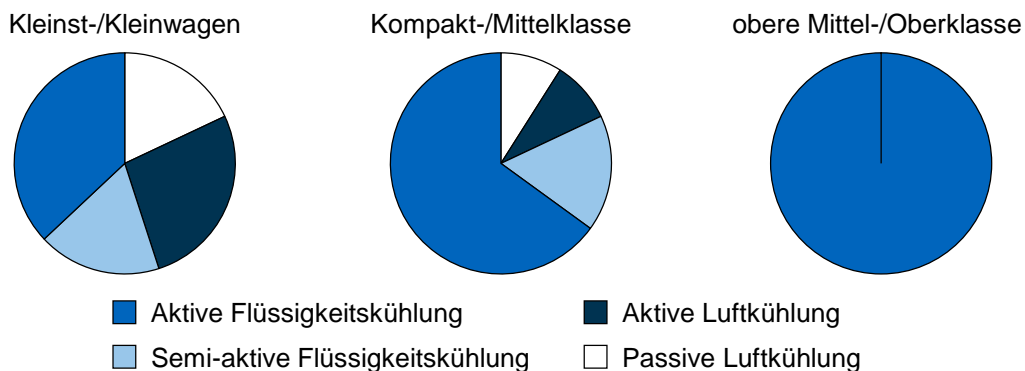


Abbildung 5.11: BTMS-Maßnahmen in Abhängigkeit der Fahrzeugklasse (nach [104, S. 51-54])

se mit der verwendeten grundsätzlichen BTMS Lösung [104, S. 51-54]. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Abbildung 5.11 zusammengefasst und in Anhang C vollständig aufgeführt. Weil die Fahrzeugklasse direkt das verfügbare Package, die Leistungs- und Reichweitenanforderungen und den durch das Preisniveau der Fahrzeuge möglichen Aufwand beeinflusst, sind die Voraussetzungen vergleichbar und können als Ausgangspunkt für die eigene Konzepterstellung dienen. Die Fahrzeugklasse bestimmt zusätzlich die Anforderungen an das Thermomanagement auf Fahrzeugebene [137]; ein Einfluss auf das BTMS, der keinesfalls vernachlässigt werden darf und daher im folgenden Kapitel näher betrachtet wird.

6 Integration in das Thermomanagement des Gesamtfahrzeugs

Im letzten Schritt des Auslegungsprozesses wird das Batteriekonzept in das Gesamtfahrzeug integriert. Wurde in den letzten Schritten die Belastung des Batteriesystems allein durch Ladezyklen abgebildet, werden in diesem Schritt nun reale Anwendungsszenarien und Umgebungsbedingungen berücksichtigt. Je nach Auslegung des VTMS ergeben sich Rückkopplungen zwischen den thermischen Eigenschaften der Antriebsstrangkomponenten mit dem BTMS, die die Temperierung des Batteriesystems je nach Situation beeinträchtigen, aber auch positiv beeinflussen können. Zur Hinführung an die Problemstellung werden in diesem Kapitel die Grundlagen des Thermomanagements von BEV betrachtet. Anschließend wird ein Vorgehen zur Bestimmung der thermischen Eigenschaften elektrischer Antriebsstränge vorgestellt. Aufbauend auf diese Ergebnisse wird das VTMS Simulationsmodell entwickelt, dessen Parametrierung und Validierung ebenfalls diskutiert wird. Das Modell ermöglicht die Untersuchung des Einflusses und der Potenziale unterschiedlicher VTMS Systemarchitekturen. Daraus werden Empfehlungen zur Auswahl des VTMS Konzepts abgeleitet.

6.1 Thermomanagement von Elektrofahrzeugen

Innerhalb des Betrachtungshorizonts des VTMS steht in dieser Arbeit die Sicherstellung der Einhaltung der erlaubten Temperaturbereiche der Antriebsstrangkomponenten im Vordergrund. Die Temperaturniveaus und die Art und Größenordnung des Klimatisierungsbedarfs der einzelnen Komponenten sind in Tabelle 6.1 aufgeführt. Für alle Leistungsangaben wird Volllast angenommen, die für die elektrische Maschine (EM) und Leistungselektronik (LE) im Alltagsbetrieb stets nur für kurze Zeit abgerufen wird. Es ist offensichtlich, dass in BEV, anders als bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor, nicht genügend frei verfügbare Wärmeenergie zur Verfügung steht [137], um den Klimatisierungsbedarf des Innenraums und des Batteriesystems zu decken. Mit der Traktionsbatterie ist darüber hinaus eine Komponente mit einem eng umgrenzten Betriebsbereich und geringer Toleranz gegenüber Temperaturänderungen vorhanden, wodurch dem Thermomanagement höchste Priorität eingeräumt werden muss. Das Batteriesystem befindet sich auf einem gänzlich anderen Temperaturniveau wie die restlichen Komponenten des Antriebsstrangs, weshalb innerhalb des VTMS von BEV zwischen Hochtemperatur (HT) und Niedertemperatur (NT) Komponenten unterschieden wird [52].

Zusätzlich muss das VTMS die Heiz-, Kühl- und Entfeuchtungsleistung für den Fahrzeuginnenraum zur Verfügung stellen [56, S. 9], wodurch sich ein direkter Einfluss auf den Komfort der Fahrzeuginsassen ergibt und auch gesetzliche Anforderungen hinsichtlich der Temperaturniveaus und Leistung des Klimatisierungssystems (HVAC) erfüllt werden müssen [56, S. 19]. Diese Leistung muss in aktuell standardmäßig in BEV verbauten Heizsystemen komplett von

Tabelle 6.1: Temperaturniveaus und Klimatisierungsbedarf unterschiedlicher Fahrzeugkomponenten nach [109, S. 16]

Komponente	Typischer Temperaturbereich	Einteilung	Klimatisierungsbedarf	
			Art	max. Leistung
Batteriesystem [55, S. 13]	15 °C bis 40 °C	NT	Heizen, Kühlen	5 kW [‡] (Spitze)
Innenraum [55, S. 14-15]	21 °C bis 27 °C	NT	Heizen, Kühlen	12 kW (Dauer)
Elektrische Maschine [55, S. 14]	< 180 °C	HT	Kühlen	5 kW [‡] (Spitze)
Leistungselektronik [55, S. 14]	< 125 °C bis 150 °C	HT	Kühlen	5 kW [‡] (Spitze)
Ladegerät [†]	< 125 °C bis 150 °C	HT	Kühlen	5 kW [‡] (Dauer)

[†] bei Annahme der Verwendung gleicher Halbleiter wie für die Leistungselektronik [‡] Annahme für $P = 100 \text{ kW}$, $\eta = 95 \%$

der Batterie zur Verfügung gestellt werden [138, S. 318], wodurch sich der, in Unterkapitel 2.4 bereits diskutierte, gravierende Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Fahrzeugreichweite ergibt. Dies kann durch eine Vorkonditionierung des Fahrzeugs zwar deutlich reduziert werden [139], weil jedoch auch der Fall des „Laternenparkers“ ohne dauerhafte Verbindung zum Stromnetz abgedeckt werden soll, kann dieser Umstand nicht als gegeben angesehen werden. Das VTMS muss folglich in der Lage sein, Innenraum und Batterie eines komplett ausgekühlten oder aufgeheizten Fahrzeugs möglichst schnell in die zulässigen Temperaturbereiche zu bringen. Gleichzeitig muss das System effizient genug arbeiten, um trotz des Klimatisierungsaufwands noch eine akzeptable Reichweite bieten zu können. Weil LIB und der Mensch ähnliche Temperaturbereiche bevorzugen [13, S. 130], muss davon ausgegangen werden, dass, wenn das VTMS durch das HVAC des Innenraums bereits hoch belastet ist, auch für das BTMS ein signifikanter Energieaufwand nötig ist. Steht für die Deckung des Bedarfs beider Systeme nicht ausreichend Leistung zur Verfügung, muss der Einfluss der reduzierten Klimatisierungsleistung des BTMS auf die Batterietemperatur festgestellt und überprüft werden, ob die Erfüllung der Leistungsanforderungen auch unter diesen Bedingungen noch möglich ist.

Je nach Architektur des VTMS sind die thermischen Rückkopplungen zwischen Gesamtfahrzeug und BTMS unterschiedlich groß. Im einfachsten Fall wird eine Batterie mit einer vom VTMS unabhängigen Klimatisierung verwendet. Hierbei ergeben sich geringe bis keine Abhängigkeiten vom restlichen Antriebsstrang, jedoch können auch keine Synergieeffekte durch gemeinsame TMS-Komponenten genutzt werden. Werden BTMS und VTMS kombiniert, ergibt sich deutliches Potenzial zu Verbesserung des thermischen Verhaltens des Gesamtfahrzeugs [55, 84]. Gleichzeitig erhöht sich jedoch auch der Aufwand, weil die entstehende komplexe Interaktion zwischen den unterschiedlichen TMS ausgelegt, gesteuert und abgesichert werden muss. Bei gekoppelten BTMS und VTMS sind annähernd beliebige Kombinationen und Zwischenstufen möglich, deren Herleitung und Diskussion nicht Teil dieser Arbeit sein sollen; an dieser Stelle werden lediglich einige grundlegende Möglichkeiten und Komponenten für den Aufbau von VTMS erläutert.

Der Wärmeaustausch zwischen dem VTMS und der Umgebung erfolgt über den Kühler und ist damit abhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit [140, S. 36-38]. Zusätzlich kann der Luftdurchsatz bei Bedarf durch den Kühlerlüfter erhöht werden. Innerhalb der Fluidkreisläufe wird der Volumenstrom durch eine Pumpe geregelt und kann über Ventile geschlossen oder ganz oder anteilmäßig verzweigt werden [141, S. 15-16]. Werden mehrere Kreisläufe verwendet, können diese über Wärmetauscher thermisch miteinander gekoppelt werden [141, S. 16-18]. Dies wird beispielsweise genutzt, um einen Kühlmittelkreislauf mit dem Kältemittelkreislauf der Innenraum-Klimaanlage oder eines Kleinklimageräts zu koppeln und ihn so unter Umgebungstemperatur abkühlen zu können [108, S. 169]. Für das Heizen der Fluidkreisläufe können

elektrisch betriebene Heizgeräte verwendet werden. In prototypischen Studien werden zudem Lösungen wie PCM oder thermoelektrische Module [142] zur Verwendung im VTMS vorgeschlagen, mit dem Ziel, die thermischen Eigenschaften weiter zu verbessern. Weil ein möglichst geringer Energieverbrauch angestrebt wird, werden im Rahmen dieser Arbeit alle Komponenten, die zusätzlichen Energieverbrauch bedeuten, also Kleinklimageräte, elektrische Zuheizter und thermoelektrische Module, von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Aus den vorhergegangenen Betrachtungen wurde einerseits ein genereller Mangel von frei verfügbarer Klimatisierungsleistung in elektrischen Antriebssträngen und andererseits vielfältige Möglichkeiten zur thermischen Kopplung der Antriebsstrangkomponenten und des Innenraums über das VTMS deutlich. Letzteres bietet vor allem für den Fall des Heizens interessante Möglichkeiten: Auch wenn die verfügbare Abwärme der Antriebsstrangkomponenten zur Temperierung von Innenraum und Batterie alleine nicht ausreichend ist und durch Zuheizter ergänzt werden muss [143], lässt sich über die Kopplung unter Umständen trotzdem der Energiebedarf verringern und ein Reichweitenvorteil erlangen. Weitere Ideen zur Effizienzsteigerung des VTMS beinhalten die Nutzung des Batteriesystems als Wärmespeicher [139, 144] oder die latente Speicherung überschüssiger Wärme mittels eines PCM im Zustand der unterkühlten Schmelze, wodurch sich in Vorversuchen im Rahmen von Studienarbeiten [145, 146] entscheidende Effizienzgewinne erzielen ließen. Diese wurden bereits in einer Vorveröffentlichung dargelegt [142], auf die an dieser Stelle für weiterführende Informationen verwiesen sei.

Bei den genannten Verfahren muss dem Nutzen jedoch der zusätzliche Aufwand gegenübergestellt werden. Vor allem ein komplexes und entsprechend aufwendiges VTMS, wie bei der in [142] vorgestellten Untersuchung, ist aktuell vermutlich nicht sinnvoll in Serie umsetzbar, weshalb sich die weiteren Betrachtungen dieser Arbeit näher an den Stand der Technik anlehnen. Zur Vorbereitung dieser im weiteren Verlauf des Kapitels durchgeführten Betrachtungen ist zunächst die Bestimmung der thermischen Eigenschaften elektrischer Antriebsstränge nötig, um den Klimatisierungsbedarf und die verfügbare Wärmeleistung in BEV einschätzen zu können. Anschließend werden unterschiedliche VTMS Architekturen und deren Einflüsse auf die Komponententemperaturen verglichen und bewertet.

6.2 Bestimmung der thermischen Eigenschaften elektrischer Antriebsstränge

Für die Modellierung und Parametrierung des VTMS Modells müssen die thermischen Eigenschaften und relevanten Wechselwirkungen des elektrischen Antriebsstrangs bekannt sein. Grundsätzlich ist die thermische Vermessung der Antriebsstrangkomponenten äußerst aufwändig, weil sie für jede Komponente einzeln durchgeführt wird und spezialisierte Prüfstände benötigt werden [147]. Dies widerspricht dem Anspruch der Arbeit, eine große Anzahl unterschiedlicher Konzepte schnell vergleichen zu können und erfordert zusätzlich die Verfügbarkeit der Komponenten des geplanten Antriebsstranges. Weil dies in der frühen Entwicklungsphase, oder im universitären Umfeld nur schwer realisierbar ist, wird daher ein Weg aufgezeigt, die thermischen Eigenschaften eines Antriebsstranges schnell und effizient im Gesamtfahrzeug vermessen zu können.

Für die Entwicklung des VTMS sind vor allem die Verlustleistung und Temperaturen der Antriebsstrangkomponenten von Interesse. Abbildung 6.1 zeigt den Leistungsfluss von der Batterie bis zum Rad. Auf diesem Weg wird zuerst die in den LIB gespeicherte chemische Energie als

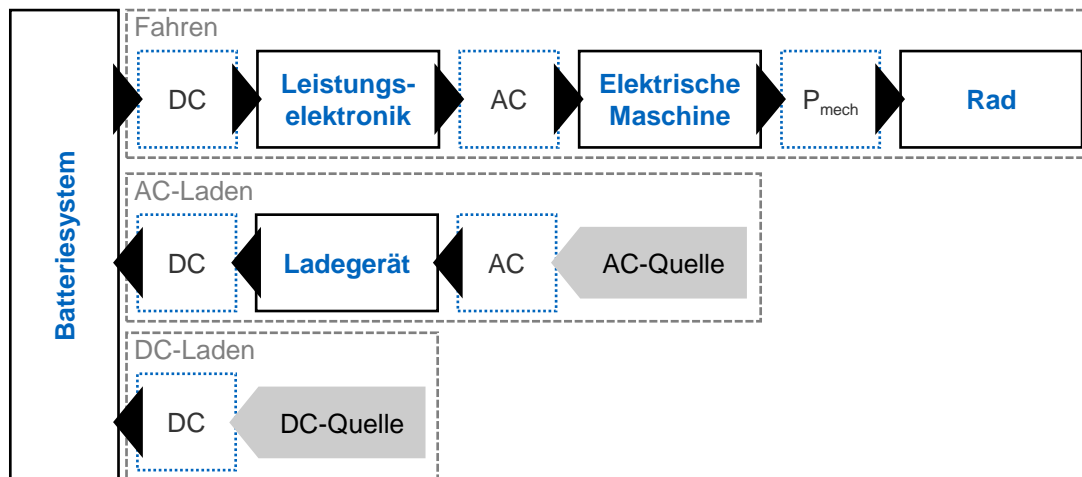


Abbildung 6.1: Leistungsflüsse im elektrischen Antriebsstrang

Gleichstrom (DC) freigesetzt. Dieser wird in der LE in Wechselstrom (AC) und schließlich in der EM von elektrischer Leistung P_{el} in mechanische Leistung P_{mech} umgewandelt. Die mechanische Leistung wiederum wird durch ein Getriebe in die Ausgangsdrehzahl an den Rädern übersetzt und erzeugt damit den Vortrieb [138, S. 266]. Beim Laden mit Wechselstrom wird dieser durch ein im Fahrzeug verbautes Ladegerät zuerst gleichgerichtet und fließt dann in die Batterie; beim Laden mit Gleichstrom entfällt der Weg über das Fahrzeugladegerät [148]. Der jeweilige Wirkungsgrad der Energiewandlung definiert die abgegebene Verlustleistung und damit den Wärmeeintrag in das VTMS, sofern die Komponente daran angebunden ist. Die Wirkungsgrade sind dabei nicht konstant, sondern abhängig vom Betriebspunkt der jeweiligen Komponente [149]; man beachte insbesondere den vom SOC abhängigen Innenwiderstand von LIB. Sind die Komponentenwirkungsgrade bekannt, können aus einem vorgegebenen Geschwindigkeits- oder Ladeprofil direkt die Verlustleistungen und daraus der Wärmeeintrag in das VTMS bestimmt werden. Im Umkehrschluss kann bei bekannter Leistung und Wärmefreisetzung auf den Wirkungsgrad der Komponenten geschlossen werden. Für die VTMS Simulation werden folglich die Wirkungsgrade aller Antriebsstrangkomponenten in Abhängigkeit ihres Betriebszustandes benötigt, um gemeinsam mit ihrer Wärmekapazität die individuellen Temperaturen berechnen zu können. Die Temperatur wird zusätzlich durch Wärmeaustausch mit dem VTMS, benachbarten Komponenten und der Umgebung, etwa durch Fahrtwind, beeinflusst.

Die Verlustleistung innerhalb von LE, EM und Batteriesystemen entsteht an bestimmten Bauelementen im Inneren dieser Komponenten und gelangt über komplexe Wärmeleitungswege in das VTMS oder die Umgebung. Die genauen Orte der Wärmefreisetzung und die innere Temperaturverteilung der Komponenten sind für diese Arbeit jedoch nicht relevant, weshalb für die VTMS Auslegung analog zum Vorgehen bei der Batteriesystemmodellierung alle Komponenten als thermische Punktmassen angenähert werden. Hierdurch vereinfacht sich die Betrachtung auf eine durchschnittliche Komponententemperatur, die zu einem Wärmeaustausch mit dem VTMS führt. Auf der Systemebene des VTMS gilt dies auch für das Batteriesystem, obwohl hierfür ein detailliertes Simulationsmodell vorhanden ist. Eine gekoppelte BTMS und VTMS Simulation wäre zwar grundsätzlich möglich, führt aber zu einem hohen zusätzlichen Rechenaufwand, der in keinem Verhältnis zum zusätzlich erlangten Informationsgehalt steht, weil das Batteriesystem ohnehin bereits auf Worst Case Bedingungen ausgelegt ist.

Die diskutierten Einflüsse und der unklare innere Aufbau der Komponenten und der Wärmeübertrager in das VTMS machen die thermische Vermessung ohne spezialisierte Prüfstände

äußerst fehleranfällig. Um trotz dieser Schwierigkeiten aussagekräftige Antriebsstrangparameter zu erlangen, wurde der in Abbildung 6.2 vorgestellte Messaufbau in ein Versuchsfahrzeug integriert. In vorangegangenen Untersuchungen wurden bereits Stromsensoren hinter der Batterie, der LE und den Drehmomentsensoren an den Antriebswellen verbaut [150], wodurch eine genaue Vermessung des Leistungsflusses innerhalb des Antriebsstrangs und die Bestimmung der Wirkungsgrade von Batterie, LE und EM ermöglicht wird. Diese Wirkungsgrade wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit mit einem Auslegungstool für EM [151], beziehungsweise mit dem thermischen Batteriesystemmodell nochmals plausibilisiert, was eine Abschätzung der Verlustleistungen abhängig vom jeweiligen Betriebszustand erlaubt.

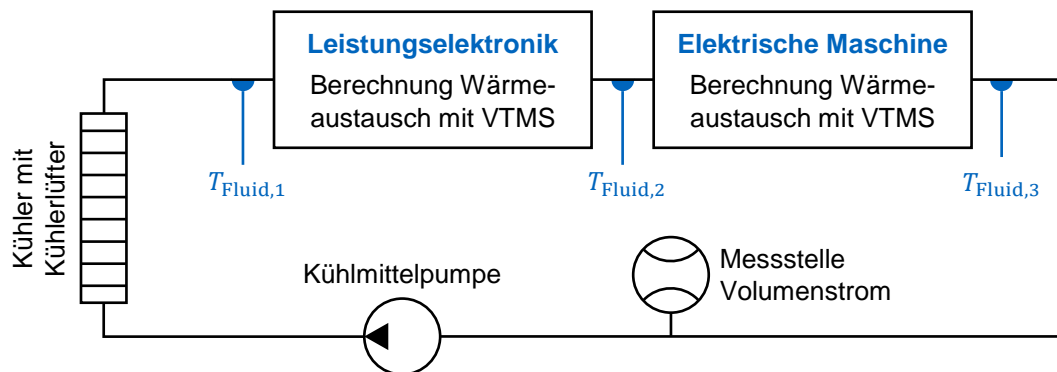


Abbildung 6.2: Versuchsaufbau zur Vermessung im Gesamtfahrzeug [20]

Für die Messung der Wärmeeinträge in das VTMS müssen die Volumenströme des Kühlmittels sowie die Temperaturen $T_{\text{Fluid},i}$ vor und nach den einzelnen Komponenten bekannt sein. Weil die genauen Bedingungen des Wärmeübergangs in das VTMS an den thermischen Anbindungen der Komponenten nicht exakt bekannt sind, werden Fläche und Wärmedurchgangskoeffizienten zu einem gemeinsamen Wert UA_i zusammengefasst, mit dem der Wärmestrom zwischen einer Komponente i und dem VTMS analog Abbildung 5.1 bestimmt werden kann. Der UA -Wert ist hierbei abhängig vom Volumenstrom und daher für mehrere Stützstellen innerhalb der erwarteten Betriebsbereiche zu parametrieren. Bei der Vermessung realer Fahrzeuge zeigen sich zusätzliche Einflüsse auf die Komponententemperaturen, die sich vermutlich auf erzwungene Konvektion der Umgebungsluft um die Komponenten zurückführen lassen [140, S. 77]. Im speziellen Fall des Versuchsträgers kommt es zusätzlich zu Einflüssen der Bordnetzspannung auf die Referenzspannung der Temperatursensoren. Diese hochgradig fahrzeugspezifischen Aspekte haben keinen Einfluss auf den im weiteren Verlauf der Arbeit geplanten Vergleich unterschiedlicher VTMS Architekturen und werden daher nicht weiter berücksichtigt.

6.3 Modellierung des Fahrzeugthermomanagements

Anhand des geforderten Funktionsumfangs und der durch die thermische Vermessung des Gesamtfahrzeugs erreichbaren Qualität und Zuverlässigkeit der Systemparameter wird nun das Simulationsmodell des VTMS entwickelt. Zuerst wird die Modellierungsmethode hergeleitet und anschließend der Aufbau des Modells und seine grundsätzliche Funktionsweise erläutert. Für Details der Implementierung und die formelmäßigen Zusammenhänge sei auf die zugehörige Vorveröffentlichung [20] und auf den unter einer Open Source Lizenz verfügbaren Quellcode [152] verwiesen.

Für die thermische Modellierung von Fluidströmen existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Möglichkeiten. Neben den Korrelationsgleichungen, die für das in Unterkapitel 5.3 vorgestellte BTMS Modell verwendet wurden, besteht die Möglichkeit der physikalischen Simulation mit Programmen wie Simscape [153] sowie der exakten Simulation der Strömungsbedingung mittels der Methoden der numerische Strömungsmechanik (CFD) [154], zu denen die Finite-Volumen-Methode (FVM) [155, S. 83-87] mit ein-, zwei- oder dreidimensionaler Betrachtung gezählt wird. Weil für das VTMS, im Vergleich zur BTMS Simulation, die thermischen Vorgänge im Fluid an sich stärker in den Fokus rücken – als Beispiel genannt seien der Kühler und die Aufteilung und Vereinigung des Fluidstroms durch Dreivegeventile – ist eine Betrachtung durch Korrelationsgleichungen nicht mehr ausreichend. Aus diesem Grund wird für das Modell eine eindimensionale und isobare Betrachtung mittels der FVM gewählt. Eine mehrdimensionale Abbildung oder eine exakte Berechnung der Fluideigenschaften mittels aufwendigerer Methoden der CFD bringen aufgrund der noch spärlichen Detailinformationen der Geometrie des Kühlkreislaufs nur geringen Mehrwert, vor allem, wenn dieser dem um Größenordnungen höheren Rechenaufwand [119, S. 78-79] gegenübergestellt wird.

Die in Abbildung 6.3 visualisierte FVM basiert auf der Aufteilung des Fluidstroms in definierte Kontrollvolumina, für die die thermodynamischen Grundsätze der Massen-, Impuls- und Energieerhaltung angewandt werden [155, S. 83]. Jedes finite Volumen (FV) wird als Punktmasse betrachtet, dessen thermische Eigenschaften durch sein Volumen und die Fluidcharakteristika definiert sind. Mit der aus dem bekannten Volumenstrom bestimmbaren Strömungsgeschwindigkeit und den Wärmeströmen in das System, können zu jedem Zeitschritt der Simulation die individuellen Temperaturen $T_{FV,i}$ der einzelnen FV interpoliert werden [156, S. 47]. Hierdurch lassen sich auch die Auswirkung externen Wärmeeintrags, beispielsweise über die Abwärme von Komponenten oder der Wärmeabgabe an die Umgebung, und fluidinterne Effekte wie die Konduktion darstellen. Die Konduktion innerhalb des Fluids muss zwingend mit abgebildet werden, ansonsten entstehen in der Simulation fälschlicherweise „heiße“ Bereiche innerhalb des Kühlkreislaufs, die mit der Geschwindigkeit der Fluidströmung im VTMS umlaufen [156, S. 121-124].

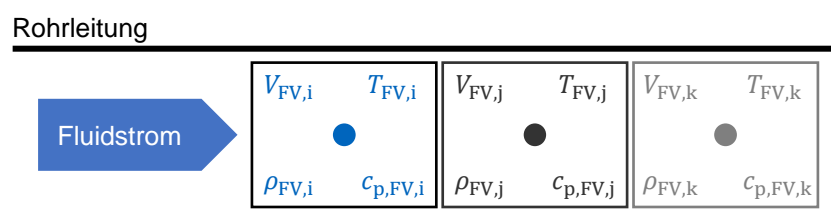


Abbildung 6.3: Prinzip der Finite-Volumen-Methode (nach [145, S. 12])

Die Struktur des in MATLAB/Simulink implementierten Modells und die betrachteten Komponenten sind in Abbildung 6.4 visualisiert. Die Belastung auf die Antriebsstrangkomponenten wird aus dem geforderten Geschwindigkeitsprofil berechnet. Aus Gründen der Rechenzeit wird hierfür eine Rückwärtssimulation verwendet. Es ist folglich im Voraus zu überprüfen, ob das Fahrzeug dem geforderten Geschwindigkeitsprofil folgen kann. Auch der Fall des Ladens kann dargestellt werden, optional unter Verwendung des internen Ladegeräts. Anschließend werden mittels Wirkungsgradkennfeldern und eines auf Batteriesystemebene skalierten ECM die Verlustleistungen von EM, LE und Batterie berechnet und diese an die Kühlkreislaufsimulation übergeben.

Während die Längsdynamik- und Komponentensimulation statisch implementiert sind [140, S. 27-31, 157], wird die Kühlkreislaufsimulation dynamisch anhand einer vom Benutzer definierten VTMS Architektur aufgebaut [156, S. 105-106]. Dies erlaubt die Simulation annähernd

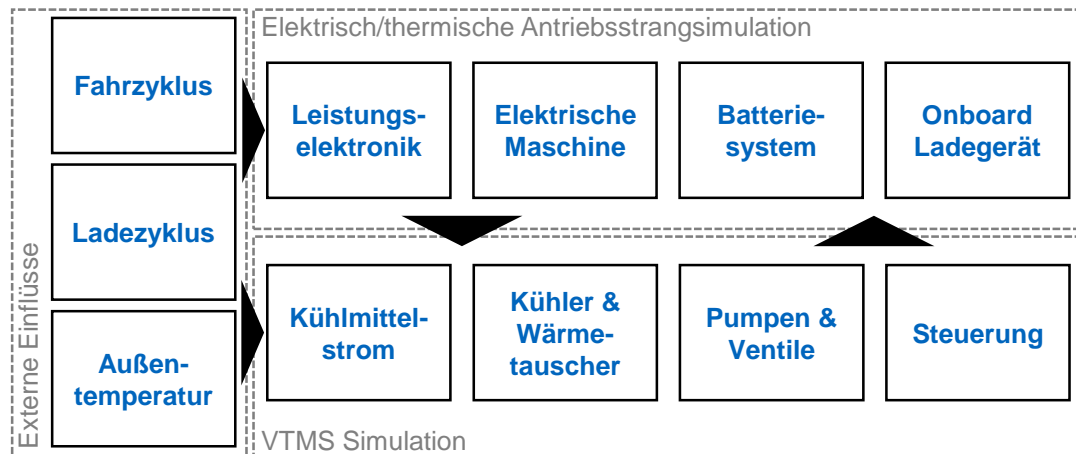


Abbildung 6.4: Aufbau des Fahrzeugthermomanagementsystem-Modells (nach [20])

beliebiger VTMS Konfigurationen, ohne Änderungen am Modell selbst durchführen zu müssen. Anhand der Definition des VTMS ist die Position jedes FV bekannt, wodurch die Eingangs- und Ausgangswärmeströme des VTMS den entsprechenden FV zugeordnet werden können. Die Rohrleitungen zwischen den Komponenten werden als adiabatisch angenommen, müssen aufgrund ihres enthaltenen Fluidvolumens, das entscheidend zur Wärmekapazität des Gesamtsystems beiträgt, aber ebenfalls bei der Systemdefinition berücksichtigt werden. Die für die Simulation benötigten Fluidparameter werden analog zum Vorgehen des BTMS Modells über die Open Source Software *CoolProp* [124] bestimmt.

Durch das Simulationsmodell ist es möglich, auch komplexe Kühlkreisläufe mit Verzweigungen und Vereinigungen darzustellen und mehrere Kühlkreisläufe über Wärmetauscher zu koppeln. Zusätzlich können Ventilstellungen, Volumenströme und die Drehzahl des Kühlerlüfters in Abhängigkeit der Fluid- oder bestimmter Komponententemperaturen gesteuert werden. Hierbei ist zu beachten, dass der Volumenstrom neben dem Einfluss auf die UA -Werte auch den notwendigen Simulationszeitschritt Δt bedingt, mit dem die Interpolation der Temperatur der FV durchgeführt werden muss. Je höher der Volumenstrom, desto kleiner muss Δt gewählt werden, um eine stabile Simulation zu gewährleisten, hierdurch steigt jedoch die Rechenzeit. Dies wird im Vorfeld der Simulation berechnet und Δt anschließend automatisch auf die notwendige Schrittweite eingestellt, die in jedem Fall eine stabile Simulation ermöglicht. Die Wärmeübertragung zwischen den Komponenten und dem Kühlkreislauf wird über den UA -Wert definiert, weshalb dieser experimentell für mehrere Strömungsgeschwindigkeiten ermittelt werden muss.

6.4 Validierung des Fahrzeugthermomanagements

Für die Validierung der VTMS Simulation dient das bereits in Unterkapitel 6.2 verwendete Fahrzeug mit dem in Abbildung 6.2 dargestellten Versuchsaufbau. Obwohl das Fahrzeug nur einen HT-Kreislauf besitzt, können durch diesen alle im Simulationsmodell beinhalteten Modellierungsstrategien hinsichtlich der Simulation der Wärmefreisetzung, Temperaturberechnung und des Wärmeaustauschs überprüft und thermische Kopplung mehrerer Komponenten über das VTMS betrachtet werden. Diese Ergebnisse sind auf die Traktionsbatterie und die weiteren Komponenten des VTMS Modells, wie Dreiwegeventile und Wärmetauscher, übertragbar, weil im Simulationsmodell alle Komponenten auf die gleichen grundlegenden Mechanismen aufbauen.

Während die Modellparametrierung mit statischen Belastungen durchgeführt wurde, werden für die Validierung dynamische Fahrzyklen eingesetzt, um sicherzustellen, dass die Simulation auch für unbekannte Belastungen korrekte Ergebnisse liefert. Zur Sicherstellung reproduzierbarer Bedingungen und der Vermeidung der Verfälschung der Messungen durch unvorhergesehene externe Einflüsse, wurden die Versuche auf einem Rollenprüfstand durchgeführt. Die vollständige Diskussion der Ergebnisse erfolgt in der Vorveröffentlichung [20]; ein Auszug hiervon ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Es wird deutlich, dass sowohl für die Komponenten-, als auch die Fluidtemperaturen ein hoher Grad der Übereinstimmung herrscht und zusätzliche Einflüsse, wie die Änderung der Luftgeschwindigkeit durch den Fahrzeugkühler durch das Zuschalten des Kühlerlüfters, zuverlässig abgebildet werden können. Folglich werden sowohl die Mechanismen der Verlustleistungen als auch die des thermischen Komponentenverhaltens und des Wärmeaustauschs mit dem VTMS korrekt dargestellt und bleiben im Gesamtsystem stabil.

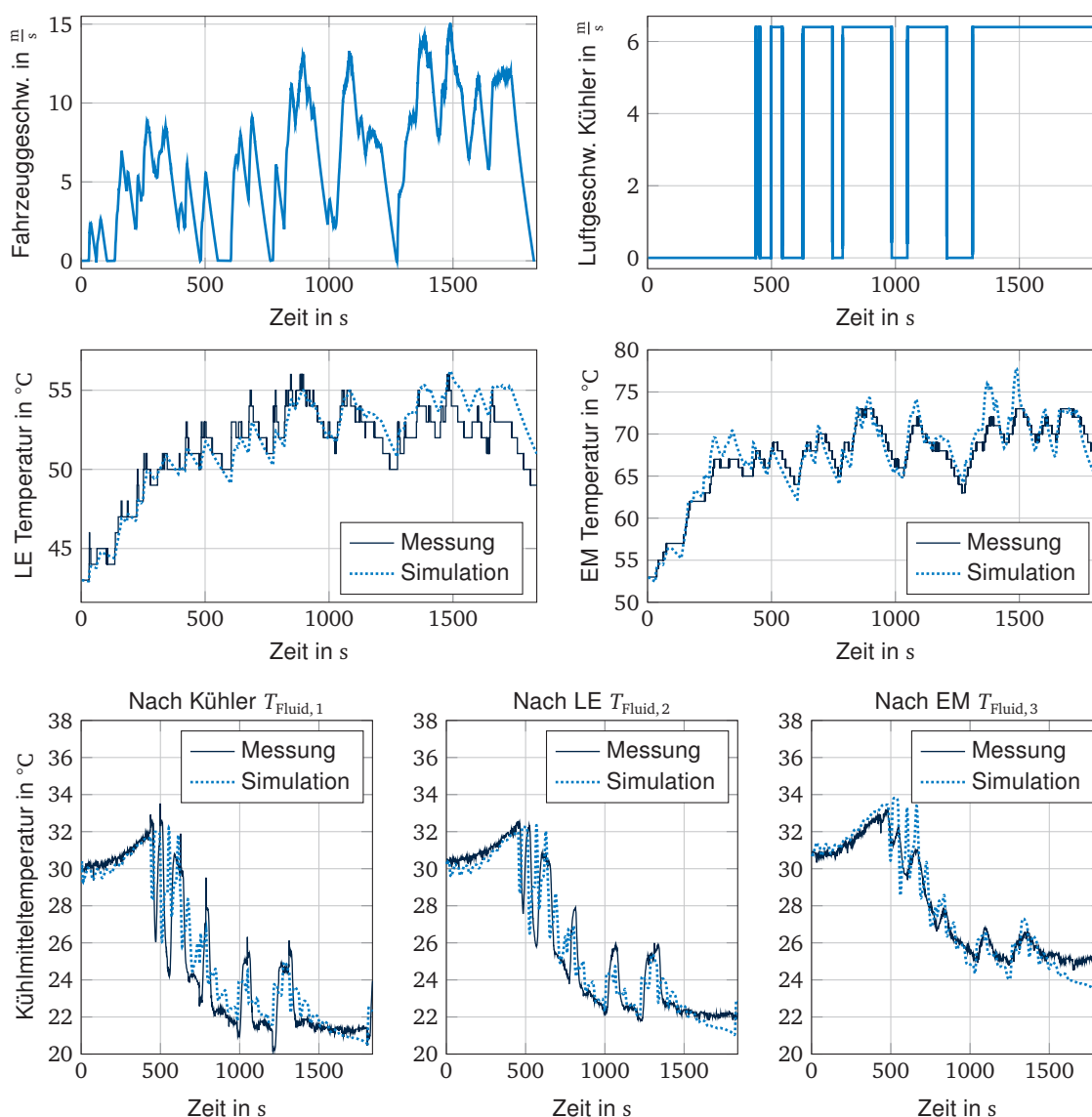


Abbildung 6.5: Auszug aus der Validierung des VTMS Modells (vorveröffentlicht in [20])

Oben links: Fahrzeuggeschwindigkeit. **Oben rechts:** Luftgeschwindigkeit durch den Kühler als Funktion des Schaltzustands des Kühlerlüfters. **Mitte links:** Simulierte und gemessene EM-Temperatur. **Mitte rechts:** Simulierte und gemessene LE-Temperatur. **Unten:** Simulierte und gemessene Kühlmitteltemperaturen nach Kühler, LE und EM. Umgebungstemperatur: 20 °C.

Zur Übertragbarkeit der Ergebnisse auf EM, LE und Batteriesysteme anderer Leistungsstufen wurde als zweiter Versuchsträger ein Renault Twizy betrachtet. Dieses Fahrzeug besitzt keinen Kühlkreislauf, zeichnet sich jedoch durch eine hervorragende Zugänglichkeit zu den Antriebsstrangkomponenten aus und erlaubt daher eine einfache thermische Vermessung. Für die Parameterbestimmung wurden die Komponenten bestmöglich isoliert und anschließend statische und dynamische Fahrprofile auf dem Rollenprüfstand absolviert. Durch die Messung der Erwärmung der Komponenten und einer Gegenüberstellung mit dem Gewicht konnten sowohl die angenommenen Wärmekapazitäten als auch die aus den Messungen aus Unterkapitel 6.2 und der mit der Methode aus [151] berechneten Wirkungsgradkennfelder und das thermische Batterieverhalten bestätigt werden [142, 145, S. 59-81, 146, S. 37-58].

Die Validierungsmessungen zeigen, dass das VTMS Simulationsmodell in der Lage ist das Verhalten eines VTMS zuverlässig wiederzugeben. Als problematisch stellen sich jedoch die vielfältigen externen Einflüsse auf das thermische Antriebsstrangverhalten dar. Bereits unter den kontrollierten Bedingungen der durchgeführten Messungen treten Effekte auf, die das thermische Verhalten der Komponenten überlagern und dadurch verfälschen. Bei dem verwendeten Versuchsfahrzeug tritt beispielsweise ab einer gewissen Raddrehzahl eine Luftverwirbelung auf, die die Wärmeabfuhr aus der EM an die Umgebung stark erhöht. Diese hochgradig fahrzeugspezifischen Einflüsse machen eine Anpassung des Simulationsmodells auf bestimmte Fahrzeuge äußerst aufwendig, weil die jeweiligen Effekte nicht allgemeingültig sind und daher kein Standardvorgehen zu ihrer Abbildung vorgesehen werden kann. Zusätzlich verfälschen diese Effekte die Parametrierungsmessungen. Wird ein VTMS Modell höchster Genauigkeit benötigt, kann auf eine Einzelvermessung der Komponenten auf spezialisierten Prüfständen daher nicht verzichtet werden. Ist, wie in dieser Arbeit, der Vergleich unterschiedlicher VTMS Architekturen das Ziel, kann die Modellgenauigkeit jedoch als ausreichend erachtet werden. Zusätzlich ist zu beachten, dass es sich bei beiden Versuchsträgern um Fahrzeuge handelt, deren Komponenten offen zugänglich verbaut sind und daher stark von der Umgebung beeinflusst werden. Bei den meisten Serienfahrzeugen sind die Komponenten des Antriebsstrangs in der Regel deutlich stärker gekapselt. Daher ist bei letzteren weniger direkte thermische Interaktion mit der Umwelt zu erwarten.

6.5 Einflüsse unterschiedlicher Systemarchitekturen

Im Gegensatz zu der in Kapitel 4 und 5 vorgestellten elektrisch/thermischen Batteriesystemauslegung, bei der ein festes Vorgehen zur Verschaltung und geometrischen Anordnung der Zellen, Module und BTMS Kühlkanäle vorgesehen werden kann, ist dies für das VTMS nicht mehr möglich. Die Möglichkeiten des Aufbaus und der Kopplung und Interaktion unterschiedlicher Kühlkreisläufe (KK) sind schlichtweg zu vielfältig, um dies, wie bei den vergangenen Auslegungsschritten, über simple Schnittstellen darstellen zu können. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt eine repräsentative Auswahl charakteristischer VTMS Architekturen hergeleitet, um den Lösungsraum zu verkleinern und für die Systemauslegung eine Vorauswahl hinsichtlich der optimalen Ausbaustufe des VTMS treffen zu können. Die Betrachtung der zu temperierenden Komponenten beschränkt sich hierbei auf EM, LE und das Batteriesystem. Um den Fokus allein auf technische Anforderungen legen zu können, werden Innenraum und Insassenkomfort des Fahrzeugkonzepts nicht mitbetrachtet.

