

Erweiterung des thermischen Modells zur Bestimmung der optimalen Zellgröße auf Modulebene und Anwendung auf das Fahrzeugkonzept des aCar mobility Projekts

Masterarbeit zur Erlangung des Grades
M. Sc. Maschinenbau und Management
an der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München

Aufgabensteller	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik
Betreuer	Xue Lin, M. Sc. Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik
Eingereicht von	Borja Sanchez Zarate, B. Sc. Matrikelnummer: 03685851
Ausgabe am	02.11.2017
Eingereicht am	11.05.2017

Masterarbeit

Erweiterung des thermischen Modells zur Bestimmung der optimalen Zellgröße auf Modulebene und Anwendung auf das Fahrzeugkonzept des aCar mobility Projekts

Das Batteriesystem ist technisch und wirtschaftlich eines der wichtigsten Komponenten eines Elektrofahrzeugs. Sie sind ausschlaggebend für die Leistung, Reichweite und Sicherheit eines Fahrzeugs. Momentan existiert eine Vielzahl an Ausführungen von Batteriesystemen mit unterschiedlichen Zellbauformen und Zellgrößen. Diese Lösungen resultieren mehr aus Kompromissen zwischen Kosten und Fertigbarkeit, als aus wissenschaftlichen Betrachtungen. Um eine aus wissenschaftlicher Sicht optimale Zellgröße zu ermitteln wurde in vorherigen Arbeiten Modelle zum thermischen Verhalten, elektrischer Effizienz und Kosten in Abhängigkeit der Zellgröße erstellt.

Im Rahmen dieser Arbeit soll einerseits das Modell zur Bestimmung der thermisch optimalen Zellgröße auf Modulebene erweitert werden. Andererseits sollen die Modelle auf ein Fahrzeugkonzept angewendet werden, um die Frage nach der optimalen Zellgröße für dieses Fahrzeugkonzept zu beantworten. Es handelt sich dabei um ein vollelektrisches Fahrzeug für Subsahara-Afrika. Mithilfe der Anwendung der bestehenden Modelle sollen zudem Probleme identifiziert und behoben werden.

Die folgenden Aufgabenpakete sollen bearbeitet werden:

- Einarbeitung in den Stand der Modelle zur Bestimmung der optimalen Zellgröße
- Erweiterung des thermischen Modells auf Modulebene
- Einarbeitung in die Erprobungsdaten vom aCar
- Bestimmung der optimalen Zellgröße für das aCar

Die Ausarbeitung soll die einzelnen Arbeitsschritte in übersichtlicher Form dokumentieren. Der Kandidat verpflichtet sich, die Masterarbeit selbstständig durchzuführen und die von ihm verwendeten wissenschaftlichen Hilfsmittel anzugeben.

Die eingereichte Arbeit verbleibt als Prüfungsunterlage im Eigentum des Lehrstuhls und darf Dritten nur unter Zustimmung des Lehrstuhlinhabers zugänglich gemacht werden.

Ausgabe: 02.11.2017

Abgabe: 11.05.2018

Prof. Dr.-Ing. M. Lienkamp

Betreuer: Xue Lin, M.Sc.

Geheimhaltungsverpflichtung

Herr/Frau: **Sanchez Zarate, Borja**

Im Rahmen der Angebotserstellung und der Bearbeitung von Forschungs- und Entwicklungsverträgen erhält der Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München regelmäßig Zugang zu vertraulichen oder geheimen Unterlagen oder Sachverhalten industrieller Kunden, wie z.B. Technologien, heutige oder zukünftige Produkte, insbesondere Prototypen, Methoden und Verfahren, technische Spezifikationen oder auch organisatorische Sachverhalte.

Der Unterzeichner verpflichtet sich, alle derartigen Informationen und Unterlagen, die ihm während seiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik zugänglich werden, strikt vertraulich zu behandeln.

Er verpflichtet sich insbesondere

- derartige Informationen betriebsintern zum Zwecke der Diskussion nur dann zu verwenden, wenn ein ihm erteilter Auftrag dies erfordert,
- keine derartigen Informationen ohne die vorherige schriftliche Zustimmung des betreffenden Kunden an Dritte weiterzuleiten,
- keine Fotografien, Zeichnungen oder sonstige Darstellungen von Prototypen oder technischen Unterlagen hierzu anzufertigen,
- auf Anforderung des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik oder unaufgefordert spätestens bei seinem Ausscheiden aus dem Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik alle Dokumente und Datenträger, die derartige Informationen enthalten, an Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik zurückzugeben.

Eine besondere Sorgfalt gilt im Umgang mit digitalen Daten:

- Kein Dateiaustausch über Dropbox, Skydrive o.ä.
- Keine vertraulichen Informationen unverschlüsselt über Email versenden.
- Wenn geschäftliche Emails mit dem Handy synchronisiert werden, darf dieses nicht in die Cloud (z.B. iCloud) synchronisiert werden, da sonst die Emails auf dem Server des Anbieters liegen.
- Die Kommunikation sollte nach Möglichkeit über die (my)TUM-Mailadresse erfolgen. Diese Emails dürfen nicht an Postfächer anderer Emailprovider (z.B.: gmail.com) weitergeleitet werden.

Die Verpflichtung zur Geheimhaltung endet nicht mit dem Ausscheiden aus dem Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, sondern bleibt 5 Jahre nach dem Zeitpunkt des Ausscheidens in vollem Umfang bestehen.

Der Unterzeichner willigt ein, dass die Inhalte seiner Studienarbeit in darauf aufbauenden Studienarbeiten und Dissertationen mit der nötigen Kennzeichnung verwendet werden dürfen.

Datum: 02.11.2017

Unterschrift: _____

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Garching, den 11.05.2017

Borja Sanchez Zarate, B. Sc.

Danksagung

Es war mir eine Ehre und eine Freude, die Masterarbeit im Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik zu schreiben. Ich möchte mich bei den Mitarbeitern und Studierenden des Lehrstuhls für den freundlichen und angenehmen Umgang bedanken. Meinen herzlichsten Dank an meiner Betreuerin M.Sc. Xue Lin für ihre Unterstützung und ihr Vertrauen auf mich.

Außerdem bin ich besonders dankbar zu meinen Freunden Irene, Maria und Jacobo für ihre ehrenamtliche Unterstützung. Zuletzt bedanke ich mich bei meiner Eltern und Geschwister für ihre Zuneigung.

Garching, im Mai 2018

Borja Sanchez Zarate

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation.....	1
1.2	Ziel der Arbeit.....	2
1.3	Aufbau der Arbeit	2
2	Grundlagen und Stand der Technik.....	5
2.1	Grundlagen der Lithium-Ionen-Zellen	5
2.1.1	Aufbau und Funktionsweise	5
2.1.2	Materialien	6
2.1.3	Produktion und Wirtschaftlichkeit	8
2.1.4	Sicherheitsmechanismen	9
2.1.5	Elektrisches Verhalten.....	10
2.2	Thermisches Verhalten der Lithium-Ionen-Zelle	12
2.2.1	Wärmeerzeugung.....	13
2.2.2	Wärmeübertragungsmechanismen.....	14
2.2.3	Alterungswirkung der Betriebstemperatur.....	15
2.3	Lithium-Ionen-Batterien im Elektrofahrzeug.....	16
2.3.1	Konventionelle Bauformen	16
2.3.2	Modulaufbau	18
2.3.3	Sicherheit	19
2.4	Modellierung von Lithium-Ionen-Batterien	19
2.5	Metamodelle	21
3	Methodik zur Bestimmung der optimalen Zellgröße	23
3.1	Aufbau und Simulation der Metamodelle	23
3.2	Das Gesamtoptimierungstool	24
4	Erweiterung des thermischen Optimierungstools.....	27
4.1	Entwicklung des Modells für die Modulebene	27
4.1.1	Physikalische Grundlage und Randbedingungen	27
4.1.2	Zelle	30
4.1.3	Stromleiter und Kontaktierungen	33
4.1.4	Gehäuse und Kühlungssystem.....	36
4.1.5	Gesamtmodell.....	43

4.2	Programmierung und Simulation des Modelles	48
4.2.1	Aufbau des Programmes.....	48
4.2.2	Ergebnisse der Simulationsprobe.....	52
4.2.3	Implementierung im Optimierungstool	60
5	Anwendung des Tools im aCar Fahrzeugkonzept	67
5.1	Inputs und Parameter des Optimierungstools.....	68
5.2	Analyse zur Zelloptimierung	70
5.2.1	Ergebnisse der Kostenanalyse	70
5.2.2	Ergebnisse der thermischen Analyse	72
5.2.3	Ergebnisse der Sicherheitsanalyse	79
5.2.4	Gesamtoptimierung.....	81
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	85
	Abbildungsverzeichnis.....	i
	Tabellenverzeichnis.....	iii
	Literaturverzeichnis	iv
	Anhang.....	viii

Abkürzungsverzeichnis

BMS	Battery Management System
CC	Constant Current
CID	Circuit Interrupting Device
CV	Constant Voltage
EOL	End Of Life
FEM	Finite Element Methode
PE	Polystyrol
PP	Polypropylen
PTC	Positive Temperature Coefficient
SEI	Solid Elektrolyte Interface
SOC	State Of Charge
SOC	State Of Charge
WzBdoZ	Werkzeug zur Bestimmung der optimalen Zellgröße

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
A	m^2	Fläche
C	Ah	Kapazität
C_N	Ah	Nennkapazität
C_{Rate}	A/Ah	Entladerate / C-Rate
D	m	Durchmesser
E_e	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$	Elektromotive Kraft
E_z	m	Zellentfernung
F	C/mol ⁻¹	Faraday Konstante
I	A	Strom
L	m	Länge
Nu	-	Nußelt-Zahl
Pr	-	Prandtl-Zahl
Q	J	Reversible Wärme
\dot{Q}	W	Wärmeleistung
R	Ω	elektrischer Widerstand
Re	-	Reynolds-Zahl
S	J/K	Entropie
T	°C oder K	Temperatur
U	V	Spannung
U_{in}	J	innere Energie
V	m^3	Volumen
b	m	Breite
c_v	J/(kg K)	spezifische Wärmekapazität
d	m	Dicke
d_h	m	gleichwertige Durchmesser eines rechteckigen Rohres
f_j, f_A	-	Korrekturfaktoren
h	m	Höhe
k	W/(K m)	Wärmeleitfähigkeit
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
\dot{q}	W/kg	spezifische Wärmeleistung
r	m	Radius
t	s	Zeit
u	m/s	Geschwindigkeit

Ψ	-	Hohlraumanteil
α_{th}	W/(K m ²)	Wärmeübergangskoeffizient
ν	m ² s ⁻¹	kinematische Viskosität
ξ	-	Rohrreibungszahl
ρ	kg/m ³	Dichte
σ	J/K	Boltzmann Konstante
τ	s	Zeitdifferenzial

1 Einleitung

Unter derzeitigen technologischen Herausforderungen befindet sich der Wandel im Energiebereich von fossilen Energieressourcen zu erneuerbaren Energiequellen. Das Ziel ist ein verantwortungsvoller Lebensstil zu führen und dadurch die Schädigung an der Umwelt zu reduzieren. Dieser energetische Wandel wird in der Mobilität als die Entwicklung von neuen Fahrzeugkonzepten übersetzt.

Anhand der Hochleistung und dem Entwicklungspotenzial, welche die Lithium-Ionen-Batterien gezeigt haben, hat das Elektrofahrzeug die Führung dieser technologischen Revolution in der Mobilität übernommen. Hinweis dafür ist das zunehmende Verkaufsvolumen im europäischen Markt, das im Jahr 2017 um 37% sich erhöhte [1]. Die Situation im deutschen Markt der leichten Fahrzeuge ist noch ausgeprägter. Im Dezember 2017 hatte die Hälfte der verkauften Fahrzeuge einen wieder aufladbaren Elektroantrieb [1].

Das aktuelle Elektrofahrzeugkonzept bietet ein enormes Wachstumspotential. Nicht nur die Anpassung des Elektroantriebs zur automobilen Anwendung, sondern auch die Optimierung des elektrischen Versorgungssystems stellen vielversprechende Ergebnisse dar. Nach der Überwindung der ersten Hindernisse, wie die beschränkte Reichweite oder der Mangel an einer verbreiteten Ladeinfrastruktur, haben eine Vielzahl von Fahrzeugherstellern die ersten Schritte in Richtung einer zukünftigen Serienproduktion unternommen.

Unter den Komponenten des Elektrofahrzeugs hat die Weiterentwicklung der Batterie eine Aufgabe die oberste Priorität. Die verwendeten elektrochemischen Energiespeicher zeigen eine niedrige Energiedichte im Vergleich zum fossilen Kraftstoff. Die ungünstigen Eigenschaften können nur durch ein größeres Volumen und Gewicht der Batterie ausgeglichen werden. Die aktuelle Batterieentwicklung versucht das Energie-Volumen-Verhältnis zu steigern und zugleich einen höheren Sicherheitsgrad zu halten.

Heutzutage basieren die Elektrofahrzeugbatterien fast ausschließlich auf der Lithium-Ionen Technologie [2, S. 7]. Die Batteriemodule sind aus der Verschaltung einer großen Anzahl von Lithium-Ionen-Zellen zusammengesetzt, deren Eigenschaften das Verhalten der gesamten Batterie vorgeben.

1.1 Motivation

Die Lithium-Ionen-Zelle bestimmt überwiegend die Eigenschaften und die Leistung des Fahrzeugs. Die Analyse ihres Verhaltens ist Pflicht, um den Fortschritt der Elektromobilität zu gewährleisten. Trotz ihrer Bedeutung hat die Frage, welche Zellgröße für den automobilen Einsatz geeignet ist, im Moment keine deutliche Antwort.

Am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der TU München werden Untersuchungen zur Optimierung der Zellgröße durchgeführt. Die optimalen Zellgrößen werden aus der Analyse ihrer Eigenschaften und ihrer Interaktion auf Modulebene bestimmt. Die Sicherheit, Temperaturverteilung, Alterung, Energieeffizienz und Fertigung sind bei der Bestimmung der optimalen Zellgröße zu berücksichtigende Bewertungsfaktoren.

Die Komplexität der Batteriemodellierung auf Modulebene und die langen Rechenzeiten, welche die „Finite Element Model“ (FEM) Simulationsprogramme benötigen, sind Herausforderungen, die zu überwinden sind.

1.2 Ziel der Arbeit

Zur Analyse des Temperaturverhaltens von Lithium-Ionen-Zellen wurde in zwei Vorarbeiten [3, 4] ein thermisch-elektrisches Simulationsmodell entwickelt, das die Untersuchung von verschiedenen Zellgrößen und Zellaufbauten zulässt. Die FEM Modelle wurden als Metamodelle mit extrem kurzen Simulationszeiten umgesetzt und in der thermischen Optimierung Unterteilung des Programms „Werkzeug zur Bestimmung der optimalen Zellgröße“ (WzBdoZ) hinzugefügt.

Das Ziel dieser Arbeit besteht aus der Erweiterung des thermischen Optimierungsmodells auf Modulebene und ihrer Implementierung im WzBdoZ Programm. Das erweiterte Modell wird durch den Vergleich zwischen den Simulationsergebnissen des Programms und den Realwerten des Fahrzyklus des aCar Fahrzeugkonzepts validiert.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Benutzeroberfläche des WzBdoZ Programms verbessert und die Vereinigung der bisherigen thermischen Metamodelle ergänzt. Damit wird der Benutzer des Werkzeuges die Optimierungsverfahren intuitiv und fehlerfrei aus der Benutzeroberfläche durchführen können.

1.3 Aufbau der Arbeit

Zu Beginn der Arbeit werden grundlegende Inhalte und Zusammenhänge zu den Themen Lithium-Ionen-Zellen und Wärmeübertragung dargestellt. Weiterhin erfolgt ein Überblick über eingesetzte Verfahren zur Lithium-Ionen-Batteriemodellierung und zur Metamodellbildung.

Kapitel 3 beinhaltet eine detaillierte Erläuterung der Annahme und Ergebnisse der Vorarbeiten, sowie des Optimierungstools. Im nächsten Kapitel werden die theoretischen Grundlagen und der Aufbau des Modulmodells erklärt. In Kapitel 4 wird das erweiterte Modell durch den Vergleich mit den realen Temperaturmessungen validiert.

In Kapitel 5 findet die Analyse zur Bestimmung der optimalen Zellgröße des aCar Fahrzeuges statt. Anschließend wird eine Zusammenfassung der Arbeitsergebnisse und ein Ausblick auf zukünftige Verbesserungen gegeben.

Kapitel 1: Einleitung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Positionierung der Arbeit innerhalb der Elektromobilität ▪ Aufgabenbeschreibung
Kapitel 2: Stand der Technik	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Die Lithium-Ionen-Zelle ▪ Wärmeübertragung ▪ Modellierung und Metamodelle
Kapitel 3: Vorarbeiten	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Modelle, auf die sich die Erweiterung stützt ▪ Das Werkzeug zur Bestimmung der optimalen Zellgröße
Kapitel 4: Modellentwicklung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Physik des Modells ▪ Mathematik des Modells ▪ Programmierung ▪ Simulation ▪ Validierung ▪ Implementierung
Kapitel 5: Optimierung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verbesserungen des Optimierungstools ▪ Analyse zur Optimierung der Zellgröße des aCar ▪ Darstellung der Ergebnisse
Kapitel 6: Abschluss	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zusammenfassung ▪ Zukünftige Erweiterungen

Abb. 1.1 Aufbau der Arbeit

2 Grundlagen und Stand der Technik

Die Lithium-Ionen-Zellen haben heutzutage einen immer größeren Anwendungsbereich, von der mobilen Energieversorgung von Mobiltelefonen bis zur stationären Speicherung von erneuerbaren Energien. Mit der zunehmenden Expansion der Elektromobilität wird diese Technologie nicht nur in dem Mittelpunkt des Interesses der Forschung gerückt, sondern auch der weltweit führenden Automobilhersteller. Dieses Kapitel soll die Grundlagen der Lithium-Ionen-Zellen allgemein und hinsichtlich ihrer Anwendung in Elektrofahrzeugen erläutern.

2.1 Grundlagen der Lithium-Ionen-Zellen

Die Lithium-Ionen-Zelle ist ein galvanisches Element, das aus dem Zusammenschluss zweier Elektroden und eines Elektrolyts besteht und als Gleichspannungsquelle fungiert [5, S. 160]. Es wird zwischen Primärzellen und Sekundärzellen unterschieden. Die Primärzellen können nur einmalig elektrisch entladen werden aber die Sekundärzellen können mehrmals geladen und entladen werden [6, S. 26]. Lithium-Ionen-Zelle gehören zur Kategorie der Sekundärbatterien.

Der entscheidende Vorteil des Lithiums gegenüber anderen Metallen ist sein größtes negatives Spannungspotential, wodurch eine hohe Zellspannung möglich ist. Bezogen auf das Wasser Lithium besitzt ein Spannungspotential von -3.05 V . Es hat mit 3.86 Ah/g auch die höchste spezifische Kapazität. Im Vergleich besitzt Blei nur eine spezifische Kapazität von 0.26 Ah/g [7, S. 4]. Grund dafür ist die niedrige Dichte des Lithiums. Daher ist das Lithium das beliebteste Material zur Herstellung von Batterien.

Historisch werden zwei Batterietyp aus Lithium betrachtet: Lithium-Metall- und Lithium-Ionen-Batterien. Lithium-Metall-Batterien konnten sich im Markt nicht durchsetzen, weil das Wachstum von Dendriten während ihrer Anwendung zum Kurzschluss in der Batterie führten [8, S. 6, 9, S. 1626].

2.1.1 Aufbau und Funktionsweise

Jede Lithium-Ionen-Zelle besteht aus einer negativen Elektrode (Anode) und einer positiven Elektrode (Kathode). Die Elektroden setzen sich jeweils aus einem Stromableiter und einem darauf aufgebracht Aktivmaterial zusammen. Zwischen den Elektroden befinden sich zum einen der ionenleitende Elektrolyt, der als Vermittler des Ionenaustausch in der Zelle wirkt, und der Separator, der die elektronische Trennung der Elektroden gewährleistet [10, S. 2]. Diese Komponenten sind im folgenden Bild detailliert dargestellt.

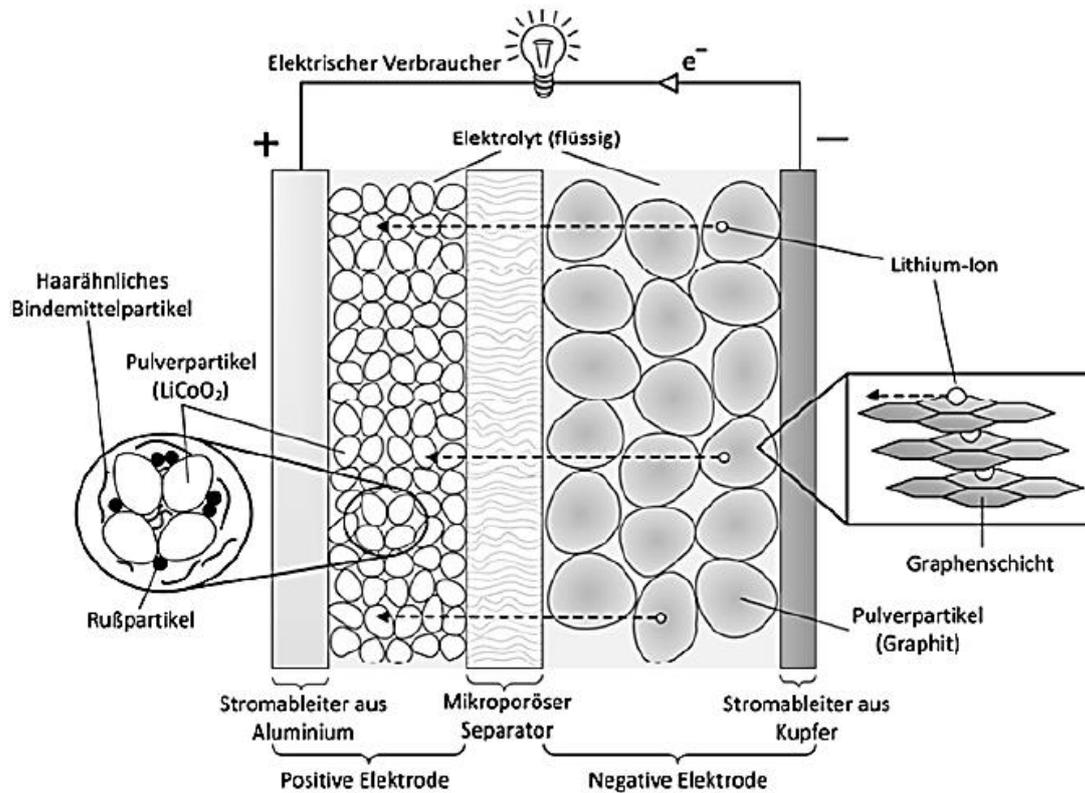


Abb. 2.1 Komponenten einer konventionellen Lithium-Ionen-Zelle beim Entladevorgang [11, S. 22]

Anhand Abb. 2.1 kann auch die Funktionsweise der Zelle erklärt werden. Bei der Entladung wird die negative Elektrode oxidiert, d. h., es werden Elektronen freigesetzt. Parallel dazu wird die positive Elektrode reduziert und nimmt Elektronen auf. Die freigesetzten Elektronen fließen durch den äußeren Verbraucherkreis von Anode zu Kathode. Der Stromfluss wirkt eine Stromquelle, die als Generator dient. Innerhalb der Zelle fließt über den Elektrolyt ein Ionenstrom und durch den Separator zwischen den Elektroden, wodurch der Stromkreis geschlossen wird. Beim Laden wird durch das Anlegen einer Spannung der Elektronenfluss umgekehrt und die Redoxreaktion läuft in entgegengesetzter Richtung ab [12, S. 5]. Im Gegensatz zu anderen Batterien (wie beispielsweise im Blei-Säure-Batterie) ist die Reversibilität des Ionenaustauschprozesses die Basis der Lithium-Ionen-Technologie [13, S. 108].

Die Materialien, welche die Lithium-Ionen-Zelle bilden, bestimmen den Elektronenfluss und dadurch auch die Zellcharakteristika.

2.1.2 Materialien

Lithium-Ionen-Zellen sind aus Aktiv- und Passivmaterialien gebildet. Das Aktivmaterial nimmt an den beim Laden und Entladen auftretenden elektrochemischen Reaktionen teil. Die restlichen Bestandteile der Zelle sind als Passivmaterialien oder „Totmaterialien“ gekennzeichnet. Dazu gehören Elektrodenbinder, Separatoren, Stromleiter und das Gehäuse der Zelle. Allerdings ist das Aktivmaterial der Zelle der entscheidende Faktor bei

der Bestimmung der Eigenschaften der Lithium-Ionen-Zelle, insbesondere die Materialien der Kathode und der Anode.

Namensgebend bei der Lithium-Ionen-Batterie ist das Material der Kathode (positive Elektrode). Dabei handelt es sich um das leichteste Metall, das Lithium. Zu den häufigsten Kathoden einer Lithium-Ionen-Batterie zählen LiCoO_2 , LiMn_2O_4 und LiFePO_4 . Um die richtige Entscheidung zu treffen, müssen die elektrochemischen Daten (Tabelle 2.1) des Kathodenmaterials bekannt sein. Außerdem müssen auch die Kosten, die Lebensdauer und die Sicherheit des Materials betrachtet werden [14, S. 41].

Tabelle 2.1 Kapazität, Arbeitsspannung und Energiedichte der beschriebenen Kathodenmaterialien (typische Werte) [14, S. 42]

Material	Kapazität in Ah kg^{-1}	Arbeitsspannung in V	Energiedichte in Wh kg^{-1}
NCA ($\text{LiCo}_{0.85}\text{Al}_{0.15}$) ₂	200	3.7	740
LCO (LiCoO_2)	160	3.9	624
NMC ($\text{LiNi}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{O}_2$)	160	3.7	592
LMO (LiMn_2O_4)	100	4.1	410
LFP (LiFePO_4)	160	3.4	544

Bei konventionellen Lithium-Ionen-Zellen zeigen synthetisches Graphit, Naturgraphit, amorpher Kohlenstoff („Hard und Soft Carbons“) und Lithiumtitanat die größte Bedeutung als Anodenmaterialien. Graphit hat die niedrigsten Kosten und repräsentiert mit Abstand den größten Marktanteil. Unter den laufenden Untersuchungen zeigen ein versprechendes Potential die Komposite (hier vor allem C/Si), Siliziumlegierungen, Nicht-Siliziumlegierungen, wie z. B. Zinn basierende Legierungen sowie metallisches Lithium [15, S. 56]. Tabelle 2.2 stellt die wichtigsten Anodenaktivmaterialien mit einer qualitativen Bewertung ihrer Eigenschaften gegenüber.

Tabelle 2.2 Qualitative Betrachtung der Eigenschaftsprofile der wichtigsten Anodenaktivmaterialien [15, S. 57]

Aktivmaterial	Energie	Leistung	Lebensdauer	Sicherheit
Synthetisches Graphit	++	+	+	+
Naturgraphit	++	+	0	0
Amorpher Kohlenstoff	0	++	++	++
Lithiumtitanat	--	+++	+++	++++
C/Si- oder C/Sn- Komposite	+++	+	-	0
Siliziumlegierungen	++++	+	--	-
Lithium	++++	-	-	--

Unter den Passivelementen besteht der konventionelle Separator für Lithium-Ionen-Zellen aus Polyolefinmembranen, die aufgrund ihrer Materialauswahl und ihres Herstellungsprozesses Einschränkungen der Zelleistung und Sicherheit verursacht [16, S. 92].

Neben der Entwicklung neuer Elektrodenmaterialien und Separatoren erfolgt die Entwicklung neuer Elektrolytsysteme, insbesondere neuer Additive. Das Haupteinsatzgebiet für Additive ist die Optimierung der „Solid Electrolyte Interface“ (SEI), also die Grenzfläche zwischen der negativen Elektrode und dem Elektrolyten. Die SEI beeinflusst signifikant Lebensdauer und Leistungsfähigkeit der Lithium-Ionen-Zelle [17, S. 70].

Die Stromableiter sind meistens aus Aluminium (Kathode) und Kupfer (Anode) hergestellt, wegen ihrer höheren Leitfähigkeit und chemische Kompatibilität mit den Aktivmaterialien der Zelle.

2.1.3 Produktion und Wirtschaftlichkeit

Die Zellmaterialien haben einen großen Einfluss auf die Herstellungskosten und Wirtschaftlichkeit der Lithium-Ionen-Zelle. Die Zellbauform ist der zweite Aspekt zu berücksichtigen, um die Fertigungskosten zu schätzen. Der prinzipielle Herstellungsprozess einer Batteriezelle gliedert sich in die drei Hauptprozessschritte Fertigung der Elektroden, Zusammenbau der Zelle sowie Aktivieren. Im folgenden Bild ist die Prozessfolge dargestellt.

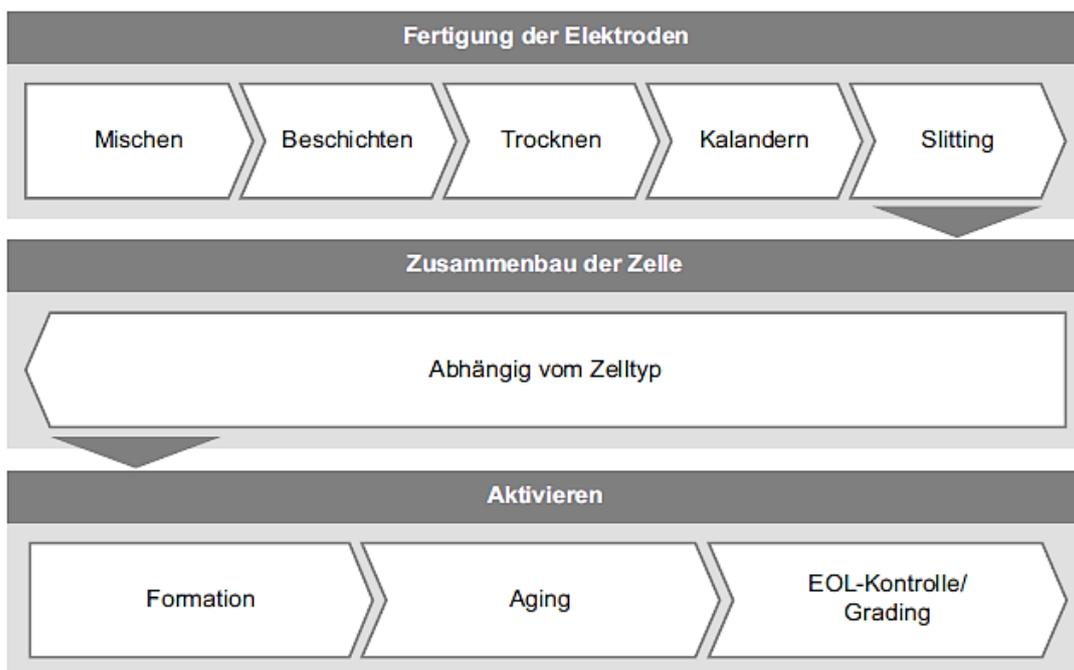


Abb. 2.2 Prozessfolge in der Zellfertigung [18, S. 61]

Die Produktion von Lithium-Ionen-Batteriezellen benötigt die Benutzung von Trockenräumen in fast alle Prozessen. Sie fängt mit der Beschichtung der Anode und der Kathode an. Danach werden die Zellen nach ihrem Zelltyp assembliert. Für die Pouch-Zellen bedeutet es essentiell ein Stapelungsprozess und bei den prismatischen Zellen und Rundzellen werden die Elektrodenschichten gewickelt. Abschließend werden durch die Erstladung die Zellen aktiviert, um die SEI zu bilden [18, S. 111].

Die Kosten der Zellen haben großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Batteriepacks im Elektrofahrzeug. Die aktuelle Produktion von Batteriesystemen basiert auf Kleinserien, die zum Teil noch manuell stattfindet. Deswegen sind die Herstellkosten von Batteriesystemen und besonders von Zellen relativ hoch. Die Anschaffungskosten eines Batteriesystems, je nach Zelltyp, liegen aktuell bei ca. 400 € pro kWh [10, S. 23]. In den letzten Jahren werden weltweit zunehmend Produktionskapazitäten für eine automatisierte Produktion von elektrofahrzeugtauglichen Batterien aufgebaut. Der Schritt geht von einer Kleinserienproduktion hin zu einer Großserienfertigung. Es wird davon ausgegangen, dass mittelfristig ein Preis von ca. 150 bis 250 Euro/kWh erreicht werden kann [18, S. 108].

2.1.4 Sicherheitsmechanismen

Wie im Absatz 2.1.2 dargelegt, wird die Betriebssicherheit der Lithium-Ionen-Zelle durch ihre Materialeigenschaften und die Qualität ihres Herstellungsprozess bestimmt. Außerdem ist die Zelle mit Sicherheitsmechanismen verfügt. Zusammen bilden sie die so genannte chemische Sicherheit.

Die Zelle kann zum Fehler geführt werden, wenn extremen äußeren Einflüssen ausgesetzt sind. Durch Hitze, Überladen, externe/interne Kurzschlüsse oder mechanische Deformationen können spontane exotherme Reaktionen ausgelöst werden, die zur Entzündung oder Explosion der Batterie führen können [8, S. 15]. Besonders relevant ist der so genannte „Thermal Runaway“, welche Schritte in der Abbildung 2.4 gezeigt sind. Dabei wird durch die exotherm ablaufenden Zersetzungsprozesse mehr Wärme produziert, als abgeführt werden kann. Tiefentladungen sollten aufgrund auftretender Korrosion auch vermieden werden.

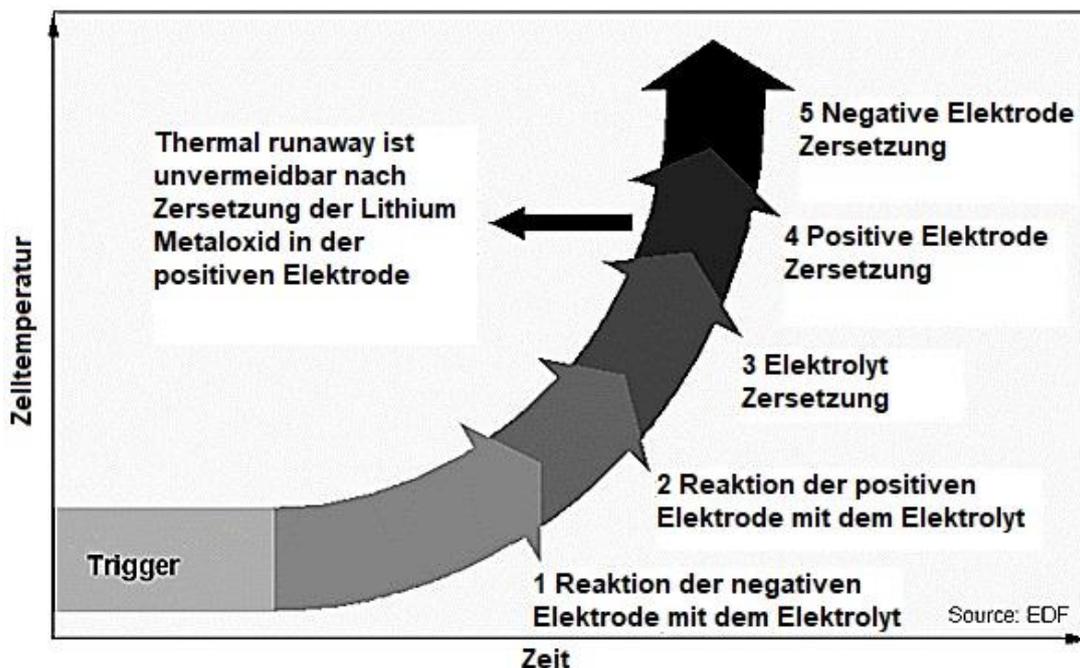


Abb. 2.3 Verfahrensschritten, die zu einem „Thermal Runaway“ führen nach [19, S. 404]

Um die Entstehung solcher fatalen Abläufe zu unterbinden, sind in einer Lithium-Ionen-Zelle mehrere Sicherheitsmechanismen vorgesehen. Standardsicherheitseinrichtungen sind ein CID und ein PTC Ring. Das PTC-Element („positive temperature coefficient“), besitzt einen temperaturabhängigen Widerstand, der bei steigender Temperatur einen höheren Wert annimmt und so den maximalen Strom durch die Zelle limitiert. Nach dem Abkühlen kann die Zelle erneut verwendet werden. Überschreitet der Druck in der Zelle einen Grenzwert, sorgt das CID („circuit interrupting device“) dafür, dass die Kontaktierung zwischen Pluspol und positivem Ableiter unterbrochen wird. Ein einmaliges Auslösen macht die Zelle in Folge unbrauchbar [3, S. 26, 20, S. 29-34].

Zur Verhinderung eines massiven elektrischen Kurzschluss durch Schmelzen des Separators wird ein 3-lagig PP/PE/PP Separatorstruktur oder ein keramischer Separator angewendet. Die PE schmilzt bei 130 °C und unterbricht den Ionenfluss, was die Kühlung der Batterie erlaubt. Im Gegensatz schmilzt der keramische Separator nicht und dadurch wird ein Kurzschluss verhindert [20, S. 31-32].

Kommt es zu einem „Thermal Runaway“, entsteht durch die Verdampfung des Elektrolyten hoher Druck in der Zelle. Bei steigendem Zelldruck öffnet sich das Überdruckventil in Zellkopf, um entstandene Gase entweichen zu lassen. Dieser Mechanismus kommt in der Pouch-Zellen nicht vor [20, S. 33-34].

