

Martin Eisele

**Entwicklungsbegleitende
Validierungsumgebung für das Design von
Kühlkonzepten bei der Batteriemodul-
entwicklung in der frühen Phase der
Produktentwicklung**

Development-Accompanying Validation
Environment for the Design of Cooling Concepts in
Battery Module Development in the Early Stage of
Product Development

Band 141

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen
(Hrsg.)

Martin Eisele

**Entwicklungsbegleitende Validierungsumgebung
für das Design von Kühlkonzepten bei der
Batteriementwicklung in der frühen Phase der
Produktentwicklung**

**Development-Accompanying Validation Environment for
the Design of Cooling Concepts in Battery Module
Development in the Early Stage of Product Development**

Band 141

Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen

Copyright: IPEK • Institut für Produktentwicklung, 2022
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Die Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft
Alle Rechte vorbehalten

Druck: Stolzenberger Druck und Werbung GmbH & Co. KG, Leimen
06224-7697915

ISSN 1615-8113

Entwicklungsbegleitende Validierungsumgebung für das Design von Kühlkonzepten bei der Batteriemodul- entwicklung in der frühen Phase der Produktentwicklung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)

von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des

Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

DISSERTATION

von

M.Sc. Martin Eisele

Tag der mündlichen Prüfung: 02. Juli 2021

Hauptreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers

Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor

Vorwort der Herausgeber (Stand: Juli 2017)

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftenreihe dient seit mehr als 20 Jahren als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK - Institut für Produktentwicklung Karlsruhe* am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) verfügbar. Die Forschung des IPEK ist dabei strukturiert in die Kategorien Systeme, Methoden und Prozesse, um so der Komplexität heutiger Produktentwicklung ganzheitlich gerecht zu werden. Erst die Verknüpfung dieser drei Kategorien ermöglicht die Synthese innovativer Systeme durch Nutzung neuester Methoden und Prozesse. Gleichzeitig werden durch die Systemsynthese die erforschten neuen Methoden und Prozesse validiert und deren Mehrwert für die Praxis abgesichert. Dieses Forschungskonzept prägt nicht nur das IPEK-Leitbild, sondern auch den Charakter dieser Schriftenreihe, da immer alle drei Kategorien und deren Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Jeder Band setzt hier individuelle Schwerpunkte und adressiert dabei folgende Forschungsgebiete des IPEK:

- das Entwicklungs- und Innovationsmanagement,
- die Entwicklungs- und Konstruktionsmethodik,
- der Leichtbau von der Ebene des ganzen Systems bis hinunter zur Optimierung des Bauteils,
- die Validierung technischer Systeme auch unter Berücksichtigung der NVH Aspekte (Noise, Vibration, Harshness) mit dem Fokus auf Schwingungen und Akustik an Komponenten und in den Gesamtsystemen sowie deren subjektiver Beurteilung durch den Menschen,
- die Antriebssystemtechnik mit den Schwerpunkten komplette Antriebslösungen für Fahrzeuge und Maschinen,
- das Design, die Tribologie und Erprobung von Kupplungen und Bremsen sowie
- die Gerätetechnik mit dem Schwerpunkt auf Power-Tools.

Die Forschungsberichte stellen Ergebnisse unserer Forschung sowohl anderen Wissenschaftlern als auch den Unternehmen zu Verfügung um damit die Produktentwicklung in allen ihren Facetten mit innovativen Impulsen zu optimieren

Albert Albers und Sven Matthiesen

* Eh.: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)

Vorwort zu Band 141

Die Forderung nach einer Einschränkung der Treibhausgasemissionen in allen Bereichen unserer Gesellschaft führt in den letzten Jahren zu enormen Anstrengungen, Lösungen für diese Herausforderungen zu finden und so die Bedürfnisse der Gesellschaft zu befriedigen und gleichzeitig die Treibhausgasemissionen zu minimieren. Ein großes Gebiet in diesem Kontext ist die Mobilität. Insbesondere die Lösungen für die individuelle Mobilität sind in den Fokus sowohl der Politik als auch der Gesellschaft, aber auch der Unternehmen gelangt. Neue Lösungen für die Bereitstellung der individuellen Mobilität zu erarbeiten ist eine der größten Herausforderungen im Bereich der Fahrzeugentwicklung sowohl für den PKW-Bereich als auch für den Bereich der Lastkraftwagen. Neben der Verwendung von synthetischen Kraftstoffen im Kontext von Verbrennungsmotoren, die sicherlich auch noch ein gewisses Potenzial haben, sind die zwei zentralen Antriebssystemlösungen hier der rein batterie-elektrische Antrieb mit E-Maschine und einer entsprechend dimensionierten Batterie als Energiespeicher und sicherlich mit besonders hohem Potenzial für die Bereiche großer Reichweite und großer Transportmassen das Antriebssystem mit Elektromotor und Brennstoffzelle zur Wandlung von Wasserstoff in elektrischen Strom, wobei auch hier immer eine entsprechende Pufferbatterie notwendig ist. Somit sind Batterie-elektrische Speicher für die neuen Antriebslösungen zentrale Bausteine. Natürlich ist in einer ganzheitlichen Betrachtung auch die Treibhausgas-Auswirkung der Produktion, insbesondere der Batterien, als auch die Entsorgung sowie als zentralem Element die Stromerzeugung zu berücksichtigen. Bezogen auf die Batteriesysteme, beziehungsweise Batteriemodule, hat dieser Druck dazu geführt, dass in sehr vielen Gruppen – sowohl in der Forschung als auch in der Entwicklung – nach Lösungen gesucht wird. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass nicht die Batteriezelle allein mit ihren Materialkombinationen im Fokus steht, sondern auch das gesamte Batteriesystem. Dies zeigt, dass das Thema *Batteriesysteme* in der ganzen Bandbreite von der Materialentwicklung, über die Zellentwicklung und -produktion zum Design von Batteriesystemen, bis hin zu deren intelligenten Steuerung, Regelung und Management eine zentrale Herausforderung für die Produktentwicklung ist. Dabei ist die Batteriesystem-Entwicklung wiederum ein wichtiger Bereich, da hier durch die gezielte Komposition von Zellen zu einem System mit entsprechender Verschaltung und Regelung ein entscheidender Beitrag zur Leistungsfähigkeit der Batterie im Alltag erbracht wird. Eine zentrale Herausforderung ist dabei die Temperierung. Kühlungs- oder Temperierungssysteme müssen strukturiert entwickelt werden, da hier komplexe Wechselwirkungen zu berücksichtigen sind.

Heutige Batteriesystemlösungen erfordern eine sehr gezielte Temperierung, da der Arbeitstemperaturbereich des Batteriesystems, in dem der Wirkungsgrad und die Lebensdauer möglichst groß sind, sehr eng ist und in etwa dem „Wohlfühlbereich“ des Menschen zwischen 15 und 30 Grad Celsius entspricht. Es müssen daher technische Lösungen gefunden werden, um die Batteriesysteme möglichst effizient und dauerhaft

in dem Wohlfühltemperaturbereich zu halten. Dies bedeutet bei Betrieb im Fahrzeug, dass im Niedrigtemperaturbereich über Heizkonzepte nachgedacht werden muss, wobei im Hochtemperaturbereich, bei Umgebungstemperaturen jenseits der 30 Grad, eine Kühlung erforderlich ist. Zusätzlich ist insbesondere beim Schnellladen der Batterie eine Kühlung erforderlich, um keine Schäden und Lebensdauerreduzierungen zu verursachen. Kühlkonzepte stellen als technische Lösung damit ein sehr wichtiges Teilsystem im Batteriesystem und damit im Antriebssystem von batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen dar. Die Entwicklung dieser Kühlkonzepte ist eine Herausforderung, insbesondere in der Frühen Phase der Produktentwicklung. Die Herausforderungen entstehen zum einen aus den oft nicht vorhandenen aktiven Batteriezellen, um in der frühen Phase zu testen und auch aus der hohen Komplexität einer Kühlkonzeptentwicklung mit aktiven Zellen unter Berücksichtigung des gesamtelektrischen Verhaltens. Eine Verifikations- und Validierungsumgebung für das Design von Kühlkonzepten für Batteriesysteme mit unterschiedlichen Abbildungsstufen stellt also hier eine Lösungsoption dar, die den Produktentwicklungsprozess unterstützt und effektiver machen kann. Genau diese zu erforschen und als Entwicklungswerkzeug darzustellen hat sich Herr Dr.-Ing. Martin Eisele in seiner wissenschaftlichen Arbeit gewidmet und zu Lösungen geführt.

Die Arbeit liefert sowohl wichtige Beiträge in der Forschung an Methoden der Produktentwicklung als auch wertvolle praxisorientierte Konzepte für die reale Batteriesystementwicklung.

Juli, 2021

Albert Albers

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird eine Methode zur strukturierten Validierung von Batteriezellkühlungen aus querumströmten, kleinformatigen, zylindrischen Batteriezellen über mehrere Entwicklungsgenerationen des Batteriemoduls erarbeitet.

Auf Basis des aktuellen Forschungsstandes werden Kriterien erarbeitet, um die Eignung virtueller, physischer und gemischt physisch-virtueller Modelle für die Validierung in der frühen Entwicklungsphase zur Unterstützung des Frontloadings zu bewerten. Neben einfachen virtuellen zeigen gemischt physisch-virtuelle Modellansätze das Potential zur Unterstützung in der frühen Phase.

Die im Rahmen der Arbeit erarbeitete Methode strukturiert die Batteriemodulentwicklung in fünf Entwicklungsgenerationen. Bei den Entwicklungsgenerationen handelt es sich um virtuelle, physische und gemischt physisch-virtuelle Modelle im Sinne des IPEK-X-in-the-Loop-Ansatzes. Die gemischt physisch-virtuelle Modellbildung kommt dabei in zwei Entwicklungsgenerationen zum Einsatz. Die Arbeit beschreibt den Aufbau dieser zwei Validierungsumgebungen und deren Anwendung in der jeweiligen Entwicklungsgeneration. Die erste Validierungsumgebung nutzt drei physische Batteriezellen, die thermisch und elektrisch mit einer Echtzeitsimulation des zu entwickelnden Batteriemoduls gekoppelt sind, um das thermisch transiente Verhalten des Batteriemoduls nachzubilden. Die zweite, gemischt modellierte Validierungsumgebung besteht aus thermischen Ersatzbatteriezellen mit steuerbarer Heizleistung und einem modularen physischen Prüfaufbau, der die Batteriezellkühlung vollständig abbildet.

Die beschriebene Methode wird an zwei Entwicklungsbeispielen erprobt, bei welchen Zellen des Formats 18650 mit Kühlflüssigkeit querumströmt werden. Im ersten Entwicklungsbeispiel werden alle Entwicklungsgenerationen bis auf jene durchlaufen, die über drei physische Zellen das thermischen Verhalten des Batteriemoduls approximiert. Diese Entwicklungsgeneration wird im zweiten Entwicklungsbeispiel aufgrund der Möglichkeit, thermisch transiente Vorgänge abzubilden, angewendet.

Die anhand der erarbeiteten Kriterien abschließende Evaluation der Methode über die Entwicklungsbeispiele bestätigt die Unterstützung des Frontloadings in der frühen Phase der Entwicklung von Batteriezellkühlungen.

Abstract

In this work, a method is developed for the structured validation of battery cell cooling at module level for small-format cross flow-cooled cylindrical cells. The process is structured by the subsequent validation of several engineering generations of a battery module.

Based on the current state of research, criteria are developed for evaluating the suitability of virtual, physical, and mixed physical-virtual models for validation at an early stage to support front loading. In addition to simple virtual, mixed physical-virtual model approaches show potential for an early-stage support.

The method developed in this work subdivides battery module development into five engineering generations. Engineering generations are virtual, physical, and mixed physical-virtual models in terms of the IPEK-X-in-the-loop approach. Mixed physical-virtual modeling is used in two engineering generations. This work describes the structure of these two validation environments and their application in the respective engineering generation. To simulate the thermal transient behavior of a battery module, the first validation environment uses three physical battery cells which are thermally and electrically coupled to a real-time simulation of the battery module. The second, mixed-mode validation environment consists of physical battery cell models with controllable heating power and a modular physical test setup that fully replicates battery cell cooling.

The described method is tested on two application examples in which coolant flows across 18650 format cells. In the first application example, all engineering generations are used except for the one that approximates the thermal behavior of the battery module via three physical cells. This engineering generation is used in the second application example due to the possibility of mapping thermally transient processes.

The final evaluation of the method over the application examples based on the developed criteria confirms the support of frontloading at the early stage of engineering battery cell cooling systems.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeiten als akademischer Mitarbeiter am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Zunächst möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers für das entgegengebrachte Vertrauen und das Bereitstellen der notwendigen Gestaltungsfreiräume bedanken. Ich konnte mich dadurch in der Zeit am IPEK nicht nur wissenschaftlich und fachlich, sondern auch persönlich in besonderem Maße weiterentwickeln. Mein Dank gilt auch Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor für die Übernahme des Korreferats und dem damit verbundenen Interesse an meiner Forschungsarbeit.

Dem gesamten IPEK-Team möchte ich für die vielfältige Unterstützung während meiner Zeit am Institut danken. Besonderer Dank gilt meinen ehemaligen Kollegen und Kolleginnen am Standort Fasanengarten für die gemeinschaftliche und motivierende Arbeitsatmosphäre, die mir stets geholfen hat auch herausfordernde Phasen zu meistern und dabei den Humor nicht zu verlieren. Dank gilt auch meiner langjährigen Vorgesetzten Katharina Bause, für das uneingeschränkte Vertrauen, die stets offene Kommunikation und die geschaffenen Freiräume sowie Rahmenbedingungen, die für meine Arbeit unabdingbar waren.

Des Weiteren möchte ich mich für das Korrekturlesen und die wertvollen Kommentare zu meiner Arbeit bei Thomas Gwosch, Tim Bruchmüller, Marcel Nöller, Norbert Eichstädt und Christine Kalzendorf bedanken.

Der größte Dank gilt meiner Familie, allen voran meinen Eltern, die mich während meiner gesamten Ausbildung mit ganzer Kraft unterstützt haben. Vor allem in schwierigen Zeiten haben sie mir Rückhalt und die nötige Zuversicht gegeben, meine Ziele zu erreichen. Meiner lieben Frau Carmen, die mich durch all die Höhen und Tiefen meiner Promotion begleitet hat, möchte ich in ganz besonderer Weise danken. Trotz vieler Entbehrungen hat sie mich immer unterstützt und mir den Rücken freigehalten, um mich, vor allem in der finalen Phase, voll auf meine Arbeit fokussieren zu können. Dieser bedingungslose Rückhalt ist alles andere als selbstverständlich und ich bin dankbar eine solche Familie zu haben!

Juli, 2021

Martin Eisele

„It always seems impossible until it's done.“
Nelson Mandela

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	iii
Abbildungsverzeichnis	xiii
Tabellenverzeichnis	xix
Abkürzungsverzeichnis	xxi
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Stand der Forschung	5
2.1 Validierung in der Produktentstehung	5
2.1.1 Das erweiterte ZHO-Modell	6
2.1.2 Entwicklungsgenerationen im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung	7
2.1.3 Validierung und Verifikation	8
2.1.4 Frontloading in der Produktentstehung	9
2.1.5 Der IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz	11
2.1.6 Zwischenfazit	13
2.2 Batteriesysteme in Elektromobilitätsanwendungen	14
2.2.1 Aufbau von Batteriesystemen in Elektro- und Hybridfahrzeugen	14
2.2.2 Thermomanagement von Batteriesystemen	17
2.2.3 Thermisches Verhalten von Li-Ionen-Zellen	21
2.2.4 Zwischenfazit	22
2.3 Kühlung zylindrischer Batteriezellen	23
2.3.1 Aktive Zellmantelkühlung zylindrischer Zellen	25
2.3.2 Passive Kühlung zylindrischer Zellen	28
2.4 Design und Validierung des Thermomanagements auf Modul- und Batteriesystemebene	29
2.4.1 Vorgehensmodelle	30
2.4.2 Zwischenfazit	39
2.5 Modellbildung in der Validierung des Thermomanagements	40
2.5.1 Virtuelle Modellbildung zur Validierung von Batteriezellkühlungen	40
2.5.2 Physische Modellbildung zur Validierung von Batteriezellkühlungen	49
2.5.3 Gemischt physisch-virtuelle Modellbildung zur Validierung von Batteriezellkühlungen	53
2.5.4 Thermische und elektrische Charakterisierung von Batteriezellen	59

2.5.5	Zwischenfazit.....	65
2.6	Fazit zum Stand der Forschung	66
3	Motivation und Zielsetzung	69
3.1	Motivation.....	69
3.2	Zielsetzung.....	70
4	Forschungsfragen und Forschungsvorgehen	73
4.1	Forschungsfragen.....	73
4.2	Forschungsvorgehen	75
5	Modellausprägungen in der Validierung von Batteriezellkühlungen	79
5.1	Kriterien zur Evaluation von Validierungsaktivitäten hinsichtlich des Frontloadings.....	79
5.2	Evaluation von Modellausprägungen hinsichtlich der Unterstützung des Frontloadings.....	82
5.2.1	Virtuelle Modellbildung.....	82
5.2.2	Physische Modellbildung	84
5.2.3	Gemischt physisch-virtuelle Modellbildung	86
5.2.4	Fazit	88
6	Strukturierte Validierung von Entwicklungsgenerationen einer Batteriezellkühlung	91
6.1	E ₁ : empirisches Modell der quерumströmten Rohrbündel	95
6.2	E ₂ : CFD-Modell.....	97
6.3	E ₃ : physisch-virtuelles Modell mit realen Batteriezellen	100
6.3.1	Physischer Teil der Validierungsumgebung – Connected Systems.....	106
6.3.2	Elektrisches Koppelsystem	106
6.3.3	Thermisches Koppelsystem	108
6.3.4	Virtueller Teil der Validierungsumgebung – System-in-Development	112
6.3.5	Virtueller Teil der Validierungsumgebung – Connected Systems	124
6.4	E ₄ : physisch-virtuelles Modell mit thermischen Batteriezellmodellen als Koppelsystem.....	125
6.5	E ₅ : physisches Modell.....	130
6.6	Fazit zur Methodenentwicklung.....	133
7	Entwicklung der gemischt physisch-virtuellen Validierungsumgebung für E₃	135
7.1	Zielsystem zur Entwicklung der Validierungsumgebung	135
7.2	Elektrisches Koppelsystem	136

7.2.1	Sensoren des elektrischen Koppelsystems.....	136
7.2.2	Aktoren des elektrischen Koppelsystems.....	138
7.2.3	Regelung des elektrischen Koppelsystems.....	138
7.3	Thermisches Koppelsystem.....	139
7.3.1	Sensoren des thermischen Koppelsystems	139
7.3.2	Aktoren des thermischen Koppelsystems	144
7.3.3	Regelung des thermischen Koppelsystems	148
7.4	Verifikation des thermischen Koppelsystems	149
7.4.1	Homogene Temperierung um den Zellumfang.....	150
7.4.2	Gleiche Temperierbedingungen in den drei Testkammern	154
7.4.3	Maximal abbildbarer Temperaturunterschied zwischen den physischen Batteriezellen	157
7.4.4	Zwischenfazit zur Verifikation der Aktoren des thermischen Koppelsystems.....	159
7.5	Fazit zur aufgebauten gemischt physisch-virtuellen Validierungsumgebung für E ₃	159
8	Anwendung der Methode und der Validierungsumgebungen.....	161
8.1	Entwicklungsbeispiel: Validierung hinsichtlich Schnellladefähigkeit	161
8.1.1	E ₁ : empirisches Berechnungsmodell querumströmter Rohrbündel	164
8.1.2	E ₂ : 2D-CFD-Modell der Batteriezellkühlung	166
8.1.3	E ₄ : physisch-virtuelles Modell mit thermischen Batteriezellmodellen als Koppelsystem	173
8.1.4	E ₅ : physisches Modell	185
8.1.5	Evaluation der Modellbildung in den Entwicklungsgenerationen.....	187
8.2	Entwicklungsbeispiel: Validierung hinsichtlich thermisch transientem Verhalten	194
8.2.1	Modellierung des virtuellen SiD	196
8.2.2	Modellierung der Connected Systems – virtuelle Umgebung.....	201
8.2.3	Verifikation des Kühlmodells im virtuellen SiD.....	201
8.2.4	Verifikation der Temperaturinterpolation virtueller Batteriezellen	204
8.2.5	Integration der physischen Batteriezellen in die Koppelsysteme	210
8.2.6	Bewertung des temperatur- und SoC-abhängigen thermischen Verhaltens.....	212
8.2.7	Evaluation der Modellbildung in E ₃	220
8.3	Evaluation der Methode und der Validierungsumgebungen.....	222
8.3.1	Handlungsempfehlung für die Methodenanwendung	228
8.3.2	Handlungsempfehlung für die gemischt physisch-virtuell modellierte Validierungsumgebung zur Abbildung thermisch transientser Zustände.	230

8.3.3	Handlungsempfehlung für die gemischt physisch-virtuell modellierte Validierungsumgebung zur Abbildung thermisch stationärer Zustände	232
9	Zusammenfassung und Ausblick	235
9.1	Zusammenfassung	235
9.2	Ausblick	238
	Literaturverzeichnis	I
	Glossar	XIX
	Anhang A	XXI
	Reglereinstellungen in der Validierungsumgebung von E_3	XXI

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Validierung als Teil des erweiterten ZHO-Modells	6
Abbildung 2.2:	Entwicklungsgenerationen im Modell der PGE	8
Abbildung 2.3:	Design und Validierung im Produktentstehungsprozess	9
Abbildung 2.4:	Bedeutung der Eigenschaftsfrüherkennung	10
Abbildung 2.5:	IPEK-X-in-the-Loop-Framework am Beispiel der Fahrzeugentwicklung	12
Abbildung 2.6:	Beispielhafte Kombination von Modellausprägungen bei der Validierung einer E-Motor-Getriebe-Einheit	13
Abbildung 2.7:	Modularer Aufbau einer Fahrzeugbatterie	14
Abbildung 2.8:	Gängige Zellformate von Li-Ionen-Zellen	15
Abbildung 2.9:	Zusammenhang zwischen Betriebstemperatur, Thermomanagement und Lebensdauer von Batteriesystemen	17
Abbildung 2.10:	Schematische Darstellung CC-CV-Laden	18
Abbildung 2.11:	Veränderung der Temperatur einer Batteriezelle bei einer 5 C Entladung	20
Abbildung 2.12:	Belastung einer einzelnen zylindrischen Batteriezelle, welche radial mit einem konstanten Luftstrom umströmt und mit einem Stromprofil entladen und geladen wurde.	20
Abbildung 2.13	Schnittdarstellungen einer zylindrischen, kleinformatigen Batteriezelle	24
Abbildung 2.14	Zellmantelkühlung zylindrischer Batteriezellen mittels flüssigem Kühlmedium	26
Abbildung 2.15	Fluidführendes Kühlblech an der Mantelfläche zylindrischer Batteriezellen	27
Abbildung 2.16	Zellmantelkühlung mittels fluidführenden Kühlzylindern	28
Abbildung 2.17:	Computertools für ein ganzheitliches Batteriesystemdesign	31
Abbildung 2.18	Arbeitsflussdiagramm zur Modellierung des Thermomanagements eines Batteriezellverbundes	32
Abbildung 2.19:	Arbeitsflussdiagramm zur Minimierung des Temperaturunterschiedes in Batteriemodulen	34

Abbildung 2.20:	Arbeitsflussdiagramm zur Auslegung eines Thermomanagements eines Batteriesystems.....	35
Abbildung 2.21:	Batteriesystemdesignplattform.....	38
Abbildung 2.22:	Beispielhafte Kühldesigns für Batteriezellverbände aus prismatischen und zylindrischen Zellen	39
Abbildung 2.23:	Verschiedene Ersatzschaltbildmodelle die für Fahrzeugbatterien verwendet werden.....	42
Abbildung 2.24:	Schema des zwei Zonen-Modells zur Vorhersage der maximalen Zelltemperatur in einem luftgekühlten Batteriemodul	43
Abbildung 2.25:	(a) Zu modellierendes Submodul. (b) Thermisches Modell einer Batteriezelle.....	44
Abbildung 2.26:	Parameter der Studie zur Simulation eines luftgekühlten Batteriemoduls.....	45
Abbildung 2.27:	Temperaturverteilung für die untersuchten drei Strömungsführungen	46
Abbildung 2.28:	Batteriezellkühlung mit radialer Strömungsführung und freier Umströmung.....	47
Abbildung 2.29:	Schematische Darstellung des thermischen Widerstandsmodells für einen Hohlraum in Zellverbund	49
Abbildung 2.30:	Querschnittsansicht des untersuchten Batteriemoduls	50
Abbildung 2.31:	Prüfaufbau zur Untersuchung einer Luftkühlung mit zwei Einlasskanälen	51
Abbildung 2.32:	Prüfaufbau zur Untersuchung eines luftgekühlten Batteriemoduls im Windkanal	52
Abbildung 2.33:	Prüfaufbau zur Untersuchung einer Luftkühlung an einem Batteriemodul	53
Abbildung 2.34:	Thermische Ersatzbatteriezelle (Battery simulator).....	55
Abbildung 2.35:	Physischer Prüfaufbau einer Batteriezellkühlung unter Verwendung thermischer Ersatzbatteriezellen.....	56
Abbildung 2.36:	Thermische Ersatzzellen (Pouchzellen).....	56
Abbildung 2.37:	Prüfaufbau zur Aufprägung eines Temperaturgradienten auf eine prismatische Batteriezelle	57
Abbildung 2.38:	Oben: Untere Hälfte der Messeinrichtung. Unten: Struktur des implementierten Regelalgorithmus eines Temperatur-Wärmefluss-Sensors	59

Abbildung 2.39:	(a) Strom- und Spannungssignal für die EIS-Messung (b) beispielhafter Nyquistplot eines Impedanzspektrums.....	64
Abbildung 4.1:	Forschungsvorgehen der Arbeit in Anlehnung an die DRM.....	77
Abbildung 6.1:	Ansatz zur strukturierten Validierung einer Zellmantelkühlung zylindrischer Batteriezellen.....	92
Abbildung 6.2:	Input- und Outputgrößen für die Validierung des thermischen Verhaltens sowie die Synthese in E_1	95
Abbildung 6.3:	Beschreibung der Zellanordnung und deren Abstände zueinander als quorumströmtes Rohrbündel.....	96
Abbildung 6.4:	Aktivitäten mit der ersten Entwicklungsgeneration (E_1).....	96
Abbildung 6.5:	Input- und Outputgrößen für die Validierung des thermischen Verhaltens sowie die Synthese in E_2	98
Abbildung 6.6:	Aktivitäten mit der zweiten Entwicklungsgeneration (E_2).....	99
Abbildung 6.7:	Input- und Outputgrößen für die Validierung des thermischen Verhaltens sowie die Synthese in E_3	100
Abbildung 6.8:	Aktivitäten mit der dritten Entwicklungsgeneration (E_3).....	102
Abbildung 6.9:	Validierungsumgebung für Batteriemodule aus zylindrischen Batteriezellen mit homogener Zellmantelkühlung.....	104
Abbildung 6.10:	Thermische und elektrische Kopplung des virtuellen Batteriemodulmodells.....	105
Abbildung 6.11:	Einbindung der drei physischen Batteriezellen in die elektrische Verschaltung der virtuellen Batteriezellen und Einbindung in die Validierungsumgebung durch das elektrische Koppelsystem.....	108
Abbildung 6.12:	Prinzip des thermischen Koppelsystems.....	111
Abbildung 6.13:	Elektrische Verschaltung und geometrische Beschreibung eines Batteriemoduls.....	113
Abbildung 6.14:	Drei Randbedingungen zur Positionierung der drei physischen Batteriezellen in das zu untersuchende Batteriemodul.....	116
Abbildung 6.15:	Beispielhaft konstruierte Temperaturverteilung in einem Batteriemodul. Beschreibung des Interpolationsprinzips von Zustandsgrößen virtueller Batteriezellen.....	119
Abbildung 6.16:	Input- und Outputgrößen für die Validierung des thermischen Verhaltens sowie die Synthese in E_4	125
Abbildung 6.17:	Physisch-virtuelle Modellbildung zur Validierung des Kühl designs unter thermisch stationären Bedingungen während dem Laden.....	128

Abbildung 6.18:	Aktivitäten mit der vierten Entwicklungsgeneration (E_4).....	129
Abbildung 6.19:	Input- und Outputgrößen für die Validierung des thermischen Verhaltens in E_5	130
Abbildung 6.20:	Aktivitäten mit der fünften Entwicklungsgeneration (E_5).....	132
Abbildung 7.1:	Elektrische Integration der physischen Batteriezellen in die Validierungsumgebung über das elektrische Koppelsystem.	137
Abbildung 7.2:	Stromregelung für die parallelgeschalteten Batteriezellen	139
Abbildung 7.3:	Mit Wärmestromsensor und Thermoelement präparierte Batteriezelle.....	141
Abbildung 7.4:	Prüfaufbau als physischer Teil des thermischen Koppelsystems	145
Abbildung 7.5:	Schnittdarstellung einer einzelnen Testkammer mit Batteriezelle.....	148
Abbildung 7.6:	Regelung einer Heizung, die einer Testkammer vorgeschaltet ist.....	149
Abbildung 7.7:	Untersuchte Positionen des Wärmestromsensors auf dem Zellmantel.....	151
Abbildung 7.8:	Box-Plots zur Messung der Wärmestromdichte an unterschiedlichen Sensorpositionen über den Zellumfang in Testkammer 1.....	152
Abbildung 7.9:	Box-Plots zur Messung der Wärmestromdichte an Sensorposition 1 in Testkammer 1	153
Abbildung 7.10:	Box-Plots der gemessenen Wärmestromdichte an thermischen Batteriezellmodellen mit einer Heizleistung von 6,5 W.....	155
Abbildung 7.11:	Box-Plots der gemessenen Wärmestromdichte an einem thermischen Batteriezellmodell mit dem Wärmestromsensor B7 mit einer Heizleistung von 6,5 W.	156
Abbildung 7.12:	Relative Temperaturerhöhung der physischen Batteriezellen Phy 2 und Phy 3 gegenüber der konstant temperierten Batteriezelle Phy 1.....	158
Abbildung 8.1:	Initiale Varianten der Batteriezellanordnungen	162
Abbildung 8.2:	Einfluss der fünf untersuchten Haupteffekte auf die Zielgröße Wärmeabfuhr.....	165
Abbildung 8.3:	Modellbildung und Randbedingungen in der CFD-Simulation von querumströmten zylindrischen Batteriezellen.....	167

Abbildung 8.4:	Am Beispiel einer Zellanordnung sind zwei Modulvarianten übereinander gelegt.	168
Abbildung 8.5:	Linearisierter Temperaturanstieg der Batteriezellen in Strömungsrichtung	170
Abbildung 8.6:	Temperaturprofile für unterschiedliche Abstände zwischen den Batteriezellen und unterschiedlichen Fluidströmen	171
Abbildung 8.7:	Thermisches Modell einer zylindrischen Batteriezelle mit einem Mantelthermoelement.....	175
Abbildung 8.8:	Modulares physisches Modell der Batteriezellkühlung querumströmter zylindrischer Batteriezellen.....	178
Abbildung 8.9:	Temperaturmesspunkte im Prüfaufbau	180
Abbildung 8.10:	Temperaturverlauf der Zellen in Strömungsrichtung für zwei unterschiedliche Düsenkonfigurationen.....	183
Abbildung 8.11:	Einfluss des Abstandes der Seitenwände auf die Temperaturverteilung senkrecht zur Strömungsrichtung	184
Abbildung 8.12:	Präparierte Batteriezelle für den Einsatz in E_5	186
Abbildung 8.13:	Gemittelte Temperaturprofile von realen Batteriezellen und thermischen Batteriezellmodellen.....	191
Abbildung 8.14:	Draufsicht auf die betrachtete Zellanordnung (8P12S).....	195
Abbildung 8.15:	Vereinfachter Aufbau des virtuell modellierten Batteriemoduls aus 96 Batteriezellen.....	196
Abbildung 8.16:	Ausgewählter Ansatz zur Abbildung strömungstechnischer Vorgänge bei der Quenumströmung zylindrischer Batteriezellen	198
Abbildung 8.17:	Verlauf der Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Batteriezellen und der Kühlflüssigkeit entlang der Strömung.....	201
Abbildung 8.18:	Abweichung der modellierten Batteriezellkühlung im Vergleich zur CFD-Simulation	203
Abbildung 8.19:	Interpolationsbedingte Abweichungen der Zellmanteltemperaturen im modellierten Batteriemoduls entlang der Strömungsrichtung bei konstanter Wärmeleistung	208
Abbildung 8.20:	Interpolationsbedingte Abweichungen der Zellmanteltemperaturen im modellierten Batteriemodul bei temperaturabhängiger Wärmeleistung	209
Abbildung 8.21:	Streubreite der Wärmestrombilanz und der Zellmanteltemperatur der drei Zellen.....	211

Abbildung 8.22:	Zellmanteltemperaturen der drei physischen Batteriezellen bei einer Fluidtemperatur von 15 °C	213
Abbildung 8.23:	Zellmanteltemperaturen der drei physischen Batteriezellen bei einer Fluidtemperatur von 30 °C	215
Abbildung 8.24:	Zellmanteltemperaturen der drei physischen Batteriezellen bei einer Fluidtemperatur von 35 °C	216
Abbildung 8.25:	Streubreite der Zellmanteltemperatur und der Abweichung der Wärmestromregelung der drei physischen Batteriezellen bei einer Fluidtemperatur von 15 °C	218

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5.1:	Kriterien zur Bewertung von Validierungsaktivitäten zur Untersuchung des thermischen Verhaltens von Batteriemodulen	81
Tabelle 5.2:	Relative Bewertung der in Kapitel 2.5.1 beschriebenen Ausprägungen virtueller Modelle	84
Tabelle 5.3:	Relative Bewertung der in Kapitel 2.5.2 beschriebenen Ausprägungen physischer Modelle	85
Tabelle 5.4:	Bewertung der in Kapitel 2.5.3 beschriebenen Ausprägungen gemischt physisch-virtueller Modelle mit thermischen Ersatzbatteriezellmodellen	86
Tabelle 5.5:	Bewertung der in Kapitel 2.5.3 beschriebenen Ausprägungen gemischt physisch-virtueller Modelle mit einzelnen physischen Batteriezellen	88
Tabelle 6.1:	Gegenüberstellung der fünf Entwicklungsgenerationen $E_1 - E_5$	94
Tabelle 8.1:	Erwärmung der Kühlflüssigkeit beim Durchströmen des Moduls in Abhängigkeit von Modulbreite und Volumenstrom.....	169
Tabelle 8.2:	Effekte der Abstands- und Volumenstromänderung auf die mittlere Zelltemperatur für verschiedene Zellanordnungen.....	172
Tabelle 8.3:	Effekt unterschiedlicher Modulkonfigurationen auf die mittlere Zelltemperatur	172
Tabelle 8.4:	Anzahl der Batteriezellmodelle, kategorisiert nach der Abweichung des Widerstandes zum Sollwert von $0,2 \Omega$	179
Tabelle 8.5:	Bewertung der Modellbildung im ersten Entwicklungsbeispiel zur Validierung des thermisch stationären Verhaltens eines Batteriemoduls	224
Tabelle 8.6:	Bewertung der Modellbildung in Entwicklungsgeneration E_3 im zweiten Entwicklungsbeispiel zur Validierung des thermisch transienten Verhaltens eines Batteriemoduls	227

Abkürzungsverzeichnis

ARC	Accelerating Rate Calorimetry
BEV	Battery Electric Vehicle – Batterieelektrisches Fahrzeug
BMS	Batteriemanagementsystem
CAD	Computer-Aided Design
CC	Constant Current – konstanter Strom
CFD	Computational Fluid Dynamics
C-Rate	Quotient aus Strom und Nennkapazität der Batteriezelle
CV	Constant Voltage – konstante Spannung
DOE	Design of Experiments
DRM	Design Research Methodology
EIS	Elektrochemische Impedanzspektroskopie
E_j	Entwicklungsgeneration j einer Produktgeneration
EV	Electric Vehicle – Elektrofahrzeug
HEV	Hybrid Electric Vehicle – Hybridfahrzeug
HPPC	Hybrid Power Pulse Characterization
IHC	Isothermal Heat Conduction Calorimetry
LCO	Lithium-Cobalt-Oxid
Li	Lithium
NCA	Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid

OCV	Open Circuit Voltage – Leerlaufspannung
PCM	Phase Change Material
PGE	Produktgenerationsentwicklung
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle – Plug-in Hybridfahrzeug
SiD	System-in-Development
SoC	State of Charge – Ladezustand einer Batteriezelle in Prozent
SoH	State of Health – Alterungszustand der Batteriezelle
XiL	X-in-the-Loop

1 Einleitung

Im Zuge der Elektrifizierung von Fahrzeugantriebssystemen ergeben sich neue Herausforderungen in der Automobilbranche, unter anderem in der Entwicklung von Batteriesystemen. Als zentrales Element des Antriebssystems beeinflusst das Batteriesystem die charakteristischen Merkmale wie Reichweite und Performance des Fahrzeugs. Außerdem nimmt das Batteriesystem bis zu 40 % des Wertschöpfungsanteils ein (Nationale Plattform Elektromobilität (NPE), 2014, S. 20).

Eine der zentralen Anforderungen an ein Batteriesystem in elektrifizierten Fahrzeugen, ist die Temperierung, genauer die Kühlung der Batteriezellen (Korthauer, 2013, S. 165–167). Dem liegt zugrunde, dass die eingesetzten Lithium-Ionen-Batteriezellen (im Folgenden als Li-Ionen-Zellen bezeichnet) ein hochgradig temperaturabhängiges Verhalten aufweisen (Erhard, 2017, S. 37). Die Temperierung der Batteriezellen beeinflusst unter anderem die Leistungsfähigkeit und die Kapazität sowie die temperaturabhängige Alterung (Kapazitäts- und Leistungsverlust) des Batteriesystems (Korthauer, 2013, S. 165–167).

Durch den hohen Einfluss auf die Funktionalität des Batteriesystems bedarf es einer frühzeitigen und entwicklungsbegleitenden Validierung des Thermomanagements, um Anforderungen kontinuierlich abzusichern und durch den Erkenntnisgewinn das Design der Batteriezellkühlung¹ iterativ anzupassen. Diese Aktivitäten stellen eine Ausprägung des Frontloadings dar, Probleme früh zu identifizieren und zu lösen, um Ressourcen einzusparen und Entwicklungszeiten zu reduzieren (Thomke & Fujimoto, 2000, S. 128). Die hierfür erforderlichen Validierungsumgebungen² entlang des Entwicklungsprozesses müssen dem jeweiligen, zum Zeitpunkt vorliegenden Reifegrad der Batteriezellkühlung entsprechen und eine Bewertung der Anforderungserfüllung auf Basis der gegebenen Datenlage erlauben.

Für die Validierung des Thermomanagements von Batteriesystemen kommen in der frühen Phase³ der Entwicklung meist Simulationsmethoden zum Einsatz. Vielfältige Modellierungsansätze zur Abbildung des thermischen Verhaltens von Batteriezellen sind im Stand der Technik und Forschung beschrieben. Diese unterscheiden sich in

¹ Definition „Batteriezellkühlung“ siehe Glossar

² Definition „Validierungsumgebung“ siehe Glossar

³ Definition „frühe Phase“ siehe Glossar

der Modellqualität, im Modellierungsaufwand und dem Bedarf an Daten zur Parametrisierung des Batteriezellmodells. Entsprechende Daten aus Charakterisierungsmessungen liegen dem Entwickler in der frühen Phase nicht immer vor und schränken somit die Möglichkeiten in der virtuellen Modellbildung ein. Physische Prototypen von Batteriemodulen oder -systemen mit realen Batteriezellen kommen aus Kostengründen und aufgrund hoher Sicherheitsanforderungen im Versuch meist erst zur finalen Absicherung der Batteriezellkühlung oder zur Modellparametrisierung in vereinfachter Form zum Einsatz.

Diese Arbeit nutzt Ansätze aus dem Stand der Forschung zur Entwicklung zweier gemischt physisch-virtueller Validierungsumgebungen, um Batteriezellkühlungen auf Modulebene entwicklungsbegleitend zu validieren. Der Einsatz dieser Validierungsumgebungen, zusammen mit virtuellen und physischen Validierungsansätzen nach dem Stand der Technik, werden in Entwicklungsgenerationen des zu entwickelnden Batteriemoduls strukturiert. Ziel ist dabei, durch entsprechende Modellbildung in den Entwicklungsgenerationen einen Beitrag zum Frontloading zu leisten.

Da das Design einer Batteriezellkühlung mit dem Zellformat und dessen Eigenschaft gekoppelt ist, bedarf es für die Entwicklung der Validierungsumgebungen einer entsprechenden Fokussierung (Hettesheimer et al., 2017, S. 20). Diese Arbeit widmet sich dem kleinformatigen, zylindrischen Zellformat. Speziell die Größe 18650 (18 mm Durchmesser, 65 mm Höhe) wird aufgrund seiner Anwendung in Consumerprodukten in großer Stückzahl am Markt angeboten (Warner, 2015, S. 84). Der Fokus der Kühlung liegt auf der konvektiven Zellmantelkühlung, wie sie in der Ausführung als Luftkühlung umfassend im Stand der Forschung beschrieben ist.

Diese Arbeit gliedert sich in neun Kapitel und ist wie folgt strukturiert:

Nach der Einleitung in diesem Kapitel sind in Kapitel 2 der relevante Stand der Forschung zur Validierung von Batteriezellkühlungen zylindrischer Zellformate sowie die notwendigen Grundlagen beschrieben. Aus dem Fazit zum Stand der Forschung wird die Forschungslücke und daraus die Zielsetzung der Arbeit in Kapitel 3 formuliert. In Kapitel 4 sind die Forschungsfragen und das Forschungsvorgehen beschrieben. Zur Schärfung der Forschungslücke und des Forschungsbedarfes werden in Kapitel 5 Modellausprägungen zur Validierung von Batteriezellkühlungen nach dem Stand der Forschung (physisch, virtuell und gemischt physisch-virtuell) hinsichtlich der Unterstützung des Frontloadings in der frühen Entwicklungsphase bewertet und die dafür notwendigen Kriterien erarbeitet. In Kapitel 6 wird die entwickelte Methode zur strukturierten Validierung von Entwicklungsgenerationen beschrieben. Die darin integrierten gemischt physisch-virtuellen Validierungsumgebungen wurden für das zylindrische Zellformat 18650 mit konvektiver Zellmantelkühlung umgesetzt. Der

Aufbau einer der beiden Validierungsumgebungen und dessen Verifikation sind in Kapitel 7 beschrieben. In Kapitel 8 kommt die entwickelte Methode mit den darin enthaltenen Validierungsumgebungen in zwei Entwicklungsbeispielen zur Anwendung. Anhand dieser wird evaluiert, ob die Zielsetzung der Arbeit erfüllt und die Forschungsfragen beantwortet wurden. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Kapitel 9 ab.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

In diesem Kapitel werden sowohl die notwendigen Grundlagen für diese Arbeit als auch der relevante Stand der Forschung beschrieben.

Systemunabhängig wird die Validierung als Entwicklungsaktivität im Kontext des Produktentstehungsprozesses beschrieben. Für diese Arbeit relevante Begriffe werden eingeführt sowie der IPEK-X-in-the-Loop-(IPEK-XiL)-Ansatz erläutert. Kapitel 2.2 geht auf den grundsätzlichen Aufbau eines Batteriesystem und speziell die Rolle des Thermomanagements ein. Entsprechend wird das temperaturabhängige Verhalten von Li-Ionen-Zellen beschrieben und Ansätze zur Kühlung kleinformatiger, zylindrischer Batteriezellen nach dem Stand der Technik und der Forschung aufgezeigt (Kapitel 2.3). In Kapitel 2.4 sind Vorgehensmodelle zum Design und der Validierung von Thermomanagementsystemen für Batteriesysteme beschrieben. Entsprechende Ansätze für die virtuelle, physische und gemischt physisch-virtuelle Modellbildung zur Validierung von Batteriezellkühlungen zylindrischer Zellformate auf Modul- oder Systemebene nach dem Stand der Forschung, sind in Kapitel 2.5 aufgeführt. Abschließend werden im Fazit die Forschungslücken und der Forschungsbedarf abgeleitet.

2.1 Validierung in der Produktentstehung

In diesem Kapitel wird die Validierung in den Kontext der Produktentstehung gesetzt. Beginnend mit dem erweiterten ZHO-Modell werden grundsätzliche Aktivitäten im Produktentstehungsprozess dargestellt. Die Validierung von Entwicklungsgenerationen wird im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung im darauffolgenden Unterkapitel beschrieben. Anschließend werden die Begriffe Validierung und Verifikation im Kontext der Produktentstehung eingeordnet und die frühzeitige Validierung als Methode des Frontloadings beschrieben. Entsprechend des Schwerpunktes dieser Arbeit folgt die Beschreibung des IPEK-XiL-Ansatzes zur entwicklungsbegleitenden Validierung. Abschließend wird ein Zwischenfazit gezogen.

2.1.1 Das erweiterte ZHO-Modell

Das erweiterte ZHO-Modell nach Albers und Braun (2011) zur Beschreibung der Produktentwicklung beruht auf dem ZHO-Modell von Ropohl (1975) (Zielsystem, Handlungssystem, Objektsystem).

Das Zielsystem beinhaltet Anforderungen und deren Wechselwirkungen in Form von geplanten Eigenschaften und Randbedingungen des Produkts. Das initiale Zielsystem wird zu Beginn der Entwicklung definiert und kontinuierlich im Laufe der Entwicklung konkretisiert, angepasst und erweitert. Alle Teillösungen in Form von Dokumenten oder andern Artefakten, die im Produktentstehungsprozess anfallen, inkl. des endgültigen Produkts sowie dessen Produktionsanlage etc. sind dem Objektsystem zugeordnet. Es ist vollständig, sobald der angestrebte Zustand des Produktes erreicht ist. Das Handlungssystem ist ein sozio-technisches System, welches beide genannten Systeme, Ziel- und Objektsystem, erstellt. Diese sind ausschließlich über das Handlungssystem miteinander verbunden. Es enthält alle notwendigen Ressourcen, die für die Realisierung der Produktentstehung notwendig sind: Entwickler, Budget, Ausstattung, Aktivitäten, Methoden und Prozesse. (Albers & Braun, 2011)

Das erweiterte ZHO-Modell beschreibt den kontinuierlichen Wechsel von Kreation und Validierung als geschlossenen Kreislauf. Die Validierung besteht hierbei aus der Analyse des Objektsystems zur Erweiterung der Wissensbasis als Teil des Handlungssystems und der daraus abgeleiteten Synthese eines angepassten Zielsystems (vgl. Abbildung 2.1). Dieser Syntheseschritt kann als Verfeinerung, Widerruf, Erweiterung oder Ergänzung eines oder mehrerer bestehender Ziele ausgeprägt sein. (Albers, Behrendt, Schroeter, Ott & Klingler, 2013)

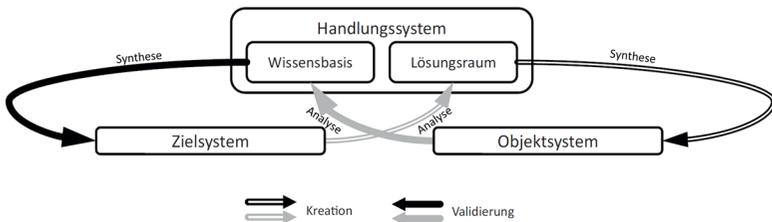


Abbildung 2.1: Validierung als Teil des erweiterten ZHO-Modells (Albers et al., 2013)

Nach Albers (2010) stellt die Validierung die zentrale Aktivität im Produktentstehungsprozess dar. Durch die Validierung erfolgt ein kontinuierlicher und systematischer Abgleich zwischen dem aktuellen Entwicklungsstand im Objektsystem und dem Sollzustand im aktuellen Zielsystem (Albers, 2010). Eine der Herausforderungen besteht in der methodischen Unterstützung des Validierungsprozesses, da dieser meist individuell ist und auf den Erfahrungen des Ingenieurs basiert (Albers, Behrendt, Klingler & Matros, 2016, S. 544; Utting, Pretschner & Legear, 2006).