In Unterkapitel 5.6 wurde bereits der Zusammenhang zwischen der Fahrzeugklasse und der Komplexität des BTMS aufgezeigt. Diese Beobachtungen gelten analog für das VTMS [104],

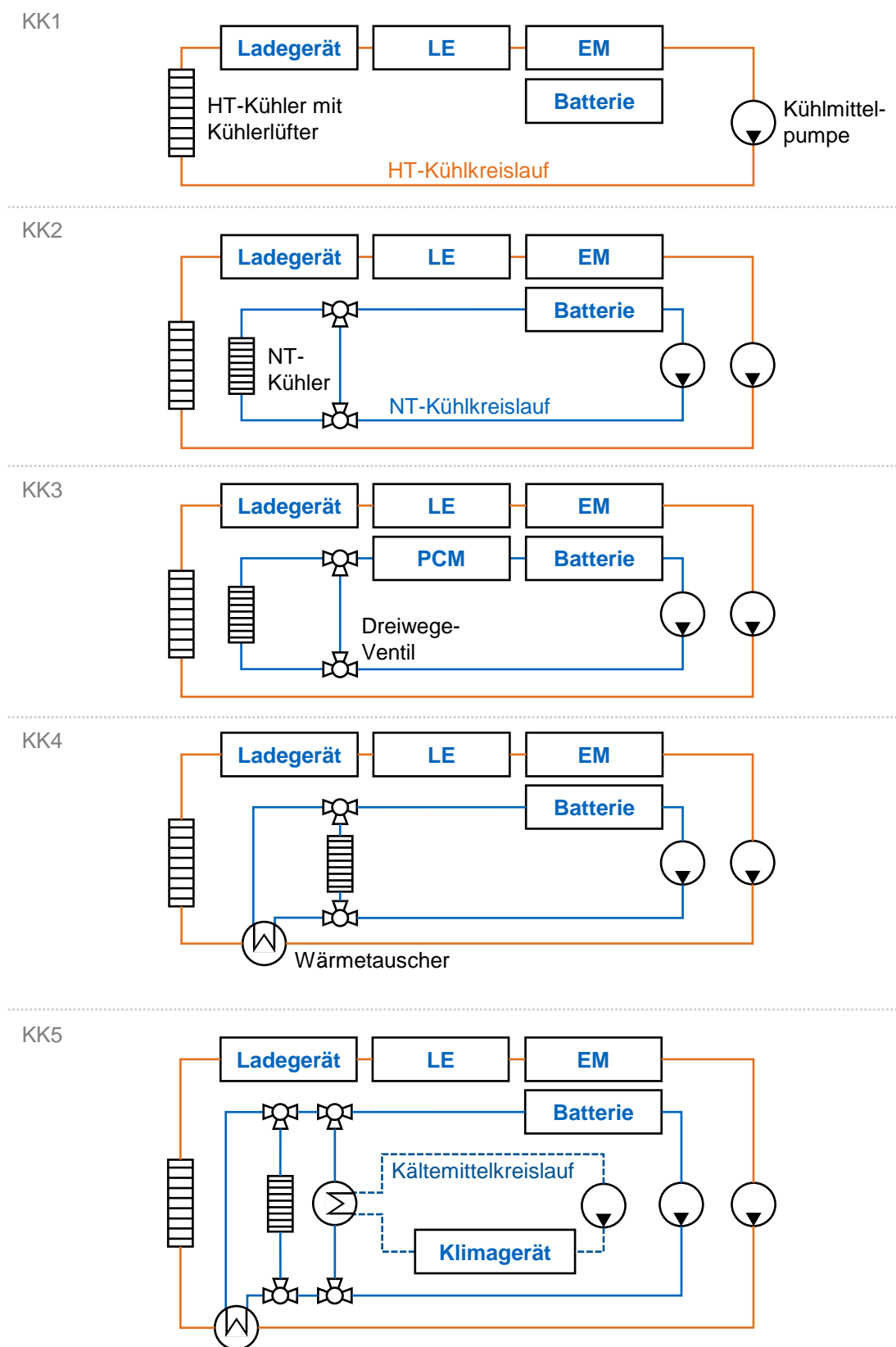


Abbildung 6.6: Berücksichtigte Kühlkreislaufarchitekturen innerhalb des VTMS Simulationsmodells (nach [104, 158])
a) KK1: Passive Kühlung der Batterie. **b)** KK2: Einbindung der Batterie in den NT-Kreislauf. **c)** KK3: Pufferung von Temperaturspitzen mittels PCM. **d)** KK4: Thermische Kopplung von NT- und HT-Kreislauf. **e)** KK5: Anbindung des NT- an den Kältemittelkreislauf.

einerseits hinsichtlich des verwendeten Kühlmediums, andererseits hinsichtlich der thermischen Kopplung zwischen den Antriebsstrangkomponenten und NT- und HT-Kreisläufen. Neben dem steigenden Anteil der Flüssigkühlung bei höheren Fahrzeugklassen, steigt der Grad der Kopplung an. Mit dem Ziel, alle Integrationsstufen exemplarisch abzubilden, wurden für die weiteren Untersuchungen dieser Arbeit die in Abbildung 6.6 dargestellten KK entworfen [104, 158], die im Folgenden erläutert werden.

In KK1 wird die Batterie rein passiv temperiert und es findet keinerlei thermische Interaktion zwischen Batteriesystem und restlichem Antriebsstrang statt. Innerhalb des HT-Kreislaufs sind die Komponenten aufsteigend, anhand ihrer erlaubten Temperaturgrenzen angeordnet. Grundsätzlich wäre es denkbar, das Ladegerät parallel zu EM und LE anzuordnen, weil beides niemals gleichzeitig betrieben wird und sich auf diese Weise zusätzlich die Strömungsverluste innerhalb des Kreislaufs vermeiden ließen. Die gewählte Anordnung stellt jedoch den einfachsten Fall und gleichzeitig das Worst Case Szenario dar. Bei kombinierten Fahr- und Ladezyklen geben in dieser Konfiguration alle Komponenten gleichzeitig Verlustleistung beziehungsweise Restwärme in das VTMS ab und belasten dieses daher stark. Dieser KK ist identisch mit dem VTMS des Versuchsfahrzeugs, mit dem die Parametrierung und Modellvalidierung durchgeführt wurde [20] und bietet daher die Möglichkeit zur Überprüfung der Simulationsannahmen.

KK2 erweitert KK1 um einen NT-Kreislauf, in den das BTMS eingebunden ist. Mit dem HT-Kreislauf findet keinerlei thermische Interaktion statt. Auch die Anordnung der Kühler zueinander ist, wie bei allen in dieser Arbeit verwendeten KK, nicht relevant. In der Realität würde sich der Kühler des NT- vor dem des HT Kreislaufs befinden, für die Darstellung in Abbildung 6.6 wurde dies zum Zweck einer optisch ansprechenderen Darstellung ignoriert. Um das Aufheizen des Batteriesystems bei niedrigen Umgebungstemperaturen zu beschleunigen, kann der Kühler mittels eines, in Abhängigkeit der Kühlmitteltemperatur geregelten, Dreiwegeventils umgangen werden. Bei Außentemperaturen, die höher als die Zieltemperatur der Batterie sind, führt dieses Vorgehen zu einer schnelleren Überhitzung der Batterie; es wäre in diesem Fall folglich besser, den NT-Kreislauf gar nicht erst zu betreiben. Um den Einfluss der Steuerung auf die KK möglichst gering zu halten und die Abgrenzung der VTMS Varianten untereinander nicht zu verwischen, werden diese und ähnliche Fälle durch die im Simulationsmodell implementierte simple Steuerung jedoch nicht abgefangen.

In KK3 wird der NT-Kreislauf von KK2 um einen PCM-Wärmespeicher zur Pufferung von Temperaturspitzen ergänzt. Die Platzierung des PCM erfolgt vor der Batterie, weil der bevorzugte Weg stets sein sollte, die Abwärme über den Kühler an die Umgebung abzuführen. Nur wenn dies nicht mehr möglich ist und das Kühlmittel mit immer noch erhöhter Temperatur den Kühler verlässt, wird diese Wärme vom PCM aufgenommen. Der Nachteil dieses Vorgehen liegt darin, dass das PCM nach Rückgang der Strombelastung der Batterie diese Wärme wieder abgibt und so die Temperaturbelastung der Batterie länger andauert. Es sei angemerkt, dass diese Art des PCM-Einsatzes nicht identisch ist zu der in Unterkapitel 5.2 diskutierten Platzierung im Inneren der Batterie. Auch wenn PCM sich in einer, mit Hilfe der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methoden, durchgeführten Studie als vielversprechende Ergänzung für das VTMS gezeigt hat [142], handelt es sich hierbei immer noch um ein experimentelles Vorgehen, weshalb bei diesem KK als einzigem ein Einsatz von PCM vorgesehen ist.

KK4 bietet die Option der thermischen Kopplung des NT- mit dem HT-Kreislauf mittels eines Wärmetauschers. Der Wärmetauscher ist im HT-Kreislauf hinter LE und EM, beziehungsweise dem Ladegerät angeordnet, um deren Abwärme bei niedrigen Temperaturen zur schnelleren Aufheizung der Batterie zu nutzen. Bei hohen Temperaturen wird der Kühlmittelstrom des

NT-Kreislaufs am Wärmetauscher vorbeigelenkt, sodass dieser KK gegenüber KK2 nur bei niedrigen Temperaturen zusätzlichen Nutzen bieten kann.

Den höchsten Funktionsumfang bietet KK5. Bei diesem KK wird der NT- neben dem HT-Kreislauf zusätzlich mit einem Kältemittelkreislauf gekoppelt. Im Gegensatz zu allen bisherigen KK besteht bei KK5 daher die Möglichkeit der Kühlung der Batterie bis unterhalb der Umgebungstemperatur. Auf den Zwischenschritt eines KK mit Kältemittelanbindung, aber ohne Möglichkeit der Heizung über den HT-Kreislauf, wird verzichtet, weil der Heiz- und Kühlfall im Betrieb nie gleichzeitig auftreten und sich die unterschiedlichen Funktionalitäten daher nur gering bis gar nicht beeinflussen sollten. Die weiteren in den Kältemittelkreislauf integrierten Komponenten, sei es das HVAC des Innenraums oder ein separates Kleinklimagerät, werden nicht betrachtet. Falls etwaige Restriktionen des Kältemittelkreislaufs bestehen, sind diese über seine verfügbare Leistung und das Temperaturniveau abzubilden.

Bei allen KK erfolgt die gleiche temperaturabhängige Anpassung des Volumenstroms innerhalb der Kreisläufe. Zudem sind die Schaltbedingungen der zur Umlenkung des Volumenstroms benutzten Dreiwegeventile identisch und so gewählt, dass die Idealtemperatur der Batterie möglichst lange gehalten wird. Der Kältemittelkreislauf in KK5 wird hingegen erst ab einer Fluidtemperatur des NT-Kreislaufs von 30 °C zugeschaltet, um dem hohen Energieverbrauch der Klimatisierung Rechnung zu tragen und diesen möglichst lange hinaus zu zögern. Für die Steuerung der KK werden wie bereits diskutiert keine externen Einflüsse wie die Außentemperatur miteinbezogen, um die Simulationsergebnisse übersichtlich und rein architekturbezogen zu halten. Eine vollständige Übersicht der Steuerungsparameter befindet sich in Anhang A.7.

Für die Abbildung des elektrischen und thermischen Verhaltens der Antriebsstrangkomponenten wird auf die in Unterkapitel 6.2 beziehungsweise 6.4 durchgeführten Validierungsmessungen zurückgegriffen. Von entscheidendem Einfluss auf die Komponententemperaturen ist hierbei die Wärmeabfuhr durch das VTMS, bestimmt durch die Volumenströme des Kühlmediums und die UA -Werte der Komponenten. Für die Bestimmung der Volumenströme wird auf Datenblätter von standardmäßig in Pkw verwendeten Kühlmittelpumpen zurückgegriffen. Die UA -Werte werden aus den Vorversuchen auf die Leistungsklasse des jeweils betrachteten Fahrzeugkonzepts nach folgender Logik skaliert: Je größer die jeweiligen EM und LE hinsichtlich ihres Drehmoments dimensioniert sind, desto mehr Fläche für die thermische Anbindung an das VTMS steht zur Verfügung. Für die Batterie wird für alle Speicherkapazitäten die gleiche Wärmeabfuhr angenommen, um Rückschlüsse über das Verhalten von gleich dimensionierten BTMS bei unterschiedlichen Batteriegrößen zuzulassen. Alle gewählten Parameter sind im Anhang A.7 aufgeführt.

Anschließend können die entwickelten VTMS Architekturen für unterschiedliche Fahrzeugkonzepte, Umgebungstemperaturen und Fahr- oder Ladezyklen simuliert werden. Alle relevanten Komponententemperaturen sowie die elektrische und mechanische Leistung und die Fluidtemperaturen an jeder Position innerhalb des VTMS werden berechnet und können anschließend zum Vergleich und zur Auswahl des VTMS Konzepts dienen. Dieses Vorgehen wird im Folgenden genauer vorgestellt.

6.6 Auswahl des Fahrzeugthermomanagements

Analog zur elektrischen und thermischen Systemauslegung werden an dieser Stelle allgemeine theoretische Überlegungen zu den Entscheidungskriterien bei der Auswahl des VTMS Konzepts

und der damit verbundenen Integration des Batteriesystems in das Gesamtfahrzeug vorgestellt. Die exemplarische Anwendung und Diskussion des Vorgehens anhand eines konkreten Fallbeispiels erfolgt in Unterkapitel 7.6. Verglichen mit der Batteriesystem-Ebene ist die Anzahl der externen Einflüsse und der möglichen Lösungswege für das VTMS nochmals höher und stark von Zielkonflikten bezüglich Leistungsfähigkeit und Komplexität geprägt. Ein Vorschlag für das Vorgehen zum Entwurf des VTMS ist in Abbildung 6.7 dargestellt.

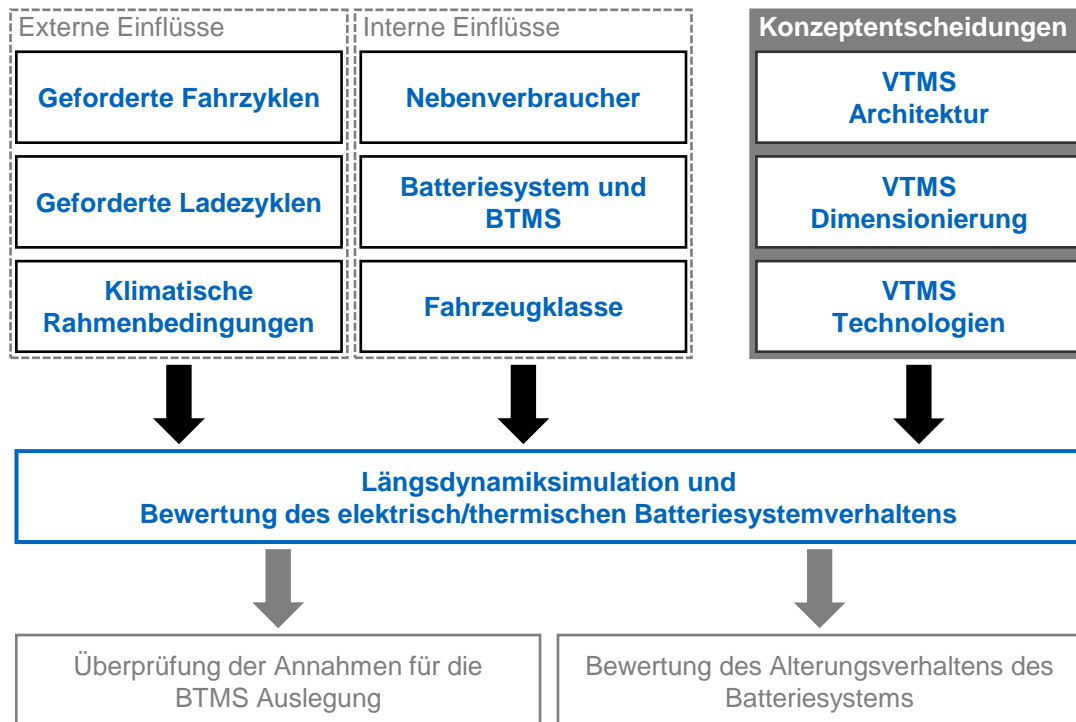


Abbildung 6.7: Vorgehen zum Entwurf des VTMS Konzepts

Zunächst müssen die Anforderungen an das Gesamtfahrzeug klar definiert werden. Dies umfasst die geforderten Fahr- und Ladezyklen oder Kombinationen hiervon, die ohne Derating durchlaufen werden müssen. Dieser Schritt wurde bereits für die in den vergangenen Kapiteln vorgestellte Auslegung des Batteriesystems absolviert; nun rückt jedoch das Verhalten des gesamten Antriebsstrangs in den Vordergrund. Dies ist daher eine Möglichkeit, die Annahmen bei der Batteriesystemauslegung nochmals zu überprüfen. Die definierten Zyklen bestimmen die Belastung der Antriebsstrangkomponenten. Zusätzlich muss abgeklärt werden, ob durch Nebenverbraucher im Fahrzeug bereits eine Grundlast auf der Batterie liegt, die die für den Vortrieb verfügbare Leistung limitiert. Sind diese Informationen bekannt, können über die Längsdynamiksimulation die Verlustleistungen [157] und das thermische Verhalten des Antriebsstrangs abgeschätzt werden.

Ein Kriterium für die Vorauswahl möglicher VTMS Architekturen sind die späteren klimatischen Bedingungen, unter denen das Fahrzeug eingesetzt wird. Besonders wenn das Fahrzeug bei extremen Umgebungstemperaturen in der Lage sein soll, volle Leistung zu erbringen, sind Lösungen zur Heizung und Kühlung des Batteriesystems unabhängig der Umgebungstemperaturen vorzusehen. Dies bedeutet jedoch, dass, falls diese hohen Anforderungen nicht gelten, oder im späteren Anwendungsland keine Temperaturen an einem oder beiden Enden des erlaubten Spektrums auftreten, diese Maßnahmen von vornherein ausgeschlossen werden können. Als Beispiel sei ein Fahrzeug genannt, das ausschließlich in Heißländern eingesetzt wird. Ein VTMS mit Zuheizern und einer aufwändigen Restwärmenutzung wäre hierfür die falsche Lösung, weil

die zusätzlichen Komponenten nie benötigt werden würden. Auch die Fahrzeugklasse übt großen Einfluss auf den Lösungsraum möglicher VTMS aus. An höherklassige Fahrzeuge werden deutlich umfassendere Ansprüche gestellt, was durch die TMS-Auslegung berücksichtigt werden muss [108, S. 165]. Gleichzeitig kommen aufwändige Verfahren für Klein- oder Kleinstwagen grundsätzlich nicht in Frage, weil in dieser Fahrzeugklasse kein Bedarf für aufwändige Systeme besteht [137]. Dies deckt sich mit der in Unterkapitel 5.6 vorgestellten Regressionsanalyse [104, S. 51-54], die ebenfalls für das VTMS valide ist.

Weitere Kriterien für die VTMS Auswahl betreffen die technischen Gegebenheiten. Ist das Batteriesystem bereits mit internen Maßnahmen zur Temperaturregulierung ausgestattet, z. B. PTC-Zuheizern, muss geklärt werden, ob der Nutzen einer zweiten Beheizungsmöglichkeit durch das VTMS den zusätzlichen Aufwand rechtfertigt, oder ob das VTMS nur die Kühlung des Packs übernehmen soll. Auch der Aufbau-, Steuerungs- und Absicherungsaufwand des gesamten TMS-Verbundes muss in Erwägung gezogen werden. Bei gekoppelten Systemen herrscht ein nicht zu vernachlässigendes Gefährdungspotential durch eine falsche Ansteuerung des Systems. Zusätzlich macht die aufwändige Verrohrung und ein eventueller Kältemittelkreislauf auf hohem Druckniveau die Abdichtung anspruchsvoll. Vor allem bei Prototypen im universitären Umfeld stellt sich die Frage, ob dieser Aufwand tatsächlich leistbar ist, oder grundsätzlich nur simplere VTMS in Erwägung gezogen werden sollten. Anhand der vorgestellten Kriterien zur Vorauswahl kann der Lösungsraum bereits bei der Auswahl des zu simulierenden VTMS entscheidend eingeschränkt werden. Die anschließend noch verbleibenden VTMS Konzepte können über eine Simulation verglichen werden.

Die VTMS Simulation liefert das thermische Verhalten aller Antriebsstrangkomponenten für unterschiedliche VTMS, Lastzyklen und Umgebungstemperaturen. Im Rahmen dieser Arbeit ist dabei vor allem die Temperatur des Batteriesystems von Interesse. Anhand der elektrisch/thermischen Belastung des Batteriesystems kann abgeschätzt werden, ob sich die LIB in alterungsrelevanten Bereichen befinden und ob, beziehungsweise in welchem Temperaturfenster, eine Erfüllung der Leistungsanforderung ohne Derating möglich ist. Für diese Aussage kann das in Unterkapitel 5.5 vorgestellte Verfahren zu Belastungsbewertung genutzt werden. Wird ein gekoppeltes TMS verwendet, können die Ergebnisse der VTMS Simulation dafür genutzt werden, die in der BTMS Auslegung abgeschätzten Kühlmitteltemperaturen nochmals zu überprüfen. Falls die Temperaturen stark abweichen, sollte die thermische Batterieauslegung nachgebessert werden, weil in diesem Fall eine Unter- beziehungsweise Überdimensionierung des BTMS vorliegen könnte. Die BTMS Auslegung wiederum beeinflusst die in der VTMS Auslegung verwendeten UA -Werte, weshalb bei einer Anpassung des BTMS auch das Verhalten des VTMS nochmals verifiziert werden sollte. Anschließend ist die Entwicklung des Batteriesystems und dessen Integration in das Gesamtfahrzeug abgeschlossen und das Konzept kann in weiteren Entwicklungsschritten weiter detailliert werden. Diese Schritte sind jedoch nicht mehr Teil dieser Arbeit.

7 Ergebnisse des Auslegungsprozesses

Nach der Herleitung des Auslegungsprozesses und der Entwicklung der Simulationsmodelle in den vergangenen Kapiteln, soll dieser Prozess nun exemplarisch angewendet werden. Hierfür werden zunächst die gewählten Anforderungen an das Batteriesystem und die verfügbaren Technologien vorgestellt und anschließend die Auslegungsergebnisse auf den einzelnen Systemebenen diskutiert.

7.1 Definition der Anforderungen

Es wurde bereits gezeigt, dass unterschiedliche Fahrzeugklassen, Leistungs- und Reichweitenanforderungen und Einsatzbedingungen jeweils unterschiedlich ausgelegte Antriebsstränge erfordern. Aus diesem Grund werden im Verlaufe dieses Kapitels mehrere unterschiedliche Anforderungen zugrunde gelegt, um deren Auswirkung auf die Batteriesystemauslegung und so die Plausibilität der vorgeschlagenen Systemkonfigurationen zu überprüfen. Die Anforderungen werden zugunsten der Darstellung besonders kritischer Fälle und der besseren Vergleichbarkeit mit realen Systemen auf den einzelnen Systemebenen unterschiedlich gewählt. Der spätere Anwendungsfall einer kompletten Auslegung über alle Systemebenen hinweg wird jedoch nicht außer Acht gelassen und anhand der späteren Ergebnisse ebenfalls diskutiert.

Die betrachteten Fahrzeugklassen sind in Tabelle 7.1 aufgeführt. Hierbei wird auf die Einteilung des Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) zurückgegriffen und die vier Fahrzeugklassen *Mini*, *Kompaktklasse*, *Mittelklasse* und *obere Mittelklasse* ausgewählt, die aktuell den Großteil des deutschen Fahrzeugbestandes ausmachen [159, S. 7]. Zu jeder Fahrzeugklasse wird ein hinsichtlich Reichweite und Antriebsleistung repräsentativer Vertreter ausgewählt, anhand dessen die für den Auslegungsprozess relevanten Fahrzeugparameter, wie Batteriegröße, Spannungslage, Gewicht und Luftwiderstand recherchiert werden. Für die Bestimmung dieser, in Anhang A.9 aufgeführten Größen, wird soweit möglich auf die Fahrzeugdatenbank des ADAC zurückgegriffen. Nicht allgemein zugängliche technische Details werden abgeschätzt [158, S. 27]. Erkennbar ist die Tendenz zu höheren Batteriekapazitäten und Fahrzeuggewicht bei aufsteigender Fahrzeugklasse. Eine Ausnahme stellt der BMW i3 mit seinen umfassenden Leichtbaumaßnahmen dar.

Tabelle 7.1: Betrachtete Fahrzeugklassen und zugehörige Spezifikationen [160]

KBA-Fahrzeugklasse	repräsentativer Vertreter	Gesamtgewicht in kg	Spannungslage in V	Batteriekapazität		Ladeleistung in kW
				in Ah	in kWh	
Mini	Renault Twizy	562	100,8	206,0	20,8	40
Kompaktklasse	VW e-Golf	1615	316,8	108,7	34,4	150
Mittelklasse	BMW i3	1320	345,6	120,2	41,5	150
Obere Mittelklasse	Tesla Model 3	1860	345,6	208,9	72,2	150

Die geforderten Belastungszyklen sind in Tabelle 7.2 zusammengefasst. Neben den Standardfahrzyklen *WLTC Class 3* und *CADC-Motorway* wird zusätzlich ein Zyklus mit einer mehrfach hintereinander durchgeführten, maximalen fahrzeugspezifischen Beschleunigung a_{\max} vorgesehen. Die Geschwindigkeitsprofile dieser Zyklen sind in Abbildung 7.1 dargestellt. Für höchste Belastung wird auf Batterieebene eine Konstantstrom, Konstantspannung (CCCV)-Schnellladung durchgeführt. Auf Gesamtfahrzeugebene erfolgt eine Autobahnfahrt mit zwischenzeitlichem Ladestopp, repräsentiert durch zwei CADC-Motorway mit einer zwischenzeitlichen CCCV-Schnellladung, deren Zeitbegrenzung eine Pause an einer Raststätte repräsentieren soll.

Tabelle 7.2: Geforderte Belastungszyklen

Name	Norm	Dauer in s		Geschwindigkeit in km/h	
		gesamt	Laden (max.)	max.	∅
WLTC Class 3	✓	1800	–	131	46,2
CADC-Motorway	✓	1068	–	130	96,9
CADC → CCCV-Schnellladen → CADC	–	3926	1560	130	53,0
Beschleunigung	–	130	–	<i>fzg.abh.</i>	<i>fzg.abh.</i>
CCCV-Schnellladen (nur Batterie)	–	<i>unbegr.</i>	–	–	–

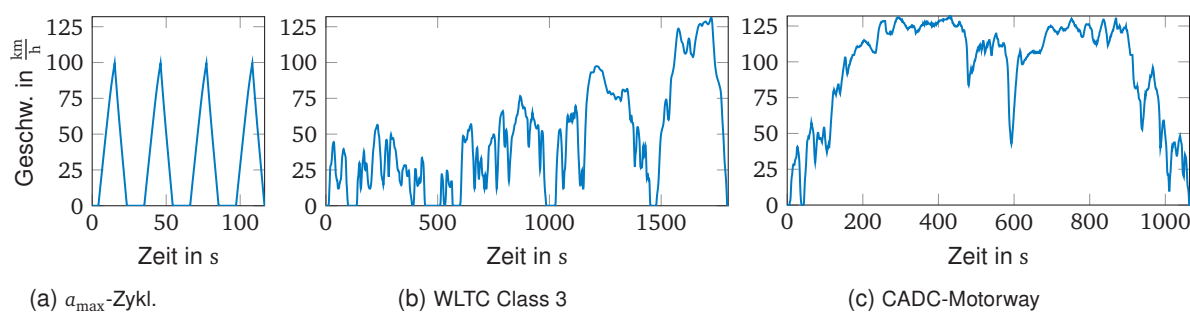


Abbildung 7.1: Geschwindigkeitsprofile der Belastungszyklen

Die vorgesehenen Ladeleistungen orientieren sich an aktuell verfügbaren Standards und Fahrzeugen und werden in den höheren Fahrzeugklassen auf 150 kW und im Mini-Segment auf 40 kW festgesetzt. Diese Leistungen führen vor allem bei kleineren Batteriegrößen zu Zellströmen, die hinsichtlich ihres Einflusses auf die Alterung als kritisch zu betrachten sind. Mit dieser Herangehensweise der Verwendung möglichst gleicher Ladeleistungen, wird jedoch eine vergleichende Bewertung des Einflusses der Batteriegröße auf das thermische Verhalten möglich. Gleichzeitig führt die während des Ladevorgangs entstehende, hohe Abwärme zu einer starken Belastung des VTMS und lässt so Aussagen über die Eignung unterschiedlicher Kühlsystemarchitekturen zu.

Bei den Umweltbedingungen werden konstante Umgebungstemperaturen im Bereich von -20 °C bis 40 °C zugrunde gelegt. Hierbei wird davon ausgegangen, dass zu Beginn der Zyklen alle Fahrzeugkomponenten Umgebungstemperatur angenommen haben. Die Frage, ob diese Annahme vor dem Hintergrund der hohen thermischen Massen der Antriebsstrangkomponenten, allen voran der Batterie, realistisch ist, wird an dieser Stelle nicht beantwortet. Das gewählte Vorgehen, vor allem an den Temperaturextrema, stellt die höchstmöglichen Anforderungen dar, wenn die Batterie möglichst schnell auf ideale Betriebstemperatur aufgeheizt, beziehungsweise gekühlt werden soll.

7.2 Definition der Rahmenbedingungen

Die im vorigen Unterkapitel vorgestellten Anforderungen müssen mittels einer geeigneten Systemauslegung umgesetzt werden. Die technischen Möglichkeiten sind durch die vorliegenden Batteriezellen, den Bauraum und die verfügbaren BTMS und VTMS Technologien definiert. Die für diese Arbeit verwendeten Rahmenbedingungen werden im Folgenden erläutert.

Für die Konfiguration der Batteriesysteme werden die in Tabelle 7.3 aufgeführten Zellen in Erwägung gezogen. Diese unterschiedlichen Zelltypen und -größen sind laut Einschätzung der Fraunhofer-Allianz Batterien aktuell und in Zukunft besonders relevant für den Einsatz in Elektrofahrzeugen [161, S. 6]. Die angenommenen Kapazitäten entsprechen der zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit aktuellen Zellgeneration [161, S. 10]. Weil für die vorliegende Arbeit vorrangig der Einfluss des Zelltyps und der Zellgröße von Interesse ist, werden die elektrischen und thermischen Eigenschaften der Zellen anhand eines gemeinsamen Datensatzes skaliert. Für die elektrischen Parameter wird hierfür der bereits für die Validierung des ECM verwendete Datensatz als Basis verwendet und diese Parameter anhand der Zellkapazität angepasst. Dieses Vorgehen wird in Anhang A.3 beschrieben. Für die Dichte und die Wärmekapazität der Zellen werden die von Xia et al. [82] experimentell ermittelten Werte benutzt. Die Parameterschwankung zwischen den Zellen wird über normalverteilte Abweichungen des Innenwiderstands R_i und der Kapazität C dargestellt. Zur Darstellung des Extremfalles höchstmöglicher Inhomogenität bei fortgeschrittener Zellalterung werden die von Baumann et al. [35] gemessenen Werte verwendet.

Tabelle 7.3: Verwendete Zelltypen und -parameter

Typ	Abmessungen in mm			Kapazität in Ah	Dichte in kg/m ³	Masse in g	spez. Wärme- kap. in J/(kg K)	Parameter- streuung in %
	x	y	z					
18650	65	18 [†]	18 [†]	3,3	2460,5 [‡]	40,7	696,1 [‡]	R_i : 3,61 [‡]
21700	70	21 [†]	21 [†]	4,8		59,7		
PHEV2	26,5	148	91	43,4	2460,5 [‡]	878,2	696,1 [‡]	C : 0,79 [‡]
BEV2	45	173	115	108,9		2202,8		
Pouch	7	330	162	73,6		920,8		
Quelle	[161, S. 7, 10]			[82]	berechnet	[82]	[35]	

[†] Durchmesser [‡] Annahme: Gleich für alle Zelltypen Elektrische Parameter: Siehe Anhang A.1, thermische Parameter: Siehe Anhang A.2

Durch das gewählte Vorgehen werden die Einflüsse unterschiedlicher Zellchemien und zell-spezifischer Herstellungsprozesse eliminiert, sodass allein die Zellkapazität das dynamische Zellverhalten beeinflusst. Gleichzeitig wird das Verhalten realer Zellen jedoch stark vereinfacht. Die durchgeführte Skalierung führt dazu, dass Hystereseeffekte vernachlässigt, beziehungsweise unsauber skaliert werden; gleiches gilt für die reversible Wärmeleistung. Für die Auslegung auf Batteriesystemebene können diese negativen Einflüsse jedoch als gering angesehen werden, weil einerseits der reine Schnellladeeffekt betrachtet wird, für den die korrekte Abbildung der Hystereseeffekte weniger kritisch ist und die irreversible die reversible Wärmeleistung bei weitem überwiegt [162]. Andererseits wird für die Auslegung auf Gesamtfahrzeugebene mit dynamischer Belastung des Batteriesystems in dieser Arbeit die Strombelastung auf das validierte Einzelzellmodell skaliert, weshalb auch auf dieser Systemebene eine korrekte Wiedergabe des dynamischen LIB Verhaltens zu erwarten ist. Schwerer für die Bewertung des thermischen Zellverhaltens wiegt die Berechnung der Zellmasse rein über die Abmessungen und die angenommene Dichte. Der zwischen den verschiedenen Zelltypen abweichende Nutzungsgrad des Gesamtvolumens durch Aktivmaterial [161, S. 10] und die unterschiedlichen Gehäusekonstruktionen werden hierbei ignoriert und PHEV2 und BEV2 als Zellen mit geringerem Ausnutzungsgrad

potenziell als zu schwer und dadurch mit zu hoher Wärmekapazität eingeschätzt. Dies muss bei der Bewertung der Zelltemperaturen innerhalb der Batteriesysteme berücksichtigt werden.

Auch für das Package und die thermischen Eigenschaften des Batteriesystems müssen einige Rahmenbedingungen festgelegt werden. Der Abstand zwischen den Zellen wird für alle Raumrichtungen als 1 mm angenommen. Befindet sich ein Kühlkanal des BTMS zwischen zwei Zellen, werden dessen Abmessungen zu dieser Entfernung hinzuaddiert. In realen Batteriesystemen können prismatische und Pouch-Zellen im direkten Kontakt zueinander stehen. Trotzdem wird der gewählte Abstand auch für diese Zelltypen verwendet, sodass Unterschiede beim Wärmeaustausch rein über die unterschiedliche Oberfläche der Zellen und damit über die Zellgröße beeinflusst und beim Vergleich der unterschiedlichen Zelltypen keine zusätzlichen Einflüsse mitbetrachtet werden. Zusätzlich werden auf diese Weise mögliche Brandschotts oder Wärmeleitbleche innerhalb der Batteriesysteme abgebildet. Für den Wärmeaustausch zwischen den LIB wird in alle Raumrichtungen ein Wärmedurchgangskoeffizient $\alpha_{\text{ges}} = 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ festgelegt, der auf Basis des in Unterkapitel 5.4 durchgeführten Vorversuchs konservativ abgeschätzt wird. Durch diese Annahme wird die vom Zellwickel hervorgerufene, anisotrope Wärmeleitung innerhalb der LIB vernachlässigt. Durch weitere Bauteile innerhalb von Batteriesystemen, beispielsweise Ableiter oder die mechanische Einspannung der Zellen, sind jedoch ohnehin weitere Pfade des Wärmetransports zu erwarten, die das thermische Zellverhalten auf eine in dieser Phase des PEP noch unbekannt Weise überlagern. Vor diesem Hintergrund erscheint diese Vereinfachung daher vertretbar.

Auch für das BTMS und das VTMS werden einige Vorüberlegungen getroffen. In der Literatur überwiegt die Annahme, dass bei schnellladefähigen Batteriesystemen Luftkühlung die entstehende Wärme nur unzureichend abführen kann [22, 80, 105]. Aus diesem Grund wird ab dieser Stelle, sofern eine aktive Temperierung eingesetzt wird, nur noch der Fall der Flüssigkühlung mittels Kühl- bzw. Kältemittel betrachtet. Als Kühlmittel wird eine 50/50-Mischung von Wasser und Monoethylenglycol (MEG) als Frostschutz vorgesehen. Die Stoffeigenschaften werden mittels *CoolProp* [124] berechnet und sind in Anhang A.5 aufgeführt. Als mögliche VTMS Architekturen werden die in Unterkapitel 6.5 hergeleiteten Kühlkreisläufe verwendet.

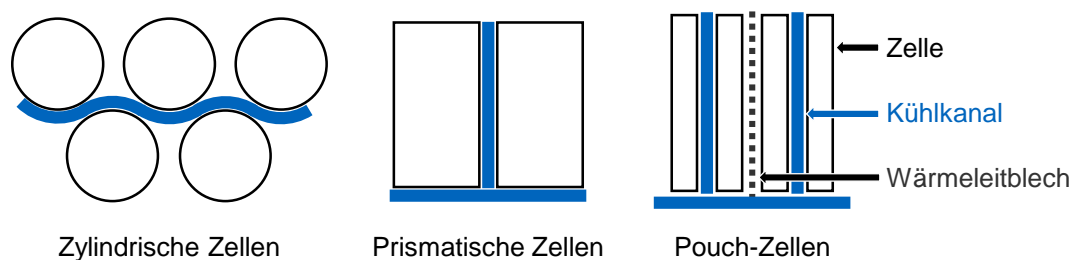


Abbildung 7.2: Mögliche thermische Anbindungen des BTMS an die Zellen (Nicht dargestellt: Kopf-/Bodenkühlung bei zylindrischen Zellen.)

Die BTMS Auslegung ist hinsichtlich der möglichen Kühlkanalarchitekturen und dem erreichbaren Wärmeübergang vor allem durch die thermische Anbindung an die Zellen definiert. Abbildung 7.2 zeigt die im Rahmen der Systemauslegung berücksichtigten Möglichkeiten der Anbindung. Zylindrische LIB werden durch geschwungene Kühlkanäle zwischen den Zellen [163, S. 39-40], analog der in Fahrzeugen der Herstellers Tesla verwendeten Lösung [164], thermisch angebunden. Prismatische und Pouch-Zellen werden häufig durch Kühlplatten zwischen den Zellen gekühlt [163, S. 40-41]. Bei prismatischen Zellen besteht zusätzlich die Möglichkeit der Bodenkühlung. Dies ist bei Pouch-Zellen durch deren Bauart nicht direkt möglich, weshalb für diese Art der Kühlung bei diesen Zellen der Einsatz von Wärmeleitblechen, die die Wärme

von den Seitenflächen zu einer temperierten Bodenplatte führen, angenommen wird. Als wärmeübertragende Fläche wird bei allen Zellen jeweils die projizierte Fläche in der jeweiligen Raumrichtung angenommen.

7.3 Ergebnisse der Packageauslegung

Im ersten Schritt wird das Package der Batteriekonzepte erstellt und überprüft, ob die Anforderungen bezüglich Spannungslage und Kapazität in Hinblick auf die Abmessungen und das Gewicht der Module und des Gesamtsystems erfüllt werden können. Hierbei wird für die einzelnen Zelltypen exemplarisch jeweils die in Abbildung 7.3 dargestellte Ausrichtung in den Raumrichtungen verwendet. Sollen die Zellen räumlich anders orientiert werden, kann dies durch eine entsprechende Anpassung der in Tabelle 7.3 gezeigten Zellabmessungen erreicht werden.

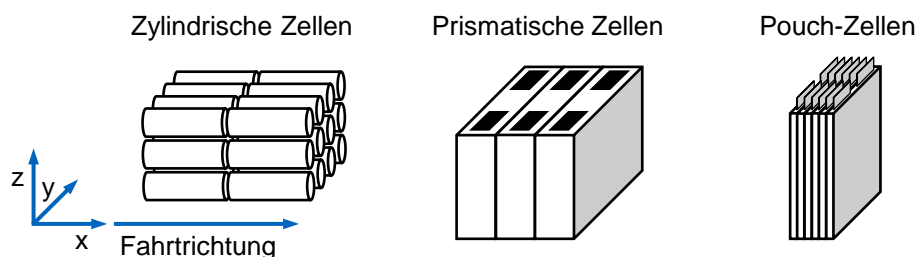


Abbildung 7.3: Orientierung der Zellen innerhalb des Batteriesystems

Für die Überprüfung des entwickelten Ansatzes zur Batteriesystemauslegung wird zugunsten einer besseren Vergleichbarkeit mit realen Systemen von den in Unterkapitel 7.1 vorgestellten Anforderungen abgewichen. Tabelle 7.4 gibt eine Übersicht über die für die jeweiligen Zelltypen final ausgewählten Batteriekonzepte. Die in diesem Schritt gewählten Anforderungen entsprechen in etwa den technischen Daten des Tesla Model S in der 85 kWh Konfiguration, wurden hinsichtlich der Abmessungen zugunsten einer größeren Flexibilität bei der geometrischen Auslegung jedoch etwas gelockert. Eine vollständige Aufstellung der Eingangsgrößen für den Auslegungsalgorithmus findet sich in Anhang B.1.