Diese Sicherheitsmaßnahmen können mit Ausnahme vom Separator im folgenden Bild erkannt werden:

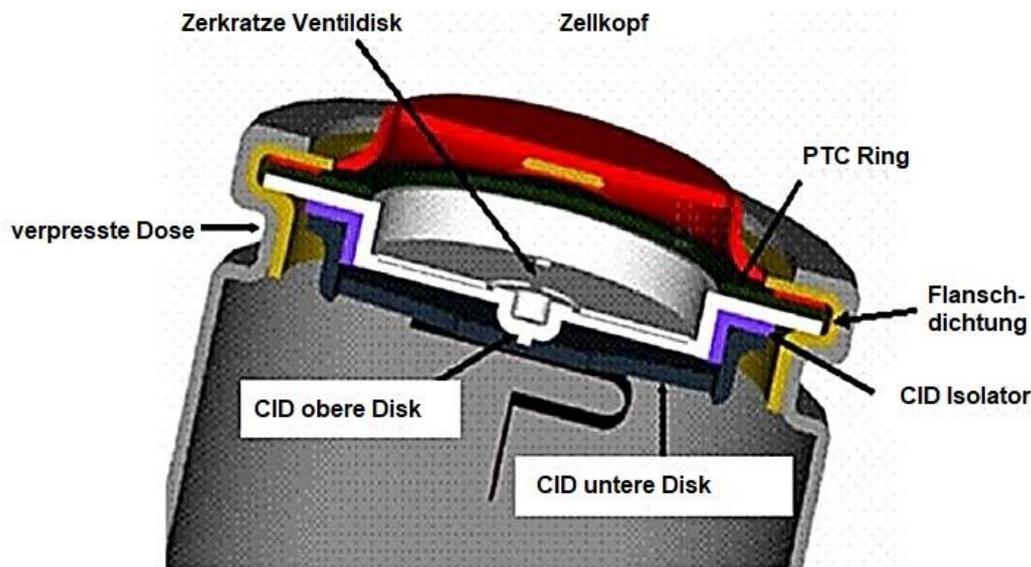


Abb. 2.4 Sicherheitsmechanismen einer zylindrischen Zelle nach [21]

2.1.5 Elektrisches Verhalten

Als Energiequelle ist die Lithium-Ionen-Zelle durch ihre Spannung und Nennkapazität gekennzeichnet. Die äußere Zellspannung ergibt sich aus der Differenz des Potentials

der positiven Elektrode und der negativen Elektrode [13, S. 109]. Während des Entladungsprozess nimmt die Zellspannung ab. Außerdem weist die Spannung einen starken Einfluss von der Betriebstemperatur auf, wie im folgenden Bild dargestellt ist:

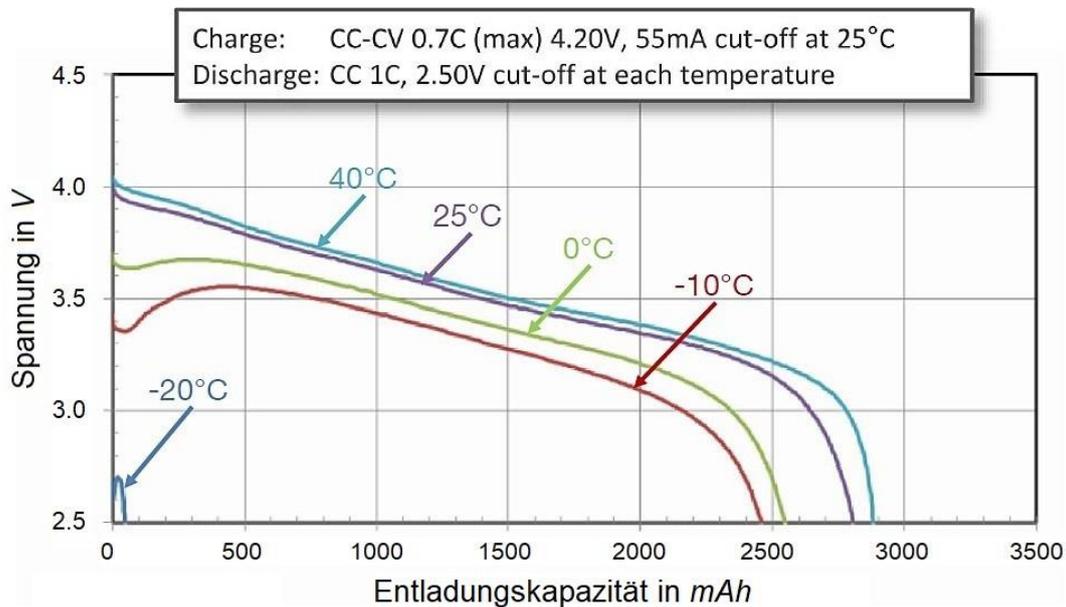


Abb. 2.5 Spannungsverläufe während Zellentladung bei unterschiedlichen Temperaturen nach [22, S. 54]

Mit niedrigen Temperaturwerten sinken die Spannung sowie die Entladungskapazität der Zelle exponentiell. Nicht nur wird die Zelleistung durch die Temperatur verringert, sondern auch die Lebensdauer der Zelle. Bei Ladung mit Temperaturen unter null wird metallisches Lithium an der Anode erzeugt. Dieser Prozess wird Lithium-Plating genannt und führt zur permanenten Schädigung der Zelle. Die Zelle benötigt daher ein thermisches Management, die durch ein Heizungs- und Kühlungssystem die Zelltemperatur unter die optimalen Betriebstemperaturwerten behaltet.

Die zweite relevanteste Eigenschaft ist die Nennkapazität C_N . Sie ist diejenige Menge an elektrischer Ladung, die von einer Zelle unter spezifischen Entladebedingungen geliefert wird. Die Kapazität ist abhängig vom Entladestrom, der Entladeschlussspannung, der Temperatur und der Art und Menge der Aktivmaterialien. Die Einheit ist Ah [23, S. 16]. Damit kann die Kenngröße SOC („State Of Charge“) auch als der prozentuelle Ladezustand der Zelle Gl. (2.1) definiert werden.

$$SOC(\%) = \frac{C}{C_N} 100 \quad (2.1)$$

Aus der Nennkapazität kann die C-Rate abgeleitet werden. Sie ist das Verhältnis zwischen der Stromstärke und der Nennkapazität. Die C-Rate gibt für einen konstanten Stromwert die benötigte Zeit an, um eine volle Zelle vollständig zu entladen. Das heißt, sie bestimmt die Geschwindigkeit der Entladungs- oder Aufladungsverfahren. Diese Kenngröße ist in 1/h gemessen.

$$C_{rate} = \frac{I}{C_N} \quad (2.2)$$

Die folgende Grafik zeigt die existierende Abhängigkeit von der Zellspannung mit verschiedenen C-Raten:

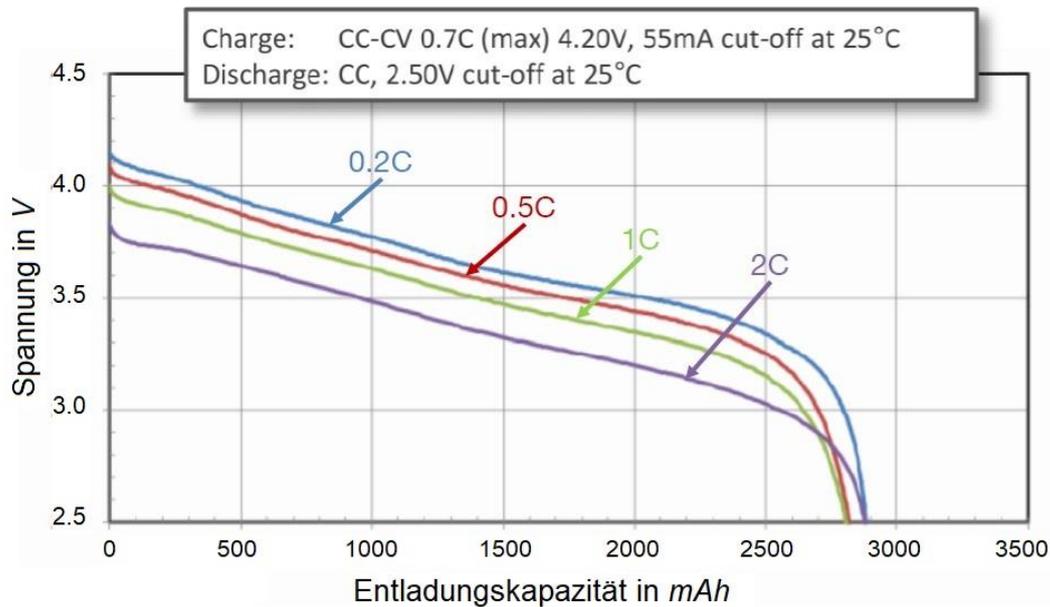


Abb. 2.6 Spannungskennlinien für verschiedene C-Raten [22, S. 50]

Grund dafür ist das dynamische Verhalten der Innenwiderstand der Zelle. Je höher die C-Rate ist, desto mehr steigt der Innenwiderstand sowie bei hohen und niedrigen Ladezuständen. Trotzdem befördert besondere Achtung hierbei der Einfluss der Temperatur [22, S. 23].

2.2 Thermisches Verhalten der Lithium-Ionen-Zelle

Die Analyse des thermischen Verhaltens gehört zu den wichtigsten Optimierungsfelder, weil es einen direkten Einfluss auf Leistung, Alterung und Sicherheit der Batterie hat [24, S. 1]. In diesem Unterkapitel werden die relevantesten Mechanismen zur Erzeugung und Übertragung der Wärme beschreibt.

2.2.1 Wärmeerzeugung

Während des Betriebs der Lithium-Ionen-Zelle entsteht Wärme, die aus mehreren verschiedenen elektrochemischen Prozessen stammt. Die Hauptwärmequellen innerhalb einer Zelle sind im Folgenden erklärt:

Reversible Reaktionswärme

Die Reaktionswärme bezeichnet die Wärme, die beim Ablauf einer chemischen Reaktion aufgenommen oder abgegeben wird [25, S. 11]. Dieser Wärmegeneration ist durch die Entropieänderungen der Elektrodenmaterialien berechnet. Die Entropieänderung kann positiv oder negativ sein, d.h. die Wärme kann generiert oder aufgenommen werden. Deswegen ist es als reversibler Prozess gekennzeichnet. Ihre Berechnung nach Sato [26, S. 70-77] ist in der nächsten Gleichung gezeigt:

$$Q_{rev} = T\Delta S = nFT \frac{\delta E_e}{\delta T} \quad (2.3)$$

Wo sich n auf die Anzahl der Ladungsmenge bezieht, F auf die Faraday Konstante und E_e auf die Zellelektromotive Kraft.

Joulesche Wärme am ohmschen Innenwiderstand

Die Joulesche Wärme ist eine irreversible Wärmeerzeugung, die beim Durchgang des Stroms am elektrischen Widerstand abfällt. Die irreversiblen Prozesse erzeugen stets Wärme. Eine solche Wärme findet vor allem im Elektrolyten statt und ist proportional zum Quadrat des Stroms, wie in der folgende Gleichung dargestellt ist [26, S. 70-77].

$$\dot{Q}_{el} = RI^2 \quad (2.4)$$

Joulesche Wärme durch Polarisationsüberspannungen

Die Polarisationswärme ist aufgrund ohmscher Überspannung, Durchtritts- und Diffusionseffekte erzeugt. In einer Lithium-Ionen-Zelle ist die Diffusion der dominierende Faktor [26, S. 70-77]. Die Gleichung (2.5) zeigt die Wärmeleistung der Polarisation als das Produkt von einem äquivalenten elektrischen Widerstand und dem generierten Zellstrom. Der Polarisierungswiderstand nimmt verschiedene Werte bei der Ladung und Entladung der Zelle auf.

$$\dot{Q}_{pol} = \Delta U_{pol} I = R_{pol} I^2 \quad (2.5)$$

Die Summe der drei Wärmeerzeugungsverfahren ergibt die gesamte Wärmemenge, die innerhalb der Zelle generiert wird. Als nächstes werden die Mechanismen, mit denen die Übertragung der Wärme erfolgt, erklärt.

2.2.2 Wärmeübertragungsmechanismen

Die Wärmeerzeugung innerhalb der Zelle bewirkt ein Temperaturanstieg innerhalb der Zelle. Die Temperaturdifferenz mit der Umgebung ruft die Wärmeabfuhr aus der Zelle hervor. Diese Wärmeübertragung an die Umrahmung der Zelle erfolgt durch drei Mechanismen: Wärmeleitung, konvektiven Wärmeübergang und Wärmestrahlung.

Die Wärmeleitung, ab jetzt Konduktion genannt, wird in der Physik als der Wärmefluss in oder zwischen einem Feststoff, einem Fluid oder einem Gas infolge eines Temperaturunterschiedes verstanden. Der Energietransport in einem wärmeleitenden Material wird durch das Vektorfeld der Wärmestromdichte beschrieben. Dies ist proportional zum Temperaturgradient. Die Proportionalitätskonstante k ist eine Materialeigenschaft, nämlich die Wärmeleitfähigkeit. Sie hängt von der Temperatur und dem Druck ab [27].

$$\dot{q}_{\text{konduktion}} = k \nabla T \quad (2.6)$$

In einem strömenden Fluid wird Energie nicht nur durch Wärmeleitung, sondern auch durch die makroskopische Bewegung der Flüssigkeit transportiert. Es gibt zwei Arten von Konvektionsverfahren: freier und erzwungener Konvektion. Bei der erzwungenen Konvektion wird das Fluid durch ein Ventilator oder eine analoge Methode beschleunigt.

Für die Stärke des konvektiven Wärmeübergangs ist die Fluidschicht in Zelloberflächen-nähe von Bedeutung. Da ändert sich die parallel zur Oberfläche gerichtete Komponente der Strömungsgeschwindigkeit vom Wert null über eine kurze Entfernung bis fast zum Maximalwert in der Kernströmung. Die Temperatur der Flüssigkeit ändert sich ebenso stark in dieser kleinen Schicht [28].

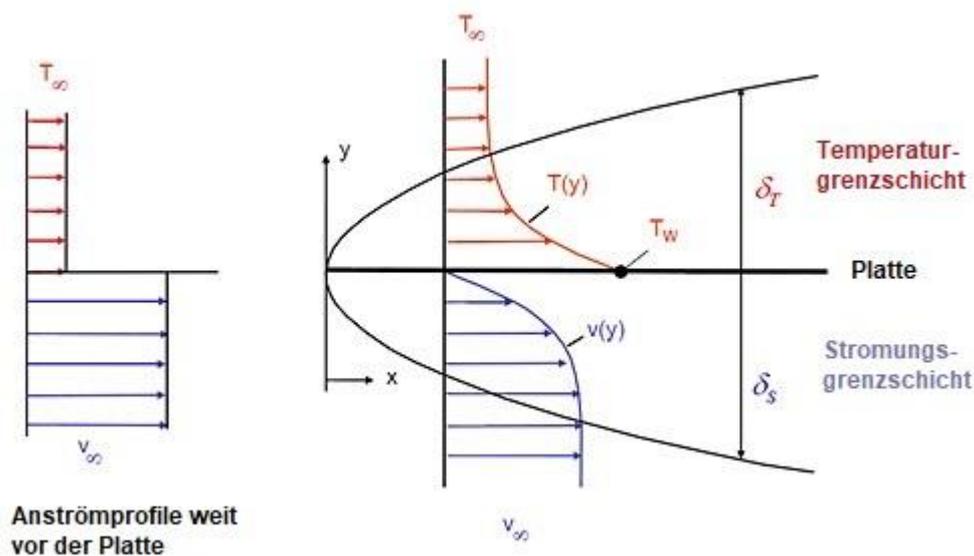


Abb. 2.7 Temperatur- und Geschwindigkeitsgrenzschicht einer Strömung an einer Platte [28]

Als Folge des Temperaturunterschieds geht Wärme von der Zelloberfläche in das strömende Fluid über. Die Wärmestromdichte ist mit dem Temperatur- und Geschwindigkeitsfeld im Fluid durch Differentialgleichungen verbunden. Diese Abhängigkeit ist im konvektiven Wärmeübergangskoeffizient enthalten [28]. Daher:

$$\dot{q}_{konvektion} = \alpha_{th} (T_{oberfläche} - T_{flüssigkeit}) \quad (2.7)$$

Der letzte Wärmeübertragungsmechanismus ist die Strahlung. Sie funktioniert durch elektromagnetische Wellen und demnach noch im Vakuum. Bei Strahlung gibt es zwei Phänomene: Abstrahlung, wenn der betrachtete Körper Strahlung emittiert, und Bestrahlung, wenn der Körper die Strahlung aus einem anderen Strahlenkörper erhält. Der Wärmeaustausch ergibt sich aus der Differenz beider Phänomene [29]:

$$\dot{Q}_{strahlung} = \sigma A_{12} (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.8)$$

Der Wärmestrom verläuft immer vom heißen zum kalten Körper. A_{12} ist die modifizierte Fläche, die abhängig von der Emissionsgrad ist, und σ ist der Stefan-Boltzmann Konstante.

2.2.3 Alterungswirkung der Betriebstemperatur

Die Temperatur spielt eine entscheidende Rolle in der Zellalterung. Nicht nur hat die Maximaltemperatur der Zelle, sondern auch die Temperaturverteilung innerhalb der Zelle ein großer Einfluss darauf. Nach Meis et al. [30] existiert eine exponentielle Korrelation zwischen der Temperatur-Stressfaktor und Kapazitätsverringern sowie eine exponentielle Zunahme des Innenwiderstands [24, S. 2]. Im folgenden Bild ist diese Interaktion qualitativ gezeichnet.

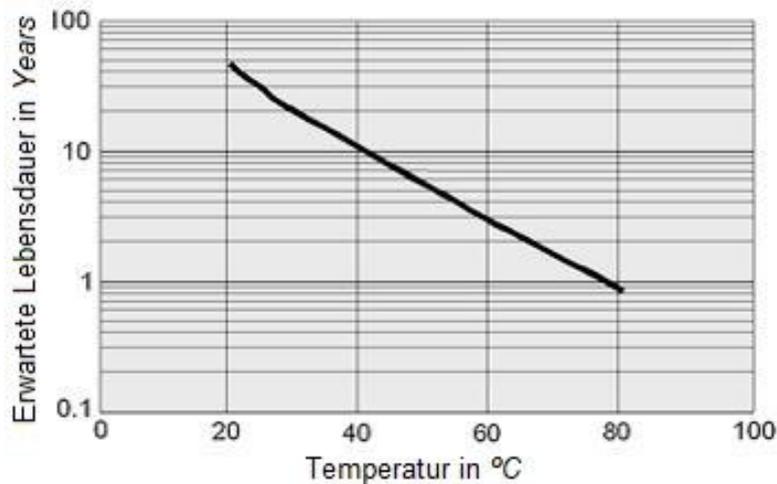


Abb. 2.8 Beispielhafte Darstellung für die kalendarische Lebensdauer in Jahren als Funktion [19, S. 411]

Die optimale Betriebstemperatur einer Lithium-Ionen-Batterie liegt etwa im Bereich zwischen 20 °C und 40 °C (Abb. 4). In diesem Temperaturbereich besitzt die Lithium-Ionen-Batterie die höchste Leistungsfähigkeit bei gleichzeitig noch tolerierbaren Alterungsverhalten.

Betriebstemperatur	-20°C	0°C	20°C	40°C	60°C
Leistung u. Verfügbarkeit:	< 70% sehr hoher R	< 90% hoher R	100%	100% -> 0% Abregelung	
Lebensdauer:	Zellalterung beim Laden		ideale Temperatur	Zellalterung -> therm runaway	
Thermomanagement:	Heizen			Kühlen	
	T diff Zelle zu Zelle < 5 K				

Abb. 2.9 Wirkung der Betriebstemperatur auf die Lebensdauer und die Leistung [31, S. 166]

Bei höheren Lebensdauieranforderungen sollte das Kühlungssystem auf die untere Temperaturgrenze zielen, weil die Zellalterung mit der Temperatur zunimmt. Wie schon in Absatz 2.1.5 erwähnt, steigen die Innenwiderstände der Zellen mit sinkender Temperatur an. Dieser Effekt erscheint bei Betriebstemperaturen unter 20 °C und gewinnt Bedeutung in überproportionaler Weise mit der Temperaturabnahme. Dadurch nimmt die Leistungsfähigkeit der Batterie und somit die dem Antrieb zur Verfügung gestellte Leistung ab. Die Alterungsmechanismen bei Minustemperaturen können zu einer irreversiblen Schädigung der Zellen führen. Der wichtigste dieser Art ist das Lithium-Plating [31, S. 166].

2.3 Lithium-Ionen-Batterien im Elektrofahrzeug

Bei automotiven Applikationen wird die Lithium-Ionen-Batterie in Module unterteilt. Diese Module enthalten eine Vielzahl von Lithium-Ionen-Zellen, die parallel oder seriell geschaltet werden können. Außerdem ist die Einordnung der Zellen innerhalb des Modules stark von ihrer Bauform abhängig. In diesem Unterkapitel sind die unterschiedlichen konventionellen Bauformen sowie der Aufbau und Sicherheit des Batteriemoduls erklärt.

2.3.1 Konventionelle Bauformen

Es existieren drei Bauformen von Lithium-Ionen-Zellen, die standardmäßig zum Einsatz kommen und in Abbildung 2.11 schematisch dargestellt sind. Jede Bauform bringt Vor- und Nachteile, die auch auf Modulebene berücksichtigt werden sollen. Außerdem weisen sie verschiedene Herstellungsprozesse und demzufolge verschiedene Sicherheitsgraden und Fertigungskosten auf.

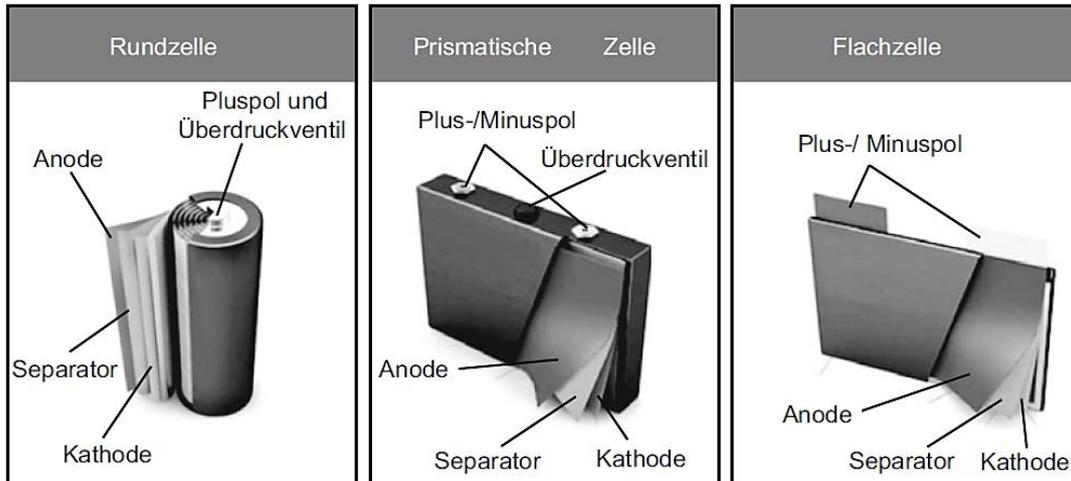


Abb. 2.10 Konventionelle Bauformen der Lithium-Ionen-Zellen [18, S. 54]

Zylindrische Zelle

Der Herstellungsprozess der zylindrischen Zelle hat einen fortgeschrittenen Optimierungsgrad. Das erlaubt eine günstigere Produktion. Sie weist eine hohe Dichtigkeit und Sicherheit auf. Der bedeutendste Vorteil der zylindrischen Zelle ist ihre hohe Lebensdauererwartung [18, S. 55]. Die einzelne Rundzelle besitzt eine hohe spezifische Energie. Trotzdem zeigt diese Bauform eine schlechtere Energiedichte auf Modulebene wegen der geometriebedingten, ineffizienten Bauraumausnutzung. Andererseits können sich wegen ihres ungünstigen Oberflächen-Volumen-Verhältnisses größere Temperaturgradienten in radialer Richtung ergeben. Daher erfordert die zylindrische Zelle ein aufwändiges Kühlungssystem [18, S. 56].

Pouch-Zelle

Das fehlende Gehäuse der Pouch-Zelle ermöglicht eine deutlich höhere Energiedichte. Anhand von ihren überlegenen Kühleigenschaften kann die erzeugte Wärme gut abgeführt werden und sogar mit einem kleinen Temperaturgradient. Trotz ihrem Gewichtsvorteil und effiziente Bauraumausnutzung, befindet sich die Pouch-Zelle in einer schlechteren als erwartete Marktposition, wegen Mangels an Sicherheitsmechanismen. Außerdem zeigt die Pouch-Zelle eine höhere Komplexität in ihrer Produktion [10, S. 20, 32, S. 22].

Prismatische Zelle

Die prismatische Zelle vereint einige Vorteile der zuvor genannten Zellkonzepte. Das quaderförmige Gehäuse ermöglicht eine effiziente Bauraumausnutzung ohne Zwischenräume. Dadurch ist die Energiedichte auf Modulebene nicht verringert. Ihre Montierbar-

keit und Sicherheit machen diese Bauweise zu einer attraktiven Option. Zu den Nachteilen zählen der Druck auf die Zelle bei der Verpackung und die Problematik des Kühlkonzepts [18, S. 56, 32, S. 22].

2.3.2 Modulaufbau

Die Kombination von einzelnen Zellen durch Reihen- und Parallelverbindungen ermöglicht, dass die Eigenschaften der Zusammenstellung frei gestaltet werden können [3, S. 33]. Diese Zellgruppe wird als Batteriemodul bezeichnet. Die Abbildung 2.12 zeigt die detaillierte Aufteilung eines Batteriemodules für die prismatische Zelle.

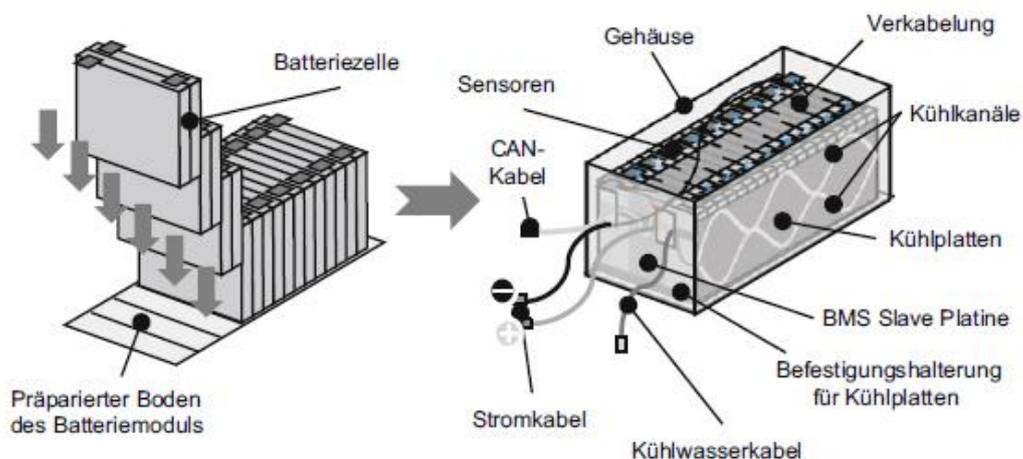


Abb. 2.11 Aufbau eines Batteriemodules [18, S. 58]

Die Spannungslage der Batterie ergibt sich aus der Summe der Einzelspannungen der seriell verschalteten Zellen. Bei gleicher Spannungslage ergibt die Parallelschaltung eine erhöhte Kapazität, je größer die Zellenzahl.

Das Batteriemodul besteht aus dem Zellblock, den Überwachungskomponenten, den Steuerungskomponenten, dem Verkabelungssystem und dem Batteriegehäuse [33, S. 99-102]. Mit diesem Unterteilungssystem sind alle Modulkomponenten nach ihrer Funktion klassifiziert.

Zuerst ist der Zellblock für die Energieversorgung zuständig. Als funktionaler Kern des Moduls umfasst er die Lithium-Ionen-Zellen und teilweise das Kühlungssystem. Die Messungen innerhalb des Moduls wie z.B. die lokale Temperatur oder Stromfluss werden bei den Sensoren vom Überwachungssystem ausgeführt. Damit erfolgt die Steuerung vom Batteriemanagementsystem (BMS). Das Verkabelungssystem ist nicht nur für den Energietransport entlang der Batterie (Stromkabel) zuständig, sondern auch für die Informationsübertragung zwischen Modulkomponenten (CAN Kabel). Letztendlich schützt das Gehäuse empfindliche Komponente von schädlichen Einflüssen an und aus der Umwelt [33, S. 99-102].

2.3.3 Sicherheit

Zusätzlich zur chemischen Sicherheit, die durch die Materialauswahl der Zelle und ihre hergestellten passiven Sicherheitsmechanismen zusammengesetzt ist, können weitere Sicherheitsmaßnahmen auf Modulebene eingesetzt werden. Diese sind in der folgenden Abbildung gezeigt:

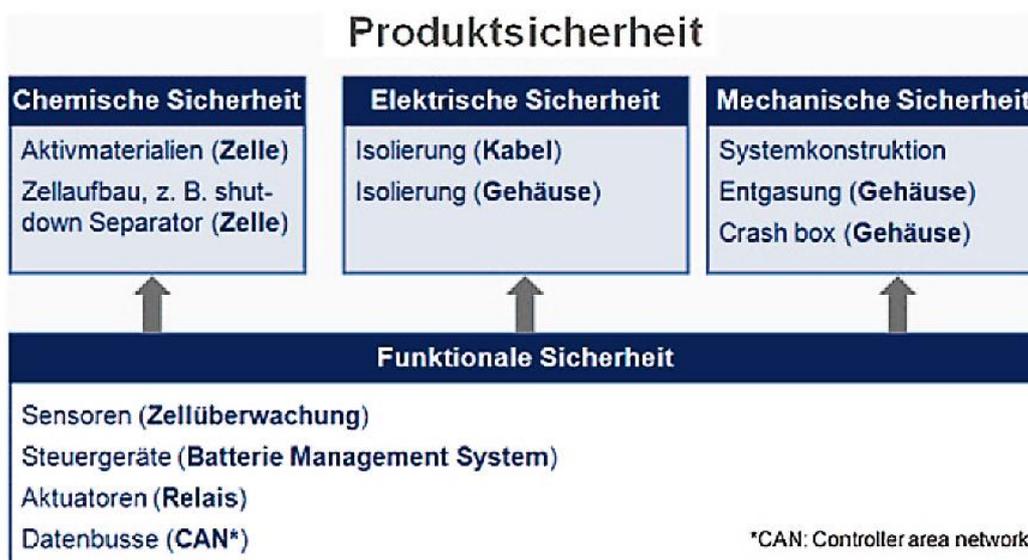


Abb. 2.12 Sicherheitsmaßnahmen der Lithium-Ionen-Batterie [23, S. 17]

Auf der elektrischen Seite spielt die Isolierung der stromführenden Fahrzeugteile eine wichtige Rolle. Die Unterbringung der Batterie und der Berührungsschutz durch Isolierschutz verringern die Gefahr in Crashesituationen. Unter üblichen Betriebsbedingungen ist die Anwendung von unverwechselbarer Kennzeichnung sämtlicher HV-Label und Spezialstecke empfehlenswert [10, S. 17].

Der mechanische Batterieschutz umfasst die Konstruktionsmaßnahmen zur Erhöhung der Crashesicherheit. Unter denen befindet sich die Ventile zur Abblasung der Reaktionsgase im Fehlerfall und die Crash Box, die der Aufprallwirkungen abfängt [10, S. 17, 23, S. 16].

Zusammen mit der gemeinsamen Handlungsweise des BMS und der weiteren Überwachungskomponenten bilden die verschiedenen Sicherheitssysteme die gesamte Produktsicherheit des Moduls.

2.4 Modellierung von Lithium-Ionen-Batterien

Die bisherigen Informationen zeigen die enorme Komplexität der Lithium-Ionen-Zelle und die Vielzahl von Eigenschaften und Einflussvariablen. Aus diesem Grund haben Wissenschaftler und Unternehmen durch die Anwendung von informatischen Modelle

versucht, deren Verhalten nachzubilden um anschließend neue Optimierungsrichtungen zu untersuchen.

In der aktuellen Forschung werden die folgenden Modelltypen für Simulation der Lithium-Ionen-Zellen verwendet: Physikalisch-chemische, Elektrisch Ersatzschaltkreise und Black-Box Modelle [34, S. 6].

Physikalisch-chemische Modelle

Für Anwendungen mit Anspruch auf eine möglichst hohe Genauigkeit werden Modelle herangezogen, die auf physikalischen und chemischen Differentialgleichungen basieren. Aufgrund der hohen Komplexität wird für das Lösen meist auf FEM-Programme (Finite-Elemente-Methode) zurückgegriffen [34, S. 6]. Ein Beispiel dafür ist in Abb. 2.14 zu sehen. Die Physik-chemischen Modelle haben den Nachteil, dass sich lange Berechnungszeiten ergeben können und werden daher nur für Entwicklungs- und Optimierungsvorhaben eingesetzt [35, S. 40].

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{Gesamt, Zyl}} &= \alpha_{th} \pi DL (T_{\text{Zelle}} - T_{\text{Luft}}) \\ &+ \left(k \frac{\pi r^2}{\Delta z} \right) (T_{\text{Zelle}} - T_{\text{Kontakt } +z}) \\ &+ \left(k \frac{\pi r^2}{\Delta z} \right) (T_{\text{Zelle}} - T_{\text{Kontakt } -z}) \end{aligned}$$

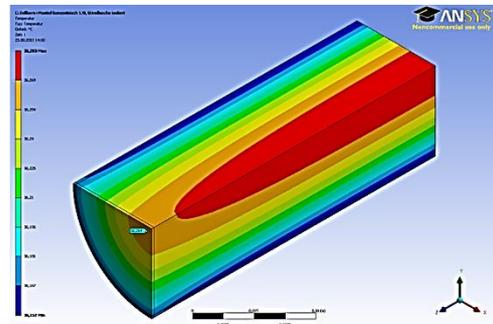


Abb. 2.13 Wärmeleitungsgleichung für eine zylindrische Zelle und ihre Lösung bei FEM-Programm nach [36]

Elektrische Ersatzschaltbilder

Das Batterieverhalten wird mithilfe von elektrischen Standardbauteilen nachgebildet. Vorteil dieser Modellierungsart ist ihre hohe Flexibilität. Die Varianten reichen von einer idealen Spannungsquelle bis hin zur Reihenschaltung einer Vielzahl von RC-Gliedern. Geringe Rechenzeiten machen das Verfahren für Anwendungen mit Echtzeit-anforderungen geeignet [34, S. 6]. Im nächsten Bild ist ein einfaches elektrisches Ersatzmodell zu sehen.

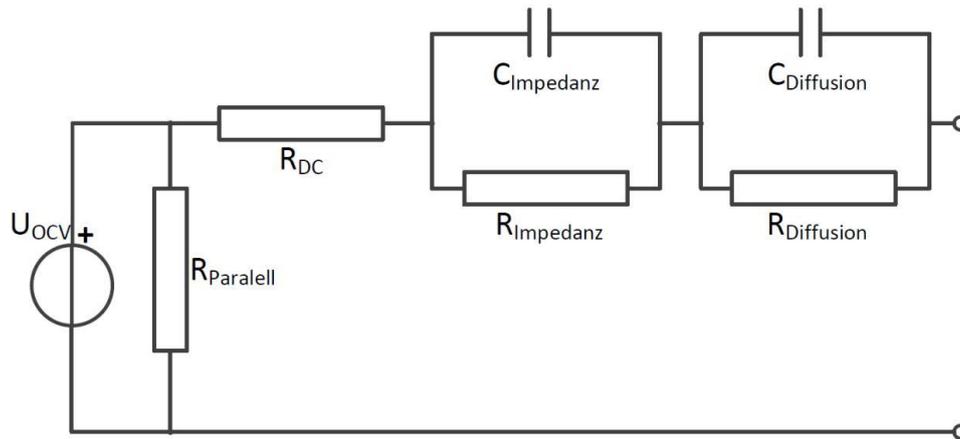


Abb. 2.14 Elektrische Ersatzschaltbilder einer Lithium-Ionen-Zelle [22, S. 44]

Black-Box Modelle

Sie bedienen sich ausschließlich empirisch ermittelter Zusammenhänge. Die rein mathematischen Modelle lernen das Batterieverhalten durch die Einspeisung von Messergebnissen [34, S. 6]. Zu den verschiedenen Methoden gehören Kapazitätsmodelle, Klemmenspannungsmodelle, Fuzzy Logic, Neuronale Netze und Stochastische Batteriemodelle. Sie haben den Vorteil, dass die Rechenzeiten kurz sind und werden hauptsächlich für Diagnosezwecke eingesetzt. Nachteilig sind der hohe Parametaraufwand und die geringe Genauigkeit im Vergleich zu den anderen Verfahren [37, S. 40].

2.5 Metamodelle

Das Problem vieler FEM-basierten Simulationen ist häufig lange Berechnungszeiten von mehreren Tagen trotz hoher Rechenleistungen. Ein Ansatz, um mit dieser Problematik zu umgehen, ist die Verwendung von Metamodellen. Die Grundlage eines Metamodells ist die Information eines Physik-chemisches Modells zu vereinfachen [38, S. 64-69]. Es soll möglichst gleiche Ergebnisse als die des ursprünglichen Modells liefern, ohne die Simulation des Physik-chemisches Modells ablaufen zu lassen.

Vor der Anwendung des Metamodells müssen einige Referenzparameter simuliert werden, um eine Datenbank zu generieren. Diese Daten dienen als Stützstellen und werden bei der Approximation für andere Datensätze angewendet. Auf diese Weise kann das Ersatzmodell eine vielfache schnellere Berechnung als das ursprüngliche Modell durchführen, ohne bedeutenden Genauigkeitsverlust [38, S. 64-69]. In Hoffmann [3, S. 67-70] liegen die Abweichungen zwischen dem Metamodell und dem ursprünglichen Modell bei einem maximalen Relativfehler von 4 %.