2.1.2 Entwicklungsgenerationen im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung

Das Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung nach ALBERS (Albers, Bursac & Wintergerst, 2015) beschreibt die Entwicklung eines neuen technischen Produkts, welches durch die Anpassung von Teilsystemen als Übernahmevariation und durch die Neuentwicklung von Teilsystemen beschrieben ist. Neu entwickelte technische Produktanteile (Komponenten, Baugruppen, etc.) können durch Gestaltvariation sowie durch Variation von Lösungsprinzipien (Prinzipvariation) realisiert werden. Eine neue Produktgeneration basiert stets auf Referenzprodukten, welche die grundsätzliche Struktur des Produkts beschreiben. Referenzprodukte können Vorgänger- oder Wettbewerbsprodukte sein, welche die Grundlage für die Entwicklung einer neuen Produktgeneration bilden. (Albers, Bursac et al., 2015)

Nach Albers, Haug, Heitger, Fahl und Hirschter (2019) wird die Entwicklung einer Produktgeneration G_n durch sogenannte Entwicklungsgenerationen $E_{n,j}$ strukturiert. Auch Entwicklungsgenerationen basieren auf mindestens einem Referenzprodukt und werden mit den gleichen Variationsarten der PGE beschrieben. Der Reifegrad einer sich in der Entwicklung befindenden Produktgeneration G_n kann durch die aktuelle Entwicklungsgeneration $E_{n,j}$ erfasst werden (Albers et al., 2019). Diese kann in Form eines physischen oder digitalen Prototypen sowie über Dokumente realisiert sein (Albers, Haug et al., 2018).

Durch die initiale Zielsystembildung der Produktgeneration G_n wird der Soll-Reifegrad als auch die zeitliche Dauer einer Entwicklungsgenerationen $E_{n,j}$ bestimmt. Somit wird aus Elementen des Zielsystems der G_n das Zielsystem der Entwicklungsgeneration $E_{n,j}$ definiert. Eine umgesetzte Entwicklungsgeneration wird abschließend durch Validierungsaktivitäten hinsichtlich seines Zielsystems bewertet und daraus entsprechende Maßnahmen abgeleitet. Zudem ist der Erkenntnis- und Wissenstransfer für folgende Entwicklungsgenerationen sicherzustellen. Die beschriebene Struktur gilt sowohl auf Gesamtsystemebene als auch für die Entwicklung technischer Teilsysteme. (Albers et al., 2019) In Abbildung 2.2 ist die Struktur des Prozesses einer Entwicklungsgeneration dargestellt.

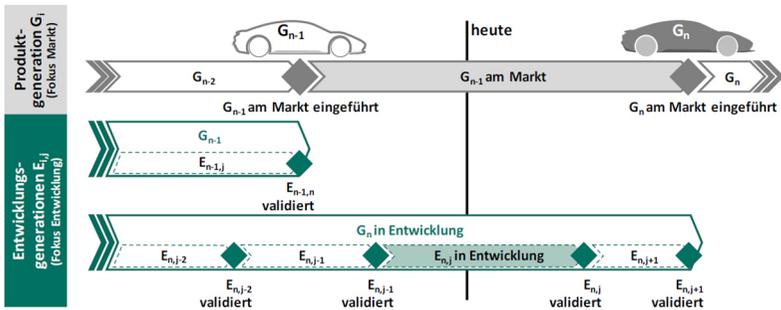


Abbildung 2.2: Entwicklungsgenerationen im Modell der PGE (Albers et al., 2019)

2.1.3 Validierung und Verifikation

Die Validierungsaktivität innerhalb eines Entwicklungszyklus wurde bereits über das erweiterte ZHO-Modell in Kapitel 2.1.1 beschrieben. In diesem Kapitel werden die Begriffe Verifikation sowie Validierung definiert und die Validierung als Entwicklungsaktivität in den Produktentstehungsprozess eingeordnet.

Im Rahmen der Validierung wird die folgende Unterscheidung getroffen, die auf zwei Definitionen nach der VDI-Richtlinie 2206 basiert:

Unter Verifikation ist „[...] die Überprüfung zu verstehen, ob eine Realisierung (z. B. ein Software-Programm) mit der Spezifikation (in diesem Fall mit der Algorithmenbeschreibung) übereinstimmt.“ (VDI 2206)

Unter Validierung ist „[...] die Prüfung zu verstehen, ob das Produkt für seinen Einsatzzweck geeignet ist bzw. den gewünschten Wert erzielt. Hier geht die Erwartungshaltung des Fachexperten und des Anwenders ein.“ (VDI 2206)

Werden die Definitionen von Verifikation und Validierung auf die Systeme der Produktentstehung, Zielsystem, Handlungssystem und Objektsystem (Albers & Braun, 2011) übertragen, stellt die Verifikation den reinen Abgleich zwischen Ziel- und Objektsystem dar. Dagegen werden bei der Validierung sowohl Objekt- also auch Zielsystem dem Bedarf und den zukünftigen Anwendungsfällen gegenübergestellt (Albers et al., 2016, S. 544). Hierbei fließen die Erwartung und Wahrnehmung der

Stakeholder¹ in die Validierung ein (Albers, Matros, Behrendt & Jetzinger, 2015, S. 76–77). Diese teilt sich nach Albers und Matros et al. (2015) in drei Aktivitäten auf: Analyse und Bewertung, Objektivierung sowie Verifikation. Abbildung 2.3 stellt die beiden Entwicklungsaktivitäten *Design* und *Validierung* mit entgegengesetzter Ausrichtung dar.

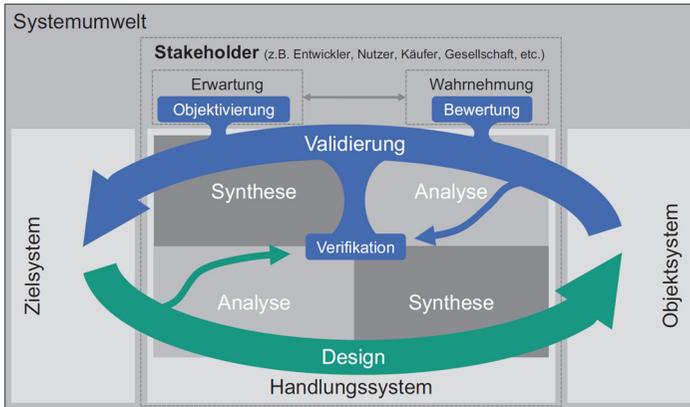


Abbildung 2.3: Design und Validierung im Produktentstehungsprozess (Albers et al., 2016, S. 543)

2.1.4 Frontloading in der Produktentstehung

Frontloading beschreibt nach Thomke und Fujimoto (2000) das frühzeitige Identifizieren und Lösen von Problemen im Produktentstehungsprozess. Dadurch können Entwicklungszeiten verkürzt, Kosten reduziert und notwendige Ressourcen verringert werden (Thomke & Fujimoto, 2000, S. 128). Lindemann nutzt äquivalent den Begriff der „Eigenschaftsfrüherkennung“, welche eine Erhöhung des Kenntnisstands über die Produkteigenschaften in der frühen Entwicklungsphase darstellt (Lindemann, 2009, S. 158–159). Diese zeitliche Verschiebung der Lernkurve empfiehlt sich, da in den frühen Phasen mit relativ geringen Kosten noch hohe Änderungsmöglichkeiten bestehen (Abbildung 2.4). Der Änderungsaufwand kann leicht durch die "Zehnerregel" (Rule of Ten) beschrieben werden (Bertsche & Lechner,

¹ Auch Anspruchsgruppe genannt: Personen, die ein Interesse am Ergebnis der Entwicklung haben.

2004; Ehrlenspiel, 2009). Nach dieser erhöhen sich die Änderungskosten von einer Entwicklungsphase zur nächsten um den Faktor 10.

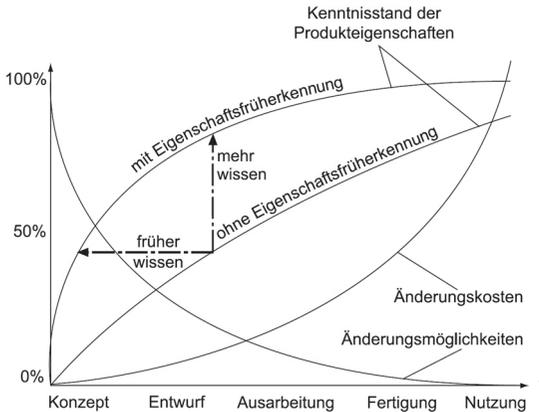


Abbildung 2.4: Bedeutung der Eigenschaftsfrüherkennung (Lindemann, 2009, S. 159)

Ein Ansatz zur Unterstützung des Frontloadings können frühzeitige und kontinuierliche Validierungsaktivitäten im Produktentstehungsprozess sein, um aufwandsminimal auf negative Validierungsergebnisse reagieren zu können (Albers et al., 2016, S. 543). Hierbei ist die Validierung nicht als abschließende, sondern prozessbegleitende Aktivität zu verstehen (Albers, Matros et al., 2015, S. 77–78). Diese trägt zum Wissensgewinn und somit zur erfolgreichen Produktentwicklung bei (Albers et al., 2016, S. 541; Freudenmann, 2014, S. 30). So wird entsprechendes Wissen für die Steuerung, Entscheidungsfindung und die Erarbeitung neuer Lösungen benötigt (Inkermann, Kleemann & Vietor, 2017).

Albers und Matros et al. (2015) konkretisieren diese Vorgehensweise im Pull-Prinzip der Validierung. Darin werden Validierungsaktivitäten eine koordinierende Funktion im Produktentstehungsprozess zugeschrieben. Im Sinne eines „atmenden“ Prozesses werden Produkthanforderungen des Zielsystems sowie Designräume zur Anforderungserfüllung durch Validierungsaktivitäten kontinuierlich erweitert und wieder eingeschränkt. Dies erfordert eine parallele Entwicklung von Produkt und Validierungsumgebung. Entsprechend muss schon bei der Synthese, z. B. einer neuen Entwicklungsgeneration, deren Validierung geplant werden. (Albers, Matros et al., 2015, S. 79)

2.1.5 Der IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz

Zur Unterstützung des Frontloading durch Validierungsaktivitäten in der frühen Phase können neben rein virtuellen Ansätzen in Form von Berechnungs- und Simulationsmodellen (Thomke & Fujimoto, 2000, S. 136) auch Prüfstände zum Einsatz kommen, die nicht real vorhandene Komponenten simulieren (Paulweber & Lebert, 2014, S. 4). Paulweber und Lebert (2014) sprechen dabei von sogenannten „X in the Loop“- oder „XiL“-Prüfständen, welche reale Komponenten auf dem Prüfstand mit virtuellen Komponenten einer Echtzeitsimulation miteinander kombinieren (Bier, Buch, Kluijn & Beidl, 2012, S. 241; Paulweber & Lebert, 2014, S. 5). Äquivalent zu dieser Definition wird auch der Begriff Hardware-in-the-Loop (HiL) verwendet, wobei der HiL-Ansatz ursprünglich für die Erprobung von elektronischen Steuergeräten entwickelt wurde (Brendecke, 2001, S. 1–2; Paulweber & Lebert, 2014, S. 53).

Der IPEK-XiL-Ansatz nach Albers und Düser (2010) findet im Kontext der Fahrzeugentwicklung primär Anwendung in der Validierung mechanischer und mechatronischer Teilsysteme (vgl. Albers & Düser, 2010; Albers, Ott, Behrendt, Merkel & Geier, 2010; Albers et al., 2016, S. 560–567; Geier et al., 2009). Auch dieser XiL-Ansatz basiert auf dem Hardware-in-the-Loop- Ansatz (HiL-Ansatz), unterscheidet sich aber dahingehend, dass die zu validierende Einheit „X“, im Folgenden *System-in-Development* (SiD) genannt, nicht nur in Hardwareform sondern auch als Simulationsmodell vorliegen kann (Albers & Düser, 2010; Albers et al., 2016, S. 560–561). Damit umfasst der IPEK-XiL-Ansatz neben dem HiL auch den Software-in-the-Loop (SiL) und den Model-in-the-Loop-Ansatz (MiL-Ansatz). Entgegen dieser drei Ansätze aus der Steuergeräteentwicklung beschränkt sich der IPEK-XiL-Ansatz nicht auf die Kopplung physischer² und virtueller Modelle in Form von Echtzeitsimulationen. Auch die Validierung in der rein physischen oder der rein virtuellen Domäne unter Berücksichtigung der gesamtsystemischen Wechselwirkungen, werden im IPEK-X-in-the-Loop-Framework abgebildet. (Albers et al., 2016, S. 559)

Dies ermöglicht die Validierung eines SiD in unterschiedlichen Reifegraden entlang des Produktentstehungsprozesses, unter Einbindung in das Gesamtsystem, der Umwelt und ggf. weiterer interagierender Systeme, welche als *Connected Systems* zusammengefasst werden (Albers et al., 2016, S. 560–561). Das SiD kann zudem in unterschiedlichen Systemebenen vorliegen, beginnend von der Untersuchung von Wirkflächenpaaren (siehe *WSP* in Abbildung 2.5) über Teilsystem- bis hin zu Gesamtsystemuntersuchungen (Albers et al., 2016, S. 560). In Abbildung 2.5 sind

² In der Literatur wird in Zusammenhang mit HiL- und XiL-Prüfständen auch von „realen“ Komponenten und Systemen gesprochen.

die unterschiedlichen Systemebenen am Beispiel der Fahrzeugentwicklung im IPEK-XiL-Framework dargestellt.

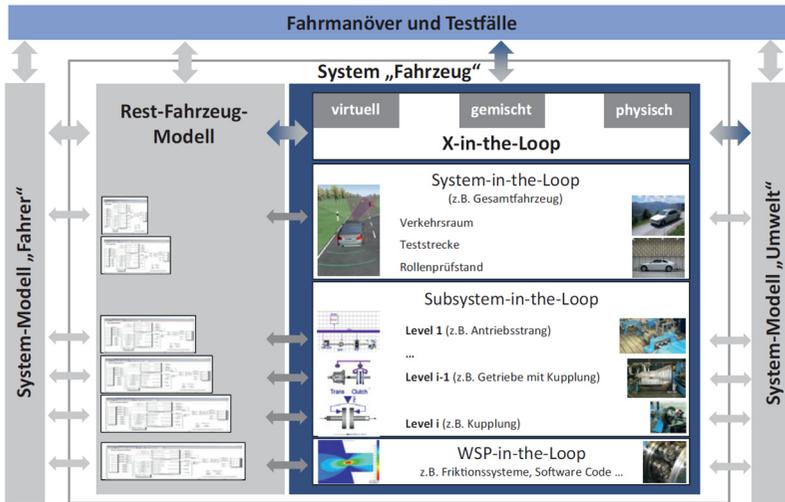


Abbildung 2.5: IPEK-X-in-the-Loop-Framework am Beispiel der Fahrzeugentwicklung (Albers et al., 2016, S. 560)

Zur effektiven und effizienten Validierung müssen Entscheidungen getroffen werden, die ein umfangreiches Systemverständnis und eine präzise Modellbildung erfordern. Darunter fallen unter anderem, welche Testfälle³ zielführend sind und wie die Validierungsumgebung für das spezifische Validierungsziel gestaltet/modelliert sein muss. (Albers et al., 2016, S. 543)

So können physische und virtuelle Modelle der *Connected Systems* und des SiD in verschiedenen Ausprägungen miteinander kombiniert werden. Beispielhaft ist in Abbildung 2.6 eine Validierungsumgebung für ein physisch vorliegendes SiD einer E-Motor-Getriebe-Einheit eines batterieelektrischen Fahrzeuges (BEV) dargestellt.

³ Definition „Testfall“ siehe Glossar

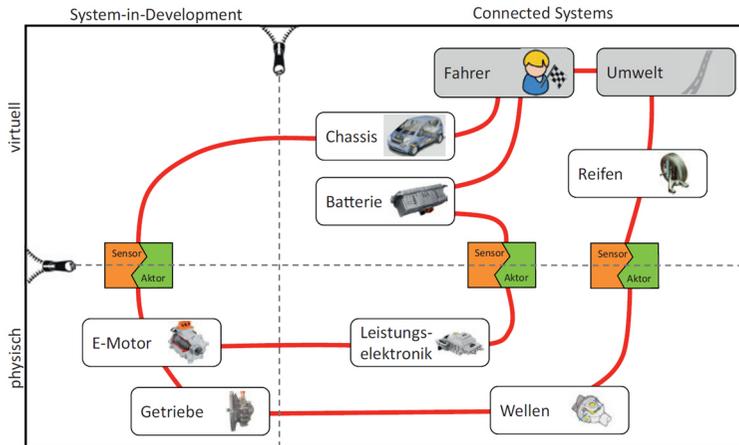


Abbildung 2.6: Beispielhafte Kombination von Modellausprägungen bei der Validierung einer E-Motor-Getriebe-Einheit (Albers et al., 2016, S. 562)

Physische und virtuelle Domäne sind über sogenannte Sensor-Aktor-Systeme oder *Koppelsysteme*⁴, miteinander verbunden (Albers, Pinner, Yan, Hettel & Behrendt, 2016, S. 113). Stier (2015) schrieb den Sensor- und Aktoreigenschaften hinsichtlich der Machbarkeit dynamischer Versuche am Antriebssystem im Closed-Loop⁵ eine entscheidende Rolle zu. Gleiches gilt für die Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf das physische Gesamtsystem (Stier, 2015, S. 53–54).

2.1.6 Zwischenfazit

Aus dem Stand der Forschung geht hervor, dass die Validierung als Aktivität zur Erweiterung der Wissensbasis eine entscheidende Rolle in der Produktentwicklung einnimmt, da der dadurch erreichte Wissenszuwachs in Syntheseaktivitäten eingeht. Um einen Beitrag zum Frontloading zu leisten, sollte die Validierung frühzeitig und kontinuierlich im Produktentstehungsprozess über die verschiedenen virtuellen oder physischen Entwicklungsgenerationen erfolgen. Der IPEK-XiL-Ansatz bietet die Möglichkeit, ein SiD unter gesamtsystemischen Wechselwirkungen sowohl auf

⁴ Definition „Koppelsystem“ siehe Glossar

⁵ Versuche mit einem geschlossenen Regelkreis. Der Aktor wird mithilfe der Sensordaten geregelt.

unterschiedlichen Systemebenen als auch in verschiedenen Produktreifegraden zu validieren. Dieser Ansatz bietet sich somit zur Unterstützung des Frontloadings an.

2.2 Batteriesysteme in Elektromobilitätsanwendungen

In diesem Kapitel wird zunächst der Aufbau von Batteriesystemen in Elektromobilitätsanwendungen und deren unterschiedliche Ausprägungen beschrieben. Von den beschriebenen Teilsystemen wird detailliert auf das Thermomanagement eingegangen. Dessen Rolle soll durch die Erläuterung des temperaturabhängigen Verhaltens von Li-Ionen-Zellen geklärt werden. Das Kapitel schließt mit einem Zwischenfazit.

2.2.1 Aufbau von Batteriesystemen in Elektro- und Hybridfahrzeugen

Beim Aufbau von Batteriesystemen kann zwischen dem Blockaufbau und dem modularen Aufbau unterschieden werden. Ersterer ist primär für kleine und einfach aufgebaute Batteriesysteme geeignet. (Korthauer, 2013, S. 96)

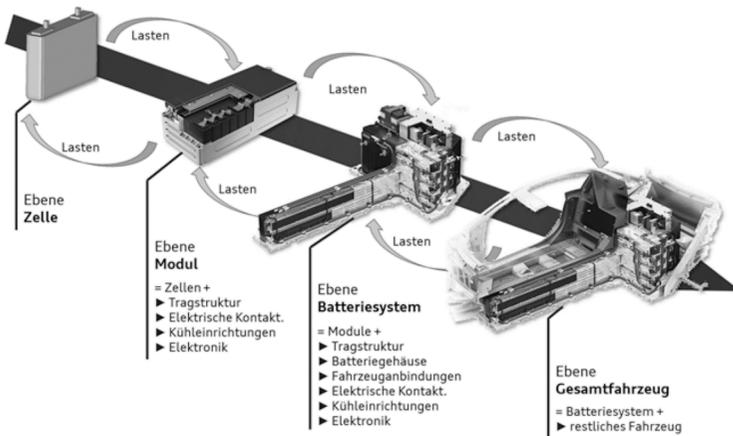


Abbildung 2.7: Modularer Aufbau einer Fahrzeugbatterie. Hier beispielhaft mit prismatischen Batteriezellen (Dörnhöfer, 2019, S. 43)

Hingegen sind größere Traktionsbatterien in BEV oder in Plugin-Hybriden (PHEV) meist modular aufgebaut (vgl. Abbildung 2.7) (Dörnhöfer, 2019, S. 42; Korthauer, 2013, S. 96). Hierbei wird zwischen den drei Ebenen: Zelle, Modul und Batteriesystem unterschieden, die im Folgenden genauer beschrieben sind.

Batteriezelle: Die in heutigen Mobilitätsanwendungen verbauten Batteriezellen können in die drei Formate *prismatisch*, *zylindrisch* und *Pouch* unterteilt werden (Hettesheimer et al., 2017, S. 3; Warner, 2015, S. 84). Die beiden Letztgenannten gehören aufgrund der geometrischen Abmessungen und dem dadurch hohen Energieinhalt zu den sogenannten großformatigen Batteriezellen. Vergleicht man diese in der Automobilindustrie gängigen Formate mit den kleinformatigen zylindrischen Batteriezellen, unterscheiden sich die Energieinhalte um ca. eine Größenordnung. Nach aktuellem Stand sind die beiden Zellformate 18650 (18 mm Durchmesser bei 65 mm Höhe) und 21700 (21 mm Durchmesser bei 70 mm Höhe) die relevantesten zylindrischen Zellformate für die Elektromobilität. (Hettesheimer et al., 2017, S. 6–10)

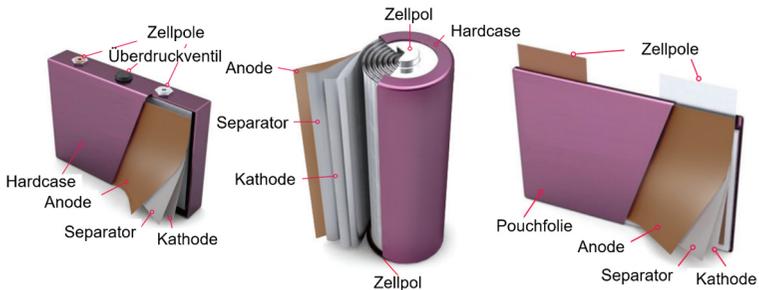


Abbildung 2.8: Gängige Zellformate⁶ von Li-Ionen-Zellen von links nach rechts: prismatische Zelle, zylindrische Zelle, Pouchzelle (in Anlehnung an Axion, 2012, S. 6–7)

Zylindrische und prismatische Zellformate besitzen ein festes Gehäuse (Hardcase), welches aus Aluminium oder Edelstahl besteht. Bei Pouchzellen wird der Zellstapel hingegen in eine Aluminium-Verbundfolie, dem sogenannte Pouch, eingeschweißt. (Korthauer, 2013, S. 112) Unabhängig vom geometrischen Format wird nach Kort-

⁶ Die dargestellte Größe der drei Zellformate wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit angepasst.

hauer (2013) über das Verhältnis der maximalen Leistung P und dem Energieinhalt E zwischen Hochenergiezellen ($\frac{P}{E} < 10$) und Hochleistungszellen ($\frac{P}{E} > 10$) unterschieden. Beide Kategorien sind aufgrund der unterschiedlichen Leistungsanforderungen an Batteriesysteme für Elektromobilitätsanwendungen bspw. für BEV oder für Hybridelektrische Fahrzeuge (HEV) von Interesse. (Korthauer, 2013, S. 388–389)

Batterieminodul: Ein Batteriemodul besteht aus mehreren identischen Batteriezellen, die elektrisch kontaktiert sind. Zur Erhöhung der elektrischen Kapazität des Batteriemoduls und des Batteriesystems können Zellen parallel verschaltet werden. Die serielle Verschaltung der Zellstränge auf Modulebene ist meist auf 60 V begrenzt, um bei Montage oder Wartung von Batteriemodulen im Bereich der Schutzkleinspannung zu bleiben (Scrosati, Garche & Tillmetz, 2015, S. 247; Tschöke, 2015, S. 89). Über das Batteriemodul erfolgt zudem die mechanische Verbindung der Zellen, um diese Einheit wiederum in das Batteriesystem zu integrieren. Abhängig vom Thermomanagement und dem Batteriezellformat sind die Batteriezellen über eine entsprechend gestaltete Batteriezelltemperierung im Modul mit dem übergeordneten Kühl- und Heizsystem des Batteriesystems verbunden. Die Wahl des Zellformats hat somit einen großen Einfluss auf die Bauweise der übergeordneten Batteriemodule, des Kühlsystems und der mechanischen Struktur. (Dörnhöfer, 2019, S. 42)

Als Teil des übergeordneten Batteriemanagementsystems (BMS) überwacht das Slave-BMS auf Modulebene die Zellspannungen aller in Reihe geschalteten Zellen sowie die Temperaturen an bestimmten Stellen des Moduls. Zudem gleicht das sogenannte Balancingsystem das Spannungsniveau seriell verschalteter Batteriezellen im Modul an, sofern diese auseinanderdriften. (Scrosati et al., 2015, S. 253).

Batteriesystem: Die Batteriemodule sind im Batteriesystem meist seriell miteinander verschaltet und werden durch das Master-BMS überwacht (Scrosati et al., 2015, S. 246). Das Master-BMS wird mit Informationen aus dem Slave-BMS des jeweiligen Moduls sowie weiteren Sensoren, bspw. zur Erfassung der Systemspannung und des Systemstroms, versorgt. Werden bestimmte Grenzwerte über- oder unterschritten, greift das BMS ein. Dieses steuert unter anderem das übergeordnete Thermomanagement als auch Hochvolt-Relays im Schaltkasten des Batteriesystems, um dieses elektrisch vom Fahrzeug zu trennen. Schädliche Zustände können bspw. Tiefentladung oder Überladung sowie zu hohe oder zu niedrige Zelltemperaturen sein. (Scrosati et al., 2015, S. 252–254)

Neben der elektrischen Verschaltung und Überwachung der Batteriemodule, werden diese im Batteriesystem untereinander thermisch über das Thermomanagementsystem und mechanisch über die Tragstruktur des Batteriesystemgehäuses miteinander verbunden. Zudem stellt das Batteriesystem thermische, elektrische, informationstechnische und mechanische Schnittstellen zum Gesamtfahrzeug bereit. (Scrosati et al., 2015, S. 246–247)

Die Rolle der Temperierung der Batteriezellen über ein entsprechend gestaltetes Thermomanagement im Batteriesystem wird im folgenden Kapitel näher erläutert.

2.2.2 Thermomanagement von Batteriesystemen

Das Thermomanagement dient einer bedarfsgerechten Temperierung der Batteriezellen. Es kann somit gleichzeitig aus einem Kühl- und einem Heizsystem bestehen. (Korthauer, 2013, S. 15) Die Bedeutung eines optimalen Temperaturbereichs für die Funktionalität eines Batteriesystems aus Li-Ionen-Zellen wird in Abbildung 2.9 verdeutlicht.

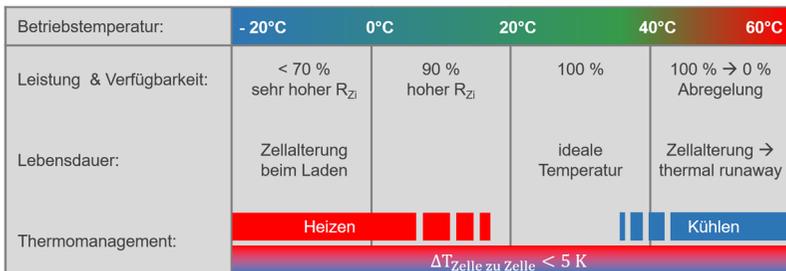


Abbildung 2.9: Zusammenhang zwischen Betriebstemperatur, Thermomanagement und Lebensdauer von Batteriesystemen aus Li-Ionen-Zellen (Korthauer, 2013, S. 166)

Der Anwendungsfall und die eingesetzten Batteriezellen beeinflussen die Auslegung der Heizsysteme und der Kühlung (Korthauer, 2013, S. 174–175).

Besonders beim Laden sind niedrige Temperaturen schädlich. Meist ist ein Laden bei Zelltemperaturen unterhalb von 0 °C nicht möglich, ohne die Batteriezelle irreversibel zu schädigen. Zudem steigt der Zellinnenwiderstand (R_{Zi} in Abbildung 2.9) bei Temperaturen unterhalb von 20 °C überproportional an. (Korthauer, 2013,

S. 166) Erhöhte Temperaturen führen gemäß der Arrhenius-Gleichung zum beschleunigten Ablauf chemischer Reaktionen, was auch für die irreversiblen Vorgänge innerhalb der Batteriezellen gilt, die den *Gesundheitszustand* oder *State of Health* (SoH) der Batteriezellen senken (Jossen & Weydanz, 2006, S. 21; Korthauer, 2013, S. 166).

Neben der Einhaltung eines zellspezifischen Temperaturfensters ist auch die Minimierung von Temperaturgradienten innerhalb und zwischen den Batteriezellen für eine geringe und gleichmäßige Alterung der Batteriezellen notwendig (Korthauer, 2013, S. 166–167). Denn Leistung, Energieinhalt und Lebensdauer des Batteriesystems sind temperaturabhängig (Korthauer, 2013, S. 411), was dem Thermomanagement eine wichtige Rolle im Batteriesystem zukommen lässt. Besonders die Kühlfunktion spielt bei hohen Lade- und Endladeströmen aufgrund der jouleschen Wärmeleistung⁷ der Batteriezellen eine wichtige Rolle, um die thermische und elektrische Belastung der Zellen innerhalb des Batteriesystems homogen zu halten (Jeon, 2014, S. 204; Ye, Shi, Cai, Lee & He, 2012, S. 237). Weitere Quelltherme der Wärmeleistung beim Laden und Entladen von Li-Ionen-Zellen werden in Kapitel 2.2.3 erläutert.

Die Belastung der Batterie während des Ladeprozesses ist schematisch in Abbildung 2.10 dargestellt und teilt sich bei der Li-Ionen-Technik in folgende zwei Phasen: Laden mit konstantem Strom (CC-Phase: Constant Current-Phase) und Laden mit konstanter Spannung (CV-Phase: Constant Voltage-Phase).

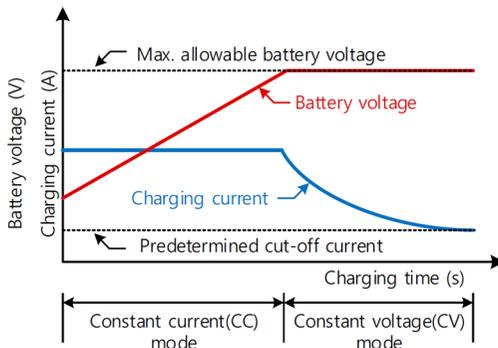


Abbildung 2.10: Schematische Darstellung CC-CV-Laden (Cho, Lee & Kim, 2019)

⁷ Die joulesche Wärmeleistung entspricht der Verlustleistung an einem stromdurchflossenen ohmschen Widerstand.

Beginnend mit der CC-Phase wird der Strom bis zum Erreichen einer Spannungsgrenze konstant gehalten. Danach sinkt der Ladestrom bei konstant anliegender Spannung, bis ein minimaler Ladestrom oder eine maximale Ladezeit erreicht ist und der Vorgang beendet wird. (Jossen & Weydanz, 2006, S. 147–150; Korthauer, 2013, S. 15–16)

Dieser Ablauf wird vom BMS überwacht und geregelt, um die Batteriezellen nicht zu schädigen. Dabei müssen gewisse Zustandsparameter der Zelle eingehalten werden. Neben Spannungs-, Strom- und SoC-Grenzen (SoC: State of Charge – Ladezustand) gibt es zellspezifische Temperaturgrenzen. Ist das Thermomanagement dauerhaft nicht dazu in der Lage, greift das BMS bei Über- oder Unterschreiten der Grenzwerte ein, um die elektrische Leistung und damit die Wärmeleistung zu reduzieren. (Korthauer, 2013, S. 98–99) In diesem Fall wird der Ladestrom reduziert und vom oben beschriebenen Ladeverlauf (CC-CV) abgewichen. Dies führt automatisch zu einer Verlängerung des Ladevorgangs.

Auch beim regulären Ladeprozess wird in der CC-Phase die höchste Wärmeleistung erzeugt, welche mit Einsetzen der CV-Phase durch den sinkenden Strom ebenfalls abnimmt (U. S. Kim, Yi, Shin, Han & Park, 2011). Abhängig von der Kühlleistung an der Batteriezelloberfläche steigt die Temperatur⁸ bei konstantem Ladestrom (oder Entladestrom) bis zum Ende der CC-Phase an bzw. erreicht bei hoher Kühlleistung schon davor sein Maximum oder einen quasi stationären Zustand (Drake et al., 2015; Jilte, Kumar & Ma, 2019; U. S. Kim et al., 2011; Zhao, Rao & Li, 2015). Dieser Zusammenhang ist am Beispiel der CC-Entladung einer einzelnen Batteriezelle mit unterschiedlichen Kühlleistungen, in Form von variierenden Masseströmen der Kühlflüssigkeit, in Abbildung 2.11 zu erkennen.

Die Schnellladefähigkeit von Batteriesystemen gehört zu einer der wichtigsten Anforderungen an Elektrofahrzeuge (European Commission Decision, 2018). Soll diese Anforderung erfüllt werden, muss zumindest aus thermischer Sicht das Thermomanagement hierfür geeignet sein (Korthauer, 2013, S. 166–167). Nach Scrosati et al. (2015) gilt die Auslegung des Thermomanagements hinsichtlich des Testfalls *Schnellladen* als besonders kritisch (Scrosati et al., 2015, S. 336). Damit kommt der Validierung der Batteriezellkühlung hinsichtlich der Schnellladefähigkeit eine entscheidende Rolle zu.

⁸ Hierbei wird angenommen, dass die Enthalpie der Zelle bei Laden oder Entladen steigt. Abhängig von Zellchemie, Stromstärke und -richtung sowie SoC kann die Zelle auch abkühlen. Auf die Wärmequellterme wird in Kapitel 2.2.3 näher eingegangen.

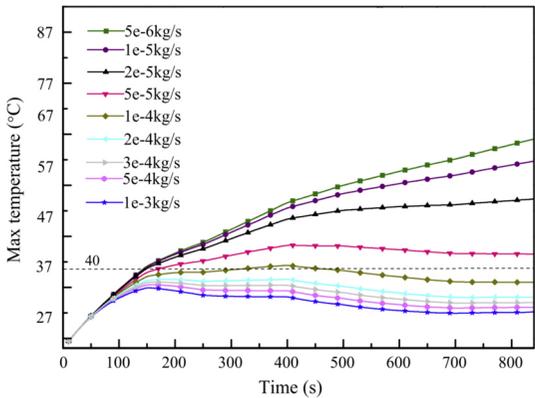


Abbildung 2.11: Veränderung der Temperatur einer mantelgekühlten, zylindrischen Batteriezeile bei einer 5 C Entladung und unterschiedlichen Masseströmen des Kühlfluides (in Anlehnung an Zhao, Rao & Li, 2015)

Die Temperatur der Batteriezellen verändert sich im Fahrbetrieb entsprechend der variierenden elektrischen Leistung, wodurch ein thermisch transientes Verhalten an den Batteriezellen zu beobachten ist (vgl. Abbildung 2.12).

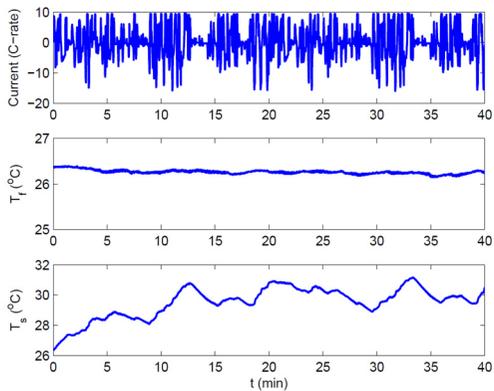


Abbildung 2.12: Belastung einer einzelnen zylindrischen Batteriezeile, welche radial mit einem konstanten Luftstrom der Temperatur T_f (mittleres Diagramm) umströmt und mit einem skalierten Stromprofil aus dem urban assault cycle (UAC) (oberes Diagramm) entladen und geladen wurde. T_s entspricht der gemessenen Zellmanteltemperatur (unteres Diagramm) (Lin et al., 2014)

Die Wärmeleistung der Batteriezellen kann kurzzeitig, bspw. bei Beschleunigungsfahrten, höher ausfallen als beim Laden, da die zulässigen Entladeströme von Li-Ionen-Zellen in der Regel größer als die Ladeströme sind (Panasonic, 2012; Yunwoong Kim, 2017).

2.2.3 Thermisches Verhalten von Li-Ionen-Zellen

Batteriezellen als elektrochemische Systeme besitzen eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Temperatur (Erhard, 2017, S. 37). Der Zusammenhang zwischen der Zelltemperatur und dem Zellinnenwiderstand sowie der Alterung der Batteriezelle (SoH) wurde bereits im vorherigen Kapitel beschrieben und ein empfohlenes Temperaturfenster für den Betrieb der Zellen aufgezeigt (vgl. Abbildung 2.9). Auch die spezifische Wärmekapazität von Li-Ionen-Zellen hängt von der Temperatur ab (Bernardi, Pawlikowski & Newman, 1985; Loges, Herberger, Seeger & Wetzel, 2016).

Für die Auslegung von Thermomanagementsystemen ist neben den thermischen Eigenschaften der Batteriezellen in Form von Wärmekapazität und Wärmeleitungen besonders das Verhalten der Zelle als Wärmequelle von Bedeutung. Bernardi et al. (1985) beschreiben erstmalig mathematisch alle Wärmequellen, die durch elektrochemische Reaktionen, Änderung von Aggregatzuständen, Mischungseffekten und joulescher Wärmeleistung in Li-Ionen-Zellen hervorgerufen werden. Die beiden wesentlichen Terme der reversiblen und irreversiblen Verluste lassen sich über Formel 1 beschreiben. Änderungen von Aggregatzuständen und Mischungseffekte werden bei dieser Gleichung zur Berechnung der Verlustleistung \dot{Q} vernachlässigt:

$$\dot{Q} = I * (V_0 - V) - I * T * \frac{dV_0}{dT} \quad 1$$

Der linke Term beschreibt die irreversiblen Verluste durch den Überpotenzial-Widerstand R_p , der sich aus dem ohmschen Widerstand R_{ohm} und den Widerständen beim Ladungsdurchtritt und Stofftransport zusammensetzt⁹. $(V_0 - V)$ stellt dabei den Spannungsabfall an R_p bei einem Strom I dar, wobei V_0 die Leerlaufspannung (OCV – Open Circuit Voltage) und V die anliegende Spannung an der Zelle ist. Die Wär-

⁹ In der Literatur wird nicht immer eindeutig zwischen den Begriffen Innenwiderstand, ohmscher Innenwiderstand oder Überpotenzial-Widerstand unterschieden. Abhängig von der Zellparametrisierung (vgl. Kapitel 2.5.4) und -modellierung (vgl. Kapitel 2.5.1) beschreibt der Zellinnenwiderstand den ohmschen oder den Überpotenzial-Widerstand.

meleistung durch den ohmschen Widerstand R_{ohm} wird auch als joulesche Verlustleistung bezeichnet. Der rechte Term in Formel 1 stellt die Wärmeleistung durch Entropieänderung und damit den reversiblen Anteil dar. Über den Entropiekoeffizient $\frac{dV_0}{dT}$ wird die Änderungen der Leerlaufspannung in Abhängigkeit der Zelltemperatur T beschrieben. Abhängig von der Stromrichtung wechselt dieser Term das Vorzeichen. Je nach Stromstärke und Stromrichtung, kann die reversible Wärmeleistung dominieren und Zelle kühlen. (Bernardi et al., 1985) Da auch der Überpotenzialwiderstand abhängig von der Zelltemperatur ist (Onda, Kameyama, Hanamoto & Ito, 2003), beeinflussen Temperaturänderung somit direkt die reversible, als auch indirekt die irreversible Wärmeleistung.

Die Anteile der reversiblen und irreversiblen Wärmeleistung sind gemäß Formel 1 linear abhängig vom Strom. Zudem weisen Zellinnenwiderstände und Entropiekoeffizienten je nach Zellchemie unterschiedliche Verläufe über den SoC sowie Temperaturabhängigkeiten auf. (Al-Hallaj & Selman, 2002; Jeon & Baek, 2011; Jeon, 2014; Viswanathan et al., 2010).

Das thermisch komplexe Verhalten von Li-Ionen-Zellen muss differenziert und abhängig von den thermischen und elektrischen Bedingungen in der Anwendung betrachtet werden.

2.2.4 Zwischenfazit

Dem Thermomanagement von Antriebsbatteriesystemen kommt eine zentrale Rolle hinsichtlich der Leistungsfähigkeit, der Sicherheit und der Performance zu (Kortbauer, 2013, S. 165–175). Diese Eigenschaften gilt es in der frühen Phase der Thermomanagemententwicklung bzw. der Kühlsystementwicklung abzusichern. Entsprechende Validierungsaktivitäten nach dem Stand der Forschung werden in Kapitel 2.4 beschrieben.

2.3 Kühlung zylindrischer Batteriezellen

Der Einfluss der Temperatur der Batteriezellen auf das elektrische Verhalten wurde in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben. Über ein entsprechendes Kühl-Design gilt es, die Batteriezellen im optimalen Temperaturbereich zu betreiben. Kühlsystemdesigns sind an das Zellformat und deren Eigenschaften gekoppelt (Hettesheimer et al., 2017, S. 20). In dieser Arbeit liegt der Fokus auf kleinformatigen, zylindrischen Zellen mit Mantelkühlung und der entwicklungsbegleitenden Validierung des thermischen Verhaltens der Batteriezellkühlung für dieses Zellformat.

Aufgrund seiner Anwendung in Consumerprodukten wird das Zellformat zylindrischer Batteriezellen speziell in der Größe 18650 in großer Stückzahl angeboten (Warner, 2015, S. 84). Durch die geringe Größe der Zelle und die zylindrische Form können unterschiedlichste Moduldesigns entwickelt werden. Traktionsbatterien für größere Mobilitätsanwendungen, wie im Automobilbereich gefordert, benötigen allerdings eine Vielzahl dieser Zellen (Bsp. Tesla Model S 85 kWh: 7104 Zellen), was den Aufbau großer Batteriesysteme aufwendig gestaltet (Warner, 2015, S. 189). Hinzu kommt die Integration des Thermomanagements. Die Anforderungen an die Temperaturhomogenität von 5 K (Jossen & Weydanz, 2006, S. 167) innerhalb eines Batteriesystems bringt Herausforderungen in der Entwicklung mit sich, die mit den Anforderungen hoher Bauraumeffizienz und geringem Gewicht in Mobilitätsanwendungen in Einklang gebracht werden müssen.

Um die hohe volumetrische Energiedichte zylindrischer Zellformate wie 18650 und 21700 auf Systemebene zu nutzen, muss die Batteriezellkühlung entsprechend bauraumeffizient gestaltet sein (Hettesheimer et al., 2017, S. 21–25). Durch die anisotrope Wärmeleitfähigkeit des Zellwickels ist der Wärmeleitpfad zwischen Wärmequelle im Zellwickel und der Kühlfläche entscheidend für die Kühleffizienz und den Temperaturgradienten innerhalb des Zellwickels (Korthauer, 2013, S. 184). Die Kühlungsart, also in welcher Form die Wärme von der Kühlfläche abtransportiert wird, beeinflusst neben der Kühlleistung auch den Bauraumbedarf (Korthauer, 2013, S. 168–169).

Hettesheimer et al. (2017) verglichen die drei Möglichkeiten, zylindrische Zellen thermisch zu kontaktieren bzw. zu kühlen: Wärmeabfuhr über den positiven Pol, über den negativen Pol und über den Zellmantel.

Prinzipiell hat die Kühlung an den Zellpolen den Vorteil, dass die Wärme entlang der Wickelebenen fließt und die Wärmeleitfähigkeit in dieser Richtung um bis zu zwei Größenordnungen besser sein kann als in radialer Richtung senkrecht zu den Wickellagen (Hettesheimer et al., 2017, S. 19; Korthauer, 2013, S. 168). Allerdings

gilt es auch, nutzbare Kontaktflächen und Wärmeleitpfade zwischen dem Zellwickel und dem Kühlmedium zu berücksichtigen. Durch die integrierten Sicherheitselemente am Pluspol sowie dessen elektrischer Isolation zum restlichen Zellgehäuse ist konstruktionsbedingt die nutzbare thermische Kontaktfläche wesentlich kleiner als am Minuspol (siehe Abbildung 2.13). Auch der Wärmeleitpfad zwischen Pluspol und Zellwickel ist deutlich länger als beim negativen Pol. Der negative Ableiter ist direkt mit dem Gehäuse verbunden. Dies führt zu einem bis zu viermal niedrigeren thermischen Widerstand als am Pluspol. Dementsprechend ist eine Kühlung des negativen Pols deutlich effizienter als auch konstruktiv einfacher umzusetzen als am Pluspol. (Hettesheimer et al., 2017, S. 19–20)

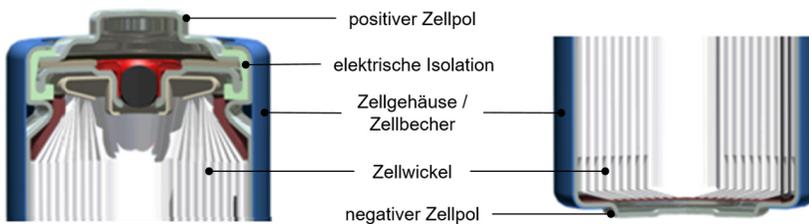


Abbildung 2.13 Schnittdarstellungen einer zylindrischen, kleinformatigen Batteriezelle. Ausschnitt Pluspol (links), Ausschnitt Minuspol (rechts) (in Anlehnung an Energizer, 2008)

Bei einer Zellmantelkühlung ist der Wärmeleitpfad zwischen Zellwickel und Zellmantel durch den flächigen Kontakt über den Umfang kurz. Allerdings limitiert die schlechte Wärmeleitfähigkeit in radialer Richtung des Zellwickels den Wärmetransport (Shah et al., 2014b). Nach Guangsheng Zhang et al. (2014) ergeben sich bei einer Zellmantelkühlung über natürliche Konvektion Temperaturunterschiede von bis zu 3 K und bei erzwungener Konvektion von bis zu 5,5 K. Bolsinger und Birke (2019) verglichen Zellmantelkühlung und Kühlung an den Polflächen an einer Batteriezelle des Formats 26650 (26 mm Durchmesser und 65 mm Länge). Wird der Effekt der natürlichen Konvektion an den ungekühlten Flächen vernachlässigt, führt die Mantelkühlung zu einem um 1 K höheren Temperaturgradient im Zellkörper als die reine Kühlung über die beiden Pole (Bolsinger & Birke, 2019).