Tabelle 7.4: Gewählte Batteriesystemkonfigurationen und Vergleich mit den gewählten Anforderungen

Zelltyp	Modulebene				Systemebene		
	Verschaltung p(pe,e) x s	Abmessungen (x, y, z) in m	Kapazität in kWh	Gew. in kg	Abmessungen (x, y, z) in m	Kapazität in kWh	Gew. in kg
18650	63(21,3) x 14	0,27 x 1,44 x 0,06	10,5	39,5	2,50 x 1,50 x 0,06	94,3	390,9
21700	44(11,4) x 14	0,31 x 0,81 x 0,09	10,6	40,4	2,92 x 0,85 x 0,09	95,8	400,2
PHEV2	5(5,1) x 14	0,39 x 0,78 x 0,10	10,9	67,6	2,05 x 1,63 x 0,10	98,4	669,4
BEV2	2(2,1) x 14	0,67 x 0,37 x 0,12	11,0	67,8	2,08 x 1,14 x 0,13	98,8	671,7
Pouch	3(3,1) x 14	0,11 x 1,04 x 0,17	11,1	42,5	0,97 x 1,09 x 0,18	100,2	421,1
Anforderungen		< 1,1 x 1,7 x 0,2	> 9,5	< 75	< 3,0 x 1,7 x 0,2	> 85	< 675

Für die einzelnen Zelltypen und -größen werden einige Besonderheiten deutlich. Während die Anzahl serieller Zellen gleich bleibt, ist bei kleineren Zellen eine deutlich größere Parallelschaltung nötig, um die Kapazitätvorgaben zu erreichen. Dies ermöglicht eine exaktere Anpassung an die Kapazitäts- und Leistungsvorgaben. Um die geforderte Ladeleistung von 170 kW zu erreichen, ist mit den verwendeten Zellparametern eine größere Parallelschaltung nötig, als

sie für die Kapazitätsanforderung von 85 kWh erforderlich wäre. Diese Parallelschaltung kann logischerweise stets nur mit ganzzahligen Schritten erweitert werden, wodurch bei den prismatischen und der Pouch-Zelle, im Vergleich zur 18650-Zelle, eine Überdimensionierung des Systems von bis zu 5,9 kWh entsteht. Beim Gewicht der Systeme zeigt sich die den anderen Zelltypen unterlegene Energiedichte der prismatischen Zellen. Diese Systeme sind, verglichen mit der leichtesten Variante auf Basis der 18650-Zelle, bis zu 72 % schwerer. Hierbei muss jedoch die Überdimensionierung des Batteriesystems bei den größeren Zellen miteinbezogen werden. Auf Zellebene erreicht die Pouch-Zelle eine der 18650-Zelle überlegene Energiedichte (Tabelle 7.3). Durch die geringere Flexibilität bei der Anpassung auf die gewünschte Systemkapazität verliert sich dieser Vorteil allerdings wieder. Zusätzlich sei angemerkt, dass keinerlei Betrachtung mechanischer und sicherheitsrelevanter Rahmenbedingungen erfolgt, die vor allem im Falle der Pouch-Zelle zu zusätzlichem Material- und Bauraumbedarf führen würden.

Hinsichtlich der Abmessungen des Batteriesystems ergeben sich durch die unterschiedlichen Größenverhältnisse der Zelltypen ebenfalls Unterschiede. Die zylindrischen Zellen können mehrlagig angeordnet werden und führen trotzdem noch zu äußerst flach bauenden Batteriepacks. Die großen Abmessungen der prismatischen und der Pouch-Zelle ergeben deutlich höhere Batteriesysteme, besonders wenn diese wie im Beispiel stehend verbaut werden. Weil keine Parallelschaltung von Modulen vorgesehen wird und der Auslegungsalgorithmus eine Serienschaltung nur in x-Richtung unterstützt, müssen, aufgrund der Abmessungen der Module aus prismatischen Zellen, diese Batteriesysteme mit mehreren Reihen seriell verschalteter Module nebeneinander ausgeführt werden. Dies ist in Abbildung 7.4 dargestellt. Das Batteriesystem aus PHEV2-Zellen erfordert zwei Reihen, das aus BEV2-Zellen sogar drei. Die Batteriesysteme aus zylindrischen und aus Pouch-Zellen können hingegen einreihig ausgeführt werden.

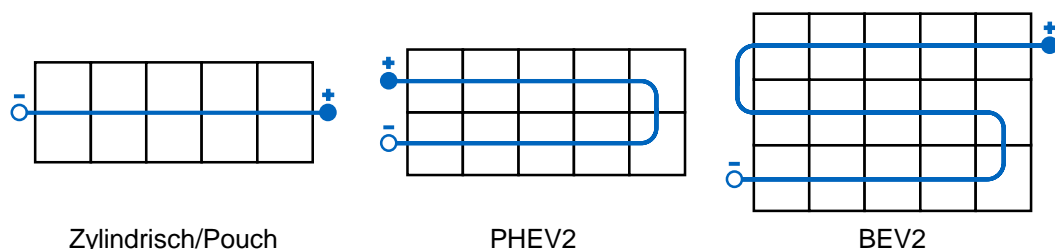


Abbildung 7.4: Modulordnung im Batteriesystem und elektrische Verschaltung

In einem vorausgehenden Abschnitt wurde bereits die höhere Flexibilität der kleineren Zellgrößen in Hinblick auf die Kapazitäts- und Leistungsanforderungen bewiesen. Diese Aussage ist ebenfalls hinsichtlich der Packageauslegung valide. Für die Bestimmung der geometrischen Anordnung der Parallelschaltung versucht der Auslegungsalgorithmus die Anzahl der parallel verschalteten Zellen p anhand ihrer Teiler auf die e, pe -Anordnung (siehe Unterkapitel 5.3) aufzuteilen. Für den Fall, dass die im Hinblick auf die Kapazitäts- beziehungsweise Leistungsanforderungen kleinstmögliche Parallelschaltung p_{min} keine oder nur ungünstige Teiler besitzt, werden zusätzlich die Parallelschaltungen $p_{min} + 1$ und $p_{min} + 2$ in Erwägung gezogen, um eine höhere Wahrscheinlichkeit einer optimalen Anordnung zu erreichen. Abbildung 7.5 zeigt bei kleineren Zellgrößen eine höhere Anzahl von Möglichkeiten zur Anordnung der Zellen innerhalb der Geometrierandbedingungen. Diese Option der Vergrößerung der Parallelschaltung, zur Erreichung einer besseren Zellverteilung, ist nur bei kleinen Zellen sinnvoll. Bei großen Zellen, etwa der verwendeten Pouch-Zelle, ist die dadurch entstehende Überdimensionierung des Batteriesystems nicht mehr vertretbar. Die finale Reduzierung des Lösungsraums auf die in Tabelle 7.4 aufgeführten Konzepte erfolgt nach den Kriterien kleinstmöglicher Überdimensionie-

zung und einer möglichst ausgewogenen Ausnutzung des verfügbaren Bauraums. Hierbei kann bei allen Zellen die optimal dimensionierte Parallelschaltung p_{min} verwendet werden.

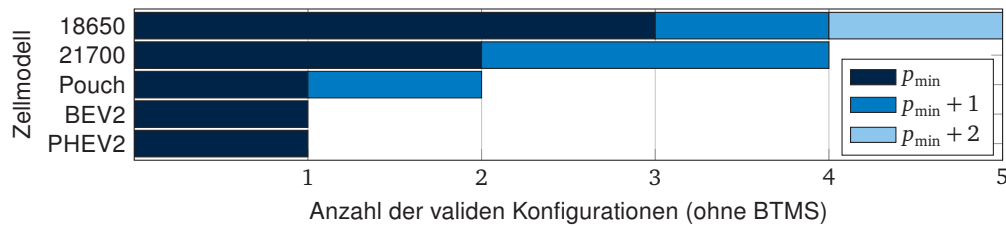


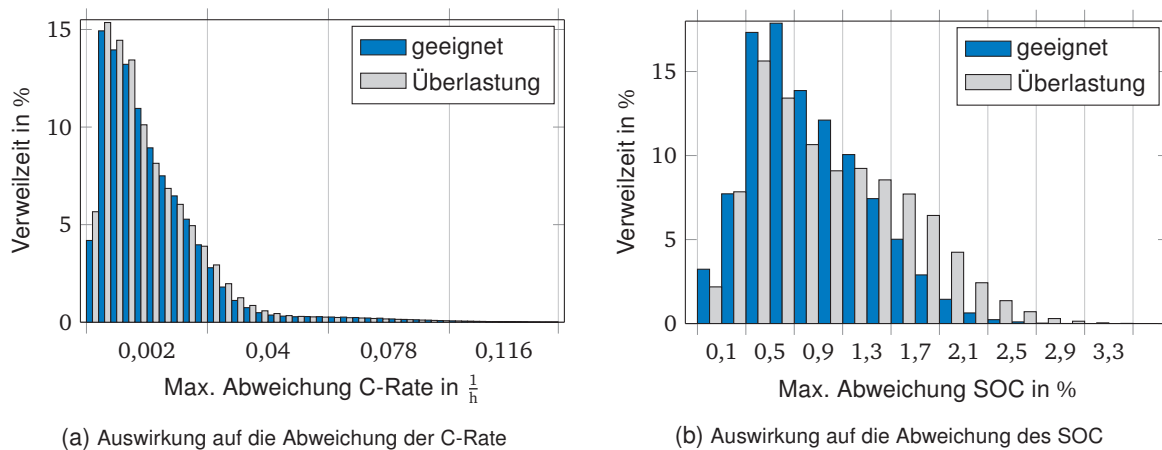
Abbildung 7.5: Anzahl der validen Systemkonfigurationen pro Zelltyp

7.4 Ergebnisse der elektrischen Auslegung

Nachdem die grundlegenden Batteriekonzepte bestimmt sind, kann deren elektrisches Verhalten weitergehend untersucht werden. Hierzu werden die in Tabelle 7.4 aufgeführten Konfigurationen jeweils mit einem Schnellladevorgang mit einer Maximalleistung von 170 kW im SOC-Bereich von 0 % bis ca. 93 % vollgeladen. Auf eine komplette Vollladung wird zugunsten der starken Reduzierung des Ladestromes und der daraus resultierenden geringeren Verlustleistung und thermischen Belastung des Batteriesystems bei hohem SOC verzichtet. Weil in diesem Auslegungsschritt nur das elektrische Verhalten des Batteriesystems betrachtet wird, wird das thermische Verhalten nicht simuliert und eine Zelltemperatur von konstant 20 °C angenommen. Anhand der Simulationsergebnisse sollen nun die Einflüsse der Parameterschwankung zwischen den Zellen und der Größe der Parallelschaltung untersucht werden.

Vergleichbar zum Aufbau eines realen Batteriesystems werden in der Simulation, die den Parameterschwankungen unterworfenen Zellen zufällig kombiniert. Für die Beurteilung der zu erwartenden Belastungsinhomogenitäten muss daher eine statistisch relevante Anzahl an Simulationen durchgeführt werden. Aufgrund des hohen Umfangs des Simulationsmodells ist dies mit erheblichem Rechenaufwand verbunden. Im Rahmen des vorliegenden Beispiels wurde daher jede Konfiguration zur Reduzierung der Rechenzeit in lediglich drei unabhängigen Durchläufen simuliert. Zur finalen Absicherung ist eine deutlich höhere Anzahl an Simulationen empfehlenswert. Die Betrachtung des Einflusses der Parameterschwankung erfolgt exemplarisch am Beispiel des Batteriesystems aus der 18650-Zelle. Von drei der durchgeführten Simulationen konnten zwei Durchgänge erfolgreich abgeschlossen werden, bei einer Simulation wurde der gesetzte Grenzwert für die maximale Zell-individuelle Strombelastung verletzt, was sich auf das Auftreten einer besonders ungünstigen Parameterkombination zurückführen lässt. In Abbildung 7.6 werden die Lastkollektive einer erfolgreichen und einer gescheiterten Simulation der Konfiguration verglichen.

Es wird deutlich, dass sich die Inhomogenität vor allem durch eine stärkere Ausprägung der Abweichungen der Zell-SOC zeigt und nicht, wie es aufgrund der Verletzung der Randbedingung des maximalen Zellstroms zu erwarten wäre, der Abweichung der C-Rate. Anhand des Fehlerbildes und der in beiden Fällen ähnlichen C-Raten Inhomogenität ist zu erwarten, dass die Überlastung ausschließlich bei hoher Strombelastung und damit direkt am Anfang des Ladevorgangs auftritt. Die Betrachtung der externen Strombelastung zeigt, dass der Ladestrom, vermutlich durch den höheren Innenwiderstand der Zellen bei niedrigem SOC, direkt am Anfang reduziert werden muss. Die Zellen werden folglich bereits ohne die Inhomogenität nahe an ihrem zulässigen Maximum betrieben.



(a) Auswirkung auf die Abweichung der C-Rate

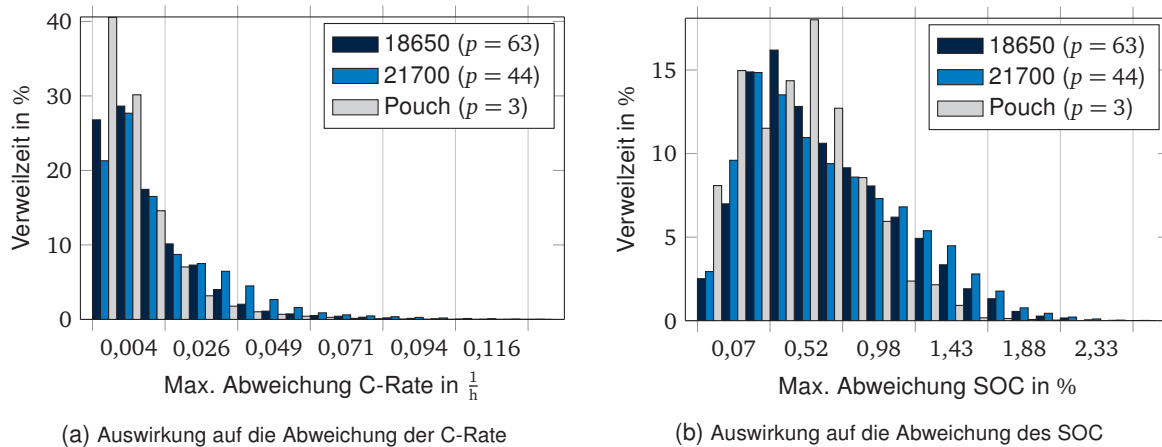
(b) Auswirkung auf die Abweichung des SOC

Abbildung 7.6: Auswirkung der Parameterschwankungen auf die Parallelschaltung (18650-Zelle)

Treten nun zusätzlich Schwankungen zwischen den Innenwiderständen innerhalb einer Parallelschaltung auf, werden einzelne Zellen überlastet. Durch die höhere Strombelastung werden diese Zellen schneller geladen, wodurch die höhere SOC-Inhomogenität erklärt werden kann. Aufgrund der kleinen Stichprobe sind an dieser Stelle keine statistisch abgesicherten Aussagen ableitbar. Auch bei anderen Zelltypen zeigen einzelne Simulationsdurchläufe eine zu hohe Strominhomogenität. Bei der Auslegung eines später tatsächlich im Fahrzeug verwendeten Systems müsste an dieser Stelle daher die Notwendigkeit der Reduzierung der Parameterstreuungen zwischen den Zellen abgeleitet werden. Alternativ müsste die maximale Strombelastung reduziert werden, vor allem bei fortschreitender Alterung des LIB, durch die eine weitere Steigerung der Inhomogenität zu erwarten ist.

Als weiterer Einfluss auf die Inhomogenität wurde die Größe der Parallelschaltung identifiziert. Für diese Betrachtung werden drei unterschiedliche Zelltypen verglichen. Für die 18650-, die 21700- und die Pouch-Zelle ergeben sich Parallelschaltungsgrößen p von 63, 44, beziehungsweise 3. Abbildung 7.7 zeigt die Inhomogenitäten von C-Rate und SOC für einen Schnellladevorgang, gemittelt aus allen erfolgreich durchlaufenen Simulationen. Zur Vermeidung der Mitbetrachtung statistischer Ausreißer wurden gescheiterte Simulationsdurchläufe von der Betrachtung ausgenommen. Die Betrachtung zeigt, dass die Pouch-Zelle und damit die kleinste betrachtete Parallelschaltung die geringste Inhomogenität zeigt, was sich mit den Ergebnissen aus Unterkapitel 4.4 deckt. Die Aussage, dass eine möglichst kleine Parallelschaltung im Hinblick auf die Homogenität der Zellbelastung am günstigsten ist, kann an dieser Stelle jedoch nicht abgeleitet werden, weil die größte Inhomogenität bei der 21700-Zelle und damit bei der in diesem Beispiel mittleren Parallelschaltungsgröße auftritt. Auch an dieser Stelle sei jedoch angemerkt, dass bei dieser Betrachtung die Fähigkeit des Simulationsmodells zur Identifizierung ungeeigneter Auslegungen im Vordergrund steht und daher keine abschließende, statistisch abgesicherte Aussage hinsichtlich der optimalen Größe der Parallelschaltung getroffen werden kann. Nichtsdestotrotz belegt die Betrachtung die Herausforderungen bei der Auslegung der Parallelschaltung und die zahlreichen Einflussgrößen, die in Zukunft noch weiterer Betrachtung bedürfen.

Die Ergebnisse dieses Auslegungsschrittes zeigen eine als kritisch zu bewertende Inhomogenität innerhalb der Parallelschaltung, die auf die stark ausgeprägte Parameterstreuung zwischen den Zellen zurückgeführt werden kann. Zwar ist eine abschließende Aussage nicht mehr Teil dieser Arbeit, angesichts der Tatsache, dass schon bei der geringen Anzahl an durchgeführten Simulationen mehrere Zellkombinationen auftreten, die zu einer Überlastung innerhalb der



(a) Auswirkung auf die Abweichung der C-Rate
 (b) Auswirkung auf die Abweichung des SOC
 Abbildung 7.7: Auswirkung der Parameterschwankungen auf unterschiedliche Größen der Parallelschaltung

Parallelschaltung führen, sind die geforderten Leistungsdaten mindestens als äußerst kritischer Grenzfall zu betrachten. Für ein reales Batteriekonzept ist dieses Risiko wohl nicht tragbar, für den Test des Auslegungsalgorithmus hingegen ist diese Konfiguration, nahe an den vertretbaren Leistungsgrenzen, umso interessanter. Aus diesem Grund werden die Systemkonzepte im nächsten Schritt der thermischen Auslegung zugeführt.

7.5 Ergebnisse der thermischen Auslegung

Bei der thermischen Auslegung werden Dimensionierung und Architektur der Wärmesenken (WS) des BTMS festgelegt. Aufgrund der vielfältigen Lösungsmöglichkeiten ist hierbei eine Vorauswahl durch den Anwender vorzunehmen. Der Algorithmus iteriert anschließend durch die vorgegebenen Alternativen und stellt für jede mögliche Konfiguration fest, ob die Anforderungen hinsichtlich Abmessungen und thermischem Verhalten erfüllt werden können. Die im Rahmen dieses Beispiels betrachteten Architekturen wurden bereits in Unterkapitel 5.6 in Abbildung 5.10 dargestellt. Weitere Parameter zu den Abmessungen der WS sind in Anhang A.6 aufgeführt.

Als einfachste BTMS Architektur wird die Bodenkühlung betrachtet. Die Module stehen auf einer Kühlplatte, die die gesamte Unterseite des Batteriesystems einnimmt. Bei den Batteriesystemen aus zylindrischen Zellen, bei denen die LIB in mehreren Ebenen angeordnet werden, steht damit nur die unterste Ebene im direkten thermischen Kontakt zur WS. Bei den prismatischen und der Pouch-Zelle erfolgt die thermische Anbindung bei dieser Variante über die Unterseite und damit aus Sicht der Wärmeübertragung nicht optimal. In einer zweiten Variante wird diese Bodenkühlung um eine Kühlung zwischen den Modulen, senkrecht zur x-Richtung des Batteriesystems erweitert. Hierbei wird vor allem für prismatische und Pouch-Zellen ein Vorteil erwartet, weil auf diese Weise, die im Vergleich zum Boden wesentlich größeren Seitenflächen thermisch angebunden sind. In der nächsten Erweiterung werden alle Modulaußenseiten thermisch angebunden. Sollte dies nicht ausreichen, können in der finalen Ausbaustufe zusätzlich noch WS im Inneren der Module vorgesehen werden. Dies erfordert allerdings eine individuelle Konfiguration für jedes einzelne Moduldesign.

Mit einer steigenden Anzahl an WS verringern sich die Distanzen, die die Wärmeströme bis zu ihrem Abtransport durch das BTMS zurücklegen müssen, wodurch eine Verringerung der Absoluttemperatur und der Temperaturgradienten erwartet wird. Gleichzeitig steigt jedoch der

Gesamtquerschnitt der WS. Soll die Strömungsgeschwindigkeit innerhalb der WS und damit die erreichbaren Wärmeübergangskoeffizienten konstant gehalten werden, ist bei größeren Gesamtquerschnitten daher eine Erhöhung des Volumenstromes des Kühlmittels innerhalb des BTMS erforderlich. Dieser Sekundäreffekt führt – neben dem durch die weiteren WS ohnehin schon erhöhten Aufwand – zu zusätzlichen Kosten und erhöhtem Energiebedarf, weil eine größer dimensionierte Kühlmittelpumpe vorgesehen werden muss. Um die Leistungsfähigkeit der komplexeren BTMS Architekturen nicht zu überschätzen und die Diskussion des Systemaufwandes rein auf das Batteriesystem zu fokussieren, wird im Rahmen dieses Beispiels für alle Varianten von gleichen Gesamt-Kühlmittelvolumenströmen ausgegangen. Je mehr WS eine BTMS Variante enthält, beziehungsweise je größer deren Abmessungen durch die Dimensionen des jeweiligen Batteriesystems sind, desto kleiner sind folglich die erreichbaren Wärmeübergangskoeffizienten.

Im nächsten Schritt werden die mit den unterschiedlichen BTMS Architekturen ergänzten Batteriesysteme für einen Schnellladevorgang, diesmal unter Berücksichtigung des thermischen Zellverhaltens, simuliert. Die erreichten Temperaturen der einzelnen Konzepte sind in Tabelle 7.5 aufgeführt. Als erlaubte Grenzen wurde eine Absoluttemperatur von 50 °C und ein maximaler Temperaturgradient von 5 °C festgelegt. Konfigurationen, die die geforderten Randbedingungen verletzen, sind in Tabelle 7.5 grau dargestellt.

Tabelle 7.5: Absoluttemperaturen und Temperaturgradienten der Batteriesystem- und BTMS Konzepte während eines Schnellladevorgangs. Die Starttemperatur der Zellen beträgt 25 °C, die Einlauftemperatur des Kühlmittels 20 °C. Werte, die die geforderten Randbedingungen verletzen, sind grau hinterlegt.

Zelltyp	KK-Architektur	Temperaturen in °C			
		absolut		Gradient	
		Ø	max.	Ø	max.
18650	Boden	23,0	38,3	2,0	8,7
18650	Boden & x-Richtung	22,9	38,5	3,1	13,5
18650	Modulaußenseiten	21,4	29,3	0,9	4,6
18650	Modulinnenkühlung	20,5	25,0	0,1	0,8
21700	Boden	25,7	48,6	4,6	17,4
21700	Boden & x-Richtung	24,5	49,1	6,6	25,0
21700	Modulaußenseiten	21,9	33,2	1,9	8,9
21700	Modulinnenkühlung	20,6	25,0	0,0	0,0
PHEV2	Boden	23,2	32,9	0,0	0,0
PHEV2	Boden & x-Richtung	22,9	34,1	2,3	8,7
PHEV2	Modulaußenseiten	21,8	29,8	1,1	4,8
BEV2	Boden	23,2	32,8	0,0	0,0
BEV2	Boden & x-Richtung	23,2	34,6	2,5	9,4
BEV2	Modulaußenseiten	21,8	29,0	0,9	4,0
Pouch	Boden	27,7	47,9	0,0	0,0
Pouch	Boden & x-Richtung	24,7	51,3	6,7	24,3
Pouch	Modulaußenseiten	23,1	37,8	2,5	10,7
Pouch	Modulinnenkühlung (3 WS)	21,0	29,0	1,1	6,0
Pouch	Modulinnenkühlung (4 WS)	20,8	29,1	1,3	7,1
Pouch	Modulinnenkühlung (5 WS)	20,7	25,4	0,4	2,5

Eine exemplarische Diskussion der Einflüsse unterschiedlicher BTMS Architekturen erfolgt anhand der zylindrischen 18650-Zelle. Die Temperaturverläufe der einzelnen Konfigurationen und die Strombelastung auf Zellebene sind in Abbildung 7.8 dargestellt. Es wird deutlich, dass die anfängliche Strombelastung nur für kurze Zeit gehalten werden kann und innerhalb der

ersten, ca. 200 s reduziert werden muss. Dieser Wert bleibt bis ca. 1100 s konstant, anschließend erfolgt der Übergang in die Konstantspannungs-(CV)-Phase. Die anfängliche Reduzierung ist mit der aus vorherigen Untersuchungen übernommenen elektrischen Zellparametrierung zu erklären, die für derart hohe Ströme nicht durchgeführt wurde und daher zu einem unplausiblen dynamischem Verhalten hinsichtlich Spannung und Temperatur führt. Nach der Reduzierung des Stromes befindet sich die Zelle wieder innerhalb des parametrierten Bereiches und das Verhalten kann als valide angesehen werden.

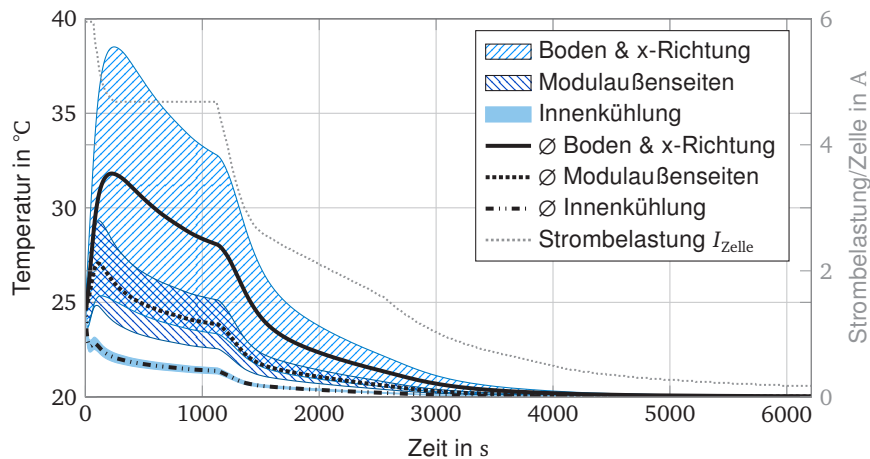


Abbildung 7.8: Temperaturverläufe unterschiedlicher BTMS Architekturen am Beispiel eines Schnellladevorgangs eines Batteriesystems aus 18650-Zellen. Schraffierte Flächen: Temperaturbereiche der LIB.

Wie erwartet sinken sowohl die Absoluttemperatur als auch die Temperaturgradienten mit einer steigenden Anzahl an WS. Verletzt der Temperaturgradient bei der BTMS Variante *Boden & x-Richtung* noch den festgelegten Grenzwert, werden die Spezifikationen bei den anderen in Abbildung 7.8 dargestellten Varianten eingehalten. Am geringsten sind die Temperaturen wie erwartet bei der Modulinnenkühlung, bei der jede einzelne Zelle im Kontakt mit einer WS steht (Abbildung 7.9). Der Einfluss des verringerten Volumenstromes bei höherem Gesamtquerschnitt der BTMS Kühlkanäle wird bei den abgebildeten Varianten durch die zusätzlich im System platzierten WS überkompensiert. Werden die Varianten *Boden & x-Richtung* und *Boden* (nicht in Abbildung 7.8 aufgeführt) verglichen, ist dies jedoch nicht mehr der Fall. Die reine Bodenkühlung führt zu leicht verringerten Absoluttemperaturen. Zusätzlich ist der Temperaturgradient verringert, weil aufgrund der Anordnung der Zellen bei einer reinen Bodenkühlung kein Gradient in x-Richtung auftritt.

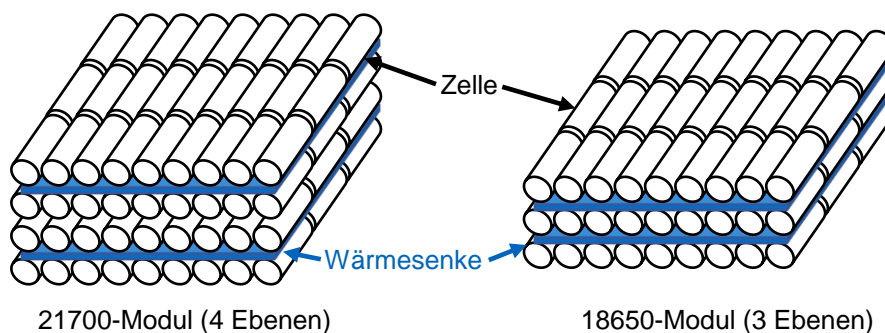


Abbildung 7.9: Platzierung der Wärmesenken bei Modulinnenkühlung von zylindrischen Zellen (schematisch)

Analog gelten diese Beobachtungen für die 21700-Zelle. Hier kann jedoch nur durch eine, wie in Abbildung 7.9 links dargestellte, Modulinnenkühlung das Kriterium des Temperaturgradienten eingehalten werden, weil sich durch die größeren Abmessungen der Zelle die Wege der Wärmeströme im Vergleich zur 18650-Zelle verlängern. Bei Modulinnenkühlung ergibt sich für die 21700-Zelle ein Temperaturgradient von 0 °C . Dies ist der Fall, weil erstens jede Zelle im Kontakt mit genau einer Wärmesenke steht und zweitens der Temperaturverlauf innerhalb der WS vereinfacht als konstant angenommen wird. Im Falle der 18650-Zelle ist die mittlere Lage, wie in Abbildung 7.9 rechts dargestellt, im Kontakt mit zwei WS und wird deshalb stärker gekühlt als die äußeren Lagen, wodurch sich bei dieser Variante ein leichter Temperaturgradient ergibt.

Bei beiden prismatischen Zellen können sowohl die Bodenkühlung als auch die Kühlung aller Modulaußenseiten die Anforderungen erfüllen. Bei der Bodenkühlung steht die Unterseite jeder Zelle im direkten thermischen Kontakt mit der WS, weshalb sich aufgrund der vorliegenden Modellierung erneut ein Temperaturgradient von 0 °C ergibt. Wird zusätzlich zwischen den Modulen in x-Richtung gekühlt, werden die vorderen und hinteren Zellen des Moduls aufgrund ihrer großen Seitenflächen stark heruntergekühlt. Der Wärmetransport zwischen den Zellen reicht nicht aus, um die Zellen im Inneren der Module von dieser zusätzlichen WS profitieren zu lassen und ein unzulässig hoher Temperaturgradient bildet sich aus. Dies kann durch die Kühlung aller Modulaußenseiten zum Teil beseitigt werden. Auch hier ist die Kühlung der Zellen an der Vorder- und Hinterseite der Module jedoch immer noch deutlich stärker als die der Zellen in der Mitte. Aufgrund der großen Abmessungen der Batteriesysteme aus prismatischen Zellen führen zusätzliche WS zudem zu einer Vergrößerung der vom Kühlmassenstrom durchflossenen Querschnitte und die Strömungsgeschwindigkeiten und Wärmeübergangskoeffizienten nehmen ab. Aus diesem Grund lässt sich die Absoluttemperatur auch bei einer Kühlung aller Modulaußenseiten im Vergleich zur Bodenkühlung nur geringfügig absenken, weshalb die Bodenkühlung für diesen Zelltyp und die gewählte geometrische Anordnung als am geeignetsten angesehen werden kann.

Analog zu den prismatischen Zellen führt die Bodenkühlung bei der Pouch-Zelle zu einem Temperaturgradient von 0 °C und die Anforderungen hinsichtlich der Maximaltemperaturen werden – wenn auch nur knapp – erfüllt. Dies ist aber nur unter der Voraussetzung der Anbindung jeder einzelnen Zelle mittels Wärmeleitblechen und eines adiabaten Verhaltens aller anderen Seiten der Module gegeben. Ob sich diese Annahmen auf reale Systeme übertragen lassen ist fraglich und kann auch durch den vorliegenden Auslegungsprozess nicht beantwortet werden. Es obliegt daher dem Anwender, für jeden Zelltyp sinnvolle BTMS Architekturen auszuwählen. Realistischer erscheint die Einschätzung, dass bei diesem Zelltyp eine Kühlung in x-Richtung beziehungsweise aller Modulaußenseiten nicht ausreichend ist. Die Pouch-Zellen sind nur über ihre großen Seitenflächen thermisch gut anzubinden und Zellen, die auf diese Weise mit dem BTMS in Kontakt stehen, erfahren keine nennenswerte Erwärmung mehr. Aufgrund des konservativ gewählten Wärmeübergangskoeffizienten zwischen den Zellen können die Zellen im Inneren der Module ihre Wärme nicht im ausreichenden Maße abführen, weshalb große Temperaturgradienten entstehen. Es muss daher zwingend auf eine Modulinnenkühlung zurückgegriffen werden.

Die unterschiedlichen betrachteten Varianten sind in Abbildung 7.10 dargestellt. Erst mit fünf WS im Inneren der Module kann der maximale Temperaturgradient ΔT_{\max} auf ein vertretbares Maß reduziert werden, sofern der Wärmeaustausch zwischen den Zellen nicht verbessert werden kann. In diesem Fall werden auch die WS an den äußeren Zellen des Moduls der Innenkühlung zugerechnet, da diese bei der vorliegenden Betrachtungsweise lediglich mit den moduleigenen Zellen interagieren. Wird die Anzahl der WS verringert, führen drei Stück zu einer besseren

Kühlung als vier, weil letztere Variante, wenn eine symmetrische Anordnung erreicht werden soll, zu einer Konzentration von WS im Inneren des Moduls und damit einer deutlich stärkeren Kühlung einiger Zellen führt. Neben der bloßen Anzahl an WS ist folglich auch deren Platzierung entscheidend für die Leistungsfähigkeit eines BTMS Konzepts.

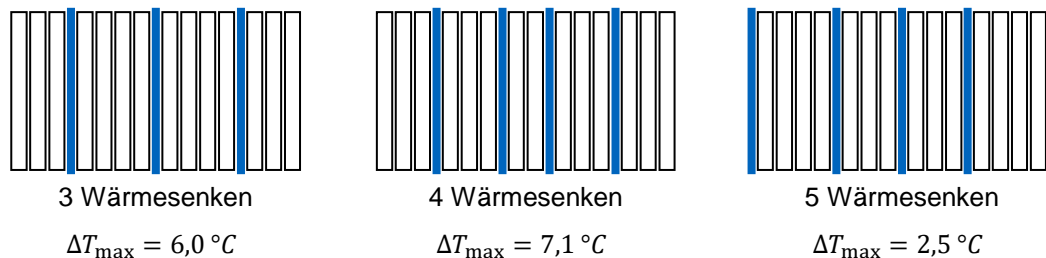


Abbildung 7.10: Platzierung der Wärmesenken bei Modulinnenkühlung von Pouch-Zellen (schematisch)

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass für jedes Batteriesystemkonzept mindestens eine geeignete BTMS Architektur gefunden werden kann. Mit den gewählten Zellen und den thermischen Parametern und unter der Vernachlässigung des inneren Temperaturverhaltens, zeigen sich die prismatischen Zellen als am einfachsten thermisch anzubinden. Die zylindrischen und die Pouch-Zellen können nur mittels aufwendiger Modulinnenkühlung innerhalb akzeptabler Temperaturbereiche gehalten werden. Im Falle der 18650-Zelle wird diese Lösung jedoch nachweislich auch in Serienfahrzeugen verfolgt. Fahrzeuge des Herstellers Tesla verwenden eine patentierte Modulinnenkühlung, die jede einzelne Zelle direkt an den Kühlkreislauf anbindet [164]. Im Falle des Model S85 wird zusätzlich eine Batterie mit ähnlichen Zellen, Bauraum und Leistungsdaten wie im vorliegenden Beispiel verwendet (Anhang A.9). Auch wenn Tesla die Zellen stehend verbaut, ergeben sich bei der Modulinnenkühlung aufgrund der Vereinfachungen des Simulationsmodells gleiche thermische Eigenschaften im Vergleich zur simulierten Variante. Es ist anzunehmen, dass Tesla während des Schnellladevorgangs, der einen Betrieb an der absoluten Leistungsgrenze darstellt, eine höhere Systemtemperatur zulässt, als sie in der Simulation aufgetreten ist. Dies ließe sich durch eine Anpassung des in der Simulation angenommenen Kühlmittelvolumenstromes direkt bewerkstelligen. Zusätzlich ist zu erwarten, dass bei einer Änderung der Orientierung der Zellen als Eingangsgröße in den Auslegungsalgorithmus, nur noch die Modulinnenkühlung als valide Möglichkeit verbleibt; der Algorithmus gibt daher, hinsichtlich der idealen Systemarchitektur, dieselbe Empfehlung ab, wie sie von den Ingenieuren von Tesla gewählt wurde. Auf Basis dieses ersten Vergleichs können die Ergebnisse dieses Auslegungsschrittes und die Annahmen der thermischen Simulation als belastbar eingeschätzt werden. Diese Einschätzung kann jedoch lediglich anhand der Replikation einer bestehenden Auslegung erfolgen. Eine abschließende Aussage der Zuverlässigkeit des Auslegungsansatzes, insbesondere der Teile, die über den aktuellen Stand der Technik hinausgehen, ist nicht möglich.

7.6 Ergebnisse der Integration in das Gesamtfahrzeug

Im letzten Auslegungsschritt wird das Batteriesystem in das VTMS des Gesamtfahrzeugs integriert. An dieser Stelle wird daher das thermische Verhalten des gesamten Antriebsstrangs relevant, weshalb eine isolierte Betrachtung des Batteriesystems allein nicht mehr möglich ist. Aus diesem Grund wird nun auf die in Unterkapitel 7.1 vorgestellten Belastungszyklen und Fahrzeugkonzepte zurückgegriffen, um den Einfluss des Gesamtfahrzeugs abzubilden. Da zusätzlich weitere Einflüsse, die sich aus Besonderheiten der BTMS Auslegung und mögliche

Fehlerfortpflanzung der Simulationsmodelle ergeben, möglichst eliminiert werden sollen, wird für die folgenden Simulationen ein vereinfachtes Batteriesystem- und BTMS Modell verwendet, dessen Parameter und Skalierungen zur Anpassung auf die unterschiedlichen Batteriekapazitäten in Anhang A.8 aufgeführt sind.

Für die Betrachtung wird auf die in Unterkapitel 6.5 definierten KK zurückgegriffen. Die in Unterkapitel 6.4 vorgestellte Modellparametrierung und -validierung ist mit Fahrzeugen niedrigerer Antriebsleistung, als der meisten der in diesem Beispiel betrachteten Fahrzeugkonzepte, erfolgt. Daher müssen die Volumenströme des Kühlmittels, der Kühler und die Wärmedurchgangszahlen zwischen den Antriebsstrangkomponenten und dem VTMS auf die höhere Leistung angepasst werden. Aus diesem Grund wird zur Vorbereitung eine Simulation bei der maximal vorgesehenen Außentemperatur von 40 °C, dem leistungsfähigsten und schwersten Fahrzeug (obere Mittelklasse) und dem anspruchsvollsten Fahrzyklus (CADC-Motorway & Schnellladen) durchgeführt. Als VTMS Architektur wird KK1 gewählt. Auf diese Weise entfällt der Einfluss des Batteriesystems auf den HT-Kreislauf und die grundsätzliche Auslegung des VTMS ohne eine Kopplung der Systemebenen kann überprüft werden. Mit den gewählten, in Anhang A.7 aufgeführten, Parametern, betragen die Maximaltemperaturen 60 °C für die EM und 75 °C für die LE. Auf diese Weise besteht noch ausreichend Reserve für die zusätzliche Wärmebelastung durch das Batteriesystem bei den gekoppelten KK, wodurch sichergestellt ist, dass Konzepte nicht allein aufgrund einer nicht ausreichenden Dimensionierung des Kühlers oder der Kühlmittelpumpe ausgeschlossen werden. Auf eine individuelle Auslegung des Kühlmassenstromes und des Kühlers für die einzelnen KK wird zugunsten einer besseren Vergleichbarkeit der Konzepte verzichtet.