3 Methodik zur Bestimmung der optimalen Zellgröße

In vorherigen Masterarbeiten des Lehrstuhls wurden thermische Modelle der konventionellen Bauformen durch die Metamodellierungsmethodologie erstellt. Mit diesen Metamodellen kann der Temperaturverlauf der Zelle für einen eingegebenen Fahrzyklus bestimmt werden. Die Berechnungszeiten sind im Vergleich zu den entsprechenden FEM Modelle 1000-mal schneller [39, S. 8].

Auf Basis der Metamodelle wurde ein Optimierungstool erstellt, das nach Vorgabe von Restriktionen eine optimierte Zellgeometrie ausgibt. Während bisher mehrere Tage für den Optimierungsprozess benötigt wurden, liefert das metamodellbasierte Verfahren ein Ergebnis in ca. 1 Minute [3, S. 78]. Dieses Optimierungstool ist im WzBdoZ Programm hinzugefügt.

3.1 Aufbau und Simulation der Metamodelle

Die Arbeiten von Hoffmann [3] und Ladhari [4] beruhen auf bestehenden thermisch-elektrischen Modelle, die mittels ANSYS Workbench erstellt wurden. Diese Modelle wurden durch das Ansys Parametric Design Language parametrisiert, um die Simulation von unterschiedlichen Geometrien zu ermöglichen. Dadurch konnte der spezifische Widerstand der Zellmaterialien nach der Geometrievariation angepasst werden. Ein Anspruch dieser Arbeiten ist, die Parameter des Aktivmaterials als homogen entlang des Zellelements zu betrachten. Die Simulation der ANSYS Modelle benötigte eine lange Zeit und erforderte die konkrete Lösung für bestimmte Randbedingungen.

Zur Vermeidung langer Rechenzeiten wurde ein Verfahren entwickelt, welches das thermische Simulationsverhalten in Metamodellen abbildet. Dadurch können die Metamodelle Lösungen für ein breites Spektrum von Randbedingungen in einer extrem kurzen Zeit anbieten.

Die Kombination verschiedener Parameter (Starttemperatur, Temperaturgradient und C-Rate) stellen die Randbedingungen für 1-sekündige Simulationen dar. Die Ergebnisse dieser Simulationen bilden die Datenbank, mit der die Metamodelle trainiert wurden und die mathematischen Beziehungen approximiert wurden. Für die Erzeugung der Metamodelle aus dieser Datenbank wurde der MATLAB-Toolbox SUMO verwendet [40, 41]. Dieses Vorgehen wurde für die zylindrische und für die Pouch-Bauweise mit jeweils 25 verschiedenen Geometrien durchgeführt. [3, S. 78]. Aufgrund der hohen Rechenzeit der prismatischen Zellen wurden Metamodelle für nur 9 verschiedene Geometrien erstellt [4, S. 80].

Die Metamodelle wurden zur MATLAB Softwareumgebung als MATLAB-Funktionen exportiert. Die Funktionen nehmen als Input die Starttemperatur und C-Rate und liefern die Zelltemperatur nach einer Sekunde Zeit. Für einen eingegebenen Fahrzyklus kann die Simulation für die 25 (oder 9) verschiedenen Geometrien durchgeführt werden. Mit der

Interpolation der Ergebnisse für diese konkreten Geometrien können Kennfelder dargestellt werden, welche die thermische Leistung der Zelle nach ihrer Größe angeben. Obwohl diese Funktionen die Endtemperatur für verschiedene Anfangstemperaturen und Fahrzyklus bestimmen, sind diese Funktionen abhängig von den Randbedingungen definiert im parametrischen Modell. Das verhindert in einem gewissen Maße die Möglichkeit, der Zelltemperaturablauf bei anderen Kühlungssysteme zu simulieren.

3.2 Das Gesamtoptimierungstool

Die Bestimmung der optimalen Zellgröße kann nicht zur Auswahl der besten thermischen Zelleistung reduziert werden. Es gibt eine Vielzahl von Faktoren die berücksichtigt werden müssen. Die Anforderungen an die Lithium-Ionen-Batterie in Rahmen der Elektromobilität wurden nach Kerler identifiziert und unter den folgenden Bewertungskriterien klassifiziert:

- Die Zellsicherheit. Die optimale Zellgröße sollte die niedrigste Ausfallwahrscheinlichkeit haben und den geringsten Schaden im Fehlerfall verursachen.
- Die Kosten und Produktionsfreundlichkeit. Die Herstellungskosten und die verwendeten Rohmaterialien spielen eine wichtige Rolle in der Zellauswahl. Die Bewertung der optimalen Zellgröße sollte die Montierbarkeit und Handhabbarkeit der Zelle betrachten.
- Das thermische Verhalten der Zelle. Es ist direkt verbunden mit der Sicherheit und der Leistung der Batterie.
- Die elektrische Effizienz. Die Wirkung der Kontaktierungen und Verschaltungen sollte analysiert werden. Die optimale Zellgröße sollte der elektrische Leistungsverlust minimieren.
- Das Package. Die optimale Interaktionen innerhalb des Batteriepacks und die Anordnung des Moduls sollte optimal ausgenutzt werden.

Die Abbildung 3.1 nach Lin fasst diese Kriterien und die Inputs für die Bewertungsmodelle zusammen. Lin fügt noch die Alterung als Bewertungskriterium angesichts ihrer Verbindung zur Batterieleistung hinzu. Die erwartete Lebensdauer der Zelle hat auch eine indirekte Wirkung auf die Batteriekosten durch die Ersetzung der älteren Zellen.

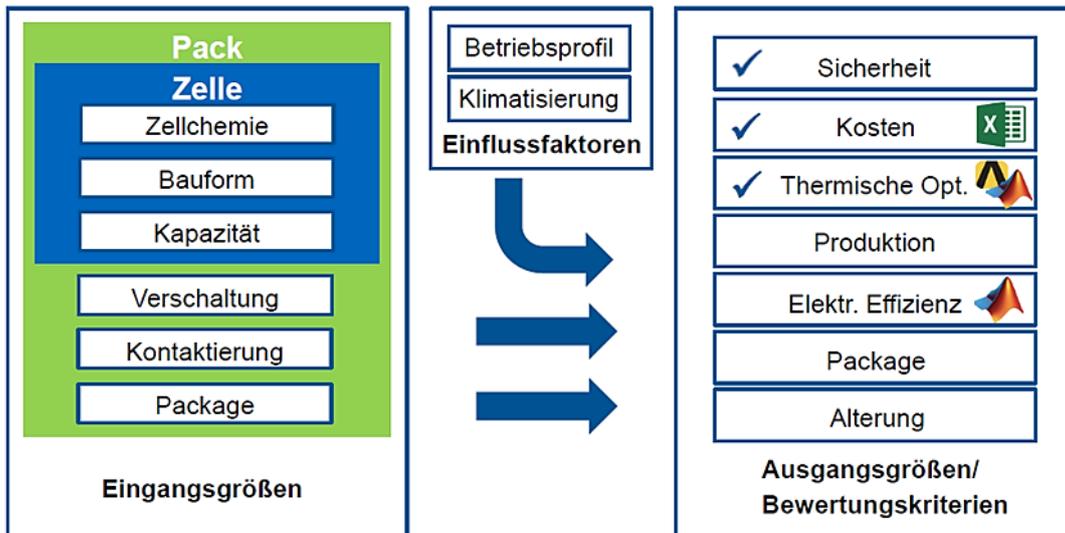


Abb. 3.1 Eingangsgrößen und Bewertungskriterium des Gesamtoptimierungstool nach [42, S. 4]

In der Zukunft sollte das WzBdoZ Programm nach allen diesen Bewertungskriterien erstellt werden. Momentan besteht es aus einem Kostenmodell, einem thermischen Optimierungstool, und einem Modell zur Bestimmung der chemischen Sicherheit. Danach führt das Programm eine Gesamtoptimierung durch.

Das Kostenmodell erlaubt einen A-B-Vergleich zwischen unterschiedlichen Zellchemien und den Herstellungskosten der verschiedenen Zellbauformen. Das thermische Optimierungstool ermöglicht die Simulation des thermischen Verhaltens von Zellen unterschiedlicher Größe nach den erstellten Metamodellen. Das Sicherheitsmodell simuliert die unterschiedlichen Zellchemien und bestimmt die sicherere Zellgröße. Die Gesamtoptimierung erfolgt nach der Einzelbewertung jeder Programmunterteilung. Bei einem multikriteriellen Auswertungsprogramm bestimmt die Gesamtoptimierung die optimale Zellgröße [42, S. 3-6].

Die Benutzeroberfläche spielt eine wichtige Rolle im WzBdoZ Programm. Sie sammelt die Ergebnisse der einzelnen Optimierungstools und führt die Schritte des ganzen Optimierungsverfahrens aus. Diese Schritte sind in der Abbildung (3.2) gezeigt.

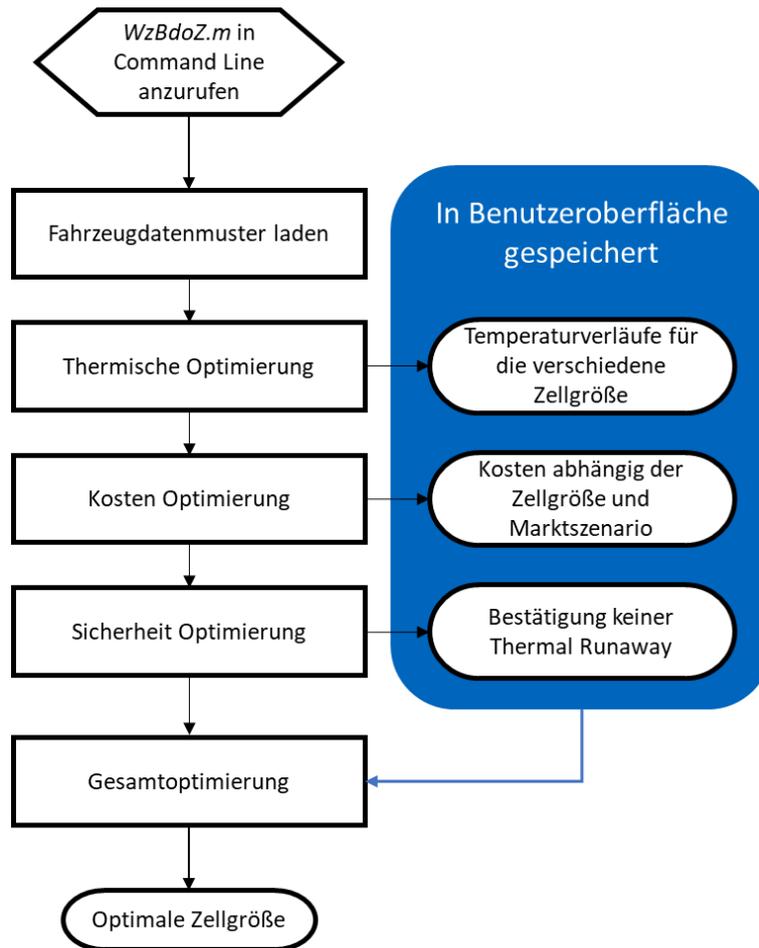


Abb. 3.2 Schritte der Optimierungsverfahren

4 Erweiterung des thermischen Optimierungstools

Das thermische Optimierungstool kann das thermische Verhalten der Lithium-Ionen-Zellen mit unterschiedlicher Größen und Zellbauformen qualitativ vergleichen. Die Kühlungsstrategie ist in den angestellten Metamodellen schon bestimmt, aber die Entladungsbedingungen können durch die Eingabe eines gewünschten Fahrzyklus modifiziert werden. Die Metamodelle berücksichtigen die Wärmewirkungen innerhalb der Zelle und der Wärmeabgabe an die unmittelbare Umgebung. sie berücksichtigen keinen Wärmeaustausch zwischen aneinander liegenden Zellen, der durch die Stromleiter, den Kontakt zwischen Zellen oder die Luft des Kühlungssystems erfolgt.

Die Erweiterung des thermischen Optimierungstool soll das komplexe thermische Verhalten eines Batteriemoduls auf Basis der Metamodelle von Hoffmann [3] und Ladhari [4] beschreiben.

Dieses Kapitel zeigt erstens die Grundlagen und Entwicklung des Modulmodells. Danach wird ein MATLAB Programm aus dem Modulmodell entwickelt. Die Validierung des Modells erfolgt durch den Vergleich der Programmergebnisse mit den Realendaten des aCar Fahrzeugs. Zuletzt wird die Implementierung im Optimierungstool erklärt.

4.1 Entwicklung des Modells für die Modulebene

4.1.1 Physikalische Grundlage und Randbedingungen

Die Grundlage des Modells ist der 1. Hauptsatz der Thermodynamik, der die Leistungsbilanz in einem Volumenelement definiert [27]. Ihre Formulierung ohne Arbeitsstrom über die Systemgrenze lautet wie folgt:

$$\frac{\partial U_{in}}{\partial t} = \sum^i \dot{Q}_i + q^* dV \quad (4.1)$$

Wie die Gl. (4.1) zeigt, führt die zeitliche Änderung der inneren Energie U_{in} des Volumenelements dV auf zwei Ursachen zurück: Auf die Wärmeströme \dot{Q}_i und auf die im Volumen vorhandenen Quellen mit dem volumenspezifischen Quellterm q^* . Das Bild (4.1) zeigt ein Beispiel zur Anwendung des Hauptsatzes für ein differentiales Volumenelement im Euklidischen Raum.

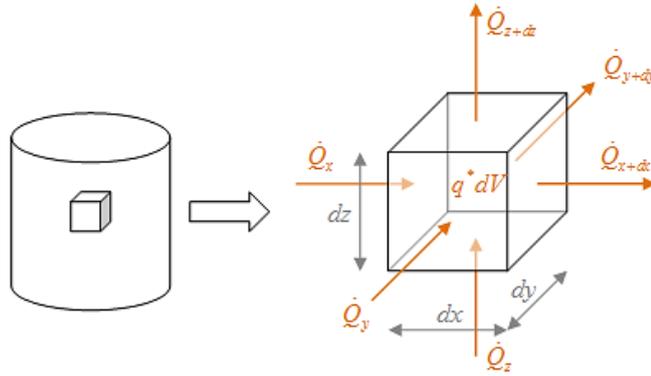


Abb. 4.1 Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik

Die innere Energie eines inkompressiblen Körpers hängt von seiner Temperatur und seiner spezifischen Wärmekapazität ab. der Wärmestrom ergibt sich aus dem Temperaturgradient und der Wärmeleitfähigkeit des Elementes. Die Terme von Gl. (4.1) können formuliert werden als:

$$\frac{dU_{in}}{dt} = \rho \int_V c_v(T) \frac{\partial T}{\partial t} dV \quad (4.2)$$

$$\dot{Q} = - \int_A \vec{q} \cdot \vec{n} dA = - \int_V \nabla \cdot \vec{q} dV \quad (4.3)$$

Wenn die Terme der Gl. (4.1) ersetzt werden, ergibt sich das folgende Volumenintegral:

$$\rho \int_V c_v(T) \frac{\partial T}{\partial t} dV = - \int_V \nabla \cdot \vec{q} dV + q^* dV \quad (4.4)$$

In der Gl. (4.4) wird dV ausgeklammert, um alle Terme in einem einzigen Volumenintegral aufzustellen.

$$\int_V \left(\rho c_v(T) \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q} - q^* \right) dV = 0 \quad (4.5)$$

Dieses Volumenintegral verschwindet nur dann, wenn der Integrand selbst gleich null ist. Damit gilt:

$$\rho c_v(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \vec{q} + q^* \quad (4.6)$$

Letztendlich wird das Gesetz von Fourier (4.7) herangezogen. Dadurch wird die Wärmestromdichte mit dem Temperaturgradienten verknüpft. Damit ergibt sich die gesuchte Differentialgleichung für das Temperaturfeld (4.8):

$$\dot{\vec{q}} = -k(T) \nabla T \quad (4.7)$$

$$\rho(T)c_v(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k(T) \nabla T) + q^* \quad (4.8)$$

Für den instationären Fall bei der Betrachtung eines genügend kleinen Zeitintervalls, ergibt sich die folgende Gleichung [27]:

$$\rho(T)c_v(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \sum_i \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_i(T) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + q^* \quad (4.9)$$

Die Aufgabe des Modulmodelles ist für jeden Zeitschritt und jedes Modulelement diese Gleichung zu lösen.

Im Modell werden die Lithium-Ionen-Zellen, die Stromleiter, die Kontaktierungen und die Kühlungssystemelemente wie z.B. die Kühlungsplatte oder die Kühlungsluft betrachtet. Der Wärmeaustausch zwischen diesen Elementen und der Umgebung werden modelliert.

Um die Rechenzeit des Modells zu begrenzen, werden die spezifischen thermischen Eigenschaften der Komponenten mit einigen Vereinfachungen berücksichtigt. Die Komponenten werden als homogen betrachtet und die Temperaturabhängigkeit von den Materialien wird nicht berücksichtigt. Der Einfluss der Temperatur im betrachteten Bereich führt nur zu Abweichungen von unter 5 % führt [43, S. 535-542, 44, S. 341-350]. Zum Beispiel ergibt sich für die spezifische Wärmekapazität der zylindrischen Zelle eine Abweichung von 3.33 % in ihren Werten zwischen 20 °C und 45 °C. Das Bild (4.2) zeigt diese Wechselwirkung zwischen der Wärmekapazität und der Temperatur.

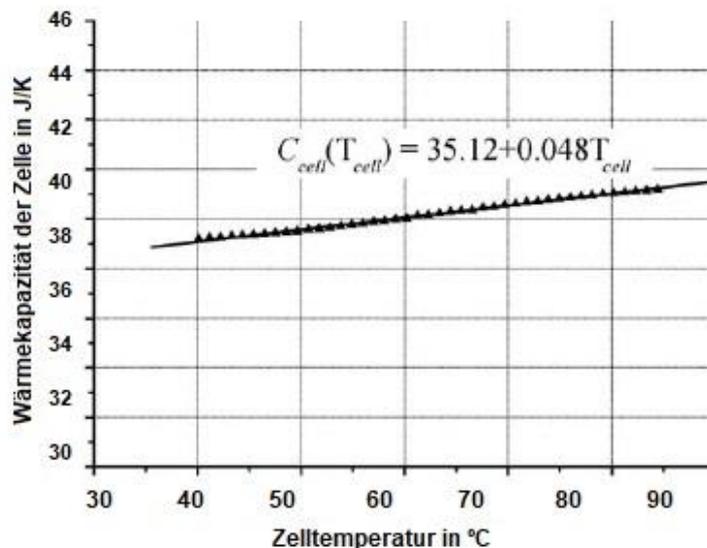


Abb. 4.2 Wechselwirkung der Wärmekapazität der Zelle mit der Zelltemperatur [43, S. 535-542]

In den weiteren Wärmeanalysen ist die Strahlung zwischen Elementen wegen ihrer starken Abhängigkeit vom Temperaturunterschied der nahliegenden Körper nicht zu berücksichtigen. Vorherige Untersuchungen schätzen, dass diese Vereinfachung der Wärmeverlustrechnung zur Präzisionsverlust von maximal 7% führt [45, S. 63].

Wenn der Wärmeaustausch durch Strahlung vernachlässigt wird, können die identifizierten Wärmeleistungen eines Elements als die Summe der Wirkung der Konduktion und der Konvektion auf jede Fläche gezeichnet werden. Für eine bestimmte Richtung j und die senkrechte Fläche A_s und A_h ergibt sich die folgende gerichtete Wärmeleitungsgleichung:

$$\dot{Q}_j = k \frac{A_s(j) T(j)}{\partial j} + \alpha_{th} A_h (T_{Element} - T_{Luft}) \quad (4.10)$$

Im Folgenden wird die konkrete Lösung des zweiten Gleichungsbestandteils von der Gl. (4.9) für jedes Element beschrieben. Dafür werden alle Wärmeströme des Elements durch die in Kapitel 2 erläuterten Wärmeübertragungsmechanismen definiert. Die Verbindung der Modulelemente ist durch eine Verbindungsmatrix gewährleistet.

Als wärmeerzeugende Elemente sind die Zellen, die Stromleiter und die Kontaktierungen zu zählen. Ihre Wärme entsteht aus dem Stromfluss durch den elektrischen Widerstand der leitenden Elemente. Das ist, wie in Kapitel 2 erläutert, die Joulsche Wärme Gl. (2.4).

4.1.2 Zelle

Wie schon erwähnt, ist die Zelle eine Wärmequelle des Moduls. Ihre Wärmeentwicklung ist aus der Simulation der Metamodelle entnommen. Um ihre Wärmeströme zu erkennen und die Gl. (4.10) anzuwenden, wird die Zelle als orthotropes thermisches Element betrachtet. Das Bild zeigt die Wärmeströme in Bezug zu ihren jeweiligen senkrechten Oberflächen.

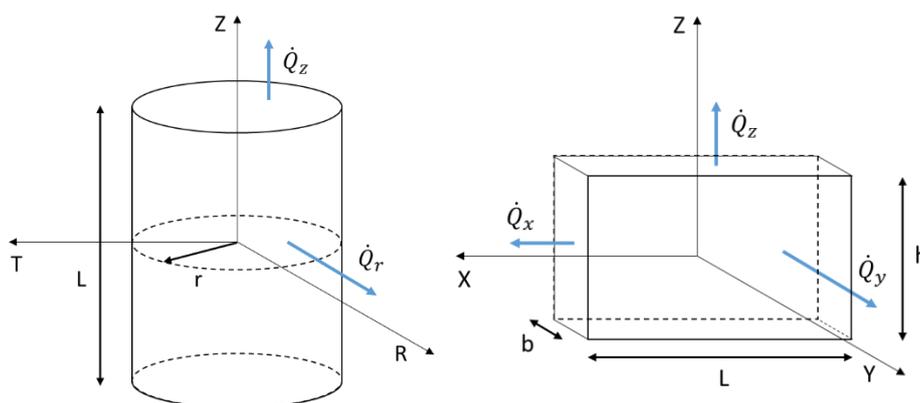


Abb. 4.3 Wärmeübertragungsrichtungen der zylindrischen und prismatischen Zelle

Abhängig von der Anordnung der Zellen kann ein vorherrschender Wärmeübertragungsmechanismus identifiziert werden. In diesem Fall kann die Gl. (4.10) auf einen Term reduziert werden. Dafür müssen die Flächen der Zelle beobachtet werden. Die Zellen,

die keinen direkten Kontakt mit anderen Modulelementen haben, erzeugen den Wärmefluss durch Konvektion. Andernfalls bestimmt die Konduktion den Wärmeaustausch.

Nach der Untersuchung der meistgenutzten Anordnungen in den aktuellen Elektrofahrzeugkonzepten werden in dieser Arbeit die folgenden zwei Zellanordnungen behandelt:

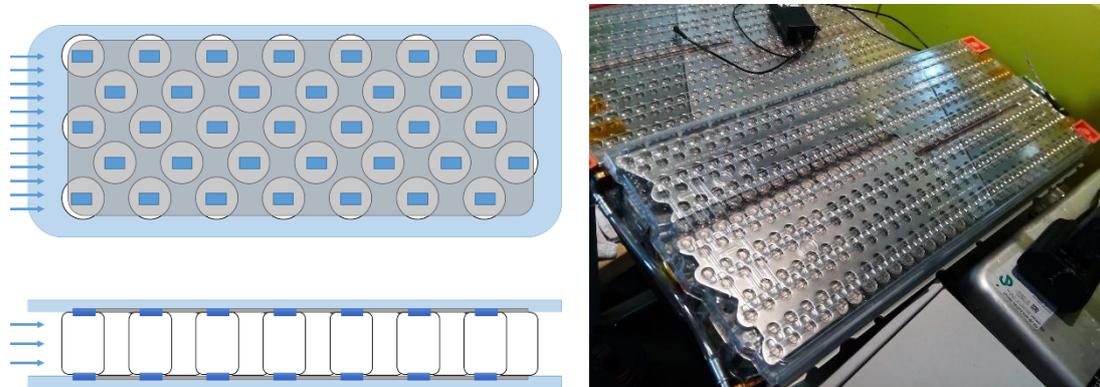


Abb. 4.4 Hexaedrische Modulordnung der zylindrischen Zellen abstrahiert von Tesla Model S Batteriemodul

Die hexaedrische Anordnung ermöglicht ein kompaktes und hochenergiedichtetes Modul aus zylindrischen Zellen. Das Kühlsystem besteht aus einer erzwungenen Luftkonvektion auf der horizontalen Richtung des Moduls. Diese Modulordnung wird am meisten beim Tesla Model S benutzt [46].

Erwähnenswert ist, dass das neue Batteriekonzept von Tesla mit einem Flüssigkeitskühlungssystem aus Glykol gestaltet ist. Dieses Kühlsystem wird aufgrund der komplexen zeitaufwendigen Modellierung von der Flüssigkeit in diesem Modell nicht betrachtet.

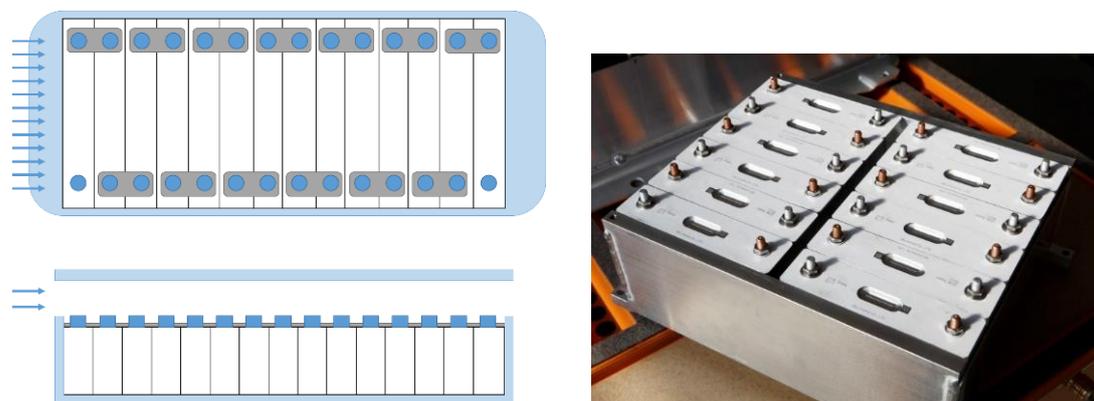


Abb. 4.5 Lineare Modulordnung der prismatischen Zellen abstrahiert von BMW i3, Audi Q7 PHEV und Renault Zoe Batteriemodulen

Die zweite Möglichkeit ist die lineare Anordnung. Dank der prismatischen Form der Zellen ist die Einpackung einfach zu produzieren. Der obere Teil kann durch eine natürliche oder erzwungene Konvektion gekühlt werden. Hier geschieht auch die Konduktion aus der Zelle an die Kühlungsplatte. Diese Modulordnung wird in vielerlei Automodellen verwendet, z.B. im BMW i3, Audi Q7 PHEV und Renault Zoe Modelle [47–49].

Diese zwei vorgestellten Anordnungen umfassen den Großteil der Modulkonfigurationen der meistverkauften Modelle in der EU in den Jahren 2016 und 2017 [50]. Die explizierten Lösungen zur Gl. (4.10) für die Wärmeleistungen der zylindrischen und prismatischen Zellen in diesen Anordnungen, werden in der folgenden Tabelle dargestellt:

Tabelle 4.1 Spezifische Lösungen der gerichtete Wärmeleistungsgleichung für das Modulelement Zelle

Eindimensionale Wärmeleistung	Aufbau	Gleichungslösung
\dot{Q}_r	Zylindrisch	$\alpha_{th} \pi D L (T_{Zelle} - T_{Luft})$ (4.11)
\dot{Q}_z	Zylindrisch	$k \frac{\pi r^2 T(z)}{\partial z}$ (4.12)
\dot{Q}_x	Prismatisch	$k \frac{b h T(x)}{\partial x}$ (4.13)
\dot{Q}_y	Prismatisch	$k \frac{L h T(y)}{\partial y}$ (4.14)
\dot{Q}_{+z}	Prismatisch	$k \frac{b L T(z)}{\partial z} + \alpha_{th} A_h (T_{Zelle} - T_{Luft})$ (4.15)
\dot{Q}_{-z}	Prismatisch	$k \frac{b L T(-z)}{\partial z}$ (4.16)

Aufgrund der ausgewählten Rechenmethode wird die Zelle als Massenpunkt betrachtet. Der Temperaturunterschied zwischen dem Zellzentrum und der Zelloberfläche beträgt weniger als 2 °C im Temperaturbereich von 20 bis 45 °C für Zellen, die kleiner als die 2085150 Zelle sind. Zuzufolge ist es angemessen, die innere Verteilung der Zelltemperatur zur durchschnittlichen Zelltemperatur zu reduzieren. Das gilt für die zylindrischen und für die prismatischen Zellen [4, S. 61, 43, S. 535-542, 44, S. 341-350]. Allerdings steigt der Unterschied mit der Größe der Zelle. Das Bild zeigt den Temperaturunterschied für eine zylindrische 18650 Zelle.

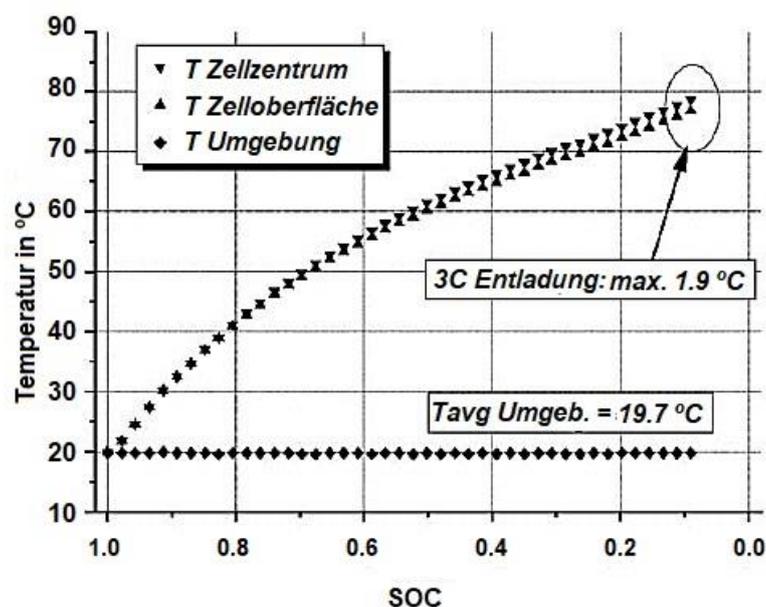


Abb. 4.6 Temperaturunterschied zwischen Zellzentrum und Oberfläche [43, S. 540]

Mit Berücksichtigung der Annäherung zur durchschnittlichen Zelltemperatur können die vorausgehenden Wärmeströme zusammengestellt werden, um die Gleichungen der Gesamtwärmeleistungen für die zylindrische und die prismatische Zelle zu erzeugen.

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{Gesamt, \text{ zyl}} = & \alpha_{th} \pi D L (T_{Zelle} - T_{Luft}) + \left(k \frac{\pi r^2}{\Delta Z} \right) (T_{Zelle} - T_{Kontakt.+z}) \\ & + \left(k \frac{\pi r^2}{\Delta Z} \right) (T_{Zelle} - T_{Kontakt.-z})\end{aligned}\quad (4.17)$$

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{Gesamt, \text{ Prism}} = & 2 \left(k \frac{b h}{\Delta x} \right) (T_{Zelle} - T_{Plate}) + k \frac{L h}{\Delta y} (T_{Zelle} - T_{Zelle \ i+1}) \\ & + k \frac{L h}{\Delta y} (T_{Zelle} - T_{Zelle \ i-1}) + k \frac{b L}{\Delta Z} (T_{Zelle} - T_{Kontakt.}) \\ & + k \frac{b L}{\Delta Z} (T_{Zelle} - T_{Plate}) + \alpha_{th} A_h (T_{Zelle} - T_{Luft})\end{aligned}\quad (4.18)$$

Zuletzt ist es nötig die Parameter ρ, c_v und k zu kennen, um die Gl. (4.17, 4.18) anzuwenden. Während der Simulation der Metamodelle wurden die Parameter als die Durchschnittswerte der Eigenschaften von jedem Material, der mit seinem Massenanteil multipliziert wird, gerechnet. Zum Beispiel gilt für die spezifische Wärmekapazität:

$$c_{v, \text{ Zelle}} = \frac{\sum_k c_{v,k} m_k}{\sum_k m_k}\quad (4.19)$$

4.1.3 Stromleiter und Kontaktierungen

Aus einer thermischen Sichtweise sind die Stromleiter für den Wärmeaustausch unter Zellen durch Konduktion zuständig. Die Kontaktierungen werden als Kontaktpunkte zwischen dem Stromleiter und der Zelle betrachtet, die diesen Wärmefluss behindern und noch als Wärmequelle wirken.

Die Stromleiter können als eindimensionale Wärmeverbindungen mit einer Fläche, die senkrecht zum Wärmefluss ist, definiert werden. Ihre Temperatur ist im Mittelpunkt zwischen den Kontaktierungen gerechnet, um die Effekte der Konduktion und auch der Wärmeerzeugung zu berücksichtigen.

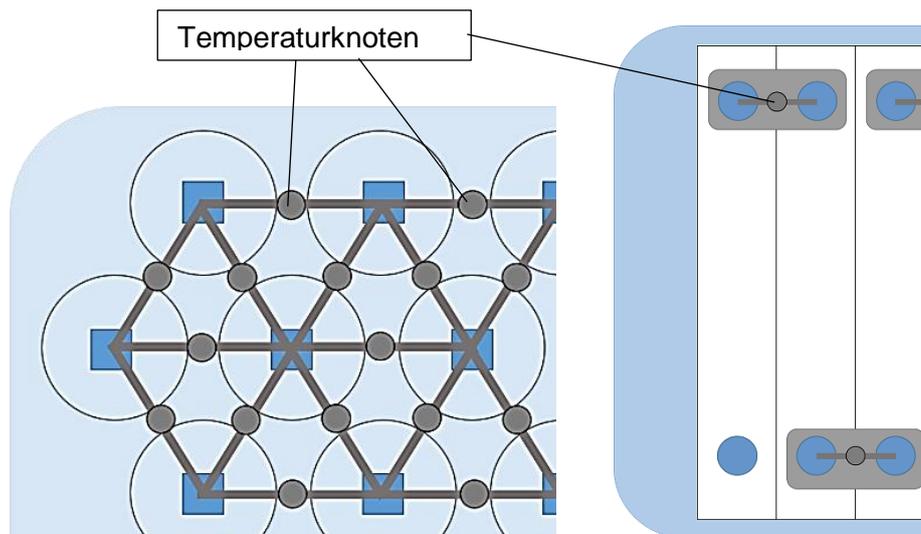


Abb. 4.7 Temperaturknoten der Stromleiter und Kontaktierungen für die zylindrische und die prismatische Anordnung

Die Temperaturknoten in der hexaedrischen Konfiguration interagieren mit den Nachbarpunkten und mit den nächstliegenden Kontaktierungen. Der Grund dafür ist, dass die Verbindung tatsächlich auf einer Metallfolie ist. Die Metallfolie bleibt immer mit einer bestimmten Nummer von Zellen in Kontakt. Übrigens gilt das nur für die zylindrischen Zellen, weil in der prismatischen Anordnung die Temperaturknoten nicht miteinander verbunden sind.

Die Konduktion ist der dominierende Wärmeübertragungsmechanismus für die Kontaktierungen. Die Stromleiter haben wegen ihrer größeren Oberfläche einen starken Wärmeaustausch nicht nur durch Konduktion sondern auch durch die Luftkonvektion.

Die Rechnung der Konduktion in den Stromleitern braucht die Bestimmung einer Fläche, die senkrecht zum Wärmeflussweg liegt. In der prismatischen Anordnung wird diese Fläche einfach durch die Dicke und Breite der Verbindung zwischen Kontaktierungen gerechnet. Aber in der zylindrischen Anordnung existiert keine klar definierte Fläche zwischen den Modulelementen, da die ganze Metallfolie als Stromleiter gilt.

Dazu wird für jeden Temperaturknoten ein Volumen mit der Form von einem hexaedrischen Prisma zugewiesen. Auf diese Weise ist die benötigte Fläche durch die Höhe und einer der Grundflächenkanten vom Prisma definiert. Zugleich sind diese geometrischen Größen jeweils die Dicke d und ein Halb von der Zellentfernung E_z . Das folgende Bild zeigt den Volumen und die definierte Fläche.