Die konstruktive Randbedingung der Zellformate 18650 und 21700, dass sich der negative Pol auf dem Zellbecher befindet, führt dazu, dass bei einer Zellmantelkühlung der negative Pol über den Wärmeleitpfad des Gehäuses mitgekühlt wird (Hettesheimer et al., 2017, S. 20). Somit fungiert das Zellgehäuse bei einer Mantelkühlung zusätzlich als Wärmeleitblech, um Wärme am negativen Pol abzuführen. Um

eine gute Kühlwirkung zu erreichen empfehlen Hettesheimer et al. (2017) für kleinformatige zylindrische Zellen eine einfache zu realisierende kombinierte Wärmeabfuhr über Gehäuse und negativen Pol.

Zwischenfazit:

Aufgrund der am Zellmantel zur Verfügung stehenden großen Kontaktfläche und der indirekten Kühlung des negativen Pols über den Zellbecher gilt die Wärmeabfuhr über die Zellmantelfläche als praktikabel, auch wenn hierdurch erhöhte Temperaturgradienten im Zellkörper in Kauf genommen werden müssen.

Die Zellmantelkühlung zylindrischer kleinformatiger Zellen wird entsprechend des Standes der Technik und der Forschung unterschiedlich umgesetzt. Im Folgenden sind unterschiedliche Arten der Zellmantelkühlung beschrieben. Hierbei wird zwischen der aktiven und der passiven Kühlung unterschieden.

2.3.1 Aktive Zellmantelkühlung zylindrischer Zellen

Aktive Kühlungsarten haben gemein, dass Wärme durch aktive Elemente aus einem Batteriesystem an die Umgebung abtransportiert wird. Hierfür kommen meist flüssige oder gasförmige Medien zum Einsatz, die entweder direkt mit dem Zellgehäuse in Kontakt kommen oder Wärmeleitelemente kühlen, die wiederum mittels Konduktion Wärme von den Zellen abtransportieren.

Kühlung durch erzwungene Konvektion

Die einfach umzusetzende und häufig genutzte Kühlungsart beruht auf Konvektion und nutzt temperierte Luft als Fluid. Die Zellen werden dabei entweder quer- oder axialumströmt. Die dafür notwendigen Kühlkanäle zwischen den Batteriezellen benötigen allerdings viel Bauraum und bedingt durch die niedrige Wärmekapazität der Luft ist diese Kühlungsart wenig effektiv. Der Vorteil der Kühlungsart ist die einfache und großflächige thermische Kontaktierung am Zellmantel und der Verzicht auf zusätzliche Isolationsschichten sowie Dichtstellen. (Korthauer, 2013, S. 168–169; Warner, 2015, S. 85)

Konstruktiv aufwendiger, aber effizienter, ist der Einsatz von flüssigen Kühlmedien, die eine höhere Wärmekapazität besitzen. Im Gegensatz zur Luftkühlung sind Dichtungselemente notwendig, um den Kühlbereich auf den Zellmantel zu begrenzen.

Wird ein elektrisch isolierendes, dielektrisches Fluid eingesetzt, welches nicht mit dem Zellbechermaterial reagiert, kann auf eine Isolationsschicht an der Mantelfläche verzichtet werden. (Scrosati et al., 2015, S. 337–339; Xia, Cao & Bi, 2017) Alternativ muss beim Einsatz elektrisch leitender Kühlfluide der Zellmantel, auf welchem der negative Pol liegt, mit einer isolierenden Schicht bspw. Lack versehen werden (Nageldinger, 2014). Ein solches Kühlkonzept unter der Verwendung einer dielektrischen Flüssigkeit ist in Abbildung 2.14 skizziert. Die in dichtester Packung angeordneten Zellen werden unter Ausschluss der Polflächen (Zellkopf und Zellboden) quer mit Flüssigkeit umströmt (Kreisel, Kreisel jr. & Kreisel, 2015).

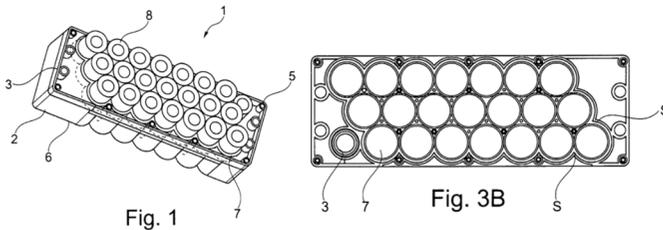


Abbildung 2.14 Zellmantelkühlung zylindrischer Batteriezellen mittels flüssigem Kühlmedium (8: Batteriezellen, 6: Hohlkörper zur Fluidführung, S: Dichtung) (Kreisel et al., 2015)

Nach Scrosati et al. (2015) und Xia et al. (2017) ist die direkte Kühlung von Batteriezellen über dielektrische Flüssigkeiten in der Anwendung wenig verbreitet.

Kühlung durch Konduktion

Bei der Kühlung durch Konduktion wird die Wärme über zusätzliche, wärmeleitende Elemente aus der Zelle abgeführt. Handelt es sich um eine Kühlmittelkühlung, wird die abgeleitete Wärme auf ein Kühlfluid übertragen (Scrosati et al., 2015, S. 339). Bei prismatischen Batteriezellformaten kommt auch die Kältemittelkühlung zum Einsatz, bei welcher das Zellgehäuse thermisch mit dem Verdampfer verbunden ist (Scrosati et al., 2015, S. 340–341).

Eine Form der Kühlmittelkühlung mit kurzem Wärmeleitpfad stellt die Verwendung von fluidführenden Kühlblechen dar (Korthauer, 2013, S. 168–169). Bei prismatischen und bei Pouchzellen können diese flächig ausgeführt werden, wohingegen bei zylindrischen Zellen der konstruktive Aufwand höher ausfällt. Ein Beispiel für die konstruktive Umsetzung eines solchen Kühlbleches ist in Abbildung 2.15 zu sehen.

Mehrere Batteriezellen werden durch eine flüssigkeitsführende Kühlröhre (Fig. 8 in Abbildung 2.15) an Bereichen der Mantelfläche berührt (Fig. 1+ 3b in Abbildung 2.15) (Hermann, Kohn & Berdichevsky, 2007). Im Gegensatz zu den konvektiven Kühlarten fließt die Wärme bei dieser Umsetzung nicht am gesamten Zellumfang ab, sondern ist auf eine relativ kleine Kontaktfläche beschränkt. Der Umschlingungswinkel bestimmt dabei die Kontaktfläche und ist abhängig von der Zellanordnung.

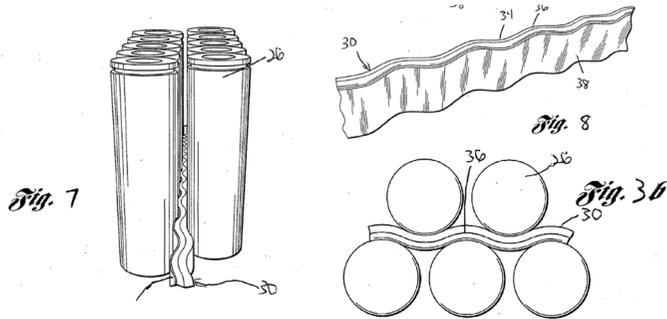


Abbildung 2.15 Fluidführendes Kühlblech an der Mantelfläche zylindrischer Batteriezellen (Hermann et al., 2007)

Zhao, Rao und Li (2015) untersuchten eine weitere Form der Kühlmittelkühlung, welche eine homogenere Wärmabfuhr über den Zellmantel erlaubt. Die zylindrischen Zellen des Formats 42110 (42 mm Durchmesser, 110 mm Länge) sind je in einen Kühlzylinder eingefasst, welcher am Umfang Micro-Kühlkanäle mit axialer Ausrichtung aufweist (vgl. Abbildung 2.16). Durch diese Kanäle wird Kühlwasser geleitet. Mittels Variation von Durchflussmenge, Anzahl und Geometrie der Kühlkanäle sowie Fließrichtung in den jeweiligen Fluidkanälen wurde das Kühlsystem optimiert. (Zhao, Rao & Li, 2015)

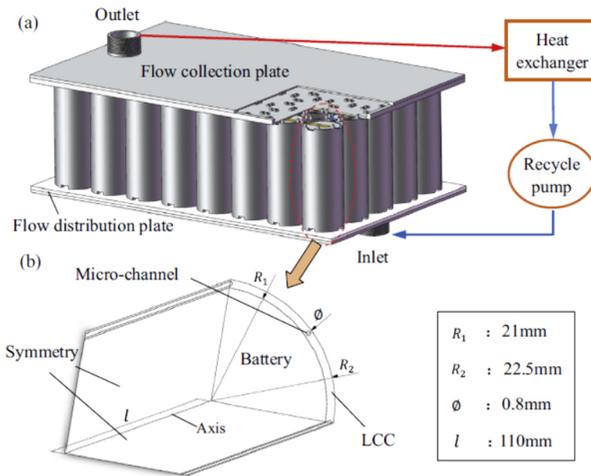


Abbildung 2.16 Zellmantelkühlung mittels fluidführenden Kühlzylindern (Zhao, Rao & Li, 2015)

2.3.2 Passive Kühlung zylindrischer Zellen

Ist eine passive Temperierung der Batteriezellen ausreichend, kann diese auf verschiedene Arten realisiert werden. Am häufigsten wird dies durch die Verwendung von Metallgehäusen erreicht, die die Wärme der Zellen aufnehmen. Auf diese Weise kann die Wärme über das metallische Gehäuse im Batteriesystem verteilt werden und in die Umgebung abstrahlen. Dies wird allgemein als Wärmesynchronisation bezeichnet und ist am effektivsten bei Batteriesystemen mit niedrigen Entladungsraten, da sie weniger Wärme erzeugen. Eine andere Methode der passiven Kühlung besteht darin, das Batteriesystemgehäuse mit Rippen zu versehen, um über diese durch den Fahrtwind Wärme abzuführen. (Warner, 2015, S. 127–128) Bei diesen Methoden wird die Wärmegabe über den Zellmantel oder die Polflächen nicht aktiv unterstützt, sondern ergibt sich durch verschiedene Wärmeleitpfade entsprechend der Einbindung der Batteriezellen im System.

Eine weitere Methode der passiven Kühlung ist die Verwendung eines Phasenwechselmaterials (phase change material: PCM). Dieses ändert beim Erhitzen seinen Aggregatzustand, meist von fest zu flüssig, wobei Energie in Form von Umwand-

lungsenthalpie aufgenommen wird (Warner, 2015, S. 127–128). Die maximale Temperatur der Zellen bei Aufheizvorgängen kann somit über die PCM-spezifische Schmelztemperatur begrenzt werden (Bandhauer, Garimella & Fuller, 2011). Bei dem Kühlkonzept wird die große Fläche des Zellmantels genutzt, um trotz schlechter Wärmeleitfähigkeit des Materials (Paraffin: $c_p < 0,3 \frac{W}{m \cdot K}$. (Khateeb, Farid, Selman & Al-Hallaj, 2004, S. 293) einen hohen Wärmestrom bei geringem Temperaturunterschied zu ermöglichen. Khateeb et al. (2004) füllten die Zwischenräume der zylindrischen Zellen in einem Batteriemodul mit PCM und offenporigem Aluminiumschaum. Durch die gute Wärmeleitfähigkeit des Metalls wird die Wärme besser von den Zellen in das PCM geleitet (Khateeb et al., 2004). Hémerly, Pra, Robin und Marty (2014) positionierten Zellen in einzelne, mit PCM gefüllte, Aluminiumbecher. Zudem sind die Becher zur besseren Wärmeverteilung im Inneren mit Wärmeleitrippen versehen (Hémerly et al., 2014). Kizilel, Sabbah, Selman und Al-Hallaj (2009) untersuchten die Kühlung eines Batteriezellpacks zylindrischer Zellen durch einen PCM-Graphit-Verbund. Das Paraffinwachs ist dabei in einer Graphitmatrix eingelagert, wodurch der Verbundwerkstoff durch das Graphit eine gute Wärmeleitfähigkeit und durch das PCM hohe Wärmespeicherkapazität besitzt (Kizilel et al., 2009).

2.4 Design und Validierung des Thermomanagements auf Modul- und Batteriesystemebene

In diesem Kapitel werden Vorgehensmodelle nach dem Stand der Forschung beschrieben, um das Thermomanagement eines Batteriesystems oder -moduls zu designen und entwicklungsbegleitend zu validieren.

Hersteller von Batteriesystemen für den Automotive-Bereich nutzen unterschiedliche Ansätze, um Li-Ionen-Batteriesysteme zu entwickeln. Abhängig von der Produktionsmenge werden unterschiedliche Strategien verfolgt. Typischerweise kommen in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) einfache analytische Berechnungsmethoden für die Auslegung und Evaluation eines Batteriesystems zum Einsatz. Die Validierung der Modellbildung erfolgt bei dieser klassischen Auslegungsform durch physische Prototypen. Jede nachträgliche Änderung oder Anpassung des Designs ist jedoch mit zeitintensiven Iterationen verbunden. (Cicconi, Landi & Germani, 2017)

Virtuelle Prototypen ermöglichen es hingegen, den Zeit- und Kostenaufwand im Zusammenhang mit vielen physischen Prototypen zu reduzieren. Allerdings führen

komplexe Simulationen bezüglich multiphysikalischer und Multi-Domain-Phänomene zu hohen Rechenkosten und -zeiten. Zudem sind unterschiedliche Simulationsstools mit hohen Einrichtungskosten verbunden und erfordern geschultes Personal. Entsprechend ist nicht jede Form der virtuellen Modellbildung zur effizienten Entwicklung und Validierung von Batteriesystemen geeignet. Es mangelt an Werkzeugen, die den Ingenieur in allen Phasen des Batteriesystem-Designs unterstützen. (Cicconi et al., 2017)

2.4.1 Vorgehensmodelle

Mit dem Fokus auf das thermische Design und der Validierung von Batteriesystemen hinsichtlich des thermischen Verhaltens, existieren wenige Ansätze, die den Ingenieur über den gesamten Entwicklungsprozess unterstützen. In diesem Kapitel werden Vorgehensmodelle nach dem Stand der Forschung beschrieben, welche verschiedene Formen der Modellbildung für die Validierung eines Thermomanagements auf Batteriemodul- und/oder -systemebene anwenden.

Die Methode nach Bouvy et al. (2012) vereinigt vier computergestützte Werkzeuge (vgl. Abbildung 2.17) zur Auslegung von Batteriesystemen¹⁰. Die Integration in ein Gesamtsystem und der Einfluss auf Effizienz und Funktionalität werden mit einer 1D-Simulationsplattform analysiert. Die 1D-Simulationen basieren auf einer ganzheitlichen Modellbibliothek, die alle energetischen (mechanischen, elektrischen, thermischen und chemischen) und logischen (Sensoren, Aktoren und Steuergeräte) Flüsse einschließlich dynamischer Randbedingungen (z. B. Fahrzyklen, Umgebungsbedingungen) berücksichtigt. Das Kühl-/Heizkonzept und die daraus resultierenden Parameter (z. B. Wärmeübergangskoeffizienten) einer geometrischen Auslegung werden mittels Computational Fluid Dynamics (CFD) ermittelt. Die resultierenden Parameter werden zur Anpassung der 1D-Modelle verwendet. Für die Strukturanalyse und damit für das Crashverhalten werden Werkzeuge der Finite-Elemente-Methode (FEM) eingesetzt. Auch hier werden die resultierenden Parameter (z. B. Masse) auf die energetische 1D-Simulationsplattform übertragen. Alle Konstruktionsdaten basieren auf computergestützten Konstruktionswerkzeugen (CAD). (Bouvy et al., 2012)

¹⁰ Die Autoren Bouvy et al. (2012) verwenden den Begriff „battery pack“. Als Synonym wird in dieser Arbeit einheitlich der Begriff Batteriesystem verwendet.

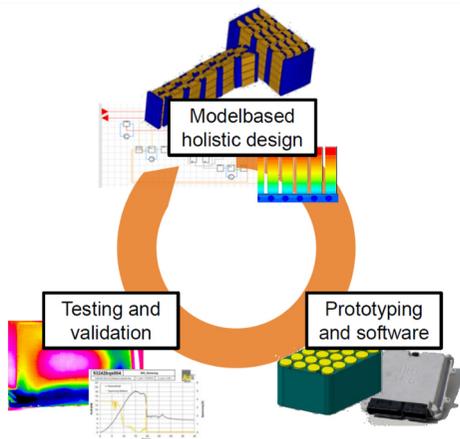


Abbildung 2.17: Computertools für ein ganzheitliches Batteriesystemdesign (Bouvy et al., 2012)

Abbildung 2.18 zeigt das Schema des National Renewable Energy Laboratory (NREL) für die virtuelle Modellierung des Thermomanagements eines Batteriezellverbundes. Zellmerkmale (z. B. Chemie, Formfaktor, Dimension und Werkstoffe), Betriebsbedingungen (z. B. Leistungslastprofile des Fahrzeugs und Umgebungstemperatur), Kühlungsstrategie des Modul-/ Zellverbunds (z. B. Kühlmittelart und Massenstrom, Gestaltung des Kühlmittelkanals und thermischer Lastzyklus) sind Eingangsgrößen für das Auslegungsmodell der NREL zum Wärmemanagement eines Batteriezellverbundes. Das Modell verwendet diese Eingaben zur Komponenten- und Systemanalyse, um das thermische Verhalten eines Kühlkonzepts vorherzusagen. Danach können die vielversprechendsten Modifikationen des Konzepts bewertet werden, um die optimale Lösung unter Berücksichtigung von Faktoren wie Kosten, Volumen, Masse und Wartungsfragen zu erarbeiten. (G.-H. Kim & Pesaran, 2007)

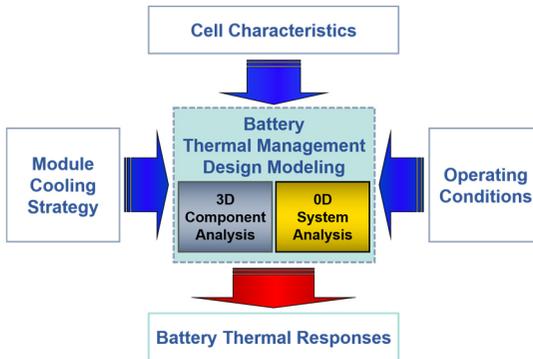


Abbildung 2.18 Arbeitsflussdiagramm zur Modellierung des Thermomanagements eines Batteriezellverbundes am National Renewable Energy Laboratory (NREL) (G.-H. Kim & Pesaran, 2007)

Eine detailliertere Beschreibung des Design- und Validierungsprozesses liefern Pesaran, Burch und Keyser (1999). Sie empfehlen einen sequenziellen Ansatz in sieben Schritten zur Auslegung und Evaluation eines Thermomanagements von Batteriesystemen¹¹ (Pesaran et al., 1999):

1. Definition der Zielsetzung und der Randbedingungen für die Entwicklung des Thermomanagements
2. Ermittlung der Wärmeerzeugung und Wärmekapazität des Moduls
3. Erste Evaluation des Thermomanagements
4. Vorhersage des Verhaltens des Batteriemoduls/ Zellverbundes
5. Entwurf eines vorläufigen Thermomanagements (ggf. Schritt 4 wiederholen)
6. Aufbau und Test des Thermomanagements
7. Optimieren des Thermomanagements

Diese sieben Schritte mit weiteren Unterschritten bilden die Grundlage zum Design und der Evaluation des Thermomanagements auf Modul- und Batteriesystemebene. Der Ansatz ist zellformatunspezifisch und auf verschiedene Batteriezellkühlungen

¹¹ Die Autoren Pesaran, Burch und Keyser (1999) nutzen die Begriffe „battery module“ und „battery pack“. Letzteres besteht aus mehreren Modulen und wurde in dieser Arbeit mit dem Batteriesystem gleichgesetzt.

anwendbar. Entsprechend beschränkten sich Pesaran et al. (1999) im beschriebenen Ansatz auf eine generische Beschreibung der Modellierungsmethoden und -tools (z. B. CFD und FEM) und ergänzten diese mit Anwendungsbeispielen. In Schritt 5 werden Experimente mit Komponenten und in Schritt 6 der Aufbau eines physischen Prototypens des Thermomanagements auf Batteriesystemebene empfohlen. Diese dienen zur Validierung des Thermomanagements und der Simulationsmodelle. Falls erforderlich werden anschließende Feinabstimmungen empfohlen. Auf die physische Modellbildung in Form von Prototypen wird in diesem Ansatz nicht genauer eingegangen.

Cicconi, Germani, Landi und Mengarelli (2014) fokussierten sich in ihrer entwicklungsunterstützenden Methode auf die virtuelle Modellbildung, die für die thermische Simulation von Batteriemodulen zum Einsatz kommt. Ziel der Methode ist es, eine einheitliche Batteriemodultemperatur im Betrieb zu erreichen. Das Besondere an diesem Ansatz ist, dass hierfür das initiale Layout/Design der Batteriezellkühlung nicht angepasst werden muss, sondern das Batteriemodul in Zonen aufgeteilt wird, die elektrisch unterschiedlich stark belastet werden. (Cicconi et al., 2014)

Das Ablaufdiagramm zur Methode ist in Abbildung 2.19 beschrieben. Ausgehend von einem Batteriemodulkonzept und entsprechenden Spezifikationen leitet der Entwickler ein CAD-Modell ab, welches für die thermische Simulation genutzt wird. Zur Erprobung des thermischen Verhaltens wird ein passender Fahrzyklus benötigt, welcher über ein analytisches Tool in einen zeitlichen Stromverlauf gewandelt wird, um daraus die Wärmeleistung der Zellen abzuleiten. Hierfür ist die Vermessung der Batteriezeile zur thermischen Charakterisierung erforderlich. Mittels CFD wird das thermische Profil im Testfall des Batteriemoduls ermittelt. Die Methode empfiehlt zur Homogenisierung der Temperatur im Batteriemodul eine Aufteilung des Zellverbundes in mehrere Submodule. Diese werden elektrisch unterschiedlich stark belastet, die Gesamtleistung also ungleich auf die Submodule verteilt. Diese Aufteilung führt auch zu einer ungleichen Wärmefreisetzung, welche mittels der Batteriezellkühlung kompensiert wird. Die Autoren zeigen am Beispiel eines luftgekühlten Batteriemoduls aus 51 zylindrischen Zellen, dass mit dieser Methode die Temperatur der Zellen im Modul homogenisiert werden kann. (Cicconi et al., 2014)

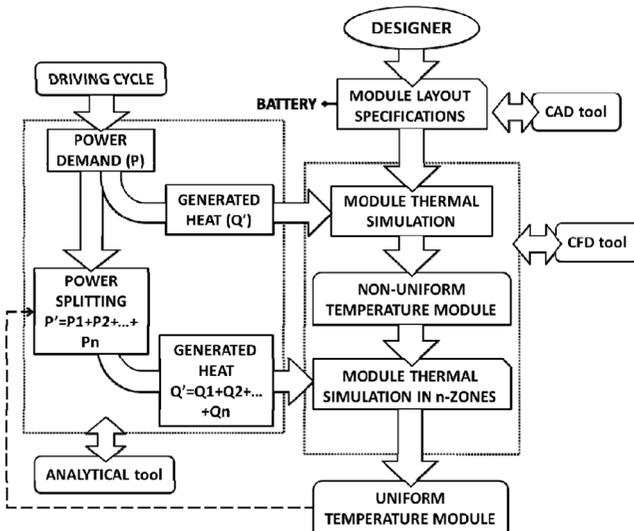


Abbildung 2.19: Arbeitsflussdiagramm zur Minimierung des Temperaturunterschiedes in Batteriemodulen durch Aufteilung der elektrischen Leistung innerhalb eines Batteriemoduls (Cicconi et al., 2014)

Dieser neuartige Ansatz ermöglicht die Temperaturhomogenisierung im Modul, geht aber mit einer ungleichen elektrischen Beanspruchung der Batteriezellen einher, wodurch sich neue Herausforderungen ergeben, die von den Autoren nicht erörtert werden. Entsprechend ist dieser beschriebene Ansatz nicht uneingeschränkt für die Entwicklung und Optimierung einer Batteriezellkühlung einsetzbar.

Der methodische Ansatz von Landi, Cicconi und Germani (2015) ist hingegen allgemeiner gehalten. Dieser dient der simulationsbasierten Evaluation des thermischen Verhaltens eines Batteriesystems, um daraus einen physischen Prototyp abzuleiten. Hierbei wird auch zwischen den Tätigkeiten von Elektrotechnik- und Maschinenbauingenieur unterschieden. Die Methode wird im Folgenden beschrieben und ist in Abbildung 2.20 skizziert.

Das elektrische Layout des Batteriesystems¹², welches den Zelltyp sowie deren Anzahl und deren elektrische Verschaltung beinhaltet, wird größtenteils vom Elektrotechnikingenieur bereitgestellt. Das Layout auf Module und Batteriesystemebene wird durch den Maschinenbauingenieur definiert. Entsprechend werden Zellanordnung, Gehäuse und das Kühlsystem festgelegt. Im folgenden Schritt der thermischen Analyse mittels analytischen Berechnungsverfahren wird die Wärmeleistung der Batteriezellen im Betrieb abgeschätzt. Hierfür sind experimentelle Untersuchungen an einzelnen Zellen geeignet, um diese zu charakterisieren. Auf Grundlage dieser Wärmeleistungen wird eine Batteriezellkühlung mit der entsprechenden Zellanordnung entworfen. Die letzte Designphase ist die thermische Analyse des Batteriesystems und die CFD-Analyse. Durch den Einsatz von 3D-Simulationswerkzeugen soll die Wirksamkeit der Batteriezellkühlung erfasst werden. Parameter können in virtuellen Modellen angepasst und deren Einfluss auf die Temperaturverteilung validiert werden. Die Simulationsaktivitäten dienen der Reduktion von physischen Tests. Erst nach der Finalisierung des Kühldesigns als Ergebnis dieses Schrittes wird ein physischer Prototyp empfohlen. (Landi et al., 2015)

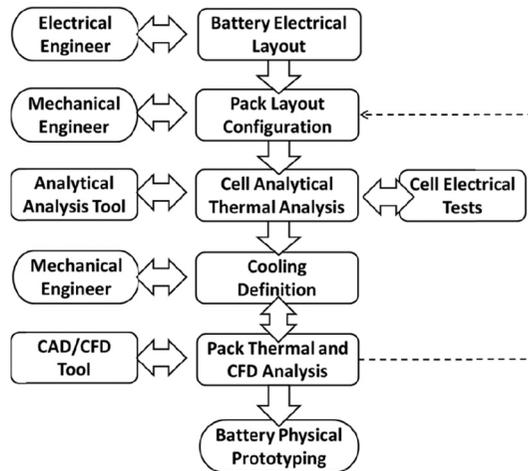


Abbildung 2.20: Arbeitsflussdiagramm zur Auslegung eines Thermomanagements eines Batteriesystems nach (Landi et al., 2015)

¹² Die Autoren Landi, Cicconi und Germani (2015) verwenden den Begriff „battery pack“ und „battery“ gleichermaßen. Zur eindeutigen Beschreibung wird in dieser Arbeit als Synonym der Begriff Batteriesystem verwendet.

Nach Jayaraman, Anderson, Kaushik und Klaus (2011) gibt es drei Faktoren, die die Integration von Batteriezellen in ein Fahrzeug und das effektive Wärmemanagement eines Batteriesystems unterstützen:

1. Simulation der elektrischen Leistung und Bestimmung der Wärmeentwicklung des Batteriesystems während verschiedener Fahrzyklen
2. Thermische Charakterisierung der Batteriezellen und Bestimmung der Wärmeübertragungskoeffizienten und des Druckabfalls im Batteriesystem
3. Regelung des Batterie- und Fahrzeugthermomagements zur Sicherung adäquater Batteriezellentemperaturen und eines optimalen Energieverbrauchs

Mit der im Folgenden beschriebenen Simulationsstrategie zur Absicherung des thermischen Designs einer Fahrzeugbatterie aus Pouchzellen adressieren Jayaraman et al. (2011) die beiden ersten Faktoren.

Zu Beginn der Batteriesystementwicklung kamen Modelle mit konzentrierten Parametern zum Einsatz. Nachdem die notwendigen Daten für die Modellbildung aus Messungen vorlagen, wurden 3D-CFD-Simulationen genutzt. Die Autoren empfehlen physische Tests in verschiedenen Stadien der Fahrzeugentwicklung, einerseits um Simulationsmodelle auf der Komponenten- und Subsystemebene zu parametrisieren, und andererseits, um Testergebnisse mit den System- und Fahrzeugmodellen abzugleichen. (Jayaraman et al., 2011)

Stationäre-CFD-Simulationen wurden zur Bewertung von Druckverlusten in der Kühlmittelführung und zur Ermittlung von thermischen Koeffizienten zwischen den Batteriezellen und der Kühlung als auch zwischen Batteriesystem und Umgebungsluft verwendet. Zur Absicherung der ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten zwischen der Batteriezellkühlung und den Pouchzellen wurden Versuche an einem Prüfaufbau durchgeführt (vgl. Abbildung 2.35). Hierfür wurden thermische Ersatzbatteriezellen mit steuerbarer Wärmeleistung eingesetzt. Diese wird durch einen Quellterm modelliert, der auf das Volumen des elektrischen Heizers der Ersatzzelle angewendet wird. Für den stationären Zustand konnten neben dem Wärmeübergangskoeffizienten auch die simulierte Batteriezelltemperatur des CFD-Modells verifiziert werden. Das erlangte Systemverständnis unterstützte bei der Synthese und Optimierung von Rippen- und Rohrleitungsdesigns, Kühlkomponenten und Isoliermaterialien. (Jayaraman et al., 2011)

Transiente Simulationen mit konzentrierten Parametern auf Fahrzeugebene, die die thermischen Eigenschaften des Systems einbeziehen, wurden zur Vorhersage des

Leistungsbereichs des Batteriesystems in unterschiedlichen Anwendungsfällen verwendet. Zur Modellparametrisierung wurden Messdaten als auch Daten aus den beschriebenen CFD-Simulationen verwendet. Diese Parameter sind neben der Wärmekapazität des Batteriesystems, die interne Wärmeleistung der Batteriezellen, der mittlere Wärmübergangskoeffizient zwischen Batteriesystem und Umgebungsluft sowie zwischen Batteriezellen und Kühlmittel. Die genannten Parameter sind wiederum von Variablen abhängig, die entsprechend der Fahrzeugnutzung und Zuständen des Batteriesystems variieren und deshalb in Form von mehrdimensionalen Kennfeldern/Lookup-tables ermittelt werden müssen. (Jayaraman et al., 2011)

Jayaraman et al. (2011) zeigten damit beispielhaft, wie unterschiedliche Arten der virtuellen Modellbildung zur effizienten Validierung eines Batteriesystems auf unterschiedlichen Systemebenen eingesetzt und im Entwicklungsprozess miteinander verknüpft werden können. Auch der effiziente Einsatz gemischt physisch-virtueller Modellbildung über einen Prüfaufbau mit steuerbaren thermischen Ersatzbatteriezellen zur Verifikation von Simulationsergebnissen wurde aufgezeigt. Auf den Einsatz realer Pouchzellen konnte somit verzichtet werden.

Cicconi et al. (2017) unterstützen den Ingenieur durch ein entwickeltes Tool, eine sogenannte Designplattform, welche in der frühen Phase der Batteriesystementwicklung Anwendung findet. Dieses Tool zielt darauf ab, Kosten und Zeit im Zusammenhang mit dem Entwurf, der Prototypenherstellung und dem Testen eines Li-Ionen-Batteriesystems¹³, das in kommerziellen vollelektrischen Fahrzeugen eingesetzt wird, zu reduzieren. Hierfür werden Werkzeuge zur schnellen Produktkonfiguration und Simulation eingesetzt. (Cicconi et al., 2017)

Die Plattform, wie in Abbildung 2.21 beschrieben, ist in vier Module unterteilt: HD-Tools, KBE, DB und VP-Tools, die im Folgenden beschrieben sind. Der Einsatz dieser Werkzeuge konzentriert sich auf das Design maßgeschneiderter Batterien. Der Input ist die Spezifikation des Batteriesystems mit dem elektrischen Layout, den Betriebsbedingungen und dem Typ und der Größe der zu verwendenden Li-Ionen-Zellen. Das Ergebnis der Designplattform ist die geometrische Anordnung der Batteriezellen, das vereinfachte 3-D-Modell, die Definition der Kühlparameter und die Verteilung der Temperatur in Bezug auf die Betriebsbedingungen. (Cicconi et al., 2017)

¹³ Die Autoren Cicconi, Landi und Germani (2017) verwenden den Begriff „battery pack“. Als Synonym wird in dieser Arbeit einheitlich der Begriff Batteriesystem verwendet.

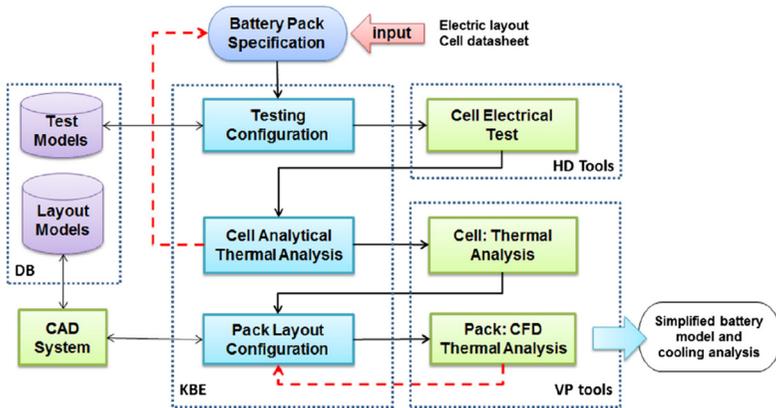


Abbildung 2.21: Batteriesystemdesignplattform nach (Cicconi et al., 2017)

Das *HD-Tool* dient der elektrischen Vermessung der verwendeten Batteriezelle, um diese zu charakterisieren. Das KBE-Modul, ist in drei verschiedene Ebenen unterteilt: *Testing Configuration*, *Cell Analytical Thermal Analysis* und *Pack Layout Configuration*. Ersteres umfasst die Definition der elektrischen Tests, die zur Charakterisierung des Modells einer Li-Ionen-Zelle mit Hilfe von *HD-Tools* verwendet werden. Im zweiten Schritt wird die Wärmeleistung der Batteriezellen über deren thermische Analyse quantifiziert. Mit der *Pack Layout Configuration* wird der Entwickler bei der Definition eines geometrischen Layouts und der Zellanordnung unterstützt. Eine Datenbank stellt eine Sammlung von Schablonen bereit, die mit Hilfe von parametrischen Funktionen, die in einem CAD-System implementiert sind, schnell verändert werden können. Konkret können im Fall der zylindrischen Batteriezellen z. B. die Fluidführung, die Zellanordnung, der Zellabstand und der Volumenstrom variiert werden. Beispielhafte Zellanordnungen und Fluidführungen sind in Abbildung 2.22 skizziert. Der Einsatz eines KBE-Moduls zielt darauf ab, die mit der Phase der Produktkonfiguration verbundene Zeit zu reduzieren, da das vorgeschlagene Werkzeug den Entwickler bei der Entscheidungsfindung unterstützt. Das dritte Modul, die *VP-Tools* basiert auf dem Einsatz von 3D-Simulationen. Hierbei wird zwischen Zell- und Pack-/Batteriesystemebene unterschieden: FEM-Thermoanalyse der Li-Ionen-Zelle (*Cell: Thermal Analysis*) und die CFD-Analyse, die auf den Zellverbund angewendet wird (*Pack: CFD Thermal Analysis*). (Cicconi et al., 2017)

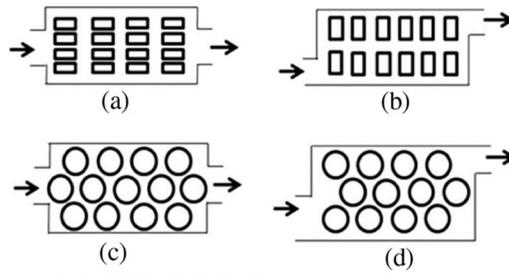


Abbildung 2.22: Beispielhafte Kühl designs für Batteriezellverbände aus prismatischen (a – b) und zylindrischen Zellen (c – d) mit verschiedenen Fluidführungen (Cicconi et al., 2017)

Der Entwurf des Batteriesystems inkl. des Thermomanagements als Ergebnis der Designplattform wird in einem physischen Prototyp mit realen Batteriezellen umgesetzt und auf Fahrzeugebene erprobt. Cicconi et al. (2017) zeigten die Nutzung des beschriebenen Tools mit der anschließenden physischen Umsetzung eines Batteriesystems am Beispiel eines elektrifizierten leichten Nutzfahrzeuges. Für das zu entwickelnde Batteriesystem wurden Pouchzellen ausgewählt. Nachgelagerte Messungen am physischen Prototyp zeigten eine Abweichung der Temperatur im Testfall gegenüber der Simulation von 5 %. Auch die analytische Auslegung zeigte geringe Abweichungen gegenüber den physischen Versuchen. (Cicconi et al., 2017)

2.4.2 Zwischenfazit

Die sieben Schritte zum Design und zur Evaluation eines Thermomanagements für Batteriesysteme nach Pesaran et al. (1999) bilden einen Leitfaden über den gesamten Entwicklungsprozess. Aufgrund der Gültigkeit der Methode für verschiedene Kühlungsarten und Zellformate ist die beschriebene Modellbildung abstrakt gehalten. Dies gilt auch für den Entwicklungsprozess nach Landi et al. (2015), der sich auf die Empfehlung von Modellierungsmethoden und entsprechende Simulationstools (CFD, FEM) beschränkt.

Jayaraman et al. (2011), Cicconi et al. (2014) und Cicconi et al. (2017) waren in der Beschreibung der Modellbildung im Entwicklungsprozess konkreter. Sie zeigten den Einsatz und die Verknüpfung analytischer Modelle mit konzentrierten Parametern und 2D- sowie 3D-CFD- als auch FE-Modellen. Alle Entwicklungsprozesse haben gemein, dass drei Inputgrößen für die virtuelle Modellbildung erforderlich sind:

1. Spezifikationen/Anforderungen an das Thermomanagement des Batteriesystems inkl. eines initialen Designs/Layouts (elektrisch/thermisch) des Batteriesystems
2. auslegungsrelevante thermische Last- und Fahrprofile
3. Daten zur Parametrisierung der Batteriezellmodelle aus Charakterisierungsmessungen der eingesetzten Batteriezelle

Es ist zudem eine klare Tendenz zur virtuellen Modellbildung des Thermomanagements in der frühen Entwicklungsphase von Batteriesystemen zu erkennen. Physische Prototypen kommen meist zur finalen Absicherung des Thermomanagements unter Verwendung realer Batteriezellen zum Einsatz. Jayaraman et al. (2011) nutzen hingegen auch die gemischt physisch-virtuelle Modellbildung in Form von steuerbaren thermischen Modellen in einem physischen Prüfaufbau (vgl. Kapitel 2.5.3), um Simulationsmodelle abzusichern.

2.5 Modellbildung in der Validierung des Thermomanagements

In den folgenden drei Unterkapiteln wird näher auf die virtuelle, physische sowie gemischt physisch-virtuelle Modellbildung zur Validierung des thermischen Verhaltens von Batteriemodulen/-systemen eingegangen. Hierbei liegt der Fokus nicht auf dem gesamten Thermomanagement des Batteriesystems, sondern auf der Batteriezellkühlung. Die Auslegung und Validierung von Wärmetauschern, Pumpen und Kühlmittelleitungen im Batteriesystem und zwischen den Batteriemodulen werden nicht betrachtet.

2.5.1 Virtuelle Modellbildung zur Validierung von Batteriezellkühlungen

Zur Validierung des thermischen Verhaltens von Batteriesystemen und -modulen muss neben der Batteriezellkühlung das thermische Verhalten der Batteriezelle und deren Wärmefreisetzung im jeweiligen Testfall beschrieben sein. Ein thermisches Batteriezellmodell kann thermisch und elektrochemisch bzw. elektrisch gekoppelt oder entkoppelt sein. Ein vollständig gekoppeltes Modell verwendet neu erzeugte Parameter für Strom und Spannung zur Berechnung der Wärmeleistung aus dem elektrochemischen bzw. dem elektrischen Modell. Somit kann die Temperaturverteilung in Bezug auf den elektrischen Zustand durch das thermische Modell vorher-

gesagt werden. Bei einem entkoppelten Modell wird die Batteriezelle als reine Wärmequelle mit entsprechenden thermischen Eigenschaften behandelt, deren Wärmeleistung auf experimentellen Daten beruht. (Q. Wang, Jiang, Li & Yan, 2016) Entsprechende Versuche werden in Kapitel 2.5.4 näher beschrieben.

Xia et al. (2017) kategorisierten Batteriezellmodelle zur Abbildung des thermischen Verhaltens und der Wärmefreisetzung in elektro-thermische Modelle, elektrochemisch-thermische und thermal-runaway Modelle. Hinsichtlich der räumlichen Auflösung wird zwischen konzentrierten Parametermodellen, 1D-, 2D-, 3D- und den bereits beschriebenen gekoppelten Modellen unterschieden. (Xia et al., 2017)

Die gekoppelten Modelle können unterschiedliche Dimensionen aufweisen. So ist das elektrochemische Modell in der Regel ein eindimensionales, auf der Physik basierendes Modell mit einer Reihe von Grundgleichungen, die Kinetik, Transportphänomene und Energiedissipation einer Zelle beschreiben. Ein damit gekoppeltes thermisches Modell kann sowohl ein Modell mit konzentrierten Parametern als auch ein 1D- bis 3D-Modell sein. (Q. Wang et al., 2016) Q. Wang et al. (2016) führen die Grundgleichungen zur elektrochemischen Modellbildung in ihrer Arbeit auf.

In gleicher Form können thermische Modelle mit elektrischen Modellen in Form von Ersatzschaltbildmodellen gekoppelt werden. Typische Ersatzschaltbildmodelle sind im Folgenden beschrieben. Das Rint-Modell (vgl. Abbildung 2.23 (a)) besteht aus einer idealen Spannungsquelle in Reihenschaltung mit einem Widerstand. Das RC-Modell (vgl. Abbildung 2.23 (b)) enthält zwei Kondensatoren und drei Widerstände, um eine der Realität nähere Batteriecharakteristik zu zeigen. Der Kondensator C_b repräsentiert die elektrische Kapazität der Batteriezelle und weist entsprechend eine sehr große Kapazität auf (Waheed, 2016, S. 18). Das Thévenin-Modell (vgl. Abbildung 2.23 (c)) ergänzt das Rint-Modell um ein seriell verschaltetes RC-Glied. Wird das Thévenin-Modell um ein weiteres RC-Glied in Reihe erweitert, handelt es sich um ein sogenanntes Double-Polarization-Modell (DP-Modell) (Huria, Ceraolo, Gazzarri & Jackey, 2012, S. 20–21). Ein Ein- oder Zwei-RC-Glied-Modell ohne parasitären Zweig ist gemäß (Huria et al., 2012) für Li-Ionen-Zellen allgemein akzeptiert. Schließlich wurde das PNGV-Modell (vgl. Abbildung 2.23 (d)) vom Thévenin-Modell mit einer leichten Erhöhung der Schaltungselemente modifiziert. (Q. Wang et al., 2016)

In den folgenden Unterkapiteln wird aufgeführt, wie die beschriebenen Modellierungsansätze in der Validierung von Batteriezellkühlungen auf Batteriemodulebene im Stand der Forschung zum Einsatz kommen. Der Schwerpunkt liegt hierbei, entsprechend dem Fokus der Arbeit, auf der Validierung aktiver Mantelkühlungen an zylindrischen Zellformaten.

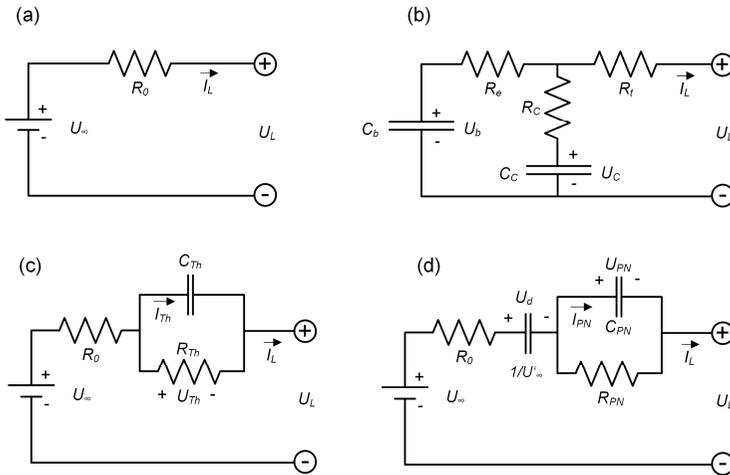


Abbildung 2.23: Verschiedene Ersatzschaltbildmodelle die für Fahrzeugbatterien verwendet werden: (a) Rint-Modell, (b) RC-Modell, (c) Thévenin-Modell und (d) PNGV-Modell (in Anlehnung an H. He, Xiong & Fan, 2011)

Thermische Modelle mit konzentrierten Parametern oder 1D-Modelle

In diesem Kapitel werden Arbeiten aus dem Stand der Forschung aufgeführt, bei denen thermische Batteriezellmodelle mit konzentrierten Parametern oder 1D-Thermomodelle zur Untersuchung des thermischen Verhaltens von Batteriemodulen eingesetzt wurden.

Motapon, Lupien-Bedard, Dessaint, Fortin-Blanchette und Al-Haddad (2017) haben ein generisches elektro-thermisches Batteriemodell mit konzentrierten Parametern entwickelt. Ziel der Arbeit war eine Minimierung des Aufwandes zur Parametrisierung des Modells. Hierfür wird auf Informationen aus dem Datenblatt der Batteriezelle und auf wenige Versuche bei Umgebungstemperatur zurückgegriffen. Zur Parametrisierung des thermischen Modells sind allerdings Versuche am Batteriepack/modul notwendig. (Motapon et al., 2017) Entsprechend ist dieser Modellierungsansatz nur für bereits physisch vorliegende Batteriemodule/-systeme geeignet.

