



**Diese Arbeit wurde vorgelegt am Lehrstuhl für Production Engineering of
E-Mobility Components (PEM) der RWTH Aachen.**

Bachelorarbeit

Name: Tobias Bernhard Robben

Matr.-Nr.: 345152

Thema: Simulative Untersuchung der Anwendbarkeit
von Tab-Kühlung auf Hochleistungsbatterie-
systeme

Betreuender Assistent: Hendrik Löbbberding M.Sc.

1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Günther Schuh

2. Prüfer: Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Heiner Hans Heimes

Aachen, den 14.08.2019

Inhalt und Ergebnis dieser Arbeit sind ausschließlich zum internen Gebrauch bestimmt. Alle Urheberrechte liegen bei der RWTH Aachen. Ohne ausdrückliche Genehmigung des betreuenden Lehrstuhls ist es nicht gestattet, diese Arbeit oder Teile daraus an Dritte weiterzugeben.

I Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis.....	i
II	Formelzeichen und Abkürzungen.....	iii
III	Abbildungsverzeichnis.....	v
IV	Tabellenverzeichnis.....	vii
1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Grundlagen und Stand der Technik	3
2.1	Lithium-Ionen-Zelltechnologie	3
2.1.1	Aufbau und Funktionsweise	3
2.1.2	Elektrisches Verhalten.....	6
2.1.3	Thermisches Verhalten	7
2.1.4	Alterung der Zelle	9
2.2	Elektrische Batteriesysteme	9
2.2.1	Bauweise von Energiespeichern	10
2.2.2	Batteriemanagementsystem (BMS)	11
2.2.3	Hochstromfähigkeit.....	11
2.3	Kühlsysteme für Energiespeicher.....	12
2.3.1	Kühlung auf Fahrzeugebene	12
2.3.2	Kühlung auf Zellebene	15
2.4	Grundlagen der Wärmeübertragung.....	20
2.4.1	Wärmeleitung	20
2.4.2	Konvektion	21
2.5	Fahr- und Lastzyklen.....	24
2.6	Batteriesimulation	24
2.6.1	Elektrochemische Modelle.....	25
2.6.2	Mathematische Modelle.....	26
2.6.3	Elektrische Modelle	26
3	Systemkonfiguration und Simulationsaufbau	28
3.1	Die Zelle.....	28
3.2	Das Modul.....	29
3.3	Gesamtsystem	30

3.3.1	Leistungssteuerung	30
3.3.2	Zellmodulmodell	31
3.3.3	Zellmodell.....	31
3.3.4	Kühlplatte	36
3.4	Simulationsziele und Simulationsablauf	36
3.4.1	Versuchsplan	37
4	Simulationsergebnisse und Diskussion	39
4.1	Konstante Leistungszuführung	39
4.2	Belastung durch Leistungsspitzen.....	40
4.3	Lastprofil des ISEA der RWTH Aachen	44
4.4	Wirkung der Tab-Kühlung	45
4.5	Sensitivitätsanalyse	47
5	Zusammenfassung und Ausblick	51
V	Literaturverzeichnis.....	53
VI	Anhang	59
VII	Erklärung.....	68

II Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
E_0	V	Open circuit voltage
$R_{internal}$	Ω	Innenwiderstand
c_p	$\frac{J}{kg * K}$	Spezifische Wärmekapazität
i_l	$\frac{A}{m^2}$	Lokale Stromdichte im Elektrolyten
i_s	$\frac{A}{m^2}$	Lokale Stromdichte im Aktivmaterial
j_n	$\frac{A}{m^2}$	Lokaler Ladungstransport
S_a	$\frac{1}{m}$	Spezifische Oberfläche
T	K	Temperatur
\dot{Q}	W	Wärmestrom
δ	mm	Dicke der Wand
Φ_l	V	Feststoff Potential
Φ_s	V	Elektrolyt Potential
η	V	Lokales Oberflächen Überpotential
λ	$\frac{W}{cm * K}$	Wärmeleitkoeffizient

Abkürzung	Beschreibung
BEV	Battery electric vehicle
BMS	Batteriemanagementsystem
BoL	Begin of Life
CAN	Controller area network
CSC	Cell supervision circuit
DOD	Depth of Discharge
EoL	End of Life
HEV	Hybrid electric vehicle

Abkürzung	Beschreibung
HiT-Cell	High temperature Cell (Forschungsprojekt des PEM der RWTH Aachen)
LFP	Lithiumeisenphosphat
MEET	Münster Electrochemical Energy Technologies
NCA	Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid
NMC	Nickel-Kobalt-Mangan
OCV	Open circuit voltage
PKW	Personenkraftwagen
SOC	State of Charge
SOH	State of Health
PCM	Phase changing material

III Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1 Aufbau Lithium-Ionen-Zelle	3
Abbildung 2.2 Verlauf der Open Circuit Voltage.....	6
Abbildung 2.3 Aufbau eines Batteriepacks	10
Abbildung 2.4 Fahrzeugkühlsystem	12
Abbildung 2.5 Zellkühlung	15
Abbildung 2.6 Zwischenzellkühlung Tesla	16
Abbildung 2.7 Temperatur nach Entladung.....	18
Abbildung 2.8 Homogenitätsunterschied Oberflächen-, Tab-Kühlung.....	19
Abbildung 2.9 Wärmeleitung Ebene Wand	21
Abbildung 2.10 Konvektion Platte	22
Abbildung 2.11 WLTP-Zyklus	24
Abbildung 2.12 Simulationsmodell - Teilmodelle.....	25
Abbildung 2.13 Einfaches Batteriemodell und R-RC-Modell'	27
Abbildung 3.1 Modul Geometrie	30
Abbildung 3.2 Zellmodulmodell.....	31
Abbildung 3.3 Zellmodell	33
Abbildung 3.4 Kühlplatte.....	36
Abbildung 3.5 Lastzyklus des ISEA der RWTH Aachen.....	38
Abbildung 4.1 Leistungsniveaus bei konstanter Temperatur (a), Wärmeentwicklung einer Zelle (b)	39
Abbildung 4.2 Peakbelastung Entladung 20°C-60°C (a), 40°C-60°C (b).....	41
Abbildung 4.3 Abkühlung nach Belastung	42

Abbildung 4.4 Peakbelastung Ladung 20°C-60°C (a), 40°C-60°C (b)	43
Abbildung 4.5 Temperaturverlauf im Lastzyklus mit Starttemperatur 20°C(a) und 40°C(b) ...	45
Abbildung 4.6 Temperaturvergleich adiabat und mit Kühlung: Konstant 8kW (a), Peak 30kW (b)	46
Abbildung 4.7 Sensitivitätsanalyse zur Optimierung	47
Abbildung 4.8 Variation der thermischen Zellwärmeleitung: Zellinnentemperatur(a), Temperaturdifferenz der Tabs(b)	48
Abbildung 4.9 Variation der Wärmestromaufteilung	49
Abbildung 5.1 Gesamtsystem in AMESim	59
Abbildung 5.2 Parallele Zellen in AMESim.....	60
Abbildung 5.3 Zellmodell in AMESim	60
Abbildung 5.4 Innenwiderstandskennfeld	61
Abbildung 5.5 Totale Wärmeentstehung.....	62
Abbildung 5.6 SOC Entladen.....	62
Abbildung 5.7 SOC Laden	63
Abbildung 5.8 Temperaturverlauf Lastprofil mit Temperaturunterschied der Tabs; Reduktion des thermischen Zellinnenwiderstand auf 10%; 65,4% Wärmestrom an der Kathode...	63
Abbildung 5.9 8kW adiabat bei verschiedenen Temperaturen	64
Abbildung 5.10 Wärmeentwicklung einer Zelle	64
Abbildung 5.11 Wärmeentwicklung in einem Tab bei 30kW	65

IV Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1 Bauformen	5
Tabelle 2.2 Temperaturspektrum Lithium-Ionen-Zelle	8
Tabelle 2.3 Kapazität bei verschiedenen C-Raten am Anfang und Ende der Zyklisierung	20
Tabelle 3.1 Modulauslegung.....	29
Tabelle 3.2 Aufteilung der Zellmassen.....	35
Tabelle 3.3 Auszug Versuchsplan	37
Tabelle 5.1 Thermischer Zellinnenwiderstand	65
Tabelle 5.2 Simulationsparameter	66

1 Einleitung und Zielsetzung

Seit Bekanntwerden der massenhaften Manipulationen von Diesel-PKW durch mehrere Hersteller steht insbesondere die deutsche Automobilindustrie international in der Kritik. Die öffentliche Diskussion ist geprägt durch die Debatte um neue Vorschriften zum Umweltschutz in Großstädten sowie der Verschärfung von CO₂ und NO_x-Grenzwerten. Auch die Forderung nach alternativen Antriebskonzepten wird zunehmend größer, hier ist vor allem die Elektromobilität auf dem Vormarsch.

Hierfür sind verschiedene Ursachen maßgeblich, vor allem die politischen Umstände lassen eine klare Präferenz des elektrischen Antriebs als die anzustrebende Zukunftslösung erkennen:

Zunächst ist hier die Verschärfung der CO₂-Emissionierung von Neuwagen zu nennen. Ab dem Jahr 2021 ist ein mittlerer Grenzwert der Fahrzeugflotte von 95 Gramm CO₂ pro km Fahrstrecke einzuhalten, dieser Wert ist technisch mit rein verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugen nicht zu schaffen¹. Ein Ausweg ist hier nur über die Elektrifizierung möglich.

Ein weiterer wichtiger Treiber sind lokalpolitische Vorgaben. Im europäischen Wirtschaftsraum ist Skandinavien als Vorreiter zu sehen, hier ist durch Subventionen ein elektrisch angetriebenes Auto günstiger als eines mit Verbrennungsmotor. So liegt schon heute der Anteil an Elektroautos in Norwegen bei annähernd 50%².

Die Automobilindustrie ist nun gefordert, Antworten auf diese neuen Rahmenbedingungen zu liefern. Ein Blick auf die branchenweit größte Ausstellermesse IAA im Jahr 2017 in Frankfurt zeigt, dass einzelne Hersteller bereits ihre Unternehmensstrategie auf eine elektrifizierte Zukunft ausgerichtet haben. BMW kündigte zwölf rein elektrisch betriebene Modelle sowie 25 hybridisierte Modelle im Jahr 2015 an, Volkswagen konterte mit der Vision, über 80 elektrifizierte Modelle anbieten zu wollen, davon allein 50 mit rein elektrischem Antrieb.

Das Fahren eines Fahrzeuges beinhaltet immer eine emotionale Komponente, welche den Kunden zum Kauf bewegt, oder eben nicht. Die spezielle Leistungsentfaltung von E-Maschinen ermöglicht die Konstruktion von dynamischen Fahrzeugen, welche sich durch hohe Beschleunigungswerte aus dem Stand sowie das lautlose Dahingleiten in der Stadt auszeichnen.

Beim Betrieb von elektrischen Energiespeichern entstehen Verluste, welche zu einer Erwärmung des Speichers führen. Um die Betriebstemperatur des Speichers in den zulässigen Grenzen zu halten, ist daher ein Kühlsystem notwendig, welches die Verlustwärme an die Umgebung abführt.

Heutige Batteriezellen erfordern für Hochleistungsanwendungen mit hohen spezifischen Leistungen eine besonders aufwändige Peripherie für das thermische Management. Ziel des öffentlich geförderten Forschungsprojektes HiT-Cell ist die Entwicklung einer Lithium-Ionen-

¹ Vgl. Koers (CO₂-Regulierung bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen).

² Vgl. manager magazin (Norwegens Elektroauto-Boom) 2018.

Zelle, welche eine maximal zulässige Betriebstemperatur von 60°C hat und deren Integration ins Gesamtsystem weniger Peripheriekomponenten und -komplexität erfordert. Außerdem soll diese Zelle sehr hohe spezifische Leistungen von bis zu 30C Entladung und 25C Ladung aushalten können. Durch die einfachere Kühlung sollen neue Anwendungsfelder erschlossen werden, bei denen eine leistungsfähige Kühlung aus technischer oder ökonomischer Sicht bislang nicht möglich war. Denkbar wäre die Integration in Hybride Fahrzeugsysteme. Denn in eben diesen ist die Unterbringung eines teuren Batteriesystems aus wirtschaftlichen Gründen nicht sinnvoll. Für Hybride Fahrzeugsysteme sind günstige Batteriesysteme mit hohen spezifischen Leistungen notwendig. HiT-Cell knüpft an diese Anforderung an, indem ein Batteriesystem mit einer Kapazität von ca. 1kWh entwickelt wird, welches jedoch fähig ist hohe Leistungen zu erbringen um gekoppelt mit einem Elektromotor z.B. einen Verbrennungsmotor beim Beschleunigen zu unterstützen. Ebenso kann durch die Unterbringung der Batterie die Bremsenergie mittels Rekuperation zurückgewonnen werden und im Batteriesystem gespeichert werden.

Die Verwendung von Tab-Kühlung soll im Rahmen des Projektes als mögliche Lösung zur Vereinfachung der Kühlung analysiert werden. Dabei werden im Gegensatz zur konventionellen Oberflächenkühlung nicht die Zelloberflächen gekühlt, sondern direkt die Zellelemente. Die Vorteile dieser Kühlmethode werden im weiteren Verlauf erklärt.

Um die Anwendbarkeit von Tab-Kühlung auf Batteriesysteme zu überprüfen, wurde in vorherigen Arbeiten bereits ein Simulationsmodell mit Hilfe der Simulationssoftware Siemens Simcenter AMESim erstellt. Dieses Modell soll innerhalb dieser Arbeit auf Hochleistungsanwendungen durch verschiedene Änderungen angepasst werden.

Für die Ausarbeitung dieser Arbeit sind diverse theoretische Grundlagen nötig, welche zu Beginn erläutert werden sollen. Dazu wird zunächst die Lithium-Ionen-Batterietechnologie zunächst auf Zellebene und anschließend auf Packebene erklärt. Zudem werden Kühlungskonzepte auf Zell- und Fahrzeugebene vorgestellt. Danach werden die Grundlagen der Wärmeübertragung erklärt und abschließend auf die Bedeutung von Lastzyklen und auf verschiedene Ansätze der Batteriesimulation eingegangen.

Nach der Erarbeitung der theoretischen Grundlagen werden zuerst die elektrischen Rahmenbedingungen des Zellmoduls definiert, welches den Anforderungen in z.B. Hybridanwendungen gerecht wird. Dazu wird ein Modul mit etwa 1kWh Kapazität und einer maximal zulässigen Systemspannung von 60V entwickelt. Danach wird das darauf basierende erarbeitete Simulationsmodell hinsichtlich Aufbaus und verwendeter Parameter erklärt. Um zu prüfen wo die Grenzen des Tab-Kühlungssystems liegen, wurde das Zellmodul mit verschiedenen konstanten und kurzen Spitzenleistungen belastet. Außerdem wurde das Simulationsmodell mit einem durch das ISEA der RWTH Aachen speziell für hohe spezifische Leistungen entwickelten Lastzyklus getestet. So soll festgestellt werden, wie sich das Kühlungssystem unter realitätsnahen Bedingungen verhält. Ebenso wird so überprüft welches zusätzliche Kühlungspotential in der Erhöhung der Betriebstemperatur liegt und ob der Kühlungsaufwand dadurch weiter abfällt.

Abschließend werden die aus der Simulation gewonnen Erkenntnisse dokumentiert und diskutiert.

2 Grundlagen und Stand der Technik

Zu Beginn dieser Arbeit werden die theoretischen Grundlagen erarbeitet, welche im weiteren Verlauf zur Anwendung kommen.

Zunächst wird die Technologie der Lithium-Ionen-Zellen erläutert. Anschließend wird ein Überblick über Aufbau und Funktionsweise von elektrischen Batteriesystemen gegeben, sowie die verschiedenen Möglichkeiten zur Kühlung der Energiespeicher sowohl auf Fahrzeugebene als auch auf Zellebene dargelegt. Weiterhin werden die Grundlagen der Wärmeübertragung im Allgemeinen erarbeitet. Danach werden gängige Fahr- und Lastzyklen vorgestellt. Abschließend wird auf die Theorie der Batteriesimulation eingegangen.

2.1 Lithium-Ionen-Zelltechnologie

Dieses Kapitel soll einen Überblick über die Technologie der Lithium-Ionen-Zelle geben sowie das elektrische und thermische Verhalten betrachten. Zuletzt werden Alterungsmechanismen erläutert.

2.1.1 Aufbau und Funktionsweise

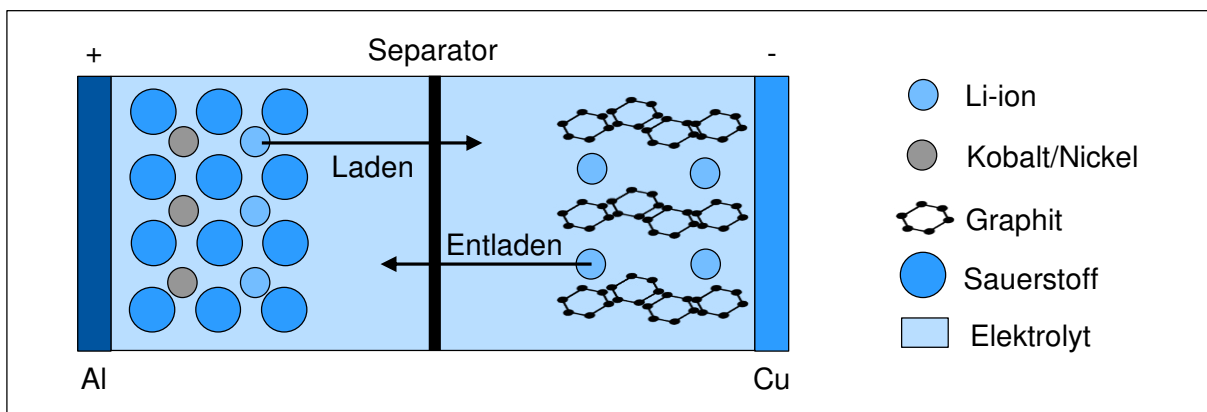


Abbildung 2.1 Aufbau Lithium-Ionen-Zelle³

Wie in Abbildung 2.1 zu sehen ist, bestehen Lithium-Ionen-Zellen prinzipiell aus zwei Elektroden, welche durch einen mit Elektrolyt durchsetzten Separator getrennt werden. Ausgehend von den elektrischen Zuständen beim Entladevorgang wird die negativ geladene Elektrode als Anode und die positiv geladene Elektrode als Kathode bezeichnet.

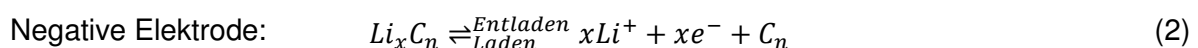
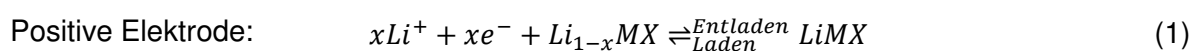
Beim Entladen und Laden wandern die Lithium-Ionen zwischen den beiden Elektroden hin und her. Beim Entladen werden die Lithium-Ionen aus der negativen Elektrode (Anode) ausgelagert und die dabei freiwerdenden Elektronen über den Zelleiter abgeführt. Die Elektronen fließen dann über einen Verbraucher zur positiven Elektrode (Kathode). Gleichzeitig wandern

³ Eigene Darstellung in Anlehnung an Vgl. Goodenough et al. (Basic Research Needs for Electrical Energy Storage) 2007, S. 11

die Lithium-Ionen durch den Elektrolyten und den porösen Separator ebenfalls zur positiven Elektrode und lagern sich im Aktivmaterial der Elektrode ein. Beim Ladevorgang kehrt sich der Prozess entsprechend um. Die negative Elektrode wird zur Kathode und die positive Elektrode entsprechend zur Anode.⁴

In der Regel ist der Interkalationsprozess des Lithiums nahezu reversibel und es tritt kein Lithium-Plating auf⁵. Beim Lithium-Plating setzt sich reines Lithium an der Anode ab, was zur Reduzierung der Zellkapazität führt. Als Anodenmaterial kommt vor allem Graphit zum Einsatz, jedoch arbeitet die Forschung an alternativen Materialien, wie z.B. Lithium-Titanat oder Titan-Nioboxid. Diese Anoden eignen sich gut für hohe Leistungs- und Sicherheitsanforderungen, besitzen allerdings relativ geringe Energiedichten und sind sehr teuer⁶. Im Bereich der Elektrodenentwicklung schreitet die Forschung zurzeit schnell voran. Beispielsweise haben Toshiba und Sila Nanotechnologies durch Verwendung anderer Materialien und Umstrukturierung der Kristalle deutlich höhere Energiedichten erzielt^{7,8}. Das Kathodenmaterial besteht aus verschiedenen Metalloxiden, sehr verbreitet ist das Material Nickel-Mangan-Cobalt (NMC) in unterschiedlichen Massenanteilen der einzelnen Oxide. Der Entwicklungstrend geht in Richtung der Reduktion des kostenintensiven Rohstoffes Kobalt⁹. Ebenfalls weite Verbreitung finden die Typen Lithium-Cobaltoxid (LCO) bei High-Energy-Zellen und Lithium-Eisenphosphat (LiFePO₄) für preisgünstige und hochstromfähige Zellen. Der Separator besteht aus mikroporösem Polyolefin (z.B. PE/PP), welcher mit einem flüssigen Elektrolyten getränkt ist. Der Elektrolyt wird auf eine hohe elektrochemische Stabilität und eine hohe Dielektrizitätszahl ausgelegt. Die Trägerschichten zur Aufnahme des Kathoden- bzw. Anodenmaterials bestehen üblicherweise aus Aluminium- bzw. Kupferfolie.¹⁰

Der grundsätzliche Ablauf der elektrochemischen Speicherung von Energie in der Lithium-Ionen-Zelle ist durch einen reversiblen Einlagerungs- bzw. Auslagerungsprozess von Lithium-Ionen in das Elektrodenmaterial gekennzeichnet. Der Prozess lässt sich beispielhaft für eine Graphit-Anode über folgende Reaktionsgleichungen beschreiben:



⁴ Vgl. Leuthner (Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien) 2013, S. 14

⁵ Vgl. von Sacken U. et al. (Solid State Ionics) 1994 S. 284

⁶ Vgl. Wurm et al. (Anodenmaterialien für Lithium-Ionen- Batterien) 2013 S. 46-47,56-57

⁷ Vgl. ingenieur.de (Neue Anode soll Kapazität von Lithium-Ionen-Batterien verdoppeln).

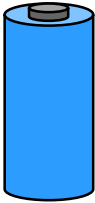
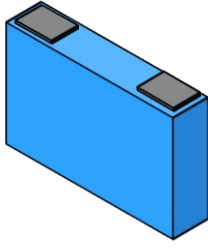
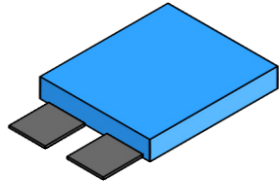
⁸ Vgl. Daimler AG (Li-Ionen-Batteriematerialien: Kooperation mit Sila Nanotechnologies).

⁹ Vgl. Chemistry World (Battery builders get the cobalt blues).

¹⁰ Vgl. Fleckenstein (Modellbasiertes Thermomanagement für Li-Ionen-Zellen in elektrischen Fahrzeuganwendungen) 2013.

Lithium-Ionen-Zellen besitzen zum heutigen Stand der Technik immer ein Gehäuse bzw. Verpackungsmaterial, welches metall-basiert ist. Dadurch wird verhindert, dass Feuchtigkeit in die Zelle eindringt, was zur Folge hätte, dass eine Hydrose des Leitsalzes LiPF₆ zu Flusssäure initiiert wird. Außerdem wird durch das Gehäuse verhindert, dass Lösemittel aus der Zelle austreten. Ein reines Kunststoff-basiertes Gehäuse ist nicht einsetzbar, da jeder Kunststoff Feuchtigkeit durchlässt und bestimmte organische Lösemittel hindurch diffundieren können. Gängige Materialien für Gehäuse sind Aluminium oder Edelstahl. Tabelle 2.1 zeigt die zum aktuellen Stand der Technik in der Automobilindustrie verwendeten Bauformen von Rundzellen, Pouchzellen und prismatischen Zellen. Für Pouchzellen kommen mehrlagige Aluminium-Verbundfolien zum Einsatz. Eine typische Filmsequenz ist beispielsweise: Polyamid (25µm)/Walzaluminium (40µm)/Polypropylen (50µm).¹¹

Tabelle 2.1 Bauformen¹²

Bauform	Zylindrisch	Prismatisch	Pouch
Abbildung			
Kapazität	2-6Ah	0,5-120Ah	2-80Ah
Spezifische Energiedichte	Hoch	Niedrig	Mittel
Vorteile	Hohe Sicherheit, hohe Verfügbarkeit, geringe Kosten	Einfache Montage	Einfache Montage, hohe Zyklenfestigkeit
Nachteile	Geringe spezifische Kühlfläche, komplizierte Montage	Geringe Standardisierung	Teuer

Die Kapazität der Zellen wächst stetig, so dass beispielsweise die volumetrische Energiedichte der prismatischen Zelle in acht Jahren um mehr als 50% gestiegen ist¹³.

¹¹ Vgl. Wöhrle (Lithium-Ionen-Zelle) 2013, S.111-112

¹² Vgl. Fraunhofer-Allianz Batterien (Entwicklungsperspektiven für Zellformate von Lithium-Ionen-Batterien in der Elektromobilität) S.10

¹³ Vgl. Fraunhofer-Allianz Batterien (Entwicklungsperspektiven für Zellformate von Lithium-Ionen-Batterien in der Elektromobilität) S.10

Die Bauform variiert je nach Hersteller, weil sich noch keine Bauform gegenüber den anderen endgültig durchgesetzt hat, denn alle sind durch ihre eigenen Vor- und Nachteile geprägt¹⁴. So setzt Tesla beispielsweise auf Rundzellen¹⁵. Im BMW i3 sind prismatische Zellen¹⁶ verbaut und im Audi e-tron Pouchzellen¹⁷.

2.1.2 Elektrisches Verhalten

Die in der Zelle gespeicherte elektrische Ladung wird über die Nennkapazität C definiert. Sie bezeichnet die verfügbare elektrische Ladungsmenge einer vollgeladenen Zelle in der Einheit Amperestunden (Ah). Als SOC wird das Verhältnis von aktueller Ladung zu Nennkapazität bezeichnet. SOH bezeichnet den Alterungszustand der Zelle.

Des Weiteren lassen sich die elektrischen Eigenschaften der Lithium-Ionen-Zelle über folgende charakteristische Spannungen beschreiben:

- Klemmenspannung: Die an den Zellpolen anliegende Spannung
- Ruhespannung, Leerlaufspannung OCV: Die Klemmenspannung bei unbelasteter Zelle

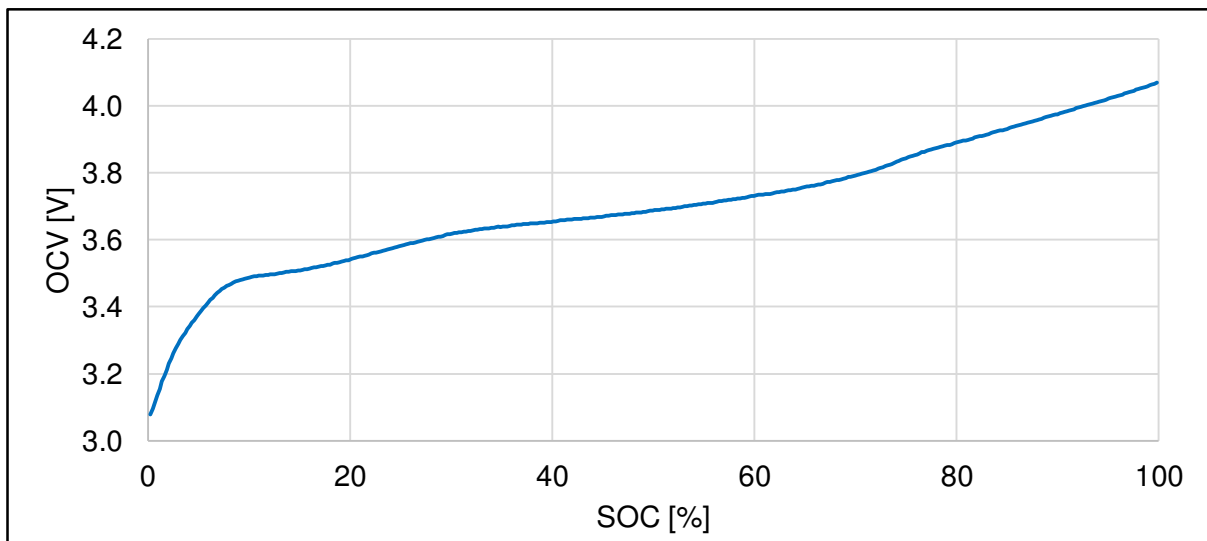


Abbildung 2.2 Verlauf der Open Circuit Voltage¹⁸

Die Leerlaufspannung ist der entscheidende Parameter zur Beschreibung des aktuellen Betriebszustandes der Zelle. Die OCV ist hauptsächlich abhängig vom aktuellen SOC der Zelle

¹⁴ Vgl. Sauer (Aktueller Entwicklungsstand von Lithium-Ionen-Batterien) 2018 S.16

¹⁵ Vgl. teslamag (Tesla: Batteriezellendesign ist „nicht eingefroren“) 2018.

¹⁶ Vgl. Edison Handelsblatt (Unternehmen baut BMW i3 mit 700 Kilometern Reichweite) 2018.

¹⁷ Vgl. Audi (Audi e-tron - Batterie und Sicherheit).

¹⁸ Vgl. Yu et al. (A Comparative Study on Open Circuit Voltage Models for Lithium-ion Batteries) 2018.

sowie der Zelltemperatur. Der SOH hat ebenfalls einen Einfluss auf die OCV, wenn auch einen geringeren als die zuvor genannten Parameter.