Auch das Ladegerät kann für die vorgesehenen Ladeleistungen seinen zulässigen Temperaturbereich mit einer Maximaltemperatur von 135 °C einhalten. Da es sich mit der EM und LE in einem gemeinsamen HT-Kreislauf befindet, wird dieser während des Ladevorgangs hoch belastet, weil die Antriebskomponenten zu Beginn noch Restwärme der vorherigen Fahrt abgeben. Grundsätzlich ist die Verwendung eines Ladegerätes bei derart hohen Ladeleistungen, wie sie in diesem Beispiel vorgesehen sind, unrealistisch, weil in diesen Leistungsstufen in der Regel auf Gleichstrom-Laden zurückgegriffen wird, für das kein im Fahrzeug integriertes Ladegerät erforderlich ist. Um etwaige, bei diesem Ladeverfahren vorhandene, aktiv zu kühlende Verlustleistungsquellen im Fahrzeug abzubilden und den Kühlungsbedarf durch das VTMS während eines Ladevorgangs keinesfalls zu unterschätzen, wird das fahrzeuginterne Ladegerät in diesem Beispiel jedoch trotzdem mitbetrachtet.

Um das Potenzial der aktiven Temperierung des Batteriesystems zu betrachten, wird zunächst das Verhalten ohne aktive Temperierung betrachtet. Dies ist nur möglich, so lange kein Schnellladen durchgeführt wird. Abbildung 7.11 zeigt den Temperaturverlauf für den Beschleunigungszyklus und den WLTC Class 3 für die verschiedenen Fahrzeugkonzepte bei einer gemäßigten Außentemperatur von 20 °C. Die Temperaturkurven zeigen zwei gegensätzliche Einflüsse: Einerseits benötigen leichte Fahrzeuge weniger Antriebsleistung. Andererseits erwärmen sich große Batteriesysteme durch ihre höhere Wärmekapazität und im direkten Vergleich geringere C-Rate langsamer. Bei den betrachteten Fahrzeugklassen steigt die Batteriekapazität im Vergleich zur benötigten Antriebsleistung überproportional an. Bei identischen Fahrzyklen erfolgt daher in den höheren Fahrzeugklassen eine geringere Erwärmung, wie am Beispiel des WLTP-Fahrzyklus (WLTP) sichtbar. Sofern vom Betrieb an der Leistungsgrenze des Antriebssystems abgesehen wird, lässt sich daher der Grundsatz ableiten, dass, je größer das Batteriesystem ist, desto später gekühlt werden muss. Dies ist jedoch ein zweischneidiges Schwert, weil sich die Batterie bei zu tiefen Temperaturen langsamer erwärmt und die volle Leistung damit erst zu einem späteren

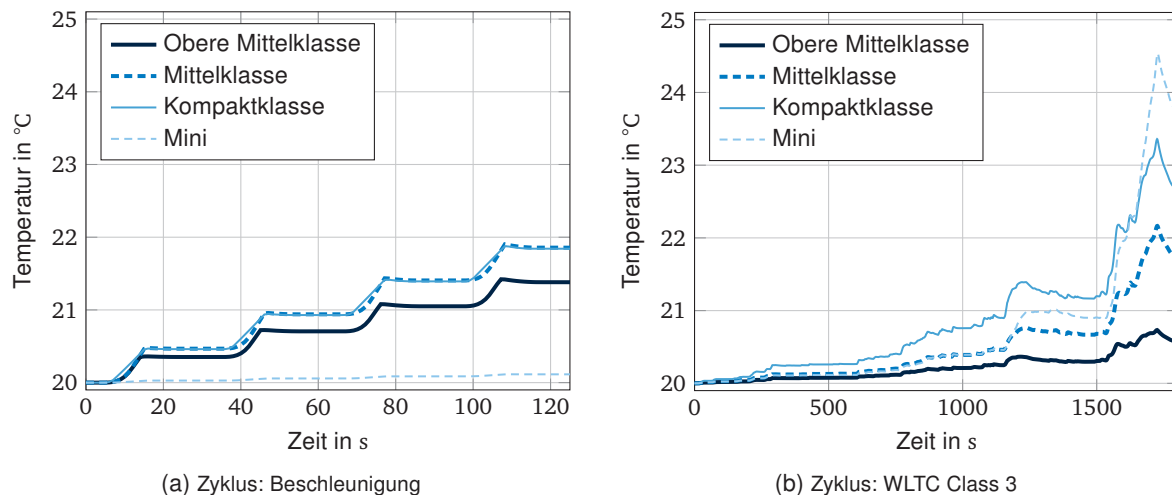


Abbildung 7.11: Entwicklung der Batterietemperatur ohne aktives Thermomanagement (KK1) für unterschiedliche Fahrzyklen und Fahrzeugklassen bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C.

Zeitpunkt zur Verfügung steht. Vor allem in Kaltländern sollte daher stets die Möglichkeit des Heizens vorgesehen werden.

Zur Überprüfung dieser Thesen wird nun eine Kopplung des Batteriesystems mit dem VTMS vorgesehen. Der Vergleich des Einflusses der Batteriegröße wird in Abbildung 7.12 anhand der Fahrzeuge der Kompakt- und der oberen Mittelklasse durchgeführt. Das Fahrzeug der Klasse Mini ist hinsichtlich der Konfiguration gänzlich anders aufgebaut und daher nur schwer vergleichbar. Das Fahrzeug der Mittelklasse liegt hinsichtlich der erreichten Temperaturen zwischen den betrachteten Fahrzeugklassen. Die Auswirkung der unterschiedlichen KK auf die Batterietemperatur wird auf Basis eines WLTC-Zyklus und einer Umgebungstemperatur von 20 °C verglichen. Weil sich KK4 von KK3 nur durch die zusätzliche Möglichkeit der Beheizung des Batteriesystems unterscheidet, was bei den gewählten Umgebungsbedingungen jedoch nicht notwendig ist, wird KK4 von der Betrachtung ausgeschlossen. Sowohl bei der Kompakt- als auch der oberen Mittelklasse ist die Erwärmung des Batteriesystems und das Potenzial der Kühlung nur gering. Selbst KK5 mit der Kopplung an den Klimakreislauf des HVAC kann im Falle der Kompaktklasse die Temperatur während des Zyklus um maximal ca. 0,6 °C senken; erst beim Stillstand des Fahrzeugs, ab ca. 1750 s, wird die Abkühlung im Vergleich zu den anderen KK deutlich beschleunigt. KK3 ermöglicht durch die thermische Pufferwirkung des PCM leicht reduzierte Batterietemperaturen im Vergleich zu KK2. Insgesamt ist der Nutzen der aktiven Klimatisierung bei gemäßigten Zyklen wie dem WLTC Class 3 jedoch noch äußerst gering.

Dieses Bild verändert sich, sobald höhere Antriebsleistungen und Schnellladen vorgesehen werden. Abbildung 7.13 vergleicht erneut die Fahrzeuge der Kompakt- und oberen Mittelklasse für den kombinierten Artemis-Fahrzyklus (CADC)-Motorway- und Schnelllade-Zyklus. Die passive Temperierung der Batterien durch KK1 erreicht Temperaturen weit oberhalb der zulässigen Bereiche und wird deshalb von einer weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Weiterhin führen Kreisläufe mit thermischer Kopplung von VTMS und BTMS zu einer unzulässig starken Erwärmung der Batterie. Dies lässt sich auf die, im Schnellladefall, im Vergleich zum Fahrbetrieb deutlich höhere Fluidtemperatur im HT-Kreislauf zurückführen. Auch wenn keine Beheizung des Batteriesystems erwünscht ist, sieht das Simulationsmodell einen geringen, parasitären Wärmestrom zwischen HT- und NT-Kreislauf vor, weil sich eine komplette thermische Entkopplung in der Realität nur schwer umsetzen lässt. Dieser geringe Wärmestrom belastet den

7 Ergebnisse des Auslegungsprozesses

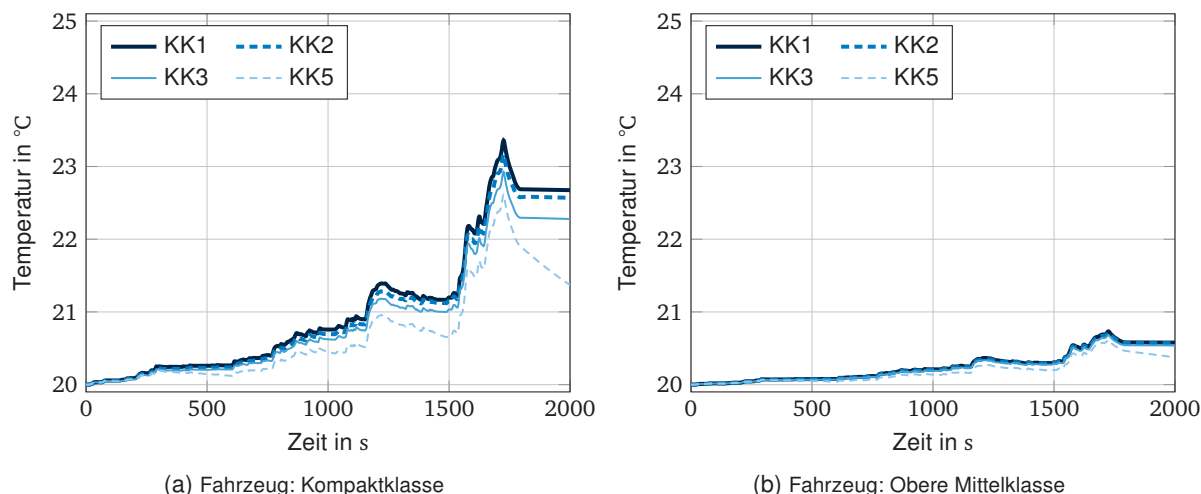


Abbildung 7.12: Entwicklung der Batterietemperaturen bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C. Zyklus: WLTC Class 3.

während des Schnellladens ohnehin schon hoch belasteten NT-Kreislauf zusätzlich und führt so zu einer Überhitzung der Batterie. Wird die Möglichkeit der Beheizung der Batterie durch das VTMS vorgesehen, muss folglich Sorge getragen werden, dass hierdurch im Falle des Kühlens kein Nachteil entsteht. Dies zeigt das hohe Gefährdungspotential der Kopplung von BTMS und VTMS.

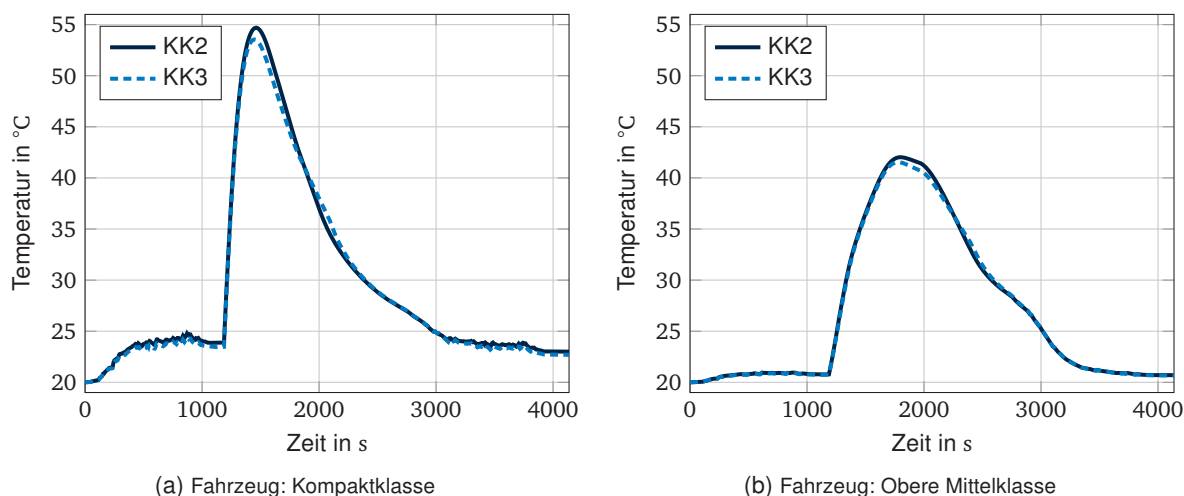


Abbildung 7.13: Entwicklung der Batterietemperaturen bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C. Zyklus: CADC-Motorway mit Schnellladen.

Von den untersuchten KK sind folglich nur KK2 und KK3 geeignet, die Batterie in allen betrachteten Zyklen ausreichend zu kühlen. Das PCM in KK3 kann durch die geringe verbaute Masse die Batterietemperatur dabei nicht nennenswert senken. Die Verwendung einer höheren Masse erscheint, angesichts der ohnehin schon angespannten Gewichtssituation von Elektrofahrzeugen, zweifelhaft. Die größere Batterie des Fahrzeugs der oberen Mittelklasse erlaubt, durch ihre höhere thermische Masse und die geringeren C-Rate auf Zellebene, eine Reduzierung der Maximaltemperatur von über 10 °C. Die Batterie wird daher deutlich geringer belastet.

Im Falle hoher Außentemperaturen steigt zwar einerseits der Klimatisierungsbedarf der Batterie, andererseits sinkt jedoch die Wirkung der Kühlung, weil auch die Wärmeabgabe in die Umgebung verschlechtert wird. Dies ist für den WLTC und eine Umgebungstemperatur von

40 °C in Abbildung 7.14 dargestellt. Die aktive Klimatisierung von KK2 kann die Batterietemperatur im Vergleich zur passiven Klimatisierung (KK1) zwar stärker absenken, wie es bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C der Fall war. Eine Kühlung unter Außentemperatur ist jedoch nicht möglich. Das PCM von KK3 befindet sich zu Beginn des Zyklus bereits jenseits des Phasenwechsels und bringt daher keine Vorteile mehr. Abhilfe bei der Batterietemperatur schafft nur der Kältemittelkreislauf von KK5, der in Bereichen niedriger Antriebsleistung bei beiden betrachteten Fahrzeugkonzepten eine starke Abkühlung der Batterie erlaubt. Dem muss jedoch der hohe erwartete Energiebedarf gegenübergestellt werden, dessen Betrachtung jedoch nicht Teil dieser Arbeit ist.

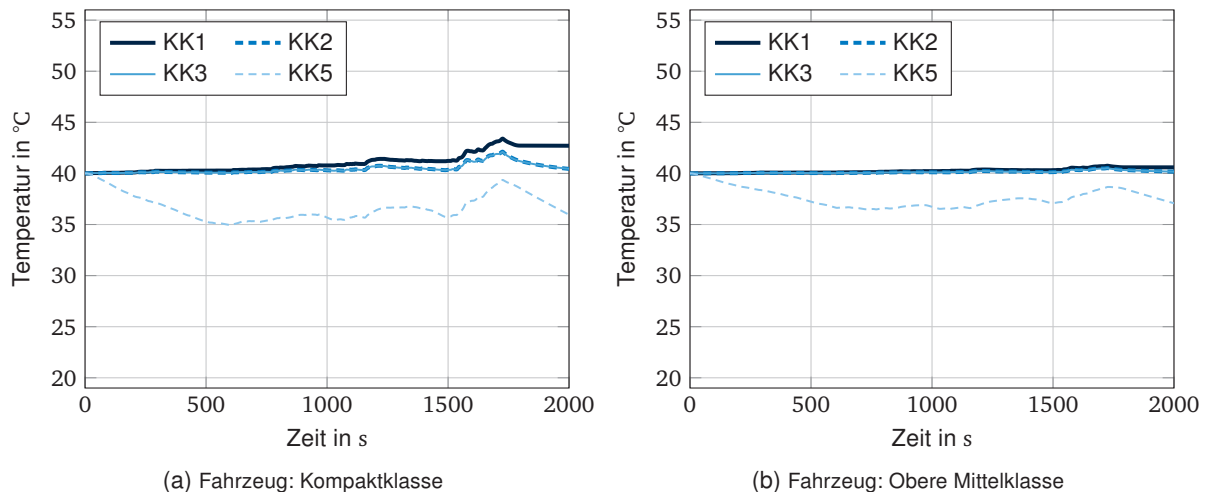


Abbildung 7.14: Entwicklung der Batterietemperaturen bei einer Umgebungstemperatur von 40 °C. Zyklus: WLTC Class 3.

Im Falle eines Zyklus mit Schnellladen ergeben sich analoge Beobachtungen zu Abbildung 7.13, jedoch mit unzulässig hohen Temperaturen jenseits der 70 °C für Kompakt- beziehungsweise 60 °C für obere Mittelklasse. Weil KK5 durch die zusätzliche Kopplung mit dem HT-Kreislauf erneut durch ein zusätzliches Aufheizen des NT-Kreislaufs betroffen ist, hat der Kältemittelkreislauf keinen Einfluss und die Batterietemperatur kann nicht gesenkt werden. Für diesen Fall wäre ein KK mit Kältemittelkreislauf, jedoch thermisch komplett entkoppelten HT- und NT-Kreisläufen ideal. Bedenken bzgl. des Energieverbrauchs des Kältemittelkreislaufs während des Ladens bestehen keine, weil keine Auswirkungen auf die Reichweite bestehen und der Energieverbrauch im Vergleich zur Ladeleistung als vernachlässigbar klein erwartet wird.

Als letztes Szenario wird das Heizen des Batteriesystems bei geringen Umgebungstemperaturen behandelt. Zu diesem Zweck stellt Abbildung 7.15 die Batterietemperatur für den WLTC bei 0 °C Umgebungstemperatur dar. Unter diesen Voraussetzungen hat die aktive Temperierung von KK2 gegenüber KK1 sogar Nachteile. Selbst wenn der Kühlmassenstrom auf null reduziert wird, führt die Konduktion des Kühlmittels immer noch Wärme aus dem Batteriesystem ab. Dieser Effekt ist jedoch für die gewählten Systemparameter so klein, dass seine Auswirkung unterhalb der Genauigkeit des Simulationsmodells liegt. Die Abwärmennutzung des HT-Kreislaufes bei KK4 bringt nur geringen Nutzen, weil, bevor über diesen Weg nennenswert Wärme in den NT-Kreislauf gebracht werden kann, zuerst ein geeignetes Temperaturniveau erreicht werden muss. Dies ist selbst am Ende des Zyklus noch nicht der Fall, weshalb der Aufwand des zusätzlichen Wärmepfades durch den Nutzen nicht zu rechtfertigen ist. Beim Fahrzeug der oberen Mittelklasse, dessen Batterie nur geringe Selbsterwärmung zeigt, ist der Nutzen etwas höher, es ist jedoch anzumerken, dass ein elektrischer Zuheizung in der Batterie oder im NT-Kreislauf für die gewünschte Wirkung die geeignetere Wahl wäre.

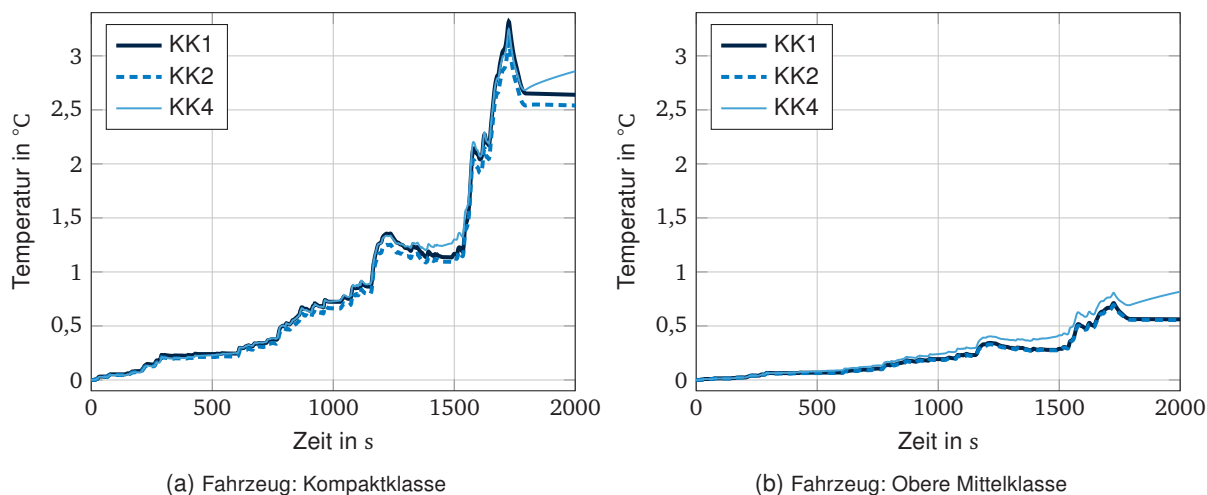


Abbildung 7.15: Entwicklung der Batterietemperaturen bei einer Umgebungstemperatur von 0 °C. Zyklus: WLTC Class 3.

Im Falle des Schnellladens ist fraglich, ob ein kaltes Batteriesystem für die hohen vorgesehenen Ladeleistungen geeignet ist, oder ob zusätzliche Einrichtungen zur Heizung verbaut werden müssen. Auch eine vorangegangene Fahrt hat bei diesen Umgebungstemperaturen nur geringe Auswirkungen auf die Batterietemperatur, wie in Abbildung 7.16 gezeigt. Bei 0 °C erwärmt sich die Batterie bei dem Fahrzeug der Kompaktklasse während des CADC-Motorway Zyklus um lediglich 5 °C, bei der oberen Mittelklasse sind es lediglich 1 °C. Anhand des Temperaturverlaufes ist keine weitere Erwärmung der Batterie bei Verlängerung der Autobahnfahrt zu erwarten, weil sich gegen Ende des Zyklus ein thermisches Gleichgewicht einstellt. Interessant ist, dass die Kopplung mit dem HT-Kreislauf in KK4 in diesem Fall sogar eine Reduzierung der Batterietemperatur zur Folge hat, der HT-Kreislauf dient durch seine thermische Masse zunächst also als zusätzliche Wärmesenke.

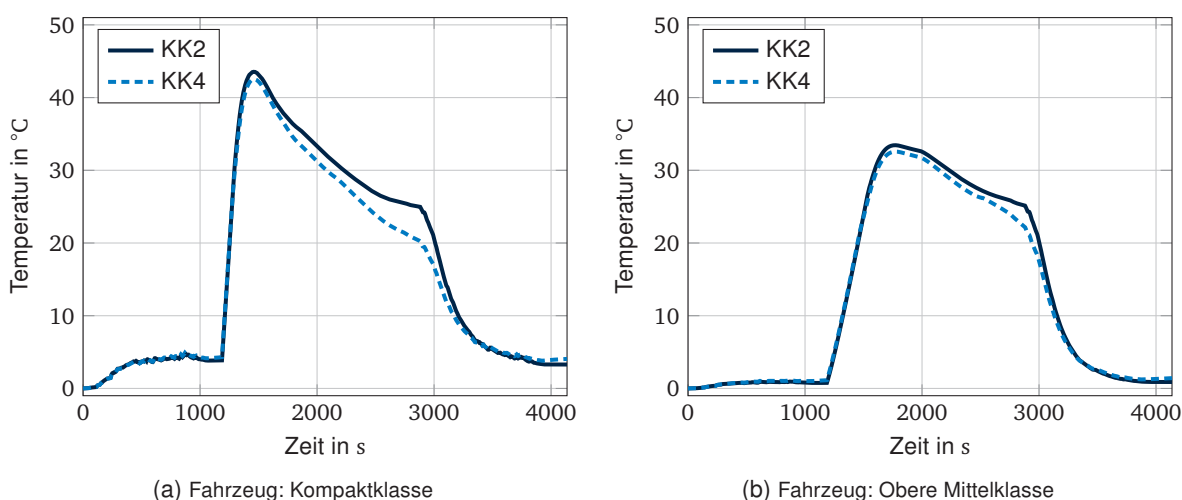


Abbildung 7.16: Entwicklung der Batterietemperaturen bei einer Umgebungstemperatur von 0 °C. Zyklus: CADC-Motorway mit Schnellladen.

Werden die Umgebungstemperaturen noch weiter gesenkt, ist mit den verwendeten KK kein Schnellladen mehr möglich. Die Verlustleistungen des reinen Fahrbetriebs reichen nicht mehr aus, die Batterie nennenswert zu erwärmen. Abbildung 7.17 zeigt eine Autobahnfahrt des Fahrzeugs der oberen Mittelklasse bei einer Umgebungstemperatur von -20 °C. Ab etwa der

Mitte des Zyklus ist bei KK4 der HT-Kreislauf warm genug, um die Batterietemperatur leicht zu erhöhen, wenn auch bei weitem nicht im benötigten Maße.

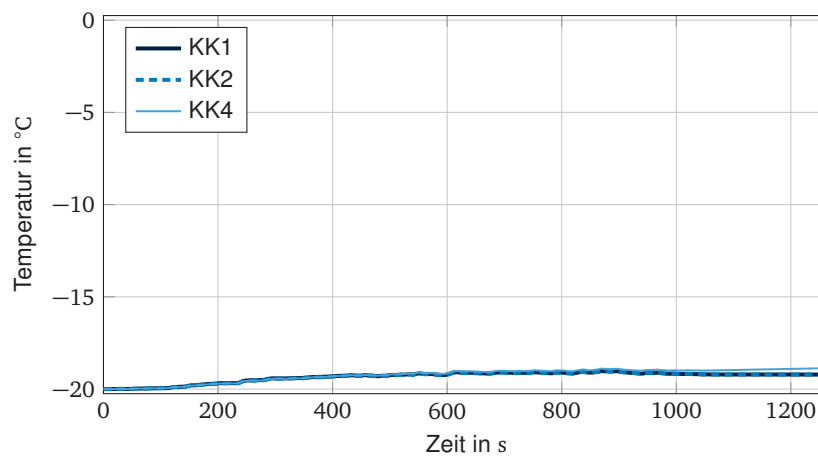


Abbildung 7.17: Entwicklung der Batterietemperaturen bei einer Umgebungstemperatur von -20 °C . Fahrzeug: Obere Mittelklasse. Zyklus: CADC-Motorway.

Es kann festgehalten werden, dass die Auslegung des VTMS vom gewünschten Anwendungsfall und der Fahrzeugklasse abhängt. Je größer das Batteriesystem, desto länger kann von der Benutzung einer aktiven Kühlung abgesehen werden. Ab einer gewissen Ladeleistung ist jedoch in jedem Fall eine Kühlung vorzusehen, andernfalls kann die volle elektrische Leistung, bevor die Batterie zu heiß wird, nur für kurze Zeit bereitgestellt werden. Eine Kühlung ist folglich nur bei hohen Ladeleistungen oder dauerhaft hohen Umgebungstemperaturen erforderlich; bei letzterem dann jedoch zwingend mit Kopplung zum Kältemittelkreislauf. Die geringe Selbsterwärmung großer Batteriesysteme wird jedoch zum Nachteil, wenn diese unter kalten Umgebungsbedingungen betrieben werden. Bei tiefen Umgebungstemperaturen zeigen die Simulationsergebnisse in allen betrachteten Fällen den Bedarf einer aktiven Beheizung. Andernfalls könnte das Batteriesystem nicht mehr mit voller Leistung betrieben werden, wodurch eine Erfüllung der geforderten Referenz-Fahrzyklen unter Umständen nicht mehr möglich ist. Ohne aktive Beheizung sind die betrachteten Batteriesysteme nicht innerhalb akzeptabler Zeiträume in ihre idealen Temperaturbereiche zu bringen. Diese Zusammenhänge können durch die entwickelte Auslegungsmethode abgebildet werden, weshalb deren Eignung auch auf dieser Systemebene nachgewiesen ist.

7.7 Wechselwirkungen zwischen den Systemebenen

Die betrachteten Systemebenen Zelle, Parallelschaltung, Package, BTMS und VTMS interagieren miteinander und beeinflussen sich gegenseitig. Die positiven und negativen Wechselwirkungen, die sich dadurch ergeben, werden an dieser Stelle anhand der Simulationsergebnisse diskutiert, Potenziale und Gefahren aufgezeigt und daraus allgemeine Gestaltungsgrundsätze abgeleitet.

Bei den Ebenen Zelle und Parallelschaltung besteht ein klarer Zusammenhang zwischen den Parameterstreuungen des dynamischen Zellverhaltens und der Strombelastbarkeit des Batteriesystems. Je höher die Schwankung, desto geringer ist der maximal zulässige Strom. Die Simulationsergebnisse deuten darauf hin, dass bei einer gegebenen Parameterstreuung ein Optimum hinsichtlich der durch die Zellgröße definierte Anzahl der parallel verschalteten Zellen besteht, bei dem die Verschaltung einerseits groß genug ist, genügend Zellen mit

gegenseitig ausgleichendem Verhalten zu beinhalten, andererseits jedoch klein genug, um die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Zellen, die statistische Ausreißer darstellen, zu minimieren. Aufgrund der individuellen Ausprägung der Parameterschwankungen verschiedener Zelltypen, -größen und -chemien, bis hin zu einzelnen Produktionschargen [136], ist zu erwarten, dass dieses Optimum nicht allgemeingültig quantifiziert werden kann. Gleichzeitig ist die Größe der Parallelschaltung durch Kapazitätsanforderungen sowie die Modularisierung und Überwachung des Batteriesystems zum Teil vorgegeben, weshalb nur geringes Potenzial besteht, auf diesem Wege auf eine gegebene Parameterschwankung zu reagieren. Im Zweifel ist eine Sortierung der Zellen erforderlich, um ein homogenes Verhalten sicherzustellen.

Das Package wird durch die Anzahl der Zellen, deren Größe und die Verschaltung beeinflusst. Je geringer die Kapazität der Zellen, desto flexibler können diese angeordnet werden. Dieser positiven Eigenschaften stehen jedoch der höhere Montage- und Kontaktierungsaufwand gegenüber. Die letzten beiden Punkte sind nicht Teil des vorliegenden Auslegungsprozesses, müssen in einem späteren Auslegungsschritt jedoch unweigerlich in Erwägung gezogen werden. Geht es um die bloße Erfüllung anspruchsvoller Package-Restriktionen, sind kleine Zellen jedoch tendenziell im Vorteil.

Die Aufgabe des BTMS ist es, ein für die Zellen optimales und innerhalb des Batteriesystems möglichst homogenes Temperaturniveau zu schaffen. Bei der durchgeführten Simulation wurde eine zwar niedrige, jedoch homogene und in allen Raumrichtungen gleiche Wärmeleitung zwischen den Zellen angenommen. Zusätzlich wurden für das Batteriesystem keine zusätzlichen Wärmeströme über einzelne Außenflächen, etwa durch nahe an der Batterie angebrachte Antriebskomponenten oder Fahrwind an der Unterseite, angenommen. Tritt dieser Fall auf, kann diesen für die Temperaturverteilung schädlichen Einflüssen durch eine gezielte Platzierung des BTMS Rechnung getragen werden. Auf eine erhöhte Wärmefreisetzung einzelner Zellen, sei es durch vorzeitige Alterung oder Parameterschwankungen, kann allein durch eine Verbesserung der Wärmeleitung zwischen den Zellen und der damit verbundenen Temperaturhomogenisierung reagiert werden. Weil im Vorfeld nicht bekannt ist, wo sich diese Zellen innerhalb des Batteriesystems befinden werden, ist eine gezielte Kühlung durch das BTMS ohne unrealistisch hohen Aufwand nicht möglich.

Bezüglich der Kopplung von VTMS und BTMS, in den durchgeführten Simulationen dargestellt durch HT- und NT-Kreislauf, überwiegen für die untersuchten KK die Nachteile. Der Nutzen bei der Beheizung des Batteriesystems stellte sich als äußerst gering heraus. Die erzielbaren Temperaturgewinne des Batteriesystems lagen unterhalb von 1 °C und waren in den Zyklen erst zu einem späten Zeitpunkt, nach der Überwindung der Wärmekapazität des HT-Kreislaufs, verfügbar. Gleichzeitig ergab sich ein hohes Gefährdungspotenzial durch unerwünschte Wärmeströme in den NT-Kreislauf, die die Batterietemperatur erhöhten, wenn eigentlich eine Kühlung erforderlich war. Anhand der in dieser Untersuchung verwendeten KK kann ohne Verbesserungen der Architekturen und zusätzlichen Maßnahmen zur gezielten thermischen Trennung der Kreisläufe eine Kopplung von BTMS und VTMS daher nicht empfohlen werden.

7.8 Diskussion der Ergebnisse

Die Eignung des entwickelten Vorgehens wurde anhand mehrerer exemplarischer Anwendungsfälle und Ausgangssituationen gezeigt. Sämtliche Aussagen fußen daher auf der Validität der in diesem Kapitel entwickelten Systemkonzepte. Bevor in Kapitel 8 eine grundsätzliche Diskussion

des Auslegungsprozesses erfolgt, sollen daher zunächst die im aktuellen Kapitel vorgestellten Ergebnisse, unabhängig des gewählten Vorgehens, nochmals diskutieren werden.

Die in der Auslegungsmethode betrachteten Systemkonzepte werden anhand von Simulationsergebnissen bewertet. Um sicherzustellen, dass die Konzepte der Realität entsprechen, ist daher die Validität sämtlicher Simulationsmodelle zwingende Voraussetzung. Nach Krausz [165, S. 36-37] sind hierfür folgende Schritte erforderlich:

1. *Modellbewertung*: Bewertung der grundsätzlichen Modellqualität.
2. *Szenariobewertung*: Bewertung der Ähnlichkeit von Bewertungs- und Validierungsszenarien.
3. *Sensitivitätsbewertung*: Bewertung der Auswirkung von Variationen in Parametern und Modelleingängen.

Erst, wenn diese Bewertungen durchgeführt sind, kann der gesamte Simulationsansatz abschließend bewertet werden und eine Aussage bezüglich der Genauigkeit und damit der Validität der Ergebnisse getroffen werden [165, S. 37].

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Ansatz entzieht sich jedoch durch seine Ausrichtung auf eine frühe Entwicklungsphase einer direkten Anwendung dieses Vorgehens. Das Ziel ist nicht, ein bestehendes System möglichst detailliert abzubilden, sondern wie in Abbildung 7.18 gezeigt, eine große Zahl unterschiedlicher Konzepte möglichst schnell miteinander vergleichen und ungeeignete Konfigurationen identifizieren und ausschließen zu können. Um dies zu erreichen, sind bei der Modellierung einige Vereinfachungen notwendig. Dies hat Auswirkungen auf die quantitative Genauigkeit der Simulationsmodelle, gleichzeitig muss jedoch die qualitative Aussagekraft für die vergleichende Betrachtung der Konzepte erhalten bleiben. Über die Höhe des quantitativen Genauigkeitsverlustes ist keine belastbare Aussage möglich. Auch wenn Teilmodelle und grundsätzliche Modellierungsansätze validiert wurden, konnte dies stets nur für einen bestimmten Zelltyp, eine Verschaltung oder, im Falle des VTMS, für bestimmte Architekturen, EM-, LE-Modelle, inklusive deren thermischer Anbindung, und Volumenströme durchgeführt werden. Nach den für den Auslegungsansatz notwendigen Verallgemeinerungen für andere Dimensionierungen, Zelltypen oder VTMS Architekturen, sind daher weder die Modellqualität noch die Auswirkungen der Skalierung bekannt, weil keine Sensitivitätsbewertung der Parameter mehr durchgeführt werden kann. Die zugrundeliegenden, unterschiedlich aufgebauten und dimensionierten Systeme existieren in der Realität nicht und können daher nicht zum Vergleich herangezogen werden. Um die Qualität der Auslegungsempfehlungen daher tatsächlich abschließend bewerten zu können, müssten die einzelnen Konzepte realisiert und vermessen werden. Hinsichtlich der Vielzahl an Möglichkeiten, man denke alleine an die unterschiedlichen Zelltypen und -größen und den Umfang der beinhalteten Systemebenen und Szenarien kombinierter Fahr- und Ladezyklen bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen, ist der Aufwand derart hoch, dass dies für den kompletten Ansatz kaum realistisch durchführbar ist. Aus diesem Grund kann in dieser Arbeit keine weitere Validierung über die bereits vorgestellte Bewertung der Teilmodelle hinaus durchgeführt werden; die Aussagen zur Validität des gesamten Ansatzes müssen aus diesen Betrachtungen abgeleitet werden.

Die Zuverlässigkeit der Simulationsmodelle wird durch Skalierung beziehungsweise Anpassungen auf andere Gegebenheiten verringert. Im Rahmen dieser Arbeit wurden, über die reine Modellierung beziehungsweise den validierten Bereich hinaus, folgende Anpassungen und Annahmen vorgenommen:

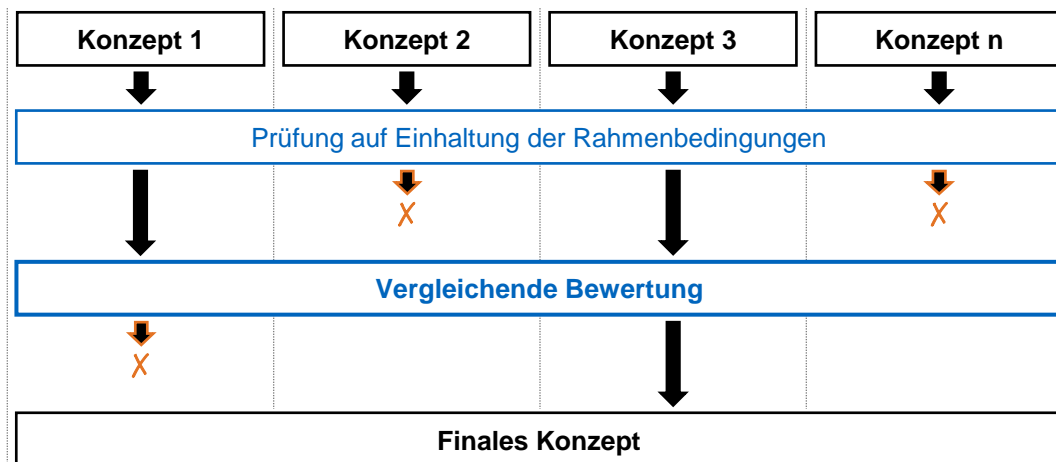


Abbildung 7.18: Auswahl des Gesamtkonzepts vor dem Hintergrund möglicher Einschränkungen bei der Genauigkeit der Simulationsmodelle

- *Elektrisches Zellmodell:* Anpassung der ECM-Parameter auf andere Zellkapazitäten, Laden/Entladen mit höherer C-Rate als durch die Parametrierung vorgesehen, Skalierung der Zellparameter zur Abbildung von Parameterstreuungen
- *Thermisches Zellmodell:* Anpassung auf unterschiedliche Zelltypen, Verlassen des parametrisierten Temperaturbereichs
- *Parallelschaltungsmodell:* Darstellung beliebiger Parallelschaltungen
- *Geometrisches und physikalisches Batteriesystemmodell:* Annahmen bei der Abbildung von Modul- und Packeffekten (z. B. Masse und Platzbedarf Modulgehäuse)
- *Thermisches Batteriesystem- und BTMS Modell:* Modellierung von Wärmeströmen in alle Raumrichtungen für verschiedene Zelltypen, Abschätzung der thermischen Anbindung des BTMS an die Zellen
- *Längsdynamikmodell [157]:* Abschätzung nicht bekannter Fahrzeugparameter
- *VTMS Modell:* Verwendung nicht validierter KK, Kühl- und Kältemittel, Skalierung der Antriebsstrangmodelle, Volumenströme und Kühlerparameter

Dieser unweigerlich hohen Anzahl an möglichen Fehlerquellen stehen die vorgestellten Beobachtungen aus der Anwendung des Ansatzes gegenüber. Sämtliche Modelle bleiben in allen betrachteten Konfigurationen und auch im Falle der gekoppelten Anwendung, für die sie nicht parametrisiert wurden, stabil und innerhalb realistischer Betriebsgrenzen. Konzepte, in denen der sinnvolle Betriebsbereich verlassen wurde, hierzu gehören die Szenarien des Schnellladens ohne aktive Kühlung des Batteriesystems, sind Fälle, die auch in der Realität nicht realisierbar sind. Auch weitere Fehlerbilder, etwa ein zu großer Temperaturgradient im Inneren des Batteriesystems durch inhomogene Kühlung, werden zuverlässig erkannt. Bei einer Erhöhung der Wärmeleitung zwischen den Zellen geht der Temperaturgradient wie erwartet zurück. Die Simulation ist folglich in der Lage, nicht geeignete Auslegungen zu erkennen und reagiert wie erwartet auf Anpassungen einzelner Parameter.

Im Falle des kombinierten elektrisch/thermischen Batteriesystemmodells inklusive BTMS unter Verwendung zylindrischer 18650-Zellen, konnte zusätzlich mit dem Batteriesystem des Tesla Model S85 eine reale Entsprechung gefunden werden. Auch wenn viele Parameter des realen

Fahrzeugs nicht bekannt sind, hierzu gehören die tatsächlichen Volumenströme, Temperaturverläufe während des Ladens und die thermischen Wechselwirkungen innerhalb des Packs, empfiehlt die Simulation eine Auslegung, die der Realität entspricht. Würde die geometrische Anordnung der Zellen im Inneren des Batteriesystems weiter auf die Gegebenheiten des Batteriepacks des Tesla angepasst, ist zu erwarten, dass die Modulinnenkühlung als einzige valide Konfiguration übrig bleibt und die Empfehlung des Auslegungsalgorithmus wäre identisch zum realen Batteriesystem.