X. Li, He und Ma (2013) hatten auf Basis eines transienten 2D-CFD-Modells ein thermisches Modell eines luftgekühlten Batteriemoduls mit konzentrierten Parametern entwickelt. Das Modell basiert auf der Umströmung von Rohren mit identischer Oberflächentemperatur. Um der inhomogenen Temperaturverteilung im Modul gerecht zu werden, wurde der Zellverbund in zwei Zonen (vgl. Abbildung 2.24) eingeteilt. Die Temperatur der Batteriezellen innerhalb einer Zone ist identisch (Zone 1: T_s , Zone 2: T_{max}). X. Li et al. (2013) koppelten die beiden Zonen, unter Annahme einer jouleschen Wärmefreisetzung ($I^2 * R$) jeder Zelle, wie sie auch im CFD-Modell hinterlegt wurde. Hierfür wurde ein temperaturabhängiger Innenwiderstand der Zelle nach (C. Park & Jaura, 2003) angenommen. Durch einen Abgleich mit dem CFD-Modell konnte unter konstantem Entladestrom eine hinreichend genaue Vorhersage der maximalen Temperatur im Zellverbund über das konzentrierte Parametermodell nachgewiesen werden. Aufgrund der Einfachheit des Modells empfehlen die Autoren dessen Einsatz für In-Situ-Analysen oder für die aktive Regelung des Thermomanagements. (X. Li et al., 2013)

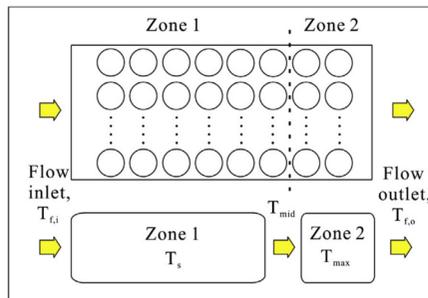


Abbildung 2.24: Schema des zwei Zonen-Modells zur Vorhersage der maximalen Zelltemperatur in einem luftgekühlten Batteriemodul (X. Li et al., 2013)

Das von Pesaran (2002) vorgestellte thermische Batteriezellmodell mit konzentrierten Parametern teilt den Zellwickel und das Zellgehäuse in zwei separate isothermische Massen auf. Die Wärmeerzeugung im Zellwickel wird über die joulesche Verlustleistung und den coulombschen Wirkungsgrad¹⁴ modelliert. Dieses Modell ermöglicht die Vorhersage von Temperaturänderungen in der Fahrzeugbatterie je nach Fahrzyklus, Luftkühlungsdurchsatz und Batteriezelltyp. Da das gekoppelte

¹⁴ Der coulombsche Wirkungsgrad ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen entnommener elektrischer Energie beim Entladen und zugeführter Energie beim Laden einer Batteriezelle.

Das gleiche thermische Netzwerk nutzten Mahamud und Park (2011), um den Einfluss einer Richtungsumkehr der Luftkühlung in einem Batteriemodul ohne strömungsführende Elemente zu untersuchen. Zudem wurde ein valides 2D-CFD-Modell, bei welchem die Batteriezellen mit einer homogenen Wärmestromdichte und einer isotropen Wärmeleitfähigkeit modelliert wurden, zum Modellabgleich herangezogen. Auch wenn die mehrdimensionale CFD-Modellierung für die Analyse komplexer Batteriesysteme unerlässlich ist, wären laut Mahamud und Park (2011) zeiteffiziente thermische Modelle mit konzentrierten Parametern unter Verwendung geeigneter Wärmeübertragungskorrelationen für aufwendige Berechnungen sehr geeignet. Als Beispiele führten die Autoren die Vorhersage der Batterielebensdauer auf der Grundlage von Lastzyklen der Batterie sowie Echtzeit-Batterietemperaturvorhersagen und -regelungen auf. (Mahamud & Park, 2011)

S. Park und Jung (2013) setzen für ihre Parameterstudie ein thermisches 1D-Modell der zylindrischen Batteriezelle ein, um die ungleiche Temperaturverteilung in radialer Richtung bei der Umströmung des Zellmantels mit Kühlfluid zu berücksichtigen. Die Studie wurde für ein Batteriemodul aus 88 Zellen durchgeführt. Der Zellanordnungsabstand, die Zellanordnung und damit das Seitenverhältnis des Moduls, die Wärmeleistung der Batteriezellen und das Kühlfluid (Luft und Mineralöl) u. w. wurden variiert. In Abbildung 2.26 ist beispielhaft die Batteriezellkühlung mit Luft und den beschriebenen Parametern abgebildet.

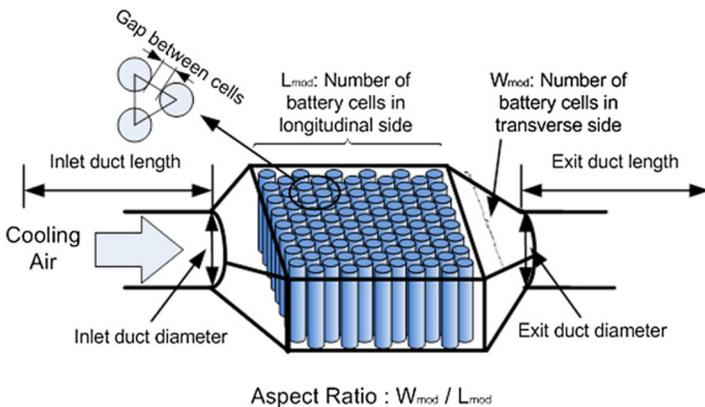


Abbildung 2.26: Parameter der Studie zur Simulation eines luftgekühlten Batteriemoduls (S. Park & Jung, 2013)

Die Wärmeleistung wurde über die joulesche Verlustleistung berechnet. Das thermische Modell wurde durch Messung der Kern- und der Manteltemperatur der äquivalenten Batteriezelle im Experiment verifiziert. Wie bei C. Park und Jaura (2003) sowie Mahamud und Park (2011) basieren die mittleren Wärmeübergangskoeffizienten am Zellmantel auf empirischen Berechnungsmodellen nach dem Stand der Technik. Mithilfe der Simulationsergebnisse konnten der kühlfluidspezifische Energieverbrauch des Thermomanagements bewertet und Parameter für einen minimalen Temperaturunterschied zwischen den Batteriezellen im Batteriemodul identifiziert werden. (S. Park & Jung, 2013)

Thermische 2D- und 3D-Modelle

Dieses Kapitel führt Arbeiten aus dem Stand der Forschung auf, bei denen thermische 2D- oder 3D-Batteriezellmodelle eingesetzt wurden, um das thermische Verhalten auf Modulebene zu untersuchen.

Eine ähnliche Parameterstudie wie S. Park und Jung (2013), unter Verwendung konzentrierter Parametermodell haben Zhao, Rao, Huo, Liu und Li (2015) mit einem 2D-CFD-Modell durchgeführt. An einem Batteriemodul aus 24 zylindrischen Zellen wurden die Auswirkungen verschiedener Strömungsführungen der Luft, der Spaltabstände zwischen benachbarten Zellen, der Temperatur der Umgebung und der Eingangsluft sowie des Batteriezelldurchmessers auf die Zelltemperaturen untersucht (vgl. Abbildung 2.27). Daraus wurden Erkenntnisse über den Einfluss der untersuchten Parameter auf die Temperaturverteilung der Batteriezellen gewonnen.

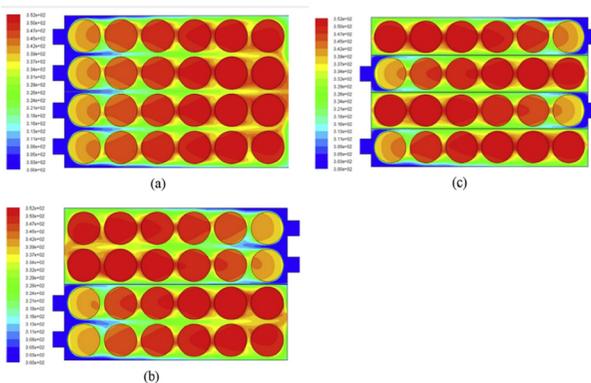


Abbildung 2.27: Temperaturverteilung für die untersuchten drei Strömungsführungen (a – c) (Zhao, Rao, Huo et al., 2015)

Die Wärmeleitfähigkeit der Batteriezelle wurde in der betrachteten Ebene als isotrop und die Wärmeleistung als homogen und konstant modelliert. Der Ursprung der verwendeten Parameter des thermischen Modells wurden in der Veröffentlichung nicht genannt. (Zhao, Rao, Huo et al., 2015)

Jilte et al. (2019) untersuchten den Einfluss einer radialen Strömungsführung (vgl. Abbildung 2.28 oben) auf die Temperaturverteilung und den Druckverlust in einem luftgekühlten Batteriemodul. Verglichen wurden die Ergebnisse mit einer freien Umströmung der zylindrischen Zellen (vgl. Abbildung 2.28 unten), wie sie bspw. Zhao, Rao und Huo et al. (2015) mittels 2D-Simulationen untersucht haben. Über transiente 3D-CFD-Simulationen wurden die beiden Strömungsführungen untersucht. Die Wärmeleistung der Zelle wurde über die Entropieänderung und die joulesche Verlustleistung modelliert. Letztgenannte wurde über ein temperaturabhängiges Widerstandspolynom und dem Entladestrom berechnet. Auf Basis der radialen Wärmeleitfähigkeit der realen Batteriezelle wurde das thermische Zellmodell als isotroper Körper modelliert. Die Validierung des Modells erfolgte über den experimentellen Abgleich der Temperaturverläufe mit einer axial luftumströmten Batteriezelle unter konstantem Entladestrom. (Jilte et al., 2019)

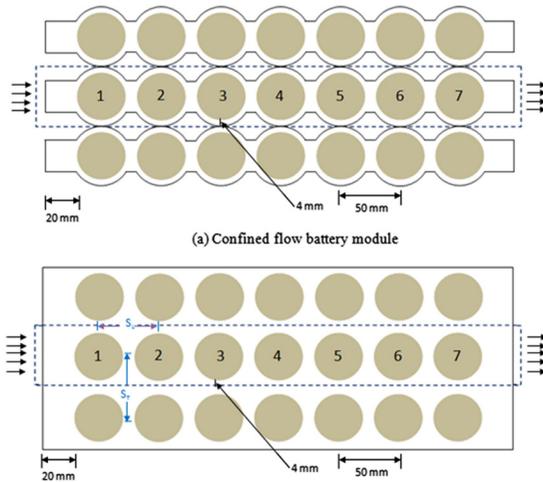


Abbildung 2.28: Batteriezellkühlung mit radialer Strömungsführung (oben) und freier Umströmung (unten) (Jilte et al., 2019)

N. Yang, Zhang, Li und Hua (2015) untersuchten den Einfluss von Längs- und Querabständen zwischen zylindrischen Batteriezellen auf deren Kühlung bei einer Quenumströmung. Hierfür wurde eine fluchtende und eine versetzte Zellanordnung in einem 2D-CFD-Modell simuliert. Neben der Variation der Zellanordnung wurden Zellabstand und strömungsführende Elemente am Moduleingang hinsichtlich ihres Einflusses auf die Temperaturverteilung zwischen den Zellen und dem Leistungsbedarf der Luftkühlung untersucht. Das thermische Batteriezellmodell wurde sehr detailliert als Wickel aufgebaut und mit einem 1D-elektrochemischen Modell gekoppelt. Die Daten zur Modellparametrisierung wurden teilweise experimentell ermittelt, vom Zellhersteller zur Verfügung gestellt oder wurden anderen Literaturquellen entnommen. Verifiziert wurde das Batteriezellmodell über den Abgleich des Spannungs- und Temperaturverlaufs in einem Versuch mit einer einzelnen Zelle. (N. Yang et al., 2015)

Die Modellbildung der Batteriezelle in der Parameterstudie von T. Yang, Yang, Zhang und Li (2016) unterscheidet sich nur in der Dimension des thermischen Modells. Da ein Modul aus axial gestapelten Batteriezellen in Kombination mit einer axialen Strömungsführung der Luft in den Hohlräumen zwischen den Batteriezellen untersucht wurde, wurde ein 3D-CFD-Modell eingesetzt. Das elektrische und thermische Verhalten des gekoppelten thermo-elektrochemischen Batteriemodells unter Berücksichtigung der Kühlungsrandbedingungen wurde auch in dieser Veröffentlichung in einem Experiment an einer einzelnen Batteriezelle abgesichert. (T. Yang et al., 2016)

Lu et al. (2016) widmeten sich einer ähnlichen Fragestellung wie T. Yang et al. (2016). Gestapelte als auch in dichtester Packung angeordnete Zellen wurden über die sich ergebenden Hohlräume mit Luft gekühlt. Zellabstände, Anzahl der durchströmten Hohlräume und weitere Parameter wurden in einer stationären 3D-CFD-Simulation variiert, um eine homogene und niedrige Temperaturverteilung zu erhalten. Die Zellmodellierung ist nicht näher beschrieben. Ein konstanter Wärmestrom wurde auf der Zelloberfläche aufgeprägt, welche auf der Wärmeleistung der Batteriezelle in verschiedenen Lade- und Entladeströmen basiert. Die Validierung der Strömungssimulation erfolgte über ein analytisches Modell, welches die Wärmeübergabe in den Hohlräumen in Form von thermischen Widerständen (R_{con} , R_{adv}) abbildet (vgl. Abbildung 2.29).

Auch Sefidan, Sojoudi und Saha (2017) nutzten ein thermo-elektrochemisches Batteriezellmodell, um eine nanofluidbasierte Kühlung in Kombination mit einer Luftkühlung zu untersuchen. In einer Parameterstudie wurden verschiedene Strömungsführungen der Luft sowie Zellanordnungen evaluiert. Die Validierung des

Modells erfolgte über den Abgleich von Temperatur, Spannungsverlauf und Wärme-freisetzung in Versuchen an einzelnen Zellen. Im thermischen Modell wurde zwischen der Wärmeleitfähigkeit in axialer, radialer und tangentialer Richtung unterschieden. (Sefidan et al., 2017)

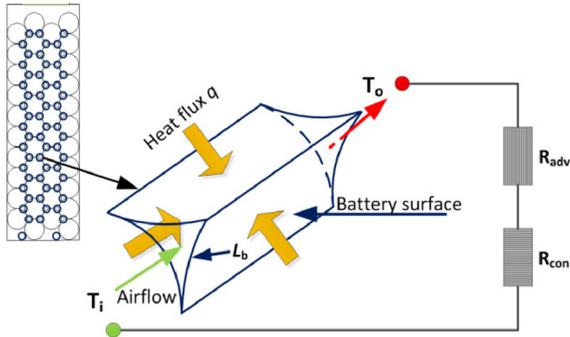


Abbildung 2.29: Schematische Darstellung des analytischen thermischen Widerstandsmodells (rechts) für einen einzelnen Hohlraum in Zellverbund (links) (Lu et al., 2016)

Für den Vergleich verschiedener Zellanordnungen in Kombination mit unterschiedlicher Position des Fluidein- und -ausgangs in einem luftgekühlten Batteriemodul nutzen T. Wang, Tseng, Zhao und Wei (2014) ein 3D-CFD-Modell. Die Batteriezellen wurden als homogene Körper mit homogener Wärmefreisetzung modelliert. Die Wärmeleistung der Batteriezelle unter konstanter C-Rate wurde in Versuchen an einzelnen Zellen mit adiabaten Randbedingungen ermittelt. Bei der Wärmeleitfähigkeit wurde zwischen axialer und radialer Wärmeleitung unterschieden. Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeiten wurden über die Einzelmaterialien der Batteriezelle berechnet. (T. Wang et al., 2014)

2.5.2 Physische Modellbildung zur Validierung von Batteriezellkühlungen

In diesem Kapitel werden Arbeiten aufgeführt, die Versuche an physischen Prototypen auf Modulebene nutzen, um die jeweilige Batteriezellkühlung zu validieren.

Die experimentellen Untersuchungen an einem luftgekühlten Batteriemodul (vgl. Abbildung 2.30) von Saw et al. (2016) wurde durch eine 3D-CFD-Simulation ergänzt, um das Strömungsfeld der Kühlung zu verstehen. Dieser Erkenntnisgewinn ist nur

begrenzt mit experimentellen Untersuchungen möglich. Die Batteriezellen wurden als homogene Körper mit anisotroper Wärmeleitfähigkeit nach Mahamud und Park (2011) modelliert. Für die stationäre Simulation wurde die durchschnittliche Wärmeleistung unter konstantem Entladestrom angenommen und homogen über den Zellkörper verteilt. Mithilfe der Simulationsergebnisse im stationären Zustand sollte das transiente Verhalten bei unterschiedlichen Laderaten vorhergesagt werden. (Saw et al., 2016)

Mit dem in Abbildung 2.30 dargestellten Prüfaufbau wurden Versuche mit unterschiedlichen Ladeströmen und Volumenströmen der Luftkühlung durchgeführt, um das transiente Verhalten des Batteriemoduls zu untersuchen. Zudem wurde über weitere Versuche die CFD-Simulation verifiziert. Diese Kombination aus Simulation und experimentellen Versuchen ermöglichen laut den Autoren in einfacher Weise, die thermische Leistung eines großen Batteriesystems abzuschätzen, wenn eine vollständige transiente Simulation nicht durchführbar ist. (Saw et al., 2016)

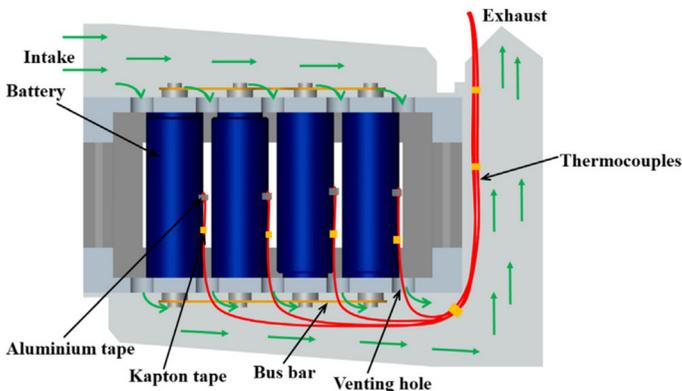


Abbildung 2.30: Querschnittsansicht des untersuchten Batteriemoduls mit der Position der Thermoelemente und der Richtung des Luftstroms (grün) (Saw et al., 2016).

Shahid und Agelin-Chaab (2018) untersuchten eine Luftkühlung mit zwei Einlasskanälen, um die Temperaturhomogenität in einem Batteriezellverbund zu verbessern. Der zweite Einlass ändert die Strömungsrichtung im Zellverbund und beeinflusst die Luftumwälzung und die Totwassergebiete zwischen den Batteriezellen. Die Abmessungen des zweiten Lufteinlasses und die Strömungsgeschwindigkeiten wurden mittels stationärer 3D-CFD-Simulationen optimiert. Mit einem physischen Prüfaufbau (vgl. Abbildung 2.31), der eine Variante der simulierten Strömungsführungen

abbildet, wurden zwei verschiedene Versuche durchgeführt. In einem Versuch wurde mittels Wärmestromsensor auf der Zellmantelfläche die Wärmeleistung je Zelle bei konstantem Entladestrom ermittelt. Aus dem Wärmestromverlauf wurde eine mittlere Wärmeleistung als Inputgröße für die Simulation berechnet. Der zweite Versuch wurde genutzt, um die Simulation über den Abgleich mehrerer Zellmanteltemperaturen zu validieren.

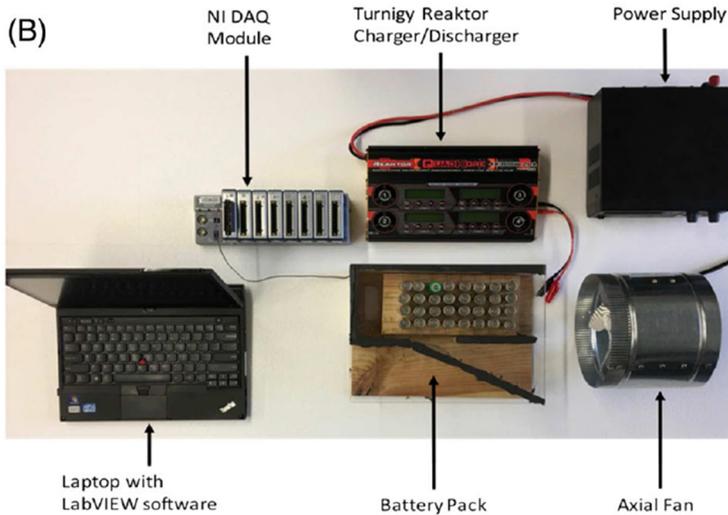


Abbildung 2.31: Prüfaufbau zur Untersuchung einer Luftkühlung mit zwei Einlasskanälen (Shahid & Agelin-Chaab, 2018)

X. Li et al. (2013) hatten ein transientes 2D-CFD-Modell entwickelt, um detaillierte Simulationen zu thermischen Problemstellungen in luftgekühlten Batteriemodulen unter konstanten Lade-/Entladeströmen durchzuführen. Temperaturinhomogenitäten im Modul konnten identifiziert werden. Verifiziert wurde die Modellbildung über den Abgleich mit einem kleineren Batteriemodul mit weniger Zellen in einem Windkanal unter verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten. Hierfür wurde der Temperaturanstieg an zwei Zellen des Moduls herangezogen. Der Prüfaufbau sowie die Temperaturmessstellen im Modul sind in Abbildung 2.32 beschrieben. Die Wärmeleistung der Zelle wurde im CFD-Modell über die joulesche Verlustleistung mit einem temperaturabhängigen mittleren Innenwiderstand entsprechend (C. Park & Jaura, 2003) und dem elektrischen Strom berechnet. (X. Li et al., 2013)

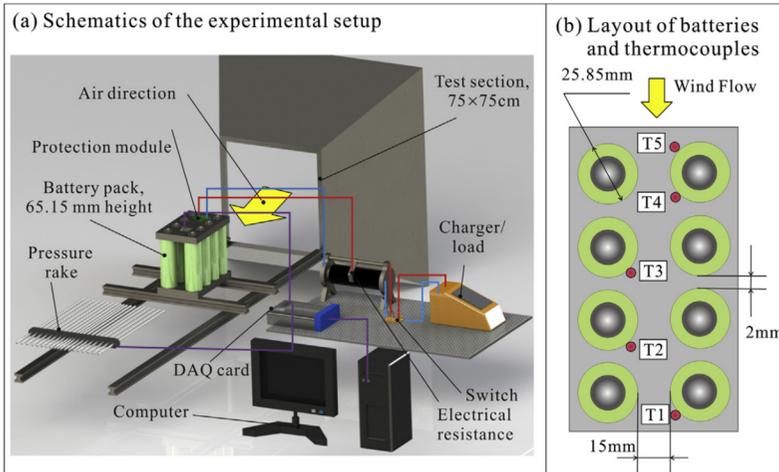


Abbildung 2.32: Prüfaufbau zur Untersuchung eines luftgekühlten Batteriemoduls im Windkanal (X. Li et al., 2013)

F. He, Li und Ma (2014) griffen in ihrer Arbeit den Prüfaufbau und das CFD-Modell aus (X. Li et al., 2013) auf und erweiterten diese. Neben der Temperatur- wurde auch die Druckverteilung unter verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten, Lade- und Entladeströmen an verschiedenen Modulkonfigurationen am Prüfaufbau untersucht. Im Gegensatz zu dem in (X. Li et al., 2013) beschriebenen CFD-Modell wurde die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleistung bei konstantem Entladestrom vernachlässigt und stattdessen die SoC-abhängige Wärmeleistung modelliert. Die Wärmeleistung wurde bedingt durch den konstanten Strom im Versuch als Funktion der Zeit beschrieben. Diese Funktion wurde für unterschiedliche Lade- und Entladeströme durch Anpassung der Koeffizienten anhand von Versuchsdaten bestimmt. Die Druck- und Temperaturverteilungen aus den Versuchen wurden im Zuge der Modellverifikation mit den Ergebnissen der CFD-Simulation verglichen. Zur Berechnung des Druckverlustes und der Leistungsaufnahme der Kühlung für verschiedene Modulkonfigurationen wurde das CFD-Modell verwendet. (F. He et al., 2014)

Y.-W. Wang, Jiang, Chung, Chen und Shu (2019) evaluierten die aktive Luftkühlung eines Batteriemoduls alleinig über physische Versuche. Evaluationskriterien waren die maximale Temperatur und der maximale Temperaturunterschied zwischen den Zellen des Moduls. Hierfür wurden acht Batteriezellen mit einem Thermoelement versehen (vgl. Abbildung 2.33 (c)). Zwei unterschiedliche Strömungsführungen in zwei Modulgehäusen (vgl. Abbildung 2.33 (a), (b)) wurden untersucht. Hierfür wurde

das Batteriemodul in einer Versuchsreihe wiederholt mit konstanten Lade- und Entladeströmen belastet. Letztere wurden zwischen den Versuchsreihen variiert, um die Leistungsgrenzen der Kühlung zu identifizieren. (Y.-W. Wang et al., 2019)

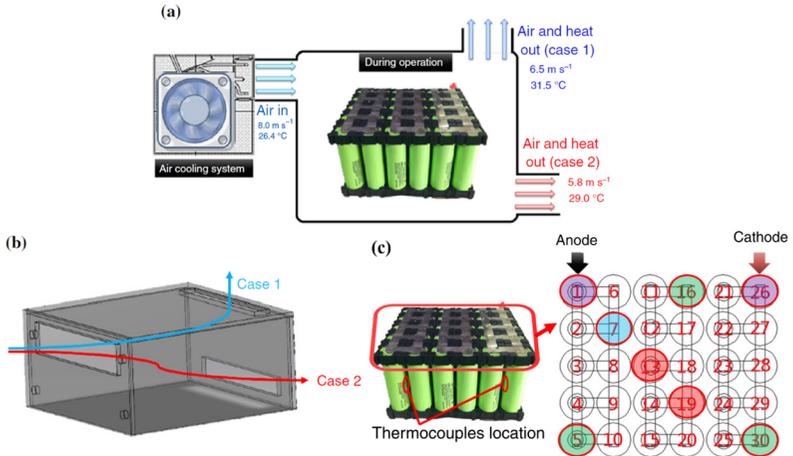


Abbildung 2.33: Prüfaufbau zur Untersuchung einer Luftkühlung an einem Batteriemodul: (a) Schema des Kühlsystems zur Untersuchung zweier Luftführungen, (b) zwei Modulgehäusedesigns zur Luftstromführung, (c) elektrische Verschaltung der Batteriezellen im Modul und Position der Thermoelemente (Batteriezellen mit Sensoren farblich gekennzeichnet) (in Anlehnung an Y.-W. Wang et al., 2019)

2.5.3 Gemischt physisch-virtuelle Modellbildung zur Validierung von Batteriezellkühlungen

Dieses Kapitel beschreibt Arbeiten, in denen das Kühldesign eines Batteriemoduls durch gemischt physisch-virtuelle Modellbildung untersucht wurde. Neben Versuchen an zylindrischen Batteriezellen werden auch Untersuchungen an anderen Zellformaten beschrieben.

Die beiden von Hémary et al. (2014) untersuchten Batteriezellkühlungen auf Batteriemodulebene basieren auf einer aktiven Luftkühlung sowie einer PCM-Kühlung in Kombination mit einer aktiven Flüssigkeitskühlung. Das Batteriemodul mit aktiver

Luftkühlung besteht aus in drei Ebenen gestapelten Zellen, die axial mit Luft umströmt werden. Die passiv-aktive Kühlung kombinierte eine PCM-Mantelkühlung mit einer aktiven Kühlung des PCM über Kühlplatten. Erstgenanntes Batteriemodul wird unter verschiedenen Anströmungsgeschwindigkeiten untersucht. Beide Kühlkonfigurationen wurden thermischen Belastungen ausgesetzt, die eine konstante Ladung oder Entladung, einen kurzen Fahrzyklus sowie einen thermischen Defekt, wie z. B. ein thermischer Ausfall einer einzelnen Zelle in der Mitte des Moduls, simulieren. (Hémery et al., 2014)

Aus Sicherheitsgründen wurden keine realen, sondern thermische Batteriezellmodelle zur äquivalenten Wärmefreisetzung einer Batteriezelle des Formats 26650 eingesetzt. Jede Zelle besteht aus einem elektrischen Heizer mit einem Stahlmantel. Entsprechend der Modulgröße wurden 26 seriell verschaltete Ersatzbatteriezellen verwendet, die mit einem steuerbaren Netzgerät mit Strom versorgt werden. Zur Abbildung des thermischen Defekts einer einzelnen Zelle wurde diese thermische Ersatzzelle separat an einem Netzteil angeschlossen. Versuche an einzelnen Batteriezellen waren vorgelagert, um die Wärmeleistung der elektrischen Heizer zu steuern. Eine reale Batteriezelle wurde mit je einem Temperatursensor am Mantel und im Kern versehen und mit verschiedenen konstanten Strömen entladen. Die Wärmeleistung wurde auf Grundlage der Temperaturdifferenz zwischen der Kern- und Manteltemperatur der realen Zelle geschätzt. Unter Annahme einer konstanten Wärmeleistung bei konstantem Entladestrom wurde die Heizleistung der Batteriezellmodelle in den Verifikationsversuchen konstant gehalten. Dabei wurde die Manteltemperatur der Ersatzzelle mit der Mantel- und Kerntemperatur der echten Batteriezelle verglichen. (Hémery et al., 2014)

Lyu et al. (2019) nutzten ebenfalls eine thermische Ersatzbatteriezelle aus einem elektrischen Heizer in einem Aluminiummantel im Zellformat 18650, um ein Thermomanagementsystem an einer einzelnen Zelle zu erproben. Bei dem untersuchten Thermomanagementsystem handelte es sich um einen Hybrid aus thermoelektrischer Kühlung (TEC), erzwungener Konvektion und Flüssigkeitskühlung (vgl. Abbildung 2.34 (c)). Diese wurde mit einer Kühlung unter natürlicher Konvektion und einer reinen Flüssigkeitskühlung verglichen. Bewertungsgrundlage war der Temperaturverlauf an der Mantelfläche der thermischen Ersatzzelle bei verschiedenen konstanten Heizleistungen. Zusätzlich wurde die Zelle mit Kupfer ummantelt (vgl. Abbildung 2.34 (b)), um den direkten Kontakt des Zellmantels mit der Kühlfüssigkeit zu vermeiden. Die Heizleistung der Batteriezellen wurde auf Grundlage der Wärmeleistung großformatiger Batteriezellen aus mehreren Literaturquellen berechnet. (Lyu et al., 2019)

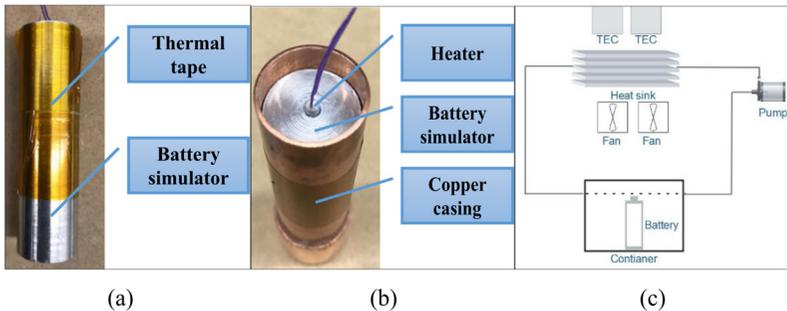


Abbildung 2.34: (a) Thermische Ersatzbatterie zelle (Battery simulator), (b) thermische Ersatzbatterie zelle mit integriertem Heater sowie einem zusätzlichen Kupfermantel, (c) Schematische Darstellung des Prüfaufbaus zur Untersuchung der hybriden Kühlung (TEC, erzwungene Konvektion über Lüfter, Flüssigkeitskühlung der Zelle im „Container“) (Lyu et al., 2019)

Der Einsatz thermischer Ersatzbatterie zellen in der Arbeit von Jayaraman et al. (2011) wurde bereits in Kapitel 2.4 beschrieben. In Abbildung 2.35 ist der Prüfaufbau zur Absicherung der simulierten Zelltemperatur und des angenommenen Wärmübergangs zwischen Batterie zelle und Kühlfinne dargestellt. Der Prüfaufbau stellt einen Ausschnitt des Batteriesystems dar, in dem die Zellen über Mikrokanäle in den Kühlfinnen mit Kühlfluid gekühlt werden. Ausgewertet wurde die Temperaturverteilung im stationär eingeschwungenen Zustand. Die Ersatzzelle besteht aus einem Aluminiumkörper im Pouchzellenformat und einem eingelassenen elektrischen Heizer (vgl. Abbildung 2.35). Entsprechend des angenommenen Wärmequellterms wurden die Heizer mit Strom versorgt. (Jayaraman et al., 2011)

Bei der Firma Behr kommen sogenannte Zelldummies für die thermische Validierung des Thermomanagements auf Komponentenebene zum Einsatz (vgl. Abbildung 2.36). Wiebelt, Isermeyer, Siebrecht und Heckenberger (2009) sahen den Einsatz der thermischen Ersatzzellen als besonders hilfreich an, um Versuche durchzuführen, auch wenn die realen Zellen noch nicht verfügbar sind. Die verwendeten Dummies bilden die anisotrope Wärmeleitfähigkeit, als auch die Wärmekapazität einer realen Batterie zelle ab. Über Heizfolien wird eine realitätsnahe Wärmeleistung eingebracht, die sich aus den Innenwiderständen der Zelle ergibt, welche abhängig von Temperatur, Ladezustand (SoC) und der Lade- bzw. Entladerate sind. (Wiebelt et al., 2009) Auch Seegert, Herberger, Loges und Wiebelt (2020) beschreiben die Vorteile thermischer Ersatzbatterie zellen zur Verkürzung von Entwicklungszeiten. Die Entwicklungsmethodik zum Aufbau und zur Validierung des thermischen

Verhaltens einer solchen Ersatzbatterie zelle im Pouchformat wurde in (Seegert et al., 2020) aufgezeigt.

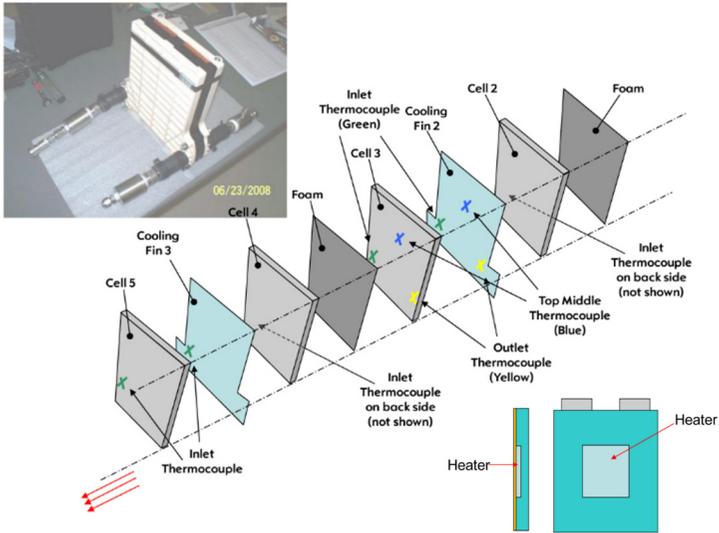


Abbildung 2.35: Physischer Prüfaufbau einer Batteriezellkühlung unter Verwendung thermischer Ersatzbatteriezellen (Zelldummies) (in Anlehnung an Jayaraman et al., 2011)

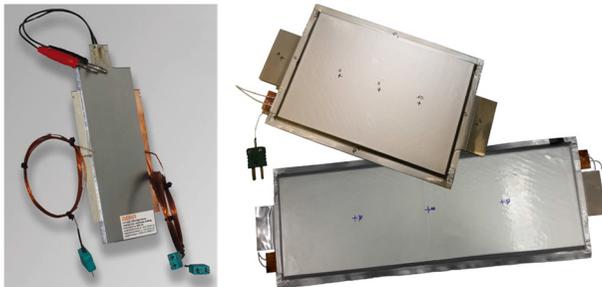


Abbildung 2.36: Thermische Ersatzzellen (Pouchzellen) zur realitätsnahen, thermischen Untersuchung vom Thermomanagement (Seegert et al., 2020 (rechts); Wiebelt et al., 2009 (links))

Troxler et al. (2014), Rizzo, Christen und Stöck (2016) sowie Christen, Rizzo, Galdola und Stöck (2017) wandten eine andere Form der gemischt physisch-virtuellen Modellbildung bei ihren Untersuchungen mit prismatischen Batteriezellen an. Im Gegensatz zu den zuvor aufgeführten Arbeiten wurde nicht die Zelle, sondern die Batteriezellkühlung an einer realen Batteriezelle gemischt physisch-virtuell modelliert.

Mit dem Prüfaufbau von Troxler et al. (2014) können zwei Seiten einer prismatischen Batteriezelle unterschiedlich temperiert werden, um realistische Kühlzustände eines Thermomanagements in einem Batteriemodul abzubilden. Solche Temperaturunterschiede können beispielsweise an außenliegenden Zellen eines Batteriemoduls auftreten. Wenn diese Zellen einseitig aktiv gekühlt werden, kann Wärme an der gegenüberliegenden Seite nur über natürliche Konvektion abtransportiert werden. Zur Abbildung dieses Zustandes wird die Oberflächentemperatur der gegenüberliegenden Seiten einer Batteriezelle mit je einem thermoelektrischen Kühlelement oder Peltier-Element geregelt. Diese können je nach Stromrichtung einseitig heizen oder kühlen. Wie in Abbildung 2.37 zu erkennen, liegt auf der gegenüberliegenden Seite eines jeden Peltier-Elements eine Wasserkühlung an, welche als Wärmesenke oder -quelle dient. (Troxler et al., 2014)

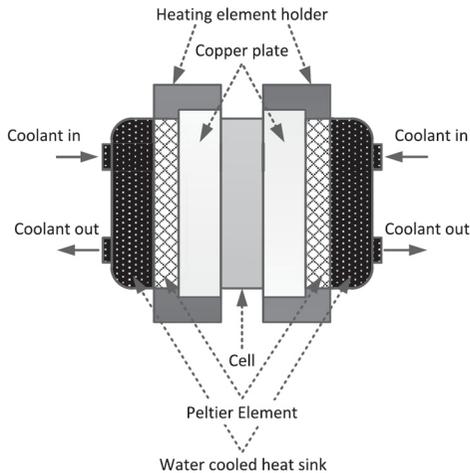


Abbildung 2.37: Prüfaufbau zur Aufprägung eines Temperaturgradienten auf eine prismatische Batteriezelle unter Verwendung von zwei Peltier-Elementen und einer Wasserkühlung (Troxler et al., 2014)

Der Prüfaufbau wurde von Troxler et al. (2014) für eine Reihe von Tests verwendet, um den Einfluss von Temperaturgradienten in der Batteriezelle auf deren Impedanz zu untersuchen. Hierfür wurde der SoC und die Temperaturen variierte sowie Entropieeffekte bei den verschiedenen SoC untersucht.

Rizzo et al. (2016) erweiterten den Prüfaufbau von Troxler et al. (2014), um den Einfluss lokaler Kühlzonen auf die Oberflächentemperaturverteilung und die Wärmestromdichten zu untersuchen. Das angewandte Verfahren zur lokalen Wärmeflussmessung wurde von Murashko, Mityakov, Pyrhönen, Mityakov und Sapozhnikov (2014) vorgeschlagen und zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität einer Pouchzelle verwendet (Murashko et al., 2014). Mit dem von Rizzo et al. (2016) sowie Christen et al. (2017) vorgestellten Prüfaufbau können an fünf Seiten einer prismatischen Batteriezelle thermische Randbedingungen lokal beeinflusst und messtechnisch erfasst werden (vgl. Abbildung 2.38 oben). Dies erfolgt über Messstempel, die homogen auf der Zelloberfläche verteilt und angepresst sind. Die lokale Temperatur und Wärmestromdichte können gemessen und aktiv geregelt werden. Die Regelstruktur der beiden Betriebsarten Wärmestrom- und Temperaturregelung über entsprechende PI-Regler ist in der Abbildung 2.38 dargestellt. (Christen et al., 2017; Rizzo et al., 2016)

Während des Betriebs der eingespannten Batteriezelle können somit Zonen auf konstanter Temperatur gehalten und der sich einstellende Wärmestrom gemessen werden. Die verbleibenden Oberflächenbereiche der Zelle werden auf eine feste Wärmestromdichte geregelt, um die thermischen Randbedingungen einer im Modul verbauten Batteriezelle abzubilden. So können beispielhaft thermische Isolationen durch die Vorgabe adiabater Randbedingungen simuliert werden. (Christen et al., 2017; Rizzo et al., 2016)

Nach Rizzo et al. (2016) bietet das vorgestellte System einerseits eine hohe Flexibilität der Messwerterfassung und ermöglicht zudem beliebige Kühlvarianten im Betrieb nachzubilden. Entsprechend kann der Entwickler das entworfene Batteriemoduldesign hinsichtlich der geforderten thermischen Eigenschaften verifizieren und Variationen des Kühlkonzepts regelungstechnisch erproben. (Rizzo et al., 2016)

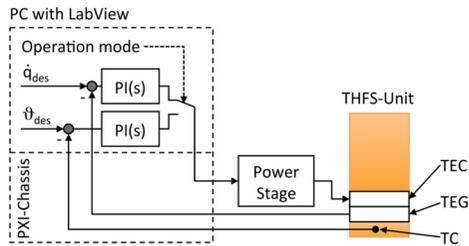


Abbildung 2.38: Oben: Untere Hälfte der Messeinrichtung – Messstempel rechtwinklig angeordnet. Unten: Struktur des implementierten Regelalgorithmus eines Temperatur-Wärmefluss-Sensors (THFS = Messstempel) mit zwei verschiedenen Betriebsarten.; PI: PI-Regler; TEC: thermoelektrischer Kühler; TEG: thermoelektrischer Generator; TC: Thermoelement. (Christen et al., 2017; Rizzo et al., 2016)

2.5.4 Thermische und elektrische Charakterisierung von Batteriezellen

Wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben, sind für die virtuelle Modellierung einer Batteriezelle Messdaten notwendig, um das thermische und elektrische Verhalten durch entsprechende Modellparameter abbilden zu können. Zur batteriezellenspezifischen Ermittlung dieser Parameter werden die Zellen in Messungen thermisch und elektrisch charakterisiert. Auf die Vermessung von Batteriezellen zur Parametrisierung elektrochemischer Modelle wird im Rahmen dieser Arbeit nicht eingegangen.

Im Folgenden werden Messverfahren vorgestellt, um thermische Modelle und gekoppelte oder entkoppelte elektrische Modelle einer zylindrischen Batteriezelle zu parametrisieren.

Verfahren zur thermischen Charakterisierung zylindrischer Batteriezellen

Die in diesem Kapitel beschriebenen Verfahren dienen der Bestimmung der folgenden thermischen Parameter zylindrischer Batteriezellen:

- Wärmeleitfähigkeiten in radialer und axialer/tangentialer Richtung zylindrischer Batteriezellen
- spezifische Wärmekapazität der Batteriezelle
- Wärmefreisetzung (reversibel und irreversibel) beim Laden und Entladen

Je nach Detaillierungsgrad des thermischen Modells können die ersten beiden Parameter für die Zelle als Ganzes oder für die einzelnen Komponenten (Gehäuse und Zellwickel) oder sogar für einzelnen Zellwickelkomponenten (Anodenmaterial, Kathodenmaterial, Aluminium, Kupfer und mit Elektrolyt getränkter Separator) bestimmt werden.

Die Wärmeleitfähigkeit kann somit durch die Verschaltung der Wärmeleitfähigkeit der Einzelmaterialien parallel in der Wickelebene und seriell senkrecht zu den Wickellagen berechnet werden (Werner, Loges, Becker & Wetzel, 2017; Xia et al., 2017). Nach Ye, Saw, Shi, Somasundaram und Tay (2014) kann allerdings die Vernachlässigung der thermischen Kontaktwiderstände zwischen den Materialien zu einer Überschätzung der Wärmeleitfähigkeit senkrecht zur Schichtung führen (Ye et al., 2014). Ebenso kann die Wärmekapazität der Batteriezelle durch Addition der einzelnen Komponentenanteile berechnet werden (Schmidt, 2013, S. 38). Dies erfordert jedoch detaillierte Informationen über die Zellstruktur, die nach Murashko et al. (2014) normalerweise vertraulich und daher oft nicht verfügbar sind (Murashko et al., 2014).

Alternativ kann die Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität an der Zelle als Ganzes gemessen werden (Schmidt, 2013, S. 38). Allerdings wurde nur in einer begrenzten Anzahl von Beiträgen über Arbeiten zur Messung der thermischen Eigenschaften von Li-Ionen-Zellen berichtet (Drake et al., 2014). Bandhauer et al. (2011) geben einen Überblick über thermische Phänomene im Zusammenhang mit Li-Ionen-Zellen und weisen auch auf den Mangel an Daten zur Messung der thermischen Eigenschaften hin (Bandhauer et al., 2011).

Zur Bestimmung der Wärmekapazität werden Kalorimeter eingesetzt (Maleki, 1999; Onda, Ohshima, Nakayama, Fukuda & Araki, 2006; Pesaran & Keyser, 2001). Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit kann über Temperaturdifferenzmessungen bei bekanntem Wärmestrom im thermisch stationären Fall erfolgen (Forgez, Vinh Do, Friedrich, Morcrette & Delacourt, 2010; Maleki, 1999; Schmidt, 2013, S. 38). Für die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit senkrecht zur Stapelrichtung, in radialer Richtung, positionierten Forgez et al. (2010) einen Temperatursensor im Zentrum des Zellwickels und einen Sensor am Zellmantel. Über symmetrische Lade- und Entladepulse wurde ein thermisch stationärer Zustand bei konstantem SoC und bekannter Wärmeleistung der Zelle erzeugt (Forgez et al., 2010).

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Wärmekapazität und der radialen Wärmeleitfähigkeit zylindrischer Batterien zeigten Barsoukov, Jang und Lee (2002) durch Analyse einer thermischen Impulsantwort. Hierfür wurde das thermische Impedanzspektrum aus der transienten Temperaturantwort auf dem Zellmantel bestimmt, um damit ein thermisches Ersatzschaltbild der Batteriezelle aus Widerständen und Kapazitäten zur parametrisieren (Barsoukov et al., 2002). Auch Fleckenstein, Fischer, Bohlen und Bäker (2013) wandten diesen Ansatz an, nutzten in ihrer Arbeit aber keine externe Wärmequelle, sondern die Verlustleistung der Batteriezelle durch entsprechende Strompulse (Fleckenstein et al., 2013).

Drake et al. (2014) bestimmten die Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeiten durch Messung der thermischen Reaktion der Zelle auf einen adiabaten Wärmestrom in radialer oder axialer Richtung. Hierfür wurde der gemessene Temperaturanstieg am Zellmantel bzw. am Zellpol durch ein analytisches 1D-Temperaturmodell in radialer respektive axialer Richtung approximiert. Die Werte der spezifischen Wärmekapazität und der entsprechenden Wärmeleitfähigkeit wurden so bestimmt, dass der mittlere quadratische Fehler zwischen experimentellen Daten und dem analytischen Modell minimiert wird. (Drake et al., 2014)

Bei einem entkoppelten thermischen Modell wird die Wärmeleistung der Batteriezelle im untersuchten Testfall auf Grundlage von Messungen berechnet. Entsprechende Messmethoden sind im Folgenden beschrieben.