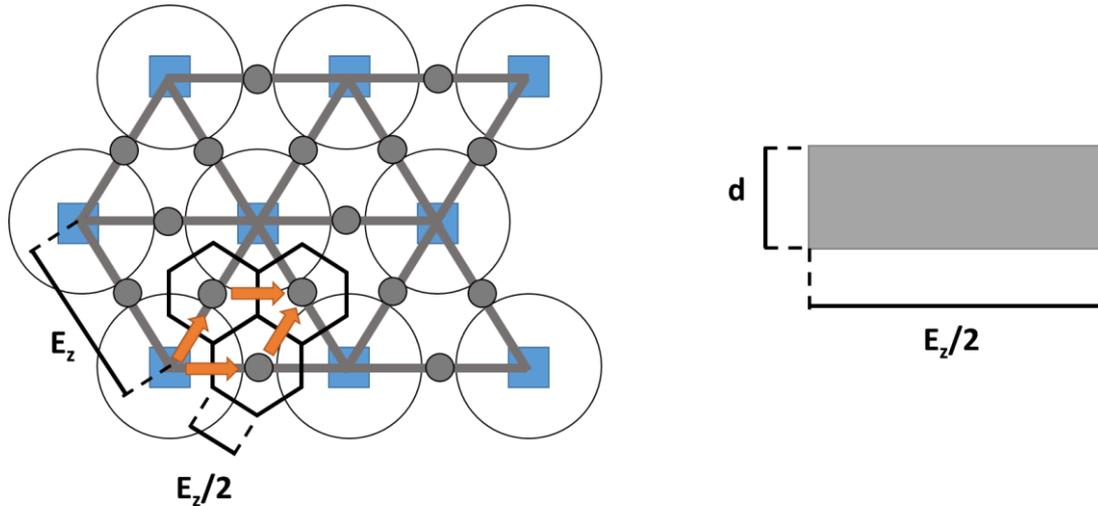


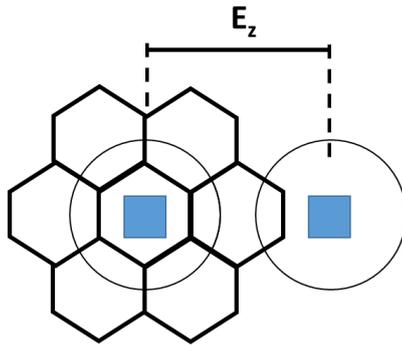
Abb. 4.8 Senkrechte Fläche der Metallfolie definiert als die Seite eines hexaedrischen Prismas

Die Wärmeausrichtungen sind hier durch den Weg zur Verbindung der Elemente festgelegt. Die Zelle ist mit den Kontaktierungen verbunden. Die Kontaktierungen sind mit den Stromleitern verbunden und die Stromleiter interagieren mit der Luft und sich selbst. Da werden die folgenden Wärmeleistungen erkannt:

Tabelle 4.2 Spezifische Lösungen der gerichtete Wärmeleistungsgleichung für die Modulelemente Kontaktierung und Stromleiter

Eindimensionale Wärmeleistung	Aufbau	Gleichungslösung
$\dot{Q}_{zelle-kontakt.}$	Zylindrisch	$k \frac{\pi r^2 T(z)}{\partial z}$ (4.20)
$\dot{Q}_{stromleit.-stromleit.}$	Zylindrisch	$k \frac{d \frac{E_z}{2} T(l)}{\partial l}$ (4.21)
$\dot{Q}_{zelle-kontakt.}$	Prismatisch	$k \frac{b L T(z)}{\partial z}$ (4.22)
$\dot{Q}_{kontakt.-stromleit.}$	Beide	$k \frac{d \frac{E_z}{2} T(l)}{\partial l}$ (4.23)
$\dot{Q}_{stromleit.-luft}$	Beide	$\alpha_{th} A_h (T_{Kabel} - T_{Luft})$ (4.24)

Die Fläche A_h von der Konvektionswärmeleistung der Stromleiter ändert sich nach dem Anordnungstyp. Für die prismatische Anordnung ist A_h die Oberfläche der Verbindungsfolie zwischen den Kontaktierungen. Im zylindrischen Fall wird eine Approximation nach der Unterteilung der Stromleiterfolie in Sechsecken ausgeführt. Das folgende Bild zeigt dieses Flächendefinitionsverfahren.



$$A(\text{Sechseck}) = A_6 = \frac{3 \left(\frac{E_z}{2} \right)^2}{2 \tan 30}$$

Abb. 4.9 Rechnung der Fläche für die Konvektionswärmeleistung

Zum Schluss sind die Parameter zu beachten. Wie schon im Absatz 4.1.2 über die Zelle dargelegt, sind die Parameter ρ , c_v und k die Durchschnittswerte der angewendeten Materialien und die werden in der Gl. (4.9) benutzt. Um die erzeugende Wärme zu berechnen, ist auch notwendig der elektrische Widerstand der Stromleiter und der Kontaktierungen zu kennen. Eine genaue Beschreibung der Rechnungsmethode befindet sich im Absatz 4.1.5.

4.1.4 Gehäuse und Kühlungssystem

Das Kühlungssystem besteht aus einer Luftzirkulation und einer Kühlungsplatte. Jedes von diesen Elementen übernimmt eine der zwei wichtigsten Wärmeübertragungsmechanismen, Konvektion und Konduktion.

Die Luftzirkulation führt die Wärme von den Zellen und den Stromleitern durch Konvektion an die Umgebung. Über die Kühlungsplatte findet Wärmeaustausch in Form von Konduktion mit der Umgebung statt. Das Gehäuse kann eine Kombination der drei Mechanismen nutzen, um die Wärme an die Umgebung zu übertragen. Schließlich hängt es überwiegend vom Batteriekonzept ab.

Das Gehäuse hat in der zylindrischen Anordnung keine direkte Interaktion mit den wärmeerzeugenden Modulelementen. Es muss erst ein Wärmeaustausch mit der Luftströmung erfolgen. Nur danach könnte das Gehäuse einen Einfluss auf die Wärmedissipation der Zellen oder der Stromleiter haben. Als passives thermisches Element führt das Gehäuse zu keiner Erhöhung der Temperatur der Luftkonvektion. Doch selbst wenn es der Fall wäre, würde ihre Wirkung wegen ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit noch mehr verringert. Aus diesen Gründen wird das Gehäuse in der zylindrischen Anordnung nicht betrachtet.

Außerdem spielt das Gehäuse die Rolle der Kühlungsplatte in der prismatischen Anordnung. Das kommt daher, dass keine Gefahr von elektrischen Kurzschluss mit den Zellenpolen besteht. Sodann kann das Gehäuse aus einem leitenden Metall in Kontakt mit den Seiten der Zellen aufgebaut werden. Auf diese Weise wird die Wärmeübertragung durch Konduktion bedeutend verstärkt.

In der Kühlungsplatte ist die Temperatur nur an bestimmten Punkten gerechnet. Diese Punkte fungieren als Knoten und vertreten die Oberfläche in Kontakt mit der Zelle oder mit der Umgebung. Die Position der Knoten wird durch die folgende Methode bestimmt:

Erstens wird ein Knoten in der Mitte der Oberfläche in Kontakt mit der Seite einer Zelle positioniert. Danach wird ein zweiter Knoten in der anliegenden Punkt auf der äußeren Oberfläche der Kühlungsplatte hinzugefügt. Die Punkte sind auch miteinander thermisch verbunden durch die Konduktion innerhalb des Festkörpers.

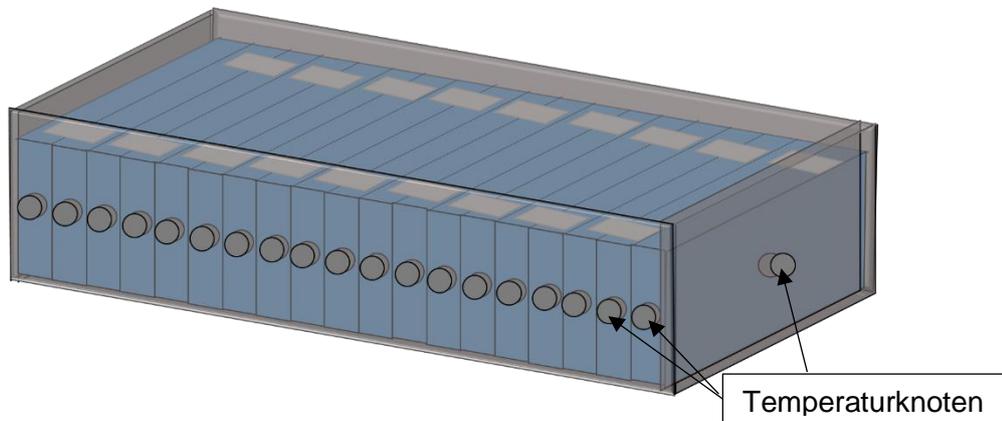


Abb. 4.10 Schematische Zeichnung des metallischen Gehäuses in der prismatischen Anordnung

Die Temperaturknoten der Kühlungsplatte haben die folgenden Gleichungen für die Wärmeleistung zwischen ihnen selbst und die Umgebung:

Tabelle 4.3 Spezifische Lösungen der gerichtete Wärmeleistungsgleichung für das Modulelement Kühlungsplatte

Wärmeleistung	Aufbau	Gleichungslösung	
$\dot{Q}_{Platte-Platte}$	Prismatisch	$k \frac{A_s T(l)}{\partial l}$	(4.25)
$\dot{Q}_{Platte-Zelle}$	Prismatisch	$k \frac{A_s T(j)}{\partial j}, \quad j \in [x, y, z]$	(4.26)
$\dot{Q}_{Platte-Umgebung}$	Prismatisch	$\alpha_{th} A_h (T_{Platte} - T_{Umgebung})$	(4.27)

Unter die Kühlungselemente muss der Luftkonvektion eine besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Bei beiden Anordnungen wird eine erzwungene Luftkonvektion auf die Zelle angewandt. Die prismatischen Zellen werden nur an der oberen Seite gekühlt, wie in der folgenden Abbildung gezeigt.

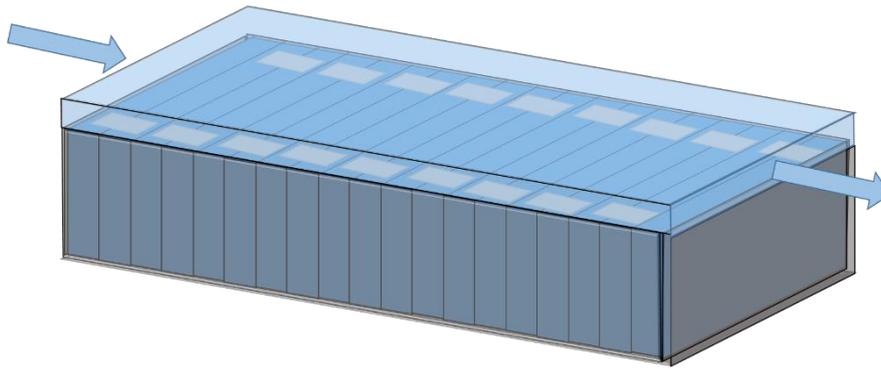


Abb. 4.11 Erzwungene Luftkonvektion in der prismatischen Anordnung

Im Gegensatz werden die zylindrischen Zellen durch Luftströmung entlang des Modules auf der ganzen Seitenoberfläche gekühlt. Zusätzlich wird eine Wärmeabgabe durch Konvektion von der Kühlungsplatte an einer oberen Luftströmung betrachtet. Diese zwei Luftsysteme werden voneinander unabhängig betrachtet, also sie interagieren nicht thermisch miteinander. Dann sind zwei Luftmassegruppen zu unterscheiden, wie im Bild dargestellt ist:

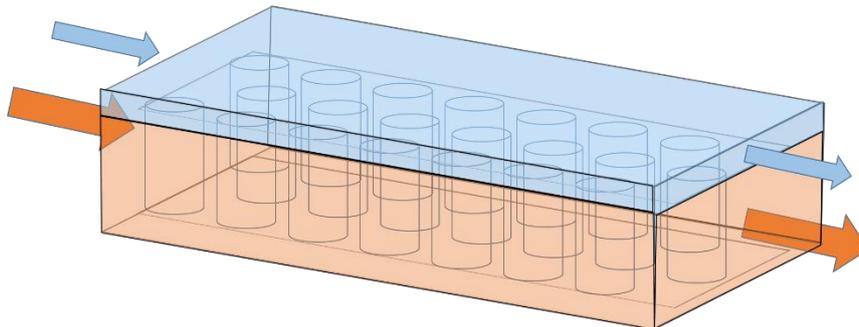


Abb. 4.12 Luftmassengruppen in der zylindrischen Anordnung

Außerdem ist die Luftmassengruppe, die quer gegen die zylindrischen Zellen strömt, in aufeinanderfolgenden Luftmassen unterteilt. Jede Luftmasse hat eine durchschnittliche Temperatur, welche die Wärmeeigenschaften der Luftmasseunterteilung bestimmt. Das folgende Bild zeigt diese Unterteilung.

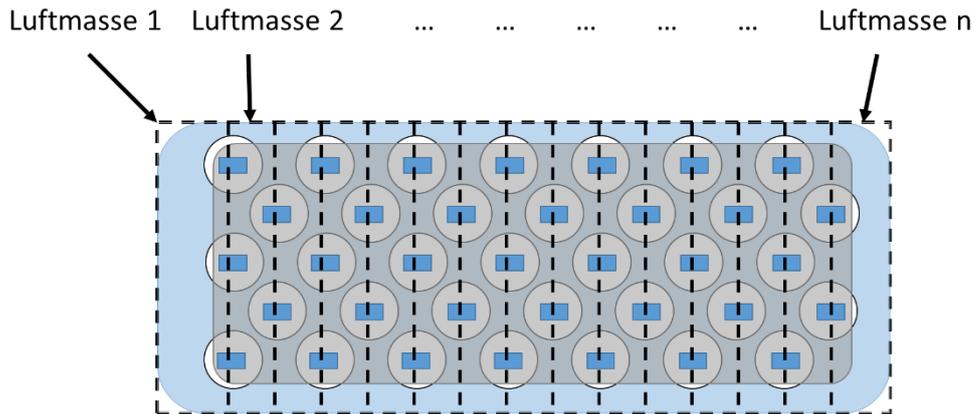


Abb. 4.13 Unterteilung der quer angeströmten Luftmassengruppe

Dem Grund hierfür liegt in der Vereinfachung der Rechnung der Wärmeaustausch durch Konvektion. Erstens muss die Kontinuitätsgleichung für eine kompressible Flüssigkeit Gl. (4.28) betrachtet werden.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} (\rho \vec{u}) = 0 \quad (4.28)$$

Die Geschwindigkeit der erzwungenen Luftzirkulation hat nur eine Richtung und nach der Betrachtung, dass jede Luftmasse dieselben Eigenschaften teilt, kann die Gl. (4.28) verarbeitet werden:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial x} = 0 \quad (4.29)$$

Wenn dieser Ausdruck über eine quer angeströmte Fläche angewendet wird, ergibt sich die folgende Gleichung:

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} = \frac{\partial(\rho A \vec{u})}{\partial x} = 0 \quad (4.30)$$

Infolgedessen muss der Massenstrom entlang der Geschwindigkeitsrichtung konstant bleiben. Das ist äquivalent zum Kontinuitätsgesetz für eine kompressible Flüssigkeit Gl. (4.31) und weist eine konstante Geschwindigkeit für jede Luftmasse nach, solange sich die quer angeströmte Fläche nicht ändert:

$$\dot{m} = \rho A u = \text{konstant} \quad (4.31)$$

Die Annahme, dass jede Luftmasse eine durchschnittliche Temperatur und Geschwindigkeit hat, erlaubt die genaue Bestimmung der Wärmeeigenschaften jeder Luftmasse. Vor allem ermöglicht es die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizient α_{th} , der abhängig von der Geschwindigkeit, der Viskosität und der Dichte des Lufts ist.

Das führt zur zweiten Vereinfachung. Durch die Anwendung des Wärmeübergangskoeffizienten in das Fouriersche Gesetz für Konvektionswärmeleistungen (4.7) kann die konvektive Wärmeleistung einfach berechnet werden.

$$\dot{Q}_{konv} = \alpha_{th} A_h (T_{Festkörper} - T_{Flussigkeit}) \quad (4.32)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient α_{th} wird aus der Nußelt-Zahl bestimmt. Die Nußelt-Zahl ist eine dimensionslose Kennzahl, die proportional zum Wärmeübergangskoeffizient ist.

$$Nu = \alpha_{th} \frac{D_{fluss}}{k} \quad (4.33)$$

Die Rechnungsformel der Kennzahl Nu kommt auf den Strömungstrajektorien und der Position der Modulelemente in Bezug zum Luftfluss an.

In der zylindrischen Anordnung hat der Luftstrom zwischen der Metallfolie und dem Gehäuse die Charakteristika einer turbulenten Strömung mit einem nicht entwickelten Stromprofil. In diesem Fall ist die folgende Gleichung am besten geeignet, um die Wirkung von der Konvektion und auch der Reibung zu berücksichtigen [51, S. 86-88, 52].

$$Nu_{d,turb} = \frac{(\xi/8) Re_d Pr}{1 + 12.7 \sqrt{(\xi/8)} (Pr^{2/3} - 1)} \left(1 + \frac{d_h}{L}\right)^{2/3} \left(\frac{T}{T_w}\right)^{0.45} \quad (4.34)$$

Mit ξ als die Rohrreibungszahl. Sie ist folgendermaßen gegeben [51, S. 86-88]:

$$\xi = [1.8 \log(Re_d) - 1.5]^{-2} \quad (4.35)$$

Die Gl. (4.33) berechnet die Nußelt-Zahl auf der gleichwertige Durchmesser d_h eines rechteckigen Rohres mit Höhe a , Breite b und Länge L .

$$d_h = \frac{2 a b}{a + b} \quad (4.36)$$

Die anderen dimensionslosen Kennzahlen benutzt in der Gleichung sind die Reynolds-Zahl und die Prandtl-Zahl.

$$Re_d = \frac{u d_h}{\nu} \quad (4.37)$$

$$Pr = \frac{\nu c_p \rho}{k} \quad (4.38)$$

Die obigen Gleichungen gelten ebenso für den Luftstrom in der prismatischen Anordnung, der den oberen Teil des Modules durchfließt. Ihr Gültigkeitsbereich ist für $10^4 < Re_d < 10^6$ und $L/d_h > 1$ definiert und eignet sich nur für Gase.

Für die Luftströmung, welche die zylindrischen Zellen quer anströmt, muss die Berechnungsweise der Nußelt-Zahl zwei Aspekte in Erwägung ziehen.

Erstens umgibt der Luftfluss die Zelle, die kein stromlinienförmiger Körper ist. Daraus folgend werden Wirbeln und Rückströmungen hinter der zylindrischen Zelle erzeugt. Die folgende Gleichung berücksichtigt diese Phänomene für die Nußelt-Zahl:

$$Nu_{L,turb} = \frac{0.037 Re_L^{0.8} Pr}{1 + 2.443 Re_L^{-0.1} (Pr^{2/3} - 1)} \left(\frac{T}{T_w} \right)^{0.121} \quad (4.39)$$

Die Gl. (4.39) gilt immer, sofern die Reynolds-Zahl zwischen 10^5 und 10^7 bleibt und die Strömung aus Gasen besteht. Die T_w bezieht sich auf die Wandtemperatur.

Der zweite Aspekt umfasst die Zusammenwirkung der Zellgruppe auf die Strömung. Da die zylindrischen Zellen in Strömungsrichtung hintereinander angeordnet sind, wird an den Zellen die Strömung abgelöst und dies beeinflusst den Wärmeübergangskoeffizient [51, S. 105-108].

Deswegen müssen die dimensionslosen Kennzahlen mit Geometriefaktoren korrigiert werden [51, S. 105-108, 53, S. 41-43]. Dazu ist die Körperdichtigkeit durch die Abstände zwischen den Zellen definiert. Der Abstand der zylindrischen Zellen senkrecht zur Strömungsrichtung ist s_1 , der Abstand der Rohrreihen s_2 .

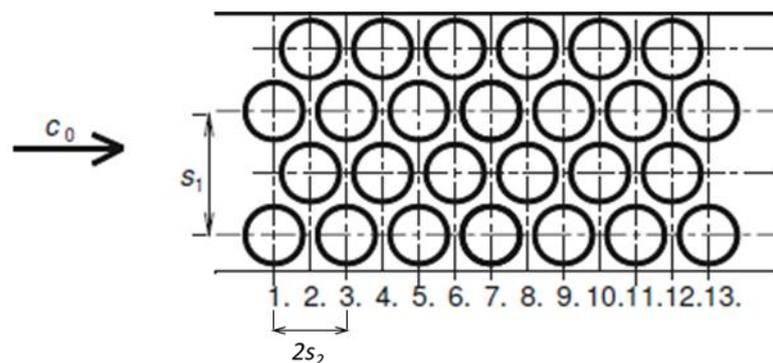


Abb. 4.14 Definition der Anordnungsdichtigkeit durch ihre Abstände

Danach wird der Hohlraumanteil Ψ als das Gesamtvolumen minus Volumen der Zellen berechnet. Der Hohlraumanteil ist auch das Verhältnis des Volumens zwischen den Zellen zum Gesamtvolumen des Bündels.

$$\Psi = 1 - \frac{V_{fest}}{V} = 1 - \frac{\pi D^2 l}{4 s_1 s_2 l} \quad (4.40)$$

Die mittlere Geschwindigkeit im Hohlraumanteil ergibt sich aus der folgenden Gleichung:

$$c_\Psi = c / \Psi \quad (4.41)$$

Die Reynolds-Zahl wird mit der mittleren Geschwindigkeit im Hohlraumanteil und die charakteristische Länge die Überströmlänge L' gebildet. Sie ist als die am Austausch beteiligte Fläche A , geteilt durch zweimal die Länge, definiert.

$$Re_{\psi,L} = \frac{c_{\psi} L'}{\nu}, \quad \text{mit } L' = \frac{\pi D L}{2 L} \quad (4.42)$$

Mit dieser Reynolds-Zahl wird die Nußelt-Zahl für einzeln angeströmte Zylinder Gl. (4.39) gebildet und für die Bündelanordnung zusätzlich noch mit zwei Geometriefaktoren multipliziert. Der erste Faktor f_A berücksichtigt die Anordnungsdichtigkeit der Zellen im Bündel [51, S. 105-108].

$$f_A = 1 + \frac{2 D}{3 s_2} \quad (4.43)$$

Der zweite Faktor f_j berücksichtigt das so genannte "first row effect", dass der Turbulenzgrad der Strömung erhöht und damit auch die Wärmeübergangszahl durch die Ablösung der Strömung an den zylindrischen Zellen.

$$f_j = \begin{cases} 0.6475 + 0.2 j - 0.0215 j^2, & \text{wenn } j \leq 4 \\ 1 + \frac{1}{j^2 + j} + 3 \frac{2 j - 1}{j^4 - 2 j^3 + j^2}, & \text{wenn } j \geq 5 \end{cases} \quad (4.44)$$

Wie auf dem Bild (4.15) zu sehen, ist der Faktor f_j größer von der dritten bis zur achten Reihe als am Anfang oder als im Inneren des Bündels.

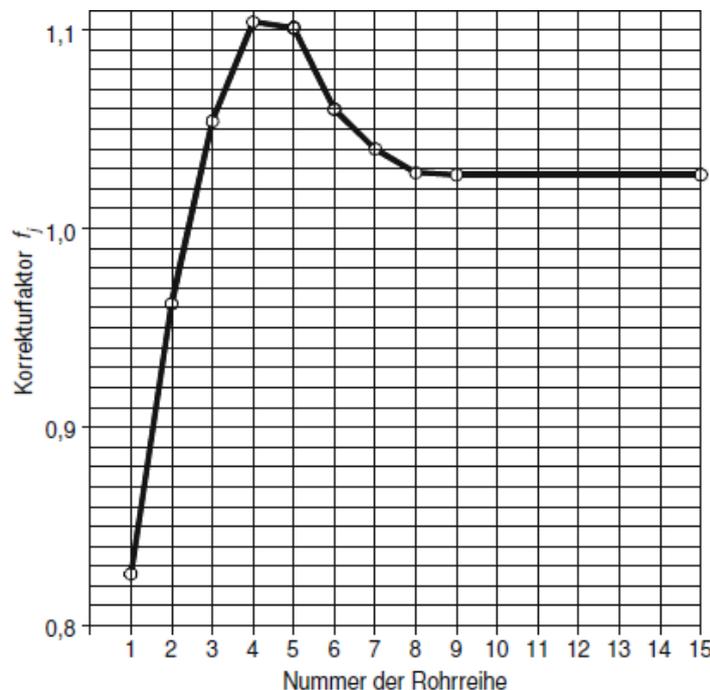


Abb. 4.15 Korrekturfaktor f_j als funktion der Anzahl der Zellreihe

Anschließend kann die Nußelt-Zahl für die j-te Reihe mit der folgenden Gleichung bestimmt werden:

$$Nu_j = \alpha_{th} \frac{L}{k} = Nu_{L,turb} f_A f_j \quad (4.45)$$

Nach diesen Betrachtungen können die Wärmeübergangskoeffizienten für alle Luftströme im Modul formuliert werden, um die Gl. (4.32) anzuwenden.

$$\alpha_{th_1} = Nu_d \frac{k}{d_h} = \frac{(\xi/8) Re_d Pr}{1 + 12.7 \sqrt{(\xi/8)} (Pr^{2/3} - 1)} \frac{k}{d_h} \left(1 + \frac{d_h}{L}\right)^{2/3} \left(\frac{T}{T_w}\right)^{0.45} \quad (4.46)$$

$$\alpha_{th_2} = Nu_j \frac{k}{L'} = \frac{0.037 Re_L^{0.8} Pr}{1 + 2.443 Re_L^{-0.1} (Pr^{2/3} - 1)} \left(\frac{T}{T_w}\right)^{0.121} \left(1 + \frac{2d}{3s_2}\right) f_j \frac{2k}{\pi d} \quad (4.47)$$

Damit können die Wärmeleistungen aufgebaut werden.

Tabelle 4.4 Spezifische Lösungen der gerichtete Wärmeleistungsgleichung für das Modulelement erzwungene Luftkonvektion

Wärmeleistung	Aufbau	Gleichungslösung	
$\dot{Q}_{luft-gehäuse}$	Beide	$\alpha_{th_1} b L (T_{gehäuse} - T_{Luft})$	(4.48)
$\dot{Q}_{luft-stromleit.}$	Beide	$\alpha_{th_1} b L (T_{stromleit.} - T_{Luft})$	(4.49)
$\dot{Q}_{luftmasse-zelle}$	Zylindrisch	$\alpha_{th_2} \pi r l (T_{zelle} - T_{Luft})$	(4.50)

Bei der Luftwechsel erfolgt die Wärmeabgabe an die Umgebung und die Kühlung des Modules. Wenn die Wirkung der Kühlungsplatte auch zur Betrachtung ziehen wird, ergibt sich die folgende Gesamtgleichung der Wärmeleistung an die Umgebung.

$$\dot{Q}_{Umgebung} = \dot{m}_{luft} \bar{c}_p (T_{aus} - T_{ein}) + \sum_n \alpha_{th} A_n (T_{Platte\ i} - T_{Umgebung}) \quad (4.51)$$

Zuletzt ist es notwendig die Lufteigenschaften ν, c_p, ρ, k zu kennen und die Stoffwerte c_p, ρ, k von der Kühlungsplatte und Gehäuse zu besitzen. Die geometrische Größe der Zellen und des Modules sind auch benötigte Parameter. Damit müssen die dimensionslosen Kennzahlen für jeder Luftmasse berechnet werden. Das gilt auch für die Wärmeübergangskoeffizienten.

4.1.5 Gesamtmodell

Das Modulmodell ist ein mathematisches Modell, dessen Aufgabe ist, die Bestimmung der Endtemperatur von jedem Modulelement nach jedem Zeitschritt.

Eine allgemeine Lösung kann aus der Leistungsbilanz für das instationäre Fall Gl. (4.9) erzeugen werden.

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{\rho(T) c_v(T)} \left(\sum_i \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_i(T) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + q^* \right) \quad (4.52)$$

Erstens kann sich die Differenzialzeit $\partial\tau$ entfernen, wenn ein normierter Zeitschritt angenommen ist. Danach können die Summe der Wärmeaustausche auf die Summe der gerichteten Konduktions- und Konvektionsverfahren abgeteilt werden. Damit ergibt sich die folgende Gleichung:

$$T_{t+1} = \frac{1}{\rho(T)c_v(T)} \left(q^* + \sum_i \frac{k \frac{A_s T(x_i)}{\Delta x_i} + \alpha_{th} A_h (T_{Element} - T_{Luft})}{V_i} \right) + T_t \quad (4.53)$$

Letztendlich kann die Gl. (4.52) zu einem linearen System, das n Modulelemente enthält, extrapoliert werden.

$$\begin{bmatrix} T_1^{t+1} \\ \vdots \\ T_n^{t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\rho_1 c_{v,1} \\ \vdots \\ 1/\rho_n c_{v,n} \end{bmatrix} \circ \left(\begin{bmatrix} q_1^* \\ \vdots \\ q_n^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_n \frac{q_{1i}}{V_1} \\ \vdots \\ \sum_n \frac{q_{ni}}{V_n} \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} T_1^t \\ \vdots \\ T_n^t \end{bmatrix} \quad (4.54)$$

Der Term $\begin{bmatrix} \sum_n \frac{q_{1i}}{V_1} \\ \vdots \\ \sum_n \frac{q_{ni}}{V_n} \end{bmatrix}$ ist ein Spaltenvektor mit der Summe aller vorkommender spezifischen

Wärmeaustausche pro Element in jeder Zeile. Die Bestimmung dieses Terms erfolgt durch das Hadamard- oder Schur-Produkt. Dieses elementweise Produkt ist mit einem Kreis als Operatorzeichen dargestellt:

$$\begin{bmatrix} \sum_n \frac{q_{1i}}{V_1} \\ \vdots \\ \sum_n \frac{q_{ni}}{V_n} \end{bmatrix} = \left([V] \circ [W] \circ \begin{bmatrix} T_1^t - T_1^t & \dots & T_n^t - T_1^t \\ \vdots & \dots & \vdots \\ T_1^t - T_1^t & \dots & T_n^t - T_n^t \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} 1/V_1 \\ \vdots \\ 1/V_n \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

Das $[V]$ steht für Verbindungsmatrix. Das ist eine quadratische boolesche Matrix, dessen Elementen v_{ij} nur auf die Werte 0 oder 1 gesetzt werden können. Die Verbindungsmatrix bestimmt, zwischen welchen Modulelementen ein Wärmeaustausch geschehen kann.

Der Vektor $\begin{bmatrix} 1/V_1 \\ \vdots \\ 1/V_n \end{bmatrix}$ wird im Folgenden als $[U]$ Vektor bezeichnet. Besonders hervorzuhe-

ben unter diesem Vektor sind die Volumenwerte für die Luftmassen. Ihre Berechnung ergibt sich aus der Gl. (4.31), die der Volumendurchfluss aus der Geschwindigkeit und der Fläche senkrecht zur Strömung bestimmt.

Jeder Wärmeaustausch kann durch die Multiplikation von einem Parameter und den Temperaturunterschied zwischen den beteiligten Elementen beschrieben werden. Das $[W]$ ist die Matrix, die alle Parameter für jede mögliche virtuelle Wärminteraktion enthält.

Ihr Erstellungsprozess benötigt die Voraussetzung von einer Matrix, welche die Wärmeaustauschparameter nach den beteiligten Modulelementen sortiert. Nachdem kann die definitive Matrix $[W]$ gebildet werden.

Tabelle 4.5 Matrix $[W]$

Legende: Z_i – Zelle i , SL_i – Stromleiter i , K_i – Kontaktierung i ,
 KL_i – Kühlungsluftmasse i , KP_i – Kühlungsplattentepunkt i ,
 Um – Umgebung

	Z_1 ... Z_n	SL_1 ... SL_n	K_1 ... K_n	KL_1 ... KL_n	KP_1 ... KP_n	Um
Z_1 ⋮ Z_n	$\frac{kA_k}{d}$	0	$\frac{kA_k}{d}$	$\alpha_{th_2}A_h$	$\frac{kA_k}{d}$	0
SL_1 ⋮ SL_n	0	$\frac{kA_k}{d}$	$\frac{kA_k}{d}$	$\alpha_{th_1}A_h$	0	$\frac{kA_k}{d}$
K_1 ⋮ K_n	$\frac{kA_k}{d}$	$\frac{kA_k}{d}$	0	0	0	0
KL_1 ⋮ KL_n	$\alpha_{th_1}A_h$	$\alpha_{th_1}A_h$	0	0	$\alpha_{th_1}A_h$	0
KP_1 ⋮ KP_n	$\frac{kA_k}{d}$	0	0	h_1A_h	$\frac{kA_k}{d}$	$\alpha_{th_{Um}}A_h$
Um	0	$\frac{kA_k}{d}$	0	0	$\alpha_{th_{Um}}A_h$	0

Das lineare System in Gl. (4.53) bestimmt die Endtemperatur der Modulelemente nach einem Zeitschritt. Um die Temperaturbestimmung für den nächsten Zeitschritt fortzusetzen, muss das Modulmodell mit den Ergebnissen des vorigen Zeitschritts gefüttert werden. Die Methode kann mit der folgenden Gleichung beschrieben werden:

$$\begin{bmatrix} T_1^t \\ \vdots \\ T_n^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{\text{anfang}}(Z_i) \\ \vdots \\ T_{\text{anfang}}(SL_i) \\ \vdots \\ T_{\text{anfang}}(K_i) \\ \vdots \\ T_{\text{anfang}}(KL_0) \\ T_{\text{anfang}}(KL_1) \\ \vdots \\ T_{\text{anfang}}(KL_{i+1}) \\ \vdots \\ T_{\text{anfang}}(KP_i) \\ \vdots \\ T_{\text{anfang}}(Um) \end{bmatrix}_{t+1} = \begin{bmatrix} T_{\text{ende}}(Z_i) \\ \vdots \\ T_{\text{ende}}(SL_i) \\ \vdots \\ T_{\text{ende}}(K_i) \\ \vdots \\ T_{KL,\text{Eingang}} \\ T_{KL,\text{Eingang}} \\ \vdots \\ T_{\text{ende}}(KL_i) \\ \vdots \\ T_{\text{ende}}(KP_i) \\ \vdots \\ T_{Umgebung} \end{bmatrix}_t \quad (4.56)$$

Generell ist der Wert der Anfangstemperatur im Zeitpunkt $t + 1$ gleich der Endtemperatur im vorigen Zeitpunkt t für jedes Modulelement. Die zwei Ausnahmen sind die Temperaturen der Kühlungsluftmassen und die Umgebungstemperatur.

Auf der einen Seite bewegen sich die Luftmassen nach jedem Zeitintervall eine Position in Richtung der Strömung. Die Terme $T(KL_0)$ und $T(KL_1)$ entsprechen den Temperaturwert der oberen Luftströmung und den der ersten quer angeströmten Luftmasse. Die Terme sind in der folgenden Abbildung dargestellt. Diese Terme haben immer denselben Wert: die Eingangstemperatur der erzwungenen Luftzirkulation. Auf der anderen Seite ist die Umgebung als Wärmequelle mit konstanter Temperatur zu betrachten.

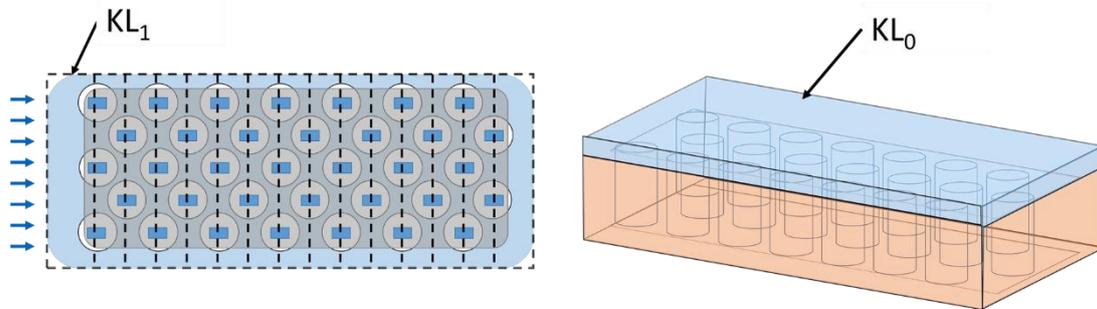


Abb. 4.16 Kühlungsluftmassen mit schon festgelegter Anfangstemperatur

Der Berechnungsprozess des implementierten linearen Systems wird im Folgenden beschrieben. Zuerst ist notwendig, die Verbindungsmatrix zu definieren. Dieser Schritt hängt von der Zellanordnung ab und es genügt, die Matrix nur am Anfang der Simulation zu bestimmen. Zweitens muss die erzeugte Wärme von den Zellen, den Kontaktierungen und den Stromleiter berechnet werden. Da das System nur mit Temperaturen als Rechenvariablen arbeitet, wird die erzeugte Wärme als Abweichung der internen Energie in einem adiabatischen Fall repräsentiert. Daher:

$$q_i^* = \frac{R_i I_i^2}{V_i} = \rho_i c_{v,i} (T_{adiab,i}^t - T_i^t) \quad (4.57)$$

Bei den Zellen haben Hoffmann [3] und Ladhari [4] schon in Matlab implementierte Funktionen angefertigt. Sie berechnen die erzeugte Zelltemperatur aus der C-Rate und der aktuellen Zelltemperatur anhand von den Ergebnissen der Simulation der Metamodelle. Diese Funktionen werden hier angewendet, um die Temperatur für das adiabatische Fall zu bestimmen.

$$f_{metamodelle}(C_{rate}, T_{Zelle\ i}) = T_{adiab,Zelle\ i} \quad (4.58)$$

Danach werden die Parameter aus der Anfangstemperatur bestimmt und alle anderen benötigten Matrizen für die Bestimmung der Wärmeaustausche berechnet. Nachdem sind alle Anforderungen getroffen, um die Endtemperaturen zu kalkulieren. Diese Schritte müssen wiederholt werden, um die Ergebnisse für einen bestimmten Zeitpunkt zu bekommen, wie in Abb. (4.17) gezeigt ist.