Für die VTMS Auslegung ist diese Betrachtung so nicht möglich. Ein Teil der möglichen Fehlerquellen wurde zwar beseitigt, indem ein stark vereinfachtes elektrisches und thermisches Batteriemodell verwendet wurde, sodass keine Fehlerpropagation von Abweichungen durch die Parallelschaltungs-, BTMS- und Wärmeleitungssimulation mehr zu erwarten ist. Trotzdem ist die Anzahl an abgeschätzten Parametern und notwendigen Vereinfachungen der realen Mechanismen hoch. Für die Validität der Simulation spricht, dass die Temperaturverläufe der Messungen an einem realen System ohne zusätzliche Anpassungen mit hoher Übereinstimmung getroffen wurden. Diese Versuche erfolgten jedoch unter kontrollierten Bedingungen auf einem Rollenprüfstand. Die zusätzlichen Einflüsse und vollkommen unterschiedlichen konstruktiven Gegebenheiten anderer Fahrzeugmodelle sowie die hohe Anzahl notwendiger Systemparameter führen zu einer Vielzahl an Fehlerquellen, weshalb bei der VTMS Simulation innerhalb des Auslegungsprozesses die größten Ungenauigkeiten zu erwarten sind. Anhand der Aussagekraft der Simulationen werden die Ergebnisse auf dieser Systemebene trotzdem als ausreichend genau eingeschätzt. Einerseits werden unerwünschte und unerwartete Effekte, als Beispiel seien die unzureichende Aufheizung der Batterie durch den HT-Kreislauf und die Probleme der parasitären Wärmeströme in die Batterie beim Schnellladen genannt, überhaupt erst erkannt. Andererseits gibt die Größenordnung der Effekte einen Überblick über das jeweilige Potenzial beziehungsweise die Gefahr. Selbst, wenn in den Beispielen die Wirksamkeit der Nutzung der Verlustwärme um eine Größenordnung unterschätzt wurde, wäre die Aussage hinsichtlich der Eignung der jeweiligen KK vermutlich ähnlich ausgefallen.

Zusammengefasst sind die vorgestellten Ergebnisse hinsichtlich ihrer quantitativen Aussagekraft kritisch zu bewerten. Für eine Diskussion auf qualitativer Ebene bestehen hingegen genügend Indizien, die für einen hohen Realitätsbezug sprechen. Vor diesem Hintergrund erfolgt im nächsten Kapitel eine abschließende Diskussion des Ablaufs der Systemauslegung, der benötigten Parameter und Informationen sowie dem Vorgehen zur Bewertung der Auslegungsempfehlung, jeweils unter der Berücksichtigung der durchgeführten Vereinfachungen und der bekannten Limitationen des Ansatzes.

8 Diskussion des Auslegungsprozesses

Nach der Diskussion der durch den Auslegungsprozess erzeugten Systemkonzepte im vergangenen Kapitel erfolgt nun eine kritische Betrachtung des entwickelten Ansatzes an sich. Hierbei wird das Augenmerk zunächst auf die Anwendbarkeit unter den festgelegten Randbedingungen in der Entwicklungsphase des PEP gelegt. Anschließend setzt sich das Kapitel mit den durchgeführten Vereinfachungen, deren Auswirkungen auf die Belastbarkeit der Simulationsergebnisse, dem Ablauf der Systemauslegung und schließlich dem Vorgehen zur finalen Bewertung der Auslegungsempfehlungen auseinander.

8.1 Benötigte Parameter und Informationen

Für die Durchführung der Simulationen wird eine Vielzahl unterschiedlicher Parameter benötigt. Eine vollständige Auflistung hiervon erfolgt in Anhang A. Die Parameter umfassen das elektrisch und thermische Verhalten von der Zellebene bis hinauf zur Ebene des VTMS und der Längsdynamik des Fahrzeugs. Aufgrund der Ausrichtung des Auslegungsprozesses auf die Entwicklungsphase muss davon ausgegangen werden, dass entscheidende Details des zu entwickelnden Antriebsstrangs noch nicht bekannt sind und daher abgeschätzt werden müssen. Weiterhin besteht die Anforderung, die Simulationsmodelle schnell auf neue Gegebenheiten anpassen zu können; umfassender Messaufwand ist daher zu vermeiden. Ob unter diesen Voraussetzungen eine belastbare Modellparametrierung möglich ist, ist Gegenstand der folgenden Betrachtung. Hierbei wird rein auf die Parametrierung der implementierten Simulationsmodelle eingegangen. Die Diskussion der in diesen Modellen vorgenommenen Vereinfachungen erfolgt gesondert in Unterkapitel 8.2.

Das elektrische Verhalten des Batteriesystems wird maßgeblich durch die Dynamik der LIB beeinflusst. Deren Modellierung mittels ECM ist durch den aktuellen Stand der Wissenschaft gut erschlossen und stellt lediglich durch den hohen Zeitbedarf der notwendigen Messreihen für die Modellparametrierung eine Hürde dar. Werden mehrere unterschiedliche LIB für ein Batteriekonzept in Betracht gezogen, ist die Parametrierung zwingend für jede Zelle einzeln durchzuführen. Hierbei muss der gesamte spätere Betriebsbereich inkl. die sich durch Alterung verändernde Zellcharakteristik abgedeckt werden, der im Vorfeld jedoch nicht exakt bekannt ist. Einen zuverlässigen Anhaltspunkt liefern allerdings die im Datenblatt angegebenen Betriebsgrenzen der Zelle, die in der späteren Anwendung keinesfalls überschritten werden dürfen. Weil zur Absicherung des Zellverhaltens, auch im Hinblick auf die Alterung, ohnehin langwierige Messungen erforderlich sind, ergeben sich seitens des Auslegungsprozesses keine zusätzlichen Ansprüche an die Messungen. Dies gilt auch für die Bestimmung der Parameterschwankungen zwischen den Zellen. Allein anhand der Durchführung der notwendigen Zelltests, die aus Zeitgründen mit der Vermessung mehrerer Zellen gleichzeitig vorgenommen werden sollte, ist zu erwarten, dass zumindest eine erste Abschätzung über den Grad der Streuung möglich ist.

Anspruchsvoller ist die korrekte Darstellung des Verhaltens der Parallelschaltung. Einerseits zeigen bereits kleinste Änderungen der Zellparameter, etwa durch eine nicht ausreichende Anzahl an Stützstellen des Datensatzes, deutliche Abweichung der Simulationsgüte. Andererseits wird die Dynamik der Parallelschaltung durch zusätzliche Widerstände in der Verschaltung beeinflusst, die in der durch den Auslegungsansatz betrachteten Entwicklungsphase noch nicht bekannt sind. Um nicht auf Abschätzungen zurückgreifen zu müssen, ignoriert das Simulationsmodell der Parallelschaltung zusätzliche Widerstände zwischen den Zellen. Sind bereits Informationen über die eingesetzte Technologie zur Zellkontaktierung und deren Übergangswiderstände vorhanden, können diese zu den Zellinnenwiderständen hinzuaddiert werden. Aufgrund des hohen Aufwandes der elektrischen Vermessung von Parallelschaltungen wurde der Nutzen dieser Herangehensweise in dieser Arbeit nicht untersucht.

Ebenfalls problematisch ist die Bestimmung des thermischen Verhaltens der einzelnen Systemebenen. Bereits auf Zellebene ist die Vermessung durch die parallel ablaufenden, unterschiedlichen Verlustmechanismen und deren Rückkopplung mit dem elektrischen Verhalten anspruchsvoll und vor allem verglichen zur Vermessung der elektrischen Dynamik stark fehlerbehaftet. Zusätzliche Unsicherheiten ergeben sich durch das thermische Verhalten im Verbund. Hierbei ist neben der Anordnung vor allem die Wärmeleitung zwischen den LIB entscheidend. Diese wird durch eine Vielzahl unterschiedlicher konstruktiver Details beeinflusst, die beim betrachteten Entwicklungsstand lediglich abgeschätzt werden können. Denkbare Möglichkeiten sind hierbei eine konservative Verwendung von Erfahrungswerten wie sie in dieser Arbeit angewendet wurde oder die gezielte Durchführung von Vorversuchen an Prototypen. Letzteres stellt einen Mehraufwand dar, ist jedoch spätestens zur Validierung des finalen Konzeptes sowieso notwendig. Es ist daher ein mehrstufiges Vorgehen empfehlenswert, bei dem zuerst anhand von Abschätzungen ein oder mehrere vielversprechende Konzepte identifiziert und diese anschließend durch weitere Tests abgesichert werden.

Die genannten Schwierigkeiten setzen sich bei der Parametrierung der BTMS und VTMS Simulation fort. Zwar wurde die Betrachtung der Kühlkreisläufe stark vereinfacht, trotzdem verbleibt eine Vielzahl notwendiger Informationen, um das Systemverhalten zu beschreiben. Die Parameter des Kühlmediums stellen hierbei die am einfachsten zu bestimmenden Eigenschaften dar und können Datenblättern, oder – wie in dieser Arbeit – Stoffdatenbanken entnommen werden. Zur Definition der Kühlkanäle und sonstiger Rohrleitungen werden, sofern sie nicht anhand der Abmessungen des betrachteten Batteriesystems vom Auslegungsansatz selbst bestimmt werden, aufgrund der vereinfachten Betrachtungsweise lediglich Querschnitte, Leitungslängen und Volumenströme benötigt. Die grundsätzlich möglichen BTMS und VTMS Architekturen müssen im Vorfeld vom Benutzer angegeben werden, was durch die vordefinierten Schnittstellen jedoch ohne großen Aufwand möglich ist. Die größte Herausforderung ist die Beschreibung der Wärmeübergänge zwischen den LIB und dem BTMS sowie zwischen den Antriebsstrangkomponenten und der Umgebung sowie dem VTMS. Selbst in der stark vereinfachten Betrachtungsweise bedeutet dies eine hohe Anzahl zu bestimmender Parameter, die sich zusätzlich gegenseitig beeinflussen. Für die Bestimmung dieser Parameter liefert der Stand der Wissenschaft kein anerkanntes Standardvorgehen. Für diese Arbeit wurde daher auf eigene Messungen und konservativ abgeschätzte Erfahrungswerte zurückgegriffen, deren Genauigkeit jedoch nicht quantifiziert werden kann. Weitere Einflüsse ergeben sich aus der Steuerung der Thermomanagementsysteme, die ebenfalls durch die Simulationsmodelle abgebildet werden und daher parametrieren müssen. Zur weiteren Absicherung der Simulationsergebnisse ist es daher erforderlich, alle Sensitivitäten der thermischen BTMS und VTMS Simulation in zukünftigen Versuchen weiter zu betrachten.

Zur Bestimmung der Verlustleistung des Batteriesystems im Betrieb ist bis einschließlich der BTMS Ebene lediglich die Vorgabe einer Ladeleistung erforderlich, die sich direkt aus den gewünschten Spezifikationen des Batteriesystems ergibt. Erst bei der VTMS Auslegung werden zusätzlich Fahrzyklen betrachtet und die Verlustleistung der Antriebsstrangkomponenten mittels einer Längsdynamiksimulation und Wirkungsgradkennfeldern bestimmt. Für die dafür benötigten Fahrwiderstandsgleichungen sind Informationen wie Masse, Stirnfläche und Luftwiderstandsbeiwert des Fahrzeugs nötig, die, sollten sie für das betrachtete Fahrzeugkonzept nicht bekannt sein, anhand bestehender, ähnlicher Fahrzeuge abgeschätzt werden können. Das Ziel der Simulation ist ohnehin eine Worst Case Betrachtung, die mit starken Vereinfachungen durchgeführt wird. Zur Bestimmung der im Antriebsstrang auftretenden Verlustleistungen wurden detaillierte, durch frühere Arbeiten gewonnene Wirkungsgradkennfelder verwendet. Die Bestimmung dieser Kennfelder ist aufwendig [149], für eine erste Abschätzung des Verhaltens ist es daher möglich, statische Werte für die Wirkungsgrade zu verwenden. Analog zu der für das BTMS und VTMS abgegebenen Empfehlung sollte auch für das thermische Verhalten des Antriebsstrangs eine Sensitivitätsanalyse aller Ein- und Ausgangsgrößen durchgeführt werden.

Bei den Fahrzyklen ist es sinnvoll, nicht ausschließlich auf gesetzliche Standardfahrzyklen zurückzugreifen, sondern ebenfalls Zyklen an der Leistungsgrenze des Antriebsstrangs vorzusehen. Hierfür sind lediglich die gewünschten Geschwindigkeitstrajektorien durch den Nutzer vorzugeben. Es ist jedoch zu beachten, dass aufgrund der Implementierung als Rückwärtssimulation keinerlei Überprüfung durch das Modell erfolgt, ob die Zyklen mit der verfügbaren Leistung des Antriebsstrangs überhaupt absolviert werden können. Hinsichtlich der Umweltparameter konzentriert sich die Betrachtung vorrangig auf das kurzfristige Verhalten des Batteriesystems. Eine Vorgabe statischer Temperaturen, bevorzugt an den Grenzen des im späteren Betrieb erwarteten Spektrums, ist daher ausreichend. Bei der Wahl der Temperaturen muss beachtet werden, dass eine Rückkopplung mit dem thermischen Verhalten der Antriebsstrangkomponenten, durch parasitäre Wärmeströme an BTMS und VTMS vorbei, besteht. Dies muss je nach Ausprägung durch die Parametrierung der jeweiligen Komponenten vorgesehen werden, um die Simulationsergebnisse nicht zu verfälschen. Diese Rückkopplungen bestehen zwischen allen Systemebenen, weshalb die getroffenen Annahmen und erzielten Simulationsergebnisse in späteren Entwicklungsschritten unbedingt nochmals am realen System validiert werden müssen.

8.2 Vereinfachungen, Limitationen und Entwicklungspotentiale der Simulationsmodelle

Neben der Parametrierung beeinflussen die bei der Erstellung der Simulationsmodelle vorgenommenen Vereinfachungen die Auslegungsergebnisse. Die Vereinfachungen wurden bereits in den Fachkapiteln zur jeweiligen Systemebene aufgezeigt und werden an dieser Stelle nur zusammengefasst wiedergegeben. Der Fokus wird auf die daraus entstehenden Einschränkungen und Entwicklungspotentiale der Modelle gelegt.

Bei der elektrischen Simulation wird die Dynamik der LIB mittels eines ECM mit zwei, oder alternativ vier RC-Gliedern abgebildet. Durch die Anzahl der RC-Glieder wird die Anzahl der abbildbaren Zeitkonstanten der dynamischen Effekte der LIB festgelegt; was zu Ungenauigkeiten führt. Auf die Frage, wie stark sich dieser Genauigkeitsverlust auf die Aussagekraft der Simulationsergebnisse auswirkt, ist keine pauschale Antwort möglich. Ist im Vorfeld bekannt, welche Zeitkonstanten des dynamischen Zellverhaltens von besonderem Interesse sind, können die RC-Glieder gezielt auf diese Zeitkonstanten angepasst werden. Die Aussagekraft des ECM

bleibt für diesen bestimmten Anwendungsfall so weitgehend erhalten. An dieser Stelle kommt bei der gewählten Implementierung jedoch ein zusätzlicher Effekt zu tragen. Die Simulation wird zur Verringerung des Rechenaufwandes zeitdiskret durchgeführt und die dem Modell zugrundeliegenden Gleichungen werden zwischen den einzelnen Zeitschritten linearisiert. Mit zunehmender Verkleinerung des gewählten Zeitschrittes könnte der Linearisierungsfehler immer weiter verkleinert werden. In der Praxis ist dies anhand des steigenden Rechenaufwandes jedoch nicht möglich, weshalb in dieser Arbeit die Batteriesimulation mit einer Frequenz von 100 Hz ausgeführt wird. Dies bedeutet, dass dynamische Effekte mit kürzeren Zeitkonstanten durch die Simulation nicht dargestellt werden können. Ob diese Effekte mit geringeren Zeitkonstanten für die durchgeführten Betrachtungen relevant sind, wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht. Weiterhin ist zu klären, ob die Ausführungsfrequenz für die bestehende Fragestellung tatsächlich optimal ist, oder ob diese entweder erhöht werden muss oder gar verringert werden, und die gewonnene Rechenzeit für eine Detaillierung des Simulationsmodells an anderer Stelle genutzt werden kann. Die Arbeit von Baumann [92], in der die verwendeten ECM Parameter bestimmt und die Ausführungsfrequenz der Zellsimulation festgelegt wurde, ist ebenfalls auf elektrisch/thermische Betrachtungen von LIB in Parallelschaltungen ausgerichtet. Daher ist davon auszugehen, dass die durch die Zellsimulation abgedeckten Zeitkonstanten grundsätzlich geeignet sind, die relevanten dynamischen Effekte abzudecken. Ob sich durch die in der vorliegenden Arbeit zusätzlichen Systemebenen relevante Einflüsse auf die Anforderungen an die ECM Parametrierung ergeben, kann jedoch nur durch die mit hohem Zeitaufwand verbundene Erzeugung neuer, validierter Parametersätze geklärt werden. Diese Untersuchung wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt und stellt daher einen interessanten Anknüpfungspunkt für zukünftige Arbeiten dar. In diesem Rahmen sollte auch auf eine Parametrierung und Validierung des ECM für den vollen Strom- und Temperaturbereich Wert gelegt werden.

Das elektrische Verhalten auf Batteriesystemebene wird in der vorliegenden Betrachtungsweise vor allem durch die Verschaltung der Zellen definiert. Hierbei bildet das Simulationsmodell die elektrischen Widerstände der Ableiter, die zur Parallelschaltung der Zellen und der Serienschaltung der Module verwendet werden, nicht ab. Aussagen über den Einfluss unterschiedlicher Geometrien dieser Ableiter sind in der jetzigen Entwicklungsstufe des Modells daher nicht möglich. In zukünftigen Versionen des Modells könnten diese elektrischen Verbindungen in der Simulation abgebildet und so zusätzliche Aussagen über die Eignung unterschiedlicher Systemarchitekturen getroffen werden. Eng mit der Gestaltung der Ableiter verknüpft ist die Darstellung verschiedener Formen der Verschaltung. Aktuell wird eine Seriell- und Parallelschaltung aller im Batteriesystem enthaltener Zellen angenommen. Die alternativen Varianten, in denen eine Parallelschaltung auf Systemebene erst durch die Module geschieht oder mehrere serielle Stränge parallelgeschaltet werden, ist derzeit nicht vorgesehen. Eine Möglichkeit ist, auch diese Varianten zu berücksichtigen, indem die elektrische Simulation auf einen zweistufigen Ansatz erweitert wird. So kann die Verschaltung auf Modulebene simuliert und diese Ergebnisse anschließend in einem Verschaltungsmodell auf Systemebene zur Simulation des Verhaltens des gesamten Batteriepacks verwendet werden. Während der zusätzliche Rechenaufwand als vertretbar eingeschätzt wird, steigt der Aufwand zur Konzepterstellung durch diese zusätzliche Dimension stark an, vor allem, wenn der bislang angewendete, vollfaktorielle Ansatz weiterverfolgt wird.

Neben der Einhaltung der Betriebsbedingungen der Zellen ist deren Alterungsverhalten ein entscheidendes Kriterium für die Bewertung eines Systemkonzepts. Die zugrundeliegenden Alterungsmechanismen greifen an verschiedenen Stellen im Inneren der LIB an und damit auf einer Systemebene, die für die Konzepterstellung nicht betrachtet wird. Diese Vernachlässigung

ist legitim und wird im Stand der Wissenschaft vielfach angewandt. Für eine dedizierte, zellspezifische Prognose des Alterungsverhaltens ist jedoch zusätzlicher Modellierungs- und vor allem Parametrierungsaufwand nötig, der im Rahmen der Arbeit nicht mehr durchgeführt wurde. Um trotzdem Aussagen darüber treffen zu können, ob die Zellen in Betriebszustände geraten, in denen beschleunigte Alterung zu erwarten ist, erfolgt eine Bewertung der Belastung mittels der LA. Diese erlaubt zwar einen Ausschluss von Systemkonzepten, in denen sich die Zellen zu weit, oder zu lange in Bereichen erhöhter Alterungsgefahr befinden, eine quantitative Aussage, wie stark die Alterung für die einzelnen Konzepte tatsächlich ausfällt, kann allerdings nicht abgeleitet werden. Zwar lässt sich, wie in Unterkapitel 5.5 bereits diskutiert, ein Zusammenhang zwischen den durch die LA aufgezeichneten Belastungsereignissen und der quantitativen Zellalterung herstellen, tiefer gehende Aussagen, etwa über die Ausprägung durch Vorgänge im Inneren der Zellen hervorgerufene Alterungsanteile oder die Pfadabhängigkeit der Alterung, sind jedoch nicht möglich. Für eine finale Absicherung und Quantifizierung des Alterungsverhaltens der LIB in den einzelnen Systemkonzepten ist der entwickelte Ansatz daher nicht geeignet, beziehungsweise muss um ein dediziertes Alterungsmodell erweitert werden. Durch den hohen Zeitaufwand, der vor allem in die Parametrierung eines solchen Modells fließen muss, ist diese Herangehensweise in der Konzeptphase, vor allem, wenn viele unterschiedliche Zelltypen betrachtet werden, jedoch nicht zielführend. Diese Erweiterung ist daher erst zu einem späteren Zeitpunkt sinnvoll, wenn der Lösungsraum bereits deutlich eingeschränkt wurde. Für diese Vorauswahl ist der Auslegungsprozess in seiner jetzigen Form bereits geeignet.

Im Vergleich zum elektrischen Teilmodell ergibt sich für die thermische Simulation, für den in dieser Arbeit gewählten Betrachtungshorizont, eine ungleich höhere Zahl an Freiheitsgraden, was sich auch in der Anzahl notwendiger Vereinfachungen der Simulationsmodelle äußert. Während bei der Berechnung der Verlustleistung der Zellen mit der reversiblen und irreversiblen Wärmegeneration die im Stand der Wissenschaft gängigen Mechanismen vollumfänglich abgedeckt werden, gehen durch die Vereinfachung zu einer thermischen Punktmasse sämtliche Informationen über die innere Temperaturverteilung verloren. Der Fehler, der hierdurch entsteht, steigt mit der Zellgröße an und führt dazu, dass die Maximaltemperaturen und damit die Ausprägung des Temperaturgradienten innerhalb der Zellen unterschätzt werden. Ein Beispiel: Eine, in der aktuellen Entwicklungsstufe der Simulationsmodelle als geeignet angesehene Bodenkühlung einer großformatigen prismatischen LIB, kann sich in der Realität als unzureichend herausstellen, weil die Temperaturrandbedingungen nur im unteren Teil der Zelle eingehalten werden können. Diese Information kann das Modell in seiner jetzigen Form nicht zur Verfügung stellen. Sehr wohl kann aber die Gefahr der unzulässigen Annahme der thermischen Punktmasse über das Biot-Kriterium abgeschätzt werden (Unterkapitel 5.4). Die Erweiterung des thermischen Modells um eine vollständige Simulation der inneren Temperaturverteilung der Zellen erscheint angesichts des hohen erwarteten zusätzlichen Rechenaufwandes für den gewählten Betrachtungshorizont unrealistisch und erfordert eine Vielzahl zusätzlicher Parameter, die sich nur durch aufwendige Vermessung bestimmen lassen. Dies steht im Widerspruch zum Ziel der schnellen Anwendbarkeit des Ansatzes. Ein geeignetes Mittel könnte jedoch die Aufteilung der Zellen in mehrere, in einem thermischen Netzwerk verbundene Punktmassen sein, sobald das Biot-Kriterium in eine Raumrichtung verletzt wird.

Mit steigender Systemebene werden die Einflüsse auf das thermische Systemverhalten umfangreicher und die notwendigen Vereinfachungen zahlreicher. Der Wärmeübergang zwischen den Zellen ist hierbei noch am einfachsten simulativ darzustellen. Das Modell lässt zu, Wärmeübergänge zwischen beliebigen LIB innerhalb des Batteriesystems darzustellen. Sämtliche Wärmeströme, von denen zwischen direkt benachbarten Zellen, bis hin zu solchen, die sich über

Stromableiter oder Teile des Gehäuses ergeben, lassen sich so darstellen. Aus Gründen der Nachvollziehbarkeit und einfachen Parametrierung wird im Rahmen des Auslegungsprozesses aktuell jedoch nur von Wärmeströmen zwischen direkt benachbarten Zellen ausgegangen. Durch weiterführende Messungen an einem realen System und der Zuhilfenahme eines leistungsfähigen Optimierungsansatzes könnten durch das bestehende Modell jedoch auch komplexere thermische Zusammenhänge innerhalb des Batteriesystems dargestellt werden.

Weiteres Optimierungspotential ergibt sich in der Simulation des BTMS und dessen thermischer Interaktion mit den Zellen. In realen Systemen können die erreichbaren Wärmeübergangskoeffizienten und damit die Wärmeübertragung durch gezielte Gestaltung der Kühlkanäle zur Erzeugung turbulenter Strömungen deutlich erhöht werden. Diese Zusammenhänge werden im Rahmen der Worst Case Auslegung, wie sie in dieser Arbeit vorgenommen wird, jedoch nicht abgebildet. Die Simulation geht immer von einer rein laminaren Strömung aus, um die Simulation mit möglichst wenig geometrischen Informationen über die Kühlkanäle durchführen zu können und die durch das System erreichbare Wärmeabfuhr keinesfalls zu überschätzen. Eine zuverlässige Abbildung des Turbulenzverhaltens der Fluidströmungen in den Kühlkanälen ist mit hohem Aufwand verbunden, und es ist fraglich, ob sich der erreichbare Informationsgewinn in der betrachteten Entwicklungsphase in derselben Größenordnung wie die sich durch die zahlreichen Abschätzungen ergebenden Unsicherheiten befindet. Weitere Vereinfachungen sind die Annahme konstanter Temperaturen innerhalb der Kühlkanäle und deren sequenzielle Berechnung unter der Vernachlässigung möglicher Wechselwirkungen. Dies führt besonders bei der Simulation von Kühlkanälen, die im Kontakt mit vielen Zellen stehen, zu einer starken Unterschätzung der Fluidtemperaturen am Ende des Kühlkanals und damit zu einer Unterschätzung der Maximaltemperaturen und des Temperaturgradienten innerhalb des Batteriesystems. Inwieweit dieser Fehler durch die Unterschätzung des Wärmeübergangs durch die Annahme einer laminaren Strömung ausgeglichen werden kann, bedarf weiterer Untersuchungen.

Falls die Temperaturverteilung innerhalb der Kühlkanäle durch zusätzliche Modelle genauer nachgebildet werden soll, ist dies mit den vom Simulationsmodell angebotenen Schnittstellen möglich. In Systemen mit langen Kühlkanälen und vielen Zellen wird jedoch ein massiver Anstieg des Rechenaufwandes erwartet, sodass auch dieser Schritt erst nach einer Eingrenzung des Lösungsraumes durchgeführt werden sollte. Dies gilt ebenfalls für andere Geometrien der Kühlkanäle. Aktuell bietet das Simulationsmodell eine Schnittstelle, die es erlaubt, Kühlkanäle in allen drei Raumrichtungen zwischen beliebigen Zellen anzuordnen. Hierbei wird vereinfachend davon ausgegangen, dass diese Kühlkanäle jeweils die gesamte Fläche der jeweiligen Schnittebene des Batteriesystems einnehmen. Komplexer geformte Kühlkanäle, etwa eine schlangenförmige Anordnung, sind durch das Modell bereits jetzt darstellbar, können jedoch nicht automatisch erzeugt werden.

Für die Simulation des VTMS müssen einerseits die Kühlkreisläufe und deren Interaktion mit der Umgebungstemperatur simuliert werden. Andererseits ist für die Berechnung der Wärmefreisetzung der Antriebsstrangkomponenten abhängig von der Betriebssituation des Fahrzeugs eine Längsdynamiksimulation erforderlich. Diese Längsdynamiksimulation basiert aktuell rein auf den Fahrwiderstandsgleichungen und beinhaltet keine Betrachtung der Rekuperation. Weiterhin werden Einflussgrößen wie die Innenraumklimatisierung nur am Rande mitbetrachtet, weshalb an dieser Stelle deutliches Optimierungspotential besteht, sofern der zusätzliche Parametrierungs- und Rechenaufwand in Kauf genommen wird. Weil der Fokus dieser Arbeit jedoch auf dem thermischen Systemverhalten und damit auf der Simulation der VTMS KK liegt, soll das Augenmerk an dieser Stelle auf diese Systemebene gelegt werden.

Im Gegensatz zum BTMS ist der Fluidkreislauf beim VTMS Modell deutlich weiter abstrahiert. Die Wärmeübergangskoeffizienten werden nicht mehr anhand der Strömungsbedingungen berechnet, sondern über Kennfelder vorgegeben. Dies erleichtert die Kontrollier- und Validierbarkeit des Modells, weil vermessene Größen direkt eingegeben werden können. Gleichzeitig erfolgt allerdings keinerlei Anpassung der Wärmeübergangskoeffizienten auf Änderungen des Volumenstroms durch die Komponenten, sobald der parametrisierte Bereich verlassen wird. Eine sinnvolle Weiterentwicklung wäre daher eine dynamische Anpassung der parametrisierten Basis-Wärmeübergangskoeffizienten, abhängig vom Volumenstrom in jeder Komponente.

Eine weitere, aktuell durch die VTMS Simulation abgebildete Einflussgröße ist der Energieverbrauch der Systeme. Besonders für aufwendige Architekturen mit Kältemittelkreislauf wird in der Praxis ein beträchtlicher Energieverbrauch erwartet, der den zusätzlichen Nutzen dieser Systeme im Vergleich zu simpleren oder gar passiven Systemen eventuell nicht rechtfertigt. Diese Aussage ist durch die Simulationsmodelle in ihrer jetzigen Form nicht möglich, weil keinerlei Informationen über innere Reibung und Druckverluste der Fluidkreisläufe mitbetrachtet werden. Auch der Einfluss der Steuerung der Systeme wird nur am Rande beleuchtet. Eine exakt auf den jeweiligen Anwendungsfall angepasste Steuerung der KK ist unter Umständen geeignet, den Zusatzaufwand komplexerer Architekturen zu vermeiden. Energieverbrauch und Steuerung des VTMS sind eng miteinander verknüpft und sollten daher in weiterführenden Arbeiten aufgegriffen und in das Simulationsmodell integriert werden.

Insgesamt wurden in dieser Arbeit drei Simulationsmodelle entwickelt. Das elektrisch/thermische Batteriesystemmodell, das BTMS und das VTMS Modell. Das BTMS Modell setzt direkt auf das Batteriesystemmodell auf, während des Auslegungsprozesses werden diese Modelle also gemeinsam ausgeführt. Für die Betrachtung innerhalb des VTMS Modells werden Batteriesystem und BTMS jedoch stark vereinfacht abgebildet. Weil die Modelle die gleichen Schnittstellen verwenden, ist es möglich, die detaillierte Batteriesystem- und BTMS in die VTMS Simulation zu integrieren. Weil sich die Modelle bereits bei getrennter Betrachtung hinsichtlich Rechen- und Speicherbedarf an der Grenze üblicher Desktop-PCs befinden, wurde hiervon Abstand genommen. Generell wäre eine gemeinsame Simulation aller Systemebenen jedoch möglich, sofern von der vollfaktoriellen Herangehensweise Abstand genommen und nur ausgewählte Systeme simuliert werden. Dies bedeutet allerdings einen starken Eingriff in das in dieser Arbeit entwickelte Vorgehen zur Systemauslegung, deren Ablauf im Folgenden diskutiert wird.

8.3 Ablauf der Systemauslegung

Nach der Besprechung der Parametrierung und Simulationsmodelle erfolgt nun die Diskussion des Ablaufs der Systemauslegung. Diese Diskussion wurde zum Teil in [18] vorveröffentlicht und wird daher an dieser Stelle zusammengefasst wiedergegeben und um die Erkenntnisse aus der exemplarischen Anwendung des Ansatzes in Kapitel 7 und den Betrachtungen des bisherigen Verlaufs dieses Kapitels ergänzt. Der Ablauf des Auslegungsprozesses ist in Abbildung 8.1 grafisch dargestellt.

Als Ausgangspunkt dient die Spezifikation des betrachteten Fahrzeugkonzepts mit den gewünschten Eckdaten hinsichtlich Bauraum, Spannungslage, Leistung und Kapazität des Batteriesystems sowie der erwarteten Umgebungsbedingungen, unter denen das Fahrzeug eingesetzt werden soll. Zur Vorbereitung wird der Auslegungsprozess mit den in Erwägung gezogenen Zellen, grundsätzlichen BTMS Varianten und VTMS Systemarchitekturen parametrisiert. Es ist

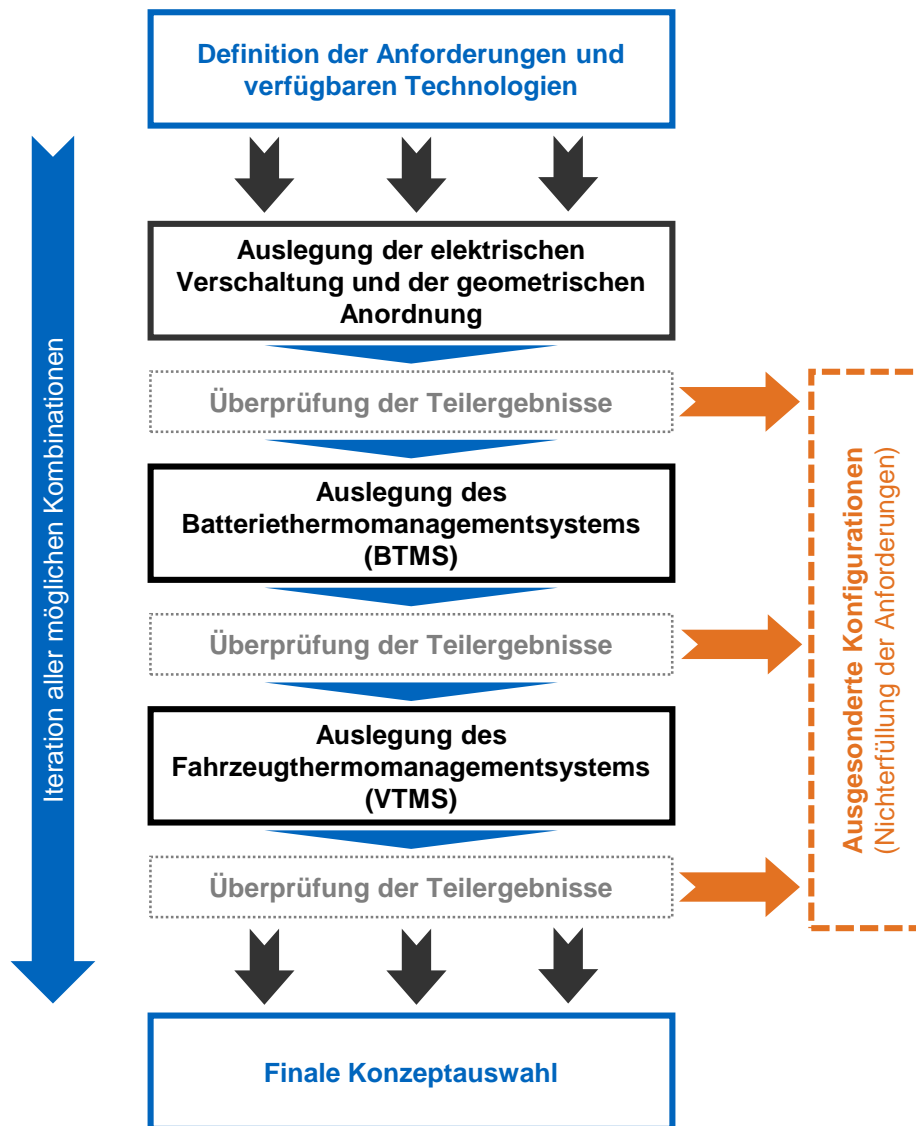


Abbildung 8.1: Ablauf der Systemauslegung (aufbauend auf [18])

empfehlenswert, in diesem Schritt mehrere Ausgangslagen anzubieten, weil sonst die Gefahr besteht, dass keine valide Konfiguration gefunden wird. Anhand dieser definierten Ausgangssituation wird anschließend in den nächsten Schritten die Systemauslegung durchgeführt. In jedem Schritt werden die Teilergebnisse auf die Einhaltung der Rahmenbedingungen überprüft und Konfigurationen, die diese verletzen, ausgesondert und mit der Angabe der individuellen Gründe abgespeichert.

Im ersten Schritt des Auslegungsprozesses erfolgt die Feststellung der elektrischen Verschaltung auf Basis der geforderten Spannungslage und Pack-Kapazität beziehungsweise Maximalleistung. Auf Basis dieser Informationen erfolgt anschließend die geometrische Anordnung der Zellen und die Unterteilung des Batteriesystems in mehrere Module gleicher Größe. Bei der Modularisierung wird angenommen, dass die Seriellschaltung der Module und der Zellen stets nur in eine Raumrichtung erfolgt. Bei hohen Spannungslagen und großformatigen LIB führt dies in vielen Fällen zu einer Verletzung der Geometrierandbedingungen. Die in diesem Falle notwendige Unterteilung des Batteriesystems in mehrere, nebeneinander angeordnete serielle Stränge (Abbildung 7.4), ist manuell vorzunehmen und erfordert ein erneutes Durchlaufen des Auslegungsprozesses.

Diese Limitation ist sinnvoll. Andernfalls würde die Anzahl möglicher Lösungen zu zahlreich und die Vergleich- und Interpretierbarkeit der Ergebnisse eines Prozessdurchlaufs verringert.

Nach erfolgter Modularisierung wird jede bislang als geeignet angesehene Konfiguration um die möglichen BTMS Architekturen ergänzt. Die Anzahl der Konfigurationen steigt also um den Faktor der vorab definierten grundsätzlichen BTMS Architekturen an. Um bereits vorab unnötige Kombinationen zu vermeiden, etwa, wenn einzelne Varianten der thermischen Anbindung für spezielle Zelltypen nicht sinnvoll möglich sind, ist es vorgesehen, für diese Zellen individuelle BTMS Architekturen zu hinterlegen. Für die Modulinnenkühlung, also der Kühlung zwischen einzelnen Zellen innerhalb der Module, muss deren exakter Aufbau bekannt sein. Hierfür ist es in der Regel notwendig, diese Konfigurationen in einem zweiten Durchlauf des Auslegungsprozesses, in dem der Aufbau der Module bereits bekannt ist, gezielt zu untersuchen. Nachdem die Module um die BTMS Kühlkanäle ergänzt sind, können deren Abmessungen und die des Gesamtsystems entsprechend aktualisiert werden.

Bei den bisherigen Überprüfungen der Randbedingungen wurde allein auf Datenblattwerte der Zellen zurückgegriffen; es wurde also keine Simulation durchgeführt. Der geringe Rechenaufwand und die hohe Ausführungsgeschwindigkeit dieser Überprüfung erlaubt die Betrachtung vieler unterschiedlicher Konzepte innerhalb von Sekunden. Für die folgenden Überprüfungen mittels der Simulationsmodelle steigt der Aufwand stark an und kann im Bereich mehrerer Stunden liegen, weshalb eine Limitierung der zu betrachtenden Konzepte notwendig ist. Aus diesem Grund muss die simulative Überprüfung der elektrischen und thermischen Batteriesystemauslegung manuell gestartet werden, um eine eventuelle Reduzierung des Lösungsraumes durch gezielte Auswahl einzelner Konzepte, oder Verschärfung der Anforderungen durch den Anwender, zuzulassen.

Für die grundsätzliche Überprüfung der elektrischen Auslegung wird zunächst eine Simulation auf Modulebene unter Vernachlässigung des thermischen Verhaltens durchgeführt. Diese, mit verhältnismäßig geringem Rechenaufwand verbundene Betrachtung, dient dem Ausschluss von Zellen und deren Verschaltungen, die in der Parallelschaltung zu starke Inhomogenität zeigen. Konfigurationen, in denen die Module die elektrischen Anforderungen erfüllen, werden der elektrisch/thermischen Systemsimulation zugeführt, in der das komplette Batteriepack inklusive BTMS betrachtet wird. Der trotz der vorgenommenen Vereinfachungen immer noch beträchtliche Rechenaufwand muss dabei in Kauf genommen werden. Andernfalls ließen sich die Wechselwirkungen zwischen dem Zellverhalten und dem BTMS nicht feststellen. Das Ergebnis dieses Schrittes ist die in Form einer LA vorliegende, elektrische und thermische Belastung jeder einzelnen Zelle. Diese kann mit den erlaubten Grenzwerten verglichen und weiterführenden Alterungsanalysen zugeführt werden.

Batteriesysteme, die die elektrisch/thermischen Anforderungen erfüllen, müssen nun für die Auslegung des VTMS der Gesamtfahrzeugsimulation zugeführt werden. Dieser Schritt stellt in der aktuell implementierten Form gleichzeitig den größten Bruch innerhalb des Auslegungsprozesses dar, weil das Batteriesystem auf dieser Ebene nur vereinfacht dargestellt wird.

Bestehen Zweifel an den für die Auslegung des BTMS getroffenen Annahmen der Kühlmitteltemperaturen, ist es jedoch denkbar, die Strombelastung und die Temperaturen und Volumenströme des Kühlmittels aufzuzeichnen und als Eingangsgrößen für die detaillierten Batteriesystemsimulation zu verwenden. Hierdurch können sowohl die für die VTMS Simulation getroffenen Annahmen als auch die angenommenen Betriebsparameter des BTMS und die daraus resultierende thermische Belastung auf Zellebene nochmals überprüft werden. Für die VTMS Auslegung steht aufgrund der Vielzahl an Betriebsgrößen und Randbedingungen keine automatisierte Be-

wertungsmethode zur Verfügung. Eine reine Überschreitung der erlaubten Temperaturbereiche der Antriebsstrangkomponenten ist jedoch direkt zu erkennen.