Die Messung der Gesamtwärmeleistung von Batteriezellen während des Ladens bzw. Entladens kann durch zwei Methoden erfolgen: die Accelerating Rate Calorimetry (ARC) und die Isothermal Heat Conduction Calorimetry (IHC). Mit der ARC-Methode kann die Wärmeerzeugungsrate auf der Grundlage einer Energiebilanz zwischen der Batteriezelle (Wärmequelle) und einer konstanten Temperatursenke berechnet werden. Die IHC-Methode hält die Batteriezelle während des gesamten Vorgangs auf einer konstanten Temperatur und verwendet hochpräzise

Thermosäulen, die an der Oberfläche der Batterie angebracht sind, um den Wärmestrom zu messen. (Bandhauer et al., 2011; Q. Wang et al., 2016; Xia et al., 2017)

Ist es von Interesse, zwischen reversiblen und irreversiblen Anteilen der Wärmeleistung zu unterscheiden, sind in der Literatur zwei Verfahren beschrieben, um die Reaktionsentropie (reversible Wärme) zu messen (Schmidt, 2013, S. 35):

Nach Q. Wang et al. (2016) ist die gebräuchlichste Methode die OCV-Kurve bei unterschiedlichen Temperaturen zu messen, um die temperaturabhängige Spannungsänderung zu berechnen (Q. Wang et al., 2016). Hierfür werden die Ladezustände nacheinander angefahren und eine ausreichend lange Zeit zur Relaxation der Spannung eingehalten (Schmidt, 2013, S. 36).

Bei der zweiten Methode wird die Batteriezelle bei niedrigen Raten entladen und geladen und gleichzeitig der Wärmestrom mittels Kalorimetrie aufgezeichnet. Hierbei wird die Annahme getroffen, dass die irreversiblen Verluste beim Laden und Entladen identisch sind. Der reversible Wärmestrom wechselt hingegen mit dem Strom das Vorzeichen, wodurch zwischen irreversiblen und reversiblen Anteilen unterschieden werden kann. (Onda et al., 2003; Schmidt, 2013, S. 35)

Verfahren zur elektrischen Charakterisierung von Batteriezellen

Wird das thermische Batteriezellmodell mit einem elektrischen Modell gekoppelt (vgl. Kapitel 2.5.1), werden die folgenden Daten für die Parametrisierung des elektrischen Ersatzschaltbildmodells benötigt (Lin et al., 2014):

- Leerlaufspannung (OCV) V_0
- Ohmscher Innenwiderstand R_{ohm} (Ausnahme RC-Modell)
- Widerstand und Kapazität der RC-Glieder (Ausnahme Rint-Modell)

Die Parameter weisen unterschiedliche Abhängigkeiten vom Ladezustand und der mittleren Zelltemperatur auf (Q. Wang et al., 2016). Je nach abzubildendem Testfall sind Messungen bei entsprechenden Temperaturen und Ladezuständen notwendig. Die aufgeführten Parameter gelten aufgrund des abweichenden Aufbaus des Ersatzschaltbildes nicht für das RC-Modell, welches zwei seriell verschaltete Widerstände beinhaltet. Thévenin-, DP- und PNGV-Modell (vgl. Kapitel 2.5.1) besitzen einen ohmschen Widerstand R_{ohm} , welcher mit mindestens einem RC-Glied seriell verschalten ist. Das Rint-Modell enthält neben dem Widerstand kein RC-Glied.

Wie bereits in Kapitel 2.2.3 beschrieben, kann mit dem Überpotenzial-Widerstand die irreversible Verlustleistung einer Zelle berechnet werden. Im Fall des Thévenin-, DP- und PNGV-Modells ist der Überpotenzial-Widerstand die Summe aller Widerstände des jeweiligen Ersatzschaltbildes. Onda et al. (2003) beschrieben vier Methoden den Überpotenzial-Widerstand der Zelle zu erfassen. Abhängig von der getesteten Batteriezelle zeigten sich aber teilweise deutliche Unterschiede im ermittelten Widerstand (Onda et al., 2003):

Wird eine Batteriezelle bei gleicher Temperatur und gleichem Ladezustand mit unterschiedlichen konstanten Stromraten entladen, ergibt sich ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen dem Strom und der gemessenen Zellspannung. Über die Geradensteigung ergibt sich der Überpotenzial-Widerstand für den spezifischen Ladezustand und die mittlere Zelltemperatur. (Onda et al., 2003)

Wie in Formel 1 (S. 21) beschrieben, kann der Überpotenzial-Widerstand auch über die OCV berechnet werden. Allerdings stellt sich nach Änderung des Ladezustandes erst nach langer Zeit eine konstante Spannung ein. Bei Onda et al. (2003) wurde 20 h zwischen den Messungen der OCV an den unterschiedlichen Ladezuständen gewartet. Bei Abu-Sharkh und Doerffel (2004) wurde der stationäre Zustand für eine Messung nach ca. 24 h erreicht. Neben der beschriebenen Relaxationsmessung gibt es die Konstantstrommessung, bei der mit sehr niedrigen Strömen (zwischen $C/40$ und $C/10$) ge- oder entladen wird, um den Zusammenhang zwischen OCV und SoC zu ermitteln (Schmidt, 2013). Hierbei ergeben sich zwar Fehler durch den zusätzlichen strombedingten Spannungsabfall, andererseits ist die Methode deutliche zeiteffizienter als die erstgenannte (Schmidt, 2013).

Onda et al. (2003) zeigten, wie der Überpotenzial-Widerstand auch durch eine intermittierende Entladung abgeschätzt werden kann. Hierfür wurde der Spannungsanstieg nach Unterbrechung der Entladung für einen definierten Zeitraum genutzt, um für den jeweiligen Ladezustand den Überpotenzial-Widerstand zu berechnen. Dieser ergibt sich, indem der Spannungsanstieg durch den Entladestrom dividiert wird. (Onda et al., 2003)

Der Widerstand wird im Bereich der Elektrochemie üblicherweise durch eine Impedanzspektroskopie (EIS) ermittelt (Onda et al., 2003). Hierbei wird der Zelle ein sinusförmiges Eingangssignal (Strom oder Spannung) mit der Frequenz f aufgeprägt. Die komplexe und frequenzabhängige Impedanz $Z(f)$ wird nach Formel 2 über das Verhältnis der Spannungs- U_{amp} und Stromamplitude I_{amp} sowie der Phasendifferenz $\Delta\varphi$ bestimmt. (Schmidt, 2013, S. 23–24)

$$Z(f) = \frac{U_{amp}}{I_{amp}} * e^{j\Delta\varphi} \quad 2$$

Der Spannungsverlauf um die OCV sowie der Phasenversatz des Stromes ist für die Messung bei einer Frequenz in Abbildung 2.39 (a) dargestellt. Diese Messung wird mit unterschiedlichen Frequenzen wiederholt. Ergebnis einer EIS ist das Impedanzspektrum der Zelle im Form eines Nyquistplots (vgl. Abbildung 2.39 (b)). Jeder Punkt auf der Linie entspricht einer Messung bei einer Frequenz. Das Diagramm ist so zu lesen, dass der Abstand eines jeden Messpunktes den Betrag der Impedanz und der Winkel zur reellen Achse dem Phasenversatz gleichgesetzt ist. (Schmidt, 2013, S. 24) Der Schnittpunkt der Impedanz mit der reellen Achse entspricht dem ohmschen Widerstand R_{Ohm} (Andre et al., 2011; Schmidt, 2013).

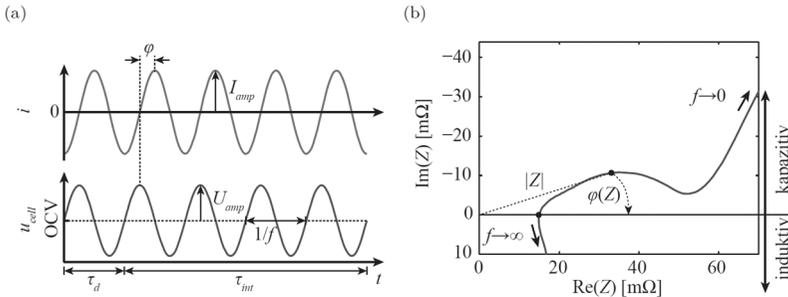


Abbildung 2.39: (a) Strom- und Spannungssignal für die EIS-Messung bei einer Frequenz f (b) beispielhafter Nyquistplot eines Impedanzspektrums (Schmidt, 2013, S. 24)

Wie bereits im Fall der thermischen Impedanzmessung beschrieben, bildet die EIS die Grundlage, um Ersatzschaltbilder zu parametrisieren. Die Anzahl der notwendigen Messpunkte hängt von der Impedanzkurve und der Anzahl der Parameter (z. B. R,C) ab, die für ein Ersatzschaltungsmodell identifiziert werden müssen (Andre et al., 2011).

Eine weitere Methode zur Parametrisierung eines elektrischen Zellmodells stellt die Hybrid Power Pulse Characterization (HPPC) dar. Die Batterie wird in unterschiedlichen Ladezuständen mit Strompulsen mit einer zwischengeschalteten Relaxationsphase für je 10 s geladen und entladen (Hunt, 2003). Das Testverfahren ist bei

Hunt (2003) detailliert beschrieben. Wie beim EIS wird aus dem elektrischen Verhalten der Batteriezelle im Test das elektrische Ersatzschaltbildmodell parametrisiert (Thanagasundram, Arunachala, Makinejad, Teutsch & Jossen, 2012).

2.5.5 Zwischenfazit

Nur wenige Ansätze beschreiben den Entwicklungsprozess des Thermomanagements für Batteriesysteme ganzheitlich. Die meisten sind allgemein gehalten. Zellformat- und kühlungsspezifische Design- und Validierungsansätze fokussieren die rein virtuelle Modellbildung. Die physische Modellbildung erfolgt zur abschließenden Validierung durch Prototypen des Batteriemodul- bzw. Batteriesystems mit realen Batteriezellen.

Der Schwerpunkt der virtuellen Modellbildung zeigt sich auch in der Vielzahl an Veröffentlichungen zur simulationsbasierten Untersuchung von Batteriezellkühlungen an zylindrischen Formaten. Elektrisch oder elektrochemisch gekoppelte Thermomodelle sowie thermische Modelle ohne Kopplung als konzentrierte Parametermodelle oder 1D- bis 3D-Modelle werden verwendet. Teilweise werden ähnliche Problemstellungen mit unterschiedlichen Batteriezellmodellen beschrieben. Hierbei sind große Unterschiede im Modellierungs- und Berechnungsaufwand zu erkennen. Mit zunehmendem Detaillierungsgrad des Batteriezellmodells steigt auch der Aufwand der Modellparametrisierung durch die notwendigen Messkampagnen zur thermischen und elektrischen Charakterisierung der Batteriezelle. Die Charakterisierungsmessungen sind teilweise mit hohem zeitlichen Aufwand verbunden und erfordern entsprechendes Equipment. Zur Verifikation der Batteriezellmodelle werden vermehrt einfache Prüfaufbauten mit einer einzelnen Batteriezelle genutzt.

Untersuchungen an Prüfaufbauten auf Modulebene sind meist mit dem Einsatz eines Simulationsmodells kombiniert. Hierbei werden Simulation und physische Versuche unterschiedlich genutzt. Teilweise dienen Simulationsmodelle zur zusätzlichen Erfassung schwer messbarer Größen, um das Systemverständnis zu verbessern, während die Hauptuntersuchungen am physischen Prototyp erfolgen. In anderen Veröffentlichungen dient der physische Prüfaufbau zur Parametrisierung und Verifikation eines Simulationsmodells auf Modulebene. Die Parameterstudien wurden in diesem Einsatzfall mittels Simulationen durchgeführt.

Nur wenige Veröffentlichungen beschreiben den Einsatz einer gemischt physisch-virtuellen Modellbildung in der Validierung des Thermomanagements auf Modulebene. Die Modellierungsarten lassen sich in zwei Kategorien einteilen. Erstens, der

Einsatz thermischer Ersatzbatteriezellen mit steuer-/regelbarer Heizleistung in großformatigen und zylindrischen Zellen. Diese wurden zum Vergleich und zur Validierung von Thermomanagementsystemen sowie zur Simulationsverifikation genutzt.

Der zweite Einsatz gemischt physisch-virtueller Modellierung ist nur für großformatige Batteriezellen beschrieben und dient der thermischen und elektrischen Charakterisierung einzelner Zellen unter thermisch inhomogenen Randbedingungen. Realitätsnahe Kühlbedingungen, wie sie in Batteriemodulen/-systemen auftreten, werden an der Batteriezellhülle durch Temperatur- oder Wärmestromregelung aufgeprägt.

2.6 Fazit zum Stand der Forschung

Aus dem Stand der Forschung geht hervor, dass die Validierung eine entscheidende Rolle in der Produktentwicklung einnimmt. Im Sinne des Frontloading sollten Validierungsaktivitäten frühzeitig und kontinuierlich im Produktentstehungsprozess erfolgen. Der IPEK-XiL-Ansatz ermöglicht die Validierung eines Produkts unter gesamtsystemischen Wechselwirkungen sowohl auf unterschiedlichen Systemebenen als auch in verschiedenen Produktreifegraden. Damit ist dieser Validierungsansatz geeignet, das Frontloading zu unterstützen.

Nach dem Stand der Forschung erfolgt das Design und die Validierung des thermischen Verhaltens von Li-Ionenbasierten Batteriesystemen in der frühen Entwicklungsphase primär über Simulationen, um den Aufwand der physischen Modellbildung gering zu halten. Meist kommen physische Prototypen des Thermomanagements erst spät in der Entwicklung zum Einsatz, um das entwickelte Kühl-Design final abzusichern oder verwendete Simulationsmodelle zu verifizieren. Die virtuelle Modellierung des thermischen Verhaltens von Batteriemodulen oder -systemen aus kleinformatischen, zylindrischen Batteriezellen ist im Stand der Forschung vielfältig beschrieben. Unterschiede ergeben sich im Aufwand der Modellierung und der Modellparametrisierung, was sich auf die Eignung der Modelle für den Einsatz in der frühen Entwicklungsphase auswirkt. Der entwicklungsbegleitende und bedarfsgerechte Einsatz von entsprechenden Modellierungsansätzen in der Entwicklung eines Thermomanagements für Batteriesysteme aus zylindrischen Zellen mit Mantelkühlung ist nur wenig beschrieben.

Der Einsatz gemischt physisch-virtueller Modellbildung zur Validierung von Thermomanagements von Batteriesystemen aus mantelgekühlten, kleinformatischen, zylindrischen Batteriezellen ist im Stand der Forschung nur unzureichend beschrieben.

Anwendung findet diese Modellierung bisher in Form von thermischen Ersatzbatteriezellmodellen mit steuerbarer Wärmeleistung, welche reale Batteriezellen in Prüfaufbauten ersetzen. Hierdurch ergeben sich sicherheitstechnische Vorteile sowie die Flexibilität einer frei definierbaren Wärmeleistung der Zellen. Jedoch ist der Einsatz dieser Modelle in Kombination mit rein virtueller und rein physischer Modellbildung in der Validierung von Batteriezellkühlungen auf Modul- und Systemebene über mehrere Entwicklungsgenerationen nicht zu finden.

Dies gilt gleichermaßen für die physisch-virtuelle Modellbildung zur Abbildung thermischer Wechselwirkungen innerhalb eines Batteriemoduls zwischen kleinformatigen, mantelgekühlten, zylindrischen Batteriezellen und dem Thermomanagement, wenn das temperaturabhängige elektrische und thermische Verhalten der Batteriezellen berücksichtigt wird. Ansätze zur elektrischen und thermischen Charakterisierung einer einzelnen prismatischen Batteriezelle unter realitätsnahen Kühlbedingungen, wie sie in Batteriemodulen/-systemen auftreten können, sind im Stand der Forschung beschrieben. Wie sich das thermische Verhalten der einzelnen Batteriezelle auf das Thermomanagement und das thermische Verhalten der restlichen Zellen im Batteriemodul auswirkt, wurde mit diesen Modellierungsansätzen jedoch nicht abgebildet.

3 Motivation und Zielsetzung

In diesem Kapitel wird auf Grundlage des Standes der Technik und der Forschung die Arbeit motiviert und die Zielsetzung abgeleitet.

3.1 Motivation

Eine der zentralen Anforderungen an ein Batteriesystem im elektrischen und hybriden Fahrzeug, ist neben den mechanischen und rein elektrischen, die Temperierung, genauer die Kühlung der Batteriezellen (Korthauer, 2013, S. 165–167). Zur entwicklungsbegleitenden Validierung des thermischen Verhaltens eines gekühlten Batteriesystems oder -moduls sind dem Reifegrad entsprechende Validierungsumgebungen notwendig. Hierfür kommen nach dem Stand der Forschung und der Technik meist Simulationsmethoden zur Konkretisierung des Designs und, für die finale Absicherung, physische Tests mit realen Batteriezellen oder thermischen Ersatzbatteriezellen zum Einsatz.

Im Fall der rein simulationsbasierten Auslegung des Kühldesigns, werden zu Entwicklungsbeginn sehr einfache Berechnungs- oder Simulationsmodelle genutzt. Mit zunehmendem Anspruch an die Modellgüte im Laufe des Entwicklungsprozesses, steigt der Aufwand für Modellbildung und Simulation. Soll das thermisch transiente Verhalten abhängig vom SoC und der Temperatur simuliert werden, sind thermische und elektrische Charakterisierungsmessungen zur Parametrisierung von Batteriezellmodellen notwendig. Diese Daten stehen dem Entwickler in der frühen Phase der Entwicklung nicht immer zur Verfügung. Liegen zudem wenig Erfahrungswerte in der Modellierung der Batteriezellen und der Kühlung vor, steigt auch die Unsicherheit hinsichtlich der Validität der Simulationsergebnisse. Diese Faktoren können eine frühzeitige und entwicklungsbegleitende Validierung im Sinne des Frontloadings hemmen.

Alternativ zu detaillierten Simulationsmodellen von Batteriezellen und deren Kühlung, bieten sich rein physische Modelle in Form von Prüfaufbauten mit realen Batteriezellen zur Validierung des thermischen Verhaltens an. Da die in der Literatur beschriebenen Prüfaufbauten zur Modellierung der Kühlung meist zur Charakterisierung oder finalen Validierung entwickelten wurden, sind sie wenig flexibel im Kühldesign. Für eine entwicklungsbegleitende Validierung, um die Batteriezellküh-

lung iterativ zu konkretisieren, sind diese physischen Aufbauten kaum geeignet. Sicherheitsmaßnahmen und Ressourcenaufwand für die Versuchsdurchführung steigen beim Einsatz elektrisch verschalteter Batteriezellen aufgrund der höheren Ströme und Spannungen.

Modellierungs- und Parametrisierungsaufwände für Simulationen sowie Versuchsaufwände mit physischen Prototypen und realen Batteriezellen können durch den Einsatz gemischt physisch-virtueller Modellbildung reduziert, bzw. eine frühzeitige Validierung erst ermöglicht werden. Teilsysteme eines Batteriemoduls, welche eine frühzeitige Validierung verhindern, können durch virtuelle oder physische Modelle ersetzt werden.

Um das Frontloading zu unterstützen, könnten klassische Validierungsmethoden wie Simulationen und physische Tests um diesen Modellierungsansatz zur Validierung des thermischen Verhaltens von gekühlten Batteriemodulen erweitert werden. Hierfür bietet sich die Strukturierung in Entwicklungsgenerationen an, in denen der Reifegrad der Batteriezellkühlung kontinuierlich über den Entwicklungsprozess gesteigert wird.

Zur Gestaltung von gemischt physisch-virtuell modellierten Validierungsumgebungen ist eine Eingrenzung auf das Zellformat und die Batteriezellkühlung erforderlich. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf kleinformatigen, zylindrischen Batteriezellen, welche am Zellmantel über erzwungene Konvektion gekühlt werden.

3.2 Zielsetzung

Im Rahmen dieser Arbeit soll die Validierung von Batteriemodulen aus mantelgekühlten, querumströmten, kleinformatigen, zylindrischen Batteriezellen, hinsichtlich des thermischen Verhaltens, mittels des IPEK-XiL-Ansatzes untersucht werden. Dadurch wird ein Betrag zum Frontloading in der Entwicklung von Batteriezellkühlungen angestrebt.

Hierfür wird eine Methode zur strukturierten Validierung von Entwicklungsgenerationen von gekühlten Batteriemodulen, unter Nutzung virtueller, physischer und gemischt physisch-virtueller Modellbildung entwickelt. Ziel ist es, die Konkretisierung des Kühldesigns durch einfache Modellbildung in der Validierung, in jeder Entwicklungsgeneration möglichst effizient zu gestalten. Die Methode deckt die entwicklungsbegleitende Validierung von der Konzeptbewertung bis hin zur finalen Absicherung des Kühldesigns zur Ableitung eines ersten physischen Prototyps ab. Entsprechend kommen abhängig vom Reifegrad der Entwicklungsgeneration des

Batterieminiduls sowohl Modelle und Modellierungsarten nach dem Stand der Forschung und Technik als auch gemischt physisch-virtuelle Modellansätze zum Einsatz.

Nach dem IPEK-XiL-Ansatz werden zwei Validierungsumgebungen mit gemischt physisch-virtueller Modellbildung für den Einsatz von Hochenergiezellen des Formats 18650 erarbeitet, die in je einer Entwicklungsgeneration der Methode verortet sind. Hierbei wird zwischen der Validierung unter thermisch stationären und unter thermisch transienten Zuständen unterschieden.

Die Validierungsumgebung zur Absicherung des thermisch stationären Verhaltens besteht aus einer physisch modellierten Batteriezellkühlung mit modularem Aufbau und einem Koppelsystem. Das Koppelsystem basiert auf dem thermischen Batteriezellmodell von Hémerý et al. (2014) und soll das thermische Verhalten der Batteriezellen hinreichend genau abbilden, um das Kühldeign hinsichtlich der thermischen Anforderungen zu validieren. Über das physische Modell der Batteriezellkühlung ist das Kühldeign einfach anpassbar und bietet die Grundlage einer entwicklungsbegeleitenden und iterativen Validierung.

Um das thermisch transiente Verhalten eines Batteriminiduls im Testfall zu validieren, müssen thermische und elektrische Wechselwirkungen zwischen den Zellen in einem Batteriminidul abgebildet werden. Dies erfolgt in einer zweiten Validierungsumgebung durch einen physischen Prüfaufbau mit drei Batteriezellen und einer gekoppelten Echtzeitsimulation, ohne Einsatz eines parametrisierten Batteriezellmodells.

Ein weiteres Ziel ist die Evaluation der Modellbildung in Entwicklungsgenerationen als auch die Evaluation der übergeordneten Methode zur Unterstützung des Entwicklers in der Validierung und Konkretisierung des Designs der Batteriezellkühlung im Sinne des Frontloadings.

4 Forschungsfragen und Forschungsvorgehen

Auf Grundlage der im vorherigen Kapitel beschriebenen Zielsetzung der Arbeit werden in diesem Kapitel die entsprechenden Forschungsfragen formuliert. Im zweiten Teil wird das Forschungsvorgehen zur Beantwortung der Fragen beschrieben.

4.1 Forschungsfragen

Aus der Zielsetzung der Arbeit wurde die folgende Forschungsfrage abgeleitet, welche sich wiederum in drei Teilforschungsfragen gliedert.

Forschungsfrage
Wie kann die Validierung nach dem IPEK-XiL-Ansatz die Entwicklung von Batteriezellkühl designs für Batteriemodule aus kleinformigen, zylindrischen Zellen mit konvektiver Mantelkühlung in der frühen Phase der Produktentwicklung das Frontloading unterstützen?

Die Forschungsfrage fokussiert die Kühlung von Batteriemodulen aus zylindrischen Batteriezellen. Durch ihren direkten und wechselseitigen Einfluss auf das elektrische Verhalten der Batteriezellen und damit auf die Grundfunktion des Energiespeichers kommt der Kühlung eine wichtige Rolle zu. Diese Funktion gilt es frühzeitig und kontinuierlich in der Entwicklung zu validieren, um ein bedarfsgerechtes Kühl design abzuleiten. Operationalisiert wird der Beitrag zum Frontloading durch drei Teilforschungsfragen. Diese beschäftigen sich mit der Einordnung des IPEK-XiL-Ansatzes in den Entwicklungsprozess der Batteriezellkühlung und der Modellierung gemischt physisch-virtueller Validierungsumgebungen für die Untersuchung des thermisch stationären und transienten Verhaltens von Batteriemodulen aus mantelgekühlten, zylindrischen Batteriezellen.

Teilforschungsfrage 1

Wie können virtuelle, physische und gemischt physisch-virtuelle Modelle gemäß des IPEK-XiL-Ansatzes für die entwicklungsbegleitende Validierung von zellmantelgekühlten Batteriemodulen eingesetzt werden, um daraus das Design der nachfolgenden Entwicklungsgeneration abzuleiten?

Für die Entwicklung von Batteriezellkühlungen, die auf querumströmten zylindrischen Batteriezellen mittels Kühlflüssigkeit beruhen, soll eine Methode zur strukturieren Validierung über mehrere Entwicklungsgenerationen entwickelt und angewandt werden. Entsprechend des Reifegrades der jeweiligen Entwicklungsgeneration und den sich daraus ergebenden Validierungszielen werden virtuelle, gemischt physisch-virtuelle oder rein physische Modelle für die Validierung eingesetzt. Das daraus gewonnene Wissen wird zur Konkretisierung des Designs der Batteriezellkühlung innerhalb einer Entwicklungsgeneration sowie für die nachfolgende Entwicklungsgeneration genutzt. Die gemischt physisch-virtuelle Modellbildung wird in den folgenden Teilfragen adressiert.

Teilforschungsfrage 2

Wie können mittels gemischt physisch-virtueller Modellbildung gemäß des IPEK-XiL-Ansatzes iterative Anpassungen eines Kühldesigns für ein zellmantelgekühltes Batteriemodul hinsichtlich des thermisch stationären Verhaltens validiert werden, ohne verschiedene, eigenständige physische Prototypen mit Batteriezellen einzusetzen?

Als Teil der strukturierten Validierung von Entwicklungsgenerationen und zur Beantwortung der ersten Teilfrage, sind zwei Entwicklungsgenerationen gemischt physisch-virtuell modelliert. In einer davon, werden zur Abbildung und effizienten Validierung des thermisch stationären Verhaltens der untersuchten Zellmantelkühlung auf Modulebene, eine physisch modellierte Batteriezellkühlung und ein Koppelsystem als Batteriezellersatz benötigt. Ersteres ist modular zu gestalten, um den Anforderungen gerecht zu werden. Erst nach erfolgter Konkretisierung des Kühldesigns werden reale Batteriezellen zur abschließenden Validierung des thermisch stationären Verhaltens der Batteriezellkühlung eingesetzt. Durch diesen moderaten Einsatz elektrisch verschalteter Batteriezellen soll der Validierungsaufwand in der frühen Entwicklungsphase niedrig gehalten werden.

Teilforschungsfrage 3

Wie kann mittels gemischt physisch-virtueller Modellbildung gemäß des IPEK-XiL-Ansatzes das thermisch transiente Verhalten eines zellmantelgekühlten Batteriemoduls ohne ein parametrisiertes virtuelles Batteriezellmodell abgebildet werden?

In einer weiteren Entwicklungsgeneration soll mittels gemischt physisch-virtueller Modellierung auch das thermisch transiente Verhalten eines untersuchten Batteriemoduls mit Zellmantelkühlung abgebildet werden. Zur Modellierung des thermisch transienten Verhaltens von zylindrischen Batteriezellen im Batteriemodul in Wechselwirkung mit der Kühlung soll auf ein parametrisierbares Simulationsmodell einer Batteriezelle verzichtet werden, welches vorgelagerte thermische und elektrische Charakterisierungsmessungen der eingesetzten Batteriezelle erfordert. Ziel ist die Bereitstellung einer Validierungsumgebung für Untersuchungen des thermisch transienten Verhaltens von Batteriemodulen mit mantelgekühlten, zylindrischen Batteriezellen, unter Verwendung realer Batteriezellen in geringer Stückzahl. Diese Validierungsumgebung beinhaltet sowohl den physischen Teil, in Form eines Prüfaufbaus und den virtuellen Teil in Form einer Prüfstandsteuerung und Echtzeitsimulationsmodellen.

4.2 Forschungsvorgehen

Die Vorgehensweise zur Beantwortung der Forschungsfragen aus Kapitel 4.1, entsprechend der Design Research Methodology (DRM) nach Blessing und Chakrabarti (2009), wird in diesem Kapitel beschrieben. In Abbildung 4.1 sind die Einzelschritte der Arbeit gemäß der DRM dargestellt.

Im Sinne der *Research Clarification* wird in Kapitel 2 der relevante Stand der Forschung zur Validierung des thermischen Verhaltens von Batteriemodulen in der frühen Phase der Entwicklung von Batteriezellkühlungen beschrieben und ein Fazit gezogen. Der abgeleitete Forschungsbedarf und die Forschungslücke werden über die *Descriptive Study I* in Kapitel 5 weiter konkretisiert. Hierfür werden die nach dem Stand der Forschung verwendeten Ansätze und Modelle zur Validierung von Batteriezellkühlungen in der frühen Entwicklungsphase dem IPEK-XiL-Ansatz gegenübergestellt und bewertet. Die daraus abgeleitete Zielsetzung der Arbeit ist in Kapitel 3 beschrieben. Die entsprechende Fortsetzung der Arbeit ist in Kapitel 3 beschrieben. Die entsprechende Fortsetzung der Arbeit ist in Kapitel 3 beschrieben. Die entsprechenden Forschungsfrage und die Teilforschungsfragen sind in Kapitel 4.1 aufgeführt.

Die Arbeit widmet sich entsprechend der ersten Teilforschungsfrage, der entwicklungsbegleitenden Validierung des thermischen Verhaltens von zellmantelgekühlten Batteriemodulen aus zylindrischen Zellen in Entwicklungsgenerationen. Hierfür wird in der *Prescriptive Study I* eine Methode unter Nutzung physischer, virtueller und gemischt physisch-virtueller Modellbildung entwickelt (Kapitel 6). Mittels gemischt physisch-virtueller Modellbildung, wird in zwei Validierungsumgebungen das thermisch transiente bzw. das thermisch stationäre Verhalten von Batteriemodulen abgebildet. Ein Teil der Validierungsumgebung, welche das thermisch transiente Verhalten abbilden kann, ist weitestgehend unabhängig von dem zu untersuchenden Batteriemodul, da dieses virtuell modelliert wird. Dieser unabhängige Teil der Validierungsumgebung, wurde wie in Kapitel 7 beschrieben, für das Zellformat 18650 umgesetzt. Beide Validierungsumgebungen sind in einer Entwicklungsgeneration der übergeordneten Methode verortet und dienen der Beantwortung der zweiten und dritten Teilforschungsfrage.

Genutzt wird die Methode in zwei Entwicklungsbeispielen, in denen das Kühldesign unter dem Anwendungsfall des Schnellladens (Kapitel 8.1), im thermisch stationären Zustand und dem Entladen im thermisch transienten Zustand (Kapitel 8.2) untersucht wird (*Descriptive Study II*). Beiden Beispielen liegt das selbe Kühlprinzip, der Querumströmung von Batteriezellen des Formats 18650 mittels Kühlfüssigkeit zugrunde. Die Modellbildung in den Entwicklungsgenerationen der Methode wird im jeweiligen Kapitel des Entwicklungsbeispiels evaluiert. Die Evaluation der Methode erfolgt als Ganzes, hinsichtlich der Zielsetzung und der Beantwortung der übergeordneten Forschungsfrage in Kapitel 8.3. Abschließend werden die Handlungsempfehlung für die Methodennutzung und die beiden entwickelten Validierungsumgebungen diskutiert.



Abbildung 4.1: Forschungsvorgehen der Arbeit in Anlehnung an die DRM (Blessing & Chakrabarti, 2009)

5 Modellausprägungen in der Validierung von Batteriezellkühlungen

In diesem Kapitel werden auf Grundlage einer Literaturrecherche zunächst Kriterien erarbeitet, die eine Unterstützung des Frontloading durch entsprechende Validierungsaktivitäten indizieren. Um die Forschungslücke zu konkretisieren, wird anhand dieser Kriterien analysiert, inwiefern unterschiedliche Modellierungsarten nach dem Stand der Forschung zur Abbildung des thermischen Verhaltens von Batteriemodulen in der frühen Entwicklungsphase zur Unterstützung des Frontloading geeignet sind. Hieraus ergibt sich der Forschungsbedarf für die Modellbildung der zu entwickelnden Validierungsumgebungen, als Teil der in Kapitel 6 beschriebenen Methode.

Des Weiteren werden die im Folgenden erarbeiteten Kriterien in Kapitel 8.3 zur Evaluation der entwickelten Validierungsumgebungen herangezogen. Dies ist erforderlich, um die übergeordnete Forschungsfrage zu beantworten.

5.1 Kriterien zur Evaluation von Validierungsaktivitäten hinsichtlich des Frontloadings

Zur frühzeitigen Problemerkennung und Lösung im Entwicklungsprozess im Sinne des Frontloadings nach Thomke und Fujimoto (2000), sind frühzeitige Validierungsaktivitäten notwendig (Albers, Matros et al., 2015, S. 74). Im Fall der Validierung des thermischen Verhaltens eines Batteriemoduls in der frühen Entwicklungsphase mit geringem Reifegrad kann folgende Situation vorliegen: Bei definiertem Zellformat steht die Entscheidung über den Einsatz einer spezifischen Batteriezelle (Zellchemie, Hersteller) noch aus, da das notwendige Wissen über das Verhalten im Fahrzeug und den vorherrschenden Randbedingungen unzureichend ist (Rothgang, Nordmann, Schaper & Sauer, 2012). Entsprechend liegen nur wenige Daten aus Datenblättern möglicher Batteriezellen und weitere Teilsysteme, wie z. B. das Kühlfluid, vor. Validierungsaktivitäten sind unter diesen Randbedingungen nur durch Modelle möglich, die wenige Daten zur Parametrisierung benötigen und trotzdem eine Bewertung des Systemverhaltens ermöglichen (Schroeder, Gwosch & Matthesen, 2020).

Neben der frühzeitigen Validierung ist für das Frontloading auch eine kontinuierliche und prozessbegleitende Validierung erforderlich (Albers, Matros et al., 2015, S. 77–78). Dies bedeutet, dass die Validierung nach dem Pull-Prinzip eine koordinierende Funktion im Entwicklungsprozess einnimmt. Synthese- und Validierungsaktivitäten laufen eng verknüpft ab, um den Lösungsraum, in diesem Fall für das Kühldesign, in einem iterativen Prozess zu erweitern und wieder einzuschränken. (Albers, Matros et al., 2015, S. 79)

Die Validierungskomplexität als auch die elektrische Spannung nehmen von Versuchen an Zellen über Modultests bis hin zu Batteriesystemtests zu (Paulweber & Lebert, 2014, S. 49). Eine voll umfängliche Validierung ist aufgrund des Aufwands nicht immer möglich. Ziel ist deshalb nach Albers und Matros et al. (2015) die effektive und effiziente Validierung auf Grundlage eines entsprechenden System- und Modellverständnisses. Zeitliche und finanzielle Rahmenbedingungen führen zur Notwendigkeit einer zeit- und ressourceneffizienten Validierung (Albers, Matros et al., 2015, S. 541).

Diese Anforderung kann nur durch eine entsprechende Modellbildung bei der Gestaltung der Validierungsumgebung erfüllt werden. Auch hinsichtlich dieser Anforderung ist eine Modellbildung, die ausschließlich auf bestehende Daten zurückgreift, zielführend. So sind zusätzliche Daten zur Parametrisierung von Batteriezellmodellen mit zusätzlichen (thermischen und/oder elektrischen) Vermessungen der Batteriezellen verbunden. Die Abhängigkeit der Validierungsaktivitäten von den zusätzlichen Messungen wirken dem Frontloading entgegen. Dennoch können diese Daten für die Modellierung in einer späteren Entwicklungsphase mit höherem Reifegrad des Batteriemoduls benötigt werden.

Der iterative Validierungsprozess nach dem Pull-Prinzip erfordert eine Modellbildung mit der dem Validierungsziel entsprechende Parameterräume mit geringem Aufwand untersucht werden können. Einfache Berechnungs- oder Simulationsmodelle, liefern in kurzer Zeit Validierungsergebnisse und ermöglichen eine effiziente Untersuchung eines Parameterraums zur iterativen Designanpassung der Batteriezellkühlung (Mahamud & Park, 2011; C. Park & Jaura, 2003; Shah et al., 2014b).

Gleiche Anforderungen können auch an die physische Modellbildung gestellt werden. Die physischen Modelle müssen eine schnelle und ressourceneffiziente Designanpassung ermöglichen. Auch die Versuchsdurchführung selbst sollte äquivalent zu einer kurzen Berechnungszeit bei Simulationen, zeiteffizient und flexibel durchführbar sein. Die Flexibilität einer Versuchsdurchführung kann unter anderem durch notwendige Sicherheitsmaßnahmen und durch begrenzt verfügbare Ressourcen gehemmt werden. Beispielhaft sind die Verfügbarkeit von elektronischen Lasten

oder Netzgeräten hoher Leistungsklasse, Sicherheitstechnik in Form von Zustandüberwachung und Prüfräumen mit entsprechendem Brandschutz zu nennen.

Die genannten Kriterien zur Bewertung von Validierungsaktivitäten hinsichtlich des Frontloadings im Fall der Validierung des thermischen Verhaltens von Batteriemodulen mit einer Batteriezellkühlung in der frühen Phase, sind im Folgenden zusammengefasst.

Tabelle 5.1: Kriterien zur Bewertung von Validierungsaktivitäten zur Untersuchung des thermischen Verhaltens von Batteriemodulen hinsichtlich deren Eignung zur Unterstützung des Frontloadings in der frühen Entwicklungsphase.

Modellierungsdomäne	Kriterien	Ziel
physisch u. / o. virtuell	Eignung für kontinuierliche und iterative Validierung des Kühldesigns	hohe Eignung
virtuell	Aufwand zur Modellparametrisierung	geringer Aufwand
	initialer Modellierungsaufwand	geringer Aufwand
	Simulations-/Berechnungszeiten	kurze Rechenzeiten
	Aufwand für Parameteranpassungen zur iterativen Validierung	geringer Aufwand
physisch	Zeit und Ressourcen zur Anpassung des Kühldesigns	geringer Zeit- und Ressourcenbedarf
	zeiteffiziente Versuchsdurchführung	Versuchsdurchführung ohne Unterbrechung
	Ressourcen- und Sicherheitsanforderungen zur zeitlich flexiblen Versuchsdurchführung	Geringe Anforderungen an das technische Equipment und die Sicherheitstechnik

5.2 Evaluation von Modellausprägungen hinsichtlich der Unterstützung des Frontloadings

In diesem Abschnitt werden die im Stand der Forschung beschriebenen Modellausprägungen zur Validierung des thermischen Verhaltens von Batteriemodulen hinsichtlich der Unterstützung des Frontloadings in der frühen Entwicklungsphase bewertet. Hierfür werden die im vorherigen Kapitel erarbeiteten Kriterien herangezogen. Bewertet wird die Erfüllung der Kriterien im Sinne einer Unterstützung des Frontloadings. Trotzdem kann eine negativ bewertete Modellausprägung aufgrund des Designs der entwickelten Batteriezellkühlung erforderlich sein. Entwicklungsspezifisch bleibt zu prüfen, ob ein im Sinne des Frontloadings in der frühen Entwicklungsphase positiv bewertetes Modell den Anforderungen der Validierung genügt oder ein Kompromiss eingegangen werden muss.

Die Modelle werden in die Domänen physisch, virtuell und gemischt physisch-virtuell eingeteilt. Letztere Modelle sind durch eine gekoppelte Echtzeitsimulation oder durch eine einfache Umrechnung von Zustandsgrößen aus der realen Anwendung in Größen, die für den Betrieb der physischen Komponenten zur Testfallabbildung benötigt werden, gekennzeichnet.

5.2.1 Virtuelle Modellbildung

Bei den im Stand der Forschung beschriebenen Simulationen kann grundsätzlich zwischen transienten und stationären Simulationen unterschieden werden. Für die Abbildung transients Vorgänge wird im Gegensatz zur stationären Simulation die Wärmekapazität der Batteriezelle bzw. deren Komponenten benötigt. Diese muss zusätzlich über kalorische Messungen (ARC oder IHC) erfasst werden (Maleki, 1999; Onda et al., 2006; Pesaran & Keyser, 2001). Transiente Simulationen gehen zudem bei numerischen Verfahren mit einem erhöhten Berechnungsaufwand einher (Saw et al., 2016). Im Sinne einer effizienten Validierung sollten zunächst stationäre Zustände untersucht werden, bevor transiente simuliert werden.

Die zu berücksichtigenden Wärmeleitfähigkeiten im thermischen Modell einer Batteriezelle steigen mit der Dimension des Modells. Dabei entspricht die Wärmeleitfähigkeit in axialer Zellrichtung jener in tangentialer Richtung entlang des Zellwickels, weshalb im 2D- und 3D-Fall zwei Wärmeleitfähigkeiten der Batteriezelle ermittelt werden müssen. In einige Simulationen wurde allerdings die radiale Wärmeleitfähigkeit nicht von der tangentialen oder der axialen unterschieden (Jilte et al., 2019; Zhao, Rao, Huo et al., 2015). Der initiale Modellierungsaufwand als auch der Aufwand für

die Änderungen geometrischer Parameter, die bei numerischen Simulationen eine neue Vernetzung erfordern, steigen mit zunehmender Dimension des Modells. Gleiches gilt für die Rechenzeiten (X. Li et al., 2013). Somit lässt sich festhalten, dass eine Parameterstudie in der frühen Entwicklungsphase mit Modellen geringer Dimension effizienter durchführbar ist.

Bei einem entkoppelten thermischen Modell einer Batteriezelle wird dieses als reine Wärmequelle mit entsprechenden thermischen Eigenschaften behandelt, deren Wärmeleistung auf experimentellen Daten beruht. Dagegen werden bei einem gekoppelten thermischen Modell der temperaturabhängige elektrische Zustand der Zelle und deren Wärmeleistung aus einem elektrischen oder einem elektrochemischen Modell berechnet. (Q. Wang et al., 2016) Diese Kopplung erfordert auch eine temperaturabhängige Parametrisierung der elektrischen/elektrochemischen Modelle. Bei der frühzeitigen Validierung des thermischen Verhaltens sollte deshalb hinterfragt werden, wie genau und ob das elektrische Verhalten im spezifischen Validierungsschritt abgebildet werden muss.

Die elektrochemische Modellierung bildet das elektrische Verhalten einer Batteriezelle am Genauesten ab, benötigt aber eine Vielzahl von schwer bestimmbar Materialparametern (Keil & Jossen, 2012; Schmidt, 2013, S. 40). Zudem sind die Rechenzeiten dieser aufwendigen Modellierungsart vergleichsweise lang. Die elektrische Modellierung über Ersatzschaltbilder ist hinsichtlich der Modellgüte des elektrisch dynamischen Verhaltens sowie des Rechenaufwandes flexibler. Diese Faktoren können in der Praxis wichtiger sein als die hochaufgelöste Nachbildung der Batteriedynamik. (Keil & Jossen, 2012)

Die in diesem Kapitel beschriebene Bewertung der Ausprägungen virtueller Modelle gegenüber den in Kapitel 2.5.1 beschriebenen Kriterien ist in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

Tabelle 5.2: Relative Bewertung der in Kapitel 2.5.1 beschriebenen Ausprägungen virtueller Modelle hinsichtlich der Kriterien zur Unterstützung des Frontloadings in der Validierung des thermischen Verhaltens eines Batteriesystems /-moduls.

Modellausprägungen		Kriterien (Zielgrößen)					
		geringer Aufwand der Modellparametrisierung	geringer initialer Modellierungsaufwand	geringe Simulations-/Berechnungszeiten	geringer Aufwand für Parameteranpassungen zur iterativen Validierung	geringer Aufwand für Parameteranpassungen	
virtuell	abbildbare thermische Zustände	thermisch stationär			-	-	
		thermisch transient			-	-	
	Dimension des thermischen Modells	konzentriertes Parameternmodell					
		1D-Modell					
		2D-Modell					
		3D-Modell					
	Kopplung des Batteriezellmodells	entkoppeltes thermisches Modell				-	-
		gekoppeltes thermisches Modell				-	-
		thermo-elektrisches Modell				-	-
	Modellierungsebene der Batteriezelle	thermo-elektrochemisches Modell				-	-

5.2.2 Physische Modellbildung

Als eine Eigenschaft physischer Prototypen von Batteriemodulen wurde zwischen größeren und kleineren Zellverbänden unterschieden. Die Größe bezieht sich auf den Energieinhalt und der damit verbauten Anzahl an Zellen. Tendenziell sind die im Stand der Forschung beschriebenen Zellverbände für physische Untersuchungen der Batteriezellkühlung meist klein (< 30 kleinformatige zylindrische Zellen), um Tischversuche ohne zusätzliche Sicherheitsvorkehrungen durchführen zu können (Khateeb, Amiruddin, Farid, Selman & Al-Hallaj, 2005; X. Li et al., 2013; Shahid & Agelin-Chaab, 2018; Y.-W. Wang et al., 2019). Entsprechend sind die Untersuchungen nicht an Prüfeinrichtungen mit hoher elektrischer Leistung und entsprechenden Sicherheitsvorkehrungen gebunden, wie sie für die Tests von größeren Zellverbänden notwendig sind.

Die beschriebenen physischen Prüfaufbauten sind meist unflexibel in der Variation geometrischer Parameter. Entsprechende Anpassungen der Kühlung oder Veränderungen des Kühlprinzips wurden meist an separaten Prototypen durchgeführt (F.

He et al., 2014; Khateeb et al., 2005; X. Li et al., 2013). Y.-W. Wang et al. (2019) untersuchten hingegen mit zwei Modulgehäusevarianten den Einfluss unterschiedlicher Luftstrompfade auf die Temperaturverteilung eines Batteriezellverbundes. Dieser modulare Ansatz ist in der physischen Modellbildung bei der Validierung von Batteriezellkühlungen an zylindrischen Batteriezellen nach Stand der Forschung nur unzureichend beschrieben.

Ein modularer Aufbau ermöglicht eine schnelle Anpassung des Kühldesigns auf Basis der vorgelagerten Versuchsergebnisse, ohne einen vollständig neuen physischen Prototyp aufbauen zu müssen. Dies erlaubt eine zeit- und ressourceneffiziente Anpassung des Kühldesigns. Die zeiteffiziente Versuchsdurchführung ist vom Prüfaufbau unabhängig. Hierbei limitieren ggf. notwendige Lade- oder Entladephasen zwischen den eigentlichen Versuchen die effiziente Versuchsdurchführung. Sind hingegen Testfälle bestehend aus Lade- und Entladephasen von Interesse, kommt es durch den Einsatz realer Batteriezellen zu keinen Verzögerungen in der Versuchsdurchführung (Ling, Wang, Fang, Gao & Zhang, 2015). Die in diesem Kapitel beschriebene Bewertung der Ausprägungen physischer Modelle gegenüber den in Kapitel 5.1 beschriebenen Kriterien ist in Tabelle 5.3 zusammengefasst.

Tabelle 5.3: Relative Bewertung der in Kapitel 2.5.2 beschriebenen Ausprägungen physischer Modelle hinsichtlich der Kriterien zur Unterstützung des Frontloadings in der Validierung des thermischen Verhaltens eines Batteriesystems /-moduls.