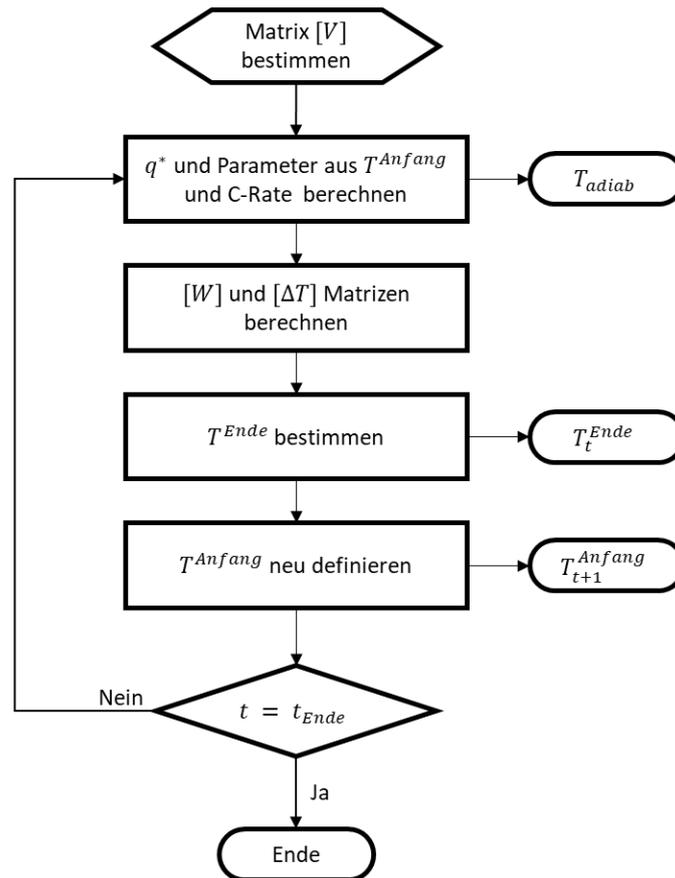


Abb. 4.17 Diagramm der Rechnungsprozess für Implementierung der Modulmodell

Das Modulmodell braucht als Input die C-Rate, die Anfangstemperatur aller Modulelemente und die geometrischen Kennzahlen des Moduls. Damit kann das Modell die Parameter der Wärmeaustausche bestimmen und die Wärmeerzeugung berechnen.

In jedem Zeitschritt können die gewünschten Endtemperaturen und Wärmeaustausche gespeichert werden. Dieses Output wird unter ein Format, das die spätere Bewertung der Ergebnisse erfolgt, angesammelt.

Zum Schluss sind alle Parameter per Element des Modulmodells an der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 4.6 Parameterliste angeordnet per Modulelemente

Modulelemente	Formelzeichen	Einheit	Parameter
Zelle	c_v	kJ/(kg K)	spezifische Wärmekapazität
	ρ	kg/m ³	Dichte
	k	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit
	h, r	m	Länge u. Radius
	l, b, h	m	Länge, Breite u. Radius
Kontaktierung und Stromleiter	c_v	kJ/(kg K)	spezifische Wärmekapazität
	ρ	kg/m ³	Dichte
	k	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit
	R_i	Ω	Innenwiderstand
	l, b, h	m	Länge, Breite u. Radius
Kühlungsluft	c_v	kJ/(kg K)	spezifische Wärmekapazität
	ρ	kg/m ³	Dichte
	k	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit
	u	m/s	Strömungsgeschwindigkeit
	ν	m ² ·s ⁻¹	kinematische Viskosität
Kühlungsplatte	c_v	kJ/(kg K)	spezifische Wärmekapazität
	ρ	kg/m ³	Dichte
	k	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit
	l, b, h	m	Länge, Breite u. Radius

4.2 Programmierung und Simulation des Modelles

Das Modulmodell ist in der Softwareumgebung MATLAB entwickelt. MATLAB kombiniert eine Desktop-Umgebung für iterative Analysen und Entwicklungsprozesse mit einer Programmiersprache, in der Matrix-basierte Mathematik direkt formulieren können werden [54]. Der R2016b MATLAB Version wird für das Schreiben des Codes und der Gestaltung der Benutzeroberfläche angewendet.

4.2.1 Aufbau des Programmes

Das Programm besteht aus zwei Hauptteile: die Matlab-Skripten und die Benutzeroberfläche. Die Matlab-Skripten sind konzipiert, um das Matrixsystem der Gl. (4.53) für jeden Zeitschritt zu lösen. Die Erhebung der Inputs und die Darstellung der Outputs sind dagegen die Aufgabe der Benutzeroberfläche.

Der Aufbau des Matlab-Skripts folgt eine zentralisierte Programmierungsstruktur mit einer Hauptfunktion, die andere sekundären Matlab-Funktionen ruft. Jede Funktion erzeugt eine der notwendigen Matrizen, um das Matrixsystem zu erstellen. Zusätzlich gibt

es eine Funktion, die eine Matlab-Struktur mit allen Parametern der Modulelemente generiert, und eine weitere Funktion, die für die Lösung des Matrixsystems zuständig ist. Folgend ist diese Programmstruktur bezeichnet.

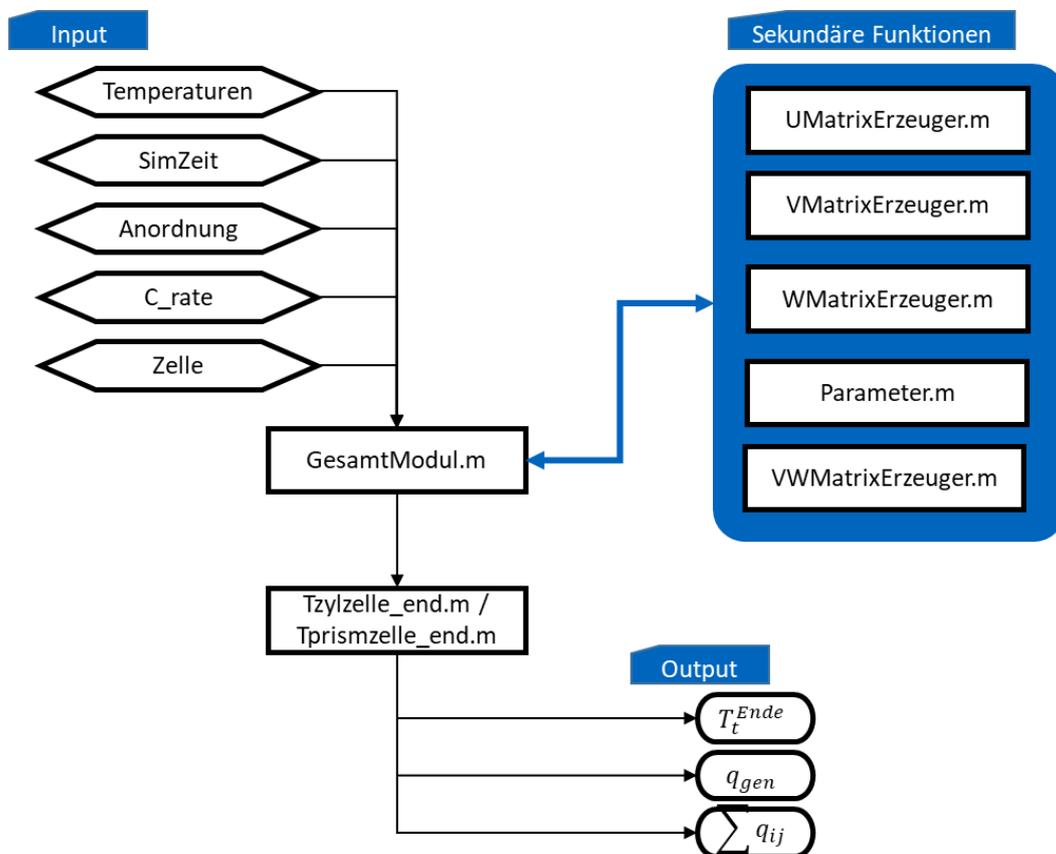


Abb. 4.18 Programmstruktur des Modulmodelles

Die *Parameter.m* enthält alle Parameterwerte und speichert sie auf eine Strukturvariable zugänglich für das Hauptprogramm *GesamtModul.m* und die sekundäre Programmen. Die *UMatrixErzeuger.m*, *VMatrixErzeuger.m* und *WMatrixErzeuger.m* generieren die jeweiligen Matrizen $[U]$, $[V]$, $[W]$, die im Abschnitt 4.1.5 definiert sind. Die Aufgabe der Hilfsfunktion *VWMatrixErzeuger.m* ist, die Multiplikation von den Matrizen $[V]$ und $[W]$ zu vereinfachen. Diese Matrizen sind am Anfang der Simulation aufgebaut.

In jedem Zeitschritt ruft das Hauptprogramm die Funktion *Tzylzelle_end.m* oder *Tprismzelle_end.m* auf. Hier finden die Berechnung der Wärmeaustausche und die Bestimmung der Temperaturabweichung statt.

Als Input nimmt das Modulprogramm durch die Benutzeroberfläche Informationen über die Zelle und die Anordnung an. Außer dem Zelltyp und dem Fahrzyklus müssen alle Werte in numerischem Format eingegeben werden. Der Fahrzyklus muss in Form eines *.txt* Datei gesorgt werden. Das Programm betrachtet jede Zeile der Fahrzyklus-Datei als die erforderliche C-Rate von jedem Simulationsschritt. Die Modulsimulation kann durch eine Maximalzeitschrittanzahl begrenzt werden. Das nächste Bild zeigt die Benutzeroberfläche und die genaue Inputs des Programmes.



Abb. 4.19 Benutzeroberfläche des Modulmodelles

Wie im Bild ersichtlich ist, braucht das Programm den Zelltyp, die Zellkapazität und die Zellgröße zu kennen. Noch benötigte Anfangsdaten für die Modulsimulation sind die Entfernung zwischen Zellzentren, die Anzahl von parallelen und seriellen Verbindungen im Modul und die Zeilenanzahl.

Der „Parameter“- Button öffnet ein neues Tab im MATLAB Workspace mit dem Skript, das alle Parameter der Modulelemente enthält. Die Werte können direkt auf dem MATLAB Workspace verändert werden. Sie sind in der folgenden Tabelle gelistet:

Tabelle 4.7 Parameter des Modulprogrammes

Modulelemente	Programmvariable	Parameter
Zelle	cvz	spezifische Wärmekapazität
	rhoz	Dichte
	kx, ky, kz	Wärmeleitfähigkeit
Stromleiter	cvsl	spezifische Wärmekapazität
	rhosl	Dichte
	ksl	Wärmeleitfähigkeit
	hsl	Dicke
	RiV_sl	spezifische elektrische Widerstand
Kontaktierung	cvk	spezifische Wärmekapazität
	rhok	Dichte
	Ri_k	elektrische Widerstand
Kühlungsplatte	cvkp	spezifische Wärmekapazität
	rhokp	Dichte
	kkp	Wärmeleitfähigkeit
	dkp	Dicke
Kühlungsluft	cvkl	spezifische Wärmekapazität
	rhokl	Dichte
	kkl	Wärmeleitfähigkeit
	u	Strömungsgeschwindigkeit
	vk	kinematische Viskosität
	h1kl	Dicke oberer Strömung
	T_ein	Eingangstemperatur
Umgebung	h_Um	Wärmeübergangskoeffizient
	T_Um	konstante Temperatur

In ähnlicher Weise können die Anfangstemperaturen der Modulelemente modifiziert werden, wenn man auf den Button „Anfangstemperaturen“ klickt. In diesem Fall wird ein neues Fenster geöffnet, in die voreingestellten Temperaturwerte geändert werden können.

Während der Simulation werden verschiedene geometrischen Parametern wie die Zellennummer und die Knotenanzahl der Kühlungsplatte berechnet. Jedes Element ist durch seine Zeilennummer im Matrixsystem identifiziert. Daraus wird ein Algorithmus entwickelt, der die Relativposition der Modulelemente bezüglich der Position der Zellen definiert.

Die zylindrische Anordnung präsentiert eine zusätzliche Problematik, weil die Zellenposition nicht nur in Richtung der Modullänge definiert ist, sondern auch in der Richtung der Modulbreite. Der Algorithmus priorisiert die Richtung der Modullänge und benutzt das Input „Zeilenanzahl“, um die Bündelstruktur zu definieren. Das Programm nimmt nur Zeilennummern an, die alle Spalten der Bündelstruktur ausfüllen.

Nach der Simulation des Modelles wird ein neues Fenster angerufen. Es enthält eine Matlab-Grafik mit den Endtemperaturen der Zellen nach jedem Zeitschritt. Zusätzlich zeigt es die Werte der Maximaltemperatur der Zellen und des maximalen Temperaturunterschiedes zwischen den Zellen.

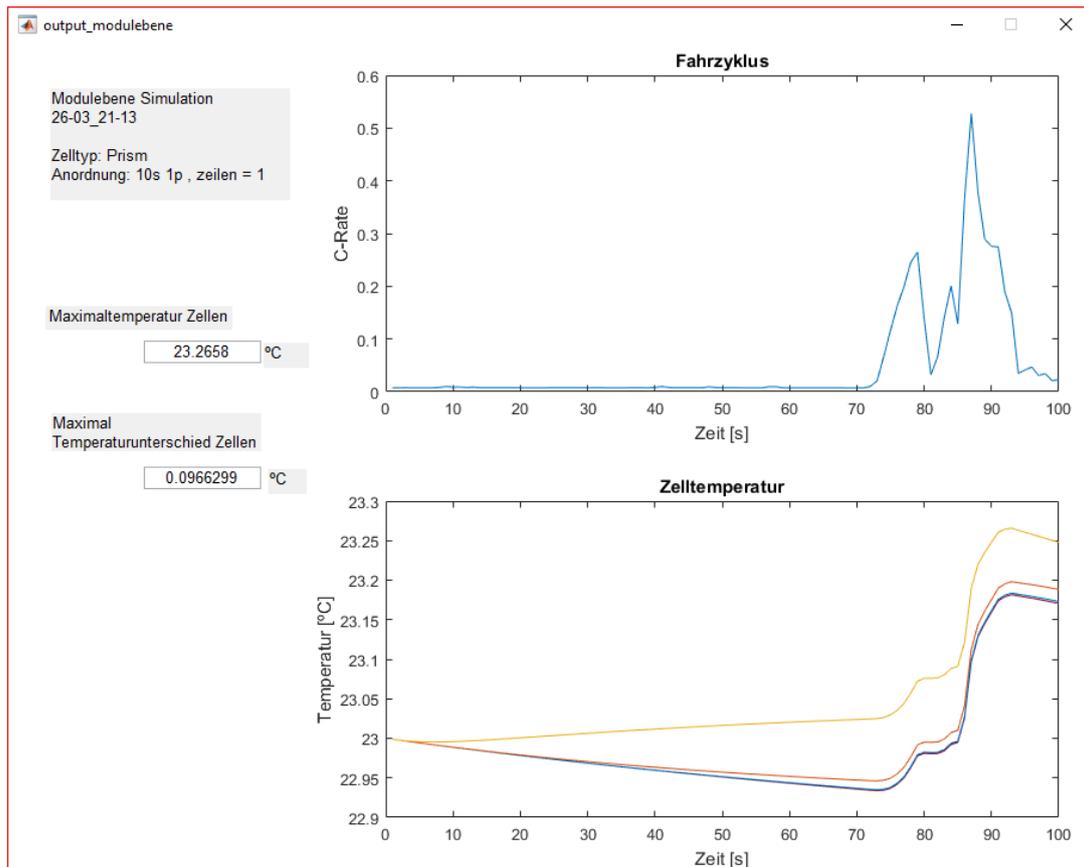


Abb. 4.20 Output des Modulprogrammes auf der Benutzeroberfläche

Die anderen Outputs werden im Ordner „.../Modulebene/Output“ als eine *.mat* Datei gespeichert. Unter ihnen befinden sich zwei Vektoren, einer mit dem Namen des Elements und ein anderer mit den Anfangstemperaturen aller Modulelemente. Ebenfalls befinden sich noch drei Matrizen in der Datei: die erste besteht aus den Endtemperaturen, die zweite aus den spezifischen erzeugenden Wärmen und die dritte aus den ausgetauschten spezifischen Wärmen. Die drei Matrizen enthalten die Rechnungsergebnisse aller Modulelemente für jeden Zeitschritt.

4.2.2 Ergebnisse der Simulationsprobe

Im Folgenden werden zwei Simulationen gezeigt, um die fehlerfreie Ablauf des Programmes zu bestätigen und die Ergebnisse zu analysieren. Ein Modul mit 10 zylindrischen parallel verbundenen Zellen und ein Modul mit 10 prismatischen seriell verbundenen Zellen werden simuliert. Die genauen angewendeten Inputs sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 4.8 Parameter des Modulprogrammes

Anordnung	Zelltyp	Zellgrößen	Zellentfernung	Anfangstemperaturen
1s12p 3 Zeilen	Zylindrisch	r = 9 mm h = 65 mm	E = 20 mm	Modul um 23 °C Kühlungsluft um 25 °C Umgebung um 27 °C
12s1p	Prismatisch	b = 20 mm h = 110 mm l = 110 mm	E = 20 mm	Modul um 23 °C Kühlungsluft um 25 °C Umgebung um 27 °C

Die Zellentemperatur wird während 1200 Simulationszeitschritte bei einer konstanten Entladung C-Rate von 3C überwacht. Die Parameterwerte werden aus der Arbeiten von Hoffmann und Ladhari [3, 4] und aus der Literatur extrahiert [36, S. 12, 43, S. 535-542, 44, S. 341-350, 55, S. 3, 56, S. 2, 57, S. 7595, 58, S. 35].

In der durchgeführten Simulationen sind die folgenden Eingrenzungen eingestellt:

- Die Parameter der Modulelemente sind unabhängig von der Temperatur und daher unabhängig von der Zeit. Ihre Werte werden nur einmal definiert und dann werden als Modellkonstanten betrachtet.
- Die Wärmeaustausche zwischen Stromleitern werden in der zylindrischen Anordnung nicht betrachtet. Demzufolge muss der Wärmefluss immer erstens durch die Kontaktierungen übertragen werden, um die Stromleiter zu erreichen.
- Die Wärmeerzeugung in den Zellen wird aus die schon angestellten Metamodellen berechnet. Das kann zu Ungenauigkeiten führen, weil die im Moment angestellten Metamodellen nicht adiabatischen Randbedingungen besitzen.

Die Simulationsergebnisse werden nach 71.062 Sekunden in der zylindrischen Anordnung und nach 76.540 Sekunden in der prismatischen erhalten. Die Elementanzahl ist höher für die prismatische Simulation mit 109 Elemente und 11881 mögliche Wärmeinteraktionen. Die zylindrische Simulation ergibt nur 78 Elemente und dadurch 6084 mögliche Wärmeinteraktionen.

Die Outputs werden von der Benutzeroberfläche gezeigt und auf die Modul Outputs Ordner hinzugefügt. Im Folgenden steht das Ergebnisfenster der zylindrischen Simulation.

Modulebene Simulation
28-03_11-26

Zelltyp: Zyl
Anordnung: 1s 10p , zeilen = 3

Maximaltemperatur Zellen

26.7847 °C

Maximal
Temperaturunterschied Zellen

0.402398 °C

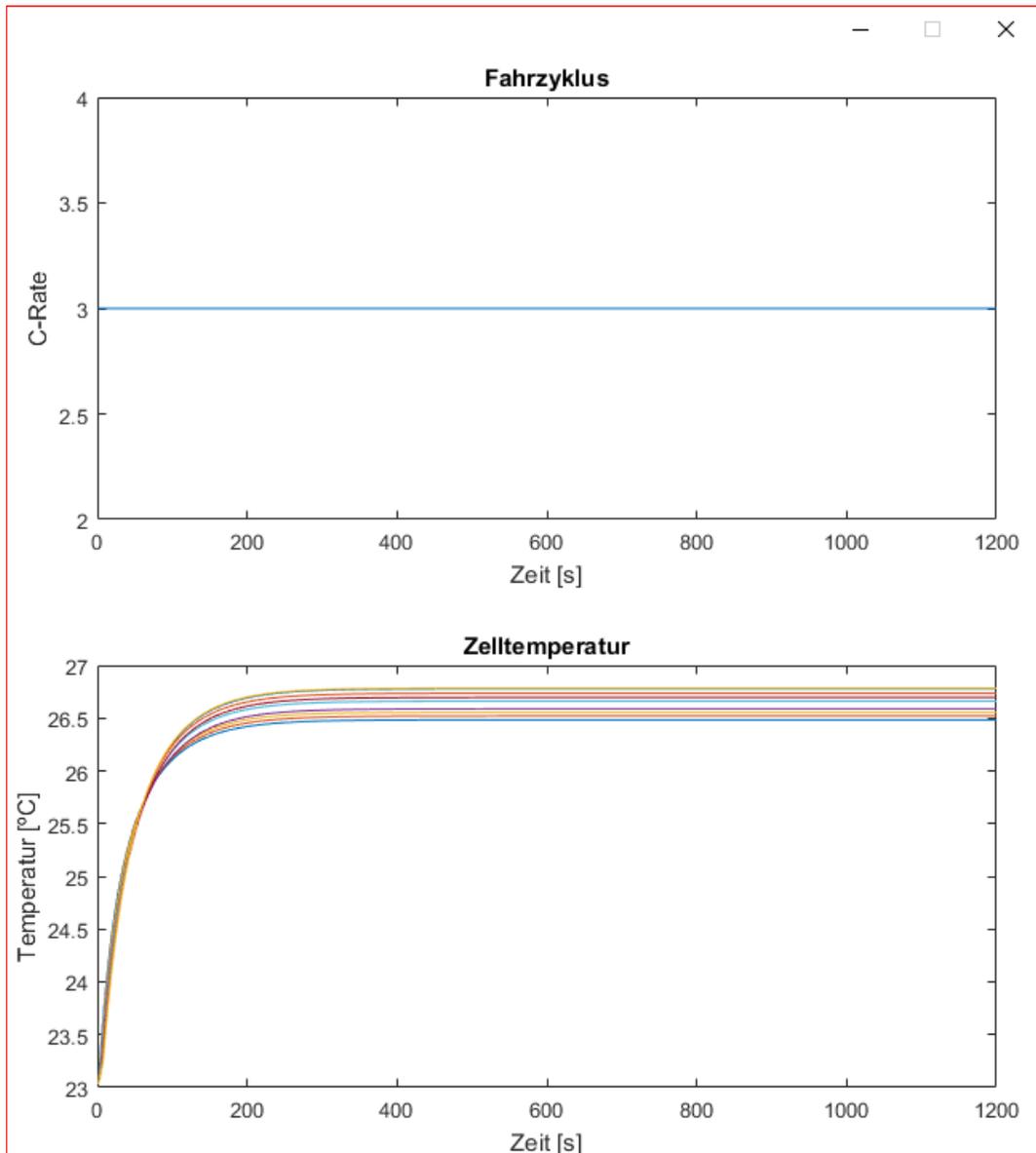


Abb. 4.21 Simulationsergebnisse für ein Modul mit 10 parallelverbundenen zylindrischen Zellen. Zelltyp 18650 mit 2.55 Ah Kapazität.

Wie auf dem Ergebnisbild ersichtlich ist, steigt die Temperatur in den Zellen bis zu einem konstanten Endwert. In diesem Moment ist der Gleichgewichtszustand erreicht. Die Endtemperaturen der Zellen unterscheiden sich, weil die Wärmeaustausche jeder Zelle von ihrer Position in der Modulanordnung abhängen.

Die Zellen, die in der Nähe der Kühlluft einlass sind, haben eine niedrigere Temperatur als die, die am meisten vom Einlass entfernt sind. Diese Folgerung kann nach einem kurzen Blick in die Simulationen bestätigt werden. Die Temperaturwerte der Luftmassen erhöhen sich mit zunehmender Entfernung vom Einlass. Demzufolge wird die Wärmedissipation der Zellen umso mehr verhindert, je weiter sie von der Luft einlass entfernt sind.

Ein weiterer Punkt zu betonen ist die dominierende Rolle der Umgebungstemperatur bei der Bestimmung der Endtemperatur. Die Wärmedissipation der Zelle durch die Kühlluftkonvektion muss nicht nur die erzeugende Wärme der Zellen bewältigen, sondern auch die aus der Umgebung stammende Wärme.

Nächstens ist das Output der prismatischen Simulation gezeigt. Wie in 4.1.4 dargelegt, erfolgt die Wärmedissipation des Moduls in der prismatischen Anordnung ohne eine quer angeströmte Luftzirkulation. Deswegen ist ein wichtiger Unterschied im Endwert der Zelltemperatur zu erwarten. In diesem Fall wird eine Wärmeabfuhr an die Umgebung durch freie Konvektion in der Kühlungsplatte betrachtet.

Modulebene Simulation
30-03_20-40

Zelltyp: Prism
Anordnung: 10s 1p , zeilen = 1

Maximaltemperatur Zellen
48.1547 °C

Maximal
Temperaturunterschied Zellen
7.59787 °C

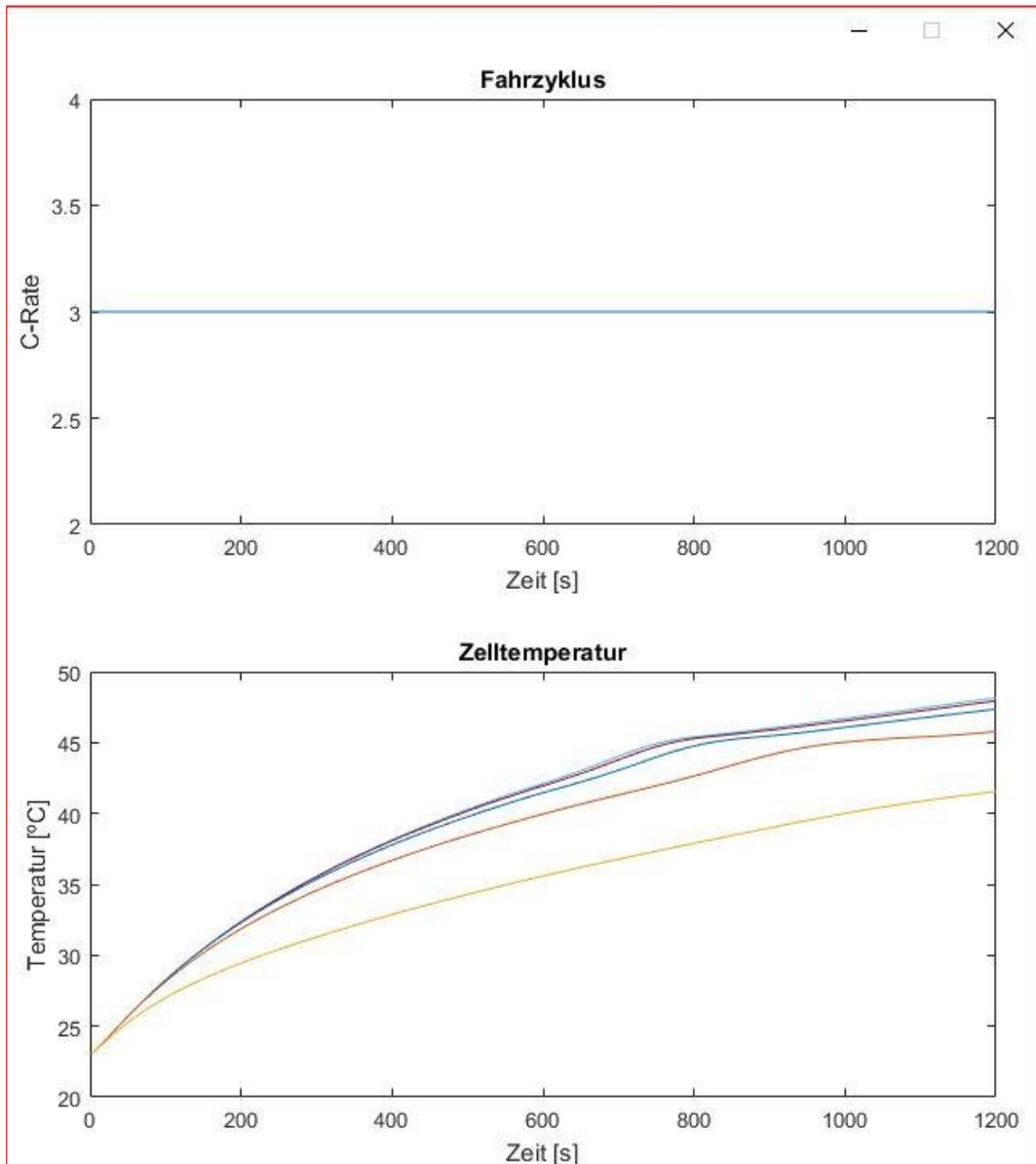


Abb. 4.22 Simulationsergebnisse für ein Modul mit 10 seriell verbundenen prismatischen Zellen. 20110110 Zellen mit 12.5 Ah Kapazität.

Wie aus der Graphik hervorgeht, steigt die Temperatur der Zellen bis ein Endwert größer als 48 °C. Der Grund dafür ist die riesige Strom, die wegen der hohen C-Rate und der seriellen Anordnung im Modul durchfließt. Der Strom erzeugt wegen ihres elektrischen

Widerstands wiederum eine enorme Wärmegeneration in Zellen und Kontaktierungen. Im Gegensatz zur zylindrischen Anordnung ist die Wärmedissipation der prismatischen Zellen erfolgt meistens bei der Konduktion durch die Kühlungsplatte an die Umgebung. Wenn der Wärmeaustausch der Kühlungsplatte mit der Umgebung nicht ausreichend stark ist, ergeben sich diese höheren Endtemperaturen.

Schlussfolgerung ist, dass für eine freie Konvektionskühlung der Kühlungsplatte die prismatischen Zellen besonders abhängig von der Intensität der C-Rate sind.

Die unterschiedlichen Temperaturkurven sind auch auffällig. Die Zellen in der äußersten Positionen haben größere Kontaktoberfläche mit der Kühlungsplatte als die in der innere des Bündels. Daher erhalten sie eine bessere Wärmedissipation und zufolge ein geringeres Temperaturwachstum. Das erklärt auch den deutlichen Temperaturunterschied zwischen Zellen.

Letztendlich zeigen die Graphik und die numerische Data eine bedeutende Vielzahl duplizierter Werte in der Wärmeinteraktionen der Modulelemente. Grund dafür ist die Spiegelsymmetrie in der Modullänge und Modulbreite Richtungen.

Abgesehen von den oberen Simulationstests wurden während dieser Arbeit viele Simulationen durchgeführt, um die Robustheit des Programmes zu testen. Unter die Untersuchungen der zylindrischen Anordnung werde eine Oszillation der Lösung ergeben, wenn das Modell eine große Zellanzahl simuliert.

Die Lösungsschwingung resultiert grundsätzlich daraus, die Temperaturveränderung als diskreten Abweichungen zu betrachten. Wie im Bild gezeigt ist, verändert starker die Temperaturendwerte, wenn die Temperatur des anders Elements nicht bei der Wärmeaustausch kontinuierlich beeinflusst ist (im Bild als die Element i' Linie).

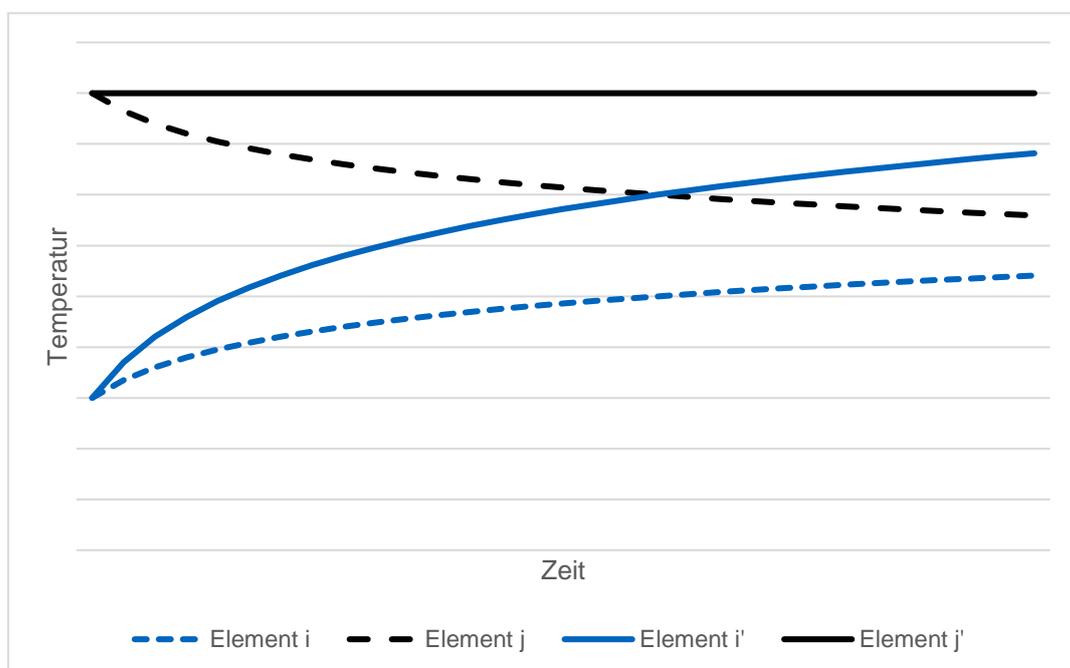


Abb. 4.23 Temperaturabweichung des Elements i, wenn das Element j bei der Wärmeaustausch beeinflusst ist und wenn das Element j' bleibt mit derselben Temperatur

In vergleichbarer Weise wird die Wärmemenge per Zeitschritt in den Wärmeaustauschen erhöht. Das Problem ergibt sich, wenn eines der Elemente eine geringe Wärmekapazität hat. Wegen der übermäßigen Wärmemenge überschreitet das Element mit niedriger Wärmekapazität die Gleichgewichtstemperatur nach jedem Simulationsschritt. Somit bleibt die Elementtemperatur von der Gleichgewichtstemperatur immer entfernt. Das folgende Bild zeigt ein Beispiel dieses Überschreitungseffektes von der Temperaturentwicklung der Elemente zwischen Zeitschritten.

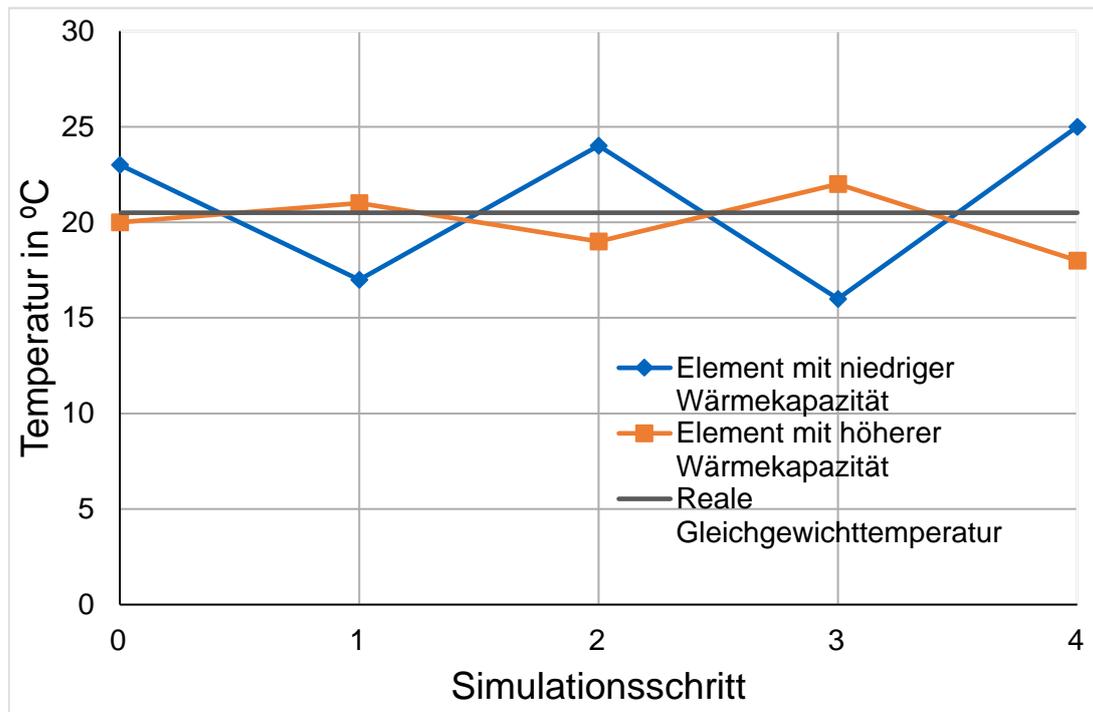


Abb. 4.24 Beispiel eines exzessiven Wärmeaustausch zwischen Modulelemente mit verschiedene Wärmekapazitäten

Die Wirkung der Diskretisierung gilt gleichermaßen für die ausgetauschte Wärmemenge und verzerrt noch mehr die Rechnung der Endtemperatur. Das Modell versucht die Verzerrung entgegenzuwirken, aber diese Versuche lösen die Oszillation der Lösung aus. Wenn die Verzerrung ausreichend groß ist, kann zur Instabilität des Modells führen. Ein Beispiel dafür ist im folgenden Bild dargestellt.

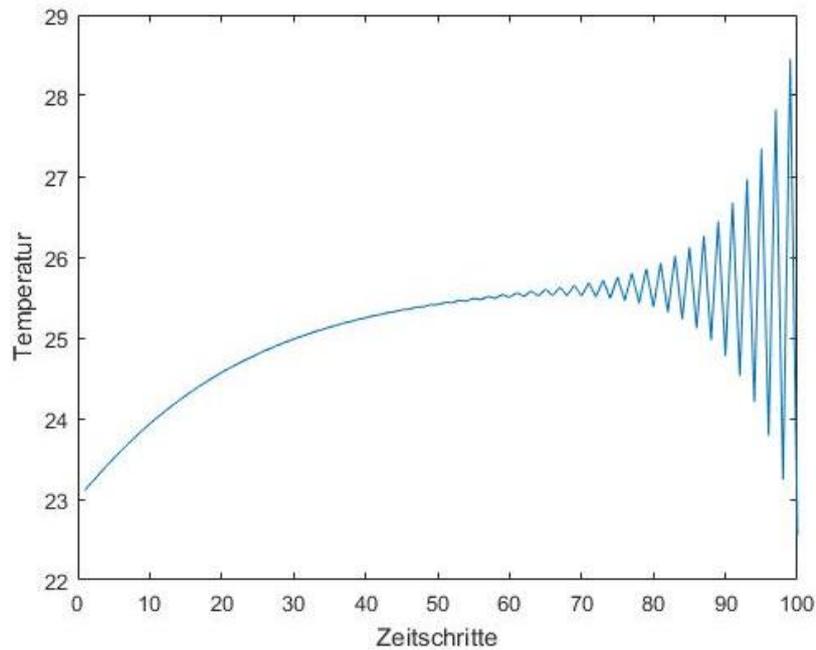


Abb. 4.25 Instabile Oszillation der Lösung für die Zelltemperatur

Um die Schwingung der mathematischen Lösung zu vermeiden, wird eine einfache Kontrollmethode entwickelt. Es besteht daraus, die gewichtete Summe der Endtemperatur und die Anfangstemperatur als Rechnungsergebnis zu nehmen wie in Gl. (4.59), statt der gerechneten Endtemperatur. Diese Steuerungstechnik ermöglicht auch die Kalibrierung des Modells durch sein Vergleich mit Temperaturmessungen und ergibt die folgende Form:

$$T^{t+1} = g_1 T^t + g_2 T^{t+1} \quad (4.59)$$

Die Gewichte g_1 und g_2 nehmen Werte zwischen null und eins, denn sie sind normiert. Ihre Summe muss eins ergeben. Je größer das erste Gewicht, desto langsamer ist die Veränderung der Temperaturwerte. Schließlich stabilisiert diese Methode die Simulationsergebnisse, denn sie ergibt den Durchschnittwert der harmonischen Schwingungen gezeigt in Abb. 4.24.