Im letzten Schritt des Auslegungsprozesses wird das finale Systemkonzept ausgewählt. Die Hintergründe werden im folgenden Unterkapitel angesprochen.

8.4 Bewertung der Auslegungsempfehlungen

Der Auslegungsprozess in seiner jetzigen Form kann nur direkt quantifizieren und so Konfigurationen ausschließen, in denen Betriebsgrößen vorher definierte Grenzen überschreiten. Auch die zusätzliche Einbeziehung der zeitlichen Komponente, also wie lange sich eine Betriebsgröße oberhalb eines definierten Wertes befindet, ist möglich und wird über die LA abgebildet, fließt aktuell aber nicht in die Bewertung ein. Ein weiterer Weg zur Auswahl ist die Analyse der Wirksamkeit individueller Maßnahmen. Kann ein zusätzlicher Kühlkanal das thermische Verhalten des Batteriesystems nur noch geringfügig verbessern, ist dieser vermutlich unnötig und der Mehraufwand übersteigt den Nutzen. Diese Aussagen können durch den Auslegungsprozess jedoch nicht mehr automatisiert getroffen werden und beruhen auf der Einschätzung des Anwenders. Deutlich komplexer wird es, wenn zwischen ähnlichen Auslegungen unterschieden werden muss, die unter Umständen in verschiedenen Betriebsbereichen, beispielsweise der Umgebungstemperatur, individuelle Vor- und Nachteile zeigen. Die Priorisierung, auf welchen Aspekt besonders Wert gelegt wird, kann dem Auslegungsalgorithmus nicht über die Parametrierung mitgeteilt werden und muss durch den Anwender erfolgen. Die automatisierte Auswahl erfolgt nur anhand von Grenzwerten und ist gleichbedeutend mit dem Ausschluss nichtgeeigneter Konzepte.

Das im späteren Anwendungsfall entscheidende Kriterium und finales Entscheidungsargument für die Auswahl eines Systemkonzeptes ist die Alterung des Batteriesystems. Diese kann durch das implementierte Vorgehen nicht quantifiziert werden und lediglich über die Belastung der LIB abgeschätzt werden. Während der Auslegungsprozess aktuell bereits unplausible Konfigurationen aussortieren kann, fehlt ihm noch die Möglichkeit der Aussage über den tatsächlichen Alterungseinfluss der unterschiedlichen Auslegungen. Das Vorgehen ist also in der Lage, aus einem komplexen Lösungsraum Konfigurationen zu erkennen, die vermutlich für die gestellten Anforderungen geeignet sind und die Vor- und Nachteile der einzelnen Auslegungen übersichtlich darzustellen. Dies befreit den Nutzer jedoch nicht von weiterführenden Untersuchungen zur Absicherung und eventuellen Optimierung dieser Konzepte.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem abschließenden Kapitel erfolgt die Zusammenfassung der Arbeit und ein Ausblick auf die mögliche Weiternutzung der Ergebnisse. Zunächst wird auf die zugrunde liegende Problemstellung und das daraufhin entwickelte Auslegungsverfahren eingegangen. Anschließend werden die im Rahmen der Absicherung des Auslegungsprozesses vorgenommenen Untersuchungen und deren Ergebnisse und die daraus abgeleiteten allgemeinen Auslegungsempfehlungen zusammengefasst. Zum Abschluss des Kapitels wird ein Ausblick auf mögliche zukünftige Nutzung und Weiterentwicklung der Ergebnisse gegeben. Teile der folgenden Betrachtungen wurden in [18] vorab veröffentlicht.

9.1 Problemstellung der Arbeit

Das Ziel der Arbeit ist die Vereinfachung der komplexen Auslegung des Batteriesystems von BEV. Für die Bereitstellung der notwendigen Antriebsleistung ist grundsätzlich das elektrische Verhalten des Batteriesystems ausschlaggebend. Aufgrund des hohen Einflusses der Temperatur auf die Dynamik und das Alterungsverhalten der verwendeten LIB, kommt dem thermischen Verhalten besonderer Stellenwert zu, weshalb dieses in den Fokus gestellt wurde. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, das Batteriesystem nicht isoliert zu betrachten, sondern die thermischen Wechselwirkungen mit der Umgebung und dem Gesamtfahrzeug über das BTMS und VTMS ebenfalls zu berücksichtigen. Es wird folglich ein Auslegungsprozess benötigt, der die Entwicklung des Batteriesystems über alle Systemebenen, angefangen bei der Zellauswahl bis hin zur Integration in das Gesamtfahrzeug, unterstützt.

Der Stand der Wissenschaft zu Batteriesystemen in BEV beinhaltet hauptsächlich Untersuchungen, die entweder auf einzelne Systemebenen detailliert eingehen, oder Betrachtungen über mehrere Systemebenen hinweg, dann allerdings mit teils starken Vereinfachungen. Aus diesem Grund wurde die Forderung nach einem Ansatz abgeleitet, der alle für die Erstellung eines grundsätzlichen elektrisch und thermischen Antriebsstrangkonzpts relevanten Systemebenen und Einflüsse vereint und die Auslegung durch eine einfach anzuwendende Methodik beschleunigt. Mithilfe eines solchen Ansatzes ist es zudem möglich, den Einfluss unterschiedlicher Umweltbedingungen und Fahrzeuganforderungen auf die Gestaltung des Antriebsstrangs zu untersuchen, allgemeine Betrachtungen der Auswirkung verschiedener Einsatzszenarien von BEV durchzuführen und Auslegungsempfehlungen für den Betrieb unter verschiedenen Rahmenbedingungen abzuleiten.

Zur Schließung dieser Forschungslücke wurde zunächst eine Analyse der Anforderungen an LIB bei der Verwendung in BEV durchgeführt. Hierbei wurde auf die Grundlagen der Lithium-Ionen Technologie eingegangen und die Betriebsbedingungen von Batteriesystemen in Elektrofahrzeugen analysiert. Darauf aufbauend erfolgte für die drei relevanten Systemebenen Zelle und elektrisches Systemverhalten, BTMS und thermisches Systemverhalten sowie VTMS und Ge-

samtfahrzeug eine Analyse der Auslegungsziele und Freiheitsgrade sowie die Wechselwirkungen mit den angrenzenden Systemebenen. Auf dieser Basis wurden die für den Auslegungsprozess benötigten Simulationsmodelle erstellt und weitestmöglich validiert. Alle Modelle nutzen die Simulationsumgebung MATLAB/Simulink und stehen unter einer Open Source Lizenz frei zur Verfügung [87, 121, 152]. Aufbauend auf diesen Simulationsmodellen wurde der geforderte Auslegungsprozess entworfen und dessen Absicherung mittels einer Anwendung für exemplarische Ausgangssituationen und Rahmenbedingungen durchgeführt und aus den Ergebnissen allgemeine Empfehlungen für die thermische Auslegung von Batteriesystemen für Elektrofahrzeuge abgeleitet. Diese Schritte werden in den folgenden Unterkapiteln gesondert zusammengefasst.

9.2 Auslegungsprozess

Der entwickelte Auslegungsprozess fußt auf den drei im letzten Absatz bereits angesprochenen Simulationsmodellen. Jedes Modell deckt eine Systemebene und damit einen grundsätzlichen Auslegungsschritt ab. Diese Arbeit konzentriert sich dabei auf die Entwicklungsphase des PEP; die nachgelagerte Detailauslegung und Auskonstruktion der Systemkonzepte werden nicht mehr betrachtet. Der Aufruf der Simulationsmodelle erfolgt durch ein übergeordnetes Skript, das die betrachteten Systemkonzepte verwaltet und die Eignung jedes Konzeptes anhand der Simulationsergebnisse, beziehungsweise grundsätzlicher Kriterien wie Masse oder Abmessungen bewertet. Konzepte, die den Anforderungen nicht entsprechen, werden automatisch aussortiert und in den nachfolgenden Schritten nicht mehr in Erwägung gezogen. Nach Ablauf des Prozesses verbleiben die Systemkonzepte, mit denen die gewählten Anforderungen auf Grundlage des aktuellen Informationsstandes erfüllt werden können und die deshalb nachgelagerten Entwicklungsschritten zugeführt werden können.

Als Eingangsgrößen für den Auslegungsprozess dienen eine beliebige Anzahl unterschiedlicher LIB und grundsätzliche BTMS Architekturen aus denen automatisch Konzepte für Batteriesysteme erstellt werden. Anschließend wird durch eine elektrisch, thermische Simulation für jedes Konzept überprüft, ob der zulässige Betriebsbereich der Zellen eingehalten werden kann. Ist dieser Schritt erfolgreich, wird eine Simulation im Kontext des Gesamtfahrzeugs inklusive des VTMS durchgeführt, um das Verhalten und die individuelle Zellbelastung auch unter realen Fahrzyklen einschätzen zu können. Hierbei greift der Auslegungsprozess sowohl auf gesetzliche als auch auf eigens für diese Arbeit entwickelte Zyklen zurück. Das Ergebnis des Auslegungsprozesses sind Informationen zur Verschaltung, dem geometrischen Aufbau, der BTMS Auslegung des Batteriesystems sowie der Architektur und der grundlegenden Steuerungsparameter des VTMS.

Um den für den Auslegungsprozess benötigten Betrachtungshorizont über mehrere Systemebenen hinweg darstellen zu können, ist es notwendig, die Simulationsmodelle hinsichtlich ihres Rechenaufwandes stark zu optimieren. Dies erfordert einige Vereinfachungen, die mit dem Ziel ausgeführt wurden, die Aussagekraft der Modelle möglichst zu erhalten. Hierfür wurde auf jeder Systemebene eine Analyse der für die Darstellung der Auswirkungen auf die Batteriebelastung besonders relevanten Einflussgrößen durchgeführt und sichergestellt, dass diese auch mit den durchgeführten Vereinfachungen weiterhin abgebildet werden. Anschließend wurde eine Absicherung des gesamten Auslegungsprozesses inklusive aller Simulationsmodelle im Verbund durchgeführt. Diese Ergebnisse werden im folgenden Unterkapitel zusammengefasst.

9.3 Absicherung des Auslegungsprozesses

Bereits die Validierung von auf die Darstellung einzelner Effekte spezialisierten Modellen, beispielsweise des ECM zur Simulation des elektrischen Verhaltens einer LIB, ist herausfordernd. Die für diese Arbeit notwendigen, gekoppelten Simulationsmodelle, in denen mehrere, in Wechselwirkung zueinander stehende Effekte, dargestellt werden, ist deutlich aufwendiger. Während die grundlegenden Mechanismen des VTMS Modells anhand eines Versuchsträgers validiert werden konnten, war dies für das elektrisch/thermische Batteriesystemmodell nicht möglich. Unerwünschte Einflüsse des verwendeten Versuchsaufbaus führten zu Abweichungen der Messergebnisse, die es unmöglich machten, potenzielle Modell- von Messfehlern zu unterscheiden. Aus diesem Grund konnten die Genauigkeit der Simulation und die Gründe von Abweichungen nicht festgestellt werden. Zwar konnten Vorschläge zur Verbesserung des Versuchsaufbaus abgeleitet, jedoch nicht mehr im Rahmen dieser Arbeit umgesetzt werden. Daher wurde für die Modellparametrierung auf Vorarbeiten anderer Autoren zurückgegriffen und so eine Worst Case Parametrierung der elektrisch/thermischen Batteriesystems simulation durchgeführt. Der Temperierungsbedarf wird mit den gewählten Parametern tendenziell überschätzt. Es wird daher angenommen, dass sich ein anhand dieses Modells ausgelegtes System in der Realität in jedem Fall als leistungsfähig genug zeigt. Trotzdem besteht an dieser Stelle noch Entwicklungsbedarf.

Im Rahmen der Absicherung wurden mehrere Systemkonzepte ausgelegt. Hierbei wurde ein zweigeteiltes Vorgehen gewählt. Im ersten Schritt wurde das Batteriesystem isoliert betrachtet und anhand der Anforderungen eines Schnellladevorgangs Konzepte aus fünf unterschiedlichen LIB und mehreren möglichen BTMS Architekturen – von passiver Kühlung bis hin zu einer aufwendigen thermischen Anbindung jeder einzelnen Zelle an das Kühlsystem – ausgelegt und analysiert. Zur Vermeidung von Fehlerfortpflanzung und der damit verbundenen Verfälschung der Diskussionsgrundlage erfolgte die Betrachtung der VTMS Auslegung im zweiten Schritt unabhängig der ausgelegten Batteriesysteme. Hierfür wurden für vier Fahrzeuge unterschiedlicher Fahrzeugklassen abweichende Anforderungen, repräsentiert durch verschiedene Fahrzyklen und Umgebungstemperaturen, VTMS Architekturen vorgeschlagen und deren Auswirkungen auf das thermische Batterieverhalten analysiert.

Die Ergebnisse der Absicherung des Auslegungsprozesses zeigen auf allen Systemebenen plausibles Verhalten und entsprechen den anhand anderer Veröffentlichungen und eigener Messungen aufgestellten Erwartungen. Zusätzlich konnte für eines der durch den Auslegungsprozess vorgeschlagenen Batteriesystemkonzepte eine reale Entsprechung in einem Serienfahrzeug des Herstellers Tesla gefunden werden; ein zusätzliches Indiz für die Eignung des Vorgehens. Diese Aussage erfolgt jedoch vor dem Hintergrund, dass einige entscheidende Details zum Systemverhalten und den verwendeten Parametern bei Realfahrzeugen und Veröffentlichungen nicht bekannt und quantitative Aussagen über die Genauigkeit des Auslegungsprozesses daher nicht möglich sind. Eine qualitative Betrachtung der Auslegungsempfehlungen spricht jedoch für die Plausibilität der Ergebnisse und erlaubte die Ableitung einiger Gesetzmäßigkeiten, die im nächsten Unterkapitel erläutert werden.

9.4 Abgeleitete Auslegungsempfehlungen

Die Ergebnisse des Auslegungsprozesses deuten auf Vorteile kleinformatiger Zellen für die gezielte Anpassung des Batteriesystems auf Package- und Kapazitätsanforderungen. Kleine Zellen können flexibler angeordnet werden und die Kapazität des Batteriesystems, bestimmt durch

die Anzahl parallel verschalteter LIB, kann in kleinen Schritten erhöht werden. Bei großen Zellen führt eine Vergrößerung der Parallelschaltung zu einem starken Anstieg der Systemkapazität, wodurch das Batteriesystem potenziell überdimensioniert wird. Bei der Dimensionierung der Parallelschaltung sind auch die sich darin abspielenden elektrischen Effekte zu berücksichtigen. Diese werden durch den Auslegungsprozess abgebildet, weshalb eine Überlastung der LIB innerhalb der Parallelschaltung bei den finalen Systemkonzepten inklusive Thermomanagement ausgeschlossen werden kann. Ob bei einer gegebenen Parameterstreuung eine optimale Größe der Parallelschaltung existiert, beziehungsweise welche zugrundeliegenden Gesetzmäßigkeiten bestehen, konnte im Rahmen der Arbeit nicht gezeigt werden, weshalb auf diesem Gebiet weitere Untersuchungen empfohlen werden.

Die optimale Gestaltung des BTMS ist stark abhängig vom verwendeten Typ und den Abmessungen der Zellen. Es sei angemerkt, dass die Betrachtung der Zelltemperaturen rein Punktmassen-basiert erfolgte und daher keine Aussagen über den Einfluss der Kühlung und der Zellgröße auf die innere Temperaturverteilung möglich sind. Bei der angenommenen thermischen Anbindung der Zellen über Kühlplatten zeigten sich Module aus prismatischen LIB als am einfachsten zu temperieren, weil eine reine Bodenkühlung in vielen Fällen ausreichend war. Bei zylindrischen und Pouch-Zellen konnte nur durch zusätzliche Wärmesenken im Inneren der Module ein zufriedenstellendes Temperaturniveau hergestellt werden. Einen großen Einfluss hat hierbei die Wärmeleitung zwischen den Zellen, die im Rahmen der durchgeführten Worst Case Betrachtung in der Simulation als vergleichsweise gering angenommen wurde. Die Sicherstellung einer ausreichenden Wärmeleitung zwischen den LIB bietet das Potenzial, die Anzahl der nötigen BTMS Kühlkanäle zu verringern, weshalb hierauf bei der Konstruktion der Batteriemodule besonders Wert gelegt werden sollte.

Bei der Anwendung des Auslegungsprozesses wurden Systemkonzepte für unterschiedliche Fahrzeugklassen erstellt. Eine höhere Fahrzeugklasse bedeutet in der Regel höhere Fahrwiderstände durch steigendes Gewicht und eine vergrößerte Stirnfläche und dadurch höhere Antriebsleistung, jedoch auch eine größere erforderliche Batteriekapazität. Die betrachteten, an reale Serienfahrzeuge angelehnten Beispiele, zeigen, dass die höhere Batteriekapazität die steigenden Fahrwiderstände überkompensiert. Je größer das Batteriesystem ist, desto geringer, vergleichbare Zyklusanforderungen und Betriebsbedingungen vorausgesetzt, fällt daher die Selbsterwärmung während des Betriebs aus. Dies bedeutet, dass länger auf eine aktive Kühlung des Systems verzichtet werden kann. Bei niedrigen Temperaturen ist dies jedoch nachteilig, weil sich eine große Batterie während der Fahrt kaum erwärmt. Um die Batterie schneller auf die bevorzugte Betriebstemperatur zu bringen, ist daher eine aktive Heizung erforderlich.

Als Betriebszustand mit der höchsten Batteriebelastung zeigte sich das Schnellladen. Anders als beim Fahren wird das Batteriesystem dauerhaft nahe an seiner Belastungsgrenze betrieben und erwärmt sich daher stark. Bei allen untersuchten Batteriekonzepten war eine aktive Kühlung erforderlich, um die Notwendigkeit eines thermischen Deratings zu vermeiden. Bei geringen geforderten Systemkapazitäten kann die Ladeleistung sogar der ausschlaggebende Punkt für die Größe der Parallelschaltung sein. In diesem Fall kommt der Homogenität des elektrischen Verhaltens der Zellen in der Parallelschaltung besonderer Stellenwert zu, weil bereits leichte Unterschiede in der Strombelastung einzelne Zellen überlasten können. Dies gilt ebenfalls für die Kühlung, weil sich Temperaturunterschiede zwischen den LIB ebenfalls negativ auf die Homogenität der Stromverteilung auswirken.

Wie erwartet zeigen auch die VTMS Architektur und die Umgebungstemperatur großen Einfluss auf das thermische Verhalten des Batteriesystems. Durch das VTMS ist definiert, wie viel Wärme dem Batteriesystem zugeführt beziehungsweise entnommen werden kann. Die Umgebungs-

temperatur beeinflusst dies für das VTMS und die Umgebung. Grundsätzlich bestimmt die Umgebungstemperatur die minimale Temperatur der Kühlkreisläufe, sofern kein zusätzlicher Kältemittelkreislauf verwendet wird. Ist eine Beheizung des Batteriesystems notwendig, reicht die Abwärme der restlichen Komponenten des Antriebsstrangs in den gewählten Beispielen nicht aus. Gekoppelte HT- und NT-Kreisläufe können Maßnahmen zur aktiven Beheizung des Batteriesystems mittels Zusatzkomponenten daher nicht ersetzen. Generell besteht bei der Gestaltung und vor allem der Steuerung des VTMS noch großes Untersuchungs- und Optimierungspotential. Eine Empfehlung für das Vorgehen zur grundsätzlichen Auslegung von TMS gibt das folgende Unterkapitel. Einen Ausblick auf weitere mögliche Untersuchungen und Weiterentwicklungen auf Basis der Ergebnisse bietet Unterkapitel 9.6.

9.5 Empfohlenes Vorgehen für die Auslegung von Thermomanagementsystemen

Als eines der entscheidenden Kriterien für das thermische Verhalten und die Sicherstellung der Leistungsfähigkeit des elektrischen Antriebsstrangs wurde in dieser Arbeit die Auslegung des Fahrzeug-Thermomanagements identifiziert. Gleichzeitig kann eine ungeeignete Auslegung des TMS zu negativen bis gefährlichen Einflüssen führen, etwa wenn überschüssige Wärme nicht ausreichend ab-, oder sogar fehlgeleitet wird. Um eine solche Fehlauselegung zu vermeiden, werden an dieser Stelle grundsätzliche Empfehlungen zum Vorgehen bei der Auslegung von TMS gegeben. Der Fokus wird hierbei auf gekoppelte BTMS und VTMS gelegt; das Vorgehen ist jedoch auch auf getrennte Systeme übertragbar.

Im ersten Schritt müssen auf der Gesamtfahrzeugebene die maximal geforderten Leistungen, gleichbedeutend mit der Maximalgeschwindigkeit, dem Beschleunigungsverhalten und der Ladeleistung des Fahrzeugs, für unterschiedliche Umgebungstemperaturen festgelegt werden. Durch diese Leistungsanforderungen und die zugehörigen Temperaturen sind auch die Eckpunkte für eine eventuelle Derating Strategie abgebildet. Diese Annahme ist zulässig, weil die Temperaturgrenzen, ab denen der Antriebsstrang nicht mehr seine volle Leistung erbringen muss, durch angepasste Anforderungen berücksichtigt werden können. Nach Festlegung der Temperaturgrenzen und Fahrzeuganforderungen sind die Bereiche maximaler TMS Belastung bekannt. Diese sind nach den Ergebnissen dieser Arbeit identisch zu den Grenztemperaturen, an denen noch das jeweils höhere Leistungsniveau gefordert wird. Diese Worst Case Punkte stellen die Maximalanforderungen dar, auf welche das TMS ausgelegt werden muss.

Mittels einer groben Abschätzung der Fahrwiderstände des Fahrzeugkonzepts können die Fahrzeuganforderungen im zweiten Schritt in Leistungsanforderungen überführt werden. Deren Kenntnis erlaubt die Bestimmung der jeweiligen Verlustleistung der einzelnen Antriebsstrangkomponenten, die sich durch deren Wirkungsgrade ergeben. Auch hier ist in der Konzeptphase eine Abschätzung, entweder über Erfahrungswerte oder eine Worst Case Analyse, sinnvoll, weil in der Regel die exakten thermischen Rahmenbedingungen der späteren Einbausituation noch unbekannt sind. Für die TMS Auslegung kann im ersten Schritt vereinfachend angenommen werden, dass die gesamte anfallende Verlustleistung durch den TMS Kühlmassenstrom aufgenommen wird; dies stellt einen Betrieb in Dauerlast, ohne Erwärmung der Komponenten, dar.

Anhand dieser Kenntnis kann im dritten Schritt die TMS Architektur ausgewählt und dimensioniert werden. Die Auswahl des grundsätzlichen Aufbaus ist vor allem von den gewünschten

Funktionalitäten abhängig. Im einfachsten Fall dient das TMS lediglich dazu, die von den Antriebsstrangkomponenten abgegebene Verlustleistung über den Fahrzeugkühler abzuführen. Wird zusätzlich aktive Beheizung und Kühlung, bis hin zu mehreren, dynamisch koppelbaren Temperaturniveaus gefordert, muss das TMS entsprechend aufwendiger aufgebaut werden. Besonders bei diesen komplexen TMS ergibt sich eine hohe Anzahl an Freiheitsgraden durch die Gestaltungsmöglichkeiten der dynamischen Steuerung von Volumenströmen und Ventilstellungen. Um die Komplexität gering zu halten, sollte bei solchen Systemen für die Grobauslegung zuerst eine statische Betrachtung festgelegter Grenzfälle vorgenommen werden. Auf dieser Basis kann die Feinauslegung der Steuerung in einem späteren Optimierungsschritt erfolgen.

Die Fähigkeit des Wärmetransports des TMS wird durch den Volumenstrom und das verwendete Fluid definiert. Es ist zielführend, beim verwendeten Medium auf Industriestandards zurückzugreifen, weshalb nur noch der Volumenstrom zu bestimmen ist. Über den Volumenstrom können die Querschnitte der Rohrleitungen und Kühlkanäle des TMS anhand der resultierenden Fließgeschwindigkeit und dem erwarteten Druckverlust abgeschätzt werden. Die Summe der gesamten abzutransportierenden Verlustleistung erlaubt die Dimensionierung des Kühlers. Auf dieser Basis können nun die weiteren TMS Funktionen aufgebaut werden. Mit der Weiterentwicklung des TMS- und Antriebsstrangkzeptes steigt auch die Kenntnis über das thermische Verhalten der Komponenten. Anhand dieser Informationen kann die Simulation und Dimensionierung des TMS weiter optimiert werden. Am Ende des TMS Entwurfs sollte immer eine Betrachtung des Gesamtsystems mit allen relevanten Einflüssen und unter Berücksichtigung des transienten Verhaltens für reale Fahrzyklen erfolgen. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die vorab getroffenen Annahmen den späteren, realen Nutzungsszenarien entsprechen. Diese Überprüfung wird auch in dieser Arbeit durch eine Simulation durchgeführt. Einen Überblick für weitere Nutzungs- und Weiterentwicklungsmöglichkeiten bietet das folgende, abschließende Unterkapitel.

9.6 Nutzung und Weiterentwicklung des Auslegungsprozesses

Während der Auslegungsprozess in seiner jetzigen Form bereits zuverlässige Ergebnisse zeigt, verbleiben noch einige Herausforderungen beziehungsweise Ansatzpunkte zur Verbesserung. Teile der Simulationsmodelle konnten im Rahmen dieser Arbeit nur plausibilisiert, jedoch nicht abschließend validiert werden. Dies beinhaltet beispielsweise das Vorgehen zum Schnellladen, das lediglich stark vereinfacht betrachtet wurde und keinerlei Nutzen aus der durch die Simulationsumgebung zur Verfügung gestellten Informationen über die individuellen Zellbelastungen zieht. Hierfür sind weitere Modellierungs- und Messkampagnen vonnöten, die aufgrund des Umfangs der Wechselwirkungen und der hohen Anzahl an relevanten Eingangsgrößen einen beträchtlichen Aufwand erwarten lassen. Weitere Verbesserungsvorschläge für zukünftige Weiterentwicklung des Auslegungsprozesses betreffen die Flexibilität und den Grad der Automatisierung der Konzepterstellung. Die automatische Erstellung der Verschaltung unterstützt momentan nur die Verschaltung auf Zellebene. Zur Erhöhung der Flexibilität, vor allem der Modularisierung des Systems, ist eine zusätzliche Möglichkeit der Parallelschaltung auf Modulebene sinnvoll. Zusätzlich wäre es zielführend, die aktuell fest vorgegebene räumliche Orientierung und die Raumrichtungen, in der die Verschaltung der Module vorgenommen wird, dynamisch durch den Auslegungsprozess anpassen zu lassen und so den aktuell noch notwendigen Anteil händischer Iteration zu verringern. Bei der automatisierten Parametrierung des thermischen

Systemmodells ist nur eine Interaktion von benachbarten LIB vorgesehen. Grundsätzlich ist das Simulationsmodell vorbereitet, auch komplexere Wärmeleitungsprofile, wie sie beispielsweise durch Modulgehäuse oder Ableiter entstehen, darzustellen. Um dieses Potential zu nutzen, ist jedoch noch eine Weiterentwicklung des Ansatzes zur Modellparametrierung nötig.

Für die Erstellung des BTMS und VTMS Konzeptes wird aktuell auf vorgegebene Architekturen zurückgegriffen, die vollfaktoriell durchgeprüft werden. Effizienter wäre es jedoch, diese dynamisch anhand der Ergebnisse der thermischen Simulation anzupassen. Mögliche Ansätze hierfür wurden bereits in einer Vorveröffentlichung [22] vorgestellt, für deren Implementierung jedoch beträchtlicher Aufwand erwartet wird. Im Falle des BTMS unterstützt die automatische Modellparametrierung nur simpel gestaltete Kühlkanäle, für weiterführende Untersuchungen zum optimalen Verlauf der Kühlkanäle sollte dieser Ansatz erweitert werden, um auch komplexere Geometrien zu unterstützen.

Schon in der jetzigen Ausbaustufe ist der Auslegungsprozess geeignet grundsätzliche Konzeptvorschläge für die Gestaltung des Batteriesystems und dessen thermischer Anbindung in BEV zu geben. Weiterhin können auch kritische Szenarien hoher thermischer Belastung wie das Schnellladen zuverlässig dargestellt werden. Dies gilt insbesondere für Prototypen in geringen Stückzahlen, für die ein simpler Aufbau im Vordergrund steht und keine hohen Anforderungen an Optimierungen für die Serienproduktion gestellt werden. Sind weiterführende Untersuchungen innerhalb der individuellen Systemebenen nötig, ermöglicht die modulare Gestaltung der Simulationsmodelle eine einfache Weiterentwicklung und Detaillierung an den gewünschten Stellen. Hierdurch kann an die im Rahmen dieser Arbeit abgeleiteten Auslegungsempfehlungen angeknüpft und neuartige Konzepte für Batteriesysteme in Elektrofahrzeugen und deren Thermomanagement abgeleitet werden. Durch die Beiträge dieser Arbeit können alle diese Untersuchungen im Rahmen einer ganzheitlichen Betrachtung des Gesamtfahrzeuges durchgeführt und so direkt deren Auswirkung auf das kundenrelevante Verhalten des Fahrzeugs überprüft werden. Es ist zu hoffen, dass diese Ergebnisse helfen, die Akzeptanz und die Adaptionsrate der Elektromobilität weiter zu steigern.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Aufbau der Arbeit.....	4
Abbildung 2.1:	Dynamische Spannungsantwort einer Lithium-Ionen Zelle (nach [30])	5
Abbildung 2.2:	Gängige Bauformen von Lithium-Ionen-Zellen und ihre Pfade maximaler und limitierter Wärmeabgabe \dot{q}_{\max} und \dot{q}_{\lim}	7
Abbildung 2.3:	Quellen der Anforderungen an Batteriesysteme	9
Abbildung 2.4:	Überwachte elektrische Größen gängiger Batteriemanagementsysteme ..	11
Abbildung 2.5:	Verbesserung der elektrischen Überwachbarkeit durch Verzicht auf Parallelschaltung	12
Abbildung 3.1:	Produktentstehungsprozess nach [74, S. 22-23] und Einordnung der Arbeit	15
Abbildung 3.2:	Betrachtete Systemebenen, Effekte und Wechselwirkungen.....	18
Abbildung 4.1:	Weitere Widerstände in Batteriesystemen	20
Abbildung 4.2:	Elektrische Effekte in Seriell- (links) und Parallelschaltungen (rechts) von LIB (Simulation von jeweils 18 Panasonic NCR18650PF Zellen. Elektrische Parameter siehe Anhang A.1, angenommene Parameterstreuungen siehe Anhang B.2.)	20
Abbildung 4.3:	Grundprinzip elektrischer Ersatzschaltkreise (nach [19]).....	21
Abbildung 4.4:	Ablauf der elektrischen Simulation (nach [19])	23
Abbildung 4.5:	Wahrscheinlichkeit der Worst Case Kombination $p_1 = p_2 = 0,2$, $n_1 = n_2$ bei unterschiedlichen Größen der Parallelschaltung (nach [85, S. 32-33]) .	25
Abbildung 5.1:	Mechanismen der Wärmeübertragung.....	28
Abbildung 5.2:	Prinzip der Methode der thermischen Netzwerke.....	28
Abbildung 5.3:	Anforderungen von LIB und BTMS-Maßnahmen während des Betriebs (nach [108, S. 166, 109, S. 9-11]).....	29
Abbildung 5.4:	Einteilung der BTMS-Maßnahmen (aufbauend auf [104, S. 28-29])	30
Abbildung 5.5:	Möglichkeiten der thermischen Anbindung der Zellen.....	31
Abbildung 5.6:	Ablauf der thermischen Simulation (nach [19, 22]).....	32
Abbildung 5.7:	Beschreibung der geometrischen Anordnung der Zellen.....	33
Abbildung 5.8:	Versuchsaufbau zur Validierung des thermischen Systemmodells	35
Abbildung 5.9:	Ablauf der Lastkollektivanalyse (nach [85, S. 19])	37
Abbildung 5.10:	Möglichkeiten der automatischen BTMS Platzierung.....	39

Abbildung 5.11: BTMS-Maßnahmen in Abhängigkeit der Fahrzeugklasse (nach [104, S. 51-54]).....	40
Abbildung 6.1: Leistungsflüsse im elektrischen Antriebsstrang	44
Abbildung 6.2: Versuchsaufbau zur Vermessung im Gesamtfahrzeug [20]	45
Abbildung 6.3: Prinzip der Finite-Volumen-Methode (nach [145, S. 12]).....	46
Abbildung 6.4: Aufbau des Fahrzeugthermomanagementsystem-Modells (nach [20])	47
Abbildung 6.5: Auszug aus der Validierung des VTMS Modells (vorveröffentlicht in [20]) .	48
Abbildung 6.6: Berücksichtigte Kühlkreislaufarchitekturen innerhalb des VTMS Simulationsmodells (nach [104, 158])	50
Abbildung 6.7: Vorgehen zum Entwurf des VTMS Konzepts	53
Abbildung 7.1: Geschwindigkeitsprofile der Belastungszyklen	56
Abbildung 7.2: Mögliche thermische Anbindungen des BTMS an die Zellen	58
Abbildung 7.3: Orientierung der Zellen innerhalb des Batteriesystems	59
Abbildung 7.4: Modulanordnung im Batteriesystem und elektrische Verschaltung.....	60
Abbildung 7.5: Anzahl der validen Systemkonfigurationen pro Zelltyp.....	61
Abbildung 7.6: Auswirkung der Parameterschwankungen auf die Parallelschaltung (18650-Zelle)	62
Abbildung 7.7: Auswirkung der Parameterschwankungen auf unterschiedliche Größen der Parallelschaltung	63
Abbildung 7.8: Temperaturverläufe unterschiedlicher BTMS Architekturen am Beispiel eines Schnellladevorgangs eines Batteriesystems aus 18650-Zellen. Schraffierte Flächen: Temperaturbereiche der LIB.....	65
Abbildung 7.9: Platzierung der Wärmesenken bei Modulinnenkühlung von zylindrischen Zellen (schematisch)	65
Abbildung 7.10: Platzierung der Wärmesenken bei Modulinnenkühlung von Pouch-Zellen (schematisch).....	67
Abbildung 7.11: Entwicklung der Batterietemperatur ohne aktives Thermomanagement (KK1) für unterschiedliche Fahrzyklen und Fahrzeugklassen bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C.....	69
Abbildung 7.12: Entwicklung der Batterietemperaturen bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C. Zyklus: WLTC Class 3.	70
Abbildung 7.13: Entwicklung der Batterietemperaturen bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C. Zyklus: CADC-Motorway mit Schnellladen.	70
Abbildung 7.14: Entwicklung der Batterietemperaturen bei einer Umgebungstemperatur von 40 °C. Zyklus: WLTC Class 3.	71
Abbildung 7.15: Entwicklung der Batterietemperaturen bei einer Umgebungstemperatur von 0 °C. Zyklus: WLTC Class 3.....	72
Abbildung 7.16: Entwicklung der Batterietemperaturen bei einer Umgebungstemperatur von 0 °C. Zyklus: CADC-Motorway mit Schnellladen.....	72

Abbildung 7.17: Entwicklung der Batterietemperaturen bei einer Umgebungstemperatur von $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Fahrzeug: Obere Mittelklasse. Zyklus: CADC-Motorway.....	73
Abbildung 7.18: Auswahl des Gesamtkonzepts vor dem Hintergrund möglicher Einschränkungen bei der Genauigkeit der Simulationsmodelle	76
Abbildung 8.1: Ablauf der Systemauslegung (aufbauend auf [18])	86

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Kundenanforderungen an Elektrofahrzeuge und technische Entsprechung..	8
Tabelle 2.2:	Grenzen der Messgrößenerfassung von Batteriemanagementsystemen	11
Tabelle 3.1:	Fokus bestehender Arbeiten (Erweiterung von [18, 22])	16
Tabelle 4.1:	Simulation des Einflusses der Größe der Verschaltung auf die Inhomogenität von Strom und SOC. (Zelle: Panasonic NCR18650PF, Schwankung R_i und C_A jeweils 3 %. Max. C-Rate auf Zellebene: $1,5 \frac{1}{h}$. Zellparameter siehe Anhang A.1, Informationen zur angenommenen Streuung und zum Vorgehen siehe Anhang B.2.)	26
Tabelle 5.1:	Vergleich gängiger Medien für Thermomanagementsysteme bei gleichem Massenstrom	29
Tabelle 5.2:	Zusammenhang zwischen den Verschaltungsvarianten und den Raumrichtungen	38
Tabelle 6.1:	Temperaturniveaus und Klimatisierungsbedarf unterschiedlicher Fahrzeugkomponenten nach [109, S. 16]	42
Tabelle 7.1:	Betrachtete Fahrzeugklassen und zugehörige Spezifikationen [160].....	55
Tabelle 7.2:	Geforderte Belastungszyklen.....	56
Tabelle 7.3:	Verwendete Zelltypen und -parameter.....	57
Tabelle 7.4:	Gewählte Batteriesystemkonfigurationen und Vergleich mit den gewählten Anforderungen	59
Tabelle 7.5:	Absoluttemperaturen und Temperaturgradienten der Batteriesystem- und BTMS Konzepte während eines Schnellladevorgangs. Die Starttemperatur der Zellen beträgt 25 °C, die Einlauftemperatur des Kühlmittels 20 °C. Werte, die die geforderten Randbedingungen verletzen, sind grau hinterlegt.	64
Tabelle A.1:	Statische elektrische Zellparameter Panasonic NCR18650PF (für 2RC und 4RC ECM).....	xxix
Tabelle A.2:	Dynamische elektrische Zellparameter Panasonic NCR18650PF (2RC)	xxix
Tabelle A.3:	Dynamische elektrische Zellparameter Panasonic NCR18650PF (2RC) (Fortsetzung)	xxx
Tabelle A.4:	Dynamische elektrische Zellparameter Panasonic NCR18650PF (4RC)	xxx
Tabelle A.5:	Dynamische elektrische Zellparameter Panasonic NCR18650PF (4RC) (Fortsetzung)	xxxi
Tabelle A.6:	Thermische Zellparameter Panasonic NCR18650PF	xxxii

Tabelle A.7:	Parameter des Zell-Balancings von Batteriesystemen	xxxii
Tabelle A.8:	Wärmeleitung zwischen Zellen und Modulen in Batteriesystemen	xxxiii
Tabelle A.9:	Parameter des Kühlfluids für die BTMS Auslegung	xxxiii
Tabelle A.10:	Allgemeine Parameter der BTMS Kühlkanäle	xxxiii
Tabelle B.1:	Angenommene Standardabweichungen der ECM Zellparameter (nicht aufgeführte Werten haben eine Standardabweichung von Null)	xxxv
Tabelle B.2:	Ergebnisse der einzelnen Simulationsdurchläufe [1, 2, ...] (zufällige Parameterzuweisung anhand der Normalverteilung). Verwendetes Lastprofil: DST. Start-SOC: 94 %, End-SOC: 30 %. Max. C-Rate auf Zellebene: 1,5	xxxv
Tabelle B.3:	Ergebnisse der einzelnen Simulationsdurchläufe [1, 2, ...] (zufällige Parameterzuweisung anhand der Normalverteilung). Verwendetes Lastprofil: DST. Start-SOC: 94 %, End-SOC: 30 %. Max. C-Rate auf Zellebene: $1,5 \frac{1}{h}$. (Fortsetzung)	xxxvi
Tabelle C.1:	Betrachtete Fahrzeuge für die Analyse der Thermomanagementstrategie [104, S. xv-xix] Legende der Fahrzeugklasse: 1 = Kleinst-/Kleinwagen; 2 = Kompakt-/Mittelklasse; 3 = Mittel-/Oberklasse	xxxvii
Tabelle C.2:	Betrachtete Fahrzeuge für die Analyse der Thermomanagementstrategie [104, S. xv-xix] Legende der Fahrzeugklasse: 1 = Kleinst-/Kleinwagen; 2 = Kompakt-/Mittelklasse; 3 = Mittel-/Oberklasse (Fortsetzung)	xxxviii
Tabelle C.3:	Verwendete BTMS Technologie der Referenzfahrzeuge [104, S. xix-xxiii]	xxxviii

Literaturverzeichnis

- [1] Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) im Umweltbundesamt. „Klimaneutrale Dienstreisen der Bundesregierung,“ 2019. [Online]. Verfügbar: https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/Factsheet_Dienstreisen-BReg.pdf?__blob=publicationFile&v=13 [aufgerufen am 08. 02. 2019].
- [2] Umwelt Bundesamt, „Energiebedingte Emissionen: Energiebedingte Treibhausgas Emissionen,“ 2019. Verfügbar: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energiebedingte-emissionen#textpart-1> [aufgerufen am 13. 09. 2019].
- [3] Europäische Kommission, „Europa in Bewegung: Die Kommission vervollständigt ihre Agenda für eine sichere, umweltfreundliche und vernetzte Mobilität: Pressemitteilung,“ 2018. Verfügbar: https://europa.eu/rapid/press-release_IP-18-3708_de.htm [aufgerufen am 13. 09. 2019].
- [4] Europäische Kommission, „Luftqualität: Kommission ergreift Maßnahmen zum Schutz der Bürger vor Luftverschmutzung: Pressemitteilung,“ 2018. Verfügbar: https://europa.eu/rapid/press-release_IP-18-3450_de.htm.
- [5] Y. Du, J. Wu, K. Hu und Y. Guo, „Simulation study on improvement of air quality by introducing electric vehicles,“ *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*, Bd. 06, Rn. 04, S. 1550042, 2015, doi: 10.1142/S1793962315500427.
- [6] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, „Klimaschutz in Zahlen: Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik Ausgabe 2019,“ 2019. Verfügbar: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz_zahlen_2019_broschuere_bf.pdf [aufgerufen am 27. 09. 2019].
- [7] Nationale Plattform Elektromobilität, „Fortschrittsbericht 2018 – Markthochlaufphase,“ 2018. Verfügbar: http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/NPE_Fortschrittsbericht_2018_barrierefrei.pdf [aufgerufen am 27. 09. 2019].
- [8] J. Ritz, *Elektromobilität: Was bremst den Erfolg elektrischer Fahrzeuge? Ressourcenverbrauch, Ökonomie und Sicherheit*, Wiesbaden, Springer, 2018, isbn: 978-3-658-20953-7. doi: 10.1007/978-3-658-20953-7_3. Verfügbar: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-20953-7>.
- [9] T. Keuschen und T. Marnier, „Zukunft Elektromobilität? – Eine empirische Untersuchung,“ in *Entscheidungen beim Übergang in die Elektromobilität*. Bd. 28, H. Proff, Hrsg. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 461–477, isbn: 978-3-658-09576-5. doi: 10.1007/978-3-658-09577-2_30.
- [10] P. Thomes, A. Kampker, D. Vallée, A. Schnettler und G. Kasperk, „Grundlagen,“ in *Elektromobilität*. Bd. 81, A. Kampker, D. Vallée und A. Schnettler, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 5–58, isbn: 978-3-642-31985-3. doi: 10.1007/978-3-642-31986-0_2.