Abbildung 2.2 zeigt den Spannungsverlauf einer typischen Lithium-Ionen-Zelle mit NMC-Chemie über den SOC. Die Spannung ist über den gesamten SOC nicht konstant, sondern nimmt mit zunehmender Entladung ab. Typische Lithium-Ionen-Zellen haben eine Nennspannung von 3,6V bei einer maximalen Ladeschlussspannung von 4,2V und einer minimalen Entladeschlussspannung von 2,5V. Stärkere Entladung führt zu irreversiblen Schäden, welche Kapazitätsverlust und erhöhte Selbstentladung zur Folge haben. Überspannung stellt ein Sicherheitsrisiko dar, da sich dabei die Zellen spontan selbst entzünden können.¹⁹

Des Weiteren existiert in jeder Zelle ein physikalischer oder chemischer Innenwiderstand R_i . Er beeinflusst den Spannungswert, welcher der Spannungsquelle wirklich entnehmbar ist. Im Wesentlichen wird der Innenwiderstand aus dem Widerstand gebildet, den der Elektrolyt den positiven Ionen bei der Bewegung entgegensetzt. Da bei zunehmender Entladung die Konzentration der Ionen abnimmt, wird der Innenwiderstand bei geringem SOC größer. Der Innenwiderstand ist stark abhängig von Zelltemperatur und SOC und weniger stark vom SOH.

2.1.3 Thermisches Verhalten

Der Betrieb von Lithium-Ionen-Zellen erfordert ein leistungsfähiges Thermomanagement um die hohen Anforderungen im mobilen Bereich von 10 Jahren Lebensdauer, sowie die volle Verfügbarkeit von Leistung und Kapazität in allen Umgebungsbedingungen erfüllen zu können. Die Leistungsfähigkeit der Lithium-Ionen-Zelle hängt signifikant von der Temperatur ab.²⁰

Die maßgeblichen Treiber für die Einstellung eines Temperaturniveaus in der Zelle sind die Entstehung von Wärme innerhalb der Zelle sowie der Wärmeaustausch mit der Umgebung. Die interne Wärmeentstehung wird hauptsächlich von den irreversiblen ohmschen Verlusten sowie von reversiblen Effekten aufgrund von Entropieänderung bestimmt.²¹

¹⁹ Vgl. Dorn et al. (Batteriemanagementsystem) 2013 S.177

²⁰ Vgl. Zeyen et al. (Thermisches Management der Batterie) 2013 S.165

²¹ Vgl. Fleckenstein (Modellbasiertes Thermomanagement für Li-Ionen-Zellen in elektrischen Fahrzeuganwendungen) 2013.

Tabelle 2.2 Temperaturspektrum Lithium-Ionen-Zelle²²

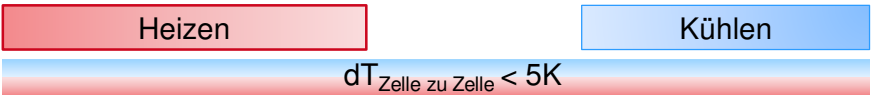
Betriebstemperatur	-20°C	0°C	20°C	40°C	60°C
Leistung & Verfügbarkeit	< 70% sehr hoher R_{zi}	90% hoher R_{zi}	100%		100% → 0% Abregelung
Lebensdauer:	Zellalterung beim Laden		Ideale Temperatur		Zellalterung → thermal runaway
Thermomanagement					

Tabelle 2.2 zeigt ein typisches Temperaturspektrum einer Lithium-Ionen-Zelle. Die optimale Betriebstemperatur von Lithium-Ionen-Zellen liegt zwischen 20-40°C. Bei Temperaturen darunter sinkt die Leistungsfähigkeit der Zelle, da sich der Innenwiderstand überproportional zur Temperatur erhöht. Dadurch entsteht ein Leistungsdefizit. Dieses Leistungsdefizit kann bis zu 30% der theoretischen Maximalleistung betragen. Außerdem kann es beim Laden der Zelle bei Temperaturen unter 0°C zum Lithium-Plating kommen. Im schlimmsten Fall kann es einen internen Kurzschluss zur Folge haben, wenn das Lithium sogenannte Dendrite bildet, die sich von der Anode bis zur Kathode erstrecken.²³

Bei Temperaturen oberhalb von 40°C treten vermehrt Alterungseffekte auf, denen die Arrhenius Gleichung zugrunde liegt. Nach dieser gilt für Lithium-Ionen-Zellen: Wird die Temperatur um 10K erhöht, halbiert sich die kalendarische Lebensdauer. Liegt die kalendarische Lebensdauer also bei 10 Jahren für eine Betriebstemperatur von 40°C, würde sich diese auf 5 Jahre bei 50°C Betriebstemperatur reduzieren. Wird die Betriebstemperatur noch weiter erhöht, kann es zur thermischen Zersetzung des Elektrolyten kommen.²⁴

Dadurch kommt es zur Entflammung der Zelle und zum sogenannten „thermal runaway“. Dabei wird nach Überschreiten einer Temperaturgrenze die Zelle sehr schnell sehr warm. Die Hitze löst weitere Reaktionen aus, so dass innerhalb kürzester Zeit Temperaturen von mehreren hundert Grad erreicht werden können. Je nach Zellchemie kann sich der Elektrolyt schon bei 60°C zersetzen und einen thermal runaway auslösen. Mögliche Ursachen sind ein interner oder externer Kurzschluss, aber auch zu hohe Lade- und Entladeströme.²⁵

Die Erhöhung der Betriebstemperatur hat jedoch nicht nur negative Effekte. Der Innenwiderstand der Zelle verringert sich mit steigender Temperatur. Diesen Vorteil macht sich die Zelle aus dem HiT-Cell Projekt zu Nutzen. Dies hat eine Erhöhung der verfügbaren Leistung zur

²² Vgl. Zeyen et al. (Thermisches Management der Batterie) 2013 S.166

²³ Vgl. Zeyen et al. (Thermisches Management der Batterie) 2013, S. 166

²⁴ Vgl. Zeyen et al. (Thermisches Management der Batterie) 2013, S. 166-167

²⁵ Vgl. Mangler (Li-Ion-Akkus: Wie lässt sich ein Thermal Runaway verhindern?).

Folge. Ebenso erhöht sich das Kühlungspotential durch den erhöhten Temperaturgradienten. Genauer wird dies in Kapitel 4.1 im Zuge der Simulationsauswertung betrachtet.

Abgesehen von der absoluten Temperatur ist es ebenso wichtig, dass die einzelnen Zellen eines Batteriesystems keine zu hohen Temperaturunterschiede aufweisen. Ein Temperaturdelta von 5K zwischen den Zellen sollte nicht überschritten werden²⁶. Im HiT-Cell-Projekt wird durch die verwendete Tab-Kühlung (siehe Kap. 2.3.2) eine sehr homogene Temperatur innerhalb der Zelle erreicht.

2.1.4 Alterung der Zelle

Zwar führt eine erhöhte Betriebstemperatur zu einer verstärkten Alterung der Zelle, doch auch im Normalbetrieb kommt es zu Alterungserscheinungen, welche Einfluss auf die elektrischen Zelleigenschaften haben. Die Lebensspanne einer Zelle wird über die Status „begin of life“ (BoL) und „end of life“ (EoL) definiert, eine andere gängige Definition ist der Parameter „state of health“ (SOH). Eine in der Fachliteratur oft verwendete Definition sieht die Festlegung des EoL-Zustandes auf den Abfall der Nennkapazität auf 80% des Startwerts bzw. eine Verdoppelung der Zellimpedanz vor.²⁷

Die Alterungsmechanismen werden nach zyklischer Alterung und kalendarischer Alterung unterschieden. Die zyklische Alterung beschreibt die Abnutzung der Zelle aufgrund des Ladungsdurchsatzes, die kalendarische Alterung gibt den SOH über Einsatzzeit (gemessen in Monaten oder Jahren) an.²⁸

Aufgrund der über Lebensdauer steigenden Impedanz erhöht sich bei gleicher Leistungsanforderung die Verlustleistung der Zelle, bei der Dimensionierung der Kühlung ist damit der EoL-Zustand der Zelle zu berücksichtigen.

2.2 Elektrische Batteriesysteme

Das nachstehende Kapitel behandelt elektrische Batteriesysteme als Gesamtsystem, wobei zuerst die Bauweise erläutert wird und anschließend kurz die Funktion des Batteriemanagementsystems erklärt wird. Abschließend wird auf die Hochvoltsicherheit eingegangen.

²⁶ Vgl. Al-Zareer et al. (Novel thermal management system using boiling cooling for high-powered lithium-ion battery packs for hybrid electric vehicles) 2017.

²⁷ Vgl. Paul (Analyse der Ausfallwahrscheinlichkeiten von Lithium-Ionen-Energiespeichern in elektrifizierten Fahrzeugen) 2015.

²⁸ Vgl. Paul (Analyse der Ausfallwahrscheinlichkeiten von Lithium-Ionen-Energiespeichern in elektrifizierten Fahrzeugen) 2015.

2.2.1 Bauweise von Energiespeichern

Abbildung 2.3 zeigt eine typische mechanische Konstruktion von Energiespeichern im automotive Bereich. Diese erfolgt üblicherweise in einem modularen Aufbau. Darunter versteht man die Kapselung einer bestimmten Anzahl an Zellen zusammen mit der Zellkontaktierung, der Sensorik und einem Anschluss ans Kühlsystem, z.B. in Form einer Kühlplatte, in einem Zellmodul. Die Module können dann zu größeren Speicheranordnungen kombiniert werden.

Die Spannung einzelner Zellen ist durch die chemischen Grundelemente sehr stark begrenzt, siehe Kap. 2.1.2. Deshalb werden einzelne Zellen zu Batterien seriell verschaltet, um so höhere Spannungen zu erzeugen. Um die Kapazität zu erhöhen, können die seriellen Stränge parallelgeschaltet werden.²⁹ Für Spannungen bis 60V (DC) gelten keine besonderen Sicherheitsmaßnahmen für den Zusammenbau der Module. Erst ab 60V (DC) sind die Bestimmungen der DGUV (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung) einzuhalten³⁰. Aus diesem Grund wird die maximale Spannung von 60V (DC) innerhalb der einzelnen Module meistens nicht überschritten. Um die notwendige Systemspannung zu erreichen, werden dann mehrere Module parallelgeschaltet.

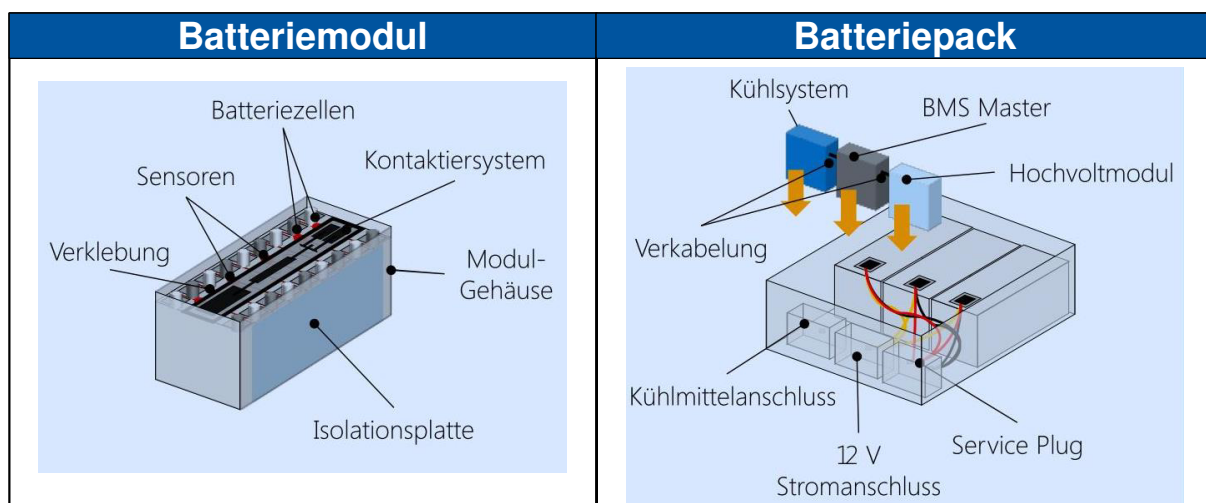


Abbildung 2.3 Aufbau eines Batteriepacks³¹

Elektrische Energiespeicher haben derzeit eine Spannung von bis zu 800V und eine Kapazität von mehr als 15kWh. Der Tesla Model S hat beispielsweise einen 100kWh Speicher mit einem Gewicht von über 400kg³². Die Größe der Batterie wird maßgeblich durch das Gewicht und den Bauraum beschränkt.³³

²⁹ Vgl. Sattler (Elektrische Sicherheit) 2013, S. 299

³⁰ Vgl. DGUV (Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltssystemen) S.9

³¹ Vgl. Kampker (Montageprozess Eines Batteriepacks) 2015 S.3

³² Vgl. ecomento (Tesla Model S).

³³ Vgl. Sattler (Elektrische Sicherheit) 2013, S. 300

2.2.2 Batteriemanagementsystem (BMS)

Das BMS ist das wichtigste Steuergerät des Energiespeichers und hat die Aufgabe die Funktionssicherheit der Batterie zu gewährleisten. Es besteht aus dem zentralen Steuergerät mit der Schnittstelle zum Fahrzeug (CAN-Bus), einem Stromsensor (Shunt) zur Messung des Lade- bzw. Entladestroms sowie den Zellüberwachungsschaltungen (CSC). Diese sind für die Messung der Zellspannungen und -temperaturen sowie den Ladungsausgleich zuständig. Des Weiteren übernimmt das BMS die Überwachung des Isolationszustandes des Hochvoltsystems gegenüber der Fahrzeugmasse, kontrolliert die Hauptschütze, um im Fehlerfall das Batteriesystem abzuschalten und steuert das Thermomanagement der Batterie.³⁴

2.2.3 Hochstromfähigkeit

Bei der Auslegung von Lithium-Ionen-Batterien entsteht ein Zielkonflikt zwischen spezifischer Energiedichte und spezifischer Leistung. Je nach Anwendungsfall schwankt dabei der Schwerpunkt der Auslegung. Bei Hochenergiezellen werden die Batterien auf hohe Kapazität, geringe Leistungsdichten und durchschnittliche Entladeströme ausgelegt. Diese erreichen Energiedichten von 120-200Wh/kg haben jedoch nur eine Leistungsdichte von 200-400W/kg. Hingegen finden sich in Hochleistungszellen Batterien geringe Energiedichten von 70-100Wh/kg, dafür aber hohe Leistungsdichten von bis zu 2000W/kg und kurzzeitig sehr hohe Lade- und Entladeströme. Erstere sind besonders wichtig für BEV, da so eine hohe Reichweite erzielt werden kann. Bei HEVs stehen eher kurze Leistungspulse im Vordergrund. Entladevorgänge kommen hier beim Anfahren und Beschleunigen vor, Ladevorgänge beim Bremsen durch Rekuperation. Hier kann es je nach Intensität der Beschleunigung/ Bremsung zu sehr hohen Strömen kommen. Die C-Rate ist der Kennwert für die Hochstromfähigkeit der Batterie, wobei diese unabhängig von der Kapazität die Größe der Lade- bzw. Entladeströme wiedergibt. C steht für die jeweiligen Ströme, die als Bruchteil, bzw. Vielfache der Nennkapazität angegeben werden. Wird also ein 1kWh Modul mit 20kW entladen, spricht man von einer C-Rate von 20C. Mit hohen Strömen geht auch eine hohe Wärmeentwicklung einher. Daher ist es für hochstromfähige Batteriesysteme wichtig, eine geeignete Zellchemie auszuwählen und eine ausreichende Kühlleistung, welche in kurzer Zeit hohe Energiemengen abführen kann, sicherzustellen.^{35,36}

³⁴ Vgl. Hofmann (Hybridfahrzeuge) 2014 S. 238-240

³⁵ Vgl. Rahimzei et al. (Kompendium: Li-Ionen-Batterien), S.18-19

³⁶ Vgl. Kampker et al. (Elektromobilität) 2013 S. 301

2.3 Kühlsysteme für Energiespeicher

Die Kühlung von Energiespeichern gliedert sich in zwei Ebenen. Die in der Batterie entstehende Wärme muss an die Umgebung abgegeben werden, doch zuvor muss die Wärme aus dem Zellinneren an den Kühlkreislauf übergeben werden. Dieses Kapitel befasst sich daher mit den verschiedenen Formen von Fahrzeugkühlkreisläufen und den Möglichkeiten der Kühlung auf Zellniveau.

2.3.1 Kühlung auf Fahrzeugebene

Zur Kühlung auf Fahrzeugebene gibt es drei Ansätze. Die Luftkühlung, Kühlung mit Kältemittel im Fahrzeugkreislauf integriert und Kältemittel im Sekundärkreislauf. Die verschiedenen Konzepte sind in Abbildung 2.4 dargestellt. Im Folgenden werden die einzelnen Konzepte vorgestellt.

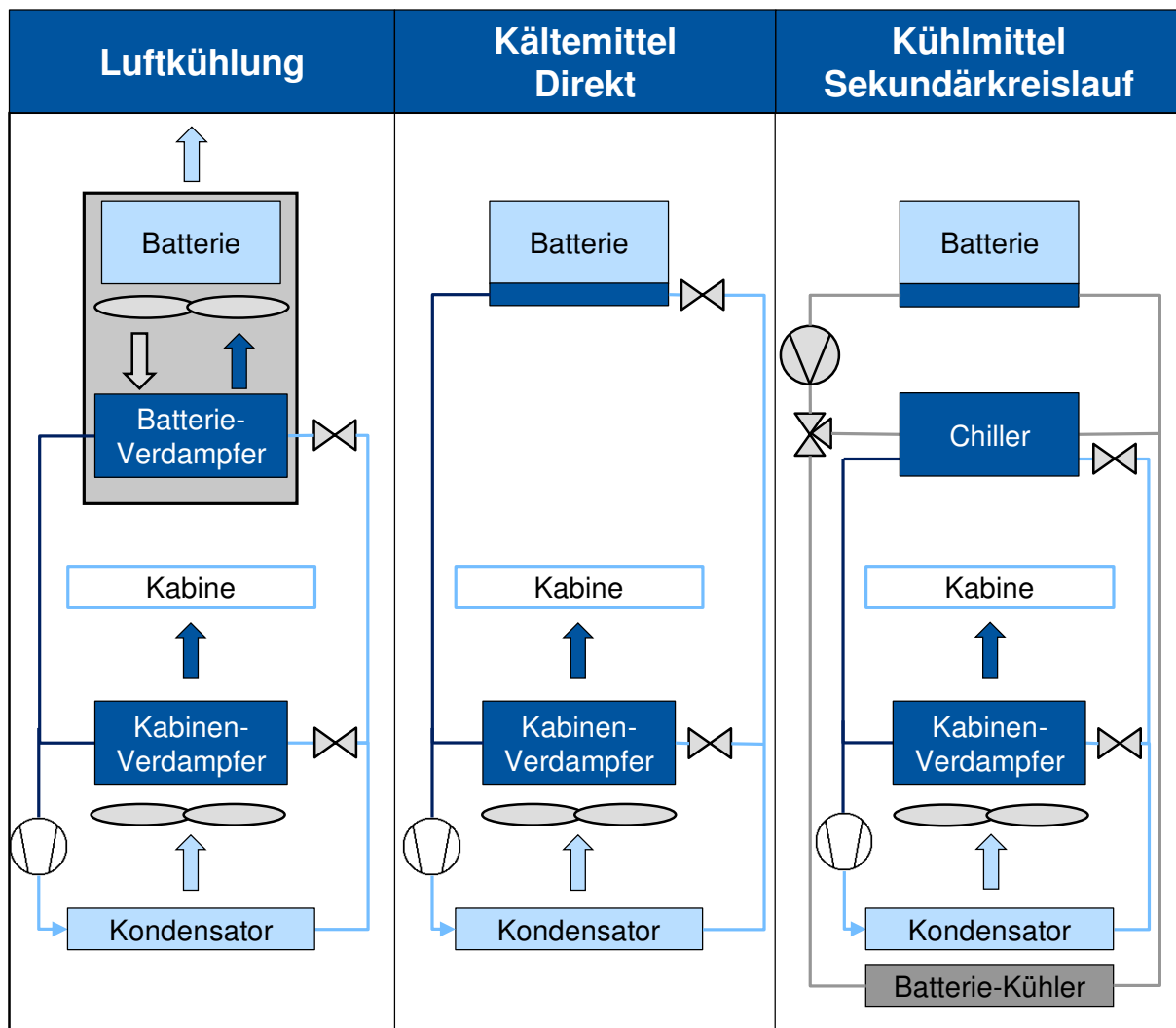


Abbildung 2.4 Fahrzeugkühlsystem

Luftkühlung

Aufgrund der einfachen technischen Umsetzung, geringen Kosten und geringem Wartungsaufwand ist die Luftkühlung die am weitesten verbreitetste Kühlungsvariante³⁷. Beispielsweise verfügen der Toyota Prius und der Honda Insight über Luft basierte Thermomanagementsysteme³⁸. Allerdings sind die Kühlkapazitäten der Luftkühlung stark begrenzt. Insbesondere bei hohen Leistungsanforderungen und beim Laden, stößt die Luftkühlung schnell an ihre Grenzen.

Die Luftkühlung arbeitet mit einem Gebläse, welches Luft, die durch einen Verdampfer, welcher im Kühlkreislauf des Fahrzeuges integriert ist, durch große Kühlkanäle entlang der Zellen bläst. Die warme Luft wird dann direkt an die Umgebung abgegeben. Je höher der Luftmassenstrom ist, desto effektiver ist auch die Kühlung³⁹. Jedoch stellt die homogene Temperaturverteilung eine große Herausforderung dar⁴⁰. Diese Methode ist zwar die günstigste Kühlungsvariante, weist aber einige Nachteile auf. Zum einen wird viel Platz für die großen Luftkanäle von und zur Batterie benötigt und zum anderen besteht ein Sicherheitsrisiko, da es eine direkte Verbindung über die Luftkanäle von der Batterie zur Kabine gibt. Dies sind die wichtigsten Nachteile der Luftkühlung. Neben diesen gibt es weitere Unwesentlichere, auf die nicht weiter eingegangen werden soll. Die Luftkühlung wird vorwiegend in Fahrzeugen mit genügend Bauraum eingesetzt, beispielsweise in Geländefahrzeugen.⁴¹

Direkte Kältemittelkühlung

Durch die in Fahrzeugen meist vorhandene Klimaanlage, wird das Kühlmittel über einen Wärmetauscher herunter gekühlt. Dies ist notwendig, da die Umgebungstemperatur je nach Region bedeutend höher sein kann als die maximale Betriebstemperatur der Zellen (vgl. Kap. 2.1.3). Dabei ist auch zu beachten, dass ein hinreichend großer Temperaturgradient für die Wärmeübertragung notwendig ist. Die Flüssigkeitskühlung ist deutlich leistungstärker als die Luftkühlung. Aus diesem Grund wird oft auf Flüssigkeitskühlung gesetzt⁴². Neben Wasser/Glykol Gemischen kann auch Öl zum Einsatz kommen. Allerdings ist die Kühlung mit Wasser

³⁷ Vgl. Ungurean et al. (Battery state of health estimation: a structured review of models, methods and commercial devices) 2017

³⁸ Vgl. Dincer et al. (Thermal Management of Electric Vehicle Battery Systems) 2017.

³⁹ Vgl. Li et al. (Parameter Study on Cooling System of Battery for HEV) S.2042

⁴⁰ Vgl. Bajura et al. (Journal of Fluids Engineering) 1976 S.656

⁴¹ Vgl. Zeyen et al. (Thermisches Management der Batterie) 2013 S.170

⁴² Vgl. Al-Zareer et al. (Novel thermal management system using boiling cooling for high-powered lithium-ion battery packs for hybrid electric vehicles) 2017, S.292

effizienter als mit Öl⁴³. Kommen die Batteriezellen direkt mit dem Kühlmittel in Berührung müssen nicht-leitende Materialien verwendet werden. Meistens wird dazu Öl oder Ethylen-Glykol verwendet⁴⁴.

Die direkte Kühlmittelkühlung stellt die kompakteste Variante der Kühlung dar. Dabei fungiert ein als Batteriekühlplatte konstruierter Verdampfer als Aufnahme des Wärmestroms der Zellen. Die Fahrzeugintegration gestaltet sich einfach, da nur zwei zusätzliche Kältemittelschläuche benötigt werden. Nachteilig ist, dass Batteriekühlung und Kabinenkühlung direkt voneinander abhängig sind, aber unterschiedliche Kühlungsanforderungen haben. Diese Abstimmung wird durch einen drehzalvariablen elektrischen Klimaprozessor vereinfacht. Kältemittelkreisläufe werden meistens in Fahrzeugen eingebaut, welche ein kompaktes Batteriekühlungssystem verlangen.⁴⁵

Kühlmittel mit Sekundärkreislauf

Diese Kühlmethode verfügt über zwei getrennte Kühlmittelkreisläufe, welche über einen Chiller gekoppelt sind. Dadurch ist dieses Konzept sehr flexibel in seiner Kühlleistung, muss aber auch über eine zusätzliche Pumpe und ausreichend viel Platz für den Chiller außerhalb der Batterie verfügen. Der Sekundärkreislauf ist üblicherweise mit einem Wasser/Glykol Gemisch gefüllt und der Primärkreislauf mit einem Kältemittel. Im Chiller wird das Kältemittel, durch Wärmeentzug des Kühlmittels aus dem Sekundärkreislauf verdampft. Dabei kühlt sich das Kühlmittel ab. Typische Temperaturen des Batteriekühlmittels liegen im Bereich zwischen 15-30°C⁴⁶.

In Elektroautos spielt die Energieeffizienz der Batteriekühlung eine große Rolle, damit die Reichweite nicht durch eine ineffiziente Kühlung reduziert wird. Deshalb befindet sich oft ein zusätzlicher Niedertemperaturkühler im Sekundärkreis. So kann bei hohen Umgebungstemperaturen die Batterie über den Chiller gekühlt werden und bei niedrigen Temperaturen die Energie zum Betrieb des Elektrokompessors gespart werden, wenn über den Niedrigtemperaturkühler gekühlt wird.⁴⁷

⁴³ Vgl. Deng et al. (Effects of different coolants and cooling strategies on the cooling performance of the power lithium ion battery system: A review) 2018 S.27

⁴⁴ Vgl. Tang et al. (Study on various types of cooling techniques applied to power battery thermal management systems) S.1572

⁴⁵ Vgl. Zeyen et al. (Thermisches Management der Batterie) 2013 S.171

⁴⁶ Vgl. Zeyen et al. (Thermisches Management der Batterie) 2013 S.171

⁴⁷ Vgl. Zeyen et al. (Thermisches Management der Batterie) 2013 S.171-172

2.3.2 Kühlung auf Zellebene

Auf Zellebene kann unter verschiedenen Konzepten unterschieden werden. Diese unterscheiden sich je nach gekühlter Fläche. Die zu nennenden Kühlungsvarianten sind:

- Oberflächenkühlung
 - Zellbodenkühlung
 - Zwischenzellkühlung
 - Immersionskühlung
- Tab-Kühlung

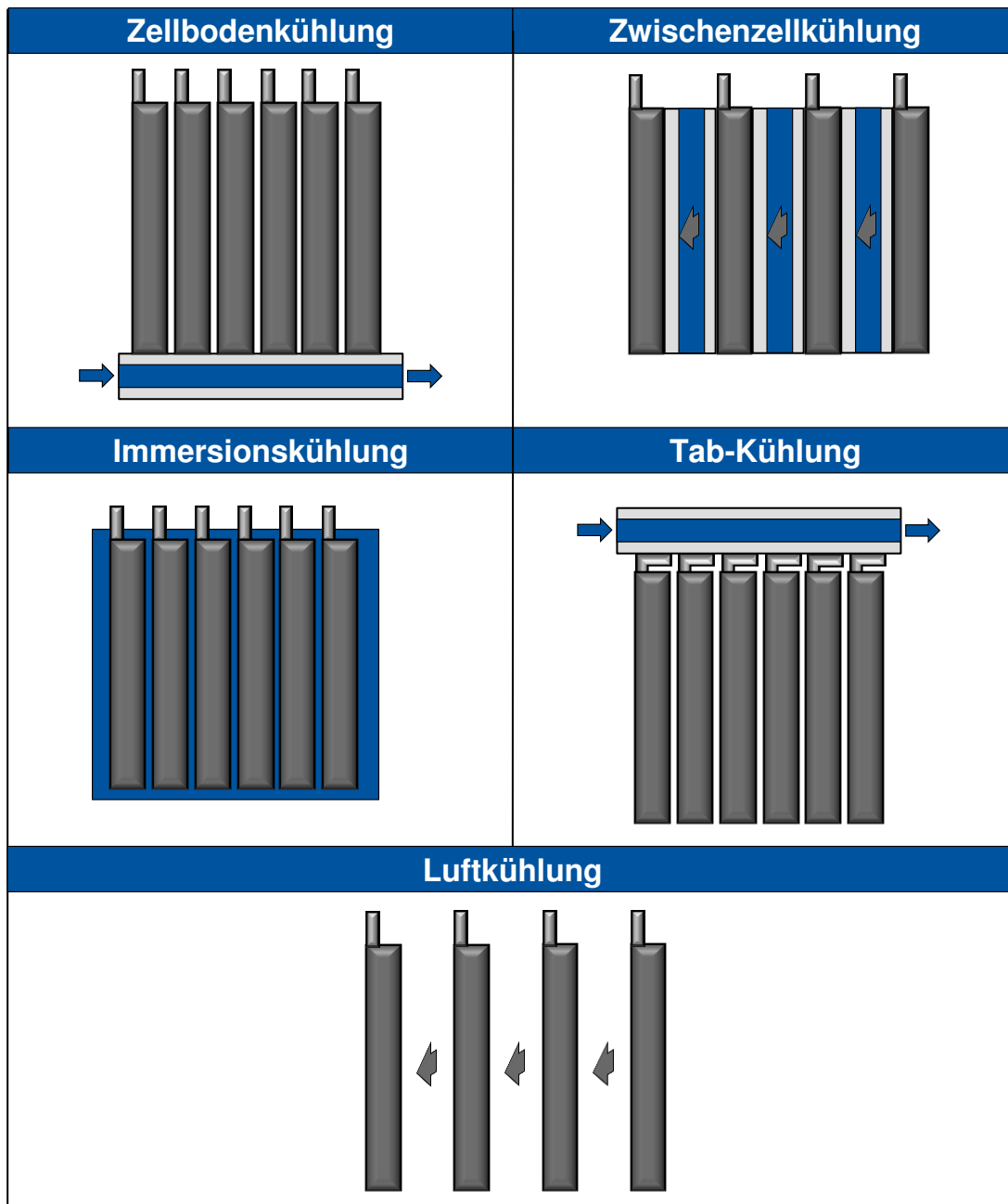


Abbildung 2.5 Zellkühlung

Oberflächenkühlung

Zellboden-, Zwischenzell- und Immersionskühlung unterscheiden sich durch die gekühlten Flächen, jedoch gehören sie alle zum Konzept der Oberflächenkühlung. Diese Kühlungskonzepte sind in Abbildung 2.5 grafisch dargestellt. Je nach notwendigem Kühlungsbedarf werden die Oberflächen ausgewählt. Die Leistungsstärke der Kühlung hängt maßgeblich von der Größe der Kühlfläche ab, aber auch von der Wahl des Kühlmediums. Grundsätzlich ist im Rahmen der Oberflächenkühlung die Zellbodenkühlung im Vergleich am ineffektivsten, die Zwischenzellkühlung effektiver und die Immersionskühlung am effektivsten. Jedoch steigen die Kosten und Komplexität der Kühlung mit der Effektivität.