Die bedeutungsreichen Simulationen sind in der folgenden Tabelle gelistet. Die mit Sternchen gekennzeichneten Ergebnisse werden nach der Implementierung von der Stabilisierungsmethode erhalten.

Tabelle 4.9 Ergebnisse für die Simulationsprobe des Modulprogrammes (Ergebnisse mit Sternchen wurden nach der Implementierung von der Stabilisierungsmethode erhalten)

Anordnung	Zelltyp	Schritte	Zeit [s]	Variablengröße	Ergebnis
1s10p 3 Zeilen	zylindrisch 18650	1200	71.1	$78^2 = 6084$	Erfolg
10s1p	prismatisch 20/110/110	1200	76.5	$109^2 = 11881$	Erfolg
400s1p	prismatisch 20/110/110	1200	1110.1	4009^2	Erfolg
500s1p	prismatisch 20/110/110	200	250.0	5009^2	Erfolg
10s40p 10 Zeilen	zylindrisch 18650	200	153.1	3491^2	Erfolg*
13s46p 19 Zeilen	zylindrisch 18650	1200	3127.5	5250^2	Erfolg*

Ein wichtiges Leistungsmerkmal des Programms ist seine kurze Simulationszeit. Das Modulprogramm kann Simulationen von fast 600 Zellen erfolgreich in weniger als eine Stunde durchführen. Gründe dafür sind die theoretische Vereinfachungen der Wärmeleitungsgleichungen und die Einschränkung der Anzahl der Rechnungsoperationen durch die Implementierung von einem minimalen Knotennetz. Die Benutzeroberfläche kann die Simulationszeit wegen der Steigerung von gleichzeitigen Parallelprozesse verlängern.

Keine Optimierungsmethode zur Reduzierung der benötigten Computerspeicher wird angewendet, weil das Programm weniger Speicherplatz im Rechner als erwartet einnimmt. Für spätere Erweiterungen ist empfohlen, den MATLAB Befehl *sparse()* an die Matrizen V, W und VW anzuwenden, um ihre enthaltene Information abzukürzen. Dadurch verwenden die Matrizen weniger als 1% von ihrem vorhergehenden Speicherplatz [59].

4.2.3 Implementierung im Optimierungstool

Wie in Unterkapitel 3.2 dargelegt, hat das Werkzeug zur Bestimmung der optimalen Zellgröße drei Unterteilungen und das Gesamtoptimierungsprogramm. In dieser Arbeit wird das WzBdoZ durch die Implementierung des entwickelten Modulprogrammes in der Unterteilung für die thermische Optimierung erweitert. Um diese Ziel zu erreichen, werden beide Programme durch die Benutzeroberfläche der thermischen Optimierung miteinander verbunden. Bei Aufruf vom Skript *therm.m* aus der MATLAB Workspace ergibt sich die folgende Benutzeroberfläche:

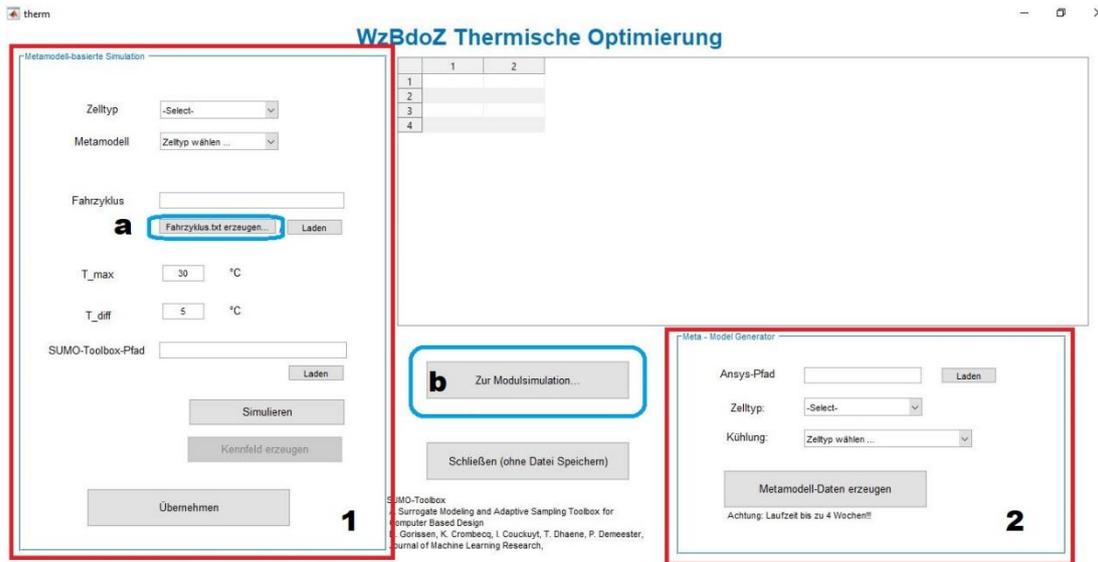


Abb. 4.26 Thermische Optimierung Benutzeroberfläche mit Modifikationen

Wie auf dem Bild ersichtlich ist, besitzt diese Benutzeroberfläche zwei Hauptteile, die auf ihre Hauptfunktionen bezogen sind.

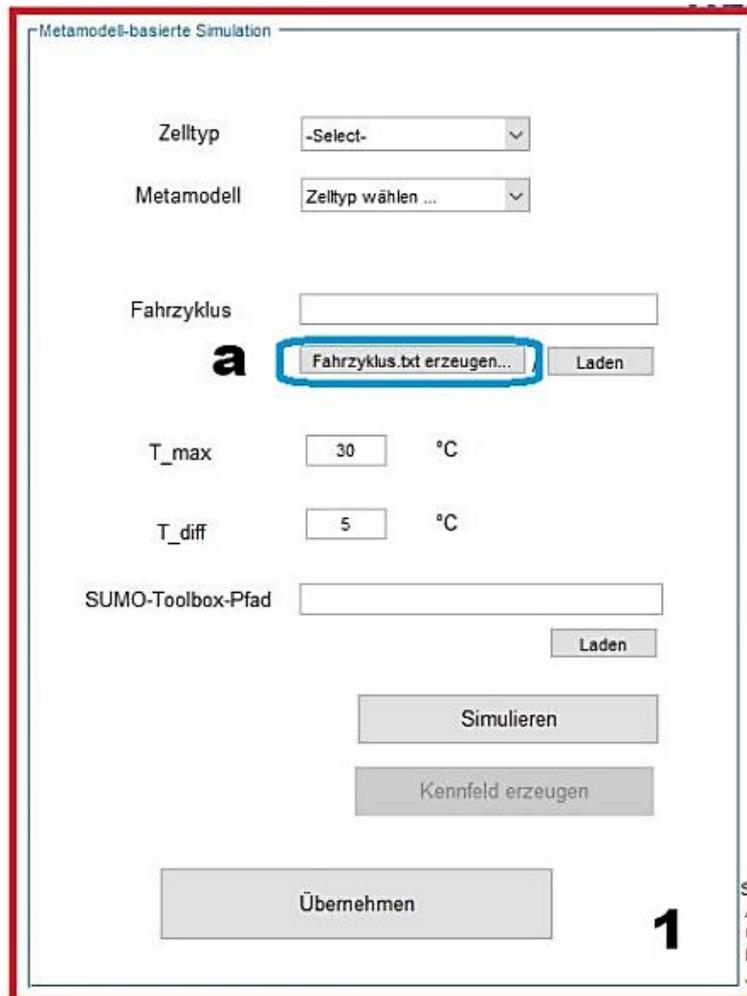


Abb. 4.27 Box Nummer 1: Metamodell-basierte Simulation

Die Box Nummer 1 enthält die Input-Felder und Funktionstasten von der Simulation der erstellten Metamodelle für einen bestimmten Fahrzyklus. Diese Funktion erzeugt eine Graphikgruppe mit der maximalen Temperaturanstieg, der maximalen Temperaturabweichung innerhalb der Zelle und die Kapazität verschiedener Zellgröße durch eine Interpolation der Werte der schon angestellten Metamodelle.

Dieser Teil der thermischen Optimierung hat die folgenden Änderungen erfahren:

- Die Vereinigung der Simulationsprogramme für zylindrischen, Pouch und prismatischen Zellen. Hoffmann [3] hat das Metamodellprogramm für die zylindrischen und Pouch Zellen entwickelt und Ladhari [4] dieselbe Entwicklung für die prismatische Zelle gemacht. Aktuell enthält das thermische Optimierung Programm beide Modellierungsprogramme.
- Die Implementierung eines neuen Werkzeugs, um den Fahrzyklus in der gewünschten Formatierung zu erzeugen. Der Grund dafür ist, die Kompatibilität zwischen den Daten des aCars zu gewährleisten. Der Benutzer des Werkzeugs

enthält als Ergebnis ein *.txt* Dokument mit den C-Raten für die ausgewählte Batteriekonfiguration. Ersichtlich in der Abb. 4.25 als das blaue Rechteck ‚a‘ und im folgenden Bild ist die Benutzeroberfläche dieses Werkzeugs gezeigt.

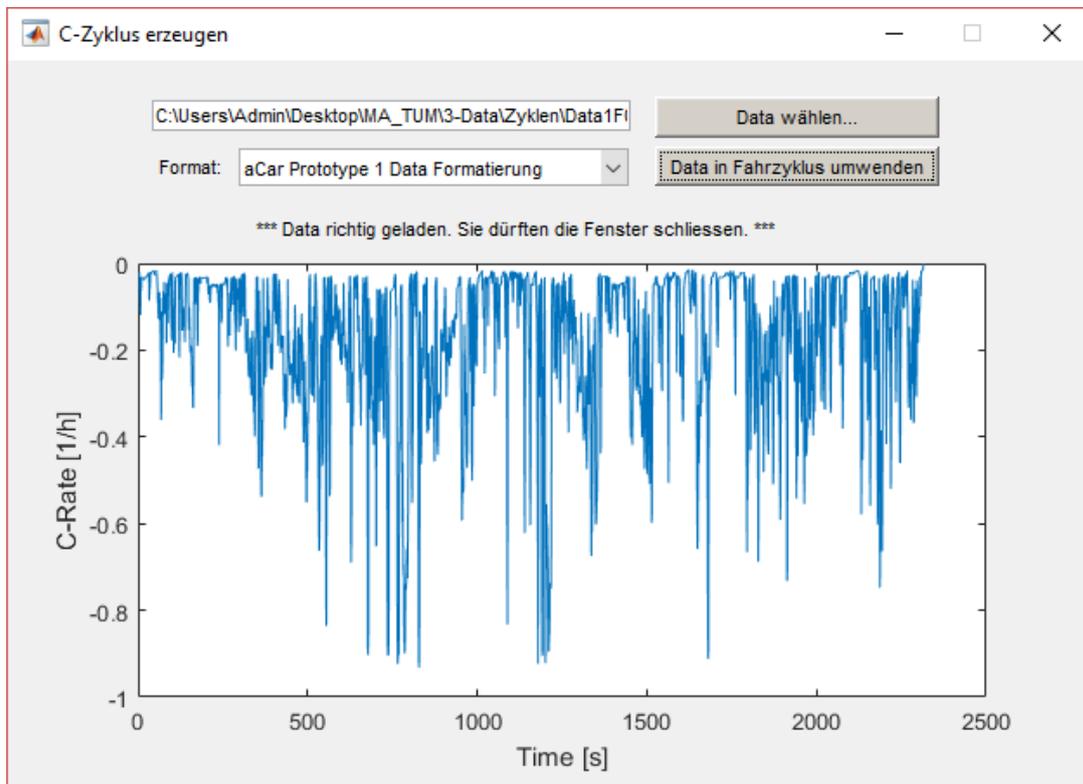


Abb. 4.28 Benutzeroberfläche des *C_Zyklus_erzeuger.m*

- Die Ergebnisse der Simulation der Metamodelle werden als drei-dimensionale Kennfelder erzeugt. Die SUMO Toolbox [40, 41] benutzt von nun an ein Muster-suche-Modell, das besser mit den Ergebnispunkten als die vorige Krigingsmodell übereinstimmt. Dieses neue Modell gestattet einen breiteren Inputdatenbereich, unter denen die Ergebnisse der prismatischen Zellmetamodelle.
- Fehlerreinigung und Verbesserungen in der Benutzeroberfläche wie z.B. die Benachrichtigung von mangelnden Inputs oder die Zuordnung der Funktionstasten nach den Schritten des Optimierungsverfahrens.

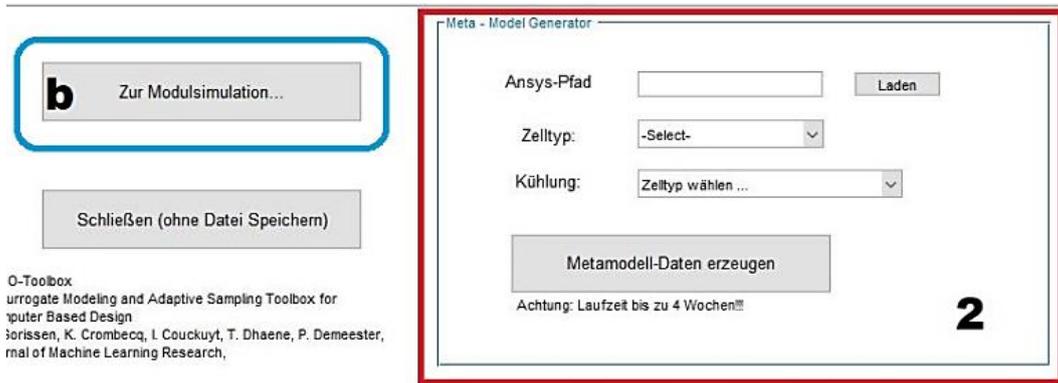


Abb. 4.29 Box Nummer 2: Meta-Model Generator und Modulsimulation Button

Die rote Box Nummer 2. umfasst den Teil der thermischen Optimierung Programm, der mit der Erstellung von neuen Metamodellen beauftragt ist. Dieser Teil wurde auch modifiziert, um die Arbeiten von Hoffmann und Ladhari zu vereinen. Davon abgesehen, gibt es keine neue Erweiterung des Programmes zur Erstellung der Metamodelle. Die Funktionen, die dieser Programmteil als Ergebnis erzeugt, unterstützen sich auf das SUMO Toolbox [40, 41]. Das ist eine MATLAB Toolbox, das genauere Ersatzmodelle aus eine gegebene Datensatz unter die gewünschte Genauigkeit- und Zeitbeschränkungen automatisch generiert.

Letztendlich signalisiert die blaue Rechtecke ‚b‘ das Button, welches das Fenster der Modulsimulation öffnet.

Das folgende Diagramm zeigt die Verwendungsweise des thermischen Optimierung Programms:

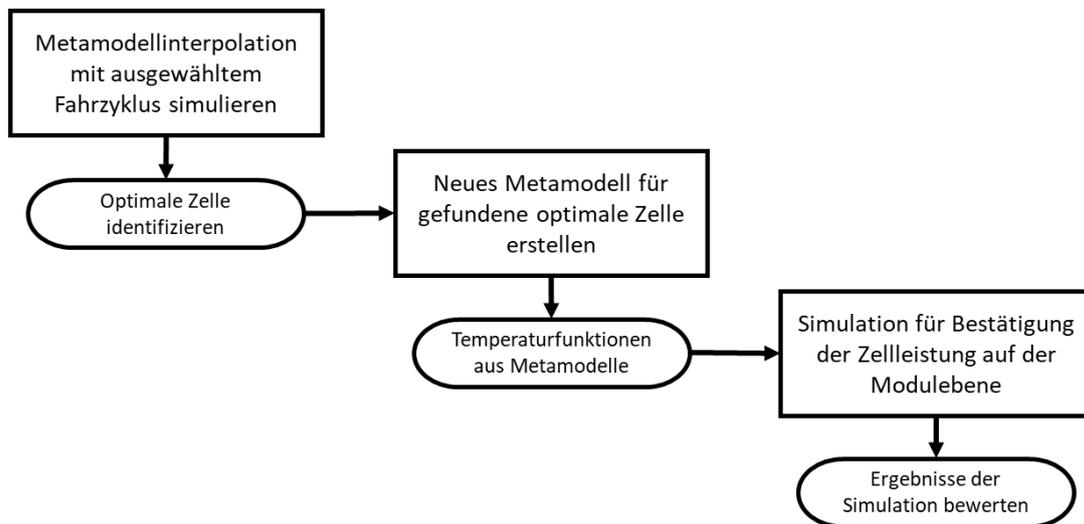


Abb. 4.30 Verwendungsweise des thermischen Optimierungstools

Mit der Metamodellinterpolation ergibt sich in kurzer Zeit ein schneller Vergleich der verschiedenen Zellgrößen. Nach der Analyse der Ergebnisse kann die Erstellung des Meta-

modelles für die ausgewählte Zelle anfangen. Dieser Prozess braucht unter normale Bedingungen mehr als eine Woche, deswegen sollte eine besondere Beachtung auf die Identifizierung der optimalen Zelle schenken, um die Zeitverschwendung zu minimieren. Nachdem kann das Modulsimulation durchgeführt werden, um das Verhalten der Zelle in der ausgewählten Modulkonfiguration zu bewerten.

Zum Schluss es ist notwendig zu betonen, dass die neuen Metamodelle unter adiabatischen Randbedingungen erstellt werden sollten. Damit wird die Kohärenz mit der Modulsimulation behalten, was wiederum zu einer höheren Präzision des Modells führt.

5 Anwendung des Tools im aCar Fahrzeugkonzept

Das aCar mobility Projekt ist ein Forschungsprojekt der Technischen Universität München gefördert von der Bayerischen Forschungsförderung, in Kooperation mit zwei wissenschaftlichen Partnerinstituten und sechs Industriepartnern.

Das Forschungsvorhaben beschäftigt sich mit den Mobilitätsbedürfnissen in ländlichen Gebieten von Sub-Sahara-Afrika in den Jahren 2020 bis 2030. Das übergeordnete Ziel ist es, ein schlüssiges Fahrzeugkonzept zu entwickeln und damit auf die Probleme der ländlichen Bevölkerung in Bezug auf die Mobilität von Personen und Waren einzugehen. Das Fahrzeug wird mit modular integrierbarer, digitaler Technik einen besseren Zugang zur Gesundheitsversorgung, zu Bildung und Informationen in den abgelegenen Gebieten ermöglichen [60].

Im Rahmen des Projekts entstehen zwei Prototypen. Prototyp 1 (P1) wurde im Mai 2016 fertiggestellt und wurde zur Erprobung in Deutschland und Ghana genutzt. Der Aufbau von Prototyp 2 (P2) hat im Sommer 2017 begonnen [60]. Im folgenden Bild ist das neue P2 Fahrzeugkonzept zu sehen:



Abb. 5.1 aCar Fahrzeugkonzept P2

5.1 Inputs und Parameter des Optimierungstools

Die Erprobungsdaten des P1 Fahrzeugs ermöglichen die Analyse von realistischen Fahrzyklus in der Betriebsbedingungen. Durch die Eigenschaften der Batterie sind berechenbar auch die C-Raten, welche die Zellen ertragen. Die Daten sind unter des Formats *.mat* gespeichert und ihre Variablen folgen eine bestimmte Struktur. Im nächsten Bild sind die relevantesten Variablen dargelegt:

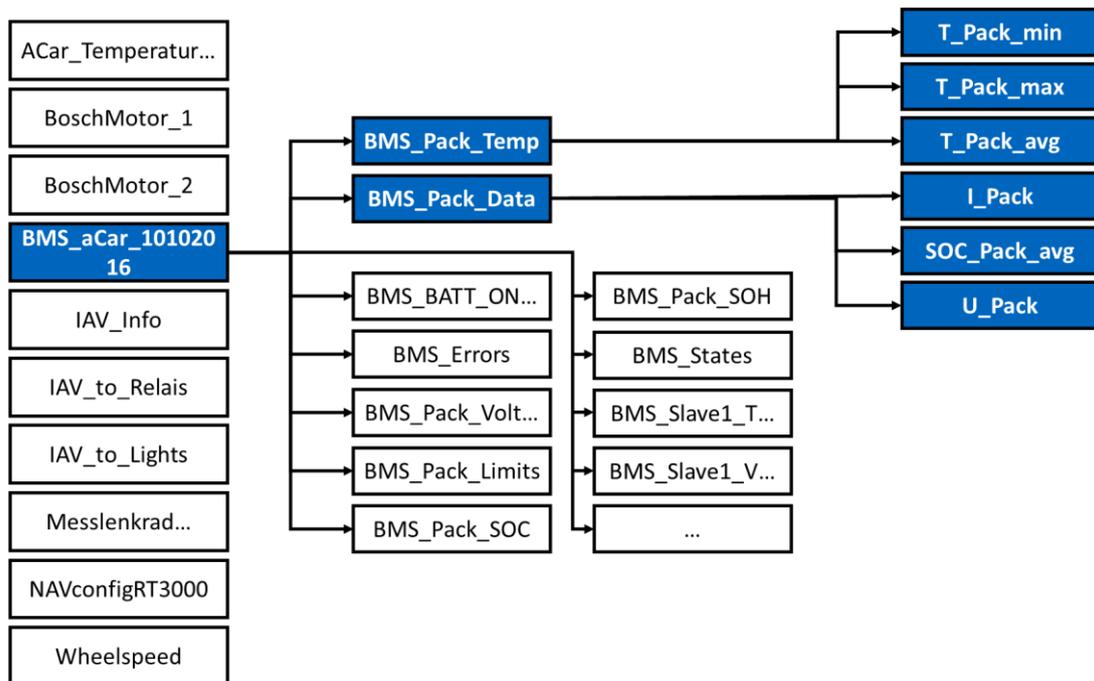


Abb. 5.2 Struktur des Datensatzes

Die Daten des BMS sind von Bedeutung für diese Arbeit. Das BMS speichert essentiell die Temperatur, die Spannung und der Strom des Batteriepacks. Es enthält diese Ergebnisse aus die Zusammenführung der Informationen, welche die BMS-Slaves übertragen zum BMS.

Außerdem sind die Eigenschaften der Batteriepack bekannt und ebenso die Modulkonfiguration. Das gilt für die Elektrofahrzeug P1 und für die neue Fahrzeugkonzept P2. In der folgenden Tabellen sind diese Informationen zusammengefasst:

Tabelle 5.1 Eigenschaften der Traktionsbatterie des aCars

	P1	P2
Hersteller	Kreisel Electric GmbH	Dräxlmaier Group
Zellentyp	Zylindrische Zellen	Prismatische Zellen
Modulstöcke	4 parallelverbunden	3 parallelverbunden
Verschaltung je Modul	13s46p	5p(12s1p)
Temperaturbereich (Entladen)	-20 °C – 55 °C	-25 °C – 50 °C
Battery Management System (BMS)	Lion Smart	Dräxlmaier Group

	Zylindrische Zelle 18650	Traktionsbatterie P1	Prismatische Zelle	Traktionsbatterie P2
Entladeschluss- spannung	2,5 V	32,5 V	3,1 V	37,2 V
Ladeschlussspan- nung	4,1 V	53,3 V	4,05 V	48,6 V
Nominalspannung	3,6 V	46,8 V	3,7 V	44,4 V
Nennkapazität	2,55 Ah	460 Ah	28 Ah	420 Ah
Energieinhalt	9,0 Wh	21,5 kWh	103,6 Wh	18,6 kWh

Das WzBdoZ Programm benötigt das Fahrzyklus in Form von einem *.txt* Datei mit den entsprechenden C-Raten. Zur Erzeugung der C-Rate Datei wird der durch das BMS gemessene Strom des Packs und die Zellkapazität verwendet. Mithilfe der Modulanordnung kann der Strom, der durch die Zelle fließt, bestimmt werden. Er ergibt sich aus die nächste Gleichung:

$$I_{zelle} = I_{pack}/n_{parallel} \quad (5.1)$$

Danach kann die C-Rate durch den Quotient der Strom und der Zellkapazität gerechnet werden.

$$C_{rate} = I_{zelle}/C_N \quad (5.2)$$

Zusätzlich wurde auch die Umgebungstemperatur in jedem Fahrt gemessen und gespeichert. Das erlaubt die Realbetriebsbedingungen des aCar Fahrzeugs zu simulieren.

5.2 Analyse zur Zelloptimierung

Im folgenden Unterkapitel sind die Ergebnisse des WzBdoZ Programms dargelegt. Die Simulation wurde im Verfahren nach Abb. 3.2 durchgeführt. Wie schon in Unterkapitel 3.2 erwähnt, sind derzeit nur die Unterteilungen für die Kosten-, Thermisch- und Sicherheitsanalyse funktionsfähig.

5.2.1 Ergebnisse der Kostenanalyse

Diese Unterteilung des Optimierungstools stellt eine Berechnung der Durchschnittskosten pro Zelle dar. Die Berechnung zieht unter Berücksichtigung ein breites Spektrum von Produktionskosten, vor allem die Material- und Herstellungskosten. Das Werkzeug einbezieht in seiner Analyse die notwendigen Anlageinvestitionen, die variablen Fertigungskosten und andere nicht direkt produktionsverbundenen Kosten wie z.B. Steuern- oder Forschungskosten.

Die Kostenaufstellung ergibt sich aus dem Zelltyp, den Zellgrößen und dem zukünftigen Marktszenario. Zwischen den möglichen Szenarien ist der Simulationsverlauf unter der erwarteten Entwicklung der Kosten hervorzuheben. Dadurch können Prognosen über dem Markt der Lithium-Ionen Zellen erstellt werden. Dies erlaubt letztendlich die Bewertung der Zellen nach ihrer wirtschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit.

Im folgenden Bild ist die erwartete Preisentwicklung der bedeutendsten Rohstoffmaterialien dargestellt.

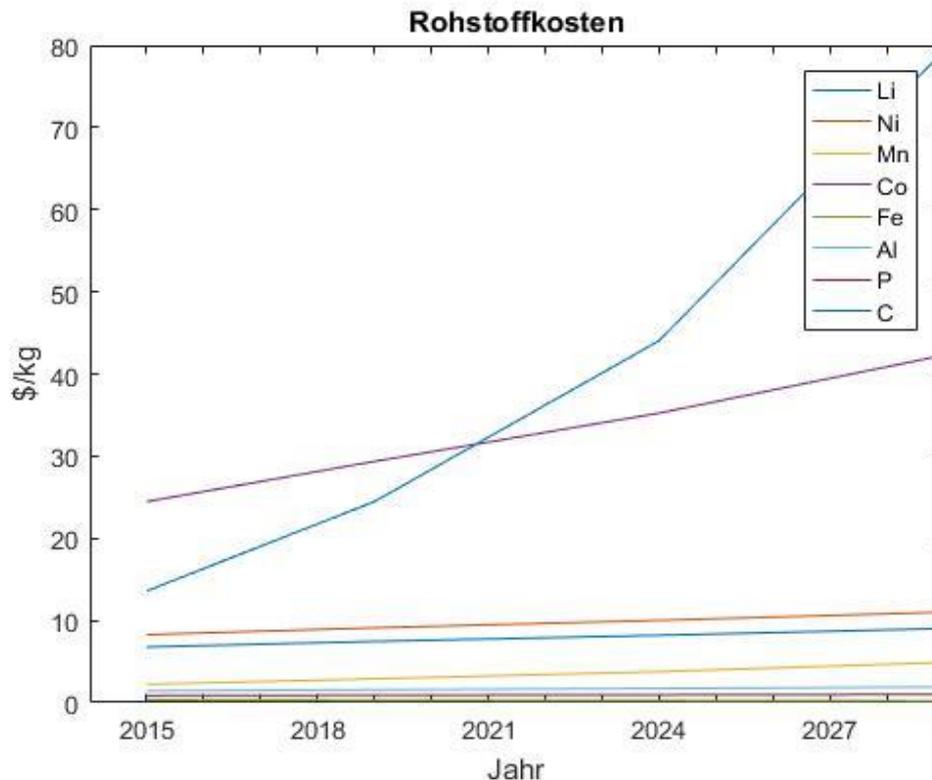


Abb. 5.3 Ergebnisse des Optimierungstools für die erwarteten Rohstoffkosten

Außer dem Lithium und dem Kobalt zeigt die Mehrheit der Rohstoffkosten keine starke Ansteigerung im untersuchten Zeitraum. Infolgedessen ist die Zellchemie aus Kobalt zu vermeiden, wenn die Kostenwettbewerbsfähigkeit als vorrangiges Ziel gilt. Das Lithium ist heutzutage unentbehrlich, aber wie die Ergebnisse hinweisen, sollte die Herabsetzung der Lithiumbeschaffung oder die Suche von alternativen Materialien eine Priorität sein.

Nach den Überlegungen bezüglich der Rohstoffmaterialien kann die Analyse der Zellgrößen durchgeführt werden. Erstens soll das Ergebnisbild der zylindrischen Zellen bewertet werden.

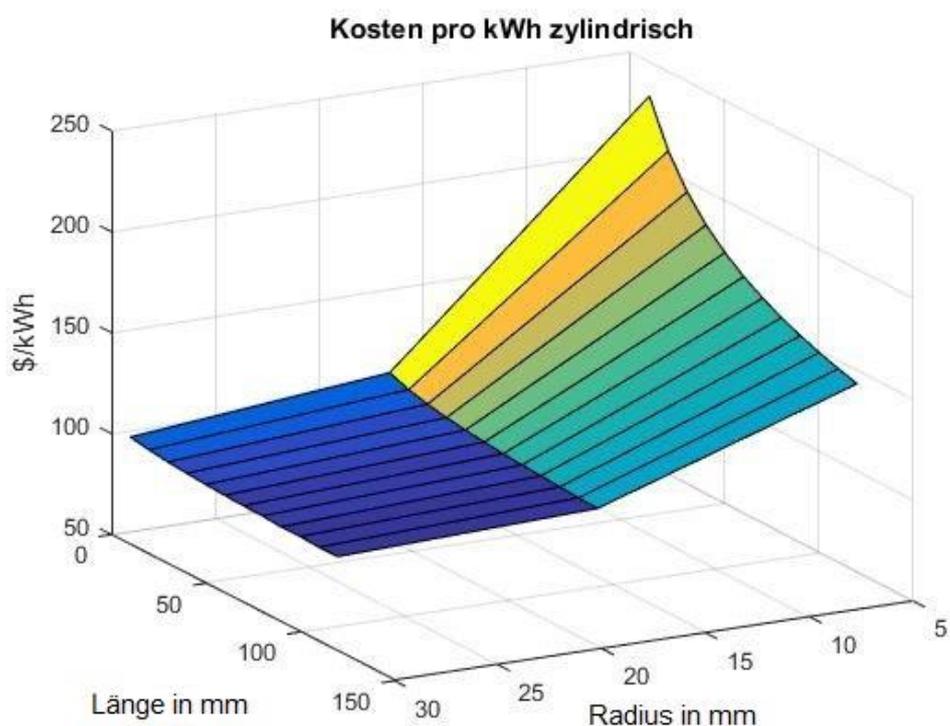


Abb. 5.4 Kostenberechnung des Optimierungstools für die zylindrische Zelle

Eine Schnellansicht der Graphik bestätigt die Hypothese, dass die größeren Zellen kostengünstiger als die kleineren Zellen sind. Bei kleineren Zellen verringern sich stark die Kosten mit der Länge der Zelle. Ab einem Zellradius von 17,5 mm bleiben die Kosten per kWh fast konstant, unabhängig der Variation der Zellgrößen.

Zweitens wird die Kosten der prismatischen Zellen durch das nächste Bild analysiert.

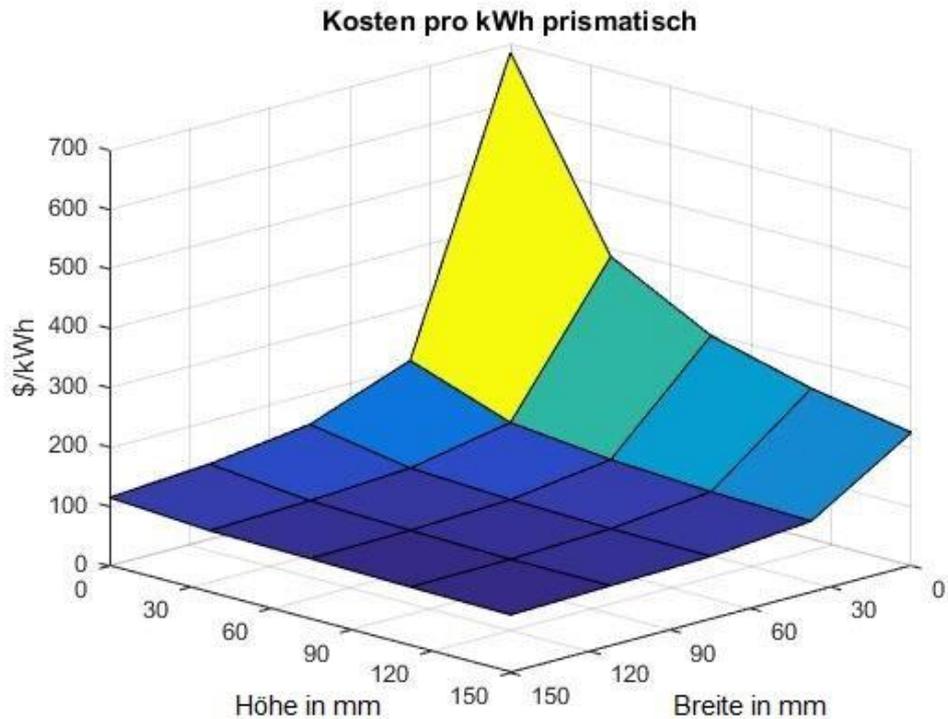


Abb. 5.5 Kostenberechnung des Optimierungstools für die prismatische Zelle

Die Länge der prismatischen Zellen ist normalerweise viel größer als 40 mm. Ab diesen Werten haben die Zellgrößen eine geringe Wirkung auf die Kostenrechnung, deswegen ist die Länge der Zellen nicht auf dem Bild gezeigt. Übrigens sind die Kosten der kleineren Zellen extrem abhängig von ihren Größen. Wird ihre Breite von 40 mm zu 10 mm reduziert, so vergrößert sich sein Preis um sieben Mal. Wie schon erwähnt, zeigen die Zellen mit Breite und Höhe ab 40 mm fast dieselben Kosten pro kWh.

Im Vergleich zu den zylindrischen Zellen zeigen die kleineren prismatischen Zellen ca. die doppelten Kosten pro kWh. Trotzdem nimmt die Kostendifferenz zwischen Zellbauformen mit der Zunahme der Zellgröße ab.

Zusätzlich ist die Ergebnisgraphik der Kostenberechnung für die Pouch-Zelle in Anhang 5.2.2 dargestellt.

5.2.2 Ergebnisse der thermischen Analyse

Die thermische Optimierung besteht aus zwei Schritten: Erstens wird das Verhalten jede Einzelzelle durch die Simulation der Metamodelle für den ausgegebenen Fahrzyklus analysiert. Zweitens folgt die Simulation ein Modul von Zellen, die dieselbe Größe wie die Zelle mit den besten Ergebnissen im ersten Analyseteil haben.

Zur Simulation der Zellen wird der folgende Zyklus angewendet.

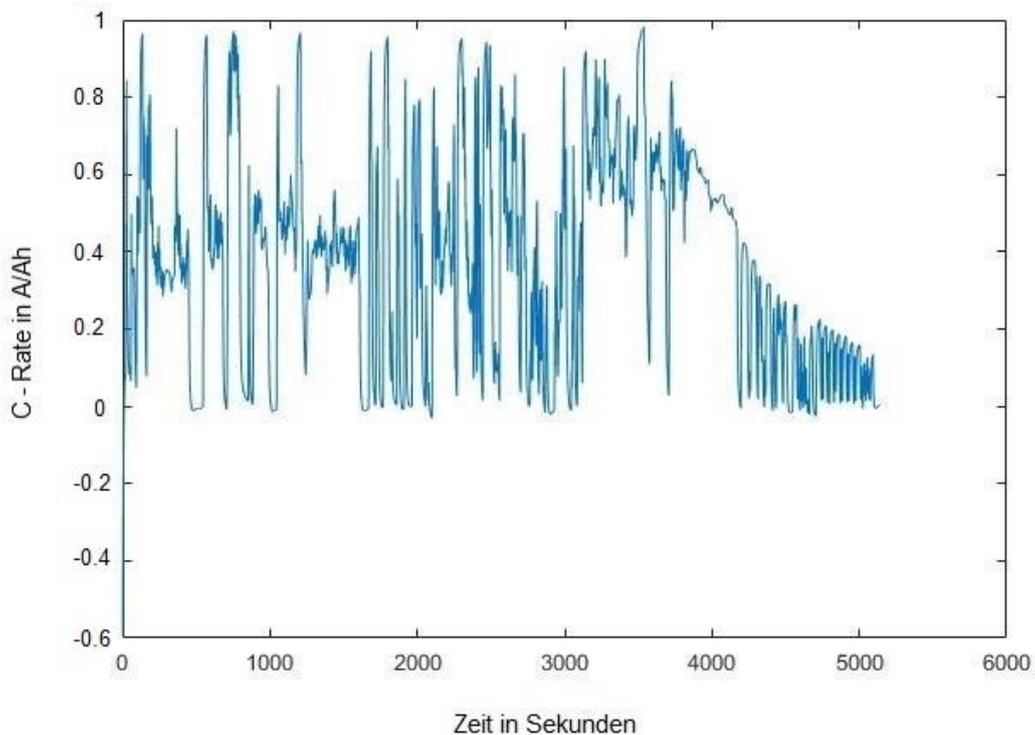


Abb. 5.6 Fahrzyklus des aCar als angelegte C-Rate der Einzelzelle

Dieser Fahrzyklus gehört zu einer Fahrt mit ein höheres C-Rate als die Üblichen. Also ist dieser Zyklus am besten geeignet, um das Verhalten der Zellen mit verschiedenen Größen zu bewerten. Bemerkenswert ist, dass kein Datenpunkt den Grenzwert von 1 C erreicht. Das führt zur Überlegung einer überdimensionierten Batterie.