- [11] Kraftfahrt-Bundesamt, „Verkehr in Kilometern - Inländerfahrleistung (VK): Entwicklung der Fahrleistungen nach Fahrzeugarten seit 2014,“ 2019. Verfügbar: https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/verkehr_in_kilometern_node. https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/verkehr_in_kilometern_kurzbericht_pdf?__blob=publicationFile&v=17 [aufgerufen am 13. 09. 2019].
- [12] Frankfurter Allgemeine. „Manipulierte Akkus? : Autohalter klagt gegen Tesla,“ 2019. [Online]. Verfügbar: <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/diginomics/us-autohalter-klagt-gegen-tesla-wegen-manipulierten-akkus-16325284.html> [aufgerufen am 27. 09. 2019].
- [13] J. Warner, „Thermal Management,“ in *The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design*, J. Warner, Hrsg. Elsevier, 2015, S. 115–130, isbn: 9780128014561. doi: 10.1016/B978-0-12-801456-1.00010-5.
- [14] S. Ahmed, I. Bloom, A. N. Jansen, T. Tanim, E. J. Dufek, A. Pesaran, A. Burnham, R. B. Carlson, F. Dias, K. Hardy, M. Keyser, C. Kreuzer, A. Markel, A. Meintz, C. Michelbacher, M. Mohanpurkar, P. A. Nelson, D. C. Robertson, D. Scoffield, M. Shirk, T. Stephens, R. Vijayagopal und J. Zhang, „Enabling fast charging – A battery technology gap assessment,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 367, S. 250–262, 2017, doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.06.055.
- [15] A. Meintz, J. Zhang, R. Vijayagopal, C. Kreuzer, S. Ahmed, I. Bloom, A. Burnham, R. B. Carlson, F. Dias, E. J. Dufek, J. Francfort, K. Hardy, A. N. Jansen, M. Keyser, A. Markel, C. Michelbacher, M. Mohanpurkar, A. Pesaran, D. Scoffield, M. Shirk, T. Stephens und T. Tanim, „Enabling fast charging – Vehicle considerations,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 367, S. 216–227, 2017, doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.07.093.
- [16] K. Specht, M. Gall und G. Scheidhammer, „From 400 to 800 V - Effects on the High-voltage On-board Electrical System,“ *ATZelectronics worldwide*, Bd. 14, Rn. 7-8, S. 42–45, 2019, doi: 10.1007/s38314-019-0073-x.
- [17] A. Lajunen, T. Hadden, R. Hirmiz, J. Cotton und A. Emadi, „Thermal energy storage for increasing heating performance and efficiency in electric vehicles,“ in *2017 IEEE Transportation and Electrification Conference and Expo (ITEC): Chicago, Illinois, June 22-24, 2017*, Chicago, IL, USA, 2017, S. 95–100, isbn: 978-1-5090-3953-1. doi: 10.1109/ITEC.2017.7993253.
- [18] C. Reiter, N. Wassiliadis und M. Lienkamp, „Design of Thermal Management Systems for Battery Electric Vehicles,“ in *2019 Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monte-Carlo, Monaco, 2019, S. 1–10, isbn: 978-1-7281-3703-2. doi: 10.1109/EVER.2019.8813671.
- [19] 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, isbn: 978-1-7281-3703-2. doi: 10.1109/EVER.2019.8813640.
- [20] C. Reiter, J. Dirnecker und M. Lienkamp, „Efficient Simulation of Thermal Management Systems for BEV,“ in *2019 Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monte-Carlo, Monaco, 2019, S. 1–8, isbn: 978-1-7281-3703-2. doi: 10.1109/EVER.2019.8813683.

- [21] C. Reiter, N. Wassiliadis, L. Wildfeuer, T. Wurster und M. Lienkamp, „Range Extension of Electric Vehicles through Improved Battery Capacity Utilization: Potentials, Risks and Strategies,“ in *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Maui, HI, USA, 2018, S. 321–326, isbn: 978-1-7281-0321-1. doi: 10.1109/ITSC.2018.8569455.
- [22] C. Reiter, X. Lin, L.-E. Schlereth und M. Lienkamp, „Finding the ideal automotive battery concept: A model-based approach on cell selection, modularization and thermal management,“ *Forschung im Ingenieurwesen*, Bd. 367, Rn. 6, 2019, doi: 10.1007/s10010-019-00316-x.
- [23] M. Fries, M. Kerler, S. Rohr, S. Schickram, M. Sinning und M. Lienkamp, „An Overview of Costs for Vehicle Components, Fuels, Greenhouse Gas Emissions and Total Cost of Ownership Update 2017,“ Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, TUM, 2017, doi: 10.13140/RG.2.2.19963.21285.
- [24] H. Martin, A. Leitner und B. Winkler, „Holistic Safety Considerations for Automotive Battery Systems,“ in *Automotive Battery Technology* (SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology), A. Thaler und D. Watzenig, Hrsg. Cham: Springer International Publishing, 2014, S. 1–17, isbn: 978-3-319-02522-3. doi: 10.1007/978-3-319-02523-0_1.
- [25] B. Riegel, „Anforderungen an Batterien für den stationären Einsatz,“ in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, R. Korthauer, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 417–428, isbn: 978-3-642-30652-5. doi: 10.1007/978-3-642-30653-2_33.
- [26] D. Neumeister, A. Wiebelt und T. Heckenberger, „Systemeinbindung einer Lithium-Ionen-Batterie in Hybrid- und Elektroautos,“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Bd. 112, Rn. 4, S. 250–255, 2010, doi: 10.1007/BF03222156.
- [27] H. Fink, „Li-ion batteries for automotive applications – Quo vadis?,“ in *16. Internationales Stuttgarter Symposium: Automobil- und Motorentechnik*, Stuttgart, 2016, S. 69–81, isbn: 978-3-658-13254-5. doi: 10.1007/978-3-658-13255-2_7. Verfügbar: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-13255-2>.
- [28] S. Leuthner, „Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien,“ in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, R. Korthauer, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 13–19, isbn: 978-3-642-30652-5. doi: 10.1007/978-3-642-30653-2_2.
- [29] S. Goutam, J.-M. Timmermans, N. Omar, P. Bossche und J. van Mierlo, „Comparative Study of Surface Temperature Behavior of Commercial Li-Ion Pouch Cells of Different Chemistries and Capacities by Infrared Thermography,“ *Energies*, Bd. 8, Rn. 8, S. 8175–8192, 2015, doi: 10.3390/en8088175.
- [30] 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, isbn: 978-1-7281-3703-2. doi: 10.1109/EVER.2019.8813578.
- [31] A. Barai, W. D. Widanage, J. Marco, A. McGordon und P. Jennings, „A study of the open circuit voltage characterization technique and hysteresis assessment of lithium-ion cells,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 295, S. 99–107, 2015, doi: 10.1016/j.jpowsour.2015.06.140.
- [32] A. Jossen, „Fundamentals of battery dynamics,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 154, Rn. 2, S. 530–538, 2006, doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.10.041.

- [33] M. A. Roscher, O. Bohlen und J. Vetter, „OCV Hysteresis in Li-Ion Batteries including Two-Phase Transition Materials,“ *International Journal of Electrochemistry*, Bd. 2011, Rn. 9, S. 1–6, 2011, doi: 10.4061/2011/984320.
- [34] W. Waag, S. Käbitz und D. U. Sauer, „Experimental investigation of the lithium-ion battery impedance characteristic at various conditions and aging states and its influence on the application,“ *Applied Energy*, Bd. 102, S. 885–897, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.09.030.
- [35] 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*, Bd. 18, S. 295–307, 2018, doi: 10.1016/j.est.2018.04.031.
- [36] J. P. Schmidt, *Verfahren zur Charakterisierung und Modellierung von Lithium-Ionen Zellen*, (Schriften des Instituts für Werkstoffe der Elektrotechnik, Karlsruher Institut für Technologie). Bd. Band 25, Karlsruhe, 2013, isbn: 9783731501152. doi: 10.5445/KSP/1000036622. Verfügbar: <http://dx.doi.org/10.5445/KSP/1000036622>.
- [37] T. Gewalt, C. Reiter, X. Lin, M. Baumann, T. Krahl, A. Hahn und M. Lienkamp, „Characterization and Concept Validation of Lithium-Ion Batteries in Automotive Applications by Load Spectrum Analysis,“ in *31st International Electric Vehicles Symposium & Exhibition (EVS 31) & International Electric Vehicle Technology Conference (EVTeC)*, Kobe Convention Center, 2018.
- [38] 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*, Bd. 241, S. 680–689, 2013, doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.05.040.
- [39] M. Broussely, S. Herreyre, P. Biensan, P. Kasztejna, K. Nechev und R. Staniewicz, „Aging mechanism in Li ion cells and calendar life predictions,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 97-98, S. 13–21, 2001, doi: 10.1016/S0378-7753(01)00722-4.
- [40] M. A. Danzer, V. Liebau und F. Maglia, „Aging of lithium-ion batteries for electric vehicles,“ in *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles* Elsevier, 2015, S. 359–387, isbn: 9781782423775. doi: 10.1016/B978-1-78242-377-5.00014-5.
- [41] S. M. Rezvanizani, Z. Liu, Y. Chen und J. Lee, „Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 256, S. 110–124, 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.01.085.
- [42] K.-H. Pettinger, „Fertigungsprozesse von Lithium-Ionen-Zellen,“ in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Bd. 196, R. Korthauer, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 221–235, isbn: 978-3-642-30652-5. doi: 10.1007/978-3-642-30653-2_17.
- [43] M. Ghalkhani, F. Bahiraei, G.-A. Nazri und M. Saif, „Electrochemical–Thermal Model of Pouch-type Lithium-ion Batteries,“ *Electrochimica Acta*, Bd. 247, S. 569–587, 2017, doi: 10.1016/j.electacta.2017.06.164.
- [44] M. Fleckenstein, *Modellbasiertes Thermomanagement für Li-Ionen-Zellen in elektrischen Fahrzeuganwendungen*, (Schriftenreihe des Lehrstuhls Fahrzeugmechatronik der TU Dresden). Bd. 9, 1. Aufl., München, Verl. Dr. Hut, 2013, isbn: 978-3843911665.
- [45] M. Kerler, F. Hoffmann und M. Lienkamp, „Optimization through rapid meta-model based transient thermal simulation of lithium ion battery cells,“ in *2017 IEEE Transportation and Electrification Conference and Expo (ITEC): Chicago, Illinois, June 22-24, 2017*, Chicago, IL, USA, 2017, S. 334–341, isbn: 978-1-5090-3953-1. doi: 10.1109/ITEC.2017.7993294.

- [46] M. Fleckenstein, O. Bohlen und B. Bäker, „Aging Effect of Temperature Gradients in Li-ion Cells Experimental and Simulative Investigations and the Consequences on Thermal Battery Management,“ *World Electric Vehicle Journal*, Bd. 5, Rn. 2, S. 322–333, 2012, doi: 10.3390/wevj5020322.
- [47] R. Schmitt und T. Pfeifer, *Qualitätsmanagement: Strategien - Methoden - Techniken*, 5., überarbeitete Auflage, München, Hanser, 2015, isbn: 9783446440821.
- [48] J. Vetter, P. Novák, M. R. Wagner, C. Veit, K.-C. Möller, J. O. Besenhard, M. Winter, M. Wohlfahrt-Mehrens, C. Vogler und A. Hammouche, „Ageing mechanisms in lithium-ion batteries,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 147, Rn. 1-2, S. 269–281, 2005, doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.01.006.
- [49] T. Waldmann, B. Hogg und M. Wohlfahrt-Mehrens, „Li plating as unwanted side reaction in commercial Li-ion cells – A review,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 384, S. 107–124, 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.02.063.
- [50] M. Dubarry, N. Vuillaume und B. Y. Liaw, „Origins and accommodation of cell variations in Li-ion battery pack modeling,“ *International Journal of Energy Research*, Bd. 34, Rn. 2, S. 216–231, 2010, doi: 10.1002/er.1668.
- [51] A. Lindemann, D. U. Sauer, C. Schäper, M. Wawzyniak und A. Wiebelt, „Energiemanagement und Regelung,“ in *Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs*, H. Tschöke, Hrsg. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 77–103, isbn: 978-3-658-04643-9. doi: 10.1007/978-3-658-04644-6_4.
- [52] A. Lajunen, Y. Yang und A. Emadi, „Recent Developments in Thermal Management of Electrified Powertrains,“ *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Bd. 67, Rn. 12, S. 11486–11499, 2018, doi: 10.1109/TVT.2018.2876315.
- [53] R. Matthé und U. Eberle, „The Voltec System—Energy Storage and Electric Propulsion,“ in *Lithium-Ion Batteries*, G. Pistoia, Hrsg. Elsevier, 2014, S. 151–176, isbn: 9780444595133. doi: 10.1016/B978-0-444-59513-3.00008-X.
- [54] A. Pesaran, „Battery Thermal Management in EVs and HEVs: Issues and Solutions,“ in *Advanced automotive battery conference, 2001*. Verfügbar: https://www.researchgate.net/profile/Ahmad_Pesaran/publication/237250969_Battery_Thermal_Management_in_EVs_and_HEVs_Issues_and_Solutions/links/54b450660cf28ebe92e475ab/Battery-Thermal-Management-in-EVs-and-HEVs-Issues-and-Solutions.pdf.
- [55] M. Auer, *Ein Beitrag zur Erhöhung der Reichweite eines batterieelektrischen Fahrzeugs durch prädiktives Thermomanagement*, Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, isbn: 978-3-658-13208-8. doi: 10.1007/978-3-658-13209-5.
- [56] G. Homann, „Energieeffizientes Heizen eines E-Fahrzeugs,“ Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig, 2015.
- [57] M. Wawzyniak und A. Wiebelt, „Thermomanagement für elektrifizierte Fahrzeuge,“ *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, Bd. 77, Rn. 5, S. 42–49, 2016, doi: 10.1007/s35146-016-0030-7.
- [58] M. Lienkamp, *Elektromobilität: Hype oder Revolution?*, (VDI-Buch), Berlin, Heidelberg, Springer, 2012, isbn: 978-3-642-28549-3. doi: 10.1007/978-3-642-28549-3. Verfügbar: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-28549-3>.

- [59] J. Warner, „System Control Electronics,“ in *The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design*, J. Warner, Hrsg. Elsevier, 2015, S. 103–113, isbn: 9780128014561. doi: 10.1016/B978-0-12-801456-1.00009-9.
- [60] R. Dorn, R. Schwartz und B. Steurich, „Batteriemanagementsystem,“ in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, R. Korthauer, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 177–187, isbn: 978-3-642-30652-5. doi: 10.1007/978-3-642-30653-2_14.
- [61] H. Rahimi-Eichi, U. Ojha, F. Baronti und M.-Y. Chow, „Battery Management System: An Overview of Its Application in the Smart Grid and Electric Vehicles,“ *IEEE Industrial Electronics Magazine*, Bd. 7, Rn. 2, S. 4–16, 2013, doi: 10.1109/MIE.2013.2250351.
- [62] M. J. Brand, M. H. Hofmann, M. Steinhardt, S. F. Schuster und A. Jossen, „Current distribution within parallel-connected battery cells,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 334, S. 202–212, 2016, doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.10.010.
- [63] U. Köhler, „Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen,“ in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, R. Korthauer, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 95–106, isbn: 978-3-642-30652-5. doi: 10.1007/978-3-642-30653-2_8.
- [64] N. Wassiliadis, J. Adermann, A. Frericks, M. Pak, C. Reiter, B. Lohmann und M. Lienkamp, „Revisiting the dual extended Kalman filter for battery state-of-charge and state-of-health estimation: A use-case life cycle analysis,“ *Journal of Energy Storage*, Bd. 19, S. 73–87, 2018, doi: 10.1016/j.est.2018.07.006.
- [65] F. Ebert, G. Sextl, J. Adermann, C. Reiter und M. Lienkamp, „Detection of cell-stack inhomogeneities via mechanical SOC and SOH measurement,“ in *2017 IEEE Transportation and Electrification Conference and Expo (ITEC): Chicago, Illinois, June 22-24, 2017*, Chicago, IL, USA, 2017, S. 545–549, isbn: 978-1-5090-3953-1. doi: 10.1109/ITEC.2017.7993329.
- [66] V. Marano, S. Onori, Y. Guezennec, G. Rizzoni und N. Madella, „Lithium-ion batteries life estimation for plug-in hybrid electric vehicles,“ in *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Dearborn, MI, 2009, S. 536–543, isbn: 978-1-4244-2600-3. doi: 10.1109/VPPC.2009.5289803.
- [67] M. Ecker, N. Nieto, S. Käbitz, J. Schmalstieg, H. Blanke, A. Warnecke und D. U. Sauer, „Calendar and cycle life study of Li(NiMnCo)O₂-based 18650 lithium-ion batteries,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 248, S. 839–851, 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.09.143.
- [68] T. Wurster, „Untersuchung der Potentiale und Risiken einer temporär erweiterten Kapazitätsausnutzung der Traktionsbatterie von Elektrofahrzeugen,“ Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2018.
- [69] M. Broussely, P. Biensan, F. Bonhomme, P. Blanchard, S. Herreyre, K. Nechev und R. J. Staniewicz, „Main aging mechanisms in Li ion batteries,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 146, Rn. 1-2, S. 90–96, 2005, doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.03.172.
- [70] P. Keil, „Aging of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles,“ Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Technische Universität München, München, 2017. Verfügbar: <http://mediatum.ub.tum.de?id=1355829>.
- [71] N. S. Pearre, W. Kempton, R. L. Guensler und V. V. Elango, „Electric vehicles: How much range is required for a day’s driving?,“ *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Bd. 19, Rn. 6, S. 1171–1184, 2011, doi: 10.1016/j.trc.2010.12.010.

- [72] J. Neubauer und E. Wood, „The impact of range anxiety and home, workplace, and public charging infrastructure on simulated battery electric vehicle lifetime utility,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 257, S. 12–20, 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.01.075.
- [73] K. Klonowski, „Charakterisierung und Modellparametrierung von real gealterten Lithium Ionen Zellen,“ Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2017.
- [74] J. Feldhusen und K.-H. Grote, „Der Produktentstehungsprozess (PEP),“ in *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. Bd. 75, J. Feldhusen und K.-H. Grote, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 11–24, isbn: 978-3-642-29568-3. doi: 10.1007/978-3-642-29569-0_2.
- [75] H.-H. Braess, T. Breitling, J. Weissinger, N. Grawunder, U. Hackenberg, V. Liskowsky und U. Widmann, „Produktentstehungsprozess,“ in *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, S. Pischinger und U. Seiffert, Hrsg. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, S. 1257–1369, isbn: 978-3-658-09527-7. doi: 10.1007/978-3-658-09528-4_11.
- [76] P. Burda, „Verfahren zur Entwicklung und Auslegung von Energiespeichersystemen für Elektrokraftfahrzeuge,“ Dissertation, Institut für Maschinen und Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, München, 2014.
- [77] A. Tourani, P. White und P. Ivey, „Analysis of electric and thermal behaviour of lithium-ion cells in realistic driving cycles,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 268, S. 301–314, 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.06.010.
- [78] E. Hosseinzadeh, R. Genieser, D. Worwood, A. Barai, J. Marco und P. Jennings, „A systematic approach for electrochemical-thermal modelling of a large format lithium-ion battery for electric vehicle application,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 382, S. 77–94, 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.02.027.
- [79] N. Nieto, L. Díaz, J. Gastelurrutia, F. Blanco, J. C. Ramos und A. Rivas, „Novel thermal management system design methodology for power lithium-ion battery,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 272, S. 291–302, 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.07.169.
- [80] G. Karimi und A. R. Dehghan, „Thermal analysis of high-power lithium-ion battery packs using flow network approach,“ *International Journal of Energy Research*, Bd. 38, Rn. 14, S. 1793–1811, 2014, doi: 10.1002/er.3173.
- [81] S. Paul, C. Diegelmann, H. Kabza und W. Tillmetz, „Analysis of ageing inhomogeneities in lithium-ion battery systems,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 239, S. 642–650, 2013, doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.01.068.
- [82] Q. Xia, Z. Wang, Y. Ren, B. Sun, D. Yang und Q. Feng, „A reliability design method for a lithium-ion battery pack considering the thermal disequilibrium in electric vehicles,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 386, S. 10–20, 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.03.036.
- [83] W. Zhou, *Modellbasierte Auslegungsmethode von Temperierungssystemen für Hochvolt-Batterien in Personenkraftfahrzeugen*, (Aachener Beiträge des ISEA). Bd. Band 81, 2016, isbn: 9783844045895.
- [84] H. Hopp, *Thermomanagement von Hochleistungsfahrzeug-Traktionsbatterien anhand gekoppelter Simulationsmodelle*, Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, isbn: 978-3-658-14246-9. doi: 10.1007/978-3-658-14247-6.
- [85] T. Krahl, „Identifikation, Simulation und Bewertung von Belastungsszenarien zur Auslegung hochbelasteter Batteriepacks in Elektrofahrzeugen,“ Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2018.

- [86] A. Barai, T. R. Ashwin, C. Iraklis, A. McGordon und P. Jennings, „Scale-up of lithium-ion battery model parameters from cell level to module level – identification of current issues,“ *Energy Procedia*, Bd. 138, S. 223–228, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.10.154.
- [87] C. Reiter, L. Wildfeuer, J. Dirnecker, A. Thomaser, T. Krahl, S. Huber, T. Wurster und M. Baumann. „sim_battery_system: A simulation framework for lithium-ion battery systems.“ 2020. [Online]. Verfügbar: https://github.com/TUMFTM/sim_battery_system [aufgerufen am 08.02.2020].
- [88] X. Hu, S. Li und H. Peng, „A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 198, S. 359–367, 2012, doi: 10.1016/j.jpowsour.2011.10.013.
- [89] A. Rahmoun, H. Biechl und A. Rosin, „Evaluation of Equivalent Circuit Diagrams and Transfer Functions for Modeling of Lithium-Ion Batteries,“ *Electrical, Control and Communication Engineering*, Bd. 2, Rn. 1, S. 34–39, 2013, doi: 10.2478/ecce-2013-0005.
- [90] C. Fleischer, W. Waag, H.-M. Heyn und D. U. Sauer, „On-line adaptive battery impedance parameter and state estimation considering physical principles in reduced order equivalent circuit battery models,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 260, S. 276–291, 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.01.129.
- [91] M. Verbrugge, „Adaptive, multi-parameter battery state estimator with optimized time-weighting factors,“ *Journal of Applied Electrochemistry*, Bd. 37, Rn. 5, S. 605–616, 2007, doi: 10.1007/s10800-007-9291-7.
- [92] M. Baumann, „Methode zur Parameterbestimmung und -prädiktion von Lithium-Ionen-Traktionsbatterien,“ Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, München, 2019.
- [93] A. Cordoba-Arenas, S. Onori und G. Rizzoni, „A control-oriented lithium-ion battery pack model for plug-in hybrid electric vehicle cycle-life studies and system design with consideration of health management,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 279, S. 791–808, 2015, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.12.048.
- [94] S. Neupert und J. Kowal, „Inhomogeneities in Battery Packs,“ *World Electric Vehicle Journal*, Bd. 9, Rn. 2, S. 20, 2018, doi: 10.3390/wevj9020020.
- [95] J. Dirnecker, „Modellbasierte Entwicklung eines vollparametrischen Batteriepackmodells für Elektro- und Hybridfahrzeuge,“ Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2017.
- [96] D. Shin, M. Poncino, E. Macii und N. Chang, „A Statistical Model-Based Cell-to-Cell Variability Management of Li-ion Battery Pack,“ *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, Bd. 34, Rn. 2, S. 252–265, 2015, doi: 10.1109/TCAD.2014.2384506.
- [97] C. Forgez, D. Vinh Do, G. Friedrich, M. Morcrette und C. Delacourt, „Thermal modeling of a cylindrical LiFePO₄/graphite lithium-ion battery,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 195, Rn. 9, S. 2961–2968, 2010, doi: 10.1016/j.jpowsour.2009.10.105.
- [98] S. Brandt, „Rechnererzeugte Zufallszahlen. Die Monte-Carlo-Methode,“ in *Datenanalyse für Naturwissenschaftler und Ingenieure*, S. Brandt, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 39–66, isbn: 978-3-642-37663-4. doi: 10.1007/978-3-642-37664-1_4.

- [99] W. Kalide und H. Sigloch, *Energieumwandlung in Kraft- und Arbeitsmaschinen: Kolbenmaschinen – Strömungsmaschinen – Kraftwerke*, 10., bearbeitete Auflage, München, Hanser Verlag, 2010, isbn: 978-3-446-42527-9. doi: 10.3139/9783446425279. Verfügbar: <http://www.hanser-elibrary.com/action/showBook?doi=10.3139/9783446425279>.
- [100] P. Stephan, „B1 Wärme und verschiedene Arten der Wärmeübertragung,“ in *VDI-Wärmeatlas*. Bd. 38, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 19–22, isbn: 978-3-642-19980-6. doi: 10.1007/978-3-642-19981-3_3.
- [101] P. Stephan, „B2 Berechnungsmethoden für Wärmeleitung, konvektiven Wärmeübergang und Wärmestrahlung,“ in *VDI-Wärmeatlas*. Bd. 1, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 23–36, isbn: 978-3-642-19980-6. doi: 10.1007/978-3-642-19981-3_4.
- [102] C. Ullrich, T. Bodmer, C. Hübner, P. B. Kempa, E. Tsotsas, A. Eschner, G. Kasperek, F. Ochs und M. H. Spitzner, „D6 Stoffwerte von Feststoffen,“ in *VDI-Wärmeatlas*, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 629–708, isbn: 978-3-642-19980-6. doi: 10.1007/978-3-642-19981-3_28.
- [103] A. Boglietti, A. Cavagnino, D. Staton, M. Shanel, M. Mueller und C. Mejuto, „Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of Electrical Machines,“ *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Bd. 56, Rn. 3, S. 871–882, 2009, doi: 10.1109/TIE.2008.2011622.
- [104] L. Schlowak, „Konzeptentwicklung, Auslegung und Bewertung von Thermomanagementsystemen für elektrische Antriebsstränge,“ Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2019.
- [105] L. Ianniciello, P. H. Biwolé und P. Achard, „Electric vehicles batteries thermal management systems employing phase change materials,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 378, S. 383–403, 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.12.071.
- [106] D. W. Lee, „Development of BLDC motor and multi-blade fan for HEV battery cooling system,“ *International Journal of Automotive Technology*, Bd. 15, Rn. 7, S. 1101–1106, 2014, doi: 10.1007/s12239-014-0114-7.
- [107] W. Wagner, H.-J. Kretzschmar und R. Span, „D2 Stoffwerte von bedeutenden reinen Fluiden,“ in *VDI-Wärmeatlas*, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 175–356, isbn: 978-3-642-19980-6. doi: 10.1007/978-3-642-19981-3_12.
- [108] M. G. Zeyen und A. Wiebelt, „Thermisches Management der Batterie,“ in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, R. Korthauer, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 165–175, isbn: 978-3-642-30652-5. doi: 10.1007/978-3-642-30653-2_13.
- [109] D. Jakob, „Entwicklung von Betriebsstrategien für hochbelastete Batteriepacks in Elektrofahrzeugen unter Berücksichtigung des gesamten Antriebsstrangs,“ Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2018.
- [110] H. Sun, B. Tossan und D. Brouns, „Thermal Behavior Study on HEV Air-Cooled Battery Pack,“ in *SAE Technical Paper Series*, 2011, doi: 10.4271/2011-01-1368.
- [111] G. Karimi und X. Li, „Thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles,“ *International Journal of Energy Research*, Bd. 37, Rn. 1, S. 13–24, 2013, doi: 10.1002/er.1956.

- [112] R. Zhao, J. Gu und J. Liu, „An experimental study of heat pipe thermal management system with wet cooling method for lithium ion batteries,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 273, S. 1089–1097, 2015, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.10.007.
- [113] T.-H. Tran, S. Harmand und B. Sahut, „Experimental investigation on heat pipe cooling for Hybrid Electric Vehicle and Electric Vehicle lithium-ion battery,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 265, S. 262–272, 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.04.130.
- [114] A. Hussain, C. Y. Tso und C. Y. Chao, „Experimental investigation of a passive thermal management system for high-powered lithium ion batteries using nickel foam-paraffin composite,“ *Energy*, Bd. 115, S. 209–218, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.09.008.
- [115] C. Huber, „Phase Change Material in Battery Thermal Management Applications: An assessment of efficiency and safety,“ Dissertation, Lehrstuhl für Elektrische Energiespeichertechnik, Technische Universität München, München, 2017. Verfügbar: <https://mediatum.ub.tum.de/1356376>.
- [116] H. Ruan, J. Jiang, B. Sun, N. Wu, W. Shi und Y. Zhang, „Stepwise segmented charging technique for lithium-ion battery to induce thermal management by low-temperature internal heating,“ in *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, Beijing, China, 2014, S. 1–6, isbn: 978-1-4799-4239-8. doi: 10.1109/ITEC-AP.2014.6941094.
- [117] Y. Ji und C. Y. Wang, „Heating strategies for Li-ion batteries operated from subzero temperatures,“ *Electrochimica Acta*, Bd. 107, S. 664–674, 2013, doi: 10.1016/j.electacta.2013.03.147.
- [118] H. Hirano, T. Tajima, T. Hasegawa, T. Sekiguchi und M. Uchino, „Boiling Liquid Battery Cooling for Electric Vehicle,“ in *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, Beijing, China, 2014, S. 1–4, isbn: 978-1-4799-4239-8. doi: 10.1109/ITEC-AP.2014.6940931.
- [119] M. C. Balkaya, „Development and Evaluation of Thermal Battery Pack Models for Electric Vehicles,“ Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2017.
- [120] R. Mahamud und C. Park, „Reciprocating air flow for Li-ion battery thermal management to improve temperature uniformity,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 196, Rn. 13, S. 5685–5696, 2011, doi: 10.1016/j.jpowsour.2011.02.076.
- [121] C. Reiter und L.-E. Schlereth. „sim_BTMS: A framework for the design and simulation of lithium-ion battery systems including the consideration of battery thermal management systems (BTMS).“ 2020. [Online]. Verfügbar: https://github.com/TUMFTM/sim_BTMS [aufgerufen am 08.02.2020].
- [122] A. Eddahech, O. Briat und J.-M. Vinassa, „Thermal characterization of a high-power lithium-ion battery: Potentiometric and calorimetric measurement of entropy changes,“ *Energy*, Bd. 61, S. 432–439, 2013, doi: 10.1016/j.energy.2013.09.028.
- [123] L.-E. Schlereth, „Auswahl von Lithium-Ionen Zellen für die Traktionsbatterien von Elektrofahrzeugen unter Berücksichtigung des gesamten Antriebsstrangs,“ Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2018. Verfügbar: <https://mediatum.ub.tum.de/node?id=1472623>.

- [124] I. H. Bell, J. Wronski, S. Quoilin und V. Lemort, „Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp,“ *Industrial & engineering chemistry research*, Bd. 53, Rn. 6, S. 2498–2508, 2014, doi: 10.1021/ie4033999.
- [125] S. Huber, „Simulation der Temperatursensorik und Modularisierung eines vollparametrischen Batteriepackmodells,“ Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2018.
- [126] H. Martin, „E2 Instationäre Wärmeleitung in ruhenden Körpern,“ in *VDI-Wärmeatlas*. Bd. 19, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 727–752, isbn: 978-3-642-19980-6. doi: 10.1007/978-3-642-19981-3_36.
- [127] G. Xia, L. Cao und G. Bi, „A review on battery thermal management in electric vehicle application,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 367, S. 90–105, 2017, doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.09.046.
- [128] A. Thomaser, „Modellierung von Wärmeübergängen innerhalb eines Batteriepacks,“ Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2018.
- [129] P. Lamp, „Anforderungen an Batterien für die Elektromobilität,“ in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, R. Korthauer, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 393–415, isbn: 978-3-642-30652-5. doi: 10.1007/978-3-642-30653-2_32.
- [130] M. Naumann, J. Stückrad, M. Schimpe, R. Karl, A. Jossen und H. Hesse, „Battery lifetime prediction for different technologies based on stress characterization and aging experiments,“ *Kraftwerk Batterie 2017*, 2017, doi: 10.13140/RG.2.2.34818.99527. Verfügbar: <https://www.researchgate.net/publication/320322737>.
- [131] M. Bulling, S. Czermel, T. Frisch, T. Harr, B. Rehfus, T. Soczka-Guth und E. Walz, „Verfahren zur Ermittlung von Beanspruchungsdaten einer Batterie, insbesondere einer Fahrzeugbatterie,“ Patent DE102009006461A1, September 24, 2009.
- [132] A. Nuhic, T. Terzimehic, T. Soczka-Guth, M. Buchholz und K. Dietmayer, „Health diagnosis and remaining useful life prognostics of lithium-ion batteries using data-driven methods,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 239, S. 680–688, 2013, doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.11.146.
- [133] W. Prochazka, „A mechanistically deduced ageing model for lithium-ion cells,“ Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Technische Universität Graz, Graz, 2013. Verfügbar: <https://diglib.tugraz.at/download.php?id=576a7d3778f62&location=browse>.
- [134] J. Eller, *Stützpunktbasierter Ansatz zur Vorhersage von Bauteiltemperaturkollektiven im Thermomanagement des Gesamtfahrzeugs*, Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017, isbn: 978-3-658-18689-0. doi: 10.1007/978-3-658-18690-6.
- [135] M. Ecker, P. Shafiei Sabet und D. U. Sauer, „Influence of operational condition on lithium plating for commercial lithium-ion batteries – Electrochemical experiments and post-mortem-analysis,“ *Applied Energy*, Bd. 206, S. 934–946, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.08.034.
- [136] 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*, Bd. 14, S. 224–243, 2017, doi: 10.1016/j.est.2017.09.010.

- [137] A. Wiebelt und M. Wawzyniak, „14. Thermomanagement im elektrifizierten Antrieb,“ *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, Bd. 74, Rn. 7-8, S. 592–598, 2013, doi: 10.1007/s35146-013-0174-7.
- [138] T. Röth, A. Kampker, U. Reisgen, K. Hameyer, R. W. de Doncker, T. Stolze, A. Vetter, J. Hagedorn, D. U. Sauer und D. Müller, „Entwicklung von elektrofahrzeugspezifischen Systemen,“ in *Elektromobilität*. Bd. 13, A. Kampker, D. Vallée und A. Schnettler, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 235–334, isbn: 978-3-642-31985-3. doi: 10.1007/978-3-642-31986-0_6.
- [139] A. Steiner, G. Mimberg, F. Weidmann und A. Caldevilla, „Traktionsbatterie als thermischer Speicher,“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Bd. 120, Rn. 1, S. 66–71, 2018, doi: 10.1007/s35148-017-0158-x.
- [140] C. Schötz, „Thermische Modellierung und Optimierung elektrischer Antriebsstränge,“ Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2017.
- [141] B. Stegmann, *Ein Beitrag zur Modellierungsgenauigkeit im Bereich eindimensionaler Simulation von Pkw-Kühlsystemen*, Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, isbn: 978-3-658-14050-2. doi: 10.1007/978-3-658-14051-9.
- [142] M. Scholl, K. Minnerup, C. Reiter, B. Bernhardt, E. Weisbrodt und S. Newiger, „Optimization of a Thermal Management System for Battery Electric Vehicles,“ in *2019 Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monte-Carlo, Monaco, 2019, S. 1–10, isbn: 978-1-7281-3703-2. doi: 10.1109/EVER.2019.8813657.
- [143] K. Beetz, U. Kohle und G. Eberspach, „Beheizungskonzepte für Fahrzeuge mit Alternativen Antrieben,“ *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, Bd. 112, Rn. 4, S. 246–249, 2010, doi: 10.1007/BF03222155.
- [144] B. Rabl, M. Waltenberger, A. Steiner und M. Hütter, „Traction Battery as Heat Storage in the Heat Pump Cycle of an Electric Vehicle,“ *ATZ worldwide*, Bd. 119, Rn. 1, S. 26–31, 2017, doi: 10.1007/s38311-016-0164-8.
- [145] B. Bernhardt, „Entwicklung und Auslegung eines innovativen Thermomanagementsystems für Elektrofahrzeuge,“ Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2018.
- [146] E. Weisbrodt, „Entwicklung und Auslegung eines innovativen Thermomanagementsystems für Elektrofahrzeuge,“ Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2018.
- [147] S. Chowdhury, L. Leitzel, M. Zima, M. Santacesaria, G. Titov, J. Lustbader, J. Rugh, J. Winkler, A. Khawaja und M. Govindarajalu, „Total Thermal Management of Battery Electric Vehicles (BEVs),“ in *SAE Technical Paper Series*, 2018, doi: 10.4271/2018-37-0026.
- [148] L. Rubino, C. Capasso und O. Veneri, „Review on plug-in electric vehicle charging architectures integrated with distributed energy sources for sustainable mobility,“ *Applied Energy*, Bd. 207, S. 438–464, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.06.097.

- [149] 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, isbn: 978-1-5090-3953-1. doi: 10.1109/ITEC.2017.7993243.
- [150] J. Adermann, D. Brecheisen, P. Wacker und M. Lienkamp, „Parameter Estimation of Traction Batteries by Energy and Charge Counting during Reference Cycles,“ in *2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, Toronto, ON, 2017, S. 1–7, isbn: 978-1-5090-5935-5. doi: 10.1109/VTCFall.2017.8288328.
- [151] 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, S. 1–7, isbn: 978-1-7281-3703-2. doi: 10.1109/EVER.2019.8813601.
- [152] C. Reiter, J. Dirnecker, B. Bernhardt, F. Näher und C. Schötz. „sim_VTMS: A framework for the thermal simulation of different vehicle thermal management (VTMS) architectures for electric vehicles.“ 2019. [Online]. Verfügbar: https://github.com/TUMFTM/sim_VTMS [aufgerufen am 08.02.2019].
- [153] J. Niedermayer, „Betrachtung von Kühl- und Kältemittelkreisläufen im Kontext der Gesamtfahrzeugsimulation,“ Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2018.
- [154] L. H. Saw, Y. Ye, A. A. Tay, W. T. Chong, S. H. Kuan und M. C. Yew, „Computational fluid dynamic and thermal analysis of Lithium-ion battery pack with air cooling,“ *Applied Energy*, Bd. 177, S. 783–792, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.05.122.
- [155] J. H. Ferziger und M. Perić, *Numerische Strömungsmechanik*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2008, isbn: 978-3-540-67586-0. doi: 10.1007/978-3-540-68228-8.
- [156] J. Dirnecker, „Entwicklung und Steuerung eines Thermomanagementsystemmodells für Elektrofahrzeuge,“ Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2018.
- [157] 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 on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monte-Carlo, Monaco, 2019, S. 1–8, isbn: 978-1-7281-3703-2. doi: 10.1109/EVER.2019.8813568.
- [158] F. Näher, „Konzeptentwicklung, Auslegung und Bewertung von Thermomanagementsystemen für elektrische Antriebsstränge,“ Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2019.
- [159] Kraftfahrt-Bundesamt, „Fachartikel: Marken und Modelle,“ 2011. Verfügbar: https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/Fachartikel/marken_modelle_20110515.pdf?__blob=publicationFile&v=6https://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/Fachartikel/marken_modelle_20110515.pdf?__blob=publicationFile&v=6 [aufgerufen am 23. 10. 2019].
- [160] Allgemeiner Deutsche Automobil-Club e. V. „Autokatalog: Automarken & Modelle,“ 2020. [Online]. Verfügbar: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/> [aufgerufen am 06. 02. 2020].