Im Falle der Zellbodenkühlung werden die Zellen üblicherweise über eine Kühlplatte, die am Zellboden angebracht ist, gekühlt. Diese Fläche ist relativ klein, so dass vergleichsweise wenig Wärme abgeführt werden kann. Die Komplexität der Kühlplatte reicht von einem einfachen Blech, für Luftkühlung, bis hin zu Kühlmittel durchströmten Kühlern. Da die Kühlung auf der anderen Seite der Zelle wie die Stromabnehmer ist, besteht nur ein geringes Risiko, in Bezug auf die Sicherheit. Die Zellbodenkühlung wird aufgrund der geringen Kosten oft eingesetzt z.B. im Audi e-tron⁴⁸.

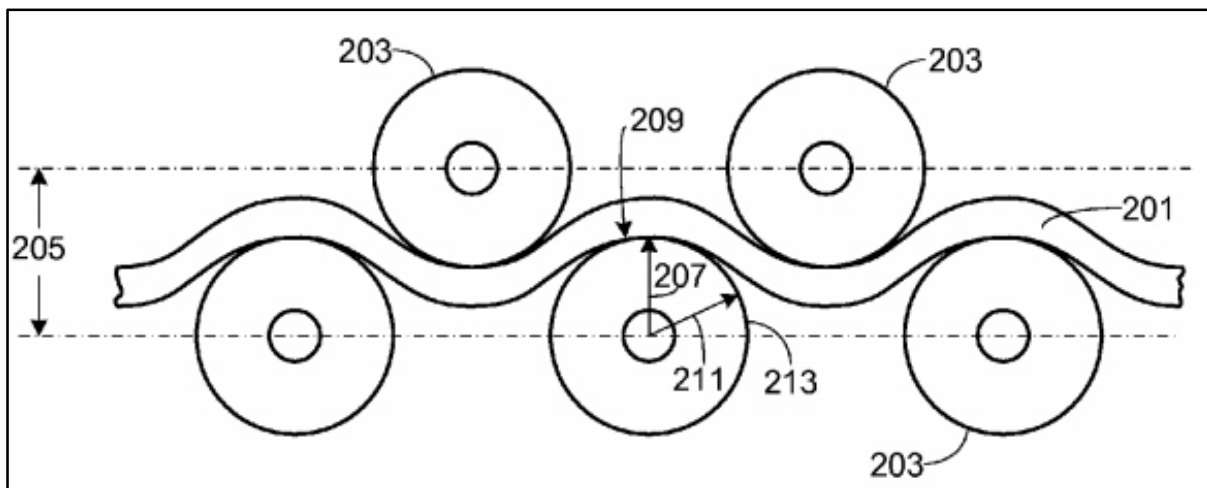


Abbildung 2.6 Zwischenzellkühlung Tesla⁴⁹

Die Zwischenzellkühlung ist deutlich effizienter als die Zellbodenkühlung, da diese die großen Seiten der Zellen kühlt. Dies ist technisch allerdings sehr viel aufwändiger, da die Zellen nicht einfach gestapelt und verpresst werden können⁵⁰, weil Platz für die Kühlkanäle bleiben muss.

⁴⁸ Vgl. electrive (Audi e-tron: Alle Details zu Ladetechnik und Batterie).

⁴⁹ Vgl. Tennessen et al. (Extruded and ripped thermal interface for use with a battery cooling system) S.3

⁵⁰ Vgl. Kampker (Montageprozess Eines Batteriepacks) 2015 S.5

Tesla hat ein Patent auf die Zwischenzellkühlung mit Rundzellen⁵¹, wobei die Zellen von einem flexiblen Kühlschlauch abwechselnd von der einen und der anderen Seite umwickelt werden (siehe Abbildung 2.6).

Eine weitere Form der Zwischenzellkühlung ist die Phase-Changing-Material-Kühlung (PCM-Kühlung). Die „Phase-Changing-Materials“ nutzen den Phasenübergang von fest zu flüssig, um die Wärme abzuführen. Durch die Abwärme der Zellen, wird das PCM geschmolzen. Durch die notwendige Schmelzenthalpie werden so die Zellen gekühlt⁵². Da die Wärmeleitfähigkeit der PCM-Kühlung noch sehr limitiert ist, wird diese Technik allerdings weniger genutzt und befindet sich noch in der Entwicklung⁵³. PCM Kühlungssysteme sind üblicherweise passive Systeme⁵⁴.

Werden die Zellen direkt in das Kühlmittel getaucht, spricht man von Immersionskühlung. Dabei werden alle Oberflächen der Zelle gekühlt, was dieses Konzept sehr effektiv macht. Allerdings ist die technische Umsetzung schwierig, da durch das Kühlmittel die Zellen nicht kurzgeschlossen werden dürfen. Diese Methode ist sehr aufwändig und teuer und wird deshalb in der Fahrzeugindustrie noch nicht in Serie eingesetzt.

Tab-Kühlung

Neben der Oberflächenkühlung besteht auch die Möglichkeit der Tab-Kühlung, bei der die Zelle direkt über die Stromabnehmer gekühlt wird. Grafisch ist dies in Abbildung 2.5 dargestellt. Die Tab-Kühlung weist eine Reihe von Vorteilen gegenüber der Oberflächenkühlung auf. Eine Lithium-Ionen-Zelle besteht aus vielen Schichten, die gestapelt sind. Wird die Zelle über die Oberfläche gekühlt, muss der Wärmestrom durch die Schichten hindurch. Die Tab-Kühlung leitet die Wärme jedoch parallel zu den Schichten über die Elektroden ab. Dabei ist der thermische Widerstand wesentlich kleiner, da es keine Kontaktwiderstände gibt, sondern nur den Wärmeleitwiderstand der Elektrodensheets.

⁵¹ Vgl. Tennessen et al. (Extruded and ripped thermal interface for use with a battery cooling system).

⁵² Vgl. Bai et al. (Thermal performance of pouch Lithium-ion battery module cooled by phase change materials) 2019.

⁵³ Vgl. Alshaer et al.

⁵⁴ Vgl. Xiaoming et al. (Research on the heat dissipation performance of lithium-ion cell with different operating conditions) 2017.

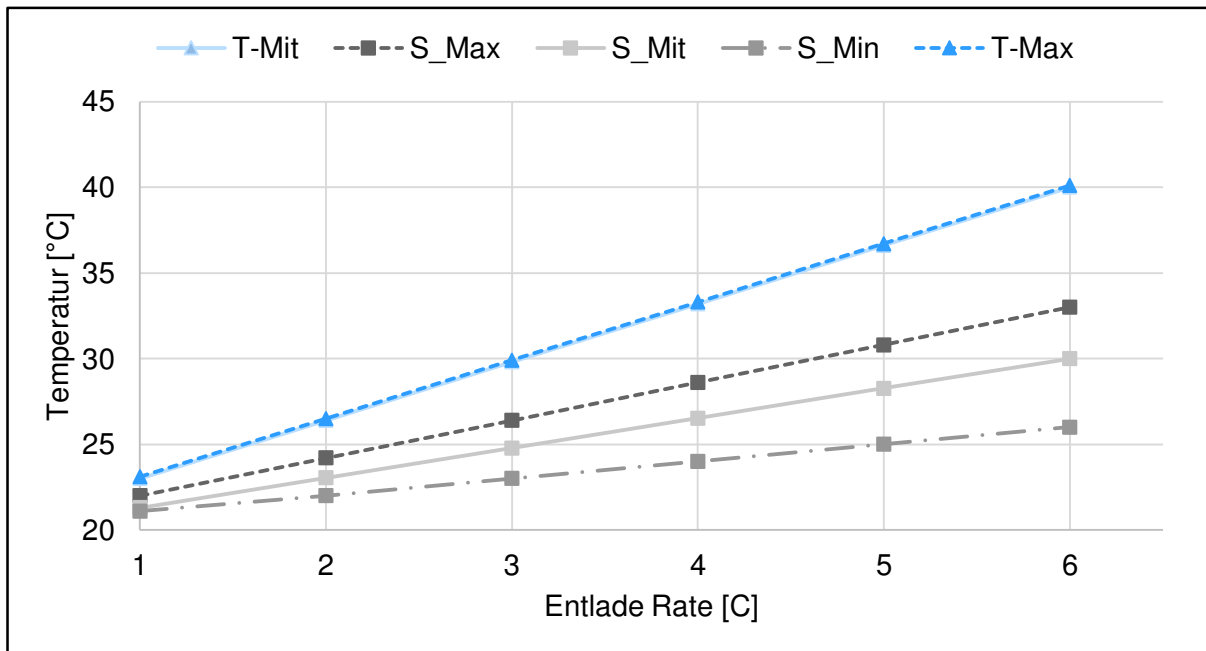


Abbildung 2.7 Temperatur nach Entladung⁵⁵

Weiterhin ist die Temperaturverteilung bei der Tab-Kühlung wesentlich homogener als bei der Oberflächenkühlung wie Abbildung 2.7 zeigt. Hierbei sieht man die großen Temperaturunterschiede innerhalb der oberflächengekühlten Zelle (S_{Max} , S_{mit} , S_{min}) und die nahezu homogene Temperatur der Tab-gekühlten Zelle (T_{max} , T_{mit}). Das hat zur Folge, dass die Wärmeabfuhr, der Stromfluss und der SOC ebenfalls homogener werden. Allerdings ist insgesamt die Temperatur im Falle der Tab-kühlung höher, da die Fläche der Tabs wesentlich kleiner ist, als die Oberfläche der Zelle.⁵⁶ Abbildung 2.8 zeigt die Homogenitätsunterschiede der Zellen mit unterschiedlichen Kühlmethoden. Die Zelle mit Oberflächenkühlung wurde in Abbildung 2.8 von der Unterseite gekühlt.

Um die Tab-Kühlung effizient zu gestalten muss sichergestellt werden, dass die Wärmewiderstände möglichst gering sind. Die notwendige Isolation des Kühlkreislaufes gegenüber dem den elektrischen Leitungen, wie zum Beispiel ein Gappad welches die Kühlplatte elektrisch von den Tabs trennt muss so gering wie möglich sein, da nicht-leitende Materialien meist aus Kunststoffen sind, welche im Allgemeinen schlechtere Wärmeleiteigenschaften haben als Metalle.⁵⁷

⁵⁵ Vgl. Zhao et al. (Modeling the Effects of Thermal Gradients Induced by Tab and Surface Cooling on Lithium Ion Cell Performance) 2018 S. A3176

⁵⁶ Vgl. Zhao et al. (Modeling the Effects of Thermal Gradients Induced by Tab and Surface Cooling on Lithium Ion Cell Performance) 2018 S. A3176

⁵⁷ Vgl. Worwood et al. (A new approach to the internal thermal management of cylindrical battery cells for automotive applications) 2017 S. 162

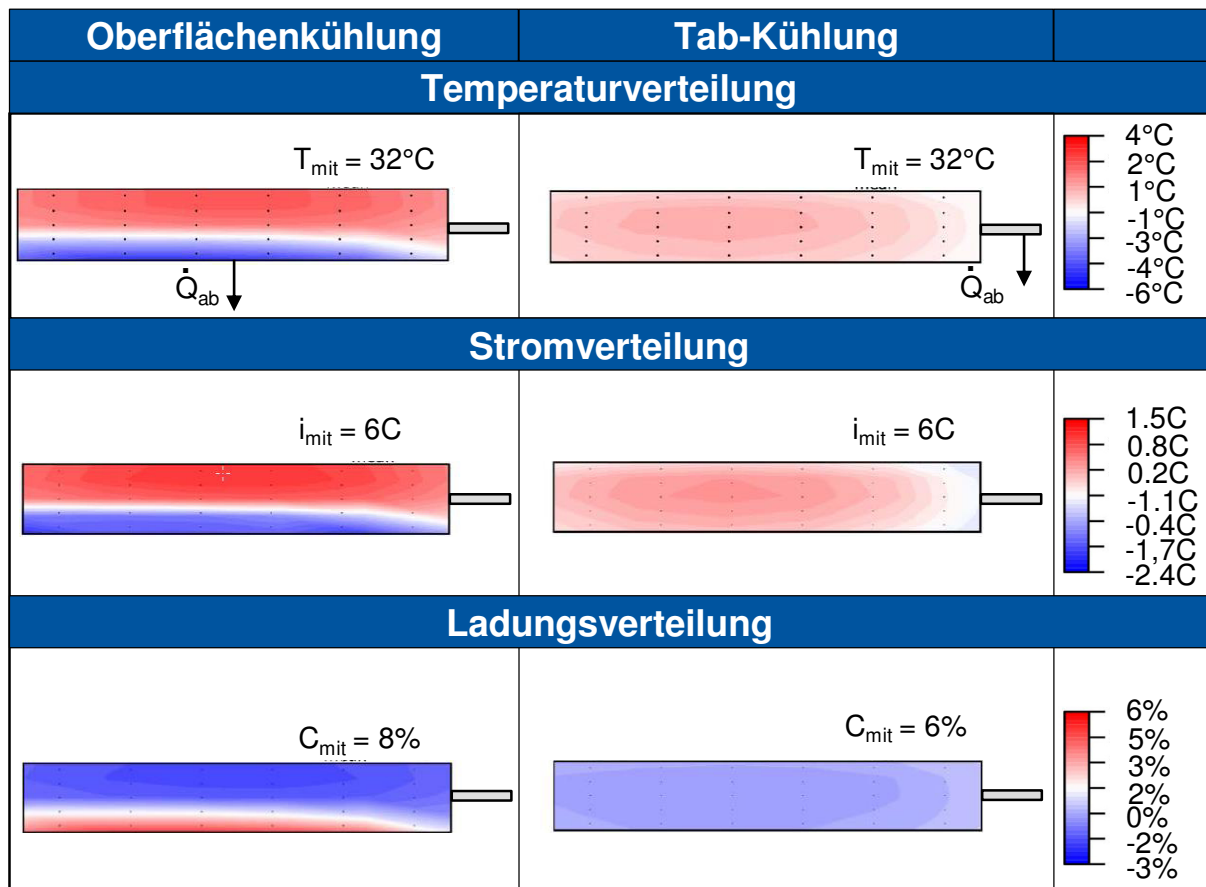


Abbildung 2.8 Homogenitätsunterschied Oberflächen-, Tab-Kühlung⁵⁸

Ob die Zelle über die Oberfläche oder über die Tabs gekühlt wird, wirkt sich auf die Lebensdauer aus. In einem Experiment wurden Zellen zyklisiert, welche über die Oberfläche bzw. über die Tabs gekühlt wurden. Die Daten befinden sich in Tabelle 2.3. Nach 1000 Zyklen haben alle Zellen an Kapazität verloren. Jedoch zeichnen sich Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Kühlmethoden ab. Bei einer C-Rate von 1/20C ist der Unterschied zwischen Oberflächen- und Tab-Kühlung verschwindend gering. Dabei hat die Tab-gekühlte Zelle 6,2% an Kapazität verloren und die Oberflächengekühlte 6,8%. Bei einer C-Rate von 6C ist der Unterschied, aber bedeutend größer geworden. So hat die Tab-gekühlte Zelle nach 1000 Zyklen 6,2% ihrer Kapazität verloren und die Oberflächen gekühlte Zelle 15,8%. Diese Unterschiede sind auf die höhere Temperaturhomogenität der Tab-gekühlten Zelle zurückzuführen.⁵⁹

⁵⁸ Vgl. Zhao et al. (Modeling the Effects of Thermal Gradients Induced by Tab and Surface Cooling on Lithium Ion Cell Performance) 2018 S. A3176

⁵⁹ Vgl. Hunt et al. (Surface Cooling Causes Accelerated Degradation Compared to Tab Cooling for Lithium-Ion Pouch Cells) 2016 S. A1848

Tabelle 2.3 Kapazität bei verschiedenen C-Raten am Anfang und Ende der Zyklierung⁶⁰

	Kapazität bei C/20 [Ah]		Kapazität bei 1C [Ah]		Kapazität bei 6C [Ah]	
Zyklus Nummer	0	1000	0	1000	0	1000
Zelle S2	5,02	4,68	2,02	4,55	4,56	3,84
Zelle T2	4,97	4,66	5,05	4,69	4,91	4,61

2.4 Grundlagen der Wärmeübertragung

Die Energieübertragung durch Temperaturunterschiede wird Wärmestrom genannt. Dazu gibt es verschiedene Mechanismen. Nach Nusselt gibt es zwei Arten der Wärmeübertragung. Diese sind Strahlung und Wärmeleitung. Oft wird in Lehrbüchern die Konvektion als eigenständiger Wärmeübertragungsmechanismus hinzugezogen. Nach Nusselt ist die Konvektion allerdings kein eigenständiger Mechanismus⁶¹. Trotzdem soll auf die Konvektion im speziellen eingegangen werden und aufgrund der geringen Relevanz für die vorliegende Kühlungsanwendung wird die Strahlung als Wärmeübertragungsmechanismus nicht erklärt.

Die folgenden Unterkapitel verstehen sich als Auszug und Kürzung der Kapitel 2,3 und 7 des Lehrbuchs „Wärmeübertragung“ von Böckh und Wetzels⁶².

2.4.1 Wärmeleitung

Die Wärmeleitung beschreibt den Wärmetransport in Festkörpern (hervorgerufen durch Schwingungen des Kristallgitters allgemein sowie durch Bewegung massebehafteter geladener Teilchen bei elektrisch leitfähigen Materialien) und Fluiden (durch makroskopische Bewegung und Zusammenstoßen von Atomen) aufgrund einer Temperaturdifferenz.

Der Wärmestrom durch Wärmeleitung in einem Körper mit konstantem Wärmeleitungskoeffizienten kann mit der vereinfachten Fourier'schen Wärmeleitungsgleichung beschrieben werden:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{p_v}{\rho \cdot c_p} \quad (3)$$

Mit:

T

Temperatur

⁶⁰ Vgl. Hunt et al. (Surface Cooling Causes Accelerated Degradation Compared to Tab Cooling for Lithium-Ion Pouch Cells) 2016 S. A1848

⁶¹ Vgl. Böckh (Wärmeübertragung) 2017 S.3

⁶² Vgl. Böckh (Wärmeübertragung) 2017.

p_v	Verlustleistungsdichte
c_p	Spez. Wärmekapazität
λ	Wärmeleitfähigkeit

Die Temperaturänderung ergibt sich damit aus der Summe der Verlustleistungsdichte und dem Produkt aus Temperaturleitfähigkeit und Divergenz der Temperaturgradienten in die jeweilige Raumrichtung.

Abbildung 2.9 zeigt ein einfaches Beispiel eines stationären eindimensionalen Wärmestroms durch eine ebene Wand ohne Wärmequelle. Auf der linken Seite herrscht Temperatur T_1 und auf der Rechten T_2 . Es gilt $T_1 > T_2$. Die Wand hat einen Wärmeleitkoeffizienten von λ_W und eine Dicke von δ .

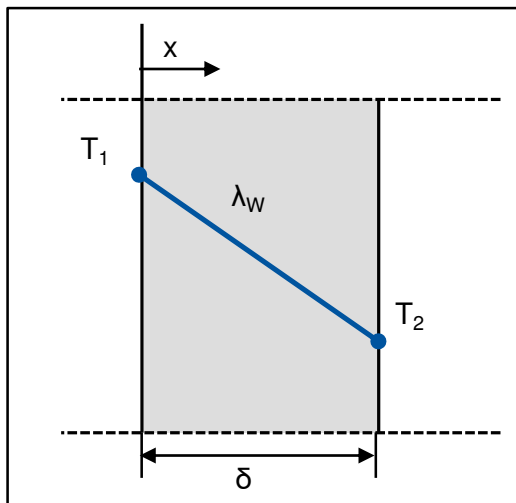


Abbildung 2.9 Wärmeleitung Ebene Wand

Mit diesen Annahmen vereinfacht sich Formel 3 zu:

$$0 = \frac{\lambda_W}{\rho \cdot c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad (4)$$

Diese Gleichung wird nun zweimal integriert sowie mit Randbedingungen versehen:

$$T(x) = \frac{T_2 - T_1}{\delta} \cdot x + T_1 \quad (5)$$

Der Wärmestrom durch die Platte berechnet sich für diesen Fall zu:

$$\dot{Q} = \frac{T_2 - T_1}{\delta} \cdot A \cdot \lambda_W \quad (6)$$

2.4.2 Konvektion

Der Begriff Konvektion beschreibt die Übertragung eines Wärmestroms von einer Festkörperoberfläche auf ein strömendes Medium. Je nach Art der Fluidbewegung wird dabei noch zwischen freier Konvektion und erzwungener Konvektion unterschieden. Erstere entsteht durch

Volumenkräfte im Fluid (z.B. Auftriebskräfte aufgrund Dichteunterschiede), letztere wird durch äußere Bewegungserzeugung (z.B. durch Pumpen, Fahrtwind oder Gebläse) hervorgerufen.

Die Wärmeübertragung durch Konvektion beruht analog der Wärmeleitung auf einem Transport von Teilchen, womit die Fourier'sche Wärmeleitungsgleichung angewandt werden kann. Der überwiegende Teil des Wärmetransports wird jedoch durch eine Fluid-Bewegung verursacht, welche mit der Navier-Stokes-Gleichung beschrieben wird.

Bei Betrachtung der Wärmeübergangszone zwischen Festkörper und Fluid ergibt sich eine thermische Grenzschicht, die der Wärmestrom durchdringt. Aufgrund der Haftbedingung ist die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids an der Körperoberfläche gleich Null, womit zunächst reine Wärmeleitung vorherrscht. Mit zunehmendem Abstand zur Oberfläche ergeben sich Mischvorgänge der Wärmeübertragung. Die Ausprägung der Grenzschicht bestimmt damit maßgeblich die Konvektion. Der Verlauf der Fließgeschwindigkeit ist in Abbildung 2.10 dargestellt.

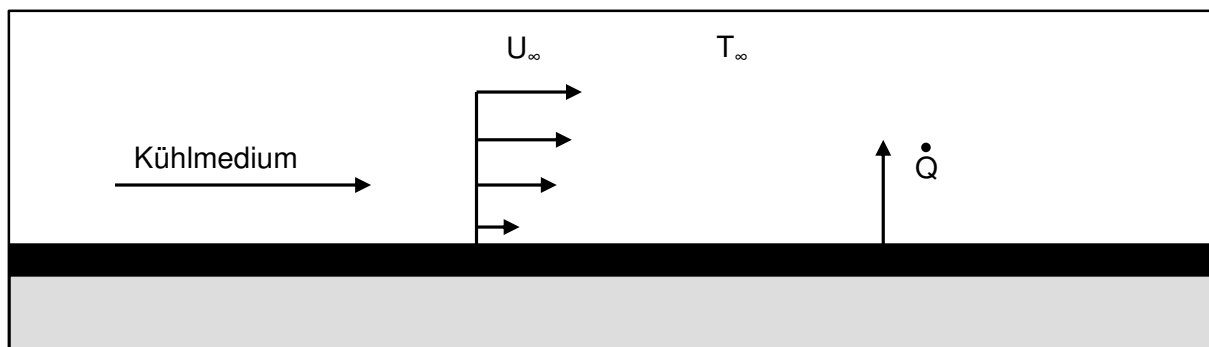


Abbildung 2.10 Konvektion Platte

Die Ausprägung der konvektiven Wärmeübertragung wird maßgeblich von der Strömungsgeschwindigkeit und der Geometrie der Grenzoberfläche bestimmt. Diese Zusammenhänge sind nicht trivial bestimmbar und können in Tabellenwerken nachgeschlagen werden z.B. im VDI-Wärmeatlas⁶³.

Der Wärmestrom durch Konvektion bestimmt sich grundsätzlich folgendermaßen:

⁶³ Vgl. Verein Deutscher Ingenieure et al. (VDI-Wärmeatlas) 2013.

$$\dot{Q} = A \cdot \alpha \cdot (T_w - T_\infty) \quad (7)$$

Mit:

T_w	Wandtemperatur
T_∞	Fluidtemperatur außerhalb der Grenzschicht
A	Grenzfläche
α	Wärmeübergangskoeffizient

Der Wärmeübergangskoeffizient α beschreibt das jeweils vorherrschende Problem und bestimmt sich aus der Ausprägung der Strömung, den Stoffeigenschaften und der Geometrie nach der folgenden Formel:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{L_0} \quad (8)$$

Mit:

Nu	Nusselt-Zahl
λ	Wärmeleitkoeffizient des Fluids
L_0	Charakteristische Länge

Die Nusselt-Zahl ist eine dimensionslose Kennzahl und entstammt der Ähnlichkeitstheorie der Wärmeübertragung. Sie kann als Funktion des dimensionslosen Temperaturfeldes aufgefasst werden. Nusselt-Zahlen sind für verschiedenste Stoffe, Geometrien und Strömungsformen experimentell ermittelt worden und in Form von Korrelationsgleichungen veröffentlicht. Eine umfangreiche Sammlung findet sich im VDI-Wärmeatlas⁶⁴.

Die Lösung eines konvektiven Wärmeübergangsproblems ist damit auf die Findung einer für das Problem passenden Nusselt-Zahl zurückgeführt.

⁶⁴ Vgl. Verein Deutscher Ingenieure et al. (VDI-Wärmeatlas) 2013.

2.5 Fahr- und Lastzyklen

In der PKW-Entwicklung wird auf genormte Fahrzyklen wie den NEFZ⁶⁵ oder den WLTP zurückgegriffen. Im Motorrad-Segment existiert der vergleichbare Fahrzyklus WMTC. Diese Zyklen sind vor allem zur Bewertung von Energieverbrauch und (bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor) Schadstoffemissionen geeignet.

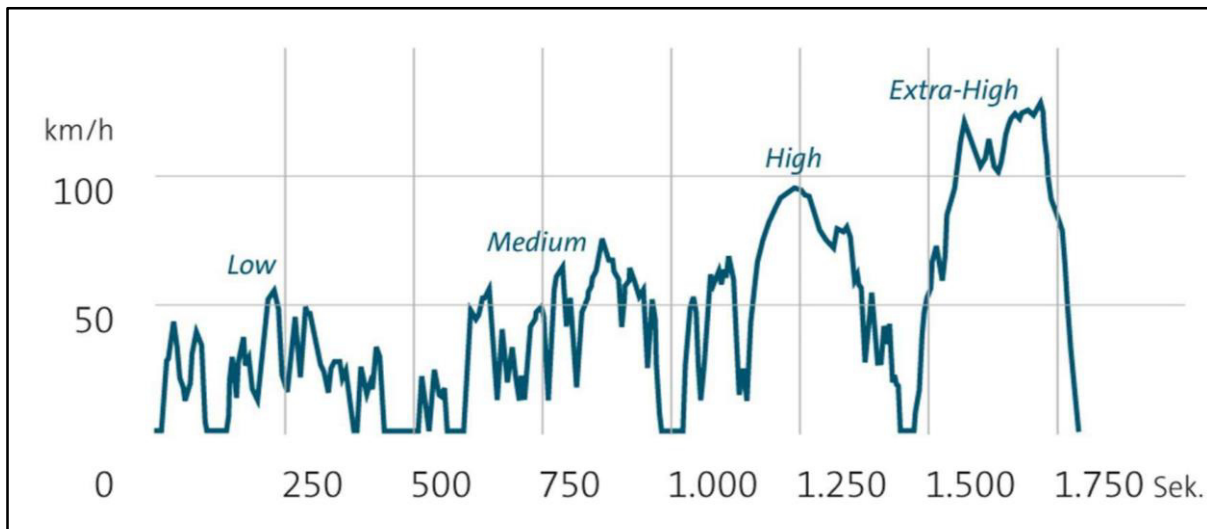


Abbildung 2.11 WLTP-Zyklus

Der aktuell in der Automobilindustrie relevante Testzyklus WLTP ist in der Verordnung (EU) Nr. 2018/2043 beschrieben^{66,67}. Der Zyklus ist auf vierrädrige Fahrzeuge der Kategorie M anzuwenden, welcher abhängig von der bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeuges in verschiedenen Kombinationen durchfahren werden muss. PKW sind in der Unterklasse M1 wiederzufinden⁶⁸. Abbildung 2.11 zeigt den WLTP-Zyklus. Es ist zu erkennen, dass sich der Zyklus in drei Teile gliedert. Zuerst wird ein Geschwindigkeitsprofil gefahren, welches dem Stadtverkehr entsprechen soll, dann zwei mit Geschwindigkeiten im mittleren Bereich für Fahrten außerorts und zuletzt ein Autobahnprofil. Laut Verordnung soll der WLTP-Zyklus dem realen Verbrauch deutlich näherkommen, als der bisher verwendete NEFZ.