		Kriterien (Zielgrößen)			
		geringer Zeit- und Ressourcenaufwand zur Anpassung des Kühldesigns	zeiteffiziente Versuchsdurchführung	geringe Ressourcen- und Sicherheitsanforderungen zur zeitlich flexiblen Versuchsdurchführung	
physisch	Prototypengröße	wenige Batteriezellen	-	-	hohe Kriterienerfüllung
		erhöhte Anzahl an Batteriezellen	-	-	niedrige Kriterienerfüllung
	Prüfaufbau	flexibler Prüfaufbau	hohe Kriterienerfüllung	-	-
		in sich abgeschlossene Prototypen	niedrige Kriterienerfüllung	-	-

5.2.3 Gemischt physisch-virtuelle Modellbildung

Bei der nach Stand der Forschung beschriebenen gemischt physisch-virtuellen Modellbildung wird im Folgenden zwischen zwei Varianten unterschieden:

1. Der Einsatz von thermischen Ersatzbatteriezellen mit steuerbarer Heizleistung in physischen Prüfaufbauten.
2. Das Aufprägen realitätsnaher Kühlzustände auf dem Batteriezellgehäuse einer einzelnen prismatischen Zelle durch lokale Wärmestrom- und/oder Temperaturregelung über einen entsprechenden Prüfaufbau.

Die Modellausprägungen der ersten Variante wird in Tabelle 5.4 gegenüber den Kriterien zur Unterstützung des Frontloadings beschrieben.

Tabelle 5.4: Bewertung der in Kapitel 2.5.3 beschriebenen Ausprägungen gemischt physisch-virtueller Modelle mit thermischen Ersatzbatteriezellmodellen hinsichtlich der Kriterien zur Unterstützung des Frontloadings in der Validierung des thermischen Verhaltens eines Batteriesystems.

Modellausprägungen		Kriterien (Zielgrößen)	hohe Kritierenerfüllung			niedrige Kritierenerfüllung			keine eindeutige Korrelation		
			hohe Kritierenerfüllung	niedrige Kritierenerfüllung	keine eindeutige Korrelation	hohe Kritierenerfüllung	niedrige Kritierenerfüllung	keine eindeutige Korrelation	hohe Kritierenerfüllung	niedrige Kritierenerfüllung	keine eindeutige Korrelation
physisch	Prototypengröße	wenige thermische Ersatzbatteriezellen erhöhte Anzahl an Ersatzbatteriezellen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Prüfaufbau	flexibler Prüfaufbau in sich abgeschlossene Prototypen	-	-	-	-	-	-	-	-	-
virtuell	Dimension des thermischen Modells	konzentriertes Parametermodell	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Kopplung des Batteriezellmodells	entkoppeltes thermisches Modell	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Im Gegensatz zu vollständig physischen Prototypen (vgl. Tabelle 5.3) wirkt sich die Anzahl der verbauten Ersatzbatteriezellen nicht merklich auf die Ressourcen- und Sicherheitsanforderungen der Versuchsumgebung aus. Auch bei Untersuchungen an größeren Batteriemodulen steigen die Sicherheitsanforderungen nur bedingt mit der Anzahl der thermischen Ersatzbatteriezellen (Hémerly et al., 2014; Jayaraman

et al., 2011). Auch die Versuchsdurchführung kann effizient ohne zwischengeschaltete Entlade- bzw. Ladephasen mit den Ersatzzellen durchgeführt werden (Hémery et al., 2014; Lyu et al., 2019). Identisch zur rein physischen Modellbildung (Kapitel 5.2.2), wird die Batteriezellkühlung über einen physischen Prüfaufbau abgebildet. Dessen Gestaltung wirkt sich beim Einsatz von thermischen Ersatzbatteriezellen gleichermaßen auf die ressourceneffiziente Anpassung des Kühldesigns aus.

Der virtuelle Teil der Versuchsumgebung besteht aus der Steuerung der Wärmeleistung über die Spannung (Lyu et al., 2019) oder den Strom (Hémery et al., 2014) an den Ersatzbatteriezellmodellen. Über das ohmsche Gesetz (konzentriertes Parametermodell), wird der Sollstrom oder -spannungsabfall am thermischen Ersatzmodell berechnet, um die äquivalente Wärmeleistung einer realen Batteriezelle im Testfall zu erzeugen. Bei den beschriebenen Modellen handelt es sich um echtzeitfähige, entkoppelte, rein thermische Batteriezellmodelle, bei denen das elektrische Verhalten nicht simuliert wurde (Hémery et al., 2014). Der initiale Modellierungs- und Parametrisierungsaufwand des Modells ist gering (Hémery et al., 2014). Teilweise wurde auf Grundlage von Messdaten anderer bereits charakterisierter Zellen eine realistische Wärmeleistung der abzubildenden Zelle kalkuliert (Lyu et al., 2019). Hierdurch konnte der Aufwand zur Parametrisierung des Wärmeleistungsmodells weiter reduziert werden.

Die zweite Variante der Modellausprägung in Form einer realitätsnahen und flexiblen Temperierung einer einzelnen prismatischen Batteriezelle ist in Tabelle 5.5 hinsichtlich der Kriterien zur Unterstützung des Frontloadings bewertet. Troxler et al. (2014) und Rizzo et al. (2016) beschrieben Prüfaufbauten, um das thermische und elektrische Verhalten einer prismatischen Batteriezelle unter realitätsnahen thermischen Randbedingungen am Zellgehäuse zu untersuchen. Durch die Einbindung einer einzelnen großformatigen Batteriezelle in den entsprechenden Prüfaufbau sind die Sicherheitsanforderungen für den Versuchsbetrieb noch moderat.

Der Prüfaufbau nach Troxler et al. (2014) ermöglicht die Aufprägung von unterschiedlichen Temperaturen auf gegenüberliegenden Zellgehäuseflächen. Dagegen kann mit dem Prüfaufbau nach Rizzo et al. (2016) an fünf Seiten des Zellgehäuses orts aufgelöst über mehrere Messstempel die Temperatur bzw. der Wärmestrom geregelt werden. Mit letzterer Validierungsumgebung können somit thermische Randbedingungen im 1D- bis 3D-Raum an der Zelle geregelt werden.

Tabelle 5.5: Bewertung der in Kapitel 2.5.3 beschriebenen Ausprägungen gemischt physisch-virtueller Modelle mit einzelnen physischen Batteriezellen hinsichtlich der Kriterien zur Unterstützung des Frontloadings in der Validierung des thermischen Verhaltens eines Batteriesystems.

Modellausprägungen		Kriterien (Zielgrößen)				
		geringer Aufwand der Modellparametrisierung	geringer initialer Modellierungsaufwand	geringer Simulations-/Berechnungsaufwand	geringer Aufwand für Parameteranpassungen zur iterativen Validierung	geringe Ressourcen- und Sicherheitsanforderungen zur zeitlich flexiblen Versuchsdurchführung
physisch	Prototypengröße	einzelne Batteriezelle	-	-	-	-
	virtuell	Abbildbare thermische Zustände	thermisch stationär	-	-	-
		thermisch transient	-	-	-	-
	Dimension des thermischen Modells	1D- bis 3D-Modell thermischer Randbedingungen an der Batteriezellhülle	-	-	-	-

Die thermischen Randbedingungen werden in Echtzeit durch eine Temperatur- und/oder Wärmestromregelung auf die Zelloberfläche aufgeprägt. Zur Variation dieser Randbedingungen müssen nur die konstanten Sollwerte für die lokale Wärmestrom- oder Temperaturregelung angepasst werden. Entsprechend können verschiedene thermisch transiente und quasistationäre Zustände untersucht werden, ohne den physischen Teil der Validierungsumgebung anzupassen (Christen et al., 2017). Dies unterstützt eine schnelle iterative Designanpassung der Kühlung auf Grundlage der Versuchsergebnisse.

5.2.4 Fazit

Die Fähigkeit zur schnellen und genauen Temperaturvorhersage einer zylindrischen Batteriezelle kann für einen schnellen iterativen Entwurf einer Batteriezellkühlung hilfreich sein (Shah et al., 2014b). Einfach aufgebaute thermische Modelle mit geringem Modellierungsaufwand, moderaten Berechnungszeiten und hoher Flexibilität zur Parametervariation ermöglichen eine effiziente und effektive Validierung. Ein

steigender Simulationsaufwand im Laufe des Entwicklungsprozesses durch detailliertere Simulationen und aufwändige Modellparametrisierungen könnten durch den Einsatz von gemischt physisch-virtueller Modellbildung reduziert werden.

Der Einsatz thermischer Ersatzbatteriezellen in Kombination mit einem flexiblen physischen Prüfaufbau bieten das Potenzial, Parameterstudien effizient durchzuführen. Hierdurch könnten frühzeitig und entwicklungsbegleitend Zielgrößen für das Design der Batteriezellkühlung abgeleitet werden. Vorteile der dadurch vorgezogenen physischen Versuche sind zudem, dass ggf. simulationseitig nicht abgebildete Probleme in anderen Domänen frühzeitig erkannt werden. Der Anteil an rein physischen Prototypen mit realen, elektrisch verschalteten Batteriezellen könnte dadurch weiterhin niedrig gehalten werden.

Auch die virtuelle Modellbildung thermischer Randbedingungen an einer realen Batterie zelle bietet das Potenzial, das Frontloading zu unterstützen, da die Batterie zelle hierfür nicht vor den Versuchen charakterisiert werden muss. Allerdings ist nach Stand der Forschung keine derartige Validierungsumgebung für zylindrische Zellformate bekannt. Zudem werden mit den beschriebenen Ansätzen für prismatische Zellen keine transienten, modulinternen, elektrischen und thermischen Wechselwirkungen zwischen den Zellen und der Batterie zellkühlung berücksichtigt. Durch Modellierung dieser Wechselwirkungen könnten Temperaturunterschiede zwischen den Batterie zellen eines Moduls sowie maximal auftretende Temperaturen ohne Aufbau eines physischen Prototyps frühzeitig im Entwicklungsprozess abgeschätzt werden.

Die Integration der gemischt physisch-virtuellen Modellbildung in den Validierungsprozess zur entwicklungsbegleitenden Absicherung des thermischen Verhaltens von Batteriemodulen gilt es zu klären. Hierdurch soll ein Beitrag zum Frontloading in der Batteriesystementwicklung geleistet werden.

6 Strukturierte Validierung von Entwicklungsgenerationen einer Batteriezellkühlung

Der im Folgenden vorgestellte Ansatz wurde entworfen, um die Konkretisierung der Batteriezellkühlung eines Batteriemoduls mit querumströmten zylindrischen Batteriezellen durch entwicklungsbegleitende Validierung zu unterstützen und zu strukturieren. Dabei wird über mehrere Entwicklungsgenerationen des Batteriemoduls ($E_1 - E_5$)¹ hinweg das Kühldesign konkretisiert und hinsichtlich thermischer Anforderungen optimiert. Hierfür werden die Batteriezellkühlungen unter definierten elektrischen und thermischen Testfällen über die jeweiligen Entwicklungsgenerationen des Batteriemoduls validiert. Nicht thermische Zielgrößen werden bei der Konkretisierung des Kühldesigns berücksichtigt. Bei der Validierung kommen Methoden der virtuellen, gemischt physisch-virtuellen und der rein physischen Modellbildung zum Einsatz. Es wird eine möglichst einfache und damit zeit- und ressourceneffiziente Modellierung der Batteriezellen und der Kühlung angestrebt. Dieser Ansatz adressiert die erste Teilforschungsfrage.

Abbildung 6.1 zeigt die einzelnen Entwicklungsgenerationen ($E_1 - E_5$) des Batteriemoduls zur Konkretisierung des Kühldesigns für zylindrische Batteriezellen mit homogener konvektiver Zellmantelkühlung. Aus dem Validierungsziel wird der zu untersuchende Testfall definiert, der in den Entwicklungsgenerationen (E_j) entsprechend modelliert wird. Unter Einbeziehung der entwickelten Kühlkonzepte wird aus dem Zielsystem der Batteriemodulentwicklung ein initialer Parameterraum für die Gestaltung der Kühlung festgelegt.

Ist der Aufwand für eine Variation der Parameter im Rahmen einer CFD-Simulation zu aufwändig, wird zunächst in E_1 ein empirisches Modell des Kühlkonzepts verwendet, um in einer Parameterstudie den Designraum einzuzugrenzen. Hierbei handelt es sich um ein thermisches Modell mit konzentrierten Parametern. Wie auch in

¹ Die zum Einsatz kommenden Entwicklungsgenerationen sind einer Produktgeneration G_n zugeordnet. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird bei der Angabe der Entwicklungsgeneration j auf den Verweis der Produktgeneration n , die sich im Rahmen der Arbeit nicht verändert, verzichtet. Statt $E_{n,j}$, gemäß Albers et al. (2020), werden die Entwicklungsgenerationen lediglich über E_j gekennzeichnet.

den nachfolgenden Entwicklungsgenerationen, wird der Parameterraum auf Grundlage der durchgeführten Validierungsaktivitäten in Form von Berechnungen, Simulationen und Untersuchungen konkretisiert.

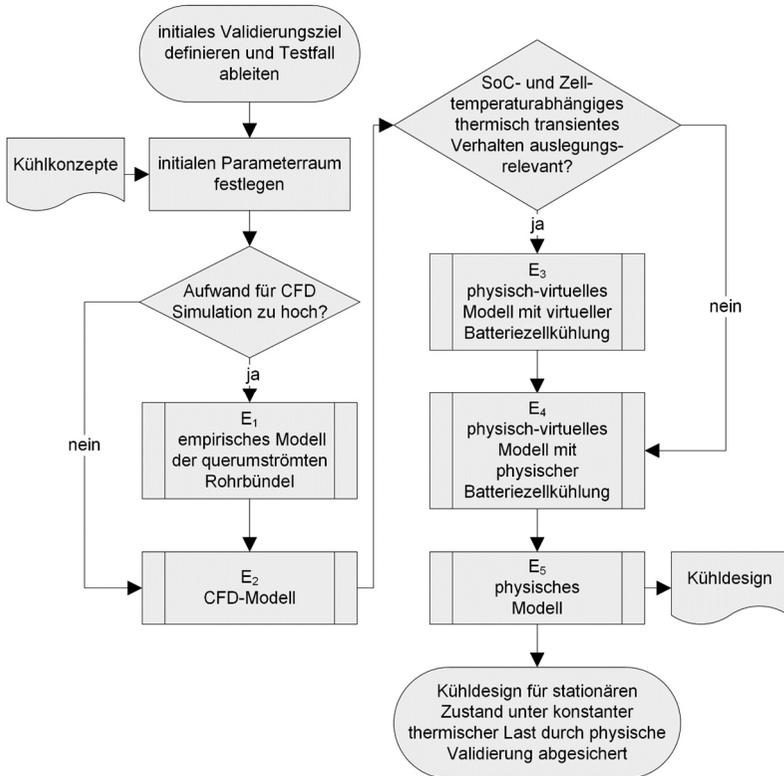


Abbildung 6.1: Ansatz zur strukturierten Validierung einer Zellmantelkühlung zylindrischer Batteriezellen in Entwicklungsgenerationen (E_i). Die Batteriezellen werden mit Fluid quерumströmt.

Als E_2 des Batteriemoduls wird die Batteriezellkühlung in vereinfachter Form mittels CFD modelliert. Das entkoppelte thermische Modell wird vorzugsweise auf den 2D-Raum reduziert und thermisch stationäre Zustände simuliert. Dadurch sollen die Simulationsaufwände auch in dieser Entwicklungsgeneration minimal gehalten werden. Diese Modellierungsart erlaubt, im Vergleich zum empirischen Modell die Untersuchung weiterer Designvarianten. Zudem werden durch die detailliertere Modellbildung der Kühlung und der Batteriezellen weitere Kriterien zur Bewertung von Designvarianten und Designparameter herangezogen.

In E_3 wird die Batteriezellekühlung virtuell für den definierten Parameterraum modelliert, wohingegen die Batteriezellen physisch in reduzierter Anzahl vorliegen. Durch physisch-virtuelle Kopplung soll aus wenigen physischen Zellen auf das elektrische und thermische Verhalten des gesamten virtuell modellierten Batteriemoduls, auch unter thermisch und elektrisch transienten Bedingungen im Testfall, geschlossen werden. Hierdurch kann auf eine aufwendige Parametrisierung eines Simulationsmodells einer Batteriezelle zur Abbildung des thermisch transienten Verhaltens verzichtet werden. Ist das batteriezellenspezifische thermisch transiente Verhalten des Batteriemoduls, abhängig von SoC und Batteriezelltemperatur, für die Auslegung nicht von Relevanz, kann diese Entwicklungsgeneration übersprungen werden.

In E_4 wird die gemischt physisch-virtuelle Modellbildung anders angewandt. Mittels Prüfaufbau wird die vollständige Batteriezellkühlung physisch und die Batteriezellen selbst als Koppelsystem zwischen physischer und virtueller Domäne modelliert. Wodurch auf den Einsatz realer Batteriezellen in dieser Entwicklungsgeneration verzichtet wird. Die physische Modellbildung der Ersatzbatteriezellen mit steuerbarer Heizleistung erlaubt im Gegensatz zu E_3 nur die Abbildung thermisch stationärer Zustände, da Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeiten des Modells nicht mit denen einer realen Batteriezelle übereinstimmen. Mithilfe des Prüfaufbaus wird das Kühldesign in mehreren Iterationen optimiert und finalisiert. Um das finale Kühldesign hinsichtlich des Testfalls abzusichern, werden in E_5 die Ersatzbatteriezellmodelle im Prüfaufbau durch reale Batteriezellen ersetzt.

In Tabelle 6.1 sind die fünf Entwicklungsgenerationen hinsichtlich der Aktivitäten zur Validierung sowie Synthese und deren Modellierungsdomäne gegenübergestellt.

Tabelle 6.1: Gegenüberstellung der fünf Entwicklungsgenerationen E₁ – E₅

Entwicklungs- generation	Validierungs- und Synthese- aktivitäten	Modellier- ungsdomäne
E₁: empirisches Modell der quерumströmten Rohrbündel	Vergleich der Sensitivitäten der Parameter auf die Zielgröße Wärmeabfuhr → konkretisierter Parameterraum	virtuell
E₂: CFD-Modell	Vergleich der Zelltemperaturen und der Temperaturverteilung im Batteriemodul bei Parametervariation → konkretisierter Parameterraum	virtuell
E₃: physisch-virtuelles Modell mit virtueller Batteriezellkühlung	Bewertung des temperatur- und SoC- abhängigen thermischen Verhaltens des Batteriemoduls für eine spezifische Zelle in potenziell auslegungsrelevanten Testfällen mit thermisch transienten Verhalten → Konkretisierter Parameterraum, ggf. zusätzliche neue auslegungs- relevante Testfälle	gemischt physisch-virtuell
E₄: physisch-virtuelles Modell mit physis- cher Batteriezell- kühlung	Vergleich der Zelltemperaturen und der Temperaturverteilung im Batteriemodul bei Parametervariation und iterative Anpassung des Kühldesigns → finales Kühldesign	gemischt physisch-virtuell
E₅: physisches Modell	finale Bewertung und Absicherung der Zelltemperaturen und der Temperaturverteilung im Batteriemodul unter Einsatz echter Batteriezellen → final abgesichertes Kühldesign	physisch

In den folgenden Kapiteln wird auf die Aktivitäten zur Erzeugung der genannten Entwicklungsgenerationen eingegangen.

6.1 E₁: empirisches Modell der querumströmten Rohrbündel

Ist wenig Erfahrungswissen bzgl. des konzeptionierten Kühlkonzepts vorhanden, können zu Beginn der Entwicklung einfache, analytische oder empirische Modelle der Stoff- und Wärmeübertragung verwendet werden, um den Parameterraum für aufwendigere Validierungsschritte in den nachfolgenden Entwicklungsgenerationen (E₂ - E₅) einzugrenzen.

Ziel der E₁ ist eine Abschätzung des Einflusses einzelner Parameter auf die Zielgröße Wärmeabfuhr, ohne die thermischen Eigenschaften einer Batteriezelle modellieren zu müssen. Abbildung 6.2 zeigt eine Übersicht über die Input- und Outputgrößen für die Validierungs- und Syntheseaktivitäten in E₁. Für die Kühlung durch querumströmte zylindrische Batteriezellen wird ein empirisches Berechnungsmodell mit konzentrierten Parametern zur Auslegung von Wärmetauschern herangezogen (Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 2013, S. 819–823).



Abbildung 6.2: Input- und Outputgrößen für die Validierung des thermischen Verhaltens sowie die Synthese in E₁

Die Batteriezellen sind dabei als Rohrbündel mit konzentrierten Parametern und konstanter sowie gleicher Oberflächentemperatur modelliert, die mit Kühlfluid querumströmt werden (vgl. Abbildung 6.3). Zur Festlegung eines sinnvollen Temperaturunterschieds zwischen Batteriezellen und Kühlfluid im Modell sollte die überschlägige Wärmeleistung der Batteriezelle bekannt sein. Entsprechend kann die Temperaturverteilung der Batteriezellen im Modul mit diesem Modell nicht prognostiziert werden.

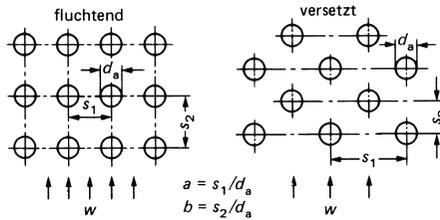


Abbildung 6.3: Beschreibung der Zellanordnung und deren Abstände zueinander als querumströmtes Rohrbündel (Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 2013, S. 820)

Das Modell wird genutzt, um mit geringem Rechenaufwand die Sensitivitäten verschiedener infrage kommender Designparameter (z. B. Kühlfliuidwahl, Zellabstände und -anordnungen, Volumenströme etc.) auf die Wärmeabfuhr an der Zelmantelfläche ermitteln zu können. Die Vorgehensweise zur Konkretisierung des initialen Parameterraums ist in Abbildung 6.4 dargestellt.

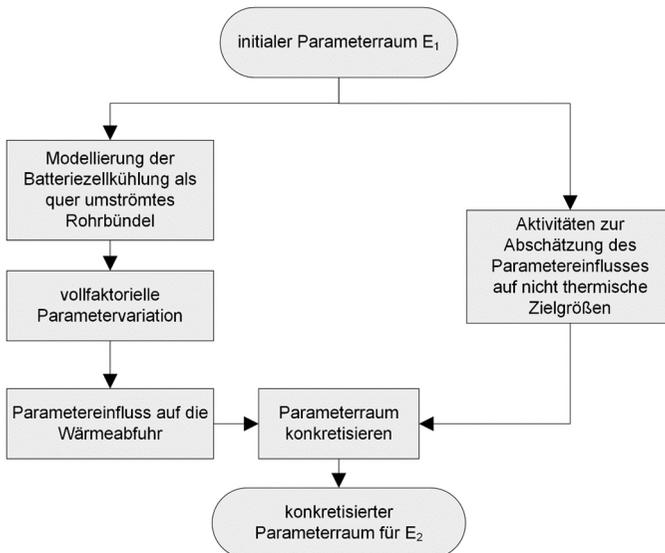


Abbildung 6.4: Aktivitäten mit der ersten Entwicklungsgeneration (E₁) zur strukturierten Validierung einer Batteriezellkühlung bei querumströmten zylindrischen Batteriezellen mittels Kühlfliuidigkeit im thermisch stationären Zustand

Hierfür wird über eine DOE (Design of Experiments)-Studie eine vollfaktorielle Parametervariation durchgeführt. Die Haupteffekte auf die Wärmeabfuhr werden über statistische Versuchsauswertung identifiziert. Das dadurch erlangte Systemverständnis erlaubt unter Berücksichtigung nicht thermischer Zielgrößen (z. B. maximaler Bauraum, Modulseitenverhältnisse etc.) die Parameterraumanpassung für die nachfolgende Entwicklungsgeneration (E_2). Hierfür werden Parameterstufen angepasst oder auch Parameter für die nachfolgenden Untersuchungen fest definiert.

6.2 E₂: CFD-Modell

Die CFD-Simulation kommt in E_2 aus zwei Gründen zum Einsatz. Erstens ermöglicht die Visualisierung von Temperaturverteilung und Strömungsverlauf, Strömungsvorgänge und den Einfluss auf die Temperatur besser zu verstehen. Zweitens ermöglicht die CFD im mehrdimensionalen Raum fluidtechnische Vorgänge und Wärmeströme abzubilden. Im Gegensatz zum konzentrierten Parametermodell in E_1 kann der Einfluss von Parametervariationen auf die Zelltemperatur und der Temperaturverteilung im Modul in den initial definierten thermischen Bedingungen eines Testfalls untersucht werden. Weitere Anforderungen, wie die maximale Temperaturspreizung zwischen den Zellen im Modul, können damit zur Konzeptbewertung in dieser Entwicklungsgeneration herangezogen werden.

Validierungsziel ist ein Vergleich der Temperaturen zwischen den Konzepten und Parametervariationen im thermisch stationären Zustand, um diese relativ zueinander zu bewerten. Exakte Temperaturen im Zellinneren spielen in dieser Entwicklungsstufe eine untergeordnete Rolle, weshalb zur thermischen Modellierung auf Literaturdaten zurückgegriffen wird. Validierungsaktivitäten sind in E_2 dadurch unabhängig von Charakterisierungsmessungen an realen Batteriezellen frühzeitig in der Entwicklung möglich. Abbildung 6.5 zeigt eine Übersicht über die Input- und Outputgrößen für die Validierungs- und Syntheseaktivitäten in E_2 .

Die Validierung unter Verwendung von CFD-Modellen der E_2 beginnt mit dem konkretisierten Parameterraum aus E_1 . Welche Parametervariationen berücksichtigt werden, wird durch den damit verbundenen Rechenaufwand und den zur Verfügung stehenden Ressourcen bestimmt. Ggf. muss der Parameterraum aufgrund der verfügbaren Ressourcen (Rechenleistung, Zeit etc.) eingeschränkt werden.

Unter Berücksichtigung des Validierungsziels und der Ressourcen für die Simulation werden Randbedingungen für die CFD-Simulation im stationären Zustand erstellt. Ist von einer gleichmäßigen Wärmeabfuhr über die Zellmantelhöhe auszugehen,

wird eine 2D-Simulation angestrebt. Ggf. ist eine Vorabsimulation mit 3D-Modellierung notwendig, um die Modellierung im Zweidimensionalen abzusichern. Unter der Annahme adiabater Randbedingungen an den Polflächen werden Wärmeströme in axialer Richtung der Zelle vernachlässigt.

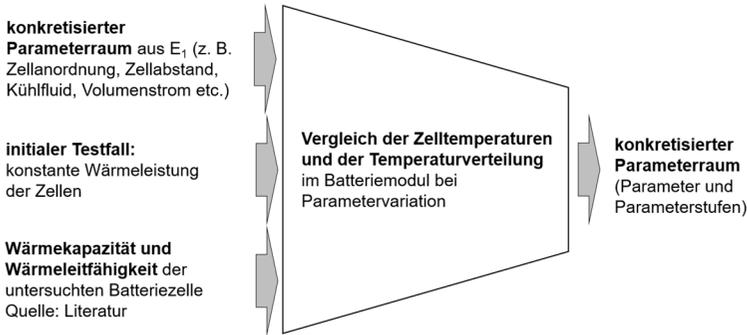


Abbildung 6.5: Input- und Outputgrößen für die Validierung des thermischen Verhaltens sowie die Synthese in E_2

Bei der Modellierung der Wärmeleitfähigkeit senkrecht zur Rotationsachse der Zellen werden zwei Optionen in Betracht gezogen:

- a) Modellierung einer isotropen Wärmeleitfähigkeit auf Basis von Literaturdaten, z. B. (Drake et al., 2014), zur Wärmeleitung in zylindrischen Batteriezellen gleichen oder ähnlichen Formats (18650; 21700; 26650) in radialer und tangentialer Richtung (Zhao, Rao, Huo et al., 2015).
- b) Modellierung einer anisotropen Wärmeleitfähigkeit, bei der sich die Werte in radialer und tangentialer Richtung unterscheiden. Datengrundlage stellen auch hier Literaturwerte dar (z. B. Drake et al., 2014). Diese Modellvorstellung kommt der Realität des Zellwickels am nächsten, ist aber mit zusätzlichem Aufwand in der Modellbildung verbunden.

Entsprechend den zu erwartenden Wärmeflüssen und den Anforderungen an die Modellgüte für die Auswertung der Simulationsergebnisse ist zwischen den Varianten a) und b) zu entscheiden. Ist aufgrund einer homogenen Kühlung über den Zellumfang mit primär radialen Wärmeströmen zu rechnen, ist der Mehrwert anisotrop modellierten Wärmeleitfähigkeit b) vernachlässigbar. Die Modellierung der Wärmekapazität der Batteriezellen spielt aufgrund der stationären Simulation eine untergeordnete Rolle.

Anschließend werden Simulationsmodelle mit einem repräsentativen Ausschnitt aus dem Zellverbund in unterschiedlichen Parameterausprägungen erstellt. Die Modellbildung hängt vom betrachteten Parameterraum ab. Anhand der Simulationsergebnisse werden die Parametervariationen hinsichtlich verschiedener Zielgrößen zur Temperaturverteilung im Zellverbund und anhand nicht thermischer Zielgrößen (z. B. Bauraumanforderungen, geforderte mechanische Moduleigenschaften etc.) bewertet. Abschließend erfolgt eine Auswahl an Parametern für die nachfolgenden E_3 bzw. E_4 über ein gemischt physisch-virtuelles Modell nach dem IPEK-XiL-Ansatz. Die beschriebene Vorgehensweise zur Konkretisierung des Parameterraums ist in Abbildung 6.6 dargestellt.

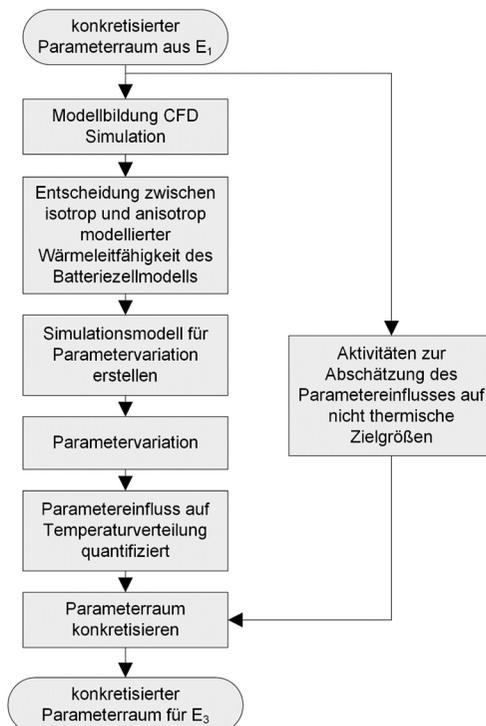


Abbildung 6.6: Aktivitäten mit der zweiten Entwicklungsgeneration (E_2) in Form von 2D-CFD Modellen zur strukturierten Validierung einer Batteriezellkühlung bei querumströmen zylindrischen Batteriezellen

6.3 E₃: physisch-virtuelles Modell mit realen Batteriezellen

E₃ ermöglicht im Vergleich zu den zwei vorhergehenden sowie der nachfolgenden Entwicklungsgeneration, eine Validierung des thermisch transienten Verhaltens einer Batteriezellkühlung für eine spezifische Batteriezelle.

Ziel ist die Bewertung des thermischen Verhaltens des Batteriemoduls in repräsentativen Betriebszuständen (temperatur- und SoC-abhängig), die neben dem initial festgelegten thermischen Lastzustand auslegungsrelevant sein könnten. Hierfür werden weitere Anwendungsfälle der Batteriemodulnutzung betrachtet, bei denen eine hohe Wärmeleistung der Batteriezellen erwartet wird, aber der Einfluss auf die Temperaturverteilung im Modul aufgrund des thermisch transienten Verhaltens schwer abzuschätzen ist. Durch entsprechende Versuche wird der in E₂ konkretisierte Parameterraum bestätigt oder weiter eingeschränkt. Ggf. können auch die thermischen/elektrischen Bedingungen im Testfall der folgenden Entwicklungsgenerationen angepasst werden, sofern dieser als auslegungsrelevanter angesehen wird, als der initial festgelegte. Für die Modellbildung der Batteriezelle in diesem Entwicklungsschritt muss lediglich die Wärmekapazität der Batteriezelle, idealerweise aus eigenen Vermessungen, alternativ aus Literaturdaten bekannt sein. In Abbildung 6.7 sind die Input- und Outputgrößen der thermischen Validierung sowie Synthese in dieser Entwicklungsgeneration aufgeführt.

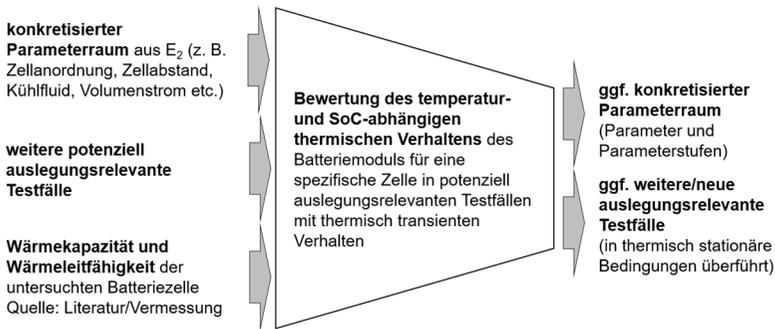


Abbildung 6.7: Input- und Outputgrößen für die Validierung des thermischen Verhaltens sowie die Synthese in E₃

Werden Testfälle mit thermisch transientem Verhalten in dieser Entwicklungsphase als wenig auslegungsrelevant angesehen und/oder das elektrisch-thermische Ver-

halten einer spezifischen Batteriezelle ist nicht von Interesse, kann diese Entwicklungsgeneration übersprungen werden. Dieser Fall kann eintreten, wenn die zu entwickelnde Batteriezellkühlung für unterschiedliche Batteriezellen gleichen Formats eingesetzt werden soll und diese Batteriezellen noch nicht bekannt sind.

Die Validierung der Batteriezellkühlung in E_3 ist in Abbildung 6.8 beschrieben und beginnt mit der Modellierung der zu untersuchenden homogenen Zellmantelkühlung. In diesem Fall wird die Querumströmung der Batteriezellen unter Verwendung des empirischen Modells der querumströmten Rohrbündel (Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 2013, S. 819–823) abgebildet. Auslegungsrelevante thermische und elektrische Wechselwirkungen des Batteriemoduls mit dem Restsystem und der Umgebung werden bedarfsgerecht modelliert.

Daraus wird das Modell des Batteriemoduls inkl. der modellierten Batteriezellkühlung und der elektrischen Verschaltung der Zellen abgeleitet. Das entwickelte Kühlungsmodell wird anhand der simulierten Temperaturverteilung im stationären Zustand über die CFD-Simulation aus der vorherigen Entwicklungsgeneration E_2 für den auslegungsrelevanten Parametersatz verifiziert.

Die Temperaturverteilung zwischen den Zellen im Batteriemodul wird über drei physische Batteriezellen, die in einem Prüfaufbau thermisch und elektrisch integriert sind, abgeschätzt. Hierfür wird den drei physischen Batteriezellen im virtuell modellierten Batteriemodul je eine Position zugewiesen, um die maximalen Temperaturunterschiede senkrecht und entlang der Strömungsrichtung abzudecken. Die drei Zellen werden entsprechend den thermischen Randbedingungen an ihrer Position im virtuellen Modul über den Prüfaufbau temperiert. Die Temperaturverteilung im Batteriemodul wird über eine Interpolationsvorschrift zwischen den Zellmanteltemperaturen der drei physischen Zellen berechnet.

Diese Temperaturinterpolation wird über ein weiteres Simulationsmodell verifiziert. Dieses Simulationsmodell ist ein Duplikat des zu untersuchenden virtuellen Batteriemoduls, verwendet allerdings keine Temperaturinterpolation. In diesem Modell wird das thermische Verhalten jeder Batteriezelle in radialer Richtung über eine partielle-Differenzialgleichung beschrieben. Parametrisiert wird das Modell anhand von Literaturdaten. Durch den Abgleich der beiden Simulationsmodelle, kann der Interpolationsfehler für den untersuchten Testfall abgeschätzt werden.

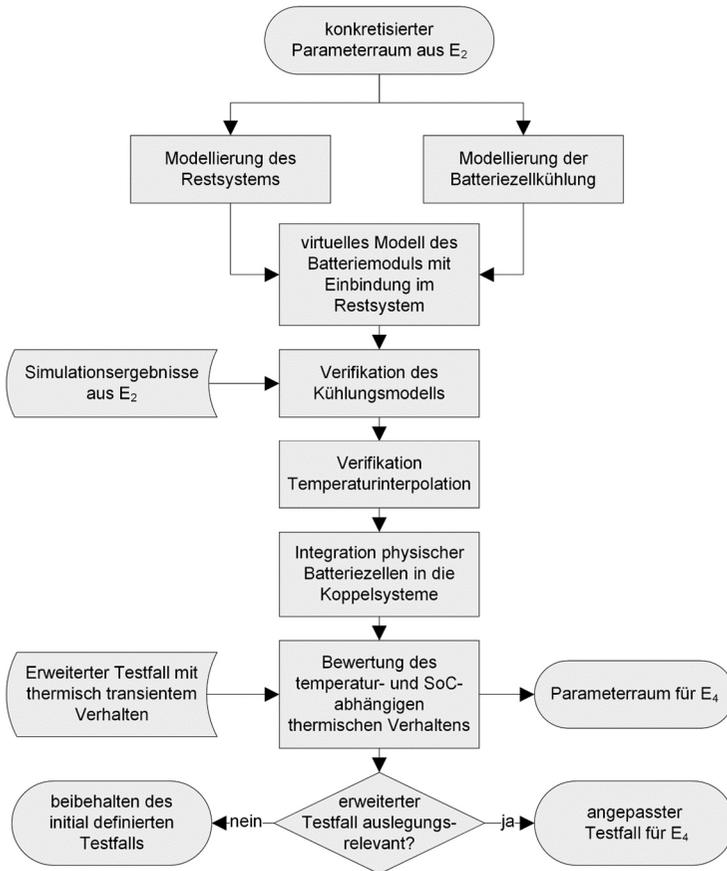


Abbildung 6.8: Aktivitäten mit der dritten Entwicklungsgeneration (E_3) in Form eines gemischt physisch-virtuellen Modells mit einem virtuellen Kühlsystem und realen Batteriezellen zur strukturierten Validierung einer Batteriezellkühlung bei querumströmten zylindrischen Batteriezellen

Vor dem eigentlichen Versuchsbeginn werden die drei physischen Batteriezellen thermisch als auch elektrisch in den Prüfaufbau integriert. Dies bedeutet einerseits, dass die Batteriezellen mit entsprechender Sensorik zur Erfassung des thermischen und als auch elektrischen Zustands bestückt werden. Für die Berechnung des Gesamtärmestroms am Zellmantel, über die lokal gemessene Wärmestromdichte, ist ggf. eine Kalibrierung des Sensors notwendig. Andererseits werden die Zellen an

elektronische Lasten/Spannungsquellen sowie in eine Temperierung integriert, um den thermischen und elektrischen Zustand zu regeln.

Nach erfolgter Integration der Zellen können potenziell auslegungsrelevante Betriebszustände des Batteriemoduls für den Parameterraum aus E_2 (Lade-/Entladeprofile, SoC und thermischer Zustand des Batteriemoduls) untersucht werden. Anhand der Versuchsergebnisse wird das thermische Verhalten des Batteriemoduls im untersuchten Parameterraum, als auch die untersuchten Testfälle hinsichtlich ihrer Auslegungsrelevanz bewertet. Entsprechend kann der Parameterraum abhängig vom Zielsystem für die folgende Entwicklungsgeneration beibehalten oder eingeschränkt werden. Ebenso kann der initiale Testfall auf Basis der Versuchsergebnisse für die folgenden Entwicklungsgenerationen E_4 und E_5 angepasst werden.

Der Ansatz der Validierungsumgebung als zentrales Element dieser Entwicklungsgeneration wird im Folgenden beschrieben.

Bei E_3 handelt es sich um ein gemischt physisch-virtuelles Modell, gemäß dem IPEK-XiL-Ansatz, welches für die Validierung von Batteriezellkühlungen mit homogener Wärmestromdichte am Zellmantel geeignet ist. Da ein Teil der Validierungsumgebung unabhängig von der zu untersuchenden Zellmantelkühlung eines Batteriemoduls ist, können auch andere Kühlungsarten, neben der hier beschriebenen, mit der Validierungsumgebung untersucht werden.

Bei dieser Validierungsumgebung soll auf eine vorherige Vermessung der verwendeten Batteriezelle zur Parametrisierung des Modells verzichtet werden. Stattdessen kommen drei physische Batteriezellen zum Einsatz, um das thermische und elektrische Verhalten des Batteriemoduls unter Berücksichtigung der Kühlung und der elektrischen Verbindung der Zellen abzubilden. (Eisele, Oser, Kaeske & Albers, 2019)

Christen et al. (2017) beschreiben einen Prüfaufbau, der eine lokal aufgelöste Temperatur- oder Wärmestromregelung am Gehäuse von prismatischen Batteriezellen während des Ladens und Entladens ermöglicht. Der Ansatz der Wärmestromregelung am Zellgehäuse wurde auf die entwickelte gemischt physisch-virtuelle Validierungsumgebung gemäß dem IPEK-XiL -Ansatz für Batteriemodule mit zylindrischen Batteriezellen und homogener Mantelkühlung übertragen (Eisele, Oser & Albers, eingereicht).

Abbildung 6.9 beschreibt die Validierungsumgebung für die Modellierung des thermischen und elektrischen Verhaltens von Batteriemodulen aus zylindrischen Batteriezellen mit homogener Zellmantelkühlung gemäß dem IPEK-XiL-Ansatz. Das elektrische und thermische Verhalten der verwendeten Batteriezellen ist unbekannt.

Drei physisch vorliegende Batteriezellen sind Teil des Connected Systems. Diese Zellen stellen die Interpolationspunkte für das thermische und elektrische Verhalten des virtuellen Modells des Batteriemoduls, des System-in-Development (SiD), dar. (Eisele et al., eingereicht)

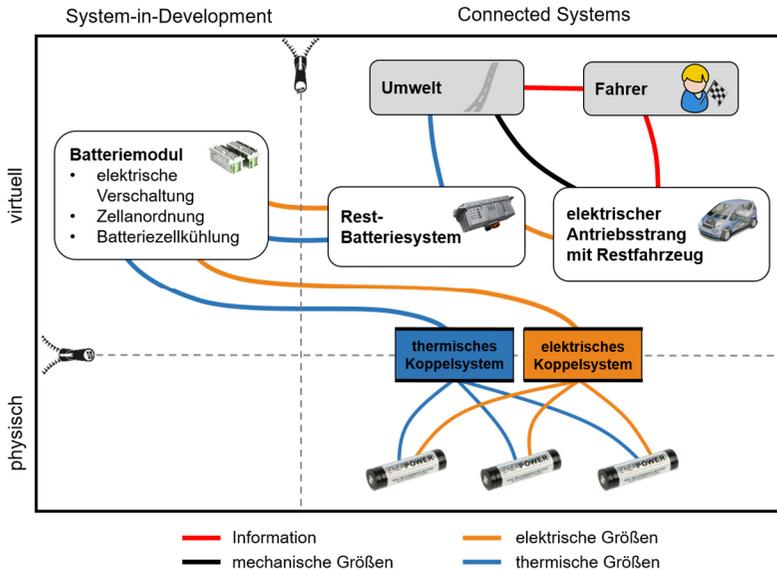


Abbildung 6.9: Validierungsumgebung für Batteriemodule aus zylindrischen Batteriezellen mit homogener Zellmantelkühlung und exemplarisch virtuell modellierten Connected Systems gemäß des IPEK-XiL-Ansatzes (Eisele et al., eingereicht; Eisele et al., 2019)

Jede der drei physischen Batteriezellen hat ihre virtuelle Position und elektrische Integration in diesem Batteriemodul. Das Modell des Batteriemoduls bildet die Kühlung der Zellen sowie deren elektrische Verschaltung ab und berechnet die resultierenden thermischen und elektrischen Randbedingungen für die physischen Batteriezellen. In Abbildung 6.10 sind die genannten Randbedingungen für eine physische Zelle in Form von elektrischem Strom, Fluidtemperatur, Wärmeübergangskoeffizient und Kühlfläche aufgeführt. Hierdurch ergibt sich für die physische Zelle ein elektrischer Sollstrom sowie ein Sollwärmestrom an der Mantelfläche. Das elektrische bzw. das thermische Koppelsystem regelt diese Größen unter Nutzung des in Echtzeit erfassten Lade-/Entladestroms respektive des gemessenen Wärmestroms. (Eisele et al., eingereicht)

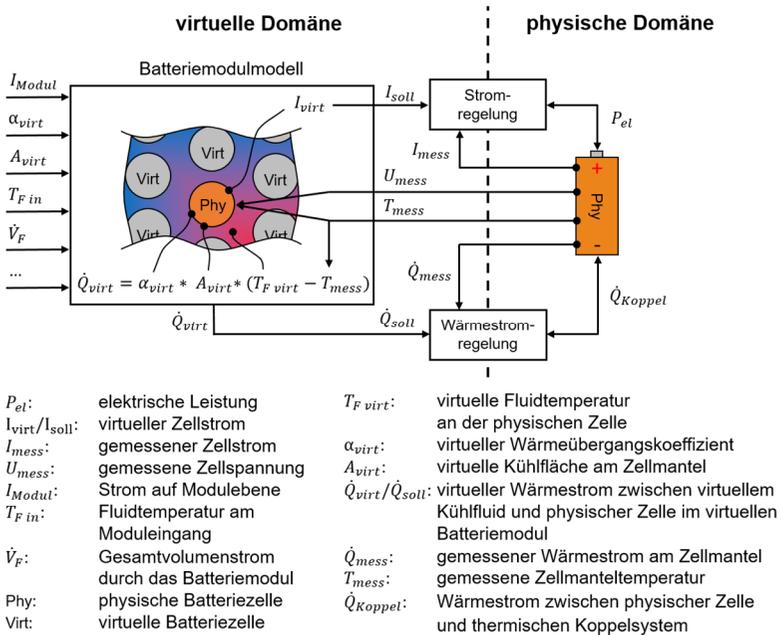


Abbildung 6.10: Thermische und elektrische Kopplung des virtuellen Batteriemodulmodells mit einer der drei physischen Batteriezele (Eisele et al., eingereicht)

Basierend auf den resultierenden Zustandsgrößen der physischen Batteriezele interpoliert das Batteriemodulmodell die Zustandsgrößen der virtuellen Batteriezele und bildet damit das thermische und elektrische Verhalten auf Batteriemodulebene ab (Eisele et al., eingereicht). Die notwendigen Interpolationsvorschriften werden in Kapitel 6.3.4 beschrieben.

Die virtuellen Modelle des Restfahrzeugs, der Umgebung und des Fahrers bilden als Teil der Connected Systems die thermischen und elektrischen Wechselwirkungen mit dem Batteriemodul ab. (Eisele et al., 2019)

Gemäß Eisele et al. (2019) werden für die beschriebene Modellbildung folgende Annahmen und Vereinfachungen getroffen:

- Die drei physischen Batteriezele haben identische Eigenschaften.