Die schon angestellten Metamodellen werden mit diesem Fahrzyklus simuliert. Die anderen Parameter können nicht verändert werden. Das Programm soll nicht das thermische Zellverhalten in jeder gewünschten Situation simulieren, sondern den Vergleich des thermischen Verhaltens der Zellen zu ermöglichen. Dazu werden Kennfelder, die alle Zelle mit Radius von 9 mm bis 15 mm und Länge von 65 mm bis 150 mm umfasst, erzeugt. Damit können die Zellen gemäß ihren Resultaten bei der erzeugten Maximaltemperatur und der Temperaturabweichung innerhalb der Zelle bewertet werden.

Die erreichte Maximalzelltemperatur weist auf die Wärmeerzeugung hin, die während der Entladung der Zelle erfolgt. Sie ist direkt mit dem Innenwiderstand der Zelle und ihre Wärmedissipationsfähigkeit verbunden. Ein hohes Maximaltemperaturwert beschleunigt die Alterung der Zelle und falls der Temperaturanstieg zu groß ist, kann es zum Thermal Runaway der Zelle führen. Im folgenden Bild ist das Kennfeld für die zylindrische Zelle dargestellt.

Maximaltemperatur der zylindrischen Zellen (LSSVM Model)

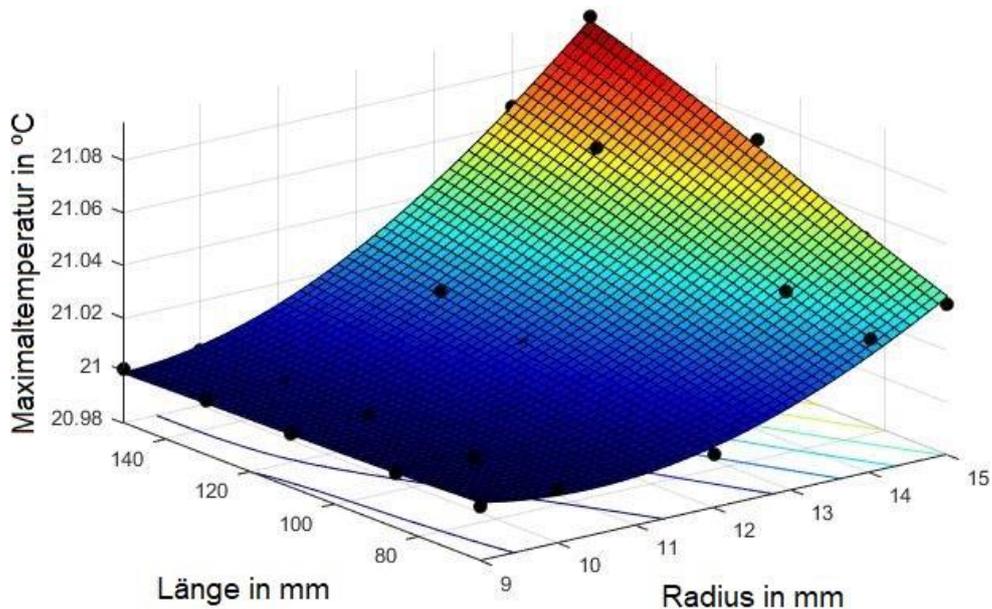


Abb. 5.7 Maximaltemperatur der Einzelzelle für den ausgegebenen Fahrzyklus

Die Interpolation der Maximaltemperaturwerte zeigt eine starke Abhängigkeit vom Temperaturanstieg der Zelle mit ihrer Größe. Je kleiner die Zelle, desto weniger Wirkung hat ihre Länge in der erzeugten Maximaltemperatur. Beachtenswert ist der geringe Unterschied unter der Temperaturwerten: es gibt eine Differenz von weniger als 0.1 °C zwischen einer 18650 Zelle und einer 301500 Zelle.

Außerdem wird die Maximaltemperaturdifferenz durch die Wärmeübertragungseigenschaften der Zelle bestimmt. Diese Differenz beeinflusst die Effizienz der Kühlmethoden bei der Wärmedissipation des Zellinneren. Vorzugswürdig sind die Zellen mit dem geringeren inneren Temperaturunterschied, denn eine homogene Temperaturverteilung erleichtert die Wärmeableitung und führt zu einem besseren Alterungsverhalten. Die nächste Abbildung zeigt die Ergebnisse der zylindrischen Zelle für den eingegebenen Fahrzyklus.

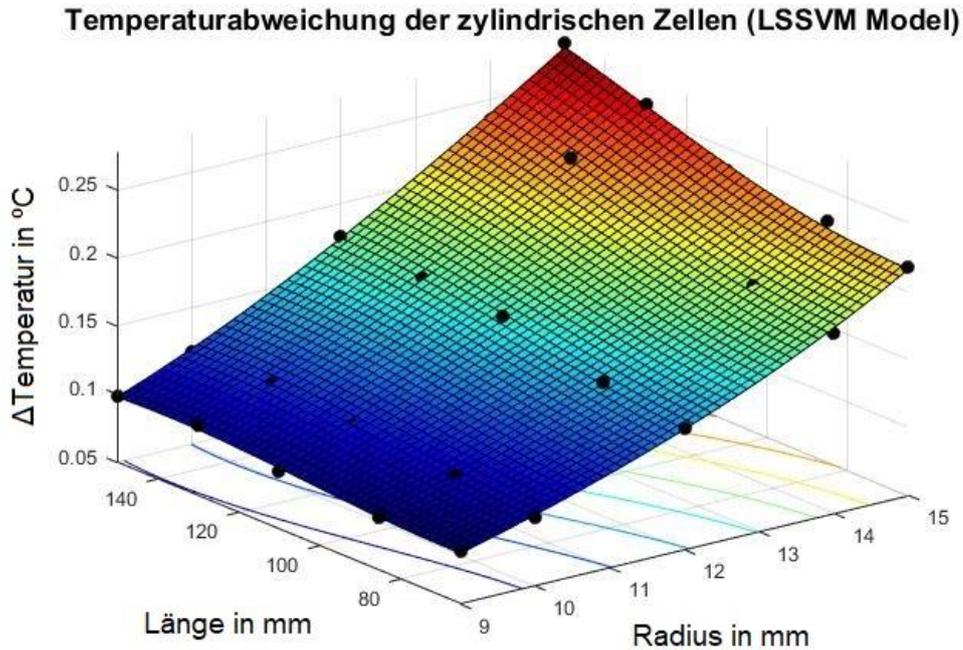


Abb. 5.8 Maximaltemperaturabweichung in der Einzelzellen für den ausgegebenen Fahrzyklus

Die Temperaturabweichung in der zylindrischen Zellen folgt die Steigungstendenz von der Maximalzelltemperatur. Die kleineren Zellen erfolgen eine niedrigere Temperaturdifferenz, die mit der Zunahme der Zellgröße erhöht. In diesem Fall sind die Wertevariationen erheblicher: der Wert der 301500 Zelle liegt bei $0.2775\text{ }^{\circ}\text{C}$, der praktisch das Dreifache des Wertes der 18650 Zelle ist.

Nach der Analyse der Kennfelder wird der Schluss gezogen, dass die kleineren Zellen ein deutliches besseren thermischen Verhalten darstellen. Darüber hinaus wird ihre Temperaturanstieg in stärkerem Maße (ungefähr die doppelte Wirkung) bei der Vergrößerung der Zellradius als bei der Länge der Zelle beeinflusst. Die Nutzung von 18650 Zellen in der aCar Fahrzeug P1 sieht wie eine zutreffende Entscheidung aus.

Diese Folgerungen richten sich gegen die Vergrößerung der Zellkapazität, dessen Werte mit der Zellgröße steigen. Die Lösung dafür bedeutet eine höhere Zellanzahl pro Modul, welche die Wichtigkeit des Gesamtverhaltens der Zellengruppe in der Modul ansteigt. Noch zu beachten ist die mögliche Kostenerhöhung, die eine große Nummer von Zellen ergeben könnte. Das folgende Bild zeigt die Ansteigerung der Zellkapazität mit ihrer Größe, die auch ein Ergebnis der thermischen Programmunterteilung ist.

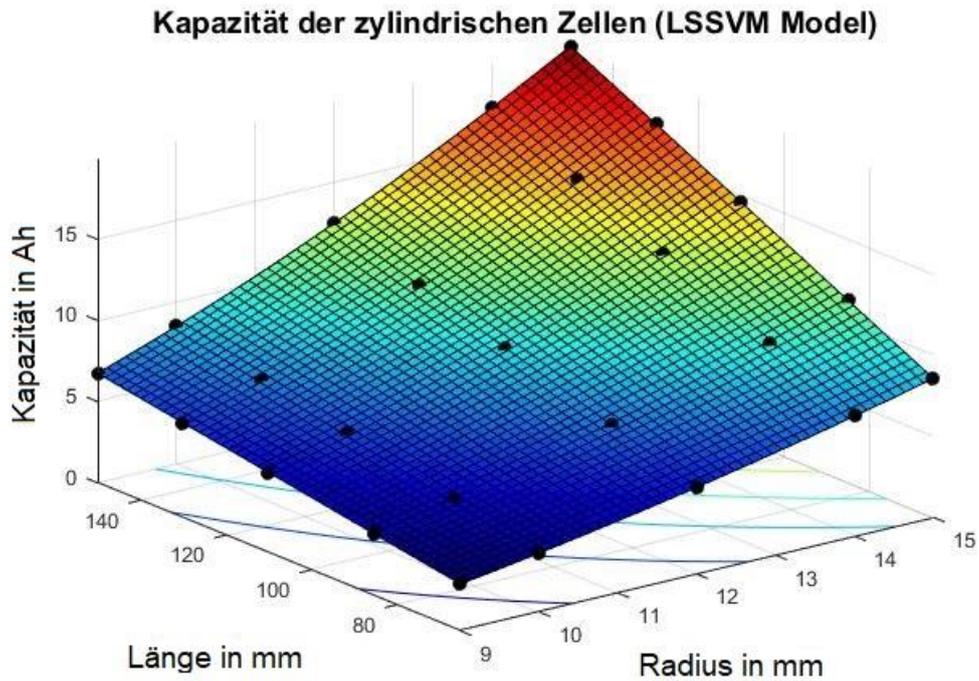


Abb. 5.9 Kapazitätsinterpolation der Einzelzellen

Nach der Bewertung der einzelnen Zellen folgt die Simulation des Modules unter dem üblichen Fahrzyklus. Zusätzlich zum Gewicht vom Fahrer und Beifahrer trug das Fahrzeug eine Ladung von 400 kg bei einer durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit von 15.2 km/h über eine Strecke von 9.64 km. Das bedeutet eine SOC Variation von 11.4 % ohne Rekuperation der elektrischen Energie.

Die Inputs der Zelle und Anordnungsparameter werden aus der technischen Daten des Fahrzeugs durch die Benutzeroberfläche eingegeben, wie im folgenden Bild gezeigt.

The image shows a software interface for configuring a battery module simulation. It is divided into several sections:

- Zellkennzahlen (Cell Characteristics):**
 - Zelltyp: Zylindrisch (dropdown menu)
 - Radius: 0.009 m
 - Höhe: 0.065 m
 - Länge: 0 m
 - Breite: 0 m
 - Kapazität: 2.55 Ah
- Anordnung (Arrangement):**
 - Zellentfernung, E: 0.02 m
 - Seriell: 13
 - Parallel: 46
 - Zellenanzahl: 9
- Buttons:**
 - Anfangstemperaturen...
 - Parameter...
- Simulation Parameters:**
 - Fahrzyklus: C:\Users\Admin\Desktop\MA_TUM2-Modell\TOPtErweitert\C_Zyklus_aCar_typisch.txt
 - Simulationszeit: 2500 Schritte
 - Start Simulation (button)

Abb. 5.10 Inputs der Modulsimulation

Die Anfangstemperatur werden auch vor dem Fahrt gemessen: der Modultemperatur lag bei 33.4 °C und die Umgebung war 30° C warm. Das Batteriemodul hat kein Kühlsystem, deshalb werden die Wärmeübertragungskoeffizienten der erzwungenen Konvektion ausgelöscht und durch eine Wärmeübertragungsanzahl von 0.09 W/m² K zwischen der Stromleiterfolie und der Umgebung ersetzt.

Die Ergebnisse der Modulsimulation sind im folgenden Bild gezeigt:

Modulebene Simulation
_6-04_21-36
Zelltyp: Zyl
Anordnung: 13s 46p , zeilen = 9

Maximaltemperatur Zellen
33.4 °C

Maximal
Temperaturunterschied Zellen
0.0789388 °C

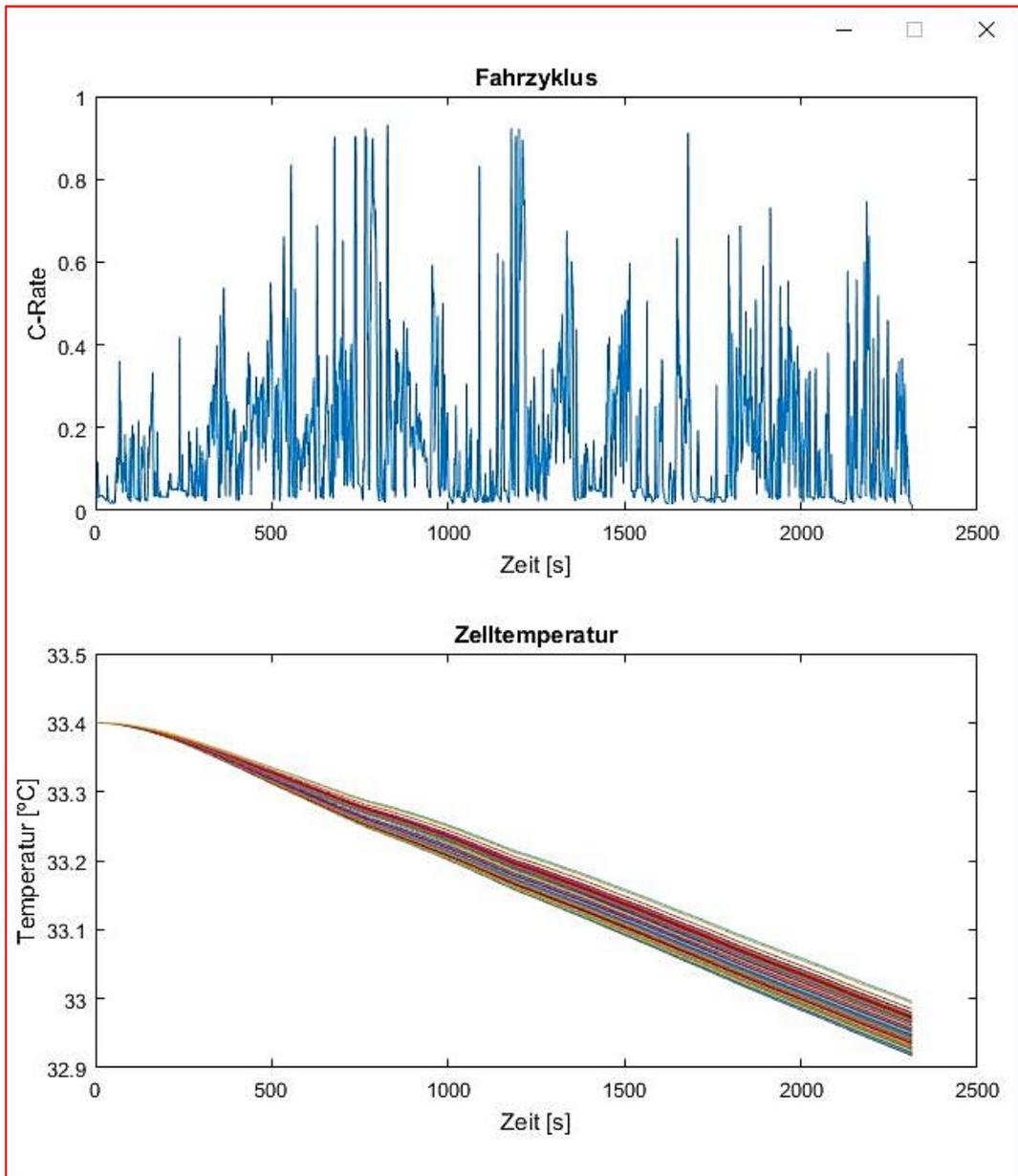


Abb. 5.11 Ergebnisse der Modulsimulation

Die Simulation zeigt, wie die Zelltemperaturen durch die niedrige geforderte C-Rate kaum beeinflusst werden. Das Modul übertrifft den Betriebsanforderungen und deswe-

gen sind die Endtemperaturen der Zellen nahezu vollständig bei der Umgebungstemperatur bestimmt. Die Temperaturdifferenz entlang des Moduls wächst während der Fahrt, aber ihr Maximalwert steht innerhalb der Grenzen für eine homogene Alterung des Zellmoduls. Schlussfolgerung dafür ist, dass der Modul nicht wegen eines möglichen Thermal Runaway gefährdet ist. Weiterhin sollte die Moduloptimierung auf die Verringerung der Zellenanzahl eingerichtet sein, um eine unnötige Überdimensionierung und die damit verbundenen unbegründeten Kosten zu vermeiden.

Im nächsten Bild sind die Messwerte der BMS vom aCar Fahrzeug P1 abgebildet.

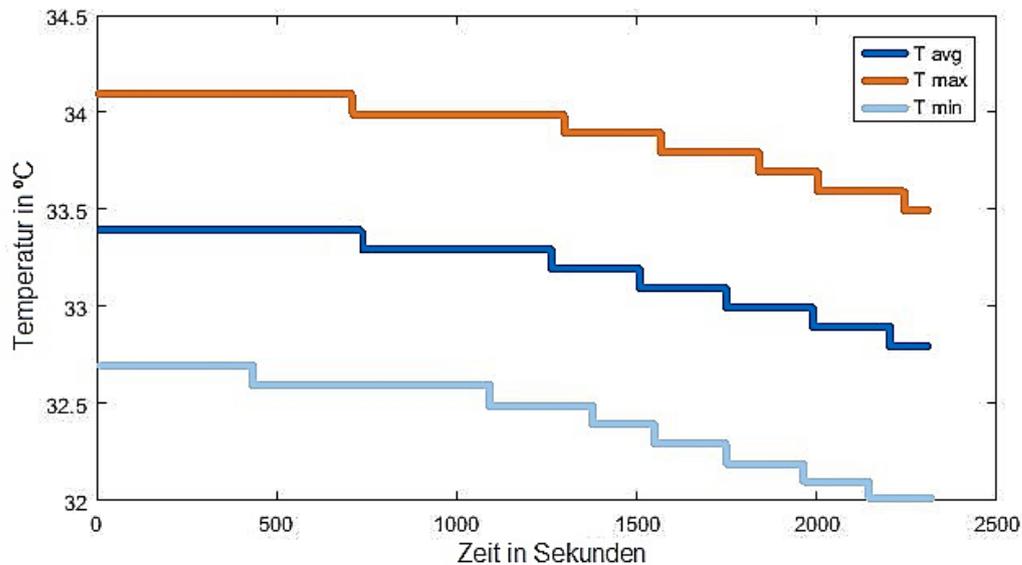


Abb. 5.12 Darstellung des durch die BMS gemessenen Temperaturlaufs

Die Messwerte der Sensoren des BMS entsprechen den Ergebnissen der Simulation und verifizieren das Modulmodell. Die durchschnittliche Temperatur des Modules in der Simulation stimmt mit den Messwerten mit einem maximalen relativen Fehler von 0.4% überein. Demgegenüber ist es nicht möglich, eine verlässliche Bewertung der Fähigkeit des Modelles zur Bestimmung der Extremtemperaturen vorzunehmen. Die Programmsimulation setzt dieselbe Anfangstemperatur für alle Zellen voraus. Obwohl das Programm in der Lage ist, verschiedene Anfangstemperaturen der Zellen zu berücksichtigen, muss diejenige Position und Temperatur dieser Zellen gekannt sein und in der Programm manuell eingegeben werden.

Trotz der unterschiedlichen Anfangstemperaturen folgen alle Temperaturkurven einem ähnlichen Muster. Noch bemerkenswert ist, dass die Differenz zwischen der Extremtemperaturwerten vergrößern sich nicht.

In Anhang 5.2.2 befinden sich auch die Ergebnisbildern der Simulation für die Modulanzordnung des aCar Fahrzeugs P2.

5.2.3 Ergebnisse der Sicherheitsanalyse

Die Sicherheitsanalyse erfolgt eine Graphik mit den ausgewählten Zellchemien, die untersucht werden sollten. Damit kann die kritische Zelltemperatur, die zum Thermal

Runaway der Zelle führt, identifiziert werden und das Verhalten der Zellen unter Thermal Runaway Bedingungen beobachtet werden.

Dieses Werkzeug kann benutzt werden, um eine qualitative Bewertung der Gefahrengrad der verschiedenen Kathodenmaterialien zu erhalten, oder zu überprüfen, dass die Zelle unter extreme äußeren Wirkungen führt keine „Thermische Runaway“.

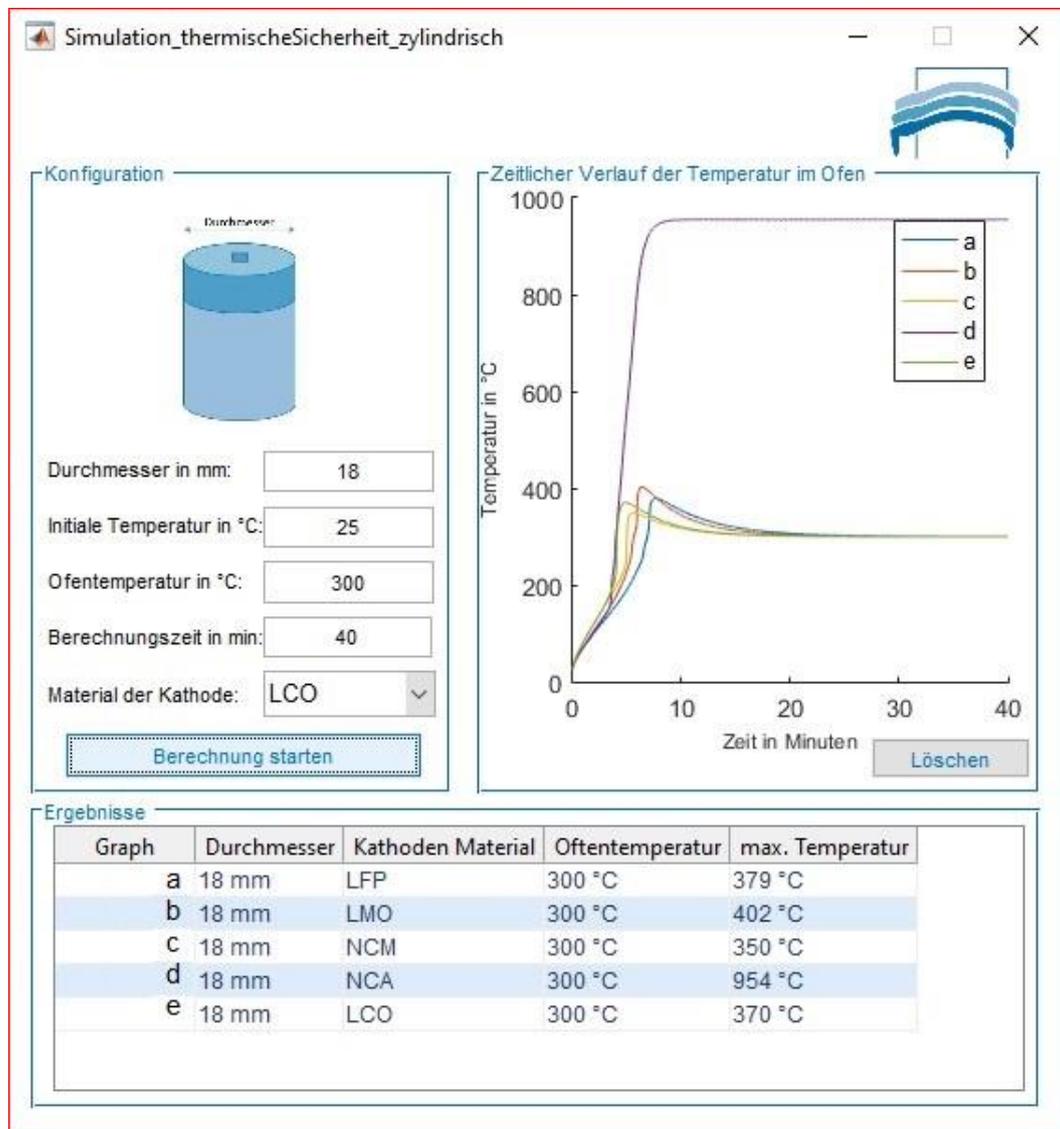


Abb. 5.13 Simulation bis zu Thermal Runaway

Das LFP scheint das sicherste Kathodenmaterial zu sein, weil es mehr Zeit bis dem Thermal Runaway benötigt und ihre Maximaltemperatur einen nicht zu hohen Wert erreicht. Auf der Rangliste würde die NCM Zelle die zweite Stelle einnehmen, gefolgt vom LMO und dem LCO. Auf der letzten Position liegt mit deutlichem Abstand die NCA, wegen ihrer außergewöhnlichen Maximaltemperatur und aufgrund der langfristigen Erhaltung dieser Temperatur. Diese Resultaten übereinstimmen mit den Schlussfolgerungen von Peng [61, S. 1009-1017]. In dieser numerischen Untersuchung der thermischen Sicherheit der Lithium-Ionen-Batterie wird die LFP Zellchemie auch als die sicherste Option dargestellt.

In der Gesamtoptimierung beweist sich, dass keine Zellchemien während des eingegebenen Fahrzyklus eine Thermal Runaway produzieren. Nachdem bewertet das Programm die Sicherheitsgrad der Zelle nach der Änderungsgeschwindigkeit der Temperaturabweichung.

5.2.4 Gesamtoptimierung

Dieser Unterteilung wird von den Ergebnissen der anderen Programmteile gefüttert. Das Optimierungsverfahren ist auf der Erstellung einer Rangfolge von Zellen mit unterschiedlichen Größen gegründet. Dies wird durch die Benotung der Zelleistung aus jeder Optimierungsperspektive erreicht. Erstens müssen die gewünschten Konfiguration und das Kostenlimit in der Benutzeroberfläche eingegeben werden. Zusammen damit, sollte jeder Optimierungsaspekt mit einer Nummer zwischen 1 und 10 gewichtet werden. Im folgenden Bild stehen die Optimierungsparameter:

The image shows two side-by-side windows from a software interface. The left window, titled 'Konfiguration', contains three input fields: 'T_max' with the value '30' and a unit '°C', 'T_diff' with the value '5' and a unit '°C', and 'Kostenjahr' with a dropdown menu set to '2018'. Below these fields is a grey button labeled 'Optimieren'. The right window, titled 'Zellauswahlhilfe', contains a 'Kostenlimit' input field with the value '150' and the unit 'Euro'. Below this is the heading 'Einzelgewichte für die Zellauswahl' followed by six rows of parameters, each with an input field set to '1' and a range '[1-10]': 'T_max', 'T_diff', 'Kosten', 'Effizienz', 'P_Schaltun', and 'Sicherheit'. At the bottom of this window is a grey button labeled 'Ergebnis'.

Abb. 5.14 Restriktionen und Gewichte für die Gesamtoptimierung

Das Programm erfolgt durch den MATLAB Befehl *gamultiobj()* eine Pareto-Optimierung, welche die mathematisch optimalen Zellgrößen für das multikriterielle Problem erzeugt. Da keine eindeutig beste Lösung definiert ist, wird eine Menge von Lösungen des Optimierungsproblems bestimmen. Die gemeinsame Eigenschaft dieser Menge ist, dass die Verbesserung eines Zielfunktionswertes nur durch die Verschlechterung eines anderen erreicht werden kann. Also sie sind die Menge optimaler Kompromisse, die auch als Pareto-Menge werden. Die folgende Graphik zeigt ein Beispiel der Herstellung einer Pareto-Optimierung.

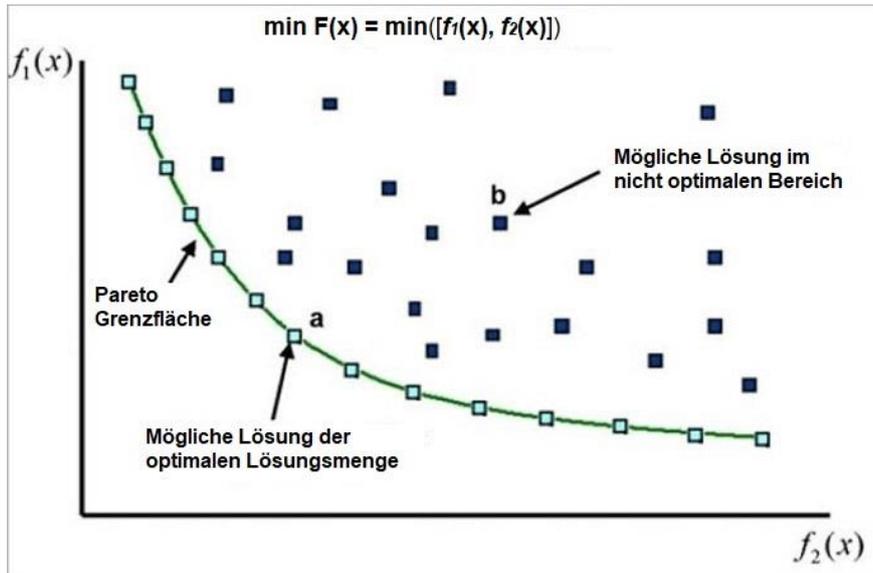


Abb. 5.15 Beispiel einer Pareto multikriteriellen Optimierung mit zwei Zielfunktionen nach [62]

Danach benotet das Programm die Zellen in der Pareto-Menge durch die eingegebenen Gewichte. Die Benotung hat keine tatsächliche Bedeutung, aber erlaubt die qualitative Urteilung der Zellen und die Korrelationen zwischen Zielfunktionswerten. In der folgenden Graphik zeigt die Bewertung der Zellen nach ihren Größen.

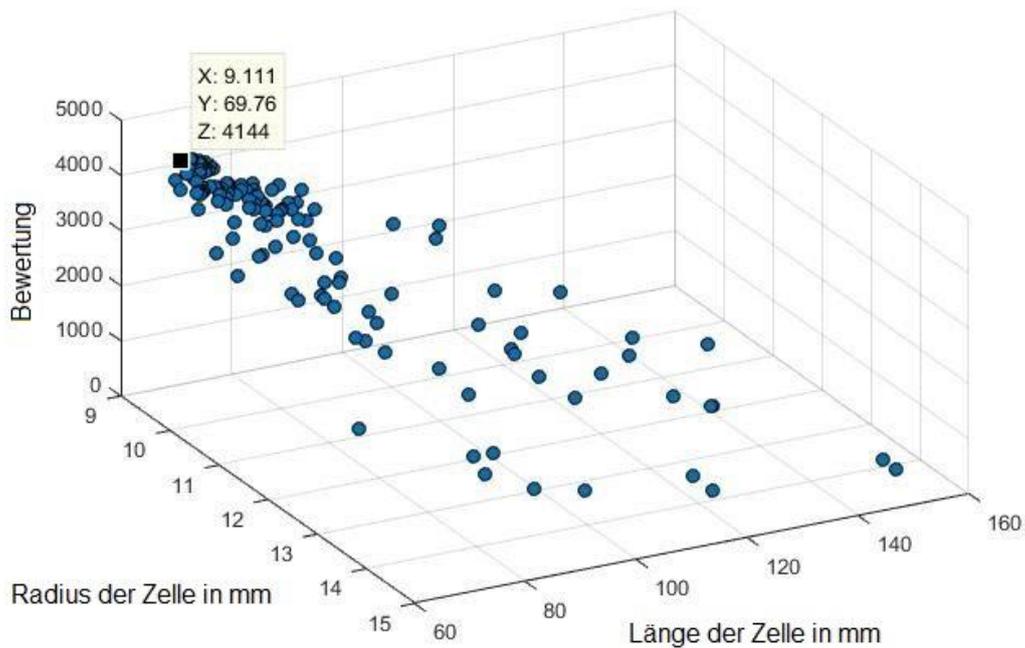


Abb. 5.16 Ergebnisse der Bewertung der zylindrischen Zellen nach den ausgewählten Restriktionen und Gewichte

Die kleineren zylindrischen Zellen erreichen die besten Bewertungen trotz ihre höheren Kosten. Der Radius spielt eine wichtigere Rolle als die Länge. Seine Bewertung nimmt ab einem Radiuswert von 10 mm stark ab. Im Gegensatz tritt eine bedeutende Notenminderung ab einer Länge von 90 mm ein.

Weitere Untersuchungen erwiesen eine große Wirkung der Kostenrestriktion auf die Ergebnissen, weil sie die kleineren Zellen zuerst verschieben. Das gilt insbesondere für die Zellen mit einem Radius zwischen 9 und 11 mm und einer Länge zwischen 60 und 80 mm. Außerdem gibt das Programm benotungssystem eine besondere größere Punktzahl zum thermischen Verhalten der Zelle als zu ihrer wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit.

Die Optimierungsergebnisse beinhalten eine Matrix von Graphiken, die der Korrelation zwischen Optimierungsvariablen und die Werteverteilung der Lösungsmenge zeigen. Die relevantesten Korrelationsgraphiken sind im folgenden Bild zu sehen. Die vollständige Matrix kann im Anhang 5.2.4 gefunden werden.

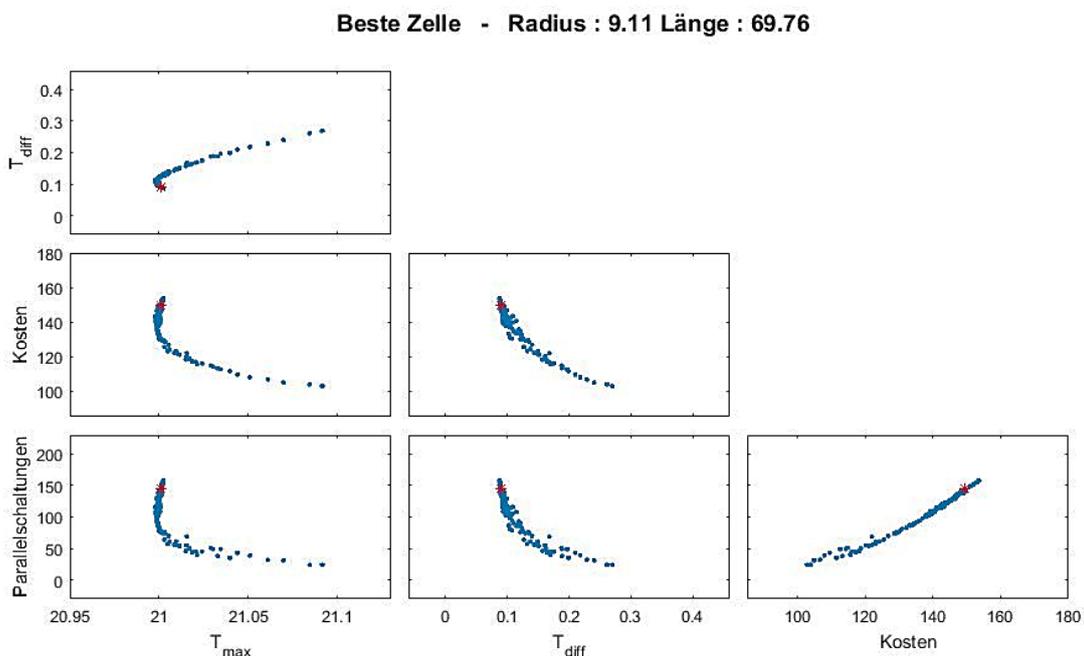


Abb. 5.17 Relevanteste Korrelationsgraphiken zwischen Variablen

Die Korrelationsgraphiken zeigen klare Beziehungen zwischen den thermischen Variablen, den Kosten und dem Parallelgrad der Schaltungen. Die Maximaltemperatur der Zelle und die Temperaturdifferenz innerhalb der Zelle sind praktisch direkt proportionale Variablen. Es gibt auch eine direkte Proportionalität zwischen der Kostenrechnung und der Anzahl von Parallelschaltungen. Außerdem erfolgt ein besseres thermisches Verhalten der Zelle durch die Zunahme der Parallelschaltungen und demzufolge durch den Kostenanstieg.