2.6 Batteriesimulation

Basis einer Simulation ist immer das Simulationsmodell, welches im Falle einer Computersimulation in Form von Anweisungen im Rechner vorliegt. Der Simulationsprozess kann in folgende Schritte unterteilt werden:

1. Modellkonzept und Modellstruktur entwickeln

⁶⁵ Vgl. Europäisches Parlament und Rat (Verordnung (EU) Nr. 168/2013) 2013.

⁶⁶ Vgl. Europäisches Parlament und Rat (Verordnung (EU) Nr. 2018/2043) 2018.

⁶⁷ Vgl. Europäisches Parlament und Rat (Verordnung (EU) 2017/1153) 2017.

⁶⁸ Vgl. Europäisches Parlament und Rat (Verordnung (EU) Nr. 168/2013) 2013 S.63

2. Entwicklung des Simulationsmodells
3. Simulation durchführen
4. Validierung des Simulationsmodells
5. Dokumentation

Üblicherweise werden diese Schritte in der Reihenfolge durchlaufen. Eventuell muss beim Durchlaufen dieses Prozesses auf einen vorherigen Schritt zurückgesprungen werden, wenn z.B. unzulässige Abweichungen festgestellt werden.

Simulationsmodelle können insbesondere für Batterien sehr komplex werden, so dass es sinnvoll ist das Modell in verschiedene Teilmodelle zu unterteilen. Im Falle der Batteriesimulation könnten die Teilmodelle beispielsweise wie in Abbildung 2.12 gewählt werden.⁶⁹

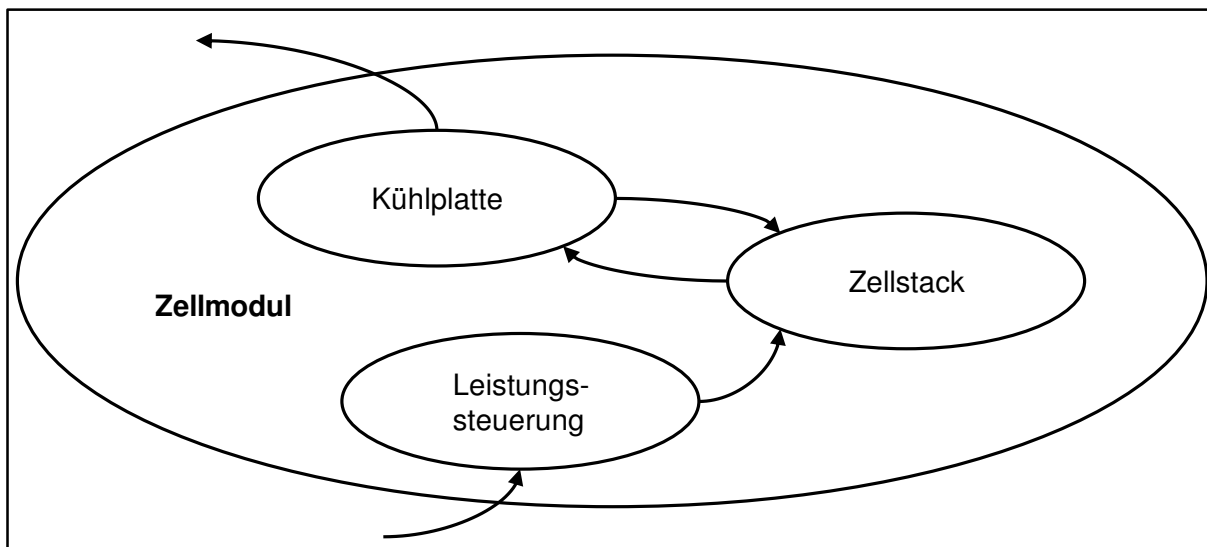


Abbildung 2.12 Simulationsmodell - Teilmodelle⁷⁰

Zur Simulation von Batterien gibt es verschiedene Arten von Modellen, welche sich durch ihre Stärken für verschiedene Fragestellungen unterscheiden. Diese Modelle sollen im Folgenden kurz erklärt werden.

2.6.1 Elektrochemische Modelle

Elektrochemische Modelle werden genutzt, um das physikalische Design der Zellen zu optimieren. Sie nutzen sowohl makroskopische Parameter, wie z.B. Spannung und Strom, als auch mikroskopische Parameter wie die Konzentrationsverteilung der Ionen. Diese Modelle

⁶⁹ Vgl. Glöckler (Simulation mechatronischer Systeme) 2014 S. 10

⁷⁰ Vgl. Glöckler (Simulation mechatronischer Systeme) 2014 S. 11

sind sehr komplex und benötigen hohe Rechenzeiten. Sie arbeiten mit einem System aus zeitvarianten, räumlichen partiellen Differentialgleichungen⁷¹. Dieser Komplexität folgen dafür sehr genaue Ergebnisse.⁷²

2.6.2 Mathematische Modelle

Mathematische Modelle werden weniger zur konkreten Systemauslegung genutzt, sondern um das Verhalten auf Systemebene zu beschreiben, wie z.B. Batterieeffizienz oder Kapazität. Sie beruhen nicht auf physikalischen oder chemischen Gleichungen, sondern auf rein deskriptiven Gleichungen, welche durch Messdaten parametrisiert werden. Die meisten mathematischen Modelle gelten nur für sehr spezifische Anwendungen. Sie sind außerdem mit einem vergleichsweisen hohen Fehler von 5%-20% behaftet.⁷³

2.6.3 Elektrische Modelle

Elektrische Modelle rangieren in Bezug auf Genauigkeit zwischen den elektrochemischen und mathematischen Modellen und haben einen Fehler von 1%-5%. Diese Modelle werden oft genutzt um Batterien auszulegen. Elektrische Modelle von Batterien nutzen Ersatzschaltbilder.⁷⁴

Sie kombinieren Spannungsquellen, Widerstände und Kapazitäten um die Zelle zu modellieren. Es gibt viele Ansätze zur elektrischen Batteriemodellierung.

Fleckenstein stellt in seiner Arbeit die folgenden Modellansätze vor⁷⁵:

- Ideale Spannungsquellen-Modelle
- Blackbox-Modelle
- Ersatzschaltbild-Modelle (Impedanzmodelle)
- Physikalisch-chemische Modelle

Ideale Spannungsquellen-Modelle zeichnen sich durch eine unbegrenzte Leistungsabgabe aus und sind nur für Fragestellungen geeignet, bei denen der Energiespeicher das eigentliche Ergebnis wenig beeinflusst. Durch Ergänzung eines konstanten Innenwiderstandes kann das Modell ein realitätsnäheres Spannungsverhalten darstellen.⁷⁶

Blackbox-Modelle bilden das Verhalten der Zelle anhand von hinterlegten Daten ab, welche aus Messungen stammen. Zu erwähnen ist das Shepherd-Modell und Modelle, welche das

⁷¹ Vgl. Dees et al. (Electrochemical modeling of lithium polymer batteries) 202.

⁷² Vgl. Siczek (Modeling of Batteries) 2019 S. 201

⁷³ Vgl. Siczek (Modeling of Batteries) 2019 S.201

⁷⁴ Vgl. Siczek (Modeling of Batteries) 2019 S.201

⁷⁵ Vgl. Fleckenstein (Modellbasiertes Thermomanagement für Li-Ionen-Zellen in elektrischen Fahrzeuganwendungen) 2013.

⁷⁶ Vgl. Kim et al. (Design of interface circuits with electrical battery models) 1997 S. 81

Gesetz nach Peukert anwenden. Die Güte dieser Modelle ist stark abhängig von der Genauigkeit der hinterlegten Parameter und der Anpassung auf Messdaten (Parameter-Fitting). Der Trend geht zum adaptiven Parameter-Fitting unter Verwendung von Machine-Learning-Methoden.⁷⁷

Ersatzschaltbild-Modelle basieren auf der Nachbildung des elektrischen Systemverhaltens der Zelle. Die Parametrisierung erfolgt vergleichbar zum Blackbox-Modell durch Fitting der Parameter einer elektrischen Schaltung an Messwerte. Die durchzuführenden Versuche zur Zellcharakterisierung müssen auf die zu modellierende Fragestellung angepasst sein. Ein einfaches Ersatzschaltbild, bestehend aus einem Seriellwiderstand zur Abbildung des Spannungsabfalls bei einer Stromanforderung sowie eines RC-Gliedes zur Abbildung der zeitvarianten Spannungsänderungen, ist in Abbildung 2.13 zu sehen. Das Einfache Batteriemodell besteht aus einer Spannungsquelle welche die OCV (V_{OCV}) darstellt, dem Innenwiderstand ($R_{internal}$) und der abgreifbaren Spannung (V_0).⁷⁸

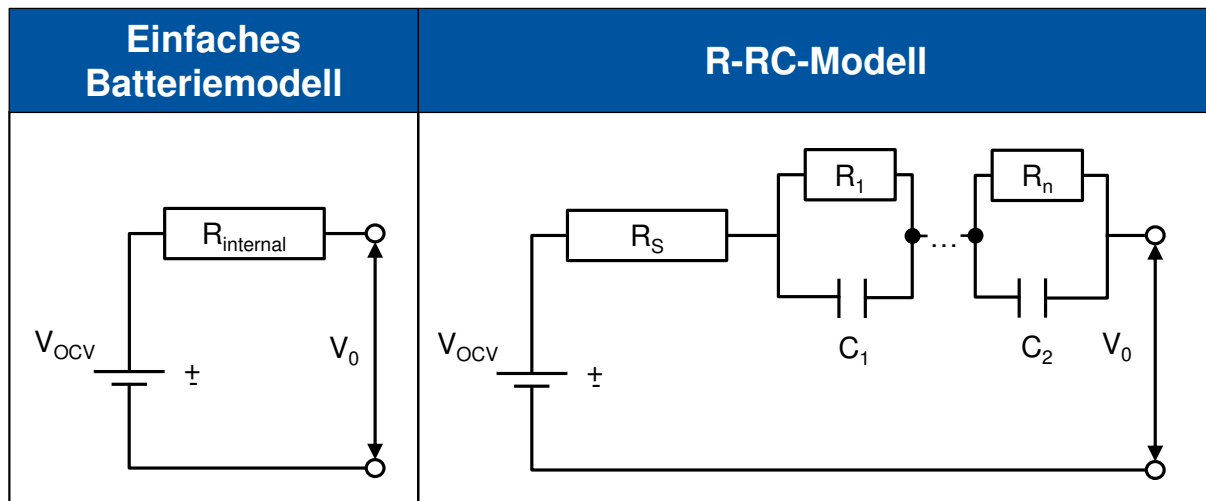


Abbildung 2.13 Einfaches Batteriemodell und R-RC-Modell^{79,80}

⁷⁷ Vgl. Chan et al. (The available capacity computation model based on artificial neural network for lead–acid batteries in electric vehicles) 2000 S.201-204

⁷⁸ Vgl. Chan (2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37077)) 2000 S.470-475

⁷⁹ Vgl. Chan (2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37077)) 2000 S. 471

⁸⁰ Vgl. Kim et al. (Design of interface circuits with electrical battery models) 1997 S.81

3 Systemkonfiguration und Simulationsaufbau

Im Zuge des HiT-Cell Projektes des PEM der RWTH Aachen soll ein Batteriespeicher mit einer Systemspeicherkapazität von ca. 1kWh und einer Nennspannung von 48V entwickelt werden. Dieser Speicher ist darauf ausgelegt, besonders hohe spezifische Leistungen von bis zu 30C bereitstellen zu können. Besonders in Hybridanwendungen kommen so hohe spezifische Leistungen aufgrund der kleinen Batterie vor. Um dies zu realisieren wird eine Zelle entwickelt, die bei einer Temperatur von 60°C sicher betrieben werden kann. Dabei sollen keine zusätzlichen temperaturbedingten Alterungseffekte auftreten. Damit liegt die Betriebstemperatur deutlich höher als bei konventionellen Lithium-Ionen-Zellen (vgl. Kap. 2.1.3). Um diese hohen Leistungen erbringen zu können, bedarf es eines leistungsstarken Thermomanagements. Dafür wird nach aktuellem Stand der Technik eine aufwändige Kühlungsperipherie benötigt. Aus diesem Grund soll in dieser Arbeit überprüft werden, ob die Zellen mittels Tab-Kühlung (vgl. Kap. 2.3.2 Tab-Kühlung) effektiv und mit relativ einfacher Kühlungsperipherie effizienter gekühlt werden können. Die zentrale Forschungsfrage dieser Arbeit lautet also:

Kann ein Hochleistungsbatteriemodul effektiv mittels Tab-Kühlung gekühlt werden und wo liegen die Unterschiede zwischen 40°C und 60°C Betriebstemperatur?

Inhalt dieses Kapitels ist zunächst die Vorstellung der verwendeten Zelle und die Ausarbeitung eines Moduls, welches die genannten Anforderungen erfüllt. Für die Kühlungsauslegung wurde in vorherigen Arbeiten ein Simulationsmodell mit Hilfe der Simulationssoftware Siemens Simcenter AMESim erstellt, welches auf den vorliegenden Anwendungsfall abgeändert, weiter ausgearbeitet und im Folgenden erläutert werden soll. Zuletzt wird der Versuchsplan erarbeitet und ein vom ISEA der RWTH Aachen entwickelter Lastzyklus zur Simulation realitätsnaher Belastungen vorgestellt.

3.1 Die Zelle

Das HiT-Cell- Projekt nutzt Pouchzellen mit LFP-Zellchemie. Aktuell werden am PEM der RWTH Aachen Zellen mit 11Ah Kapazität gefertigt. Aus diesem Grund wird auch in der Simulation diese Kapazität verwendet.

Der Elektrolyt wird vom Münster Electrochemical Energy Technologies (MEET) der Universität Münster entwickelt und auf besondere thermische Stabilität ausgelegt, so dass eine maximal zulässige Betriebstemperatur von 60°C erreicht werden kann.

Die Maximale Ladeschlussspannung der Zelle beträgt 4,2V und die Nennspannung 3,6V. Die minimale Entladeschlussspannung liegt bei 2,5V.

Für die Anode kommt eine Graphit-Anode auf Aluminium-Zellableitern zum Einsatz. Das LFP-Material wird auf Kupfer-Zellableitern aufgetragen. Zum aktuellen Stand besteht die Zelle aus je 15 doppelseitig beschichteten Anoden- und Kathodensheets. Insgesamt soll die Zelle eine maximale Dicke von 10mm nicht überschreiten.

Die Parameter der Zelle sind in Tabelle 5.2 zu finden.

3.2 Das Modul

Auf Basis der in Kap. 3.1 vorgestellten Zelle wurde ein Zellmodul entwickelt. Um die geforderte Kapazität und Spannung zu erreichen müssen mehrere Zellen parallel und seriell verschaltet werden⁸¹.

In Tabelle 3.1 **Modulauslegung** wird berechnet, in welcher Konfiguration die Zellen verschalten werden müssen um die Systemkapazität von ca. 1kWh zu erreichen. Die Berechnung zeigt, dass 25 Zellen benötigt werden. Aus Symmetriegründen werden allerdings nur 24 Zellen verwendet. Im zweiten Schritt muss die Spannung des Moduls ausgelegt werden, da eine Spannung von 60V in keinem Fall überschritten werden darf, da ab dieser Spannung der Hochvoltbereich anfängt und zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen notwendig sind⁸². Für die Auslegung der Spannung, muss die maximale Spannung von 4,2V der einzelnen Zellen berücksichtigt werden, da sonst bei vollgeladenem Modul die 60V Grenze überschritten werden könnte. Tabelle 3.1 macht deutlich, dass eine 24s1p Verschaltung nicht in Frage kommt, da die 60V Grenze deutlich überschritten wird. Aus diesem Grunde wurde eine 12s2p Verschaltung gewählt, da so die Nennspannung von 48V am ehesten erreicht und 60V sicher unterschritten wird.

Tabelle 3.1 Modulauslegung

Elektrische Auslegung des Moduls				
Kapazitätsauslegung				
Parameter		Ergebnisse		
Soll-Modulkapazität	1kWh	Erforderliche Zellanzahl für Soll-Modulkapazität	25,253	Verwendet: 24
Zellkapazität	11Ah	Ist-Modulkapazität	990Wh	
Zellnennspannung	3,6V			
Spannungsauslegung				
Parameter		Ergebnisse		
Max. Modulspannung	60V	Max. Modulspannung 24s1p	100,8V	> 60V
Max. Zellspannung	4,2V	Max. Modulspannung 12s2p	50,4V	< 60V
Zellanzahl	24			
Geometrische Auslegung des Moduls				
Verschaltung	12s2p			

⁸¹ Vgl. Kampker (Montageprozess Eines Batteriepacks) 2015.

⁸² Vgl. DGUV (Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltssystemen) S.9

Eine besondere Herausforderung ist die elektrische Isolation der Tabs. Es kann keine Metallkühlplatte direkt auf die Tabs appliziert werden, da dadurch ein Kurzschluss zwischen den Zellen entstehen würde. Um dieses Problem zu lösen gibt es verschiedene Möglichkeiten. Es bieten sich vier Möglichkeiten zur elektrischen Isolation der Kühlplatte an. Zum einen, kann ein Gappad aus einem nichtleitenden Material verwendet werden oder nichtleitende Kühlrippen an die Kühlplatte angebracht werden. Außerdem kann zwischen Tabs und Kühlplatte ein Luftspalt gelassen werden oder eine nichtleitende Kühlplatte verwendet werden. Diese Möglichkeiten bieten verschiedene Vor- und Nachteile. Zu beachten ist, dass nichtleitende Materialien entweder sehr teuer sind oder schlechte Wärmeleitkoeffizienten haben. In dieser Arbeit wurde die Gappad-Variante aus zuvor stattgefundenen Simulationen übernommen.

Abbildung 3.1 zeigt einen möglichen Zellstack inklusive Maße. Zu beachten ist, dass dies nur die Maße der aneinander gereihten Zellen sind. Es werden jeweils zwei Kathoden mit zwei Anoden mittels Ultraschalles verschweißt. Dadurch kommt eine 12s2p Verschaltung zustande. Hinzukommen noch eine Halterung für die Zellen, Zellkontaktierungssystem, Isolationsfolien, ...⁸³. Die konstruktive Auslegung des Moduls soll in dieser Arbeit jedoch nicht weiter betrachtet werden.

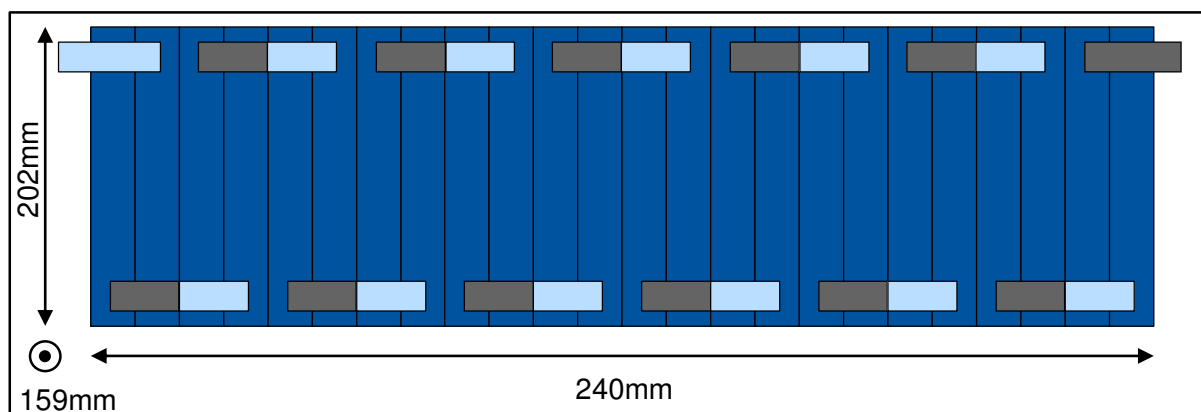


Abbildung 3.1 Modul Geometrie

3.3 Gesamtsystem

Das Simulationsmodell gliedert sich in drei Teilmodelle, welche die Leistungssteuerung, die Strömungsberechnung der Kühlplatte und das Elektro-thermische-Modell der Zellen beinhalten. Die Abbildung 5.1-3 im Anhang geben einen Überblick über die Modellstruktur in AMESim. In diesem Abschnitt soll diese näher erläutert werden.

3.3.1 Leistungssteuerung

Die Leistungssteuerung regelt den Strom, welcher an den Zellen anliegt. Dazu wird die Systemspannung kontinuierlich gemessen und im Load-Controller mit dem angelegten Lastprofil in einen Strom verrechnet. Außerdem beendet die Leistungssteuerung im Cut-Off-Element die

⁸³ Vgl. Kampker (Montageprozess Eines Batteriepacks) 2015.

Simulation, wenn das Batteriemodul die untere zulässige Systemspannung unterschreitet. Aufgrund von Diskontinuitäten zu Anfang der Simulation sind sowohl der Cut-Off als auch der Load-Controller mit Pufferelementen ausgestattet um einen reibungsfreien Simulationsstart zu gewährleisten.

3.3.2 Zellmodulmodell

Das Zellmodul besteht aus zwölf Teilmodellen mit jeweils zwei parallel geschalteten Zellen. Aus den Teilmodellen „Parallel cells“ werden jeweils die Anoden bzw. Kathoden miteinander verbunden und dann mit dem nächsten Teilmodul verbunden. Dabei werden gemäß der Verschaltung die zwei Kathoden eines Teilmodells mit den Anoden des nächsten Teilmodells verbunden. Diese vier Stromabnehmer teilen sich eine Fläche der Kühlplatte, über die die gesamte entstehende Wärme abgeführt wird. Aufgrund der Größe wurde in Abbildung 3.2 darauf verzichtet alle Teilmodelle darzustellen. Die Ausgänge 2 führen zum Modell der Kühlplatte.

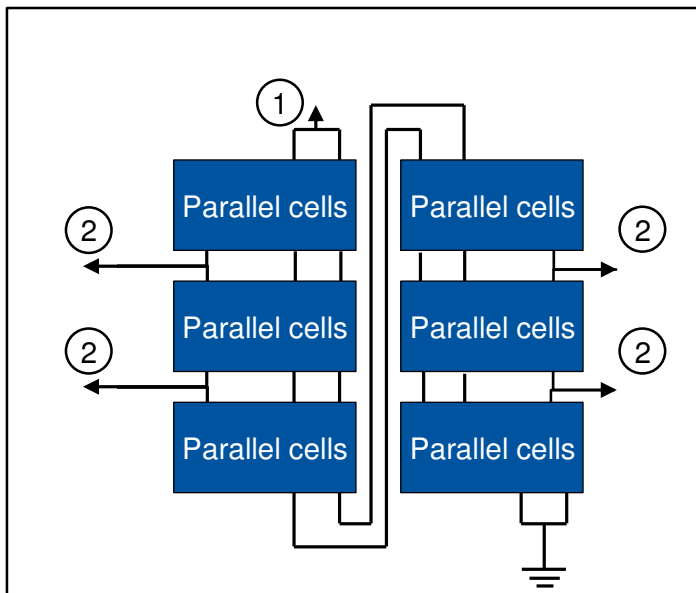


Abbildung 3.2 Zellmodulmodell

3.3.3 Zellmodell

Das Zellmodell besteht aus einer elektrischen und thermischen Komponente.

Im Modell befinden sich drei Wärmequellen. Dies sind die ohm'schen Verluste in beiden Tabs und die Wärmeverluste der Zelle. Die ohm'sche Wärmeentwicklung wächst quadratisch mit dem Strom (Formel (9))⁸⁴.

⁸⁴ Vgl. Yang et al. (An improved semi-empirical model for thermal analysis of lithium-ion batteries) 2019 S. 5

$$Q_{Ohm} = I^2 * R_{Kath/Anod} \quad (9)$$

Innerhalb der Zelle setzt sich die Wärmeentwicklung aus einem reversiblen und einem irreversiblen Teil zusammen. Die irreversible Wärmeentwicklung der Zelle lässt sich zum einen auf ohm'sche Verluste (Q_{Ohm}) zurückführen und zum anderen auf Polarisierung (Q_{pol}). Dabei fällt der größte Anteil auf die ohm'schen Verluste, welche durch elektrische Widerstände in den Feststoffen und durch ionische Widerstände im Elektrolyt entstehen⁸⁵. Die Energie zur Polarisierung wird benötigt, um das Gleichgewicht zwischen Lithium-Ionen und Elektrolyt zu brechen und wird durch Formel (12) beschrieben. Das Potential des Aktivmaterials der Elektroden dissipiert dann als Wärme⁸⁶. Die reversible Wärmeentwicklung (Q_{rea}) ist auf die Reaktionsenthalpie zurückzuführen welche aus der Reaktion in Formel (1) und (2) aus Kap. 2.1.1 hervorgeht⁸⁷. Der Gesamtwärmestrom berechnet sich also zu:

$$Q_{Ges} = Q_{Ohm} + Q_{pol} + Q_{rea} \quad (10)$$

$$Q_{Ohm} = -i_s \nabla \Phi_s - i_l \nabla \Phi_l \quad (11)$$

$$Q_{pol} = S_a j_n \eta \quad (12)$$

$$Q_{rea} = S_a j_n T \frac{\delta E_0}{\delta T} \quad (13)$$

Mit:

E_0	Open circuit voltage
i_l	Lokale Stromdichte im Elektrolyten
i_s	Lokale Stromdichte im Aktivmaterial
j_n	Lokaler Ladungstransport
S_a	Spezifische Oberfläche
T	Temperatur
\dot{Q}	Wärmestrom
η	Lokales Oberflächen Überpotential
Φ_l	Feststoff Potential
Φ_s	Elektrolyt Potential

⁸⁵ Vgl. Bahiraei et al. (A pseudo 3D electrochemical-thermal modeling and analysis of a lithium-ion battery for electric vehicle thermal management applications) 2017 S. 19

⁸⁶ Vgl. Bahiraei et al. (A pseudo 3D electrochemical-thermal modeling and analysis of a lithium-ion battery for electric vehicle thermal management applications) 2017 S.12

⁸⁷ Vgl. Huo et al. (Electrochemical-thermal modeling for a ternary lithium ion battery during discharging and driving cycle testing) 2015.

Abbildung 3.3 zeigt das in der Simulation verwendete Zellmodell, welches nun detailliert beschrieben wird. Dabei werden verwendete Parameter erklärt und ggf. hergeleitet.

Das elektrische Zellmodell gibt einen Wärmestrom aus, welcher hauptsächlich von der Leistung abhängt, welche die Zelle ausgibt. SOC und Temperatur haben jedoch einen großen Einfluss auf den Innenwiderstand und wirken sich so auch auf den ausgegebenen Wärmestrom aus. Der Wärmestrom ist ebenfalls vom SOH abhängig, jedoch wurde in dieser Simulation auf ein Alterungsmodell verzichtet. AMESim bietet die Möglichkeit das Alterungsmodell zu implementieren; die dafür notwendigen Strukturen sind bereits im Modell vorhanden. So kann das vorhandene Simulationsmodell angepasst werden um Alterungsmechanismen zu analysieren.

Die ohm'schen Verluste in den Tabs sind neben der Zelle die einzigen weiteren Wärmequellen. Diese sind im Vergleich zur Zellwärme relativ klein und treten direkt in den Tabs auf. Allerdings muss im weiteren Verlauf analysiert werden, wie sich die Wärmeentstehung der Tabs für den Hochstrombereich verhält. Denn der ohmsche Widerstand wächst nach Formel (9) quadratisch, so dass sich für hohe Ströme ein nicht vernachlässigbarer Wärmestrom in den Tabs entwickeln könnte.

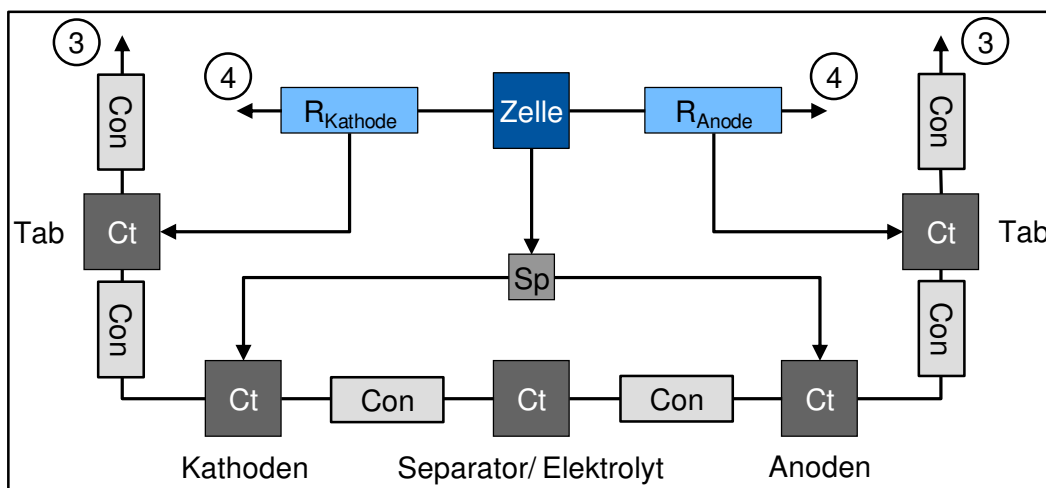


Abbildung 3.3 Zellmodell

Der Wärmestrom der Zelle teilt sich im Element „Sp“ auf die Kathoden und Anoden auf. Für diese Simulation wurde die Aufteilung zwischen Kathode und Anode, auf Basis von Literaturrecherchen, mit einem konstanten Verhältnis von etwa 45/55 Kathode/Anode angenommen⁸⁸. In der Ausarbeitung von Bahiraei wurden allerdings NMC-Zellen vermessen und nicht wie im HiT-Cell-Projekt LFP-Zellen. Die Aufteilung des Wärmestroms ist in der Realität nicht konstant, sondern hängt maßgeblich von der Temperatur und dem Ladezustand der Zelle ab. Der Verlauf der totalen Wärmeentstehung ist in Abbildung 5.5 im Anhang zu finden. Hier wird deutlich, dass der gebildete Wert eine starke Mittelung des Diagramms ist. Dazu wurde zunächst über die Dicke der Zelle gemittelt. Der Fehler, welcher dabei entsteht, ist vergleichsweise gering.