- Zu Beginn eines Tests weisen alle drei physischen Batteriezellen einen identischen Ladezustand (SoC) auf.
- Eine durch den Testfall verursachte Drift des SoC zwischen den drei Zellen hat im Rahmen des Testfalls keinen Einfluss auf das elektrische Verhalten.
- Der Unterschied zwischen der Zellmanteltemperatur und der Durchschnittstemperatur des Zellkörpers ist im untersuchten Testfall für alle Zellen zu jeder Zeit ähnlich, aber nicht zwangsläufig konstant.
- Die Temperaturabhängigkeit der elektrischen Größen der verwendeten Batteriezellen kann innerhalb der Temperaturdifferenzen, die im untersuchten Testfall im Batteriemodul auftreten, als linear angenommen werden.

In den folgenden Unterkapiteln werden die Teilsysteme der Validierungsumgebung für zylindrische Zellformate mit homogener Zellmantelkühlung beschrieben.

6.3.1 Physischer Teil der Validierungsumgebung – Connected Systems

Der physisch abgebildete Teil des Connected Systems besteht aus drei zylindrischen Batteriezellen, welche im Folgenden als Phy 1 bis Phy 3 bezeichnet werden. Dabei handelt es sich um genau jenen Zelltyp, der auch im zu entwickelnden Batteriemodul eingesetzt werden soll und dessen Wechselwirkung mit der Batteriezellkühlung für die Validierung von Interesse ist.

Da diese drei Zellen für die Interpolation der Temperaturverteilung und der elektrischen Zustandsgrößen des Batteriemoduls benötigt werden, müssen die Zellen die gleichen thermischen und elektrischen Eigenschaften aufweisen. Es wird empfohlen, Zellen der gleichen Produktionscharge im Neuzustand zu verwenden. Unterscheiden sich die Zellspannungen zu Versuchsbeginn, werden die drei Zellen für mehrere Stunden parallelgeschaltet, um den SoC anzugleichen. Ggf. sind Testmessungen mit den einzelnen Zellen in der Validierungsumgebung notwendig, um einen identischen Strom-Spannungsverlauf über den SoC zu gewährleisten.

6.3.2 Elektrisches Koppelsystem

Das elektrische Koppelsystem belastet die physischen Batteriezellen entsprechend den Vorgaben des virtuell modellierten Batteriemoduls im definierten Testfall und misst den Strom und den Spannungsabfall an den drei Batteriezellen. Die Verwendung von steuerbaren elektronischen Lasten ermöglicht das geregelte Entladen.

(Eisele et al., eingereicht) Steuerbare bidirektionale elektronische Lasten ermöglichen die Simulation von Lade- und Entladevorgängen. Die Simulation von Rekupe-rationsvorgängen im Betrieb von BEV oder die Abbildung realitätsnaher elektrischer Lastzyklen von Batteriemodulen in Hybrid- und Brennstoffzellenfahrzeugen erfordern den Einsatz bidirektionaler Lasten.

Bei der Auswahl der elektronischen Lasten ist zwischen maximalem Strom und der Stromregelgenauigkeit abzuwägen. Mit steigendem Maximalstrom sinkt bei Geräten gleichen Typs die absolute Regelgenauigkeit (Elektro-Automatik, 2017, S. 10). Primäres Kriterium ist der zu untersuchende Batteriezelltyp eines Zellformats. Hoch-energiezellen bspw. für BEV sind weniger stromtragfähig als Hochleistungszellen, wie sie in Batterien für Hybridfahrzeuge zum Einsatz kommen. Entsprechend des Testfalls und der elektrischen Verschaltung der Zellen ergeben sich auf Zellebene Stromprofile, welche die elektronischen Lasten regeln müssen.

Die Validierungsumgebung ist für ein elektrisches Verschaltungskonzept ausgelegt. Dieses sieht vor, dass sich das Batteriemodul aus Parallelschaltungen von Zellen zusammensetzt, die wiederum seriell miteinander verbunden sind (vgl. Abbildung 6.11 links). (Eisele et al., 2019) Dieses Konzept ist für die Verwendung von kleinformatigen, zylindrischen Batteriezellen das Relevanteste (Korthauer, 2013, S. 96–98). Durch die geringe Kapazität des Zellformats sind für Mobilitätsanwendungen stets Parallelschaltungen notwendig (Hettesheimer et al., 2017).

Aufgrund dieser Annahme werden für die Belastung der drei physischen Batteriezellen lediglich zwei elektronische Lasten eingesetzt. Beide werden im Stromregelmodus betrieben. Eines der Geräte belastet die zwei Batteriezellen Phy 2 und Phy 3, die parallel verschaltet werden. Diese beiden Zellen sind im virtuell modellierten Batteriemodul so positioniert, dass sie auch virtuell elektrisch parallel miteinander verschaltet sind. Die zweite Last betreibt die physische Zelle Phy 1, welche im virtuell modellierten Batteriemodul seriell zu den beiden anderen physischen Batteriezellen Phy 2 und Phy 3 verschaltet ist. (Eisele et al., eingereicht) Die physische Parallelschaltung von Phy 2 und Phy 3 erleichtert die Modellbildung und die Regelgenauigkeit. Würden beide Zellen einzeln mit je einer elektronischen Last betrieben (drei Lasten für das elektrische Koppelsystem), müssten diese zur Abbildung der virtuellen Parallelschaltung die Spannung der beiden Zellen stets auf ein identisches Niveau regeln. Bedingt durch den niedrigen Innenwiderstand von Li-Ionen-Zellen führen geringe Abweichungen in der Spannungsregelung zu größeren Abweichungen des sich einstellenden Stroms. Die beschriebene Verschaltung der Batteriezellen im elektrischen Koppelsystem sowie die Einbindung dieser Zellen im virtuell modellierten Batteriemodul sind in Abbildung 6.11 schematisch dargestellt.

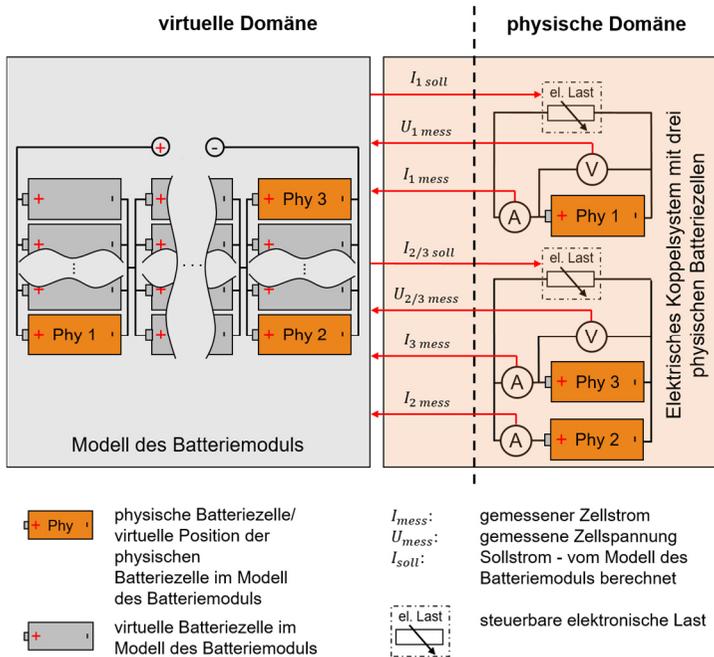


Abbildung 6.11: Einbindung der drei physischen Batteriezellen (Phy 1 – Phy 3) in die elektrische Verschaltung der virtuellen Batteriezellen des simulierten Batteriemoduls und Einbindung der selben physischen Batteriezellen in die Validierungsumgebung durch das elektrische Koppelsystem (Eisele et al., eingereicht)

6.3.3 Thermisches Koppelsystem

Das thermische Koppelsystem (auch Sensor-Aktor-System genannt) verbindet die thermische Simulation des Batteriemoduls und dessen Kühlung mit den drei physischen Batteriezellen. Aufgabe des thermischen Koppelsystems ist es, den Wärmestrom jeder einzelnen Batteriezelle soweit unabhängig voneinander in Echtzeit zu regeln, dass testfallspezifisch unterschiedliche thermische Randbedingungen innerhalb eines Batteriemoduls abgebildet werden können. (Eisele et al., 2019)

Als Regelgröße wird der Wärmestrom über die Zellmantelfläche verwendet. Hierfür ist mindestens ein Wärmestromsensor je Batteriezelle notwendig, um die gemess-

sene Wärmestromdichte über die Zellmantelfläche abzubilden. Über einen Temperatursensor wird die Oberflächentemperatur der Batteriezelle erfasst, welche im virtuell modellierten SiD zur Berechnung des Sollwärmestroms dient. (Eisele et al., eingereicht) Nach Christen et al. (2017) berechnet sich die Sollwärmestromdichte \dot{q}_{soll} an der Batteriezelloberfläche gemäß Formel 3:

$$\dot{q}_{soll} = \alpha_{virt} * (T_{phy} - T_{cool}) \quad 3$$

\dot{q}_{soll}	<i>Sollwärmestromdichte</i>
α_{virt}	<i>simulierter Wärmeübergangskoeffizient</i>
T_{phy}	<i>gemessene Zellmanteltemperatur</i>
T_{cool}	<i>Temperatur des simulierten Kühlelements</i>

An die Messketten werden zwei Hauptanforderungen gestellt. Erstens wird ein minimaler Einfluss der Sensorik auf die Wärmeströme am Zellmantel und die Wärmekapazität der Zellen angestrebt, um die thermischen Eigenschaften der Batteriezelle nicht zu verändern. Zweitens wird eine möglichst hohe Messgenauigkeit angestrebt.

Um auf Batteriesystemebene einen Temperaturunterschied zwischen den Zellen von maximal 5 K einzuhalten, sind auf Modulebene aufgrund deren thermisch serieller Verschaltung nur geringe Temperaturunterschiede zu erwarten. Wird von einem Temperaturunterschied von nur 1 K im Modul ausgegangen, ist eine zehnfach höhere Messgenauigkeit sinnvoll. Deshalb wird bei den Temperaturmessungen eine relative Abweichung der Messwerte zueinander von $\pm 0,1$ K im untersuchten Temperaturbereich angestrebt. Dies ermöglicht die im Batteriemodul simulierten und durch den Aktor des thermischen Koppelsystems erzeugten Temperaturunterschiede zwischen den Zellen hinreichend genau zu erfassen. (Eisele et al., eingereicht)

Die Validierungsumgebung dient in Rahmen dieser Arbeit zur Abbildung des thermischen Verhaltens querumströmter zylindrischer Zellen. Um das Potenzial der gemischt physisch-virtuellen Modellbildung zu heben, sollen in weiteren Arbeiten auch andere Batteriezellkühlungen mit homogener Mantelkühlung zylindrischer Zellen mit dieser Validierungsumgebung untersucht werden können. Mögliche Kühlkonzepte wären z. B. auf Konduktion basierende Mantelkühlungen zylindrischer Zellen oder Luftkühlungen. Deshalb wurde für den physischen Teil des Koppelsystems nach einer gut steuerbaren homogenen Mantelkühlung der Zellen im thermischen Koppel-

system gesucht, unabhängig von der zu untersuchenden Batteriezellkühlung, welche virtuell abgebildet wird. Eine aktive Temperierung der Polflächen ist in dieser Validierungsumgebung nicht vorgesehen (Eisele et al., 2019).

Die in (Christen et al., 2017; Rizzo et al., 2016) angewandte Temperierung prismatischer Zellen über mehrere Peltier-Elemente an der Zelloberfläche ist nicht ohne Weiteres auf kleinformatische zylindrische Zellen zu übertragen. Neben der Miniaturisierung des Aufbaus stellt die geringe Wärmefreisetzung der kleinformatischen Zellen eine Herausforderung dar (Christen et al., 2017). Die Wärmekapazität einer derartigen Temperierung, welche das thermische Verhalten der Batteriezelle parasitär beeinflusst, als auch die gekrümmte Kontaktfläche am Zellmantel gehören zu den Herausforderungen bei der Übertragung der Temperierung auf zylindrische Zellformate (Kreuer, 2017)². Zur Abbildung einer am Zellmantel homogenen Kühlung wurde sich aufgrund der genannten Problemstellungen gegen das beschriebene Konzept der Temperierung entschieden und die im Folgenden beschriebene Temperierung durch erzwungene Konvektion entwickelt (Kaeske, 2018)³:

Die Mantelflächen der Batteriezellen werden in je einer zylindrischen Testkammer in axialer Richtung mit Kühlflüssigkeit umströmt, um über den Umfang einen möglichst homogenen Wärmestrom zu erzielen. Da über den lokal gemessenen Wärmestrom des Sensors auf den Gesamtwärmestrom über die Zellmantelfläche geschlossen wird, ist die konstruktive Umsetzung einer homogenen Kühlung der Zellmantelfläche im Prüfaufbau entscheidend für die Regelgenauigkeit des thermischen Zustandes der Batteriezellen (Eisele et al., eingereicht). Diese Anforderung einer möglichst homogenen Zellmantelkühlung, ist der Grund warum sich gegen eine Querumströmung entschieden wurde, obwohl genau diese im Virtuellen abgebildet werden soll. Denn der Wärmeübergang und damit auch der lokale Wärmestrom variiert bei Querumströmung eines Zylinders über den Mantelumfang (Sarkar, Shah, Haji-Sheikh & Jain, 2014).

² Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

³ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

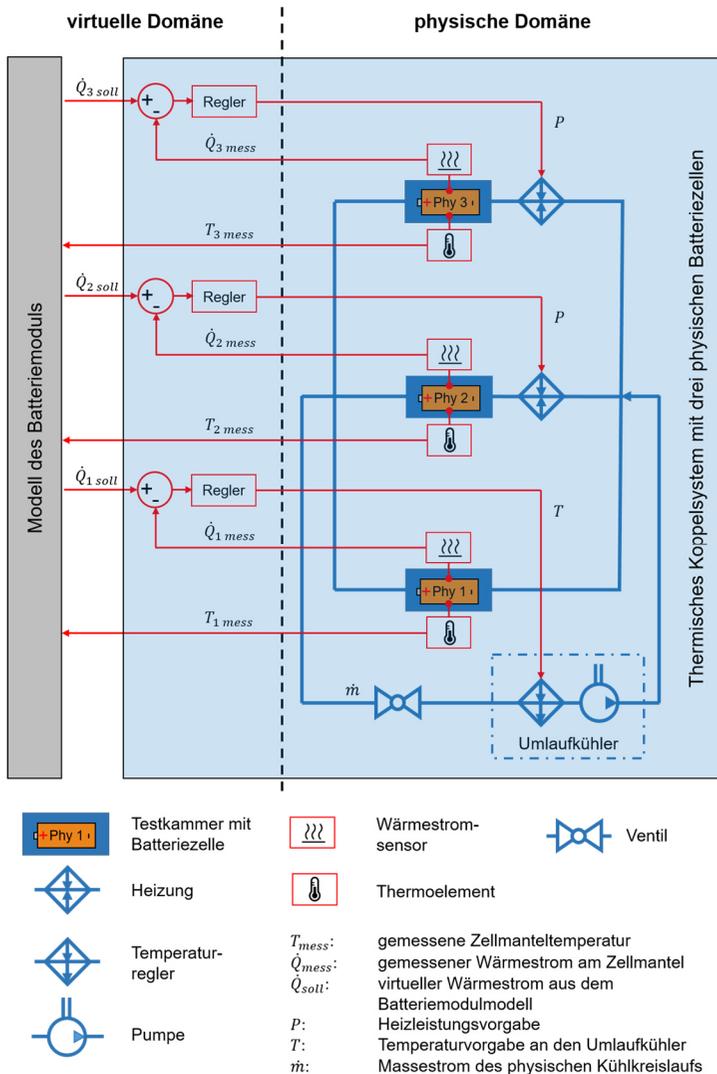


Abbildung 6.12: Prinzip des thermischen Koppelsystems zur individuellen Temperierung der drei Batteriezellen. Die Batteriezellen befinden sich in einer Testkammer und werden axial mit Kühflüssigkeit umströmt. Die Zellen sind mit je einem Temperatur- und Wärmestromsensor versehen. (Eisele et al., eingereicht)

In Abbildung 6.12 ist das thermische Koppelsystem für die drei Batteriezellen skizziert. Die drei Testkammern mit den Zellen und Temperatur- als auch Wärmestromsensoren werden parallel durch einen zentralen Umlaufkühler mit Kühlflüssigkeit versorgt. Durch eine gleichmäßige Verteilung des Volumenstroms liegen in den Testkammern für die drei Zellen ähnliche thermische Randbedingungen vor. Da bei diesem Konzept der Volumenstrom konstant bleibt, ist eine aktive Variation des Wärmestroms zwischen Batteriezelle und Kühlflüssigkeit nur durch die Adaption der Kühlfluidtemperatur möglich. Eine Variation dieser Randbedingungen zur unabhängigen Regelung der Kühlung in jeder Testkammer ist durch vorgeschaltete Heizungen möglich. (Eisele et al., eingereicht)

Bei der Verwendung von nur zwei Heizungen wird die Fluidtemperatur in der ersten Testkammer alleinig durch den Umlaufkühler geregelt. Hingegen kann die Kühlleistung an zwei der drei Batteriezellen durch vorgeschaltete Heizungen reduziert werden, indem die Heizung das Kühlmittel erwärmt. Diese Heizleistung bestimmt den maximal abbildbaren Temperaturunterschied im stationären Zustand zwischen den Zellen und damit den simulierten Temperaturgradienten innerhalb des Batteriemoduls. (Eisele et al., eingereicht)

Entsprechend können die Batteriezellen in den Testkammern mit vorgeschalteter Heizung bei gleicher Aufteilung des Volumenstroms zwischen den drei Strängen nie stärker, sondern nur gleich oder mit geringerer Leistung, als die Zelle ohne vorgeschalteter Heizung gekühlt werden. Dies ist entsprechend bei der Definition der virtuellen Position der drei physischen Batteriezellen in das virtuelle Batteriemodul zu berücksichtigen. (Eisele et al., eingereicht)

6.3.4 Virtueller Teil der Validierungsumgebung – System-in-Development

Das virtuelle Modell des SiD beinhaltet die Kühlung der Batteriezellen, deren elektrische Verschaltung sowie Anordnung und nutzt die Messgrößen der Koppelsysteme zur Interpolation des thermischen und elektrischen Verhaltens der einzelnen Batteriezellen im Modul (Eisele et al., 2019).

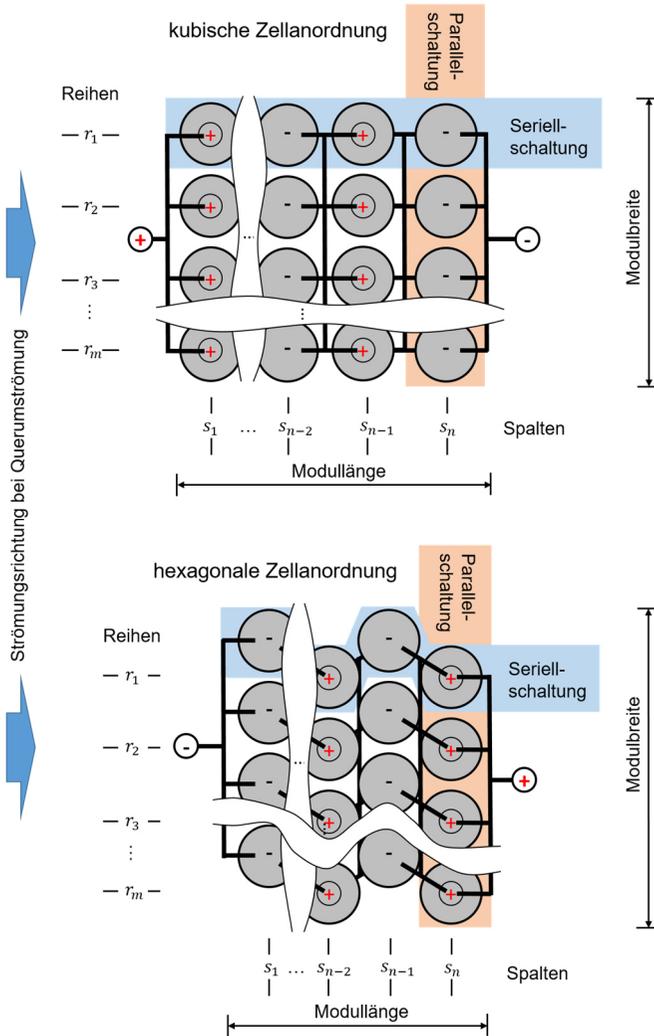


Abbildung 6.13: Elektrische Verschaltung und geometrische Beschreibung eines Batteriemoduls bei kubischer (Skizze oben) und hexagonaler (Skizze unten) Zellanordnung

In die Modellierung des Batteriemoduls fließen die folgenden geometrischen Größen ein: die Zellanordnung, Anzahl der Zellen in Reihen und Spalten sowie der Abstand zwischen den Zellen. Diese Größen und deren Abhängigkeiten sind in Abbildung 6.13 dargestellt. Zellanordnung und -abstand werden für die Zellkühlmodellierung benötigt. Hier wird zwischen hexagonaler und kubischer Anordnung mit äquidistantem oder richtungsabhängigem Abstand zwischen den Batteriezellen unterschieden. Das Längen- und Breitenverhältnis des Moduls wird über die Spalten und Reihenzahl beschrieben, sodass jeder Batteriezelle eine Position in der Verschaltungsebene zugewiesen wird. Die Zellposition wird für die Modellierung der elektrischen Verschaltung, der Kühlungsmodellierung und der Interpolation der Zustandsgrößen benötigt.

Wie bereits beschrieben sieht die Validierungsumgebung die elektrische Verschaltung vor, dass Batteriezellen parallel und diese Stränge wiederum seriell verschaltet sind. Geometrische Zellanordnung und elektrische Verschaltung sind miteinander gekoppelt. Parallel verschaltete Zellen sind stets über die komplette Modulbreite angeordnet, die serielle Verschaltung der Parallelstränge erfolgt senkrecht dazu. Somit ergibt sich aus der Anzahl der parallel verschalteten Zellen die Modulbreite und durch die serielle Verschaltung die Modullänge. Diese beschränkende Korrelation zwischen elektrischer Verschaltung und Zellanordnung wurde aufgrund der Interpolation elektrischer und thermischer Größen definiert. Entsprechend werden die Batteriezellen stets senkrecht zur Parallelschaltung querumströmt (vgl. Abbildung 6.13).

Die Batteriezellkühlung als Teil des SiD wird testfallspezifisch modelliert. Allgemein gilt soll eine modellierte Batteriezellkühlung in vereinfachter Form Wärme- und Stoffströme in der Ebene der verschalteten Batteriezellen abbilden. Wärmeströme innerhalb einer Batteriezelle werden nicht modelliert. (Eisele et al., 2019)

Abhängig von der Komplexität des Kühlvorgangs sind physikalische Modellansätze nicht immer geeignet. Bspw. können mehrere querumströmte Batteriezellen mit den entsprechenden Wärmeübergängen am Zellumfang mit echtzeitfähigen Modellen nicht so exakt wie in CFD-Simulationen abgebildet werden. Das Modell des virtuellen SiD muss deutlich einfacher aufgebaut sein. (Eisele et al., eingereicht)

Bei konvektiver Kühlung am Zellmantel können hingegen empirische Modelle wie in (Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 2013) herangezogen werden, um den mittleren Wärmeübergangskoeffizient zwischen Fluid und Zellmantel zu berechnen. Bei Kühlung der Zellen durch erzwungene Konvektion muss das Durchmischen des Kühlfluides abhängig der Anordnung abgebildet werden. Der Einfluss des Durchmischens auf die Kühlung steigt mit zunehmend inhomogener

Wärmefreisetzung zwischen den Zellen und/oder ungleichmäßiger Kühlung im Modul. (Eisele et al., eingereicht) Hierfür können ebenfalls CFD-Simulationen (z. B. aus E₂) als Referenz genutzt werden, um die Kühlmitteldurchmischung und damit den Kühleffekt an den einzelnen Zellen nachzubilden.

Interpolation des temperaturabhängigen elektrischen Zustands der virtuellen Batteriezellen

Eisele et al. (2019) beschreiben die Interpolation wie folgt: Basierend auf der virtuellen Position und der elektrischen Integration der drei physischen Batteriezellen Phy 1, Phy 2 und Phy 3 in das virtuell modellierte Batteriemodul wird der thermische und elektrische Zustand der verbleibenden virtuellen Batteriezellen des Moduls interpoliert. Für die elektrische Integration der physikalischen Batteriezellen in das virtuelle Modul sind die folgenden Punkte zu beachten. Die physischen Zellen Phy 2 und Phy 3, die im elektrischen Koppelsystem parallelgeschaltet sind, sind im virtuellen Modell ebenfalls parallel verschaltet. Während die verbleibende physische Zelle Phy 1 im elektrischen Koppelsystem unabhängig gesteuert wird und immer in Reihe zu den beiden anderen physischen Zellen im virtuellen Batteriemodul geschaltet ist (vgl. Abbildung 6.11). Die Positionen der physischen Zellen im virtuellen Modul, hängen von der elektrischen Verschaltung und der Kühlung der Batteriezellen ab. Hierzu wurden drei Randbedingungen definiert, die auch in Abbildung 6.14 dargestellt sind:

- a) Eine physische Zelle ist an der wärmsten und eine Zelle an der kältesten Stelle des Moduls positioniert.
- b) Die beiden physisch parallel verschalteten Zellen Phy 2 und Phy 3 sind im virtuellen Parallelstrang mit dem größten Temperaturunterschied positioniert.
- c) Eine Zelle aus der physischen Parallelschaltung und die verbleibende physische Zelle befinden sich im Modul an Positionen mit thermisch ähnlichen Randbedingungen, weisen aber nicht dieselbe Temperatur auf.

Die Randbedingungen (a) und (b) sollen eine Extrapolation der elektrischen Zustandsgrößen vermeiden. Die Randbedingung (c) bezieht sich auf die Zellmanteltemperatur als charakteristische Größe für den thermischen Zustand einer Batteriezelle. Unterscheiden sich die thermischen Randbedingungen, können die Zellen bspw. trotz gleicher Zellmanteltemperatur unterschiedliche Durchschnittstemperaturen aufweisen. Diese sind für das elektrische Verhalten entscheidend und könnten die Interpolation der elektrischen Zustandsgrößen beeinflussen. Testfallbeding

muss ggf. bei der Positionierung ein Kompromiss zwischen den drei Kriterien eingegangen werden. (Eisele et al., 2019)

Die physischen Zellen werden durch die beiden elektrischen Zustandsgrößen Strom I_{phy} und Spannung U_{phy} sowie durch die thermische Zustandsgröße Zellmanteltemperatur T_{phy} beschrieben. Diese sind Messgrößen des elektrischen bzw. thermischen Koppelsystems. Wie in Kapitel 6.3 beschrieben, ist der SoC aller Zellen zu Versuchsbeginn identisch und kann über die Integration der Zustandsgröße I_{phy} kontinuierlich berechnet werden. Hierfür werden nach jedem Versuch die drei Zellen parallelverschaltet, um den identischen Ausgangszustand zu erreichen. Eine Drift des SoC kann mit dieser Validierungsumgebung identifiziert aber nicht dessen langfristige Folgen, über mehrere Lade- und Entladezyklen, untersucht werden.

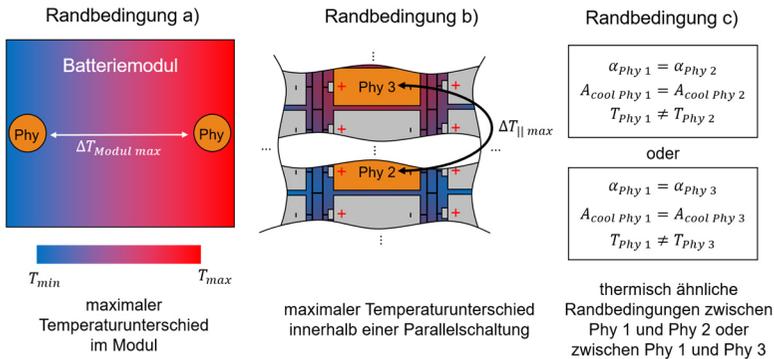


Abbildung 6.14: Drei Randbedingungen zur Positionierung der drei physischen Batteriezellen (Phy 1 – Phy 3) in das zu untersuchende Batteriemodul

Treten temperaturbedingte Unterschiede im elektrischen Zustand der Batteriezellen im Batteriemodul auf, gilt es die elektrischen Zustände der virtuellen Batteriezellen über den elektrischen Zustand der drei physischen Batteriezellen abzuschätzen. Die Zustandsbeschreibung der virtuellen Zellen erfolgt durch Interpolation der beiden Größen Strom I_{virt} und Spannung U_{virt} auf Basis einer Referenzzelle. Eine Referenzzelle ist eine virtuelle oder physische Zelle im Zellverbund deren elektrischer Zustand zum Zeitpunkt der Interpolation bekannt ist. Für die Interpolation nach Eisele et al. (2019) gelten drei Regeln:

1. Für die Interpolation der Zustandsgröße Strom innerhalb einer Parallelschaltung wird der temperaturabhängige Gradient des Stroms zwischen den physisch parallel verschalteten Batteriezellen Phy 2 und Phy 3 verwendet. Die Spannung eines Strangs an parallelverschalteten Zellen wird durch die Referenzzelle der jeweiligen Parallelschaltung bestimmt.
2. Ist die in (1) genannten Referenzzelle virtuell, werden deren Zustandsgrößen Strom und Spannung aus den temperaturabhängigen Gradienten von Strom und Spannung zwischen den physischen Zellen in Reihe im virtuellen Batteriemodul berechnet. Die Randbedingung (c) definiert, zwischen welchen der Zellen Gradienten verwendet werden (Gradienten zwischen Phy 1 und Phy 2 oder zwischen Phy 1 und Phy 3).
3. In Parallelsträngen des virtuellen Batteriemoduls, in denen physische Zellen positioniert sind, sind diese selbst die Referenzzellen für die Interpolation in (1). Der elektrische Zustand der Referenzzelle muss in diesem Fall nicht berechnet werden, sondern liegt über die Messgrößen des elektrischen Kopelsystems vor.

Die genannten Gradienten von Spannung und Strom über die Temperatur werden aus den Zustandsgrößen der drei physischen Zellen berechnet. Beispielhaft für die Zustandsgröße Spannung wird in Formel 4 der Gradient zwischen den physischen Zellen Phy 1 und Phy 2 berechnet. (Eisele et al., 2019)

$$\frac{dU_{phy,12}}{dT} = \frac{U_{phy,2} - U_{phy,1}}{T_{phy,2} - T_{phy,1}} \quad 4$$

Die Interpolation von Strom und Spannung sind gemäß Eisele et al. (2019) im Folgenden beschrieben.

Der lineare Interpolationsansatz für die Spannung U_{virt} folgt dem linearen Zusammenhang des ohmschen Gesetzes. Sind die Referenzzelle und die virtuelle Zelle, deren Zustand interpoliert wird, seriell verschaltet, berechnet sich die Spannung gemäß:

$$U_{virt} = U_{ref} + (T_{virt} - T_{ref}) * \frac{dU_{phy,seriell}}{dT} \quad 5$$

U_{ref} *an der Referenzzelle anliegende Spannung*

T_{ref} Zellmanteltemperatur der Referenzzelle

$\frac{dU_{phy_seriell}}{dT}$ Spannungsgradient über die Temperatur zwischen zwei parallel verschalteten physischen Batteriezellen (Phy 2 und Phy 3)

Da ausschließlich Batteriemodule betrachtet werden, die aus seriell verschalteten Parallelsträngen bestehen, wird die Zustandsgröße Strom I_{virt} stets gemäß Formel 6 interpoliert.

$$I_{virt} = I_{ref} + (T_{virt} - T_{ref}) * \frac{dI_{phy_parallel}}{dT} \quad 6$$

I_{ref} an der Referenzzelle anliegender Strom

$\frac{dI_{phy_parallel}}{dT}$ Stromgradient über die Temperatur zwischen zwei parallel verschalteten physischen Batteriezellen (Phy 2 und Phy 3)

Auch bei der Strominterpolation wurde ein linearer Ansatz gewählt. Dieser entspricht nicht dem ohmschen Gesetz, in dem der Strom über den Quotienten von Spannung und Widerstand berechnet wird. Der aufgrund des ohmschen Innenwiderstandes hervorgerufene Spannungsabfall kann bei variierendem Strom wegen der kapazitiven Eigenschaften der Zellen nicht in Echtzeit ermittelt werden. (Eisele et al., 2019)

Die Anwendung der Regeln zur Interpolation ist beispielhaft in Abbildung 6.15 gezeigt. Eisele et al. (2019) beschreiben beispielhaft das Batteriemodul in der Verschaltung 3P4S gemäß Abbildung 6.15. Aufgrund einer nicht weiter spezifizierten Batteriezellkühlung, bildet sich diese beispielhaft konstruierte Temperaturverteilung im Modul aus. Wie in Kapitel 6.3.2 beschrieben, sind zwei der physischen Batteriezellen parallel verschaltet (Phy 2 und Phy 3) und werden durch eine gemeinsame elektrische Last des elektrischen Koppelsystems geregelt. Auch im virtuellen Batteriemodul befinden sich diese beiden Zellen in einem gemeinsamen Strang parallel verschalteter Zellen. In Abbildung 6.15 decken die parallel verschalteten physischen Zellen Phy 2 und Phy 3, den maximalen Temperaturgradienten innerhalb einer Parallelschaltung ab (vgl. Randbedingung (b)). Die andere physische Zelle Phy 1 befindet sich an einer Position mit thermisch ähnlichen Randbedingungen wie Phy 2 am Rand des Batteriemoduls, weist aber eine andere Temperatur auf (vgl. Randbedingung (c)). Phy 1 als wärmste Zelle und Phy 3 als kühlpste Zelle erfüllen die Randbedingung (a).

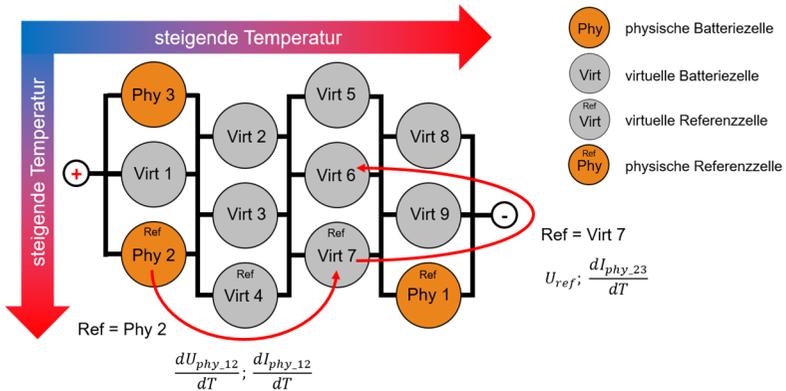


Abbildung 6.15: Beispielhaft konstruierte Temperaturverteilung in einem Batteriemodul. Beschreibung des Interpolationsprinzips von Zustandsgrößen virtueller Batteriezellen (Virt) über die messtechnisch erfassten Zustandsgrößen physischer Batteriezellen (Phy), die im virtuellen Batteriemodul (3P4S⁴) integriert sind. Jede Parallelschaltung aus drei Batteriezellen hat je eine Referenzzelle (Ref), welche die Stützstelle für die Interpolation der elektrischen Zustände im Parallelstrang darstellt. (in Anlehnung an Eisele et al., 2019)

Zur Bestimmung des elektrischen Zustandes der virtuellen Zelle Virt 6 werden im ersten Schritt die Zustandsgrößen für die Referenzzelle, in diesem Fall Virt 7, bestimmt, die sich in der selben Parallelschaltung wie die zu interpolierende Zelle befindet (vgl. Regel 1). Deshalb werden in diesem Fall auch die Gradienten zwischen Phy 1 und Phy 2 für die Interpolation der Zustandsgrößen Strom und Spannung der Referenzzelle genutzt (vgl. Regel 2 + 3). Ausgehend von der Referenzzelle Virt 7 können über den Gradienten zwischen Phy 2 und Phy 3 die Zustandsgröße Strom der virtuellen Zelle Virt 6 bestimmt werden. Die Spannung an der Zelle entspricht aufgrund der Parallelschaltung der Referenzzelle Virt 7 (vgl. Regel 1). (Eisele et al., 2019)

⁴ 3P4S: je 3 Batteriezellen sind parallelverschaltet und in 4-facher Ausführung seriell miteinander verschaltet

Berechnung des Stroms der Referenzzellen

Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, bilden die Referenzzellen die Stützstellen für die Interpolation der temperaturabhängigen elektrischen Zustände der virtuellen Zellen. Die Berechnung des Stroms bzw. des Sollstroms durch die virtuellen respektive der physischen Referenzzellen wird im Folgenden erläutert.

Der Strom des simulierten Batteriemoduls ergibt sich aus der Addition der Einzelströme der parallel geschalteten Batteriezellen. Gemäß den Modellannahmen in Kapitel 6.3 kann eine Ungleichverteilung des Stroms innerhalb einer Parallelschaltung im Modul nur durch Temperaturunterschiede zwischen den Zellen hervorgerufen werden. Weicht der Strom einer virtuellen Batteriezelle im Parallelstrang vom Strom I_{Ref} der entsprechenden Referenzzelle ab (vgl. Abbildung 6.15), wird dieser Stromunterschied durch ΔI beschrieben. Der Gesamtstrom I_{ges} eines Parallelstrangs aus p Zellen (Strom auf Modulebene) berechnet sich somit aus:

$$I_{ges} = p * I_{Ref} + \sum_{n=1}^{p-1} \Delta I_n \quad 7$$

In Testfall kann der Gesamtstrom I_{ges} auf Modulebene im Prüflauf entweder direkt vorgegeben oder über die elektrische Leistungsvorgabe berechnet werden. Somit berechnet sich der Strom der Referenzzelle eines Parallelstrangs, ob physisch oder virtuell, durch Umstellen der Formel 8:

$$I_{Ref} = \frac{I_{ges} - \sum_{n=1}^{p-1} \Delta I_n}{p} \quad 8$$

Im Fall der physischen Referenzzelle Phy 1 wird der nach Formel 8 berechnete Strom als Sollwert an die entsprechende elektronische Last als Teil des elektrischen Koppelsystems gesendet.

Eine Besonderheit bildet hierbei, wie schon in Kapitel 6.3.2 beschrieben, die Regelung der zweiten elektronischen Last für die parallelverschalteten Zellen. Der hierfür notwendige Sollstrom der Referenzzelle Phy 2 $I_{Ref\ Phy2}$ wird unter Zuhilfenahme des gemessenen Stroms der Zelle Phy 3 $I_{mess\ Phy3}$ berechnet:

$$I_{Ref\ Phy2} = \frac{I_{ges} - I_{mess\ Phy3} - \sum_{n=1}^{p-2} \Delta I_n}{p} \quad 9$$

Interpolation der Zellmanteltemperatur der virtuellen Batteriezellen

Die folgenden Inhalte dieses Unterkapitels zur Interpolation der Zellmanteltemperatur der virtuellen Batteriezellen wurden bereits in der Veröffentlichung von Eisele et al. (eingereicht) beschrieben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird auf eine mehrfache Kennzeichnung der Quelle verzichtet.

Auf Grundlage der Temperaturmessungen am Zellmantel der drei physischen Batteriezellen und dem modellierten Kühlsystem des SiD wird die Temperatur der virtuellen Batteriezellen berechnet.

Gemäß der dritten Teilforschungsfrage soll für die Validierung der Batteriezellkühlung mit der entwickelten Validierungsumgebung auf Daten aus thermischen oder elektrischen Vermessungen der Batteriezellen verzichtet werden. Somit ist die Aufstellung einer Wärmestrombilanz über die Batteriezellenoberfläche im Echtzeitmodell nicht möglich. Hierfür wären zumindest die Wärmekapazität und die radiale Wärmeleitfähigkeit unter der Annahme identischer Wärmequellterme aller Batteriezellen für die Berechnung der Zellmanteltemperatur notwendig.

Da die Batteriezellen ausschließlich senkrecht zur Strömungsrichtung parallel miteinander verschaltet sind und die Wärmeübergangskoeffizienten ausschließlich in Strömungsrichtung variieren, wurde ein richtungsabhängiger Ansatz zur Temperaturschätzung entwickelt. Zunächst wird die Interpolationsvorschrift entlang der Strömungsrichtung für die virtuellen Referenzzellen zwischen den physischen Batteriezellen Phy 1 und Phy 2 beschrieben.

Für die Approximation der Zellmanteltemperatur der virtuellen Referenzzellen wird die Annahme getroffen, dass die Kühlleistungen an benachbarten Batteriezellen in bzw. entgegen der Strömungsrichtung, auch bei abweichender Temperatur eine ähnliche ist. Entsprechend wird vereinfacht angenommen, dass das Verhältnis der Kühlleistungen zwischen virtueller Referenzzelle und physischer Zelle gleich eingesetzt werden kann:

$$\frac{Q_{Ref\ virt}}{Q_{phy}} = \frac{\Delta T_{virt} * \alpha_{Ref\ virt} * A}{\Delta T_{phy} * \alpha_{phy} * A} = 1 \quad 10$$

- $Q_{Ref\ virt}$ *Kühlleistung der virtuellen Referenzzelle, deren Temperatur berechnet werden soll*
- Q_{phy} *Kühlleistung einer der physischen Batteriezellen, die elektrisch sowie thermisch seriell zueinander verschaltet sind (Phy 1 und Phy 2)*
- ΔT_{virt} *Differenz zwischen lokaler Fluidtemperatur im virtuellen Batteriemodul und der virtuellen Referenzzelle*
- ΔT_{phy} *Differenz zwischen lokaler Fluidtemperatur im virtuellen Batteriemodul und der physischen Batteriezelle*
- $\alpha_{Ref\ virt}$ *Wärmeübergangskoeffizient am Zellmantel der Referenzzelle*
- α_{phy} *Wärmeübergangskoeffizient am Zellmantel der physischen Batteriezelle*
- A *Kühlfläche am Zellmantel*

Durch Umstellen der Formel 10 kann die Zellmanteltemperatur der virtuellen Batteriezele $T_{Ref\ virt}$ mithilfe der Temperatur des entsprechenden Fluidelements $T_{FE\ Ref\ virt}$ berechnet werden:

$$T_{Ref\ virt} = \frac{\alpha_{phy}}{\alpha_{Ref\ virt}} * \Delta T_{phy} + T_{FE\ Ref\ virt} \quad 11$$

Der Temperaturunterschied ΔT_{phy} zwischen dem Zellmantel der physischen Batteriezele und dem entsprechenden Fluidelement ergibt sich durch die gemessene Zellmanteltemperatur $T_{phy\ mess}$ und der simulierten Fluidtemperatur $T_{FE\ phy}$.

$$\Delta T_{phy} = T_{phy\ mess} - T_{FE\ phy} \quad 12$$

Je weiter die Reihe der virtuellen Referenzzelle von der Reihe der physischen Batteriezelle für die Approximation entfernt ist, desto mehr verliert die Annahme identischer Kühlleistung an Gültigkeit. Dies liegt an den unterschiedlichen thermischen Randbedingungen entlang der Strömungsrichtung (Fluidtemperatur, Wärmeübergangskoeffizienten, temperaturabhängige Heizleistung der Zelle etc.). Deshalb werden beide physische Zellen Phy 1 und Phy 2 für die Interpolation genutzt, die gemäß der Vorgabe an Stellen mit möglichst unterschiedlichen Temperaturen positioniert werden. Abhängig von der Position der virtuellen Referenzzelle zwischen den physischen Batteriezellen Phy 1 und Phy 2 werden die Interpolationsformeln über den Faktor v zueinander gewichtet und addiert:

$$T_{Ref\ virt} = (1 - v) * \frac{\alpha_{phy\ 1}}{\alpha_{virt}} * \Delta T_{phy\ 1} + v * \frac{\alpha_{phy\ 2}}{\alpha_{virt}} * \Delta T_{phy\ 2} + T_{FE\ Ref\ virt} \quad 13$$

$$T_{Ref\ virt} = \Delta T_{Ref\ virt} + T_{FE\ Ref\ virt} \quad 14$$

v Gewichtung des Interpolationsanteils von Phy 2.
Je weniger Zellreihen sich zwischen Phy 2 und der virtuellen Referenzzelle befinden, desto größer ist v ($0 < v < 1$)

Die Temperaturschätzung senkrecht zur Strömungsrichtung unterscheidet sich dahingehend, dass die Wärmeübergangskoeffizienten in der Parallelschaltung identisch sind. Deshalb wird der Temperaturunterschied zwischen Fluid und Zellmantel an der jeweiligen Referenzzelle für die Berechnung der Temperatur der virtuellen Batteriezellen derselben Parallelschaltung senkrecht zur Strömungsrichtung verwendet.

$$T_{virt} = \Delta T_{Ref\ virt} + T_{FE\ virt} \quad 15$$

$T_{FE\ virt}$ Temperatur des Fluidelements der virtuellen Batteriezelle der Parallelschaltung

Einen Sonderfall stellen die Parallelschaltungen dar, in denen physische Batteriezellen integriert sind. Sie dienen als physische Referenzzellen und $\Delta T_{Ref\ Phys\ 1}$ bzw. $\Delta T_{Ref\ Phys\ 2}$ sowie $T_{FE\ Ref\ Phys\ 1}$ respektive $T_{FE\ Ref\ Phys\ 2}$ werden gemäß Formel 13 für die Berechnung der Zellmanteltemperatur der virtuellen Batteriezellen der entsprechenden Parallelschaltung verwendet.

6.3.5 Virtueller Teil der Validierungsumgebung – Connected Systems

Die Connected Systems beeinflussen die elektrische und thermische Belastung des SiD. Die Connected Systems stellen die einzige Schnittstelle zum modellierten SiD neben den über die Koppelsysteme eingebundenen physischen Batteriezellen dar. Entsprechend werden über die Connected Systems die Testfälle für das SiD definiert. Die Wechselwirkungen mit dem Restsystem Fahrzeug und Umwelt sind im Folgenden beschrieben.

Größere Batteriesysteme in BEV und PHEV bestehen aus mehreren elektrisch und thermisch verschalteten Batteriemodulen. Diese Verschaltung und damit Leistungsaufteilung kann durch das Restbatteriesystem abgebildet werden. Weitere Connected Systems werden gemäß dem jeweiligen Testfall modelliert. Abhängig vom Validierungsziel müssen die entsprechenden Einflüsse auf das SiD abgebildet werden. Bspw. kann ein Testfall thermisch nicht zu vernachlässigende Umweltbedingungen für die Funktion des Kühlsystems beinhalten, wie besonders warme oder kalte Außentemperaturen beim Betrieb eines BEV. Die elektrische Belastung der Batteriemodule im Testfall ergibt sich wiederum durch das Fahrerverhalten z. B. im Form eines Fahrzeuggeschwindigkeitsverlaufes und durch die von der Umwelt aufgeprägten Fahrwiderstände, die über den elektrischen Antriebsstrang in ein Strom-Spannungsprofil auf Batteriesystemebene umgewandelt werden.

Gleichermaßen kann der Testfall auch einen Schnellladevorgang abbilden, sofern das elektrische Koppelsystem hierfür geeignet ist. Entsprechend bedarf es in diesem Testfall einer anderen Modellierung der Connected Systems, da nicht der elektrische Antriebsstrang, sondern das Ladesystem im Leistungsfluss steht.

Die einfachste Form der virtuellen Connected Systems ist die Vorgabe eines Stromprofils auf Modulebene bei konstanter Kühlmiteileingangstemperatur und adiabaten Randbedingungen des Batteriemoduls unter Vernachlässigung thermischer oder elektrischer Wechselwirkungen mit dem Restsystem.