- [161] Fraunhofer-Allianz Batterien, „Entwicklungsperspektiven für Zellformate von Lithium-Ionen-Batterien in der Elektromobilität,“ 2017. Verfügbar: https://www.batterien.fraunhofer.de/content/dam/batterien/de/documents/Allianz_Batterie_Zellformate_Studie.pdf [aufgerufen am 23. 10. 2019].
- [162] R. Spotnitz und J. Franklin, „Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells,“ *Journal of Power Sources*, Bd. 113, Rn. 1, S. 81–100, 2003, doi: 10.1016/S0378-7753(02)00488-3.
- [163] L. Michels, „Thermomanagement von Batteriepacks: Stand der Technik und Simulation,“ Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2018.
- [164] W. A. Hermann, „Liquid cooling manifold with multi-function thermal interface,“ Patent US8263250B2, 2010.
- [165] M. Krausz, *Methode zur Abschätzung der Ergebnisqualität von modularen Gesamtfahrzeugsimulationsmodellen*, (Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart), 2016, isbn: 978-3-658-16547-5. doi: 10.1007/978-3-658-16547-5.

Vorveröffentlichungsliste

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

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

- [22] C. Reiter, X. Lin, L.-E. Schlereth und M. Lienkamp, „Finding the ideal automotive battery concept: A model-based approach on cell selection, modularization and thermal management,“ *Forschung im Ingenieurwesen*, Bd. 367, Rn. 6, 2019, doi: 10.1007/s10010-019-00316-x.
- [64] N. Wassiliadis, J. Adermann, A. Frericks, M. Pak, C. Reiter, B. Lohmann und M. Lienkamp, „Revisiting the dual extended Kalman filter for battery state-of-charge and state-of-health estimation: A use-case life cycle analysis,“ *Journal of Energy Storage*, Bd. 19, S. 73–87, 2018, doi: 10.1016/j.est.2018.07.006.

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

- [18] C. Reiter, N. Wassiliadis und M. Lienkamp, „Design of Thermal Management Systems for Battery Electric Vehicles,“ in *2019 Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monte-Carlo, Monaco, 2019, S. 1–10, isbn: 978-1-7281-3703-2. doi: 10.1109/EVER.2019.8813671.
- [19] 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, isbn: 978-1-7281-3703-2. doi: 10.1109/EVER.2019.8813640.
- [20] C. Reiter, J. Dirnecker und M. Lienkamp, „Efficient Simulation of Thermal Management Systems for BEV,“ in *2019 Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monte-Carlo, Monaco, 2019, S. 1–8, isbn: 978-1-7281-3703-2. doi: 10.1109/EVER.2019.8813683.
- [21] C. Reiter, N. Wassiliadis, L. Wildfeuer, T. Wurster und M. Lienkamp, „Range Extension of Electric Vehicles through Improved Battery Capacity Utilization: Potentials, Risks and Strategies,“ in *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Maui, HI, USA, 2018, S. 321–326, isbn: 978-1-7281-0321-1. doi: 10.1109/ITSC.2018.8569455.

- [30] 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, isbn: 978-1-7281-3703-2. doi: 10.1109/EVER.2019.8813578.
- [65] F. Ebert, G. Sextl, J. Adermann, C. Reiter und M. Lienkamp, „Detection of cell-stack inhomogeneities via mechanical SOC and SOH measurement,“ in *2017 IEEE Transportation and Electrification Conference and Expo (ITEC): Chicago, Illinois, June 22-24, 2017*, Chicago, IL, USA, 2017, S. 545–549, isbn: 978-1-5090-3953-1. doi: 10.1109/ITEC.2017.7993329.
- [142] M. Scholl, K. Minnerup, C. Reiter, B. Bernhardt, E. Weisbrodt und S. Newiger, „Optimization of a Thermal Management System for Battery Electric Vehicles,“ in *2019 Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monte-Carlo, Monaco, 2019, S. 1–10, isbn: 978-1-7281-3703-2. doi: 10.1109/EVER.2019.8813657.

Zeitschriften, Konferenzen, Magazine, Berichte, Konferenzvorträge und -poster, etc.; nicht Scopus/Web of Science gelistet

- [37] T. Gewalt, C. Reiter, X. Lin, M. Baumann, T. Krahl, A. Hahn und M. Lienkamp, „Characterization and Concept Validation of Lithium-Ion Batteries in Automotive Applications by Load Spectrum Analysis,“ in *31st International Electric Vehicles Symposium & Exhibition (EVS 31) & International Electric Vehicle Technology Conference (EVTec)*, Kobe Convention Center, 2018.

Open-Source Simulationsmodelle

- [87] C. Reiter, L. Wildfeuer, J. Dirnecker, A. Thomaser, T. Krahl, S. Huber, T. Wurster und M. Baumann. „sim_battery_system: A simulation framework for lithium-ion battery systems.“ 2020. [Online]. Verfügbar: https://github.com/TUMFTM/sim_battery_system [aufgerufen am 08.02.2020].
- [121] C. Reiter und L.-E. Schlereth. „sim_BTMS: A framework for the design and simulation of lithium-ion battery systems including the consideration of battery thermal management systems (BTMS).“ 2020. [Online]. Verfügbar: https://github.com/TUMFTM/sim_BTMS [aufgerufen am 08.02.2020].
- [152] C. Reiter, J. Dirnecker, B. Bernhardt, F. Näher und C. Schötz. „sim_VTMS: A framework for the thermal simulation of different vehicle thermal management (VTMS) architectures for electric vehicles.“ 2019. [Online]. Verfügbar: https://github.com/TUMFTM/sim_VTMS [aufgerufen am 08.02.2019].

Nicht-dissertationsrelevante Veröffentlichungen; Scopus/Web of Science gelistet (peer-reviewed)

N. Wassiliadis, T. Herrmann, L. Wildfeuer, C. Reiter und M. Lienkamp, „Comparative Study of State-Of-Charge Estimation with Recurrent Neural Networks,“ in *Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, Novi, MI, USA, 2019, S. 1–6, isbn: 978-1-5386-9310-0. doi: 10.1109/ITEC.2019.8790597.

Betreute Studienarbeiten

Folgende studentische Arbeiten entstanden im Rahmen der Dissertation unter der inhaltlichen, fachlichen und wissenschaftlichen Betreuung und unter maßgeblicher Anleitung des Autors. Im Folgenden sind die für diese Dissertation relevanten und in Bezug stehenden Bachelor-, Semester- und Masterarbeiten aufgeführt. Vielen Dank an die Bearbeiter für die umfangreiche Unterstützung im Rahmen dieses Forschungsprojekts!

- [68] T. Wurster, „Untersuchung der Potentiale und Risiken einer temporär erweiterten Kapazitätsausnutzung der Traktionsbatterie von Elektrofahrzeugen,“ Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2018.
- [73] K. Klonowski, „Charakterisierung und Modellparametrierung von real gealterten Lithium Ionen Zellen,“ Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2017.
- [85] T. Krahl, „Identifikation, Simulation und Bewertung von Belastungsszenarien zur Auslegung hochbelasteter Batteriepacks in Elektrofahrzeugen,“ Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2018.
- [95] J. Dirnecker, „Modellbasierte Entwicklung eines vollparametrischen Batteriepackmodells für Elektro- und Hybridfahrzeuge,“ Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2017.
- [104] L. Schlowak, „Konzeptentwicklung, Auslegung und Bewertung von Thermomanagementsystemen für elektrische Antriebsstränge,“ Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2019.
- [109] D. Jakob, „Entwicklung von Betriebsstrategien für hochbelastete Batteriepacks in Elektrofahrzeugen unter Berücksichtigung des gesamten Antriebsstrangs,“ Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2018.
- [119] M. C. Balkaya, „Development and Evaluation of Thermal Battery Pack Models for Electric Vehicles,“ Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2017.
- [123] L.-E. Schlereth, „Auswahl von Lithium-Ionen Zellen für die Traktionsbatterien von Elektrofahrzeugen unter Berücksichtigung des gesamten Antriebsstrangs,“ Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2018. Verfügbar: <https://mediatum.ub.tum.de/node?id=1472623>.
- [125] S. Huber, „Simulation der Temperatursensorik und Modularisierung eines vollparametrischen Batteriepackmodells,“ Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2018.

- [128] A. Thomaser, „Modellierung von Wärmeübergängen innerhalb eines Batteriepacks,“ Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2018.
- [140] C. Schötz, „Thermische Modellierung und Optimierung elektrischer Antriebsstränge,“ Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2017.
- [145] B. Bernhardt, „Entwicklung und Auslegung eines innovativen Thermomanagementsystems für Elektrofahrzeuge,“ Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2018.
- [146] E. Weisbrodt, „Entwicklung und Auslegung eines innovativen Thermomanagementsystems für Elektrofahrzeuge,“ Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2018.
- [153] J. Niedermayer, „Betrachtung von Kühl- und Kältemittelkreisläufen im Kontext der Gesamtfahrzeugsimulation,“ Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2018.
- [156] J. Dirnecker, „Entwicklung und Steuerung eines Thermomanagementsystemmodells für Elektrofahrzeuge,“ Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2018.
- [158] F. Näher, „Konzeptentwicklung, Auslegung und Bewertung von Thermomanagementsystemen für elektrische Antriebsstränge,“ Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2019.
- [163] L. Michels, „Thermomanagement von Batteriepacks: Stand der Technik und Simulation,“ Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2018.
- S. Amberg, „Recherche und Implementierung eines Quellcodegenerators für die Automatisierte Entwicklung von Embedded Steuergeräten,“ Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2018.
- C. Heckel, „Adaptive Versuchsplanung (Design of Experiments) in der Batteriemodellierung,“ Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2017.
- A. Helbing, „Entwicklung eines Optimierungsverfahrens zur Parametrierung eines nichtlinearen Zustandsschätzers,“ Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2017.
- T. Martin, „Black Box Ansätze und künstliche neuronale Netze in der Batteriesimulation,“ Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2016.
- L. Michels, „Dimensionierung elektrischer Antriebsstrangkomponenten unter Berücksichtigung der Überlastfähigkeit,“ Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2017.
- V. Scharl, „Modellierung der inneren Temperaturverteilung von Lithium-Ionen-Zellen innerhalb eines Batteriepacks,“ Semesterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technische Universität München, Garching bei München, 2018.

Anhang

A	Parametrierung der Systemmodelle	xxix
A.1	Elektrische Zellparameter Panasonic NCR18650PF	xxix
A.2	Thermische Zellparameter Panasonic NCR18650PF	xxxii
A.3	Skalierung der Zellparameter auf andere Zellgrößen	xxxii
A.4	Batteriesystem	xxxii
A.5	Kühlfluid	xxxiii
A.6	Batteriethermomanagementsystem	xxxiii
A.7	Fahrzeugthermomanagementsystem	xxxiv
A.8	Batteriemodell für VTMS-Simulation	xxxiv
A.9	Fahrzeuge	xxxiv
B	Sonstige Parameter	xxxv
B.1	Eingangsparameter Auslegungsalgorithmus	xxxv
B.2	Parameter für Streuungen im Vorversuch	xxxv
C	Analyse der Thermomanagementstrategie unterschiedlicher Fahrzeugklassen	xxxvii

A Parametrierung der Systemmodelle

An dieser Stelle werden die in den Simulationsmodellen verwendeten Parametersätze aufgeführt, sofern diese nicht bereits im Hauptteil der Arbeit vorgestellt wurden. Die Parameter entsprechen denen der open-source Veröffentlichungen [87, 121, 152], weshalb für eine vollständige Übersicht auf diese verweisen sei.

A.1 Elektrische Zellparameter Panasonic NCR18650PF

Tabelle A.1: Statische elektrische Zellparameter Panasonic NCR18650PF (für 2RC und 4RC ECM)

Parameter	Einheit	Wert
C_A	Ah	27.762
$U_{OCV}(SOC)$	V	[3.071, 3.168, 3.237, 3.287, 3.317, 3.326, 3.333, 3.339, 3.346, 3.352, 3.360, 3.407, 3.460, 3.504, 3.537, 3.560, 3.581, 3.601, 3.621, 3.645, 3.672, 3.707, 3.767, 3.806, 3.840, 3.872, 3.904, 3.938, 3.978, 4.024, 4.068, 4.086, 4.103, 4.122, 4.148, 4.184]
$U_{Hysterese}(SOC)$	V	[0, 0.0139, 0.0165, 0.0207, 0.0196, 0.0154, 0.01449, 0.0144, 0.0144, 0.0156, 0.0186, 0.0265, 0.0270, 0.0307, 0.0202, 0.0156, 0.0144, 0.0144, 0.0148, 0.0162, 0.0173, 0.0171, 0.0167, 0.0148, 0.0135, 0.0120, 0.0112, 0.0116, 0.0122, 0.0116, 0.0095, 0.0080, 0.0066, 0.0062, 0.0040, -0.0013]
SOC (Stützstellen)	–	[-1.355e-05, 0.0099, 0.0199, 0.0299, 0.0399, 0.0499, 0.0599, 0.0699, 0.0799, 0.0899, 0.0999, 0.1399, 0.1799, 0.2199, 0.2599, 0.2999, 0.3399, 0.3799, 0.4199, 0.4599, 0.4999, 0.5399, 0.5799, 0.6199, 0.6599, 0.6999, 0.7399, 0.7799, 0.8199, 0.8599, 0.8999, 0.9199, 0.9399, 0.9599, 0.9799, 0.9999]
$\beta_{Hysterese}$	$\frac{1}{C}$	0.0040

Tabelle A.2: Dynamische elektrische Zellparameter Panasonic NCR18650PF (2RC ECM)

Parameter	Einheit	Wert
SOC (Stützstellen)	–	[0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1]
T_{Zelle} (Stützstellen)	°C	[25, 25.01]
C-Rate (Stützstellen)	$\frac{1}{h}$	[-1, 1]
$R_i(SOC, T, C-Rate(1))$	Ω	[0.0367, 0.0367; 0.0367, 0.0367; 0.0354, 0.0354; 0.0341, 0.0341; 0.0333, 0.0333; 0.0331, 0.0331; 0.0335, 0.0335; 0.0338, 0.0338; 0.0342, 0.0342; 0.0357, 0.0357; 0.0378, 0.0378]
$R_i(SOC, T, C-Rate(2))$	Ω	[0.0367, 0.0367; 0.0367, 0.0367; 0.0354, 0.0354; 0.0341, 0.0341; 0.0333, 0.0333; 0.0331, 0.0331; 0.0335, 0.0335; 0.0338, 0.0338; 0.0342, 0.0342; 0.0357, 0.0357; 0.0378, 0.0378]

A Parametrierung der Systemmodelle

Tabelle A.3: Dynamische elektrische Zellparameter Panasonic NCR18650PF (2RC ECM) (Fortsetzung)

Parameter	Einheit	Wert
$R_1(SOC, T, C-Rate(1))$	Ω	[0.0687, 0.0687; 0.0687, 0.0687; 0.0082, 0.0082; 0.0064, 0.0064; 0.0060, 0.0060; 0.0058, 0.0058; 0.0081, 0.0081; 0.0070, 0.0070; 0.0067, 0.0067; 0.0074, 0.0074; 0.0104, 0.0104]
$R_1(SOC, T, C-Rate(2))$	Ω	[0.0247, 0.0247; 0.0185, 0.0185; 0.0055, 0.0055; 0.0057, 0.0057; 0.0068, 0.0068; 0.0064, 0.0064; 0.0054, 0.0054; 0.0061, 0.0061; 0.0069, 0.0069; 0.0073, 0.0073; 0.0073, 0.0073]
$C_1(SOC, T, C-Rate(1))$	F	[25.0281, 25.0281; 25.0281, 25.0281; 133.5712, 133.5712; 866.5248, 866.5248; 974.5801, 974.5801; 844.8680, 844.8680; 464.4790, 464.4790; 326.3482, 326.3482; 316.9075, 316.9075; 264.6779, 264.6779; 31.0652, 31.0652]
$C_1(SOC, T, C-Rate(2))$	F	[8.6434, 8.6434; 14.2581, 14.2581; 151.3793, 151.3793; 699.0738, 699.0738; 627.9772, 627.9772; 447.8736, 447.8736; 564.4758, 564.4758; 696.1366, 696.1366; 725.6156, 725.6156; 566.7524, 566.7524; 566.7524, 566.7524]
$R_2(SOC, T, C-Rate(1))$	Ω	[0.0378, 0.0378; 0.0378, 0.0378; 0.0264, 0.0264; 0.0324, 0.0324; 0.0258, 0.0258; 0.0217, 0.0217; 0.0702, 0.0702; 0.0465, 0.0465; 0.0340, 0.0340; 0.0272, 0.0272; 0.0314, 0.0314]
$R_2(SOC, T, C-Rate(2))$	Ω	[0.0463, 0.0463; 0.0387, 0.0387; 0.0234, 0.0234; 0.0214, 0.0214; 0.0300, 0.0300; 0.0444, 0.0444; 0.0224, 0.0224; 0.0235, 0.0235; 0.0266, 0.0266; 0.0284, 0.0284; 0.0284, 0.0284]
$C_2(SOC, T, C-Rate(1))$	F	$1.0e+03 * [1.1468, 1.1468; 1.1468, 1.1468; 2.1554, 2.1554; 2.8817, 2.8817; 3.0931, 3.0931; 3.0275, 3.0275; 1.7824, 1.7824; 1.4993, 1.4993; 1.5003, 1.5003; 1.6233, 1.6233; 1.5135, 1.5135]$
$C_2(SOC, T, C-Rate(2))$	F	$1.0e+03 * [0.9235, 0.9235; 1.5083, 1.5083; 2.1673, 2.1673; 2.5922, 2.5922; 2.1471, 2.1471; 1.6285, 1.6285; 2.4171, 2.4171; 2.5815, 2.5815; 2.6393, 2.6393; 2.5251, 2.5251; 2.5251, 2.5251]$

Tabelle A.4: Dynamische elektrische Zellparameter Panasonic NCR18650PF (4RC ECM)

Parameter	Einheit	Wert
SOC (Stützstellen)	–	[0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1]
T_{zelle} (Stützstellen)	$^{\circ}C$	[8, 25]
C-Rate (Stützstellen)	$\frac{1}{h}$	[-1, 1]
$R_i(SOC, T, C-Rate(1))$	Ω	[0.0336, 0.0276; 0.0327, 0.0270; 0.0329, 0.0269; 0.0325, 0.0264; 0.0316, 0.0267; 0.0321, 0.0267; 0.0322, 0.0266; 0.0313, 0.0264; 0.0310, 0.0265; 0.0314, 0.0265; 0.0323, 0.0269]
$R_i(SOC, T, C-Rate(2))$	Ω	[0.0336, 0.0270; 0.0327, 0.0266; 0.0328, 0.0262; 0.0331, 0.0260; 0.0322, 0.0265; 0.0323, 0.0267; 0.0319, 0.0263; 0.0306, 0.0262; 0.0296, 0.0263; 0.0308, 0.0263; 0.0331, 0.0274]
$R_1(SOC, T, C-Rate(1))$	Ω	[0.0809, 0.0384; 0.0488, 0.0070; 0.0144, 0.0086; 0.0138, 0.0117; 0.0142, 0.0116; 0.0139, 0.0124; 0.0158, 0.0144; 0.0179, 0.0153; 0.0174, 0.0165; 0.0178, 0.0190; 0.0824, 0.0104]
$R_1(SOC, T, C-Rate(2))$	Ω	[0.0606, 0.0114; 0.0141, 0.0132; 0.0148, 0.0149; 0.0138, 0.0125; 0.0142, 0.0114; 0.0140, 0.0124; 0.0159, 0.0141; 0.0156, 0.0146; 0.0152, 0.0171; 0.0208, 0.0092; 0.1398, 0.0531]

Tabelle A.5: Dynamische elektrische Zellparameter Panasonic NCR18650PF (4RC ECM) (Fortsetzung)

Parameter	Einheit	Wert
$C_1(SOC, T, C-Rate(1))$	F	[18.0926, 9.8847; 8.2046, 3.0882; 1.7540, 4.0155; 1.6156, 3.7877; 1.5662, 3.7977; 1.7534, 3.8970; 1.9544, 3.8427; 2.0137, 3.7957; 1.8522, 3.6634; 2.1181, 3.8848; 4.1953, 4.3649]
$C_1(SOC, T, C-Rate(2))$	F	[5.1490, 3.5865; 2.0588, 4.7394; 1.9654, 4.0151; 1.9254, 3.3260; 1.8172, 3.3068; 1.8527, 3.7181; 1.9125, 3.4053; 1.5730, 3.3045; 1.2931, 3.5994; 3.2454, 3.3277; 5.9292, 6.5527]
$R_2(SOC, T, C-Rate(1))$	Ω	[5.1490, 3.5865; 2.0588, 4.7394; 1.9654, 4.0151; 1.9254, 3.3260; 1.8172, 3.3068; 1.8527, 3.7181; 1.9125, 3.4053; 1.5730, 3.3045; 1.2931, 3.5994; 3.2454, 3.3277; 5.9292, 6.5527]
$R_2(SOC, T, C-Rate(2))$	Ω	[0.0421, 0.0292; 0.0399, 0.0204; 0.0367, 0.0086; 0.0312, 0.0054; 0.0272, 0.0035; 0.0263, 0.0022; 0.0289, 0.0037; 0.0327, 0.0038; 0.0381, 0.0046; 0.0631, 0.0250; 0.0800, 0.0390]
$C_2(SOC, T, C-Rate(1))$	F	[74.4372, 238.6698; 33.9596, 17.6206; 12.8724, 16.3202; 11.2940, 36.5875; 11.0092, 79.3451; 11.1295, 179.4617; 10.8831, 186.3843; 10.3008, 176.6293; 9.2723, 91.8098; 8.3443, 31.0587; 279.8934, 7.8265]
$C_2(SOC, T, C-Rate(2))$	F	[317.7359, 13.7487; 9.9269, 17.6321; 9.7265, 40.1035; 9.7899, 49.0592; 10.1713, 82.6627; 10.1896, 252.4711; 10.0647, 176.2893; 8.2615, 130.4090; 7.3982, 112.3067; 7.7775, 9.4266; 28.4385, 22.5914]
$R_3(SOC, T, C-Rate(1))$	Ω	[1.5544, 0.3454; 0.0800, 0.0531; 0.0361, 0.0081; 0.0100, 0.0055; 0.0065, 0.0053; 0.0063, 0.0058; 0.0094, 0.0078; 0.0111, 0.0075; 0.0110, 0.0078; 0.0144, 0.0105; 0.0713, 0.0190]
$R_3(SOC, T, C-Rate(2))$	Ω	[0.0295, 0.0258; 0.0262, 0.0146; 0.0124, 0.0079; 0.0082, 0.0060; 0.0071, 0.0054; 0.0068, 0.0058; 0.0118, 0.0084; 0.0094, 0.0076; 0.0088, 0.0078; 0.0177, 0.0085; 0.0486, 0.0242]
$C_3(SOC, T, C-Rate(1))$	F	$1.0e+03 * [0.0471, 0.0365; 0.4208, 0.0636; 0.1014,$ $0.4299; 0.3908, 1.0627; 0.7833, 1.2359; 0.9757, 1.2755;$ $0.9745, 1.1617; 0.6956, 0.9913; 0.6612, 0.8830; 0.5541,$ $0.7619; 0.8153, 0.6656]$
$C_3(SOC, T, C-Rate(2))$	F	$1.0e+03 * [4.1711, 0.4331; 0.4539, 0.7149; 0.8239,$ $1.2403; 1.2179, 1.3494; 1.3301, 1.3647; 1.2696, 1.3875;$ $0.9367, 1.2553; 1.1380, 1.3081; 0.8902, 1.1417; 0.3329,$ $0.5585; 0.1804, 0.3973]$
$R_4(SOC, T, C-Rate(1))$	Ω	[0.0793, 0.0596; 0.0452, 0.0493; 0.0550, 0.0378; 0.0561, 0.0347; 0.0500, 0.0302; 0.0465, 0.0275; 0.0811, 0.0625; 0.0821, 0.0466; 0.0697, 0.0400; 0.0777, 0.0431; 0.6244, 0.0956]
$R_4(SOC, T, C-Rate(2))$	Ω	[0.1688, 0.0779; 0.0873, 0.0520; 0.0655, 0.0360; 0.0582, 0.0273; 0.0491, 0.0230; 0.0433, 0.0235; 0.0755, 0.0519; 0.0713, 0.0399; 0.0670, 0.0378; 0.0825, 0.0449; 0.1956, 0.1145]
$C_4(SOC, T, C-Rate(2))$	F	$1.0e+03 * [0.9235, 0.5601; 1.4821, 1.0207; 1.1290,$ $1.4927; 1.2074, 1.7759; 1.2969, 1.9672; 1.3280, 2.0790;$ $1.1297, 1.5058; 0.9259, 1.3508; 0.9579, 1.3450; 0.9143,$ $1.3474; 3.2427, 1.2382]$
$C_4(SOC, T, C-Rate(2))$	F	$1.0e+03 * [0.7301, 1.1698; 1.2515, 1.8374; 1.3427,$ $2.0009; 1.4624, 2.0342; 1.5380, 2.0759; 1.4949, 2.2259;$ $1.2055, 1.8080; 1.2928, 1.9991; 1.1178, 1.7938; 0.9821,$ $1.2558; 0.6691, 0.9424]$

A.2 Thermische Zellparameter Panasonic NCR18650PF

Tabelle A.6: Thermische Zellparameter Panasonic NCR18650PF

Parameter	Einheit	Wert
m	kg	0.0048
$\frac{\partial U_{OCV}}{\partial T_{Zelle}}$	$\frac{mV}{K}$	0.0001
c	$\frac{J}{kgK}$	700
A	m^2	$(2 * ((18^2) / 4) * \pi + 18 * \pi * 65) * 10^{-6}$

A.3 Skalierung der Zellparameter auf andere Zellgrößen

Vorgehen zur Skalierung der statischen und dynamischen ECM Parameter einer Referenzzelle mit der Kapazität $C_{A,Ref}$ auf eine Zelle mit der Kapazität $C_{A,Ziel}$. Hierdurch wird eine unmittelbare Vergleichbarkeit der Zellgröße, ohne etwaige Einflüsse durch spezifische Eigenschaften einzelner Zellchemien, oder Herstellungsprozesse unterschiedlicher Hersteller erreicht.

Berechnung des Skalierungsfaktors ζ :

$$\zeta = \frac{C_{A,Ref}}{C_{A,Ziel}} \quad (A.1)$$

Skalierung des Innenwiderstandes R_i :

$$R_{i,Ziel} = R_{i,Ref} \zeta \quad (A.2)$$

Skalierung der Widerstände der RC-Glieder R_n :

$$R_{n,Ziel} = R_{n,Ref} \zeta \quad (A.3)$$

Skalierung der Kapazitäten der RC-Glieder C_n :

$$C_{n,Ziel} = \frac{C_{A,Ref}}{\zeta} \quad (A.4)$$

Die OCV-Kurve bleibt unverändert.

A.4 Batteriesystem

Tabelle A.7: Parameter des Zell-Balancings von Batteriesystemen

Parameter	Einheit	Wert
R_{Bal}	Ω	33
ΔU_{Bal}	V	0.05
$U_{Bal,Limit}$	V	3.8
$I_{Bal,Limit}$	A	0.5*p

Tabelle A.8: Wärmeleitung zwischen Zellen und Modulen in Batteriesystemen

Parameter	Einheit	Wert
α_x	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$	1000
α_y	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$	1000
α_z	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$	1000
α_{mod}	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$	100
α_{∞}	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$	0

A.5 Kühlfluid

Tabelle A.9: Parameter des Kühlfluids für die BTMS Auslegung

Parameter	Einheit	Wert
$T_{\text{Fluid, in}}$	$^{\circ}\text{C}$	20
\dot{V}	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	0.0045
p_{ref}	Pa	101325
Fluidtyp	–	'INCOMP : : MEG-50%' (Wasser mit 50 % Ethylenglykol)

Die resultierenden Fluidparameter werden anhand der obenstehenden Angaben mittels der Software *CoolProp* [124] berechnet und sind daher an dieser Stelle nicht abgedruckt. Für den korrekten Funktionsaufruf von *CoolProp* siehe https://github.com/TUMFTM/sim_BTMS/blob/master/simulation_framework/functions_BTMS_sim/get_fluid_params_coolprop.m.

Ein analoges Vorgehen ergibt sich für die VTMS Auslegung. Siehe hierzu https://github.com/TUMFTM/sim_VTMS/tree/master/simulation_framework/03_VTMS_architectures.

A.6 Batterithermomanagementsystem

Tabelle A.10: Allgemeine Parameter der BTMS Kühlkanäle

Parameter	Einheit	Wert
$d_{\text{KK, Wand}}$	m	0.003
$l_{\text{KK, ratio, Sys}}$	–	0.95
$l_{\text{KK, ratio, Zelle}}$	–	0.90
$\lambda_{\text{KK, Wand}}$	$\frac{\text{W}}{\text{mK}}$	236
d_{Wand}	m	0.00015

Die Definitionsparameter der unterschiedlichen BTMS-Konfigurationen werden aufgrund des hohen Umfangs an dieser Stelle nicht abgedruckt.

Siehe https://github.com/TUMFTM/sim_BTMS/tree/master/simulation_framework/input_and_parameters/03_BTMS_config.

A.7 Fahrzeugthermomagementsystem

Nicht abgedruckt aufgrund des hohen Umfangs.

Siehe https://github.com/TUMFTM/sim_VTMS/tree/master/simulation_framework/03_VTMS_architectures.

A.8 Batteriemodell für VTMS-Simulation

Verwendung der Zellparameter für einen ECM mit 2RC-Gliedern einer Panasonic NCR18650PF Zelle (Anhang A.1) und Skalierung des Zellstromes und der Spannung anhand der angegebenen Verschaltung.

Siehe https://github.com/TUMFTM/sim_VTMS/tree/master/simulation_framework

A.9 Fahrzeuge

Nicht abgedruckt aufgrund des hohen Umfangs.

Siehe https://github.com/TUMFTM/sim_VTMS/tree/master/simulation_framework/01_vehicles.

B Sonstige Parameter

B.1 Eingangsparmeter Auslegungsalgorithmus

Nicht abgedruckt aufgrund des hohen Umfangs.

Siehe https://github.com/TUMFTM/sim_BTMS/tree/master/simulation_framework/input_and_parameters/04_system_specifications.

B.2 Parameter für Streuungen im Vorversuch

Verwendetes Zellmodell: Panasonic NCR18650PF, 4RC (siehe Anhang A.1)

Tabelle B.1: Angenommene Standardabweichungen der ECM Zellparameter (nicht aufgeführte Werten haben eine Standardabweichung von Null)

Parameter	Einheit	Wert
σ_{C_A}	–	0.0079
σ_{R_i}	–	0.0361

Tabelle B.2: Ergebnisse der einzelnen Simulationsdurchläufe [1, 2, ...] (zufällige Parameterzuweisung anhand der Normalverteilung). Verwendetes Lastprofil: DST. Start-SOC: 94 %, End-SOC: 30 %. Max. C-Rate auf Zellebene: 1,5.

Ergebnisvariable	Einheit	Wert
I_grad_CA_25	A	[0.066154241561890, 0.063400745391846, 0.046457052230835, 0.059226274490356, 0.066942691802979, 0.066675186157227, 0.062142133712769, 0.067127227783203, 0.051581859588623, 0.053690671920776]
I_grad_CA_5	A	[0.029323816299438, 0.038955688476563, 0.012435674667358, 0.040997028350830, 0.037535429000854, 0.031285047531128, 0.045205831527710, 0.034264564514160, 0.027972698211670, 0.049654006958008]
I_grad_Ri_25	A	[0.312085986137390, 0.345305025577545, 0.389443397521973, 0.317571759223938, 0.329201340675354, 0.246001482009888, 0.237945377826691, 0.413391113281250, 0.408861458301544, 0.338623821735382]
I_grad_Ri_5	A	[0.087760806083679, 0.218614578247070, 0.140195369720459, 0.332320094108582, 0.101288199424744, 0.209747433662415, 0.193171977996826, 0.115368962287903, 0.175272405147553, 0.145587921142578]
SOC_grad_CA_25	–	[0.007072716951370, 0.006824970245361, 0.004927873611450, 0.006328165531158, 0.007021278142929, 0.007163316011429, 0.006775021553040, 0.007203549146652, 0.005590766668320, 0.005800068378448]

B Sonstige Parameter

Tabelle B.3: Ergebnisse der einzelnen Simulationsdurchläufe [1, 2, ...] (zufällige Parameterzuweisung anhand der Normalverteilung). Verwendetes Lastprofil: DST. Start-SOC: 94 %, End-SOC: 30 %. Max. C-Rate auf Zellebene: $1,5 \frac{1}{h}$. (Fortsetzung)

Ergebnisvariable	Einheit	Wert
SOC_grad_CA_5	–	[0.003123998641968, 0.004196316003799, 0.001353412866592, 0.004429191350937, 0.003961503505707, 0.003494024276733, 0.004828661680222, 0.003768205642700, 0.003017574548721, 0.005320906639099]
SOC_grad_Ri_25	–	[0.002122581005096, 0.002354800701141, 0.002621293067932, 0.002171695232391, 0.002220064401627, 0.001663684844971, 0.001594185829163, 0.002783328294754, 0.002744406461716, 0.002320706844330]
SOC_grad_Ri_5	–	[6.124675273895264e-04, 0.001471132040024, 9.772479534149170e-04, 0.002241313457489, 6.987750530242920e-04, 0.001436620950699, 0.001312583684921, 7.655620574951172e-04, 0.001172304153442, 0.001020550727844]

C Analyse der Thermomanagementstrategie in unterschiedlichen Fahrzeugklassen

Tabelle C.1: Betrachtete Fahrzeuge für die Analyse der Thermomanagementstrategie [104, S. xv-xix]
 Legende der Fahrzeugklasse: 1 = Kleinst-/Kleinwagen; 2 = Kompakt-/Mittelklasse; 3 = Mittel-/Oberklasse

Modell	Klasse	Elektrische Höchstgeschw. in km/h	Elektrische Reichweite in km	Modellstart	Basispreis in €
BMW i3 (60 Ah)	1	150	190	2013	34950
BMW i3 (94 Ah)	1	150	300	2017	36800
BMW i3s (95 Ah)	1	160	280	2019	41150
Chevrolet Spark	1	164	193	2014	24366
Chevrolet Bolt	2	146	500	2016	33227
Citroen C-Zero	1	130	130	2015	17850
Ford Focus Electric (bis 2017)	2	137	162	2013	34900
Ford Focus Electric (ab 2017)	2	137	225	2017	34900
Hyundai Ioniq Electro	2	165	280	2016	24800
Jaguar I-Pace	2	200	480	2018	78240
Kia Soul EV (bis 2016)	1	145	212	2014	28890
Kia Soul EV (ab 2017)	1	145	250	2017	31390
Mitsubishi iMieV	1	130	160	2010	29300
Nissan Leaf (24 kWh)	2	144	199	2013	32385
Nissan Leaf Acenta (30 kWh)	2	144	200	2015	34385
Nissan Leaf (40 kWh)	2	144	378	2018	31950
Nissan e-NV200 Evalia	2	123	200	2018	41850
Opel Ampera-e	2	150	520	2017	39330
Peugeot iOn	1	130	150	2016	21800
Renault Zoe R90	1	135	403	2016	35000
Renault Zoe Q90	1	135	370	2016	35000
Renault Zoe R240	1	135	240	2013	23300
Renault Fluence Z.E.	2	135	185	2012	25950
Renault Twizy Life 45	1	45	100	2015	6950
Renault Twizy 80	1	80	90	2015	8700
smart EQ fortwo electric drive	1	130	160	2017	22600
smart forfour electric drive	1	130	150	2017	22600
Tesla Model S 70D	3	230	470	2012	88200
Tesla Model S 75D	3	230	490	2016	71019
Tesla Model S 90D	3	249	550	2016	103320
Tesla Model S 100D	3	249	632	2017	108420
Tesla Model S P100D	3	249	613	2016	145420
Tesla Model X 75D	3	210	417	2016	95300
Tesla Model X 90D	3	250	489	2016	113300
Tesla Model X P90D	3	250	467	2016	131300
Tesla Model X 100D	3	250	565	2017	115000
Tesla Model X P100D	3	250	542	2017	156900
Tesla Model 3	2	225	499	2018	65000

C Analyse der Thermomanagementstrategie unterschiedlicher Fahrzeugklassen

Tabelle C.2: Betrachtete Fahrzeuge für die Analyse der Thermomanagementstrategie [104, S. xv-xix]
 Legende der Fahrzeugklasse: 1 = Klein-/Kleinwagen; 2 = Kompakt-/Mittelklasse; 3 = Mittel-/Oberklasse (Fortsetzung)

Modell	Klasse	Elektrische Höchstgeschw. in km/h	Elektrische Reichweite in km	Modellstart	Basispreis in €
Volkswagen e-up!	1	130	160	2016	22975
Volkswagen e-Golf (bis 2016)	2	140	190	2014	34900
Volkswagen e-Golf (ab 2017)	2	150	300	2017	35900
Volvo C30 Electric	2	125	163	2011	24300
Fiat 500e	1	141	140	2013	19900

Tabelle C.3: Verwendete BTMS Technologie der Referenzfahrzeuge [104, S. xix-xxiii]

Modell	Zelltyp	Kapazität Batteriesystem in kWh	BTMS-Maßnahmen	Kühlmedium
BMW i3 (60 Ah)	Prismatisch	18,8	akt. Flüssigkeit	Kältemittel
BMW i3 (94 Ah)	Prismatisch	27,2	akt. Flüssigkeit	Kältemittel
BMW i3s (95 Ah)	Prismatisch	27,2	akt. Flüssigkeit	Kältemittel
Chevrolet Spark	Pouch	19,0	akt. Flüssigkeit	Kühlmittel
Chevrolet Bolt	Pouch	60,0	akt. Flüssigkeit	Kühlmittel
Citroen C-Zero	Prismatisch	14,5	semi-akt. Luft	Luft
Ford Focus Electric (bis 2017)	Prismatisch	23,0	akt. Flüssigkeit	n/a
Ford Focus Electric (ab 2017)	Prismatisch	33,4	akt. Flüssigkeit	n/a
Hyundai Ioniq Electro	Pouch	28,0	aktiv Luft	Luft
Jaguar I-Pace	Pouch	90,0	akt. Flüssigkeit	n/a
Kia Soul EV (bis 2016)	Pouch	27,0	aktiv Luft	Luft
Kia Soul EV (ab 2017)	Pouch	30,0	aktiv Luft	Luft
Mitsubishi iMieV	Prismatisch	16,0	semi-akt. Luft	Luft
Nissan Leaf (24 kWh)	Pouch	24,0	passiv Luft	Luft
Nissan Leaf Acenta (30 kWh)	Pouch	30,0	passiv Luft	Luft
Nissan Leaf (40 kWh)	Pouch	40,0	passiv Luft	Luft
Nissan e-NV200 Evalia	Pouch	40,0	aktiv Luft	Luft
Opel Ampera-e	Pouch	60,0	akt. Flüssigkeit	Kühlmittel
Peugeot iOn	Prismatisch	14,5	semi-akt. Luft	Luft
Renault Zoe R90	Pouch	41,0	aktiv Luft	Luft
Renault Zoe Q90	Pouch	41,0	aktiv Luft	Luft
Renault Zoe R240	Pouch	22,0	aktiv Luft	Luft
Renault Fluence Z.E.	Pouch	22,0	aktiv Luft	Luft
Renault Twizy Life 45	Pouch	5,8	passiv Luft	Luft
Renault Twizy 80	Pouch	6,1	passiv Luft	Luft
smart EQ fortwo electric drive	Pouch	17,6	akt. Flüssigkeit	n/a
smart forfour electric drive	Pouch	17,6	akt. Flüssigkeit	n/a
Tesla Model S 70D	Zylindrisch	70,0	akt. Flüssigkeit	Kühlmittel
Tesla Model S 75D	Zylindrisch	75,0	akt. Flüssigkeit	Kühlmittel
Tesla Model S 90D	Zylindrisch	90,0	akt. Flüssigkeit	Kühlmittel
Tesla Model S 100D	Zylindrisch	100,0	akt. Flüssigkeit	Kühlmittel
Tesla Model S P100D	Zylindrisch	100,0	akt. Flüssigkeit	Kühlmittel
Tesla Model X 75D	Zylindrisch	75,0	akt. Flüssigkeit	Kühlmittel
Tesla Model X 90D	Zylindrisch	90,0	akt. Flüssigkeit	Kühlmittel
Tesla Model X P90D	Zylindrisch	90,0	akt. Flüssigkeit	Kühlmittel
Tesla Model X 100D	Zylindrisch	100,0	akt. Flüssigkeit	Kühlmittel
Tesla Model X P100D	Zylindrisch	100,0	akt. Flüssigkeit	Kühlmittel
Tesla Model 3	Zylindrisch	80,5	akt. Flüssigkeit	Kühlmittel
Volkswagen e-up!	Prismatisch	18,7	passiv Luft	Luft
Volkswagen e-Golf (bis 2016)	Prismatisch	24,2	passiv Luft	Luft
Volkswagen e-Golf (ab 2017)	Prismatisch	35,8	passiv Luft	Luft
Volvo C30 Electric	n/a	24,0	akt. Flüssigkeit	n/a
Fiat 500e	Prismatisch	24,0	akt. Flüssigkeit	Kühlmittel