⁸⁸ Vgl. Bahiraei et al. (A pseudo 3D electrochemical-thermal modeling and analysis of a lithium-ion battery for electric vehicle thermal management applications) 2017 S.19-20,45-47

Jedoch wurde danach über den SOC gemittelt. Dabei kommt es zu einem großen Fehler aufgrund der starken Unterschiede der Wärmeentwicklung über den SOC. Da zum aktuellen Entwicklungsstand jedoch keine Zellen vermessen werden konnten, musste der Wert recherchiert werden und muss in Zukunft durch ein genaues Modell ersetzt werden. Die daraus resultierenden Unterschiede der Ergebnisse sollen im Zuge der Sensitivitätsanalyse in Kap. 4.5 geklärt werden. Für das neue Modell sollte ein Kennfeld vermessen werden, welches die Wärmeströme, unter Variation der Betriebstemperatur und Ladezustand der Zelle, an den Kathoden und Anoden misst. Nach der Ausarbeitung von Bahiraei ist ebenfalls der Abstand im Aktivmaterial von den Zellelektroden relevant. Jedoch hat dies nur einen geringen Einfluss auf die Wärmestromaufteilung und kann aufgrund des vorgesehenen Detaillierungsgrades dieses Modells, nämlich das Modul zu beschreiben, vernachlässigt werden. Der Einfluss auf die Gesamtzelltemperatur wird im Zuge der Sensitivitätsanalyse in Kap. 4.5 analysiert.

Das thermische Zellmodell aus Abbildung 3.3 gliedert sich in drei thermische Massen „Ct“ für das Zellinnere und zwei Massen für die Tabs. Durch die im Vergleich zum Elektrolyten geringen Massen der Kathoden und Anoden und deren gute Wärmeleitfähigkeit bildet sich ein dynamisches Modell, welches schnell auf Wärmestromspitzen reagieren kann. Die Temperaturen der Kathoden und Anoden können sich so schnell an den vorliegenden Lastfall anpassen und die Wärme über die Tabs abgeben, ohne dass der Elektrolyt jede Temperaturspitze mitfährt. Die thermischen Massen sind durch thermische Widerstände „Con“ verbunden, welche den Grundlagen der Wärmeübertragung folgen und die Wärme durch Wärmeleitung übertragen.

Für den Wärmeübergang zwischen Kathode/Elektrolyt und Anode/Elektrolyt wurde auf Grundlage von recherchierten Daten ein Ersatzwiderstand gebildet⁸⁹. Der Ersatzwiderstand ist auf Basis von NCA-Zellen gebildet worden. Für die HiT-Cell kommt entweder die NCA-Zellchemie oder die LFP-Chemie zum Einsatz. Jedoch fehlt dem Ersatzwiderstand ein Wert für den Kontaktwiderstand zwischen den verschiedenen Materialien, wodurch der Widerstand geringer wird. Die aktuelle Wärmeleitung wird als Mittel der Wärmeleitfähigkeiten, unter Berücksichtigung der Schichtdicken, der einzelnen Zellkomponenten aufgestellt. So kommt ein Wärmeleitkoeffizient von $1,268 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ für die Anode und $0,672 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$ für die Kathode zustande. Der entstehende Effekt auf die Ergebnisse wird in Kap. 4.5 erörtert. Die Berechnung der Widerstände ist in im Anhang zu finden

Aufgrund der relativ vereinfachten Darstellung mit fünf thermischen Massen, wurden die einzelnen Komponenten den Massen zugeordnet. Einen Überblick darüber liefert Tabelle 3.2. Teilweise wurden die Massen anteilsweise zwei Massen zugeordnet, denn im Falle der porösen Schicht der Aktivmaterialien muss beispielsweise berücksichtigt werden, dass der Elektrolyt in die Poren eindringt.

⁸⁹ Vgl. Argonne National Laboratory (Modeling the Performance and Cost of Lithium-Ion Batteries for Electric-Drive Vehicles) S.68

Tabelle 3.2 Aufteilung der Zellmassen

Elektrolyt und inaktive Komponenten		Kathoden		Anoden	
Elektrolyt	178,1g	Kathode Aktivmaterial	37,1g	Anode Aktivmaterial	19,9g
Anode Aktivmaterial	19,9g	Kathode-SA	19,3g	Anode-SA	48,1g
Kathode Aktivmaterial	37,1g	Kathode Additive	3,2g	Anode Additive	2,3g
Pouchbag	3,7g				
Separator	4,6g				
Summe	243,4g		59,6g		70,3g

Das elektrische Modell besteht aus zwei ohm'schen Widerständen für die Verluste in den Tabs und einem Zellmodell, welches die Simulationssoftware zur Verfügung stellt und durch Parameter gespeist wird. Aufgrund des frühen Entwicklungsstandes des Projektes gibt es aktuell noch keine Charakteristiken für den Innenwiderstand, die OCV und die Filterkapazität aus der realen Zelle. Da Innenwiderstand und OCV jedoch elementar für das Zellmodell sind, wurden diese aus vergleichbaren Zellen aus einem weiter fortgeschrittenen Projekt verwendet. Der Innenwiderstand wird als dreidimensionales Kennfeld in die Simulation eingebettet (siehe Abbildung 5.4 im Anhang). Es ist zu erkennen, dass der Innenwiderstand stark von der Temperatur und dem SOC abhängt. Aktuell ist das Temperaturkennfeld nur bis 50°C hinterlegt. Liegt die Zelltemperatur über 50°C wird auch der Innenwiderstand bei 50°C gewählt. Für sehr niedrige Ladezustände der Zelle, steigt der Innenwiderstand stark an, so dass dies bei der Simulation insbesondere bei der konstanten Leistungszuführung in Kap. 4.1 besonders berücksichtigt werden muss. Die Qualität der Ergebnisse sollte sich durch das übernommene Innenwiderstandskennfeld nicht ändern, weil die Kurven für Innenwiderstände insgesamt einen gleichen Verlauf haben, dass der Innenwiderstand über den größten Ladezustand auf einem Niveau bleibt und bei hohen DOD's stark zunimmt. Zudem verringert sich der Innenwiderstand üblicherweise mit zunehmender Temperatur. Jedoch kann es in den Ergebnissen zu einer Verschiebung kommen, so dass z.B. eventuell weniger Leistung konstant abgeführt werden kann als in Kap. 4.1 beschrieben. Für die OCV kommt eine ähnliche Kurve wie aus Kap. 2.1.2 Abbildung 2.2 zum Einsatz. Die Filterkapazität kann mit Hilfe von AMESim aus dem Innenwiderstandskennfeld und der OCV berechnet werden.

Eine Übersicht der verwendeten Parameter ist in Tabelle 5.2 im Anhang zu sehen.

3.3.4 Kühlplatte

Das Modell der Kühlplatte wurde als Aluminiumplatte mit Kühlrippen simuliert und aus einem anderen Projekt übernommen. An einer Kühlfläche liegen je zwei Anoden und zwei Kathoden aufgrund der elektrischen Verschaltung an. Jede Kühlfläche verfügt über 6 Kühlrippen, welche eine Wandstärke von 2mm haben. Die Rippen sind 37mm lang und 14mm hoch. Die konstruktive Gestaltung der Kühlplatte findet sich in Abbildung 3.4 Als Kühlmittel wird ein Wasser/Glykol Gemisch verwendet, welches durch einen Chiller auf 15°C herunter gekühlt wird. Für Kühlkreisläufe mit Sekundärkreisläufen gelten Temperaturen von 15°C-30°C.⁹⁰ Da dies ein Hochleistungssystem ist, wird die untere Grenze des Temperaturspektrums verwendet. Interne Versuche haben gezeigt, dass die Kühlplatte einen Volumenstrom von bis zu 16l/min umsetzen kann. Dieses Potential wird für diese Anwendung voll ausgeschöpft, um die hohen Wärmestromspitzen effektiv abfangen zu können. Dazu ist eine Pumpendrehzahl von 1600rev/min notwendig, welche nach Datenblatt einer aktuell verbauten Pumpe problemlos machbar ist⁹¹. Nicht Teil der Simulation ist der Kältemittelkreislauf, welcher den Kühlmittelstrom auf die erforderliche Temperatur herabkühlt. Verwendet wird dafür ein Kompressor von Moteg⁹² mit einer maximalen Leistung von 3,6kW. Dieser Kompressor wird bereits in anderen Projekten verwendet und soll daher vorerst übernommen werden, um eine Neuanschaffung zu vermeiden.

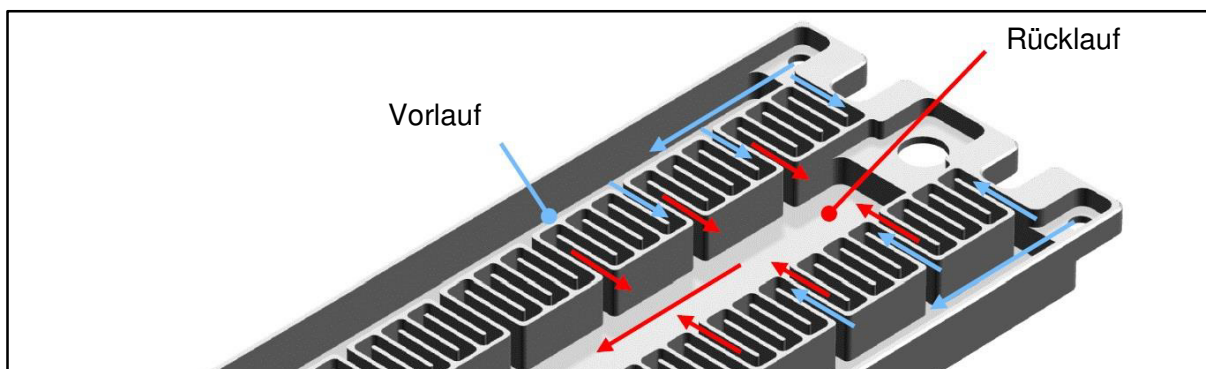


Abbildung 3.4 Kühlplatte

3.4 Simulationsziele und Simulationsablauf

Das zuvor erklärte Simulationsmodell dient dazu, das Potential der HiT-Cell im Vergleich zu konventionellen Lithium-Ionen-Zellen offenzulegen, während das System über Tab-Kühlung gekühlt wird. Der Versuchsplan fokussiert sich deshalb auf die Temperaturgrenzen von 40°C (vgl. Kap. 2.1.3) für die konventionelle Zelle und 60°C für die HiT-Cell. Im weiteren Verlauf der Versuchsreihe wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um zu bestimmen, an welchen Stellen des Systems Engpässe in der Wärmeabfuhr bestehen.

⁹⁰ Vgl. Zeyen et al. (Thermisches Management der Batterie) 2013 S.171

⁹¹ Vgl. Valeo Commercial Vehicles Germany GmbH (Übersicht und EA SPump DEEN).

⁹² Vgl. Moteg (eAir 2.1 DataSheet v1.1).

3.4.1 Versuchsplan

Um die zuvor beschriebenen Unterschiede der Betriebstemperatur deutlich zu machen, wurde ein Versuchsplan entworfen. Der Versuchsplan gliedert sich in vier Teile. Zuerst wird geprüft welche konstante Leistung abgegeben werden kann, während die Zellen auf einer bestimmten Temperatur gehalten werden. Anschließend werden verschiedene Leistungsprofile gefahren, in denen die Zellen mit bestimmten Lade- und Entladepeaks belastet werden. Die Dauer der Peaks richtet sich danach, nach welcher Zeit eine Zelltemperatur von 40°C bzw. 60°C erreicht wurde. Insgesamt werden acht dieser Profile in der Simulation verwendet.

In den ersten vier Profilen werden die Zellen entladen. Dabei variiert die Peakleistung der Profile zwischen 20kW und 30kW. Vor dem Peak werden die Zellen bei der Leistung entladen, bei der sie eine konstante Temperatur von 20°C bzw. 40°C. Nach dem Peak werden verschiedene kleinere Lasten aufgebracht um das Abkühlverhalten unter Last zu analysieren. In Profil 5 und 6 werden die Zellen nach dem Peak gar nicht mehr belastet. Diese Profile dienen als Referenz, welchen Einfluss die weitere Leistungszufuhr auf die Abkühlung hat. Die Profile 7 und 8 laden die Zellen mit 20kW bzw. 30kW. Dazu wird der SOC der Zellen zu Anfang auf 20% gesetzt, um die Zellen nicht zu überladen, da diese dadurch beschädigt werden würden. Auf eine Teillast im Ladebetrieb wurde verzichtet, weil das Laden der Zellen im Fahrbetrieb durch Rekuperation stattfindet. Da die Rekuperation an einen Bremsvorgang gekoppelt ist, ist es in der Realität nicht möglich für mehrere Minuten durchgehend zu bremsen, wenn man den Spezialfall langer Gefälle auf Passstraßen im Gebirge ausnimmt. Auch der in Abbildung 3.5 beschriebene Lastzyklus des ISEA der RWTH Aachen verfügt über keine langen Phasen, in denen die Zellen mit geringer Leistung über längere Zeiträume geladen werden.

Tabelle 3.3 Auszug Versuchsplan

Simulation	Simulationsparameter	Details
Simulation 3 Sensitivitätsanalyse		
Simulation 3.1	Wärmeaufteilung Kathode/ Anode	Analyse des Einflusses auf die Zelltemperatur
Simulation 3.2	Dicke des Gappads	Verdünnung des Gappads
Simulation 3.3	Kühlmitteldurchsatz	Einfluss auf Kühlleistung
Simulation 3.4	Kühlmitteltemperatur	Variation der Temperatur innerhalb Temperaturgrenzen aus Literatur ⁹³
Simulation 3.5	Innerer Wärmewiderstand	Analyse des Einflusses auf die Zelltemperatur
Simulation 3.6	Tab-Größe	Aufdeckung von Kühlungspotential durch Vergrößerung

⁹³ Vgl. Zeyen et al. (Thermisches Management der Batterie) 2013 S.171

Nachfolgend wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt um Optimierungspotential aufzudecken. Dabei werden, die im Versuchsplan in Tabelle 3.3 Auszug Versuchsplan gelisteten Parameter in der Simulation variiert und deren Einfluss auf die Kühlung dokumentiert. Insbesondere soll dabei festgestellt werden, inwieweit die in Kap. 3.3.3 abgeschätzten Parameter die Simulationsergebnisse verfälschen.

Zuletzt wird das Zellmodul durch einen vom ISEA der RWTH Aachen entwickelten Lastzyklus belastet. Dieser Lastzyklus soll ein realistisches Fahrprofil für einen PKW im Stadtverkehr darstellen. Abbildung 3.5 zeigt diesen Lastzyklus, wobei auffällt, dass auch in diesem Lastzyklus auf die hohen spezifischen Leistungsanforderungen von bis zu 30C Rücksicht genommen wurde. Aufgrund der Kürze des Lastzyklus wird dieser zweimal simuliert, einmal ausgehend von einer Zellstarttemperatur von 20°C und einmal von 40°C.

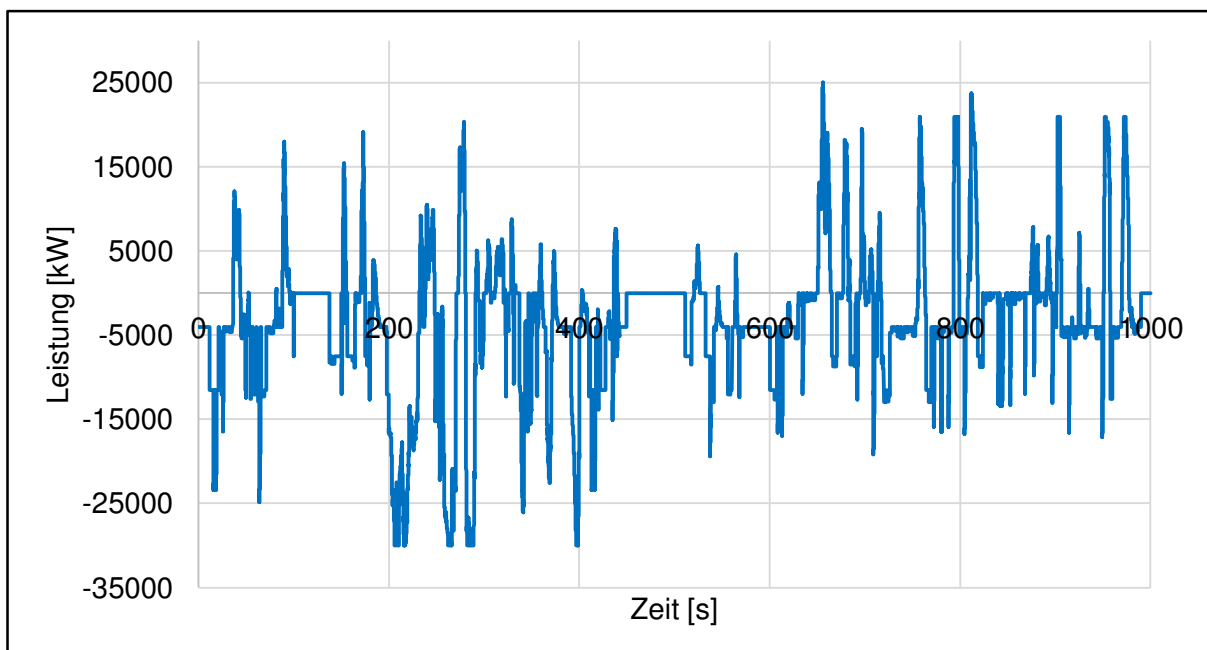


Abbildung 3.5 Lastzyklus des ISEA der RWTH Aachen

4 Simulationsergebnisse und Diskussion

Die in Kapitel 3.4 beschriebenen Versuche sollen in diesem Kapitel vorgestellt, ausgewertet und diskutiert werden. Insbesondere soll dabei der Unterschied zwischen den Temperaturgrenzen 40°C von konventionellen Lithium-Ionen-Zellen und 60°C für die HiT-Cell hervorgehoben werden. Die Temperatur in den folgenden Ergebnissen wird, wenn nicht anders beschrieben, immer in der thermischen Masse für den Elektrolyten wiedergegeben.

4.1 Konstante Leistungszuführung

Die Versuche der konstanten Leistungszuführung machen deutlich, auf welchem Temperaturniveau welche Leistung zur Verfügung steht, ohne dass sich das Zellmodul erhitzt oder abkühlt. Es ist direkt erkennbar, dass bei steigender Temperatur eine höhere konstante Leistung erbracht werden kann. Das ist darauf zurückzuführen, dass der Temperaturgradient zwischen Kühlmittel und Zellen mit steigender Zelltemperatur vergrößert wird und durch Wärmeübertragungsmechanismen (vgl. Kap. 2.4) mehr Wärme abgeführt werden kann. Allerdings kann die Temperatur unabhängig davon, ob die Zelle höhere Temperaturen aushalten kann, nicht beliebig erhöht werden, um höhere konstante Leistungen erbringen zu können. Dies begründet sich darin, dass die Wärmeübertragungsmechanismen linear zum Temperaturgradienten Wärme abführen können. Jedoch ist die Wärmeentwicklung in den Zellen (vgl. Abbildung 4.1(a)) in diesen Leistungsbereichen maßgeblich durch den ohm'schen Widerstand bedingt, welcher wiederum quadratisch vom Strom abhängt (vgl. Kap.3.3.3)⁹⁴.

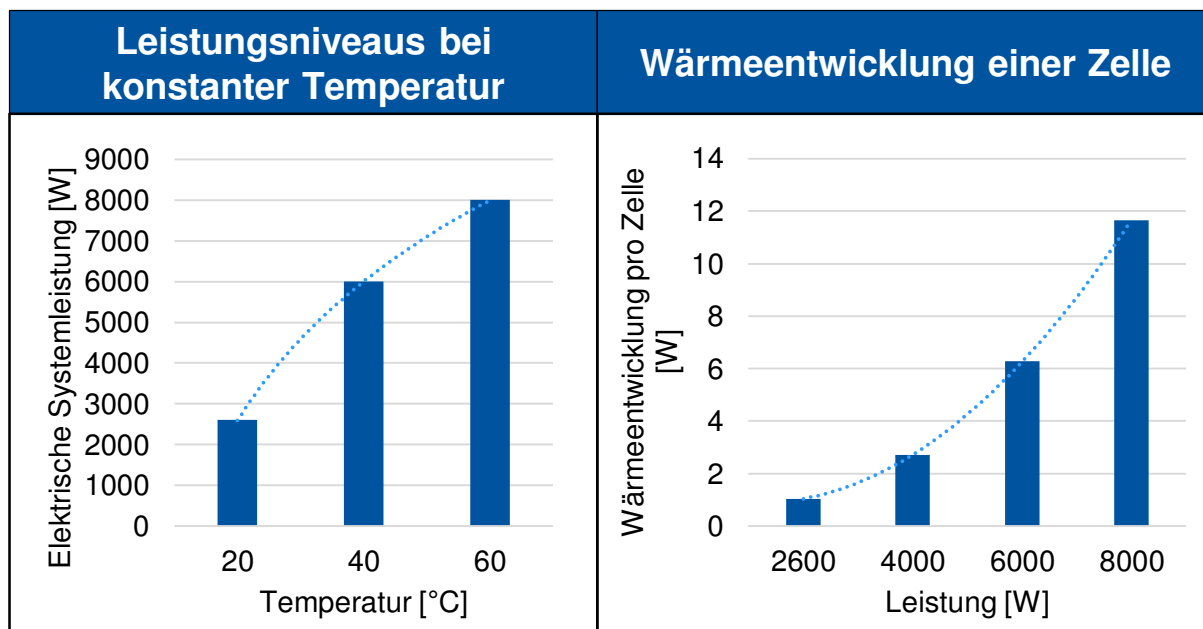


Abbildung 4.1 Leistungsniveaus bei konstanter Temperatur (a), Wärmeentwicklung einer Zelle (b)

⁹⁴ Vgl. Bahiraei et al. (A pseudo 3D electrochemical-thermal modeling and analysis of a lithium-ion battery for electric vehicle thermal management applications) 2017 S.13

Durch die, durch den hohen Strom bedingte, hohe Wärmeentwicklung wird das System bei zunehmender Leistung ineffizienter. Aus Abbildung 4.1(b) geht hervor, dass sich die Verlustleistung pro Zelle bei einer Leistungssteigerung von 6kW auf 8kW fast verdoppelt. Die Steigerung der Systemleistung von 6kW auf 8kW zieht eine Reduzierung des Zellwirkungsgrades von 97,6% auf 96,55% nach sich. Diese Werte sind relativ hoch, in der Literatur finden sich Werte um 90%⁹⁵.

Abbildung 4.1(a) zeigt das Potential der höheren Betriebstemperatur von 60°C gegenüber jener von 40°C. So kann bei 60°C die Leistung um 33%, bei gleichem Kühlmitteldurchfluss, gesteigert werden, so dass eine Leistung von 8kW abgerufen werden kann, hingegen bei 40°C nur 6kW. Deshalb ist die erhöhte Betriebstemperatur auf Systemebene effizienter, da der Kühlmittelstrom reduziert werden kann. Zu beachten ist trotzdem, dass die Wärme über den primären Kreislauf abgeführt werden muss. Da sich die Abwärme von 6kW auf 8kW Dauerleistung verdoppelt, muss in Zukunft die notwendige Leistung des Kompressors in der Simulation mitberücksichtigt werden, um eine quantitative Aussage über den Systemwirkungsgrad treffen zu können.

4.2 Belastung durch Leistungsspitzen

Zur Analyse der Reaktion des Systems auf kurze Belastungsspitzen wurde das System, ausgehend von unterschiedlichen konstanten Temperaturniveaus, durch kurze Leistungspulse belastet. Dazu wurde das System zunächst durch eine Leistung zum Halten des Temperaturniveaus (vgl. Kap. 4.1) belastet und anschließend ein Peak von 30kW bzw. 20kW eingesteuert. Dieser Peak wurde so lange gehalten, bis sich die Zellen auf eine Temperatur von 60°C erhitzt haben, oder leer sind. Anschließend wurde die Leistungszufuhr reduziert oder abgeschaltet.

Die Zeit, nach der die 30kW-Leistungsspitze abgeschaltet werden muss ist in jedem Fall kürzer als jene der 20kW-Leistungsspitze. Dies ist analog zur Erklärung der Wärmeentwicklung in Kap. 4.1 auf das quadratische Verhalten des ohm'schen Widerstandes zurückzuführen. Die Wärmeentwicklung beträgt ca. 200W für den 30kW Peak und 80W für den 20kW Peak pro Zelle. Die Wärmeströme entsprechen einem Vielfachen der Leistung, welche das Tab-Kühlungssystem abführen kann (vgl. Kap. 4.4).

Abbildung 4.2 zeigt eine solche Peakbelastung mit 30kW bzw. 20kW. Es ist direkt erkennbar, dass sich die Zellen durch die 30kW Belastung schneller erhitzen. Hervorzuheben ist auch, dass konventionelle Zellen bei 40°C abgeschaltet werden müssten, in Abbildung 4.2(a) bedeutet dies also für den 30kW Peak, dass die konventionellen Zellen nach ca. 35 Sekunden und einem DOD von 35% abgeschaltet werden müssen, hingegen die HiT-Cell erst nach ca. 80 Sekunden und einem DOD von 75%. Das entspricht einem durchschnittlichen Temperaturanstieg von 0,5K/s während des Peaks. Es kann also innerhalb eines Leistungspeaks mehr als die doppelte Energie aus dem Batteriespeicher gezogen werden. Für den 20kW Peak gilt

⁹⁵ Vgl. Statista (Wirkungsgrade* verschiedener Stromspeicher im Jahr 2012) 2019.

insbesondere, dass die Zellen leer sind, ehe sie die kritische Temperatur von 60°C erreichen. Das bedeutet also, dass das Modul vollständig entladen werden kann, ohne dass ein vorzeitiges Abschalten notwendig wäre. Die 40°C Grenze wird beim 20kW Peak jedoch schon nach ca. 85 Sekunden überschritten, wobei die Zellen erst einen DOD von 55% erreicht haben. Der Temperaturanstieg beträgt dabei 0,24K/s.

Abbildung 4.2(b) hebt hervor, dass auch bei einer Temperatur von 40°C vor dem Leistungspeak immer noch Potential besteht einen DOD von ca. 47% bei 30kW und 76% bei 20kW zu erreichen.

Die Kurven für den SOC befinden sich im Anhang Abbildung 5.6.

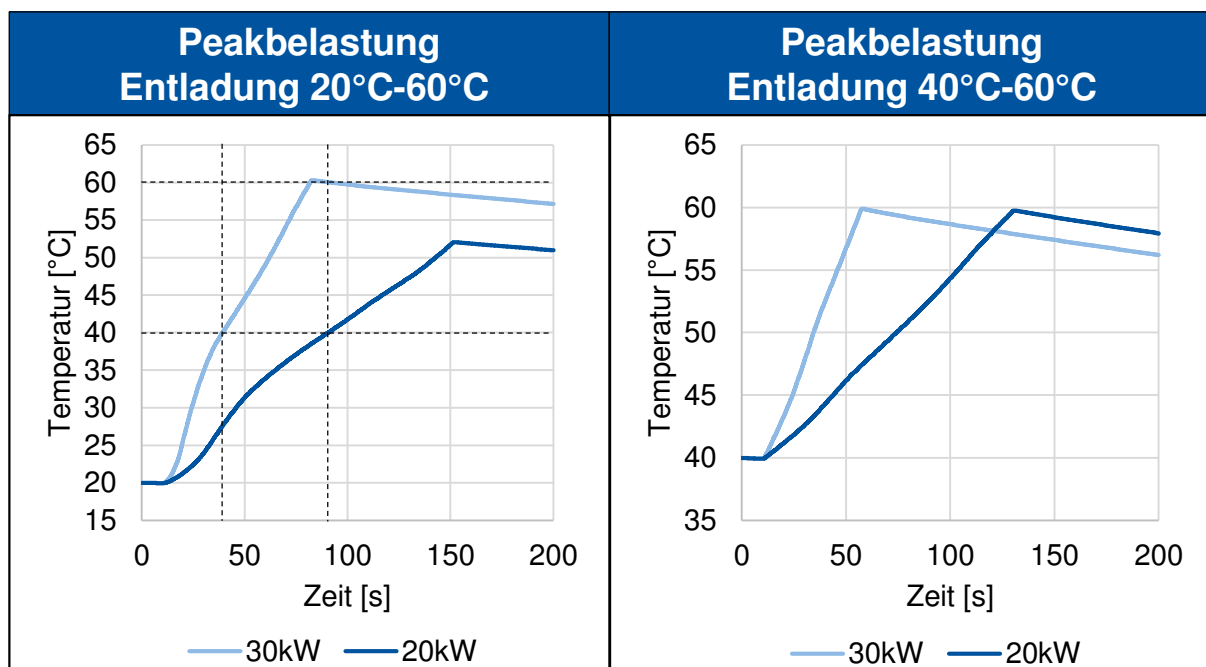


Abbildung 4.2 Peakbelastung Entladung 20°C-60°C (a), 40°C-60°C (b)

Die hohen spezifischen Leistungen können nur zu Lasten der Zelleffizienz genutzt werden. Auf Modulebene fallen für 20kW Systemleistung 1,9kW Verlustwärme an und für 30kW Leistung 4,8kW. So beträgt der Wirkungsgrad des Zellmoduls während des 20kW Peaks nur noch 90,4% und bei 30kW 84%. Für Hochstromanwendungen ist die Abnahme des Wirkungsgrades immer zu berücksichtigen und die Vor- und Nachteile dieser abzuwägen.