Abschließend bestätigen die Ergebnisse der Behauptung, dass die kleineren Zellen die bestmögliche Option unter alle zylindrischen Zellen sind. Die mathematische Lösung des Gesamtoptimierungsproblems stellt eine Zelle mit einem Radius von 9.11 mm und einer Länge von 69.76 mm als die allerbeste Wahlmöglichkeit. Das Resultat des Programmes

beweist als zutreffend die Entscheidung, 18650 Zellen für das aCar Fahrzeug P1 anzuwenden, denn die Herstellung von 18700 Zellen ist begrenzt oder existiert kaum in den aktuellen Lithium-Zellen-Batterie Märkten. Weitere Untersuchungen mit unterschiedlichen Kostenrestriktionen und Einzelgewichten zeigten ähnliche Ergebnisse. Nur für den Fall einer drastischen Kostenrestriktion empfahl das Optimierungsprogramm eine Steigerung der Zelllänge bis 120 mm wegen der hohen Empfindlichkeit des thermischen Verhaltens auf Änderungen des Radiuswertes.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein thermisches Modell zur Simulation des Zellenverhaltens in der Modulebene entwickelt. Das Modell wurde als Erweiterung des Gesamtmodells zur Bestimmung der optimalen Zellgröße konzipiert. Zu diesem Zweck wurden die bisherigen Ergebnisse der thermischen Meta-Modellierung auf Zellebene gesammelt und verarbeitet. Mithilfe einer gemeinsamen Benutzeroberfläche konnte das Modulmodell in der thermischen Optimierungsunterteilung implementiert werden. Die Verwendungsmethode und die Validierung der Modulerweiterung wurden durch die Anwendung des Optimierungstool im aCar Fahrzeugkonzept geprüft.

Die Modellentwicklung wurde auf der Identifikation der spezifischen Wärmeaustauschverfahren und Wärmeerzeugung jedes Modulelements basiert. Nach der Definition der Wärmeinteraktionen wurden die Temperaturveränderungen der Modulelemente durch ein lineares Matrixsystem bestimmt und verbunden. Mittels der MATLAB Softwareumgebung wurde das Simulationsprogramm zur Lösung des Matrixsystems aufgebaut. Danach wurde dieses Simulationsprogramm in der Benutzeroberfläche der thermischen Optimierung des Gesamtmodells implementiert. Ebenso wurde das Modulprogramm mit ihrer eigenen Benutzeroberfläche versorgt, um die Simulationsergebnisse darzustellen. Spätere Untersuchungen der Modulsimulation zeigten Instabilitäten in der Temperaturbestimmung von Modulen mit einer höheren Zellanzahl. Als Gegenmaßnahme wurde eine einfache Regelungsmethode auf die Temperaturberechnung eingerichtet, die auch als Kalibrierungssystem des Modells angewandt werden kann.

Letztendlich konnte das Modulmodell Simulationen von Modulen mit ca. 600 Zellen in weniger als eine Stunde Zeit durchführen. Der Anwendungsbereich des Modulprogrammes umfasst zwei Modulkonfigurationen: eine hexaedrische Anordnung für zylindrische Zellen und eine lineare Anordnung für prismatische Zellen. Beide Konfigurationen ziehen unter Berücksichtigung die Wärmedissipation des Moduls durch ein Kühlungssystem. Besonders interessant ist die quer angeströmte Luftzirkulation, die in der zylindrischen Anordnung betrachtet wurde.

Nach der erfolgreichen Implementierung der Erweiterung konnte die Optimierungsanalyse für das aCar Fahrzeugkonzept durchgeführt werden. Das Optimierungstool bewertet abhängig von der Zellgeometrie das Zellpotenzial nach vier Aspekte: die elektrische Effizienz, die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit, das thermische Verhalten und der Sicherheitsgrad. Nachdem erfolgt das Tool eine multikriterielle Gesamtoptimierung und bestimmt die optimalen Zellgrößen für die eingegebenen Restriktionen und Fahrbedingungen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Analyse der elektrischen Effizienz nicht durchgeführt, weil diese Unterteilung des Gesamtmodells zum Zeitpunkt der Analyse nicht funktionsfähig war.

Für die zylindrischen Zellen, die das aCar Fahrzeugkonzept verwendet, zeigte die Kostenanalyse eine hohe Abhängigkeit der Kosten per kWh gegenüber der Radiusgröße unter ein Radiuswert von 15 mm. Eine andere Schlussfolgerung aus der Kostanalyse für die Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit war, Kobalt als Rohstoffmaterial der Zelle zu vermeiden.

Im Gegensatz zur Kostenanalyse stellte die thermische Simulation einzelner Zellen fest, dass die kleineren zylindrischen Zellen eine geringere Maximaltemperatur hatten und auch eine reduziertere Temperaturabweichung innerhalb der Zelle erzeugten.

Danach wurde die Modulsimulation der Zelle 18650, welche die besten thermischen Ergebnisse erwies, durchgeführt. Die Ergebnisse wurden zur Validierung der Modulmodelle mit den gespeicherten Daten des aCar Fahrzeugs P1, die während eines betriebsähnlichen belasteten Fahrzyklus beim BMS gemessen wurden, verglichen. Die Resultate der Bestimmung der durchschnittlichen Modultemperatur überstimmten mit den gemessenen Temperaturdaten des P1 mit einem Relativfehler von 0.4 %. Nach der Analyse der Temperaturkurven wurde der Schluss gezogen, dass die Fahrzeugbatterie die thermischen Anforderungen bedeutend übertraf. Es sollte überprüft werden, ob die Batterie überdimensioniert war.

Folgend wurde der Sicherheitsgrad der verschiedenen Zellchemien untersucht und eine Rangliste erstellt. Auf dem ersten Platz befand sich die LFP Chemie, gefolgt von der NCM, der LMO, der LCO und zuletzt die NCA.

Letztendlich wurde die Gesamtoptimierung durchgeführt. Die multikriterielle Bewertung wurde durch die Anwendung vom Pareto-Optimierungsverfahren erfolgt. Das Programm schloss ab, dass die kleineren Zellen die bestmögliche Option unter alle zylindrischen Zellen sind. Die allerbeste Punktzahl wurde von einer Zelle mit einem Radius von 9.11 mm und einer Länge von 69.76 mm erreicht. Das Resultat des Programms bewies als zutreffend die Entscheidung, 18650 Zellen für das aCar Fahrzeug P1 anzuwenden. Bemerkenswert ist die Wirkung von einer bedeutenden Kostenrestriktion auf den Optimierungsergebnissen: fast alle Kleinzellen würden von der Optimierung vernachlässigt. In diesem Fall würde die Zelle mit 9 mm Radius und 120 mm Länge die beste Bewertung zeigen. Grund dafür ist die hohe Empfindlichkeit des thermischen Verhaltens auf Änderungen des Radiuswertes.

Das Modulmodell harmonisiert mit dem Gesamtmodell, dank ihrer hohen Geschwindigkeit und einfache Benutzeroberfläche. Es ergänzt die Ergebnisse einzelner Zelle durch die Simulation des ganzen Modules unter der gewünschten Fahrbedingungen. Aus der Benutzeroberfläche kann die Analyse des Modulverhaltens von verschiedenen Zelltypen, Modulanordnungen und Fahrzyklen durchgeführt werden. Durch die manuelle Bearbeitung des Matrixsystems können Anomalitäten und Fehlern in der Modulkonfiguration simuliert werden.

Die Implementierung des Modells durch MATLAB Softwareumgebung vereinfacht die möglichen Erweiterungen von zukünftigen Arbeiten. Das wichtigste Verbesserungspotential liegt in der Einfügung der Pouch-Zellen im Modulmodell, die keine passende Option im aCar Fahrzeugkonzept war. Trotzdem gibt es eine ziemlich große Anzahl von Elektrofahrzeuge, die diesen Zelltyp verwenden. Diese Erweiterung wird den Untersuchungsbereich des Modells zu aller konventionellen Zellbauformen ergänzen.

Zur Vergrößerung des Genauigkeitsgrads kann das Modulmodell umgewandelt werden, um die Effekte der Balancierung der Zelle zu berücksichtigen. Außerdem ist eine tiefere Integration im Gesamtmodell auch empfohlen, besonders in der Gesamtoptimierung-Unterteilung, die im Moment keine Bewertung auf Modulebene durchführen kann.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Aufbau der Arbeit	3
Abb. 2.1	Komponenten einer konventionellen Lithium-Ionen-Zelle beim Entladevorgang [11, S. 22].....	6
Abb. 2.2	Prozessfolge in der Zellfertigung [18, S. 61].....	8
Abb. 2.3	Verfahrensschritten, die zu einem „Thermal Runaway“ führen nach [19, S. 404].....	9
Abb. 2.4	Sicherheitsmechanismen einer zylindrischen Zelle nach [21].....	10
Abb. 2.5	Spannungsverläufe während Zellentladung bei unterschiedlichen Temperaturen nach [22, S. 54].....	11
Abb. 2.6	Spannungskennlinien für verschiedene C-Raten [22, S. 50].....	12
Abb. 2.7	Temperatur- und Geschwindigkeitsgrenzschicht einer Strömung an einer Platte [28].....	14
Abb. 2.8	Beispielhafte Darstellung für die kalendarische Lebensdauer in Jahren als Funktion [19, S. 411].....	15
Abb. 2.9	Wirkung der Betriebstemperatur auf die Lebensdauer und die Leistung [31, S. 166]	16
Abb. 2.10	Konventionelle Bauformen der Lithium-Ionen-Zellen [18, S. 54].....	17
Abb. 2.11	Aufbau eines Batteriemodules [18, S. 58].....	18
Abb. 2.12	Sicherheitsmaßnahmen der Lithium-Ionen-Batterie [23, S. 17].....	19
Abb. 2.13	Wärmeleitungsgleichung für eine zylindrische Zelle und ihre Lösung bei FEM-Programm nach [36].....	20
Abb. 2.14	Elektrische Ersatzschaltbilder einer Lithium-Ionen-Zelle [22, S. 44].....	21
Abb. 3.1	Eingangsgrößen und Bewertungskriterium des Gesamtoptimierungstool nach [42, S. 4].....	25
Abb. 3.2	Schritte der Optimierungsverfahren.....	26
Abb. 4.1	Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik.....	28
Abb. 4.2	Wechselwirkung der Wärmekapazität der Zelle mit der Zelltemperatur [43, S. 535-542]	29
Abb. 4.3	Wärmeübertragungsrichtungen der zylindrischen und prismatischen Zelle	30
Abb. 4.4	Hexaedrische Modulanordnung der zylindrischen Zellen abstrahiert von Tesla Model S Batteriemodul	31
Abb. 4.5	Lineare Modulanordnung der prismatischen Zellen abstrahiert von BMW i3, Audi Q7 PHEV und Renault Zoe Batteriemodulen.....	31
Abb. 4.6	Temperaturunterschied zwischen Zellzentrum und Oberfläche [43, S. 540]	32
Abb. 4.7	Temperaturknoten der Stromleiter und Kontaktierungen für die zylindrische und die prismatische Anordnung	34
Abb. 4.8	Senkrechte Fläche der Metallfolie definiert als die Seite eines hexaedrischen Prismas	35
Abb. 4.9	Rechnung der Fläche für die Konvektionswärmeleistung	36
Abb. 4.10	Schematische Zeichnung des metallischen Gehäuses in der prismatischen Anordnung	37

Abb. 4.11	Erzwungene Luftkonvektion in der prismatischen Anordnung.....	38
Abb. 4.12	Luftmassengruppen in der zylindrischen Anordnung	38
Abb. 4.13	Unterteilung der quer angeströmten Luftmassengruppe.....	39
Abb. 4.14	Definition der Anordnungsdichtigkeit durch ihre Abstände.....	41
Abb. 4.15	Korrekturfaktor f_j als funktion der Anzahl der Zellreihe.....	42
Abb. 4.16	Kühlungsluftmassen mit schon festgelegter Anfangstemperatur	46
Abb. 4.17	Diagramm der Rechnungsprozess für Implementierung der Modulmodell.	47
Abb. 4.18	Programmstruktur des Modulmodelles	49
Abb. 4.19	Benutzeroberfläche des Modulmodelles.....	50
Abb. 4.20	Output des Modulprogrammes auf der Benutzeroberfläche	52
Abb. 4.21	Simulationsergebnisse für ein Modul mit 10 parallelverbundenen zylindrischen Zellen. Zelltyp 18650 mit 2.55 Ah Kapazität.	54
Abb. 4.22	Simulationsergebnisse für ein Modul mit 10 seriell verbundenen prismatischen Zellen. 20110110 Zellen mit 12.5 Ah Kapazität.....	56
Abb. 4.23	Temperaturabweichung des Elements i , wenn das Element j bei der Wärmeaustausch beeinflusst ist und wenn das Element j' bleibt mit derselben Temperatur	57
Abb. 4.24	Beispiel eines exzessiven Wärmeaustausch zwischen Modulelemente mit verschiedene Wärmekapazitäten	58
Abb. 4.25	Instabile Oszillation der Lösung für die Zelltemperatur	59
Abb. 4.26	Thermische Optimierung Benutzeroberfläche mit Modifikationen	61
Abb. 4.27	Box Nummer 1: Metamodell-basierte Simulation.....	62
Abb. 4.28	Benutzeroberfläche des <i>C_Zyklus_erzeuger.m</i>	63
Abb. 4.29	Box Nummer 2: Meta-Model Generator und Modulsimulation Button	64
Abb. 4.30	Verwendungsweise des thermischen Optimierungstools.....	64
Abb. 5.1	aCar Fahrzeugkonzept P2	67
Abb. 5.2	Struktur des Datensatzes	68
Abb. 5.3	Ergebnisse des Optimierungstools für die erwarteten Rohstoffkosten	70
Abb. 5.4	Kostenberechnung des Optimierungstools für die zylindrische Zelle	71
Abb. 5.5	Kostenberechnung des Optimierungstools für die prismatische Zelle.....	72
Abb. 5.6	Fahrzyklus des aCar als angelegte C-Rate der Einzelzelle	73
Abb. 5.7	Maximaltemperatur der Einzelzelle für den ausgegebenen Fahrzyklus	74
Abb. 5.8	Maximaltemperaturabweichung in der Einzelzellen für den ausgegebenen Fahrzyklus.....	75
Abb. 5.9	Kapazitätsinterpolation der Einzelzellen	76
Abb. 5.10	Inputs der Modulsimulation	77
Abb. 5.11	Ergebnisse der Modulsimulation	78
Abb. 5.12	Darstellung des durch die BMS gemessenen Temperaturlaufs	79
Abb. 5.13	Simulation bis zu Thermal Runaway	80
Abb. 5.14	Restriktionen und Gewichte für die Gesamtoptimierung.....	81
Abb. 5.15	Beispiel einer Pareto multikriteriellen Optimierung mit zwei Zielfunktionen nach [62]	82
Abb. 5.16	Ergebnisse der Bewertung der zylindrischen Zellen nach den ausgewählten Restriktionen und Gewichte.....	82
Abb. 5.17	Relevanteste Korrelationsgraphiken zwischen Variablen	83

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1	Kapazität, Arbeitsspannung und Energiedichte der beschriebenen Kathodenmaterialien (typische Werte) [14, S. 42]	7
Tabelle 2.2	Qualitative Betrachtung der Eigenschaftsprofile der wichtigsten Anodenaktivmaterialien [15, S. 57]	7
Tabelle 4.1	Spezifische Lösungen der gerichtete Wärmeleistungsgleichung für das Modulelement Zelle	32
Tabelle 4.2	Spezifische Lösungen der gerichtete Wärmeleistungsgleichung für die Modulelemente Kontaktierung und Stromleiter	35
Tabelle 4.3	Spezifische Lösungen der gerichtete Wärmeleistungsgleichung für das Modulelement Kühlungsplatte.....	37
Tabelle 4.4	Spezifische Lösungen der gerichtete Wärmeleistungsgleichung für das Modulelement erzwungene Luftkonvektion	43
Tabelle 4.5	Matrix W	45
Tabelle 4.6	Parameterliste angeordnet per Modulelemente	48
Tabelle 4.7	Parameter des Modulprogrammes.....	51
Tabelle 4.8	Parameter des Modulprogrammes.....	53
Tabelle 4.9	Ergebnisse für die Simulationsprobe des Modulprogrammes (Ergebnisse mit Sternchen wurden nach der Implementierung von der Stabilisierungsmethode erhalten).....	60
Tabelle 5.1	Eigenschaften der Traktionsbatterie des aCars	69

Literaturverzeichnis

- [1] EV Consultancy, *Europe Plug-in Vehicle Sales for Q4 and 2017 Full Year*. [Online] Verfügbar: <http://www.ev-volumes.com/>. Gefunden am: Apr. 15 2018.
- [2] Markus Lienkamp, *Status Elektromobilität 2016 Oder Wie Tesla Nicht Gewinnen Wird*: Markus Lienkamp, 2016.
- [3] F. Hoffmann, "Metamodellbasierte thermische Optimierung ein zylindrischen und einer Pouch-Lithium-Ionen-Zelle," Masterarbeit, Fakultät für Maschinenwesen, Technischen Universität München, München, 2016.
- [4] O. Ladhari, "Metamodellbasierte thermische Optimierung einer prismatischen Lithium-Ionen-Zelle," Master Arbeit, Fakultät für Maschinenwesen, Technischen Universität München, München, 2017.
- [5] P. Kurzweil und O. K. Dietlmeier, *Elektrochemische Speicher*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [6] M. Sterner und I. Stadler, *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [7] X. Lin, "Erweiterung und Evaluierung eines prädizierenden Alterungsmodells für Lithium-Ionen-Traktionsbatterien," Masterarbeit, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Technischen Universität München, 2016.
- [8] B. Ketterer, U. Karl, D. Möst, und S. Ulrich, "Lithium-Ionen Batterien: Stand der Technik und Anwendungspotenzial in Hybrid-, Plug-In Hybrid- und Elektrofahrzeugen," Institut für Materialforschung I - Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, 2009.
- [9] B. Scrosati, "History of lithium batteries," *J Solid State Electrochem*, Bd. 15, Rn. 7-8, S. 1623–1630, 2011.
- [10] E. Rahimzei, K. Sann, und M. Vogel, "Kompendium: Li-Ionen-Batterien: Grundlagen, Bewertungskriterien, Gesetze und Normen," Bd. VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V, Jul. 2015.
- [11] K. Vuorilehto, "Materialien und Funktion," in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, R. Korthauer, Hrsg, Frankfurt, Deutschland: Springer Vieweg, 2013, S. 21–30.
- [12] P. Bottke, "Primäre und wiederaufladbare Lithium-Batterien," Februar 2013.
- [13] T. Wöhrle, "Lithium-Ionen-Zellen," in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, R. Korthauer, Hrsg, Frankfurt, Deutschland: Springer Vieweg, 2013, S. 107–118.
- [14] C. Graf, "Kathodenmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien," in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, R. Korthauer, Hrsg, Frankfurt, Deutschland: Springer Vieweg, 2013, S. 30–43.
- [15] C. Wurm, O. Öttinger, S. Wittkämper, R. Zauter, und K. Vuorilehto, "Anodenmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien," in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, R. Korthauer, Hrsg, Frankfurt, Deutschland: Springer Vieweg, 2013, S. 45–60.
- [16] C. J. Weber und M. Roth, "Separatoren," in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, R. Korthauer, Hrsg, Frankfurt, Deutschland: Springer Vieweg, 2013, S. 78–93.
- [17] C. Hartnig und M. Schmidt, "Elektrolyte und Leitsalze," in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, R. Korthauer, Hrsg, Frankfurt, Deutschland: Springer Vieweg, 2013.
- [18] A. Kampker, "Die Produktion des Hochvolt-Speichersystems," in *Elektromobilproduktion*, A. Kampker, Hrsg, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, S. 43–113.

- [19] P. Lamp, "Anforderungen an Batterien für die Elektromobilität," in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, R. Korthauer, Hrsg, Frankfurt, Deutschland: Springer Vieweg, 2013, S. 392–415.
- [20] M. Lienkamp, "Sicherheit von Batterien," 2017.
- [21] Z. J. Zhang, P. Ramadass, und W. Fang, "Safety of Lithium-Ion Batteries," in *Lithium-Ion Batteries // Lithium-ion batteries: Advances and applications / [editor] Gianfranco Pistoia*, G. Pistoia, Hrsg, Amsterdam: Elsevier, 2014, S. 409–435.
- [22] M. Lienkamp, "Batterien - Grundlagen," 2017.
- [23] S. Leuthner, "Übersicht zu Lithium-Ionen-Batterien," in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, R. Korthauer, Hrsg, Frankfurt, Deutschland: Springer Vieweg, 2013, S. 13–19.
- [24] M. Kerler und M. Lienkamp, *A method to find a thermal optimum cell size*, 2015.
- [25] A. Jossen und W. Weydanz, *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen: 36 Tabellen*, 1st Aufl. Neusäß: Ubooks, 2006.
- [26] N. Sato, "Thermal behavior analysis of lithium-ion batteries for electric and hybrid vehicles," *Journal of Power Sources*, Bd. 99, Rn. 1-2, S. 70–77, 2001.
- [27] Mathematical Engineering, *Wärmeleitung*. [Online] Verfügbar: <http://me-irt.de/warme-stoff-transport-waermeleitung>. Gefunden am: Feb. 14 2018.
- [28] Mathematical Engineering, *Konvektion*. [Online] Verfügbar: <http://me-irt.de/warme-stoff-transport-konvektion>. Gefunden am: Apr. 13 2018.
- [29] Mathematical Engineering, *Zusammenfassung: Strahlung, Wärmeleitung, Konvektion*. [Online] Verfügbar: <http://me-irt.de/strahlung-waermeleitung-konvektion>. Gefunden am: Apr. 13 2018.
- [30] C. Meis, S. Mueller, S. Rohr, M. Kerler, und M. Lienkamp, "Guide for the Focused Utilization of Aging Models for Lithium-Ion Batteries - An Automotive Perspective," *SAE Int. J. Passeng. Cars – Electron. Electr. Syst*, Bd. 8, Rn. 1, 2015.
- [31] M. G. Zeyen und A. Wiebelt, "Thermisches Management der Batterie," in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, R. Korthauer, Hrsg, Frankfurt, Deutschland: Springer Vieweg, 2013, S. 165–176.
- [32] C. Cluzel und C. Douglas, "Cost and performance of EV batteries: Final report," Element Energy Limited, Cambridge, Mrz. 2012. [Online] Verfügbar: https://www.theccc.org.uk/archive/aws/IA&S/CCC%20battery%20cost_%20Element%20Energy%20report_March2012_Public.pdf. Gefunden am: Apr. 14 2018.
- [33] U. Köhler, "Aufbau von Lithium-Ionen-Batteriesystemen," in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, R. Korthauer, Hrsg, Frankfurt, Deutschland: Springer Vieweg, 2013, S. 95–106.
- [34] P. Keil und A. Jossen, "Aufbau und Parametrierung von Batteriemodellen," Lehrstuhl für Elektrische Energiespeichertechnik - Technische Universität München, 2012.
- [35] J. P. Schmidt, *Verfahren zur Charakterisierung und Modellierung von Lithium-Ionen Zellen*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2013.
- [36] F. Uptmoor, "Modellbildung und Simulation von Batterien in der Elektromobilität," Master Thesis, Fakultät Technik und Informatik, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Hamburg, 2011.
- [37] M. Baumann und M. Lienkamp, "Batterien - Modellbildung," 2017.
- [38] T. Bäck, P. Krause, und C. Foussette, "Automatische Metamodellierung von CAE-Simulationsmodellen," *ATZ Automobiltech Z*, Bd. 117, Rn. 5, S. 64–69, 2015.
- [39] M. Kerler, F. Hoffmann, und M. Lienkamp, "Optimization through rapid meta-model based transient thermal simulation of lithium ion battery cells," Technischen Universität München - Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik.

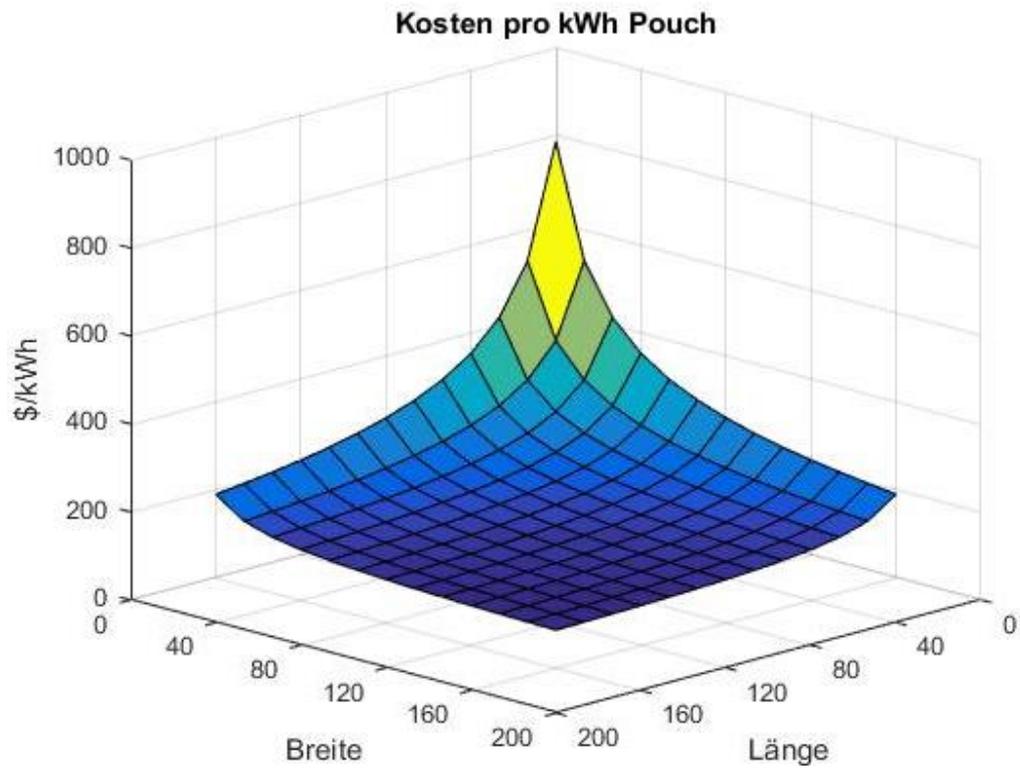
- [40] D. Gorissen, I. Couckuyt, P. Demeester, T. Dhaene, und K. Crombecq, “A Surrogate Modeling and Adaptive Sampling Toolbox for Computer Based Design,” *Journal of Machine Learning Research*, Bd. 11, S. 2051–2055, 2010.
- [41] J. van der Herten, I. Couckuyt, D. Deschrijver, und T. Dhaene, “Adaptive classification under computational budget constraints using sequential data gathering,” *Advances in Engineering Software*, Bd. 99, S. 137–146, 2016.
- [42] X. Lin, *Untersuchung der optimalen Zellgröße für Elektrofahrzeuge*. Doktorat Kolloquium
- [43] K. Onda, T. Ohshima, M. Nakayama, K. Fukuda, und T. Araki, “Thermal behavior of small lithium-ion battery during rapid charge and discharge cycles,” *Journal of Power Sources*, Bd. 158, Rn. 1, S. 535–542, 2006.
- [44] A. Loges, S. Herberger, P. Seegert, und T. Wetzel, “A study on specific heat capacities of Li-ion cell components and their influence on thermal management,” *Journal of Power Sources*, Bd. 336, S. 341–350, 2016.
- [45] M. M. Kerler, “Optimierung eines modularen Batteriepacks hinsichtlich elektrischer, thermischer und mechanischer Belastung,” Diplomarbeit, Lehrstuhl Fahrzeugtechnik, Technischen Universität München, München, 2012.
- [46] InsideEVs, *Tesla S battery module*. [Online] Verfügbar: <https://insideevs.com/look-inside-a-tesla-model-s-battery-pac/>. Gefunden am: Feb. 15 2018.
- [47] InsideEVs, *BMW i3 battery module*. [Online] Verfügbar: <https://insideevs.com/2017-bmw-i3-get-94-ah-samsung-cells-125-mile-epa-range-rating/>.
- [48] InsideEVs, *Audi Q7 PHEV battery module*. [Online] Verfügbar: <https://insideevs.com/audi-releases-details-gas-version-q7-e-tron-phev/>. Gefunden am: Feb. 15 2018.
- [49] InsideEVs, *Renault Zoe battery module*. [Online] Verfügbar: <https://insideevs.com/renault-zoe-z-e-40-41-kwh-battery-visualized/>. Gefunden am: Feb. 15 2018.
- [50] Statista, *EU sales volume 2016-2017*. [Online] Verfügbar: <https://www.statista.com/statistics/804772/sales-volume-electric-vehicles-eu/>. Gefunden am: Feb. 15 2018.
- [51] P. von Böckh und T. Wetzel, “Erzwungene Konvektion,” in *Wärmeübertragung*, P. von Böckh und T. Wetzel, Hrsg, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, S. 79–120.
- [52] schweizer-fn, *Wärmeübergang*. [Online] Verfügbar: https://www.schweizer-fn.de/waerme/waermeuebergang/waerme_uebergang.php#rohr_innen. Gefunden am: Mrz. 08 2018.
- [53] ITW Stuttgart, “Erzwungene Konvektion,” in *Wärmeübertragung*, P. von Böckh, Hrsg, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006, S. 73–109.
- [54] The Mathworks, Inc, *MATLAB*. [Online] Verfügbar: <https://de.mathworks.com/products/matlab.html>. Gefunden am: Mrz. 25 2018.
- [55] S. Al Hallaj, H. Maleki, J. S. Hong, und J. R. Selmán, “Thermal modeling and design considerations of lithium-ion batteries,” *Journal of Power Sources*, Bd. 83, Rn. 1-2, S. 1–8, 1999.
- [56] A. Eddahech, O. Briat, und J.-M. Vinassa, “Lithium-ion battery heat generation investigation based on calorimetric entropy measurements,” in *2013 IEEE International Symposium on Industrial Electronics: IEEE*, 2013, S. 1–5.
- [57] J. Yi, B. Koo, und C. Shin, “Three-Dimensional Modeling of the Thermal Behavior of a Lithium-Ion Battery Module for Hybrid Electric Vehicle Applications,” *Energies*, Bd. 7, Rn. 11, S. 7586–7601, 2014.

- [58] C. Bolsinger, M. Zorn, und K. P. Birke, "Electrical contact resistance measurements of clamped battery cell connectors for cylindrical 18650 battery cells," *Journal of Energy Storage*, Bd. 12, S. 29–36, 2017.
- [59] The Mathworks, Inc, *Documentation: sparse*. [Online] Verfügbar: http://de.mathworks.com/help/matlab/ref/sparse.html?s_tid=gn_loc_drop. Gefunden am: Mrz. 27 2018.
- [60] aCar mobility, *aCar mobility: Homepage*. [Online] Verfügbar: <http://www.acar.tum.de/index.php?id=5>. Gefunden am: Apr. 03 2018.
- [61] P. Peng und F. Jiang, "Thermal safety of lithium-ion batteries with various cathode materials: A numerical study," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Bd. 103, S. 1008–1016, 2016.
- [62] M. Di Soma, *Optimal Operation Planning Of Distributed Energy Systems Through Multi-Objective Approach: A New Sustainability-Oriented Pathway: Scientific Figure on ResearchGate*. [Online] Verfügbar: https://www.researchgate.net/Example-of-a-Pareto-frontier-for-a-multi-objective-optimization-problem-with-two_fig6_309609991. Gefunden am: Apr. 09 2018.

Anhang

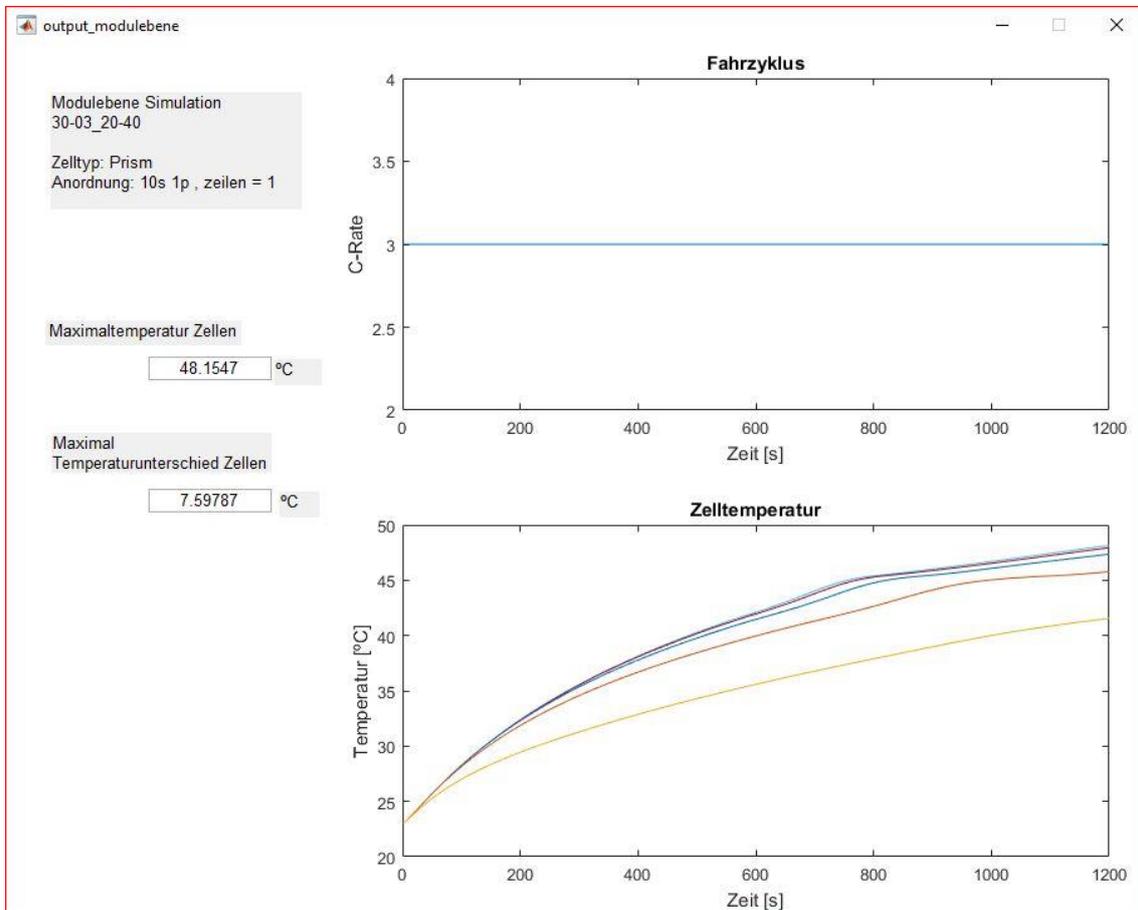
A 5.2.1

Kostenberechnung des Optimierungstools für die Pouch-Zelle

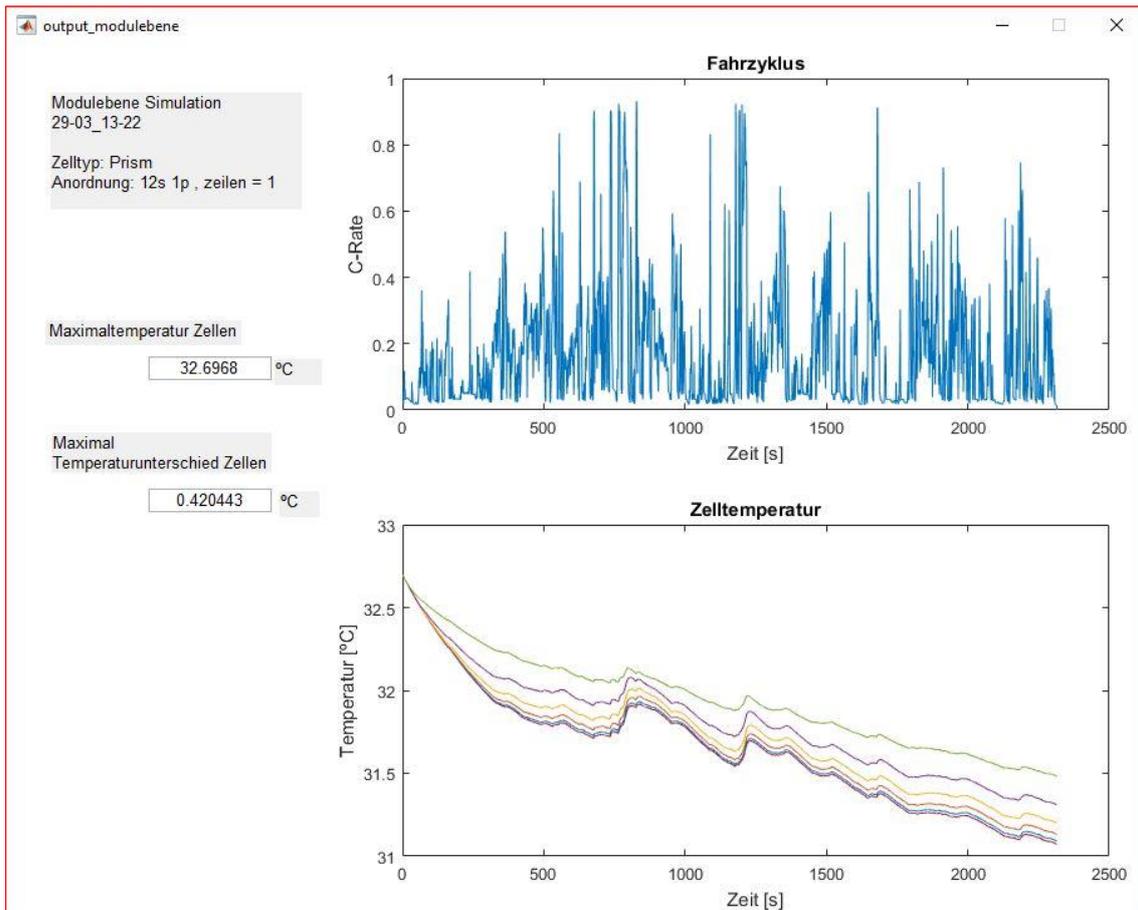


A 5.2.2

Ergebnisse der adiabatischen Simulation für die Modulanordnung des aCar Fahrzeugs P2



Ergebnisse der Simulation mit Kühlung durch Kühlungsplatte für die Modulanordnung des aCar Fahrzeugs P2



A 5.2.4

Korrelationsgraphiken des Optimierungstools