Für die Systemeffizienz muss die Leistung der Pumpe und des Kompressors im Kältekreislauf mit einberechnet werden. Unter maximaler Leistung verbraucht die Pumpe⁹⁶ 260W und der Kompressor 3,6kW⁹⁷. Dies sind Maximalwerte und übersteigen die notwendige Leistung zum Betrieb des Kühlsystems, da die maximale Durchflussrate der Kühlplatte nur 960l/min beträgt und die der Pumpe 6000l/min. Deshalb ist die tatsächliche Pumpen- und Kompressorleistung deutlich geringer als 260W bzw. 3,6kW. Für zukünftige Simulationen müssen zur Bestimmung

⁹⁶ Vgl. Valeo Commercial Vehicles Germany GmbH (Übersicht und EA SPump DEEN).

⁹⁷ Vgl. Moteg (eAir 2.1 DataSheet v1.1).

des Systemwirkungsgrades Leistungskennfelder für Pumpe und Kompressor in die Simulation eingebettet werden. Im „worst-case“ beträgt die Verlustenergie im 30kW Peak, mit Einbezug des Kühlsystems, mit 3,6kW für den Kompressor 0,26kW für die Pumpe und 4,8kW Wärmeverlustleistung der Zellen, 8,66kW. Damit ergibt sich der schlechteste Gesamtwirkungsgrad von 71%.

Die Betriebstemperatur hat ebenfalls großen Einfluss auf die Systemeffizienz. Abbildung 5.10 im Anhang zeigt die Wärmeentstehung bei verschiedenen Starttemperaturen im 30kW Peak. Zu Anfang steigt für beide Temperaturen die Wärmeentwicklung stark an. Dabei fällt auf, dass der Verlustwärmestrom bei einer Starttemperatur von 20°C bis zu dreimal höher sein kann als jener bei 40°C- Starttemperatur. Dies resultiert in einer starken Verringerung des Wirkungsgrades auf 68% im Bereich niedriger Temperaturen. Für die 40°C stabilisiert sich der Wärmestrom um 200W für den gesamten Peak. Im Gegensatz dazu fällt der Wärmestrom bei einer Starttemperatur von 20°C nach Erwärmung der Zelle wieder stark ab und gleicht sich der anderen Kurve an. Zum Ende der Kurve geringerer Starttemperatur steigt der Wärmestrom wieder an. Dies ist auf den erhöhten Innenwiderstand bei tiefer Entladung zurückzuführen. Im Betrieb muss abgewogen werden, ob der Leistungspeak zu Lasten der Systemeffizienz länger gehalten wird, oder ob hohe Leistungen zugunsten der Effizienz nur bei höheren Betriebstemperaturen gefahren werden.

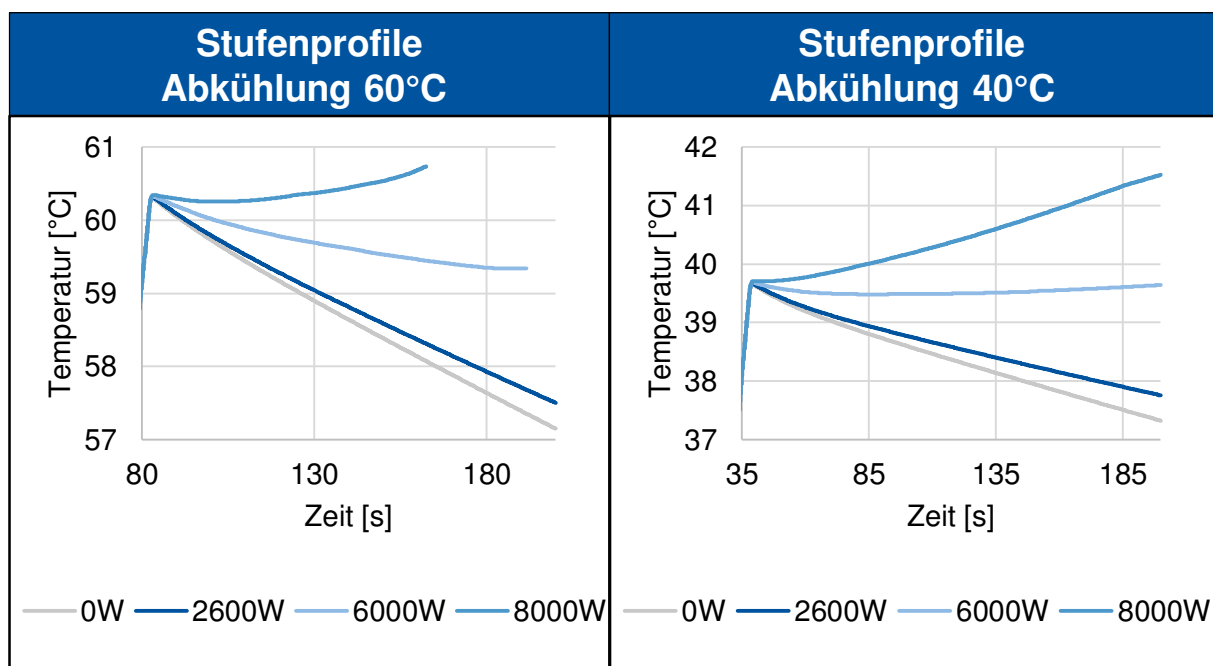


Abbildung 4.3 Abkühlung nach Belastung

Zur Analyse des Temperaturabfalls nach einer Leistungsspitze wurden verschiedene Stufenprofile gefahren. Dazu wurde das Zellmodul mit 30kW bis zum Erreichen der maximal zulässigen Temperatur und anschließend mit geringeren Leistungen von 8kW, 6kW und 2,6kW entladen. Die Peakleistungen enden nicht bei exakt 40°C bzw. 60°C, da aufgrund der Steigung des Peaks ein exaktes Erreichen der Zieltemperatur in der Simulation nicht möglich war. Um die Abkühlung unter Entladung zu vergleichen wurde in Abbildung 4.3 ebenfalls eine Abkühlkurve ohne Belastung in grau hinzugefügt. Der Temperaturanstieg der 8kW Kurve im 60°C Diagramm ist auf den erhöhten Innenwiderstand bei tiefer Entladung zurückzuführen. Aus

demselben Grund endet die Kurve vor den anderen. Der Vergleich der Abkühlung bei 60°C und 40°C zeigt deutlich, dass die Zellen bei 60°C schneller abkühlen als bei 40°C. Nach 100 Sekunden sind die Zellen bei 60°C ohne zusätzliche Belastung um 2,6K abgekühlt, hingegen bei 40°C nur um 1,7K. Gleichzeitig zeigt Abbildung 4.3, dass bei höherer Temperatur eine höhere Leistung abgeführt werden kann, ohne dass sich die Zellen weiter erhitzen.

Zuletzt wurde das Zellmodul mit zwei Ladungsprofilen von 30kW bzw. 20kW geladen bis die maximal zulässige Zelltemperatur erreicht wurde oder die Zellen vollgeladen sind. Zu Anfang hatte das Zellmodul einen Ladungszustand von 20% SOC. Auf eine weitere Entladung des Moduls wurde verzichtet, um die hohen Innenwiderstände und die damit einhergehende hohe Wärmeentwicklung zu vermeiden. Abbildung 4.4 zeigt die Temperaturkurven der Zellen. Es ist zu erkennen, dass sich die Zellen im Vergleich zur Entladung deutlich langsamer aufheizen. Die reduzierte Aufheizung des Zellmoduls beim Ladevorgang ist auf die reversiblen Wärmeverluste zurückzuführen, welche einen Teil der entstehenden Wärme beim Laden aufnehmen. Die kritische Temperatur von 60°C wurde beim Ladevorgang bei einer Starttemperatur von 20°C weder mit 20kW noch mit 30kW überschritten. Wird bei 40°C gestartet kann das Zellmodul mit 20kW immer noch vollgeladen werden und mit 30kW auf einen SOC von 78% geladen werden. Hingegen kann das Zellmodul bei einer Grenze von 40°C mit 30kW nur auf einen SOC von 56% mit 30kW bzw. auf 80% mit 20kW geladen werden.

Die SOC-Kurven befinden sich im Anhang Abbildung 5.7.

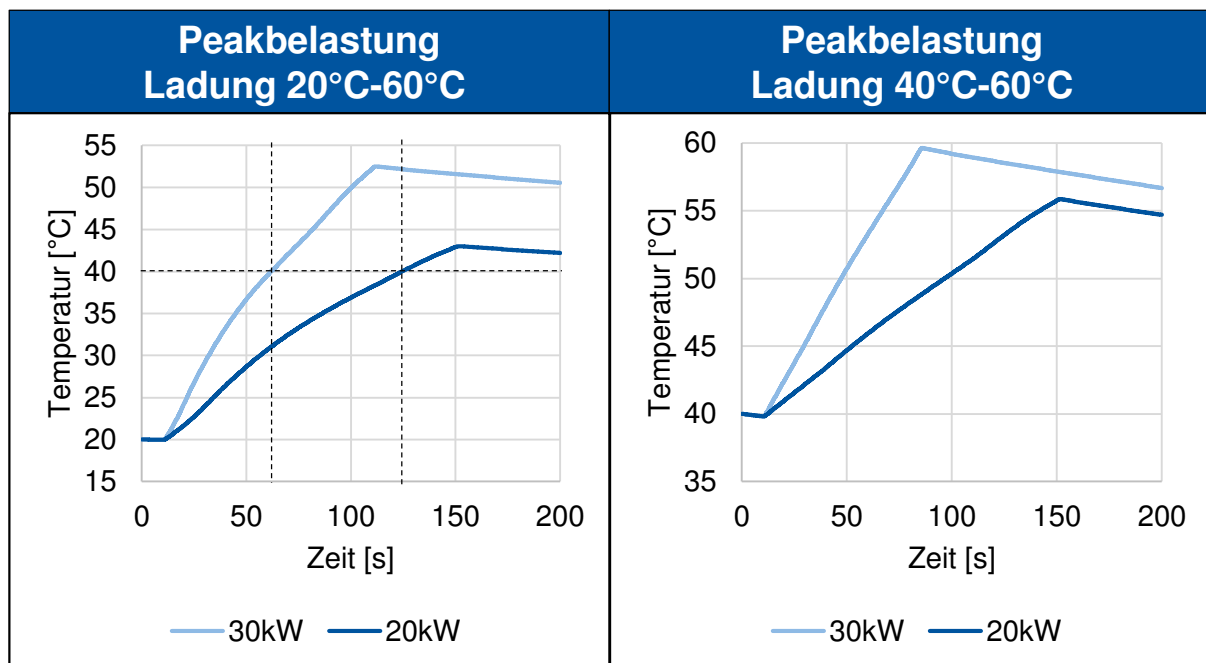


Abbildung 4.4 Peakbelastung Ladung 20°C-60°C (a), 40°C-60°C (b)

4.3 Lastprofil des ISEA der RWTH Aachen

Mittels des vom ISEA der RWTH Aachen entwickelten Lastzyklus wurde das Verhalten des Zellmoduls in einem realitätsnahen Lastprofil untersucht. Dabei wurden zwei unterschiedliche Starttemperaturen ausgewählt, da aufgrund der Kürze des Zyklus eine Starttemperatur von 20°C nicht ausreichte, um die kritische Grenze von 60°C zu überschreiten. Abbildung 4.5 zeigt den Temperaturverlauf der einzelnen Zellen in Abhängigkeit der Zeit einmal mit Starttemperatur 20°C (Versuch a) und 40°C (Versuch b).

Der Versuch wurde beendet, wenn entweder die Zellen eine Temperatur von 60°C überschritten oder leergelaufen sind. In beiden Kurven war Letzteres der Fall. Dabei fällt auf, dass die Kurven nicht zur gleichen Zeit enden, sondern der Versuch mit der höheren Starttemperatur und damit auch der höheren mittleren Temperatur 38sek bzw. 7% länger andauert. Dabei können zusätzliche 45Wh aus der Batterie entnommen werden. Zurückzuführen ist dies auf den temperaturabhängigen Zellinnenwiderstand, welcher mit zunehmender Temperatur kleiner wird.

Auf die Realität angewandt bedeutet dies eine höhere Reichweite für den Versuch mit höherer Temperatur.

Nach ca. 270 Sekunden und einem DOD von 55% wird in Simulation (a) die erste kritische Temperatur von 40°C überschritten, so dass konventionelle Zellen hier den Fahrzyklus abbrechen müssen. Da in diesem Zyklus die Maximaltemperatur etwa 50°C beträgt und auch bei erhöhter Starttemperatur die zweite kritische Temperatur von 60°C nicht überschritten, sondern nur angenähert wird, sollte der Lastzyklus überarbeitet werden.

Eine Gesamtlänge von ca. 10 Minuten ist nicht ausreichend für eine abgesicherte Aussage, ob das Zellmodul in einem Fahrzeug bestehen kann. Bei der Erstellung eines neuen Fahrzyklus sollte insbesondere darauf geachtet werden, dass der kumulierte Energieverlust niemals die Kapazität des Moduls von 1kWh überschreitet. Des Weiteren muss im neuen Zyklus die Verlustwärme berücksichtigt werden, weil insbesondere bei hohen C-Raten der Wirkungsgrad zunehmend schlechter wird. Auch sollten die Zellen nicht bis 100% DOD entladen werden, denn bei tiefen Ladungszuständen wird der Innenwiderstand so hoch, dass bei hohen Strömen deutlich mehr Verlustwärme entsteht.

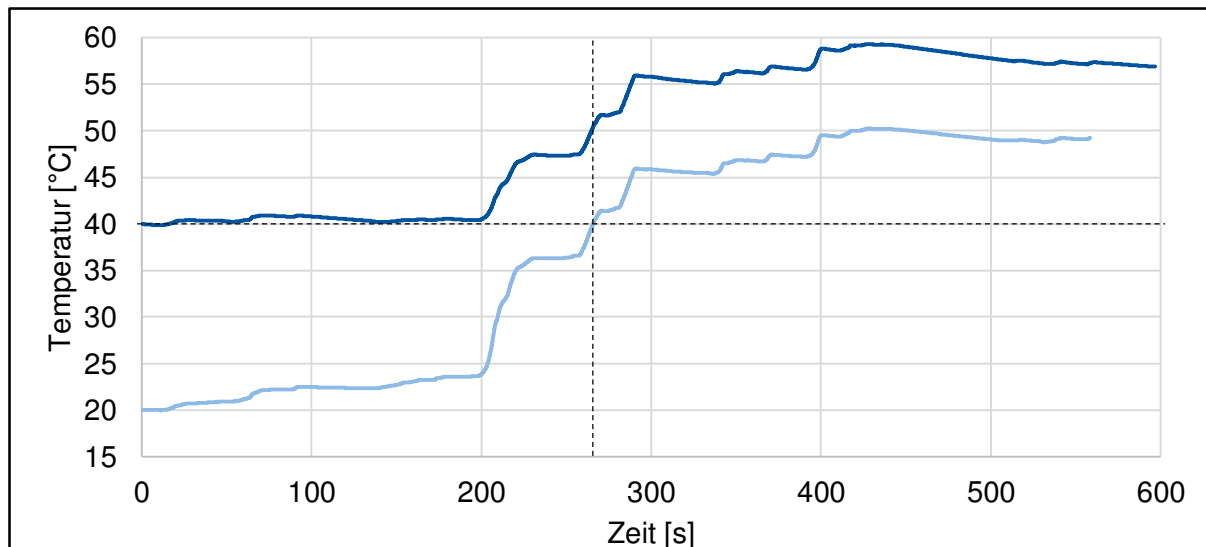


Abbildung 4.5 Temperaturverlauf im Lastzyklus mit Starttemperatur 20°C(a) und 40°C(b)

In Anbetracht der Wirkungsgrade aus Kap. 4.1 und 4.2 sollte das Lastprofil, konservativ abgeschätzt, nicht mehr als 84% der Nennkapazität verbrauchen, um die Verlustwärme zu berücksichtigen. Zusätzlich sollte ein DOD von 90% nicht unterschritten werden, um die hochohmigen Innenwiderstände bei tiefer Entladung zu vermeiden.

4.4 Wirkung der Tab-Kühlung

Um die Effektivität der Tab-Kühlung zu bestimmen, werden ausgewählte Lastfälle aus den vorherigen Kapiteln unter adiabaten Bedingungen wiederholt und anschließend mit den Ergebnissen bei eingeschalteter Kühlung verglichen. Für alle Durchläufe gilt dabei, dass die Temperatur mit Kühlung stets unter der Temperatur ohne Kühlung liegt.

Abbildung 4.6 vergleicht Temperaturverläufe aus der Simulation einmal mit eingeschalteter Kühlung und einmal im adiabaten Zustand. Abbildung 4.6(a) zeigt, dass bei einer Leistung von 8kW die Tab-Kühlung den gesamten Verlustwärmestrom kompensieren kann. Im adiabaten Fall jedoch erwärmen sich die Zellen um 2,67K/100s bei 60°C. Wird die Betriebstemperatur auf 20°C gesenkt, erhitzen sich die Zellen mit 4K/100s deutlich schneller, hingegen verhält die Temperatur sich bei 40°C ähnlich wie bei 60°C (siehe Abbildung 5.9 im Anhang). Analog gilt dies auch für die anderen konstanten Leistungen aus Kap. 4.1. In Anbetracht von Abbildung 4.6 lässt sich aus Abbildung 4.1(b) direkt die Kühlleistung der Tab-Kühlung pro Zelle ablesen, denn für die stationären Temperaturniveaus, entspricht der Verlustwärmestrom genau dem Wärmestrom, der über die Tab-Kühlung abgeführt wird. Für eine Temperatur von 60°C gilt also, dass ein Wärmestrom von 11,5W pro Zelle abgeführt werden kann, hingegen bei 40°C nur 6,1W. Somit arbeitet das Kühlsystem bei 60°C fast doppelt so effektiv und kann seine Leistung signifikant verringern. Durch den hohen Wärmewiderstand des Gappads wird über das Anoden- und Kathodentab ungefähr der gleiche Wärmestrom abgeführt. Vor dem Hintergrund, dass die Energie zum Betrieb des Kühlsystems bei BEVs ebenfalls aus der Batterie entnommen wird, steigert dies im Endeffekt die Reichweite des Fahrzeuges. Der abgeführte

Wärmestrom ist ausschließlich von der Betriebstemperatur abhängig, so dass es für Hochleistungspeaks und die damit einhergehende hohe Wärmeentwicklung während des Peaks praktisch keinen Unterschied macht, ob die Kühlung an oder ausgeschaltet ist (siehe Abbildung 4.6(b)). Dies liegt daran, dass der Verlustwärmestrom pro Zelle während des 30kW Peaks ca. 200W beträgt, über die Tab-Kühlung aber nur proportional zur Temperatur für das Spektrum von 20°C-60°C nur 1,5W-11,5W abgeführt werden können. Jedoch ist die thermische Speicherkapazität bei erhöhter Betriebstemperatur deutlich höher, wodurch längere Peakleistungen möglich sind. Ebenfalls ist zu erkennen, dass die Zellen nur relativ langsam wieder abgekühlt werden. Für eine schnellere Abkühlung muss die Kühlung weiter optimiert werden (siehe Kap. 4.5).

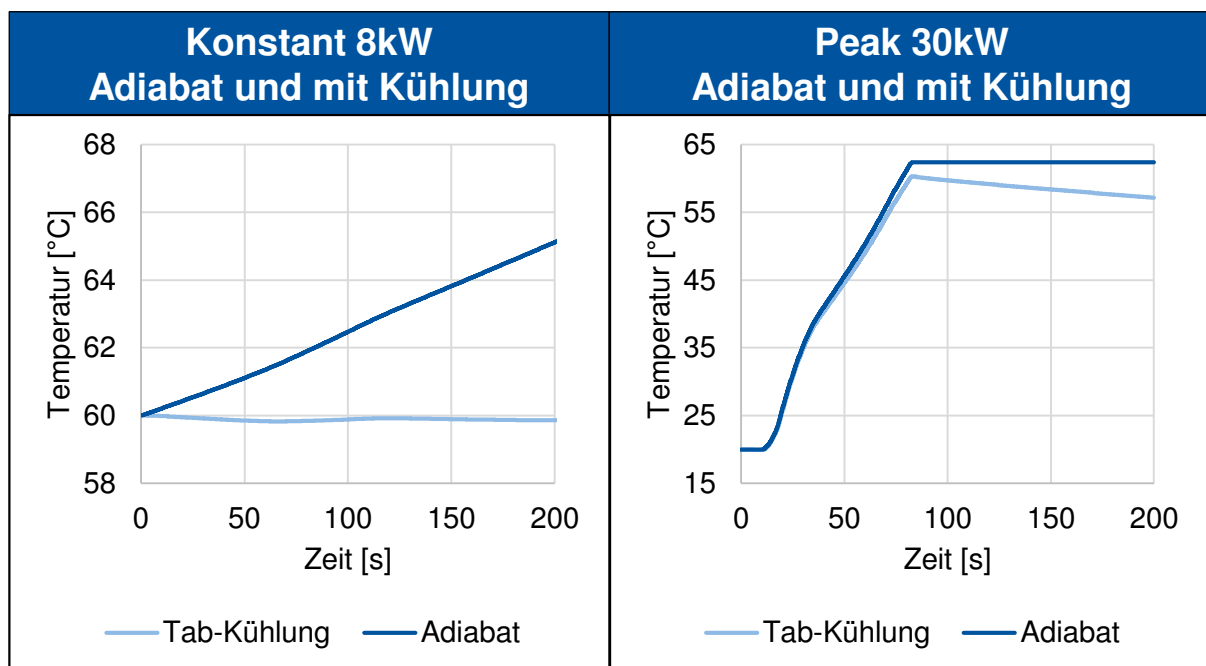


Abbildung 4.6 Temperaturvergleich adiabat und mit Kühlung: Konstant 8kW (a), Peak 30kW (b)

Für besonders hohe Ströme trägt der ohm'sche Widerstand in den Tabs selbst soweit zur Erwärmung bei, dass dieser insbesondere bei niedrigen Temperaturen nicht vernachlässigt werden sollte, da die Erwärmung der Tabs bei niedrigen Temperaturen einen großen Teil der möglichen abführbaren Wärme ausmacht. Der Verlauf des Verlustwärmestroms eines Tabs ist in Abbildung 5.11 im Anhang zu sehen. Zwar ist der Anteil an der Wärmeentwicklung bei 30kW Systemleistung mit 0,8W pro Tab im Vergleich zur Wärmeentwicklung von 200W in der Zelle immer noch sehr gering, jedoch muss beachtet werden, dass bei 40°C 6,1W über zwei Tabs abgeführt werden können und damit der Anteil der Tabs bei 26% liegt. Insgesamt tragen alle 48 Tabs zusammen einen Wärmestrom von 38,4W zur Zellerwärmung bei, während der abgeführte Wärmestrom bei 40°C 146,4W beträgt. Aktuell ist die Aufteilung des Wärmestroms der Kathode und Anode gleichmäßig verteilt. In Zukunft sollte das elektrische Modell der Tabs detaillierter werden. Dies ist insbesondere bei der Vergrößerung der Tabs zu berücksichtigen, weil dadurch der ohm'sche Widerstand steigt und die durch die Vergrößerung erhoffte bessere Wärmeleitung durch den erhöhten Verlustwärmestrom reduziert werden kann.

4.5 Sensitivitätsanalyse

Im Zuge der Sensitivitätsanalyse sollen Möglichkeiten zur Optimierung der Kühlung aufgedeckt werden, indem die kritischen Parameter hervorgehoben werden, welche den Wärmestrom hemmen. Außerdem soll überprüft werden, inwiefern die aus Literatur recherchierten Parameter einen Einfluss auf die Ergebnisse haben.

Während der Sensitivitätsanalyse wurde eine Starttemperatur von 40°C gewählt und die Leistung gemessen, bei der die Temperatur konstant bleibt. Die Referenzleistung, bei welcher die Parameter aller anderen Simulationen verwendet werden liegt dabei bei 6000W auf Systemebene. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.7 zu sehen.

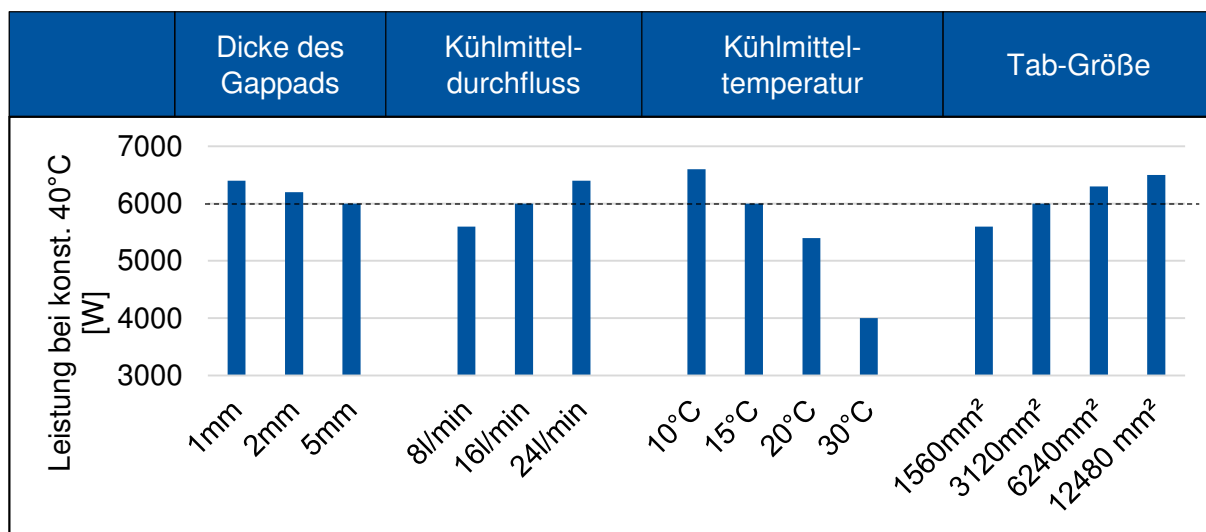


Abbildung 4.7 Sensitivitätsanalyse zur Optimierung

Den Ergebnissen nach zu urteilen, hat die Senkung der Kühlmitteltemperatur den größten Einfluss auf die Kühlleistung. So kann durch eine Senkung der Kühlmitteltemperatur von 15°C auf 10°C bei gleicher Pumpenleistung 10% mehr Leistung aus dem System entnommen werden. Hier muss jedoch die Effizienz des Primärkreislaufes mit einbezogen werden, da eine Senkung der Kühlmitteltemperatur um 5K einen wesentlichen Einfluss auf die Leistung des Kompressors aus dem Primärkreislauf mit Kältemittel hat. Zu erkennen ist auch, dass sich die abführbare Leistung bei konstanter Temperatur von 40°C um 50% reduziert, sollte sich das Kühlmittel von 15°C auf 30°C erwärmen. Insbesondere ist dies im Kfz in warmen Umgebungen zu beachten, da dort eine wesentlich höhere Kühlleistung erforderlich ist, um das Kühlmittel auf 15°C zu halten. Die Variation des Parameters ist im betrachteten Bereich weitestgehend linear, was eine Inter- und Extrapolation auf andere Kühlmitteltemperaturen zulässt. Dabei gilt, dass die Änderung der Kühlmitteltemperatur um 1K einen Unterschied in der Leistungsabfuhr von 120W ausmacht.

Ebenfalls einen großen Einfluss auf die Kühlung hat der Kühlmitteldurchfluss durch die Kühlplatte. Dieser Parameter ist im Betrieb schnell durch Änderung der Pumpendrehzahl, bei geeigneter Pumpenauswahl, stufenlos an den vorliegenden Lastfall anpassbar. Optimal wäre für reale Anwendungen eine prädiktive Steuerung der Pumpe, wodurch der kommende Lastfall erkannt werden kann, bevor dieser vorliegt. Dadurch werden die Zellen vor starken Belastungen heruntergekühlt, um bei Belastung nicht die kritische Temperatur zu überschreiten. Dabei

sollte jedoch bedacht werden, dass bei geringerer Temperatur der Innenwiderstand steigt. Es sollte deshalb aus Gründen der Effizienz nach Möglichkeit nur so wenig wie möglich und so viel wie nötig gekühlt werden. Außerdem muss auf die Fluidmechanik der Kühlplatte Rücksicht genommen werden, denn die aktuell verwendete Kühlplatte ist auf einen maximalen Volumenstrom von 16l/min ausgelegt, so dass die 24l/min in der Realität durch diese Kühlplatte nicht erreicht werden können. Jedoch kann durch die Steigerung des Kühlmitteldurchflusses um 1l/min die Systemleistung um 50W gesteigert werden.

Ein baulich bedingter Optimierungsfaktor ist die Größe der Tabs. Durch eine Verdoppelung der Tab-Größe resultiert die Möglichkeit einer Leistungssteigerung um 300W auf Systemebene. Allerdings führt eine Vervielfachung nur zu einer möglichen Leistungssteigerung um 500W. Durch die zunehmende Größe der Tabs und den dadurch entstehenden geometrischen Problemen in der Unterbringung der großen Fläche und der gegenübergestellten vergleichsweise geringen Leistungssteigerung, sollte die Vergrößerung der Tabs nicht unbedingt in Erwägung gezogen werden. Hingegen führt eine Halbierung der Tab-Größe zu einem Leistungsverlust von 400W bzw. 7%.

Durch die Verkleinerung der Gappaddicke von 5mm auf 1,5mm kann durch relativ geringen Aufwand die Leistung um ca. 7% gesteigert werden. Eine weitere Verkleinerung ist fraglich, da geringen Dicken nicht der Wärmeleitwiderstand dominiert, sondern der Kontaktwiderstand, welcher auch durch weitere Verdünnung nicht reduziert werden kann. Zudem wäre eine weitere Verdünnung aufgrund von Isolationsabständen und der Fertigung kritisch zu sehen.

Im aktuellen Modell hat die Erhöhung der Zellkapazität keinen Einfluss auf die Wärmeentwicklung. So wird bei gleicher Systemleistung die gleiche Verlustwärme frei. Jedoch sinkt die spezifische Systemleistung um den Faktor, um den die Zellkapazität erhöht wurde. Für eine Anpassung des Modells auf höhere Kapazitäten muss das elektrische Zellmodell überarbeitet werden, sowie die thermischen Massen aktualisiert werden.

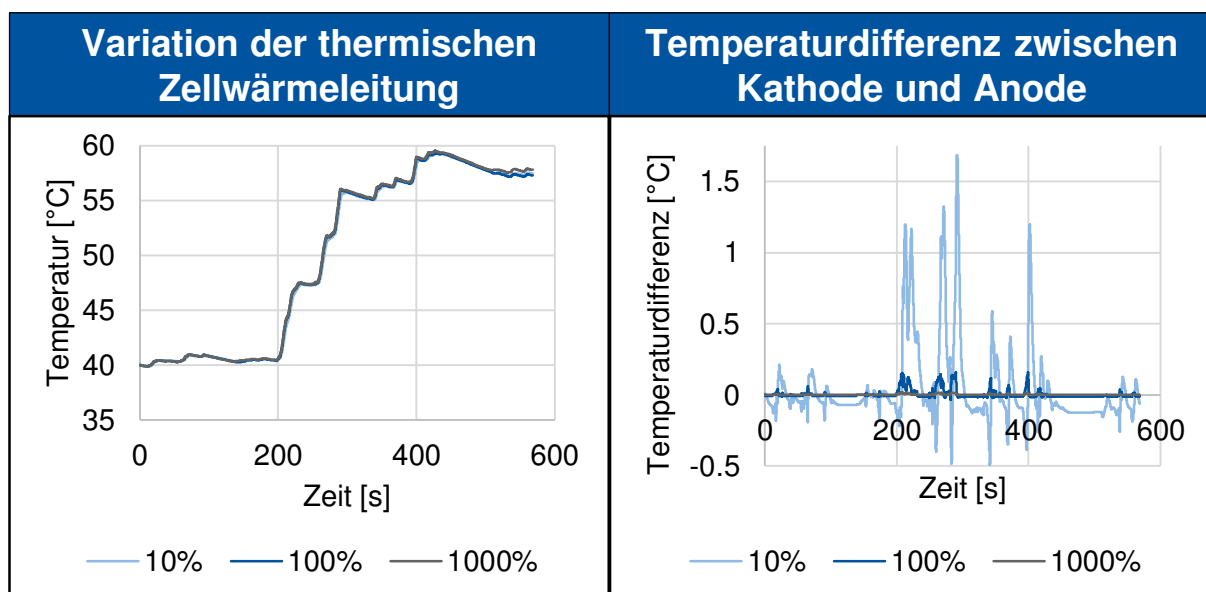


Abbildung 4.8 Variation der thermischen Zellwärmeleitung: Zellinnentemperatur(a), Temperaturdifferenz der Tabs(b)

Zuletzt soll der Einfluss der recherchierten Parameter auf die Ergebnisse geklärt werden. Abbildung 4.8(a) zeigt die Veränderung der Zellinnentemperatur, wobei die innere Zellwärmeleitung von 100% auf 10% bzw. 1000% geändert wurde. Es ist zu sehen, dass die Zellinnentemperatur durch die Variation während des Lastzyklus relativ wenig Abweichung erfährt. Hingegen ist der Unterschied in Bezug auf die Temperaturdifferenz der Tabs (siehe Abbildung 4.8(b)) deutlich größer. Bei 1000% der Wärmeleitung sind die Tabs nahezu immer gleich warm. Bei 10% jedoch ist der maximale Unterschied mit über $1,5^{\circ}\text{C}$ wesentlich größer. Der Unterschied wird vor allem im Bereich hoher C-Raten und der damit einhergehenden großen Wärmeentwicklung größer. Unter adiabaten Bedingungen ist der Temperaturunterschied nur geringfügig höher. Die äußere Koppelung der Wärmeleitung über das Gappad ist also für geringe Temperaturgradienten zu vernachlässigen. Daher ist es wichtig diesen Parameter durch geeignete Versuche, wie z.B. durch Messung des Wärmewiderstandes von Kathode zu Anode zu bestimmen.

Ähnlich wie bei der Variation der thermischen Zellwärmeleitung, verhält sich die Variation der Wärmeentstehungsaufteilung von Kathode und Anode. Die vier Kurven zeigen die Temperaturen bei verschiedenen prozentualen Anteilen der Wärmeentstehung in der Kathode. Auf Basis der Literaturrecherche in Kap. 3.3.3 wurde in der Simulation ein Verhältnis von 0,456/0,544 Kathode/Anode gewählt und in diesem Teil variiert. Dabei ist der Wert in der Legende aus Abbildung 4.9 der Anteil der Kathode. Auch hier ist zu erkennen, dass die Zellinnentemperatur nicht stark variiert. Dies ist auf die Gesamtenergiebilanz zurückzuführen, weil insgesamt immer noch die gleiche Energie in der Zelle frei wird und nur umverteilt wird. Da im verwendeten Modell die Wärmeleitung zwischen den Massen sehr gut ist, führt dies dazu, dass die Wärmeaufteilung nur einen geringen Einfluss auf die Zellinnentemperatur hat.

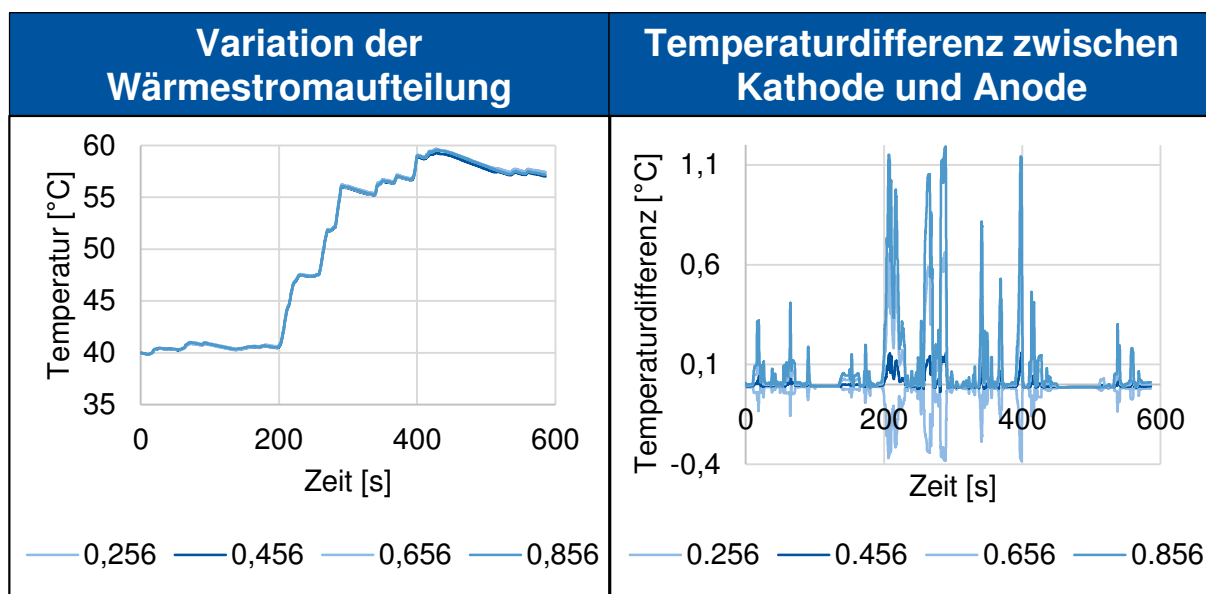


Abbildung 4.9 Variation der Wärmestromaufteilung

Wenn die Parameter so kombiniert werden, dass ein maximaler Temperaturgradient zwischen Anode und Kathode entsteht, wird der Unterschied zwischen den Zellinnentemperaturen größer (siehe Abbildung 5.8 Anhang). Dadurch wird gezeigt, dass durch die Anpassung der Parameter für Wärmeaufteilung und thermischen Zellinnenwiderstand durch reale Messdaten

das Modell hinsichtlich Dynamik optimiert werden kann, da insbesondere im Bereich von kurzen hohen Leistungsspitzen der Zellkern weniger aufgeheizt wird, weil die Wärme vorher über die Elektroden abgeführt wird.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Inhalt dieser Arbeit ist die simulative Analyse des Thermomanagements eines Hochleistungsbatteriesystems mittels eines 1D-Modells. Die maximal zulässige Betriebstemperatur der verwendeten LFP-Zellen beträgt 60°C. Das hohe Potential dieser Betriebstemperatur im Hinblick auf hohe spezifische Leistungen bis 30C soll gezeigt werden.

Zuerst wurde ein Überblick über die Lithium-Ionen-Zelltechnologie gegeben, wobei auf den Aufbau, das elektrische und thermische Verhalten und auf Alterungsmechanismen eingegangen wurde. Anschließend wurde auf die Bauweise von elektrischen Energiespeichern eingegangen und Kühlungskonzepte sowohl auf Fahrzeugebene als auch auf Zellebene vorgestellt. Danach erfolgte die Herleitung der Grundlagen zur Wärmeübertragung und die Erklärung von Lastzyklen. Zum Abschluss des ersten Teils werden verschiedene Ansätze zur Batteriesimulation aufgezeigt.

Danach wurde ein Zellmodell definiert, welches den Anforderungen von 1kWh Kapazität und einer maximalen Spannung von 60V entspricht. Auf Basis dieses Moduls wurde dann ein Simulationsmodell entwickelt, welches in der Arbeit inklusive der verwendeten Parameter, erklärt und hergeleitet wird.

Die Ergebnisse wurden insbesondere im Hinblick auf die Erhöhung der maximalen Betriebstemperatur von 40°C auf 60°C und die daraus resultierenden Unterschiede hinsichtlich des Kühlaufwandes ausgewertet.

Die Dauerleistungssimulationen haben gezeigt, dass durch die erhöhte Betriebstemperatur eine Systemleistung von 8kW abgegeben werden kann, ohne dass sich das Zellmodul weiter erhitzt. Dies entspricht einer Leistungssteigerung um 33%, bei gleicher Leistung des Sekundärkühlkreislaufes im Vergleich zur Betriebstemperatur von 40°C.

Die Simulationen der Peakbelastungen ergaben, dass bei einer maximalen Temperatur von 60°C ca. doppelt so viel Energie entnommen werden kann wie bei 40°C. Das bedeutet insbesondere, dass das Zellmodul in vielen Belastungsfällen innerhalb eines Peaks komplett geladen oder entladen werden kann.

Ebenfalls ist eine Erhöhung der Zelleffizienz zu verzeichnen. Besonders wichtig ist dies im Hochstrombereich, da die hohen Ströme mit großen Effizienzeinbußen einhergehen. Im Hochleistungsbereich ist die Wärmeentwicklung bei 20°C fast dreimal so hoch wie bei 40°C. Für die Effizienz bedeutet dies bei einer Belastung von 30C einen Wirkungsgrad von 68% bei 20°C und 84% bei 40°C.

Durch die Tab-Kühlung konnte mit dem verwendeten Lastprofil gezeigt werden, dass die kritische Zelltemperatur von 60°C nicht überschritten wird, jedoch die erhöhte Temperatur einen positiven Einfluss auf die Reichweite des Fahrzeuges hat.

Im weiteren Verlauf des Projektes muss das Simulationsmodell durch geeignete Versuche validiert werden. Dazu können einige Lastprofile dieser Arbeit ausgewählt und Temperatursensoren an äquivalenten Stellen zum Simulationsmodell an den Zellen angebracht werden. Anschließend werden die Temperaturverläufe aus der Simulation mit denen aus den Versuchen

abgeglichen. Dazu bieten sich die Tabs an, da diese im Vergleich zu den anderen Zellkomponenten relativ leicht zugänglich sind und im Modell eigene Massen haben.

Außerdem sollten die in dieser Simulation übernommenen Parameter aus anderen Projekten und aus der Literatur durch gemessene Realwerte ersetzt werden. Besonders wichtig ist dabei die Bestimmung des Innenwiderstandskennfeldes der verwendeten Zellen. Es wurde gezeigt, dass die Aufteilung der Wärmeentwicklung an Kathode und Anode und der thermische Widerstand zwischen Kathode und Anode nur einen geringen Einfluss auf die Zelltemperatur haben. Jedoch sollte nach Möglichkeit ein genaues Modell für die Wärmestromaufteilung auf Basis eines Kennfeldes wie in Abbildung 5.5 erstellt werden.

Eine Effizienzanalyse auf Gesamtsystemebene lässt das Simulationsmodell, aufgrund des fehlenden Modells des primären Kühlkreislaufes noch nicht zu. Dazu muss ein geeignetes Modell dieses Kühlkreislaufes gebildet werden und insbesondere Leistungskennfelder der Pumpe und des Kompressors implementiert werden.

Aufgrund der Kürze des verwendeten Lastzyklus lässt die Verwendung von diesem noch keine abgesicherte Aussage auf die Fahrzeugtauglichkeit in der Realität zu. Um dies zu überprüfen muss ein längerer Lastzyklus, welcher speziell auf dieses Zellmodul ausgerichtet ist entwickelt werden. Dabei ist sowohl auf die Gesamtkapazität und Verlustwärmeströme, als auch auf die hohen spezifischen Leistungen Rücksicht zu nehmen.

Des Weiteren ist für die Fahrzeugtauglichkeit ein Alterungsmodell zu implementieren um die Zellen auf Zyklfestigkeit zu testen, denn aufgrund der erhöhten Betriebstemperatur stellen sich zusätzliche Alterungseffekte ein, welche durch ein geeignetes Alterungsmodell im nächsten Schritt berücksichtigt werden sollten.

V Literaturverzeichnis

Alshaer, W. G; Nada, S. A; Rady, M; Le Bot, C. (Numerical investigations of using carbon foam/PCM/Nano carbon tubes composites in thermal management of electronic equipment):

Numerical investigations of using carbon foam/PCM/Nano carbon tubes composites in thermal management of electronic equipment, 02.2015

Al-Zareer, M; Dincer, I; Rosen, M. A. (Novel thermal management system using boiling cooling for high-powered lithium-ion battery packs for hybrid electric vehicles):

Novel thermal management system using boiling cooling for high-powered lithium-ion battery packs for hybrid electric vehicles. In: Journal of Power Sources, Jg. 363, 2017, S. 291–303

Argonne National Laboratory (Modeling the Performance and Cost of Lithium-Ion Batteries for Electric-Drive Vehicles):

Modeling the Performance and Cost of Lithium-Ion Batteries for Electric-Drive Vehicles

Audi (Audi e-tron - Batterie und Sicherheit):

Audi e-tron - Batterie und Sicherheit. <https://www.audi-technology-portal.de/de/mobilitaet-der-zukunft/audi-future-lab-tron-experience/audi-e-tron-batterie-und-sicherheit>. Abruf 20.07.2019

Bahiraei, F; Ghalkhani, M; Fartaj, A; Nazri, G.-A. (A pseudo 3D electrochemical-thermal modeling and analysis of a lithium-ion battery for electric vehicle thermal management applications):

A pseudo 3D electrochemical-thermal modeling and analysis of a lithium-ion battery for electric vehicle thermal management applications. In: APPLIED THERMAL ENGINEERING, Jg. 125, 2017, S. 904–918

Bai, F.-f; Chen, M.-b; Song, W.-j; Li, Y; Feng, Z.-p; Li, Y. (Thermal performance of pouch Lithium-ion battery module cooled by phase change materials):

Thermal performance of pouch Lithium-ion battery module cooled by phase change materials. In: LEVERAGING ENERGY TECHNOLOGIES AND POLICY OPTIONS FOR LOW CARBON CITIES, Jg. 158, 2019, S. 3682–3689

Bajura, R. A; et al. (Journal of Fluids Engineering):

Journal of Fluids Engineering. In: Journal of Fluids Engineering 1976, Nr. 98

Böckh, P. (Wärmeübertragung):

Wärmeübertragung. Grundlagen und Praxis, 7. Aufl. 2017 Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017

Chan, C.C; Lo, E.W.C; Weixiang, S. (The available capacity computation model based on artificial neural network for lead–acid batteries in electric vehicles):

The available capacity computation model based on artificial neural network for lead–

acid batteries in electric vehicles. In: Journal of Power Sources, Jg. 87, 2000, Nr. 1-2Nr. , S. 201–204

Chan, H. L. (Hrsg.)2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37077):

2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37077). 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings
23-27 Jan. 2000: IEEE 2000

Chemistry World (Battery builders get the cobalt blues):

Battery builders get the cobalt blues

Daimler AG (Li-Ionen-Batteriematerialien: Kooperation mit Sila Nanotechnologies):

Li-Ionen-Batteriematerialien: Kooperation mit Sila Nanotechnologies. <https://www.daimler.com/innovation/sila-nanotechnologies.html>

Dees, D. W; Battaglia, V. S; Bélanger, A. (Electrochemical modeling of lithium polymer batteries):

Electrochemical modeling of lithium polymer batteries. In: Journal of Power Sources 202, Nr. 110, S. 310–320

Deng, Y; Feng, C; E, J; Zhu, H; Chen, J; Wen, M; Yin, H. (Effects of different coolants and cooling strategies on the cooling performance of the power lithium ion battery system: A review):

Effects of different coolants and cooling strategies on the cooling performance of the power lithium ion battery system: A review. In: APPLIED THERMAL ENGINEERING, Jg. 142, 2018, S. 10–29

DGUV (Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltsystemen):

Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltsystemen, S. 1–80

Dincer, I; Hamut, H. S; Javani N. (Thermal Management of Electric Vehicle Battery Systems):

Thermal Management of Electric Vehicle Battery Systems , 2017

Dorn, R; Schwartz Reiner; Steurich, B. (Batteriemanagementsystem):

Batteriemanagementsystem. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 177–187

ecomento (Tesla Model S):

Tesla Model S. <https://ecomento.de/modelle/tesla-model-s/>

Edison Handelsblatt (Unternehmen baut BMW i3 mit 700 Kilometern Reichweite):

Unternehmen baut BMW i3 mit 700 Kilometern Reichweite. <https://edison.handelsblatt.com/erleben/unternehmen-baut-bmw-i3-mit-700-kilometern-reichweite/23051812.html>. Abruf 20.07.2019

electrive (Audi e-tron: Alle Details zu Ladetechnik und Batterie):

Audi e-tron: Alle Details zu Ladetechnik und Batterie. In: [electrive.net](https://www.electrive.net)

Europäisches Parlament und Rat (Verordnung (EU) Nr. 168/2013):

Verordnung (EU) Nr. 168/2013, 15.01.2013

Europäisches Parlament und Rat (Verordnung (EU) 2017/1153):

Verordnung (EU) 2017/1153, 2017

Europäisches Parlament und Rat (Verordnung (EU) Nr. 2018/2043):

Verordnung (EU) Nr. 2018/2043, 18.12.2018

Fleckenstein, M. (Modellbasiertes Thermomanagement für Li-Ionen-Zellen in elektrischen Fahrzeuganwendungen):

Modellbasiertes Thermomanagement für Li-Ionen-Zellen in elektrischen Fahrzeuganwendungen (Schriftenreihe des Lehrstuhls Fahrzeugmechatronik der TU Dresden, 9), 1. Aufl. Aufl. München: Verl. Dr. Hut, 2013. Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Fak. Verkehrswiss. "Friedrich List", Diss., 2013

Fraunhofer-Allianz Batterien (Entwicklungsperspektiven für Zellformate von Lithium-Ionen-Batterien in der Elektromobilität):

Entwicklungsperspektiven für Zellformate von Lithium-Ionen-Batterien in der Elektromobilität

Glöckler, M. (Simulation mechatronischer Systeme):

Simulation mechatronischer Systeme. Grundlagen und technische Anwendung Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014

Goodenough, J. B; Abruna, H. D; Buchanan, M. V. (Basic Research Needs for Electrical Energy Storage):

Basic Research Needs for Electrical Energy Storage U.S. Department of Energy. Washington D.C., 2007

Hofmann, P. (Hybridfahrzeuge):

Hybridfahrzeuge. Ein alternatives Antriebssystem für die Zukunft, 2. Aufl. 2014 Aufl. Vienna: Springer Vienna, 2014

Hunt, I. A; Zhao, Y; Patel, Y; Offer, J. (Surface Cooling Causes Accelerated Degradation Compared to Tab Cooling for Lithium-Ion Pouch Cells):

Surface Cooling Causes Accelerated Degradation Compared to Tab Cooling for Lithium-Ion Pouch Cells. In: J. Electrochem. Soc., Jg. 163, 2016, Nr. 9, A1846-A1852

Huo, W; He, H; Sun, F. (Electrochemical–thermal modeling for a ternary lithium ion battery during discharging and driving cycle testing):

Electrochemical–thermal modeling for a ternary lithium ion battery during discharging and driving cycle testing. In: RSC Adv., Jg. 5, 2015, Nr. 71, S. 57599–57607

ingenieur.de (Neue Anode soll Kapazität von Lithium-Ionen-Batterien verdoppeln):

Neue Anode soll Kapazität von Lithium-Ionen-Batterien verdoppeln. <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/energie/neue-anode-kapazitaet-lithium-ionen-batterien-verdoppeln/>. Abruf 03.07.2019

Kampker, A. (Montageprozess Eines Batteriepacks):

Montageprozess Eines Batteriepacks RWTH. Aachen, Frankfurt am Main, 10.2015

Kampker, A; Vallée, D; Schnettler, A. (Elektromobilität):

Elektromobilität. Grundlagen einer Zukunftstechnologie Berlin, Heidelberg: Springer, 2013

Kim, Y.-H; Ha, H.-D. (Design of interface circuits with electrical battery models):

Design of interface circuits with electrical battery models. In: IEEE Trans. Ind. Electron., Jg. 44, 1997, Nr. 1, S. 81–86

Koers, M. (CO₂-Regulierung bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen):

CO₂-Regulierung bei Pkw und leichten Nutzfahrzeugen. <https://www.vda.de/de/themen/umwelt-und-klima/co2-regulierung-bei-pkw-und-leichten-nfz/co2-regulierung-bei-pkw-und-leichten-nutzfahrzeugen.html>. Abruf 07.08.2019

Leuthner, S. (Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien):

Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 14–19

Li, Z.-Z; Shen, Y.-D; Shen, G.-Y; Li, M.-Q; Ran, M. (Parameter Study on Cooling System of Battery for HEV):

Parameter Study on Cooling System of Battery for HEV, S. 2038–2042

manager magazin (Norwegens Elektroauto-Boom):

Norwegens Elektroauto-Boom. Er läuft und läuft und läuft. <https://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/elektroautos-in-norwegen-der-boom-laeuft-und-laeuft-und-laeuft-a-1235147.html>

Mangler, A. (Li-Ion-Akkus: Wie lässt sich ein Thermal Runaway verhindern?):

Li-Ion-Akkus: Wie lässt sich ein Thermal Runaway verhindern? In: Elektronik Praxis

Moteg (eAir 2.1 DataSheet v1.1):

eAir 2.1 DataSheet v1.1

Paul, B. S. (Analyse der Ausfallwahrscheinlichkeiten von Lithium-Ionen-Energiespeichern in elektrifizierten Fahrzeugen):

Analyse der Ausfallwahrscheinlichkeiten von Lithium-Ionen-Energiespeichern in elektrifizierten Fahrzeugen Universität Ulm. Ulm, 2015

Rahimzei, E; Sann, K; Vogel, M. (Kompendium: Li-Ionen-Batterien):

Kompendium: Li-Ionen-Batterien. In: VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., S. 1–66

Sattler, H. (Elektrische Sicherheit):

Elektrische Sicherheit. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 299–306

Sauer, D. U. (Aktueller Entwicklungsstand von Lithium-Ionen-Batterien):

Aktueller Entwicklungsstand von Lithium-Ionen-Batterien 2018

Siczek, K. J. (Modeling of Batteries):

Modeling of Batteries: Next-Generation Batteries with Sulfur Cathodes, 2019, S. 201–218

Statista (Wirkungsgrade* verschiedener Stromspeicher im Jahr 2012):

Wirkungsgrade verschiedener Stromspeicher im Jahr 2012*. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/156269/umfrage/wirkungsgrade-von-ausgewaehlten-stromspeichern/>. Abruf 13.08.2019

Tang, Z; Zhu, Q; Lu, J; Wu, M. (Study on various types of cooling techniques applied to power battery thermal management systems):

Study on various types of cooling techniques applied to power battery thermal management systems, S. 1571–1576

Schutzrecht (USA):

USA). **Tennessen, P. T; Weintraub, S. C; Weston, A. H.:**

Extruded and ripped thermal interface for use with a battery cooling system

teslamag (Tesla: Batteriezellendesign ist „nicht eingefroren“):

Tesla: Batteriezellendesign ist „nicht eingefroren“. <https://teslamag.de/news/tesla-arbeitet-an-verbesseren-batteriezellen-21459>. Abruf 20.07.2019

Ungurean, L; Cârstoiu, G; Micea, M. V; Groza, V. (Battery state of health estimation: a structured review of models, methods and commercial devices):

Battery state of health estimation: a structured review of models, methods and commercial devices. In: *Int. J. Energy Res.*, Jg. 41, 2017, Nr. 2, S. 151–181

Valeo Commercial Vehicles Germany GmbH (Übersicht und EA SPump DEEN):

Übersicht und EA SPump DEEN

Verein Deutscher Ingenieure; VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (VDI-Wärmeatlas):

VDI-Wärmeatlas. Mit 320 Tabellen (VDI-Buch), 11., bearb. und erw. Aufl. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2013

von Sacken U; Nodwell, E; Sundher, A; Dahn, JR (Solid State Ionics):

Solid State Ionics, 1994

Wöhrle, T. (Lithium-Ionen-Zelle):

Lithium-Ionen-Zelle. In: Korthauer, R. (Hrsg.): *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien* Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 107–117

Worwood, D; Kellner, Q; Wojtala, M; Widanage, W. D; McGlen, R; Greenwood, D; Marco, J. (A new approach to the internal thermal management of cylindrical battery cells for automotive applications):

A new approach to the internal thermal management of cylindrical battery cells for automotive applications. In: *Journal of Power Sources*, Jg. 346, 2017, S. 151–166

Wurm, C; Öttinger Oswin; Wittkämper, S; Zauter Robert; Vuorilehto, K. (Anodenmaterialien für Lithium-Ionen- Batterien):

Anodenmaterialien für Lithium-Ionen- Batterien. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 45–60

Xiaoming, X; Fu, H; Jiang, R. (Research on the heat dissipation performance of lithium-ion cell with different operating conditions):

Research on the heat dissipation performance of lithium-ion cell with different operating conditions Jiangsu University. Zhenjiang, 27.02.2017

Yang, N; Fu, Y; Yue, H; Zheng, J; Zhang, X; Yang, C; Wang, J. (An improved semi-empirical model for thermal analysis of lithium-ion batteries):

An improved semi-empirical model for thermal analysis of lithium-ion batteries. In: Electrochimica Acta, Jg. 311, 2019, S. 8–20

Yu, Q.-Q; Xiong, R; Wang, L.-Y; Lin, C. (A Comparative Study on Open Circuit Voltage Models for Lithium-ion Batteries):

A Comparative Study on Open Circuit Voltage Models for Lithium-ion Batteries. In: Chin. J. Mech. Eng., Jg. 31, 2018, Nr. 1, S. 1526

Zeyen, M. G; Wiebelt, A. (Thermisches Management der Batterie):

Thermisches Management der Batterie. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 165–175

Zhao, Y; Patel, Y; Zhang, T; Offer, G. J. (Modeling the Effects of Thermal Gradients Induced by Tab and Surface Cooling on Lithium Ion Cell Performance):

Modeling the Effects of Thermal Gradients Induced by Tab and Surface Cooling on Lithium Ion Cell Performance. In: J. Electrochem. Soc., Jg. 165, 2018, Nr. 13, A3169–A3178

VI Anhang

A.1. Archivierung der Arbeit

Die Arbeit wird nach dem Prozess im PEM-Wiki archiviert.

A.2.

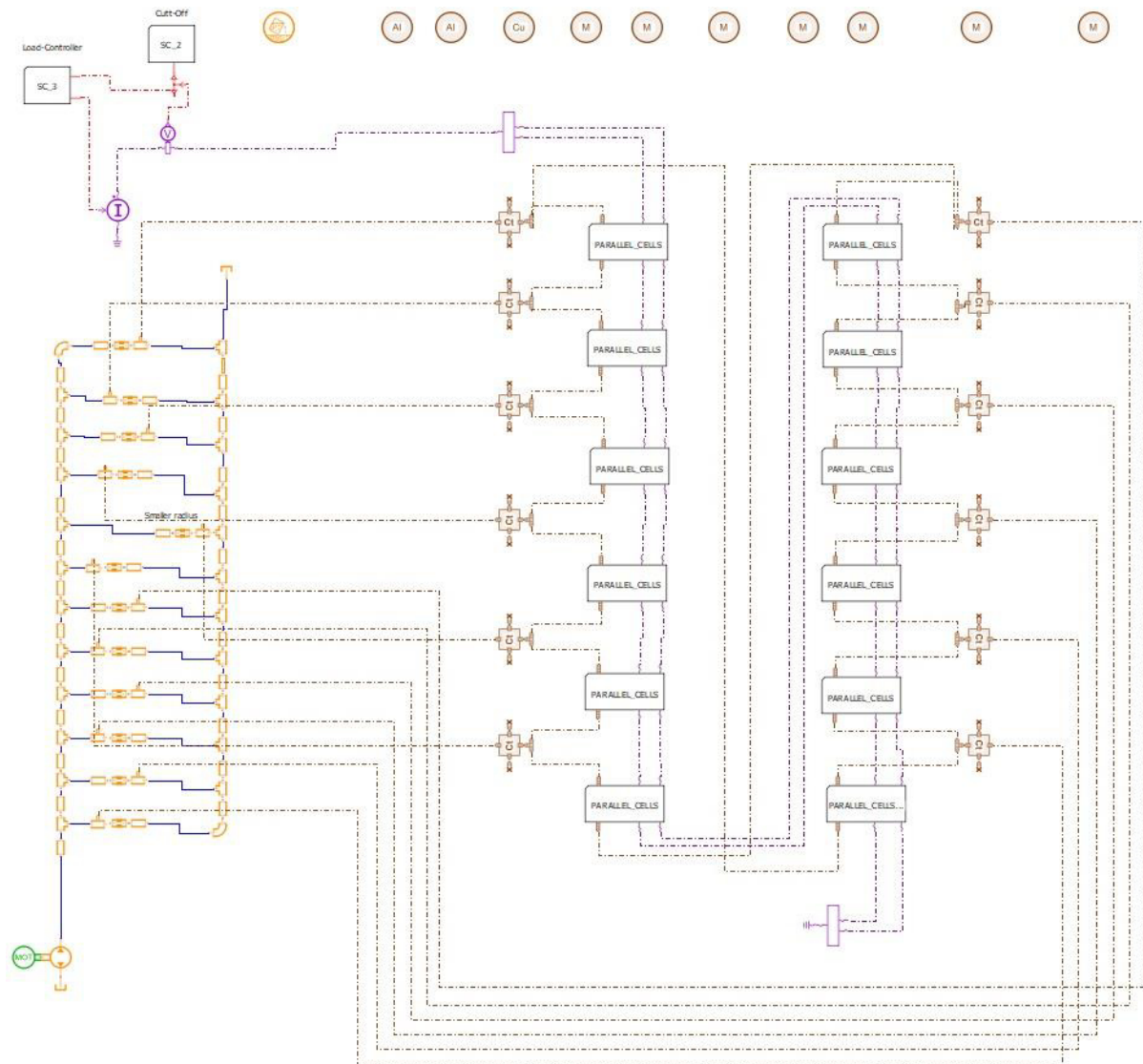


Abbildung 5.1 Gesamtsystem in AMESim

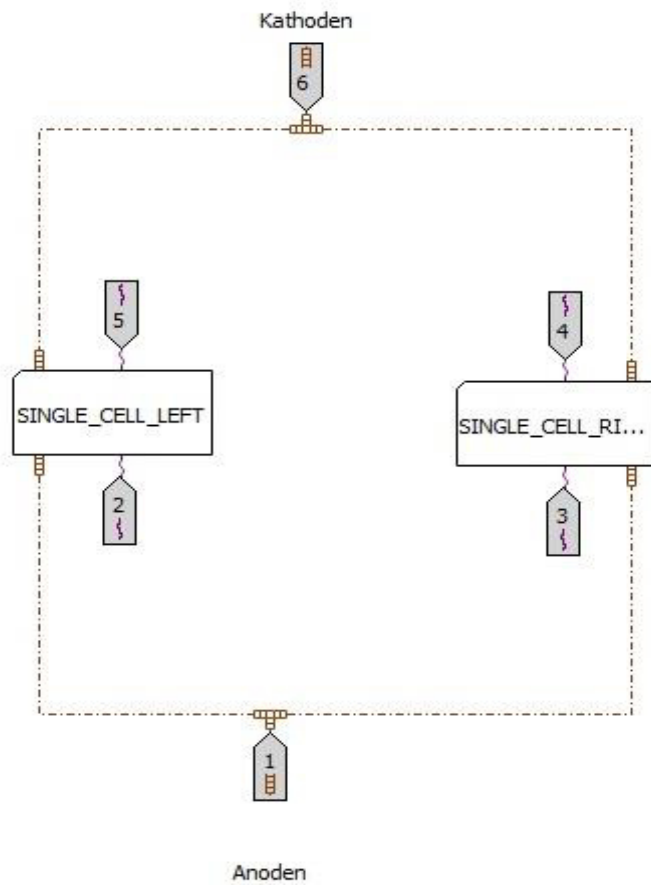


Abbildung 5.2 Parallele Zellen in AMESim

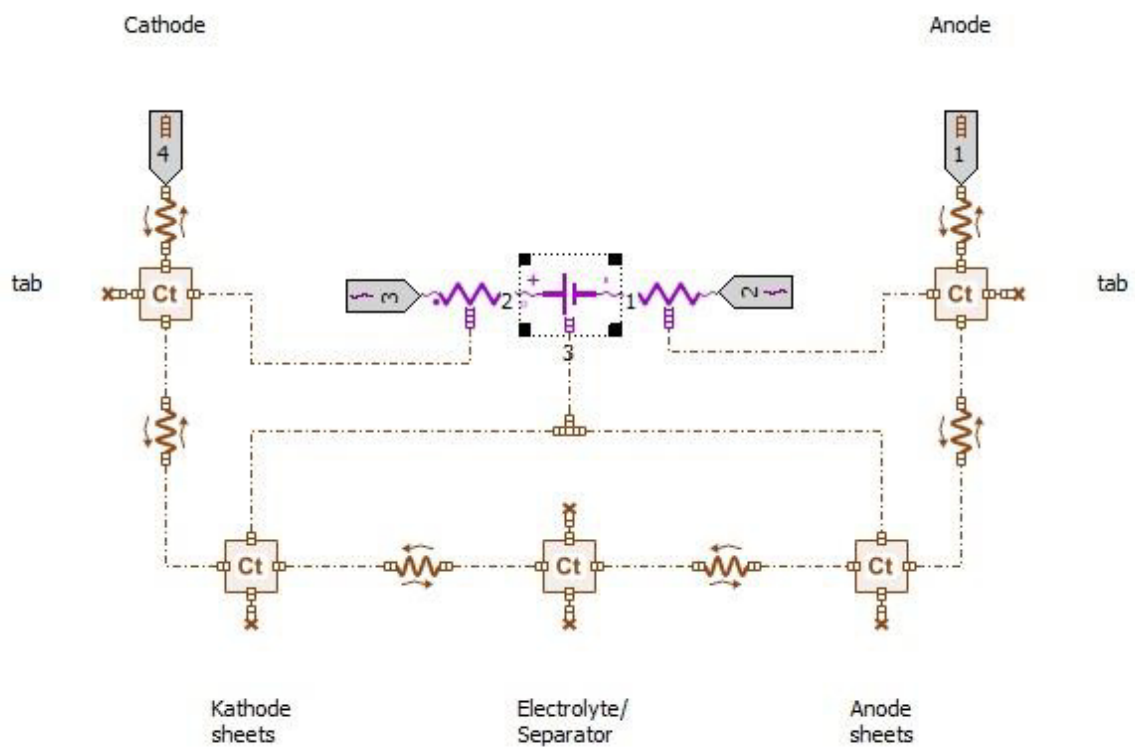


Abbildung 5.3 Zellmodell in AMESim

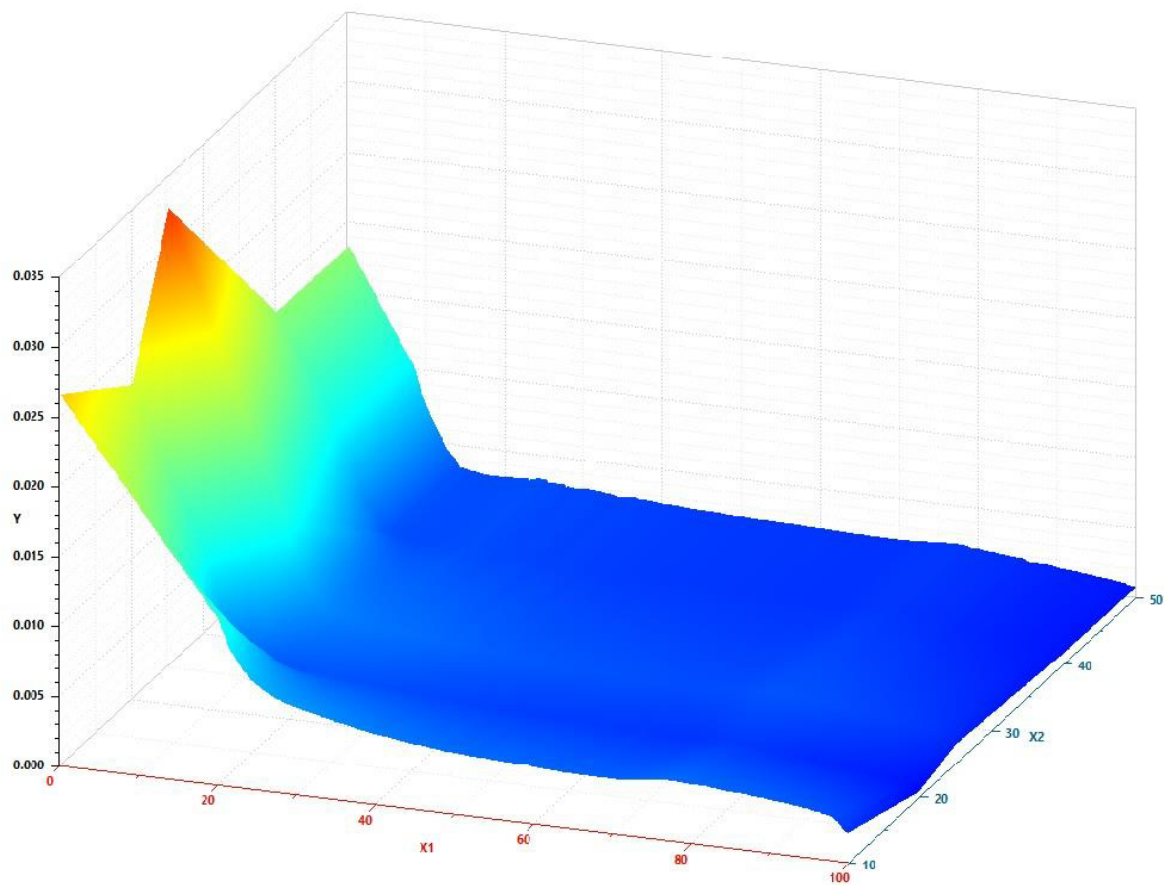


Abbildung 5.4 Innenwiderstandskennfeld

X1	SOC [%]
X2	Temperatur [°C]
Y	Ohm'scher Widerstand [Ω]

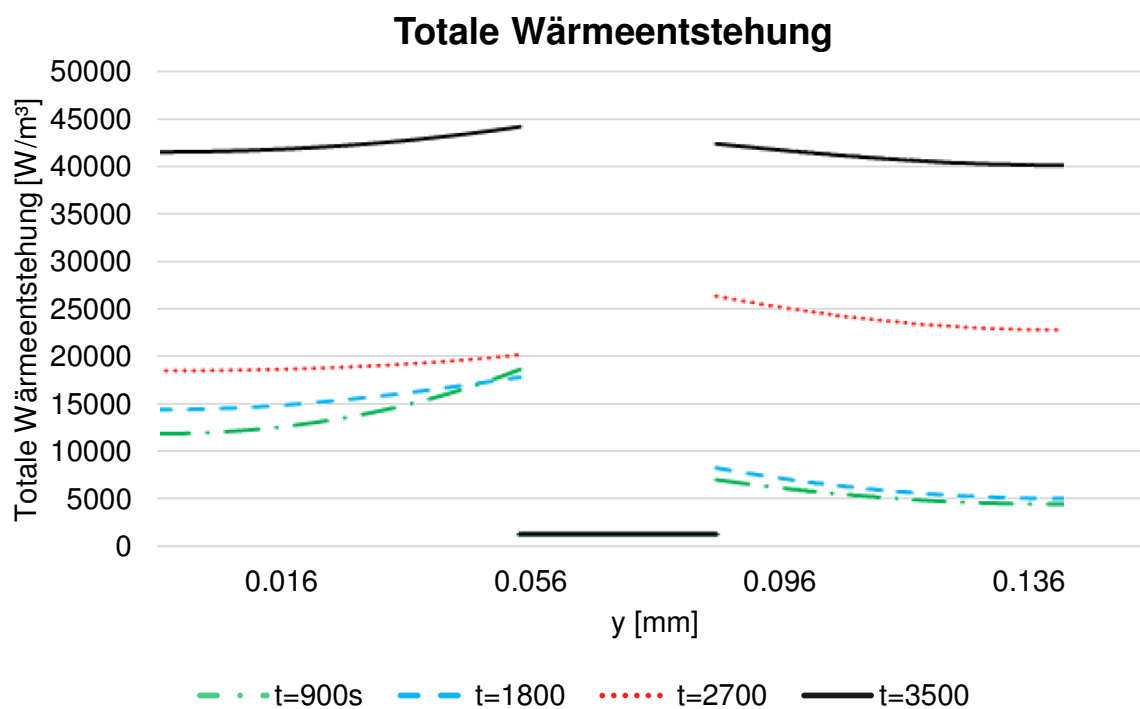
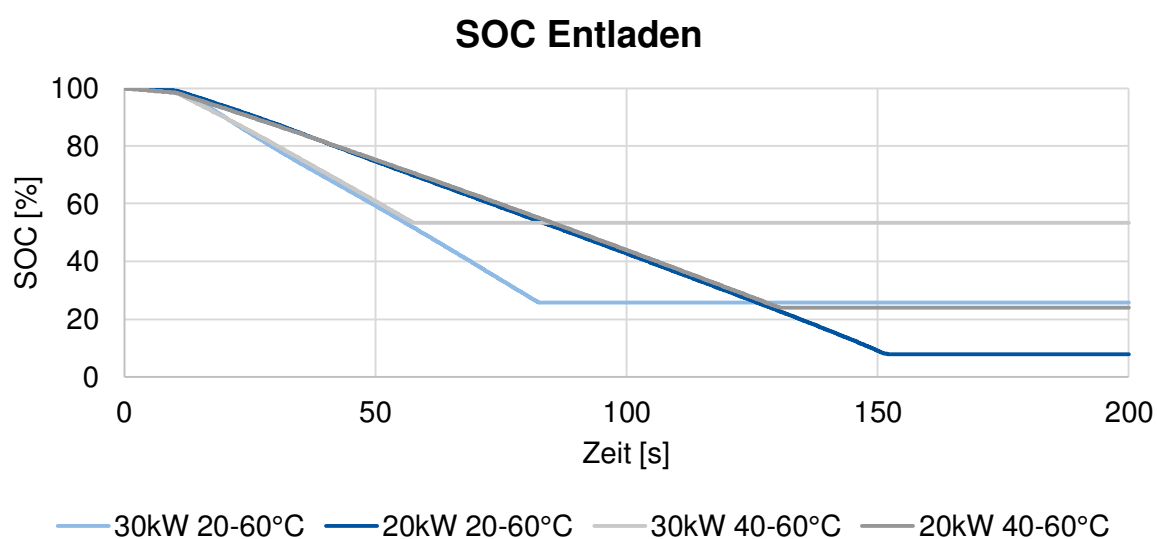
Abbildung 5.5 Totale Wärmeentstehung⁹⁸

Abbildung 5.6 SOC Entladen

Abbildung 5.6 zeigt den SOC an, während die Zelltemperatur von 20°C bzw. 40°C auf 60°C stieg.

⁹⁸ Vgl. Bahiraei et al. (A pseudo 3D electrochemical-thermal modeling and analysis of a lithium-ion battery for electric vehicle thermal management applications) 2017 S.47

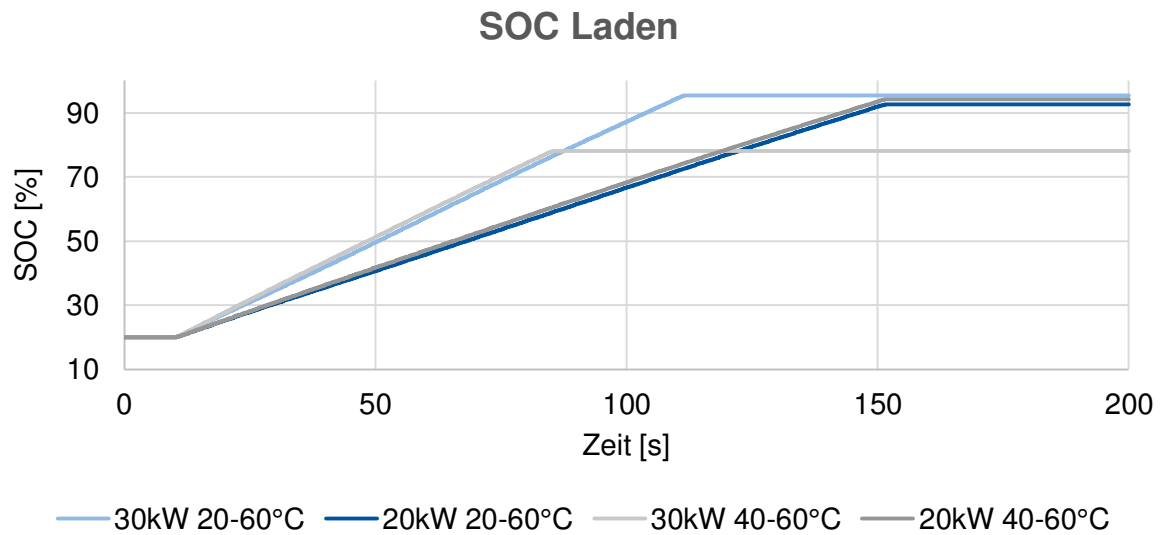


Abbildung 5.7 SOC Laden

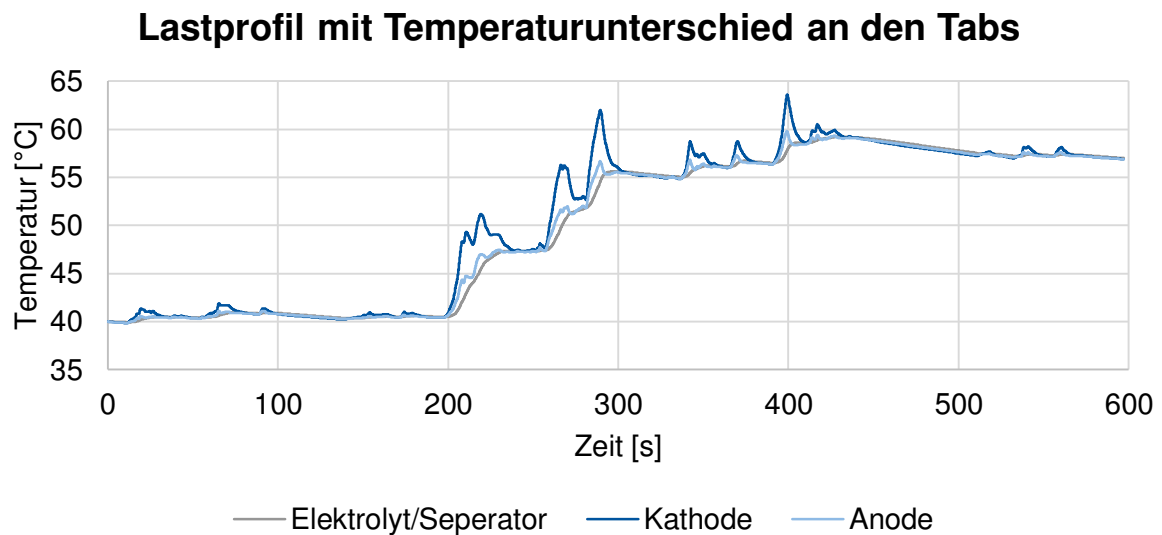


Abbildung 5.8 Temperaturverlauf Lastprofil mit Temperaturunterschied der Tabs; Reduktion des thermischen Zellinnenwiderstand auf 10%; 65,4% Wärmestrom an der Kathode

8kW adiabat bei verschiedenen Temperaturen

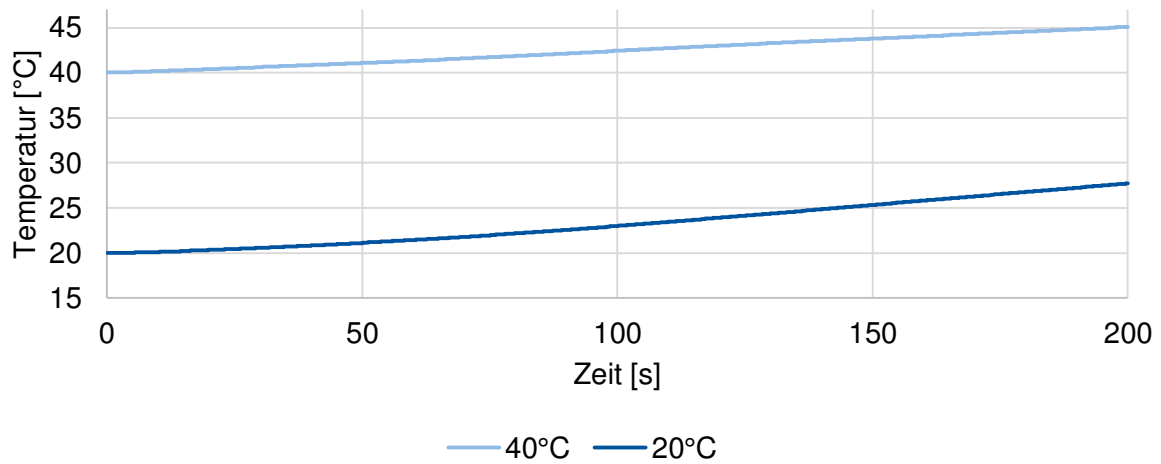


Abbildung 5.9 8kW adiabat bei verschiedenen Temperaturen

Wärmeentwicklung einer Zelle

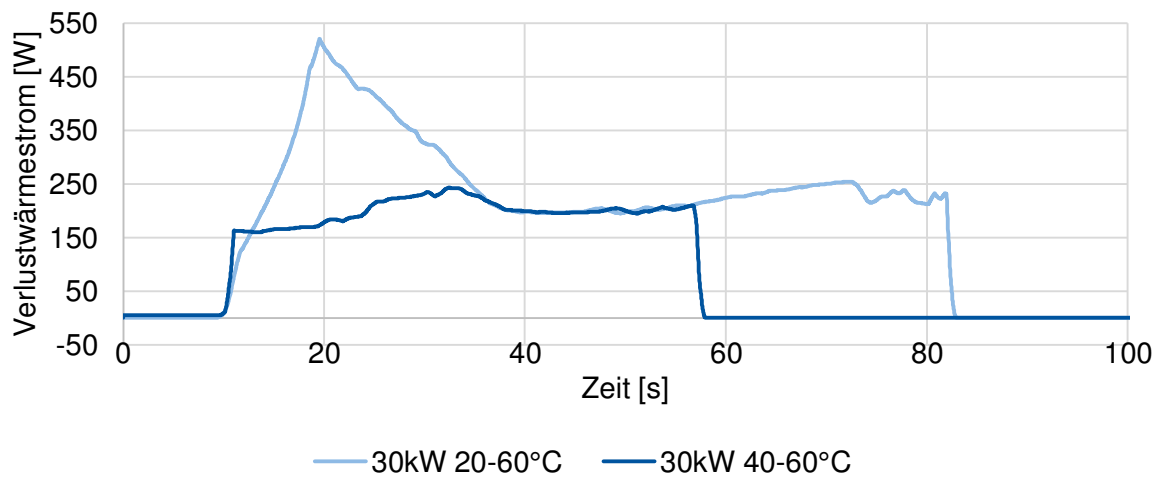


Abbildung 5.10 Wärmeentwicklung einer Zelle

Wärmeentwicklung in einem Tab bei 30kW

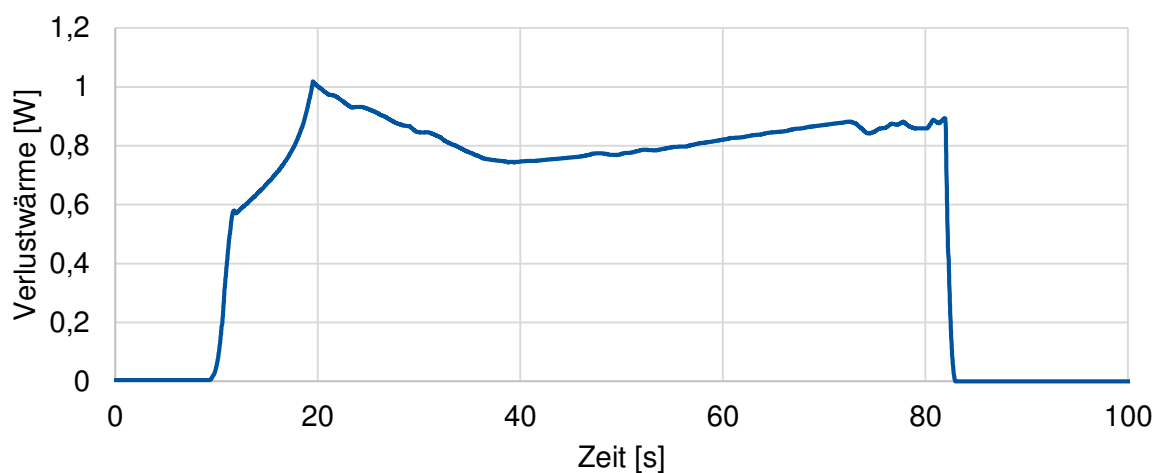


Abbildung 5.11 Wärmeentwicklung in einem Tab bei 30kW

Tabelle 5.1 Thermischer Zellinnenwiderstand

Komponente	Thermische Leitfähigkeit [W/(cm*K)]	Dicke [mm]
Anode	1,2680	0,1055
Kupfer	3,8	0,035
Negative Beschichtung	0,013	0,058
Separator	0,002	0,0125
Kathode	0,6722	0,1505
Aluminium	2	0,05
Positive Beschichtung	0,013	0,088
Separator	0,002	0,0125

Tabelle 5.2 Simulationsparameter

Simulationsparameter	
Elektrische Zelleigenschaften	
Kapazität	11Ah
Nennspannung	3,6V
Filterkapazität	0,3082F
Innenwiderstand	Siehe Abbildung 5.4
Kathodentab	
Material	Aluminium
Masse	4,52g
Dicke	0,1mm
Länge	65mm
Breite	48mm
Anodentab	
Material	Kupfer
Masse	13,55g
Dicke	0,1mm
Länge	65mm
Breite	48mm
Gappad	
Wärmeleitfähigkeit	1,5 W/(m*K)
Dicke	5mm
Elektrolyt	
Gewicht	243,42g
Wärmeleitfähigkeit	104,35W/(m*K)
Dichte	1,62g/cm ³
Spezifische Wärmekapazität	1,40Kg/(kg*K)
Anodensheet	
Gewicht	70,30g
Wärmeleitfähigkeit	283,47W/(m*K)
Dichte	6,63g/cm ³

Spezifische Wärmekapazität	0,48Kg/(kg*K)
Material	Kupfer
Dicke	0,093mm
Länge	182mm
Breite	119mm
Kathodensheet	
Gewicht	59,70g
Wärmeleitfähigkeit	84,11W/(m*K)
Dichte	2,34g/cm ³
Spezifische Wärmekapazität	0,86Kg/(kg*K)
Material	Aluminium
Dicke	0,138mm
Länge	178mm
Breite	115mm
Widerstand Tab-Gappad	
Kontaktfläche	3120mm ²
Kontaktwiderstand	1°C/W
Widerstand Tab-Sheet	
Kontaktfläche	3120mm ²
Kontaktwiderstand	0,01°C/W
Widerstand Kathode-Elektrolyt	
Kontaktfläche	21658mm ²
Wärmeleitkoeffizient	0,6722W/(cm*K)
Dicke	0,1505mm
Widerstand Anode-Elektrolyt	
Kontaktfläche	21658mm ²
Wärmeleitkoeffizient	1,2680W/(cm*K)
Dicke	0,1055mm

VII Erklärung

Eidesstattliche Versicherung

Statutory Declaration in Lieu of an Oath

Robben, Tobias
Name, Vorname/Last Name, First Name

345152
Matrikelnummer (freiwillige Angabe)
Matriculation No. (optional)

Ich versichere hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit/Bachelorarbeit/
Masterarbeit* mit dem Titel

I hereby declare in lieu of an oath that I have completed the present paper/Bachelor thesis/Master thesis* entitled

Simulative Untersuchung der Anwendbarkeit von Tab-Kühlung auf
Hochleistungsbatteriesysteme

selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe (insbes. akademisches Ghostwriting) erbracht habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Für den Fall, dass die Arbeit zusätzlich auf einem Datenträger eingereicht wird, erkläre ich, dass die schriftliche und die elektronische Form vollständig übereinstimmen. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

independently and without illegitimate assistance from third parties (such as academic ghostwriters). I have used no other than the specified sources and aids. In case that the thesis is additionally submitted in an electronic format, I declare that the written and electronic versions are fully identical. The thesis has not been submitted to any examination body in this, or similar, form.

Aachen, 15.08.2019
Ort, Datum/City, Date

Unterschrift/Signature
*Nichtzutreffendes bitte streichen
*Please delete as appropriate

Belehrung: Official Notification:

§ 156 StGB: Falsche Versicherung an Eides Statt

Wer vor einer zur Abnahme einer Versicherung an Eides Statt zuständigen Behörde eine solche Versicherung falsch abgibt oder unter Berufung auf eine solche Versicherung falsch aussagt, wird mit Freiheitsstrafe bis zu drei Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

Para. 156 StGB (German Criminal Code): False Statutory Declarations

Whoever before a public authority competent to administer statutory declarations falsely makes such a declaration or falsely testifies while referring to such a declaration shall be liable to imprisonment not exceeding three years or a fine.

§ 161 StGB: Fahrlässiger Falscheid; fahrlässige falsche Versicherung an Eides Statt

(1) Wenn eine der in den §§ 154 bis 156 bezeichneten Handlungen aus Fahrlässigkeit begangen worden ist, so tritt Freiheitsstrafe bis zu einem Jahr oder Geldstrafe ein.

(2) Strafflosigkeit tritt ein, wenn der Täter die falsche Angabe rechtzeitig berichtigt. Die Vorschriften des § 158 Abs. 2 und 3 gelten entsprechend.

Para. 161 StGB (German Criminal Code): False Statutory Declarations Due to Negligence

(1) If a person commits one of the offences listed in sections 154 through 156 negligently the penalty shall be imprisonment not exceeding one year or a fine.

(2) The offender shall be exempt from liability if he or she corrects their false testimony in time. The provisions of section 158 (2) and (3) shall apply accordingly.

Die vorstehende Belehrung habe ich zur Kenntnis genommen:

I have read and understood the above official notification:

Aachen, 15.08.2019
Ort, Datum/City, Date

Unterschrift/Signature