6.4 E4: physisch-virtuelles Modell mit thermischen Batteriezellmodellen als Koppelsystem

In dieser Entwicklungsgeneration ist das vollständige Kühlsystem physisch modelliert. Dadurch ist die Validierungsumgebung dieser Entwicklungsgeneration spezifischer auf die zu untersuchende Batteriezellkühlung zugeschnitten als in E_3 , in der das SiD vollständig virtuell modelliert wird. Bedingt durch die physische Modellbildung sind einige Parameter, die in E_1 , E_2 bzw. in E_3 vernachlässigt wurden, im Prüfaufbau zu berücksichtigen, beispielsweise strömungsführende Elemente seitlich des Zellverbundes. Entsprechend ist der Prüfaufbau so zu gestalten, um vor allem geometrische Parameter (aus der vorgelagerten Entwicklungsgeneration sowie neue Parameter) zeit- und ressourceneffizient zu variieren. Um die Versuchsdurchführung effizient und sicher zu gestalten, werden statt realer Batteriezellen physisch-virtuelle Batteriezellen gemäß des IPEK-XiL-Ansatzes eingesetzt. Deren physische Eigenschaften sollen die thermischen Eigenschaften der realen Batteriezelle hinreichend genau abbilden. Die Steuerung der konstanten Wärmefreisetzung der Zellen erfolgt in der virtuellen Domäne. Durch die Entwicklung und Anwendung eines physischen Prüfaufbaus können zudem wichtige Erkenntnisse über nicht thermische Zielgrößen konstruktiver Natur erlangt werden. Beispielhaft sind Erkenntnisse im Dichtungsbereich zu nennen.

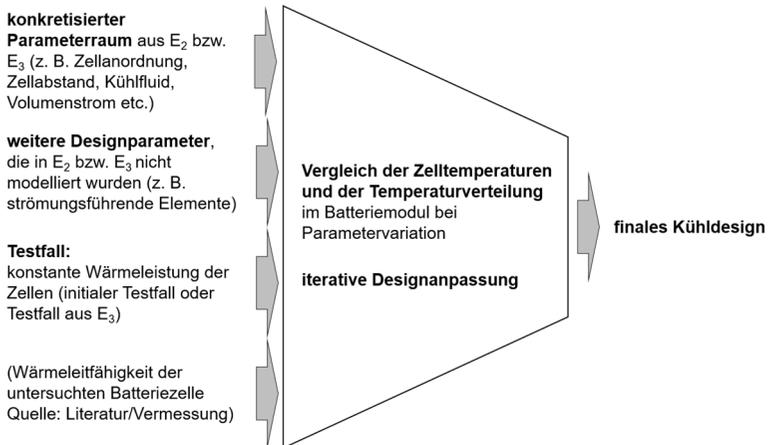


Abbildung 6.16: Input- und Outputgrößen für die Validierung des thermischen Verhaltens sowie die Synthese in E_4

Validierungsziel ist die Finalisierung des Kühldesigns auf Basis des konkretisierten Parameterraums aus der CFD-Simulation (E_2) oder der optional vorgelagerten E_3 . Hierfür sollen systematisch Vereinfachungen aus der virtuellen Modellbildung durch physische Modellbildung ersetzt werden. Zur Konkretisierung des Kühldesigns unter Berücksichtigung nicht thermischer Zielgrößen (z. B. Gewicht, Bauraum, Dichtigkeit etc.), wird das physische Modell der Kühlung im iterativen Verfahren angepasst. Die genannten Inputgrößen zur Finalisierung des Kühldesigns sind in Abbildung 6.16 zusammengefasst.

Die entwickelte Methode sieht vor, dass zunächst der Parameterraum auf Grundlage der vorhergehenden Entwicklungsgeneration und noch nicht betrachteter Parameter für die Finalisierung des Kühldesigns definiert wird. Diese Festlegung ist notwendig, um einen entsprechend variablen Prüfaufbau zu entwickeln, der eine effiziente Variation geometrischer Parameter erlaubt.

Statt realer Batteriezellen werden thermische Ersatzbatteriezellen (Batteriezellmodelle) eingesetzt. Bei der Entwicklung eines thermischen Batteriezellmodells sind die konstruktiven Wechselwirkungen mit dem Prüfaufbau, z. B. über Dichtflächen oder über Zugänglichkeit von Sensoren etc. zu berücksichtigen. Bei der Modellierung der Wärmeleitfähigkeit des thermischen Batteriezellmodells werden die Erkenntnisse aus der Validierung mittels CFD-Simulation in E_2 genutzt, um zu entscheiden ob eine isotrope Modellierung der Wärmeleitfähigkeit für die untersuchte Batteriezellkühlung geeignet ist. Der Ort der Temperaturmessung am thermischen Batteriezellmodell ist ebenso entscheidend für die thermische Modellierung.

Bei der Sensorpositionierung in/an der thermischen Ersatzbatteriezelle sind drei Dinge zu berücksichtigen:

1. Es muss geklärt werden, an welcher Stelle die Temperatur später an den realen Batteriezellen in E_5 gemessen werden soll, um einen Vergleich mit den Temperaturmessungen an den thermischen Ersatzbatteriezellen zu ermöglichen.
2. Der Messpunkt am thermischen Batteriezellmodell beeinflusst wie schon erwähnt die notwendige Modellierung der Wärmeleitfähigkeit. Um realistische Temperaturen im Zellinneren zu messen, muss das sich ausbildende Temperaturprofil aufgrund der Wärmeleitfähigkeit (Erhard et al., 2015; Osswald, Erhard, Wilhelm, Hoster & Jossen, 2015; Shah et al., 2014a) an dieser Messstelle möglichst der in der später eingesetzten realen Batteriezelle entsprechen. Dabei ist der erstgenannte Punkt zu berücksichtigen. Nicht immer liegen Daten zur Wärmeleitfähigkeit der realen Batteriezelle vor bzw. ist eine Temperaturmessung im Zellwickel einer realen Batteriezelle möglich.

3. Eine Beeinflussung der Wärmeübergänge auf der Zellmantelfläche durch Sensoren ist zu vermeiden.

Zusammenfassend wird für eine zeit- und ressourceneffiziente Validierung die einfachste Modellierung empfohlen, die für eine Bewertung der Temperaturverteilung im Zellverbund hinreichend genaue Messergebnisse liefert. Konkret wird eine isotrope Modellierung der Wärmeleitfähigkeit für das thermische Batteriezellmodell mit einer Temperaturmessstelle dicht unter der Mantelfläche empfohlen.

Entspricht die Wärmeleitfähigkeit des Materials der des Zellwickels in axialer und tangentialer Richtung ($20 - 50 \text{ W/m/K}$) (Korthauer, 2013, S. 185; Werner et al., 2017), werden Wärmeströme entlang der Zellmantelfläche realitätsnah abgebildet. Die für diese Wärmeströme verantwortlichen Temperaturunterschiede können z. B. durch unterschiedliche Wärmeflussdichten an der Zellmantelfläche entstehen. Zudem ist durch die Verwendung eines isotropen Materials eine geringe Streuung der Wärmeleitfähigkeit innerhalb und zwischen den Zellen zu erwarten.

Bei Inbetriebnahme der Batteriezellmodelle gilt es, Abweichungen in der Wärmeerzeugung zu bestimmen. Die Vertrauenswürdigkeit der Temperaturmesswerte an den thermischen Batteriezellmodellen werden durch entsprechende Randbedingungen im physischen Modell der Batteriezellkühlung in initialen Versuchen bestimmt.

Die Validierungsumgebung aus Batteriezellkühlung und Batteriezellmodellen ist in Abbildung 6.17 beispielhaft für die Simulation eines Ladevorgangs beschrieben. Die Batteriezellkühlung auf Modulebene als SiD wird über den Prüfaufbau physisch modelliert.

Das Kühlsystem des Fahrzeugs als Teil der *Connected Systems* wird durch einen Umlaufkühler mit einstellbarem Volumenstrom physisch abgebildet. Das *Koppelsystem* zwischen physischer und virtueller Domäne besteht aus dem thermischen Batteriezellmodell mit steuerbarer Wärmeleistung und lehnt sich an die Modellbildung von Hémerly et al. (2014) an. Der virtuelle Teil des thermischen Batteriezellmodells soll eine Steuerung der freizusetzenden Wärmemenge der Zellen entsprechend des angenommenen Testfalls und den modellierten Batteriezelleigenschaften ermöglichen. Die hier beispielhaft abgebildeten *Connected Systems*, Batteriesystem und Ladeinheit in der virtuellen Domäne, dienen zur Umrechnung der elektrischen Ladeleistung auf Batteriesystemebene in die thermische Leistung.

Nach erfolgter Inbetriebnahme der Validierungskonfiguration⁵ in Form des physischen Modells der Batteriezellkühlung inkl. der thermischen Batteriezellmodelle,

⁵ Definition „Validierungskonfiguration“ siehe Glossar

werden die mit Temperatursensoren bestückten Zellen so positioniert, dass die Temperaturverteilung im Zellverbund abgeschätzt werden kann. Da eine vollfaktorielle Parametervariation, bedingt durch die geometrischen Adaptionen mit einem hohen Zeitaufwand verbunden ist, wird empfohlen, einfach zu variierende Parameter einzeln zu optimieren. Entsprechend werden Parameterkombinationen als Einheiten miteinander verglichen und für eine weitere Optimierung ausgewählt.

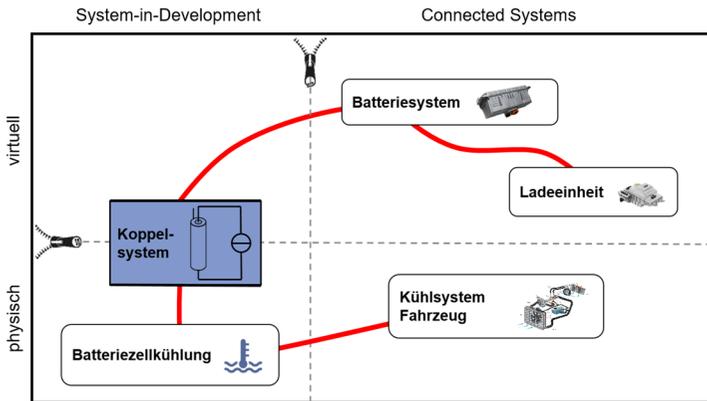


Abbildung 6.17: Physisch-virtuelle Modellbildung gemäß XiL-Ansatz zur Validierung des Kühldesigns für zylindrische Batteriezellen unter thermisch stationären Bedingungen während dem Laden des Batteriesystems (in Anlehnung an Eisele, Kohler, Prinz & Ott, 2017)

Die folgende Optimierung des Kühldesigns im Prüfaufbau erfolgt unter Einbezug neuer Designparameter, um den Reifegrad des Designs iterativ zu erhöhen. Auch hier wird empfohlen, einzelne Parameter zu optimieren, bevor neue Parameter im Versuch modelliert und berücksichtigt werden. Ggf. können vorhandene Wechselwirkungen zwischen den Parametern weitere Iterationen erfordern. Die Variation der Parameter erfolgt dabei stets unter Berücksichtigung der Temperaturverteilung im Zellverbund und unter Berücksichtigung nicht thermischer Zielgrößen, wie bspw. des Bauraums. Final ist zu prüfen, ob die modellierte Batteriezellkühlung das Zielsystem erfüllt und das Design in einen physischen Prototyp eines Batteriemoduls überführt werden kann. Die beschriebene Vorgehensweise zur Entwicklung des finalen Kühldesigns ist in Abbildung 6.18 dargestellt.

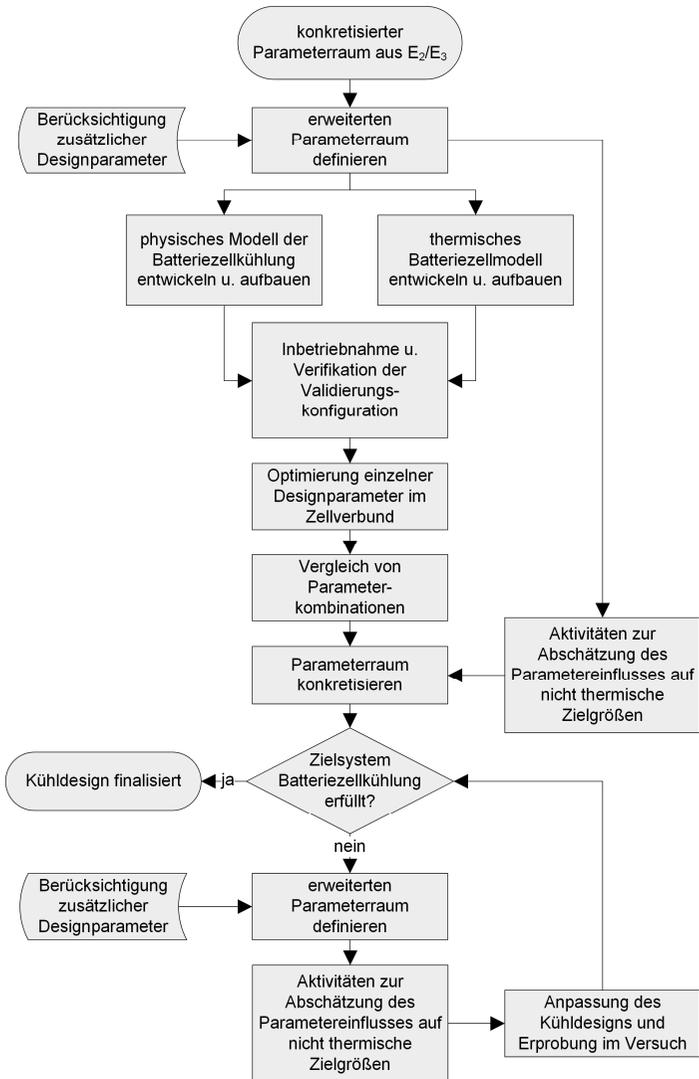


Abbildung 6.18: Aktivitäten mit der vierten Entwicklungsgeneration (E₄) in Form eines gemischt physisch-virtuellen Modells mit einem physischem Kühlsystem und physisch-virtuellen Batteriezellmodellen zur strukturierten Validierung einer Batteriezellkühlung bei querumströmten zylindrischen Batteriezellen mittels Kühlflüssigkeit

6.5 E₅: physisches Modell

Bei dieser Entwicklungsgeneration wird das Kühldesign im Prüfaufbau mit realen Batteriezellen getestet. Hierbei werden Batteriezellen verwendet, die für die spätere Anwendung bzw. für einen ersten physischen Prototyp (E₅) angedacht sind. Durch eine elektrische Verschaltung der Zellen wie im Batteriemodul, liegt eine realitätsnahe physische Modellbildung der Batteriezellkühlung vor.

Validierungsziel ist die Absicherung des mittels E₄ entwickelten Kühldesigns durch den Einsatz realer Batteriezellen. Dadurch wird auch die Modellbildung der thermischen Batteriezellmodelle aus der vorherigen Entwicklungsgeneration (E₄) abgesichert. Wie in Abbildung 6.19 dargestellt, dienen neben dem finalen Kühldesign auch die thermischen und elektrischen Bedingungen in verschiedenen Testfällen als Input. Auf letztere wird noch genauer eingegangen.

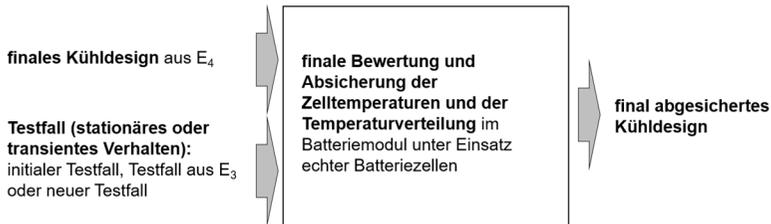


Abbildung 6.19: Input- und Outputgrößen für die Validierung des thermischen Verhaltens in E₅

Für den Einsatz realer Batteriezellen muss der Prüfaufbau erweitert werden. Entsprechend der elektrischen Verschaltung der Batteriezellen und der Kapazität ergeben sich Spannungen und maximale Ströme, die zur Abbildung des Testfalls notwendig sind. Über ein steuerbares Netzgerät und eine steuerbare elektronische Last werden die Batteriezellen auf definierte Zustände geladen bzw. entladen. Für die Spannungs- und Temperaturüberwachung der Batteriezellen ist ein BMS notwendig, welches Schütze zwischen Batteriezellen und Netzgerät bzw. elektronischer Last ansteuert. Entsprechend der Spannungslage und der Anzahl eingesetzter Batteriezellen sind ggf. weitere Sicherheitsvorkehrungen zu treffen.

Um die Temperaturmessungen mit denen der thermischen Batteriezellmodelle zu vergleichen, müssen die Sensorpositionen in radialer Richtung möglichst nahe beieinanderliegen. Wie schon im Kapitel 6.4 beschrieben, sind bei der Sensorintegra-

tion der thermischen Batteriezellmodelle die Möglichkeiten der Sensorpositionierung in/an den realen Batteriezellen zu berücksichtigen. Nicht immer ist die Integration von Temperatursensoren im Inneren von zylindrischen Batteriezellen gemäß Drake et al. (2015) möglich und sinnvoll. Aus diesem Grund wird eine Messung an der Zellmanteloberfläche empfohlen. Möglichst kleine Sensoren kommen zum Einsatz, um konduktive und konvektive Wärmeflüsse am Zellmantel möglichst wenig zu beeinflussen.

Wo am Umfang des Zellmantels der Temperatursensor angebracht wird, hängt von zwei Faktoren ab, die sich gegenseitig beeinflussen. Erstens die Sensorposition am Umfang der thermischen Batteriezellmodelle in E_4 . Je näher diese beieinanderliegen, desto ähnlicher sind die konvektiven Vorgänge an der Messstelle, welche die lokale Temperatur beeinflussen. Zweitens muss der Einfluss des Sensors auf die Strömung berücksichtigt werden. Lokale Änderungen an der Messstelle können Messwerte, aber auch die Strömungsverhältnisse an anderen Batteriezellen verändern. Beide Aspekte müssen bei der Sensorposition gegeneinander abgewogen werden. Die Verteilung der Messpunkte im Zellverbund orientieren sich, für einen besseren Abgleich, an den Messpunkten in der letzten Entwicklungsgeneration E_4 unter Verwendung der thermischen Batteriezellmodelle (vgl. Kapitel 6.4).

Bei den Versuchen mit realen Batteriezellen kann zwischen zwei Testfällen unterschieden werden. Es kann von Interesse sein, mit den realen Batteriezellen mit einer äquivalenten C-Rate zu entladen/laden, um dieselbe Wärmeleistung im thermisch stationären Zustand wie in den Versuchen mit den thermischen Batteriezellmodellen in E_4 zu erzeugen. Beruht die initial definierte Wärmeleistung im Testfalls für die Validierung auf den Eigenschaften der eingesetzten Batteriezelle, sind die elektrischen Inputgrößen (Strom oder elektrische Leistung) bereits definiert. Bei der Entwicklung einer formatspezifischen Batteriezellkühlung kommen unterschiedliche Batteriezellen zum Einsatz, sodass sich die Wärmeleistungen unterscheiden können und der initiale Testfall generisch definiert wurde. In diesem Fall muss die äquivalente C-Rate iterativ in Versuchen ermittelt werden, um das Kühldesign final über die eingesetzten Batteriezellen abzusichern.

Der zweite Testfall kann ein beliebiger auslegungsrelevanter, elektrischer Testfall, bspw. aus den Versuchen mit E_3 sein, welches zu einer anderen Wärmefreisetzung der Zellen als im initial definierten Testfall führt. Entsprechend des Zielsystems wird der jeweilige Testfall in den Versuchen angewandt, um das Kühldesign final abzusichern. Grundsätzlich können beide Testfälle auch kombiniert mit dieser Entwicklungsgeneration getestet werden.

Sofern die gemessenen Temperaturen der Batteriezellen nicht dem Zielsystem entsprechen sollten, ist eine Adaption des Kühldesigns notwendig. Dies kann zwei Gründe haben. Erstens, die thermischen Batteriezellmodelle bilden nicht hinreichend genau das thermische Verhalten der eingesetzten Batteriezellen ab und/oder zweitens, die Wärmeleistung der Batteriezelle weicht zu stark von der im Testfall modellierten ab.

Der Ablauf der beschriebenen Validierung unter Einsatz realer Batteriezellen ist in Abbildung 6.20 dargestellt.

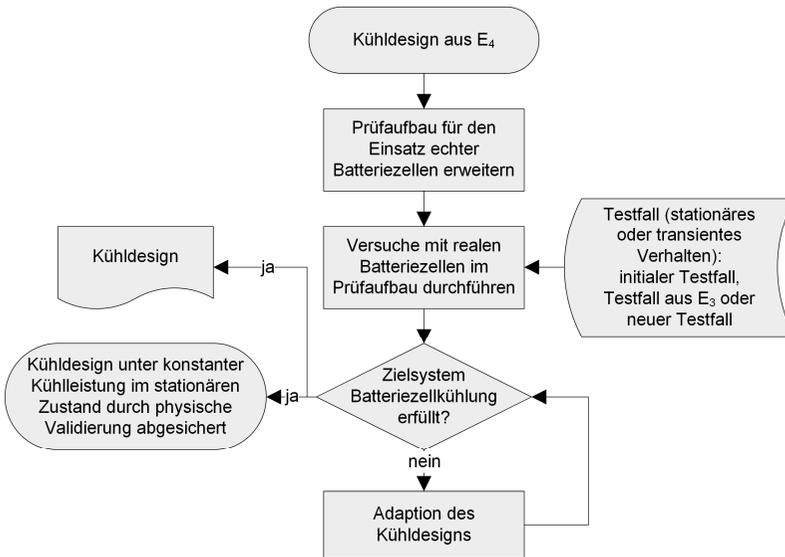


Abbildung 6.20: Aktivitäten mit der fünften Entwicklungsgeneration (E₅) in Form eines physischen Modells zur strukturierten Validierung einer Batteriezellkühlung bei querumströmten zylindrischen Batteriezellen mittels Kühlflüssigkeit

6.6 Fazit zur Methodenentwicklung

Die entwickelte Methode zur Strukturierung der Validierung von Batteriezellkühlungen in Form von querumströmten zylindrischen Batteriezellen widmet sich der ersten Teilforschungsfrage:

Wie können virtuelle, physische und gemischt physisch-virtuelle Modelle gemäß des IPEK-XiL-Ansatzes für die entwicklungsbegleitende Validierung von zellmantelgekühlten Batteriemodulen eingesetzt werden, um daraus das Design der nachfolgenden Entwicklungsgeneration abzuleiten?

Die Validierungsaktivitäten werden über fünf Entwicklungsgenerationen eines zu entwickelnden Batteriemoduls strukturiert, welche sequenziell durchlaufen, aber entwicklungspezifisch übersprungen werden können. Die Ein- und Ausgangsgrößen für die Validierung und Synthese der jeweiligen Entwicklungsgeneration zur kontinuierlichen Konkretisierung und Absicherung des Kühldesigns sind in der Methode beschrieben. Dabei werden im Sinne einer effizienten Validierung, zur Unterstützung des Frontloadings in der frühen Phase der Entwicklung, einfache virtuelle, physische bzw. gemischt physisch-virtuelle Modelle genutzt. Die Methode beinhaltet die einzelnen Schritte der Modellbildung sowie der Validierung und der Synthese. Diese Aktivitäten führen zu einem konkretisierten Parameterraum des Kühldesigns, bis in E_5 das finale Kühldesign abgesichert wird.

Die Entwicklungsgenerationen zeichnen sich durch eine steigende Modellgüte entlang des Entwicklungsprozesses als auch durch einen zunehmenden Anteil an physischer Modellbildung ab E_3 aus. Alle Entwicklungsgenerationen, mit Ausnahme von E_3 , sind für die Validierung des thermisch stationären Verhaltens gekühlter Batteriemodule konzipiert. E_1 und E_2 nutzen eine Berechnungs- respektive Simulationemethode nach dem Stand der Technik und sind durch die rein virtuelle Modellbildung hinsichtlich des zylindrischen Zellformats flexibel. Anders verhält es sich bei $E_3 - E_5$, die aufgrund des physischen Anteils in der Modellbildung spezifisch für ein zylindrisches Zellformat aufgebaut werden müssen.

Speziell für E_3 ist eine neuartige Validierungsumgebung erforderlich, um das thermisch transiente Verhalten eines Batteriemoduls durch gemischt physisch-virtuelle Modellbildung darzustellen. Die in E_3 beschriebene Validierungsumgebung wird in Kapitel 7 für das Zellformat 18650 aufgebaut sowie verifiziert. Anwendung findet die Validierungsumgebung in einem Entwicklungsbeispiel im Rahmen der Methoden-anwendung, welches in Kapitel 8.2 beschrieben ist. Hierdurch soll die der dritten Teilforschungsfrage beantwortet werden:

Wie kann mittels gemischt physisch-virtueller Modellbildung gemäß des IPEK-XiL-Ansatzes das thermisch transiente Verhalten eines zellmantelgekühlten Batteriemoduls ohne ein parametrisiertes virtuelles Batteriezellmodell abgebildet werden?

Für E_4 bedarf es einer entwicklungsspezifischen Validierungsumgebung zur iterativen Anpassung und Absicherung des Kühldesigns. Die Validierungsumgebung besteht aus einem modularen physischen Aufbau, zur Modellierung der Batteriezellkühlung, sowie gemischt physisch-virtuellen Batteriezellmodellen mit steuerbarer Heizleistung. In Kapitel 8.1 wird diese Validierungsumgebung entwicklungsspezifisch aufgebaut und genutzt, um die zweite Teilforschungsfrage zu beantworten:

Wie können mittels gemischt physisch-virtueller Modellbildung gemäß des IPEK-XiL-Ansatzes iterative Anpassungen eines Kühldesign für ein zellmantelgekühltes Batteriemodul hinsichtlich des thermisch stationären Verhaltens validiert werden, ohne verschiedene, eigenständige physische Prototypen mit Batteriezellen einzusetzen?

E_5 nutzt den selben physischen Prüfaufbau aus E_4 zur Abbildung der Batteriezellkühlung, aber unter Verwendung echter Batteriezellen.

7 Entwicklung der gemischt physisch-virtuellen Validierungsumgebung für E₃

Zur Abbildung des thermisch transienten Verhaltens eines Batteriemoduls in E₃ wird, die in Kapitel 6.3 beschriebene gemischt physisch-virtuelle Validierungsumgebung benötigt. Die thermischen und elektrischen Koppelsysteme als zentrale Elemente dieser Validierungsumgebung, sind für die Untersuchungen unterschiedlicher Batteriemodulgrößen (Anzahl der Batteriezellen und geometrische Abmessungen des Moduls etc.) sowie Batteriezellkühlungen geeignet. Die Batteriezellkühlung wird vollständig virtuell modelliert. Im Sinne einer effizienten Validierung müssen die Koppelsysteme dem Entwickler in E₃ einsatzbereit vorliegen. Entwicklungsspezifische Anpassungen der Validierungsumgebung erfolgen dann lediglich in der virtuellen Domäne und sind in Kapitel 8.2 beschrieben, um die dritte Teilforschungsfrage zu beantworten. Dies unterscheidet die Validierungsumgebung in E₃ von der in E₄, bei der die Batteriezellkühlung physisch und damit entwicklungsspezifisch modelliert wird.

Die Umsetzung beider Koppelsysteme und die Verifikation des thermischen Koppelsystems werden im Folgenden beschrieben.

7.1 Zielsystem zur Entwicklung der Validierungsumgebung

Prinzipiell soll diese bereitgestellte Validierungsumgebung eine Validierung von Mantelkühlkonzepten an Hochenergiezellen im thermisch und elektrisch transienten Betrieb auf Batteriemodulebene ermöglichen. Ein Kühlkonzept als Teil des SiD muss virtuell und entwicklungsspezifisch modelliert werden (siehe Kapitel 8.2.1). Das Temperaturfenster der Batteriezellen, in dem das elektrische und thermische Verhalten von Batteriemodulen mit integrierter Kühlung über die Validierungsumgebung untersucht werden kann, soll zwischen 15 °C und 45 °C liegen. Damit sind Untersuchungen bis zu 5 K unterhalb und oberhalb des optimalen Betriebsbereich von Li-Ionen Zellen (Korthauer, 2013, S. 166) möglich. Auch kühlssystembedingte Temperaturunterschiede von bis zu 5 K innerhalb eines Batteriemoduls sollen mit der Validierungsumgebung darstellbar sein. Somit werden im empfohlenen Grenzbereich für Temperaturdifferenzen innerhalb eines Batteriemoduls/Systems (Korthauer, 2013, S. 167) Untersuchungen ermöglicht.

Die hohe Energiedichte von Hochenergiezellen geht mit einer geringen elektrischen Leistung einher, was sich auf die Auslegung des elektrischen Koppelsystems der Validierungsumgebung auswirkt. Der maximale Entladestrom von Hochenergiezellen des Formats 18650 namhafter Hersteller, mit einer nominalen Kapazität von 3.400 – 3.500 mAh beträgt nach dem Stand der Technik 10 A (Oh & Kim, 2014; SANYO Electric Co.; Yunwoong Kim, 2017). Als Anforderung an die Validierungsumgebung wurden Entladeströme je Zelle von bis zu 8 A (80 % des maximal zulässigen Entladestroms) formuliert. Dies entspricht dem zulässigen dauerhaften Entladedauerstroms der in der Arbeit verwendeten Zelle Samsung INR18650-35E3 (Yunwoong Kim, 2017). Die Validierungsumgebung wird für die Erprobung von Entladevorgängen aufgebaut. Rekuperations- und Ladevorgänge sind in dieser Konfiguration nicht abbildbar.

7.2 Elektrisches Koppelsystem

Das elektrische Koppelsystem wird in den folgenden Unterkapiteln in Aktoren, Sensoren und dem verbindenden Regelsystem aufgeteilt und beschrieben.

7.2.1 Sensoren des elektrischen Koppelsystems

Zur Erfassung des elektrischen Zustands der drei physischen Batteriezellen wird jeweils die Spannung und der Strom gemessen.

An den Polflächen der Zellen sind Nickelbleche geschweißt und diese wiederum mit Steckern versehenen Stromkabeln verlötet, um die Zellen elektrisch zu kontaktieren. Der Spannungsabgriff erfolgt an den elektrischen Steckverbindungen der präparierten Batteriezelle. Der zusätzliche Spannungsabfall über die Stecker, die Nickelbleche und das jeweilige Kabel wird im virtuellen Teil des Koppelsystems über die Widerstände und den Strom der jeweiligen Zelle kompensiert.

Der Widerstand an jeder präparierten Batteriezelle wird über das Vierpunktmessverfahren ermittelt. Hierfür wird der Widerstand zwischen Zellpol auf dem Nickelblechstreifen und dem Stecker der Zelle (siehe Abbildung 7.1 oben) sowie zwischen dem Stecker der Zelle und dem Spannungsabgriff am entsprechenden Gegenstück (Buchse) (siehe Abbildung 7.1 unten) gemessen.

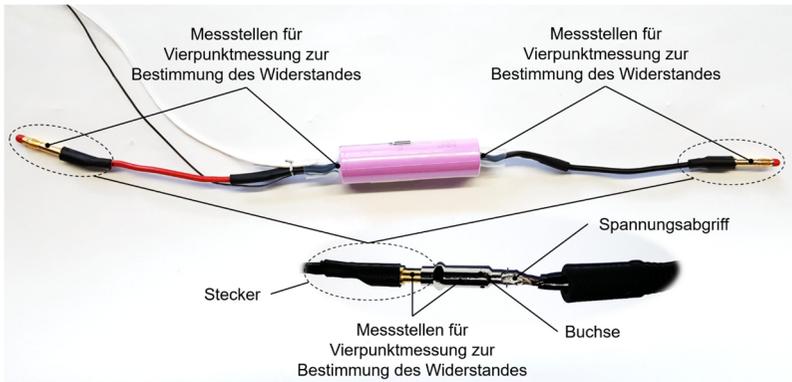


Abbildung 7.1: Elektrische Integration der physischen Batteriezellen in die Validierungsumgebung über das elektrische Koppelsystem. Oben: Messpunkte für die Widerstandsmessung zwischen den Zellpolen und den Steckern. Unten: Messpunkte für die Widerstandsmessung zwischen dem Spannungsabgriff und dem batteriezellseitigen Stecker.

Der Spannungsabfall wird an den drei Shunts ($7,5 \text{ m}\Omega$) gemessen und daraus der Strom für die drei Batteriezellen berechnet. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die zusätzlichen Widerstände der Shunts R_{Shunt} und deren Anschlusskabel R_{Kabel} sowie die Kontaktwiderstände $R_{Kontakt}$ zwischen Stecker und Buchse sowie an Schweißpunkten an den Zellpolen Einfluss auf die Stromverteilung zwischen den parallel geschalteten Zellen Phy 2 und Phy 3 haben. Das Verhältnis der Ströme im stationären Zustand berechnet sich gemäß folgender Formel:

$$\frac{I_{PZ2}}{I_{PZ3}} = \frac{R_{1PZ3} + R_{Shunt\ 3} + R_{Kabel\ 3} + R_{Kontakt\ 3}}{R_{1PZ2} + R_{Shunt\ 2} + R_{Kabel\ 2} + R_{Kontakt\ 2}} \quad 16$$

I_{PZ2} *Strom durch die physische Zelle 2*

I_{PZ3} *Strom durch die physische Zelle 3*

R_{1PZ} *Innenwiderstand der jeweiligen Batteriezelle*

Die zusätzlichen ohmschen Widerstände durch das elektrische Koppelsystem schwächen den Einfluss des temperaturabhängigen Innenwiderstands der Batteriezelle auf die Stromaufteilung in paralleler Verschaltung. Die zusätzlichen Widerstände ($R_{Shunt} + R_{Kabel} + R_{Kontakt}$) belaufen sich in der beschriebenen Umsetzung des elektrischen Koppelsystems (vgl. Abbildung 7.1) je Zelle bei ca. $28,5 \text{ m}\Omega$ (für

Phy 2 und Phy 3). Der Einfluss auf die Stromverteilung in Abhängigkeit vom Innenwiderstand der Batteriezellen wird im Rahmen dieser Arbeit nicht näher quantifiziert und muss testfallabhängig überprüft werden.

7.2.2 Aktoren des elektrischen Koppelsystems

Zur Entladung der Hochenergiezellen wird die steuerbare elektronische Last PSI 9200-18 T der Fa. EA-Elektro-Automatik GmbH & Co. KG in zweifacher Ausführung eingesetzt. Dieses weist eine maximale Stromlast von 18 A auf. Da eines der zwei baugleichen Geräte durch zwei parallel verschaltete Zellen belastet wird, ist der maximale Strom je Zelle bei gleicher Stromaufteilung auf 9 A limitiert. Damit kann der initial festgelegte Entladestrom von 0 – 8 A, um bis zu 1 A überschritten werden. An der elektronischen Last mit nur einer Zelle könnte diese theoretisch mit bis zu 18 A entladen werden. Aufgrund der virtuellen Verschaltung der Batteriezellen im SiD wird dieser Strombereich aber nicht ausgenutzt.

7.2.3 Regelung des elektrischen Koppelsystems

Um die drei physischen Batteriezellen entsprechend dem Testfall zu entladen, sind Sollwerte für die interne Stromregelung der elektronischen Last notwendig. Für die elektronische Last, welche die parallelgeschalteten Zellen Phy 2 und Phy 3 entlädt, wird eine Regelung benötigt, um den Strom einer einzelnen Zelle einzustellen. Hierfür wurde ein PI-Regler mit Vorsteuerung implementiert. Für die Berechnung der Reglerabweichung wird der über einen Shunt gemessene Strom $I_{ist\ Phy\ 2}$ und der Sollwert des Stroms $I_{soll\ Phy\ 2}$ von Phy 2 als Referenzzelle verwendet. Der Arbeitspunkt des Reglers wurde aufgrund der zwei parallel geschalteten Batteriezellen auf den doppelten Sollwert des Stroms für die Zelle Phy 2 gelegt. Der sich ergebende Sollstrom wird an die elektronische Last gesendet, welche die zwei parallel geschalteten Batteriezellen Phy 2 und Phy 3 entlädt. In Abbildung 7.2 ist der beschriebene Regelkreis skizziert. Der berechnete Sollstrom für die Zelle Phy 1 wird hingegen ohne Regelung direkt an die andere elektronische Last gesendet.

Die Stromregelgenauigkeit der verwendeten elektronischen Lasten liegt laut Hersteller bei $\pm 36\text{ mA}$ (Elektro-Automatik, 2017, S. 10). Die durch den vorgeschalteten Pi-Regler bedingte Abweichung bei den parallel verschalteten Zellen Phy 2 und Phy 3 wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht quantifiziert.

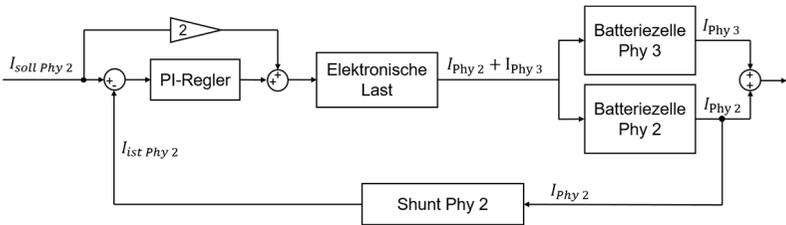


Abbildung 7.2: Stromregelung für die parallelgeschalteten Batteriezellen Phy 2 und Phy 3

7.3 Thermisches Koppelsystem

Das thermische Koppelsystem wird, analog zum elektrischen Koppelsystem, in den folgenden Unterkapiteln in Aktoren, Sensoren und dem verbindenden Regelsystem aufgeteilt und beschrieben.

7.3.1 Sensoren des thermischen Koppelsystems

Der sensorische Teil des thermischen Koppelsystems besteht je Batteriezeile aus einem Wärmestrom- und Temperatursensor mit entsprechender Ausleseinheit. Zudem wurde ein Volumenstromsensor im Kühlkreislauf verbaut. Nach Montage der drei Batteriezeilen in das thermische Koppelsystem wird das Kühlsystem durch Variation des Volumenstroms über einen Kugelhahn entlüftet. Entsprechend ist vor jeder Messung der Sollvolumenstrom neu einzustellen, weshalb ein Volumenstromsensor verbaut wurde. Dieser wird nur für die initiale händische Einstellung vor Versuchsbeginn, anders als die vorherig beschriebenen Sensoren, nicht aber für die Regelung des thermischen Koppelsystems benötigt.

Für die Temperaturmessung am Zellmantel kommen Thermoelemente des Typs J zur Oberflächentemperaturmessung zum Einsatz, welche sich durch eine geringe thermische Masse auszeichnen. Da die Standardmessgenauigkeit der Sensoren von $\pm 1,5$ K (DIN IEC 584 Teil 2) nicht ausreichend ist, wurden die drei Thermoelemente über die am Vorlauf des Umlaufkühlers mittels PT1000 gemessene Temperatur kalibriert (LAUDA DR. R. WOBSE GMBH & CO. KG, 2012, S. 59). Hierfür wurden die Batteriezeilen im elektrisch unbelasteten Zustand mit einer Vorlauftem-

peratur ähnlich der Umgebungstemperatur temperiert und die Temperaturmesswerte durch Offsets angeglichen. Dadurch konnte sowohl der absolute Temperaturfehler als auch die relative Abweichung der drei Thermoelemente zueinander reduziert werden. Nach Messungen im Temperaturbereich von 15 °C – 45 °C sind die relativen Abweichungen, exklusive Ausreißer, $\leq 0,1$ K, wodurch die Anforderungen des Zielsystems erfüllt sind.

Zur Messung der Wärmestromdichte am Zellmantel wurde der Wärmestromsensor gSKIN®-XM 26 9C der Fa. greenTEG AG verwendet. Der Sensor wurde trotz seiner steifen Bauform aufgrund der hohen Wärmestromsensitivität und seiner geringen thermischen Masse im Vergleich zur weichen Bauformen wie dem PHFS-01 der Fa. FluxTeq gewählt. Die Genauigkeit der Messkette gemäß Herstellerangaben (Sensor inkl. Spannungsmessung) beträgt $\pm 5,4$ W/m² (Kaeske, 2018)¹. Durch die kleine Bauform des gewählten Sensors von 4,4 mm x 4,4 mm ist bei einem Zelldurchmesser von 18 mm der maximale Spalt zwischen Sensor und gekrümmter Mantelfläche $< 0,3$ mm. Damit der Messwert des Wärmestromsensors der mittleren Wärmestromdichte über den Zellumfang entspricht, ist ein niedriger Wärmeübergangswiderstand zwischen Sensor und Batteriezellmantel notwendig. Hierfür wird der Spalt zwischen Zellmantel und Wärmestromsensor durch ein elastisches und elektrisch isolierendes Wärmeleitpad in den Abmessungen des Sensormoduls aufgefüllt (KERAFOL - Keramische Folien GmbH, 2008).

An den Messstellen für Wärmestrom und Temperatur wird der originale Schrumpfschlauch der Batteriezelle entfernt, um den Wärmeleitwiderstand zwischen Batteriezellmantel und Sensoren zu reduzieren. Der restliche, verbleibende, originale Schrumpfschlauch wird aus Sicherheitsgründen am Zellmantel belassen, um einen Kurzschluss der Pole durch Sensorkabel, die über die Mantelfläche und über den Pluspol geführt werden, zu vermeiden. Abschließend wird die Batteriezelle inklusive der aufbrachten Sensoren mit einem zusätzlichen PVC-Schrumpfschlauch überzogen. Dieser dichtet die Batteriezelle gegenüber der Kühlflüssigkeit ab und isoliert diese elektrisch voneinander. Zudem sorgt der Schrumpfvorgang für einen Anpressdruck, mit dem der Wärmeleitpad unter dem Wärmestromsensor komprimiert wird. Abbildung 7.3 zeigt die mit Sensoren applizierte Zelle.

¹ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

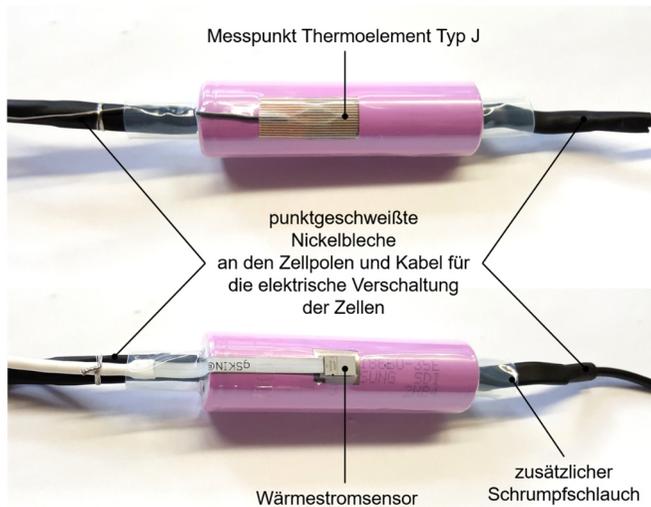


Abbildung 7.3: Mit Wärmestromsensor und Thermoelement präparierte und mit einem PVC-Schrumpfschlauch überzogene Batteriezelle, für die Integration in den physischen Teil des thermischen Koppelsystems.

Die umgesetzte Sensorapplikation auf den Zellmantel hat Konsequenzen für die Wärmestrommessung:

- Lokale Schwankungen der Schrupfschlauchdicke durch einen inhomogenen Schrumpfprozess können zu unterschiedlichen Dicken am Sensor führen.
- Unterschiede im Anpressdruck des Sensors gegen das kompressible Wärmeleitpad, dessen Wärmeleitwiderstand druckabhängig ist (KERAFOL - Keramische Folien GmbH, 2008)
- Lokale Unterschiede in der Oberflächenbeschaffenheit des Zellmantels

Die aufgeführten Unsicherheiten führen zu unterschiedlichen Wärmeleit- und Kontaktwiderständen zwischen Zellmantelfläche und Kühlfluid. Dadurch ist das Verhältnis der Wärmestromdichte über der Sensorfläche gegenüber der mittleren Wärmestromdichte über die verbleibende Zellmantelfläche unbekannt. In ähnlicher Form tritt diese Problemstellung im Prüfaufbau von Christen et al. (2017) auf. Da über die

eingesetzten Wärmestromsensoren nicht die vollständige Oberfläche der prismatischen Zelle bedeckt werden kann, kommt es auch in diesem Fall zu parallelen, nicht messtechnisch erfassten Wärmeströmen (Christen et al., 2017).

Dieser Problemstellung kann mit einer individuellen Kalibrierung des Sensors im applizierten Zustand auf dem Zellmantel begegnet werden, wofür die Wärmekapazität der verwendeten Batteriezelle benötigt wird. Das entwickelte Verfahren ist im folgenden Kapitel beschrieben.

Kalibrierung der Wärmestromsensoren

Wird der Wärmestromsensor in der beschriebenen Form auf dem Zellmantel appliziert, ist eine individuelle Kalibrierung der Sensoren notwendig, um die Genauigkeit der Wärmestromregelung der drei physischen Batteriezellen zu erhöhen. Hierfür wurde das folgende Verfahren entwickelt.

In einer initialen Heizphase werden die Batteriezellen mit appliziertem Sensor in den Testkammern bei einer Vorlauftemperatur von 50 °C am Umlaufkühler mit Kühlflüssigkeit umspült. Während dieses Vorgangs sind die Batteriezellen elektrisch unbelastet. Danach wird die Fluidtemperatur auf Raumtemperatur reduziert.

Es wird empfohlen, den nachfolgenden Prozess erst mehrere Stunden nach der Heizphase zu beginnen. Dadurch soll gewährleistet werden, dass der kriechähnliche Prozess am Schrumpfschlauch und Wärmeleitpad weitestgehend abgeklungen ist. Wie lange dieser Prozess andauert, wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht näher bestimmt.

Das Verfahren wird durchgeführt, um die Koeffizienten der Formel 17 zu ermitteln und damit den mittleren Wärmestrom Q_{mess} am Zellmantel zu berechnen:

$$Q_{mess} = \left(\frac{U_{mess} * A_{KS}}{(T_{mess} - T_0) * S_c + S_0} - (x_{1of} * T_{mess} + x_{0of}) \right) * k_{wsb} \quad 17$$

Q_{mess}	<i>mittlerer Wärmestrom am Zellmantel</i>
U_{mess}	<i>am Wärmestromsensor gemessene Spannung</i>
A_{KS}	<i>in der Testkammer gekühlte Zellmantelfläche</i>
T_{mess}	<i>gemessene und kalibrierte Zellmanteltemperatur</i>

T_0	<i>Sensorkalibrierungstemperatur gemäß Datenblatt</i>
S_0	<i>Sensitivität des Sensors gemäß Datenblatt</i>
S_c	<i>Offset der Sensorsensitivität gemäß Datenblatt</i>
x_{1of}, x_{0of}	<i>Koeffizienten des temperaturabhängigen Offsets des Wärmestroms</i>
k_{wsb}	<i>über Wärmestrombilanz ermittelter Korrekturfaktor</i>

Die vier Schritte zur Ermittlung der Koeffizienten sind im Folgenden erläutert:

1. Sensorspannung in Wärmestrom umrechnen:

Gemäß dem Datenblatt des jeweiligen Wärmestromsensors wird die Wärmestromdichte über die Sensoren mit sensorspezifischen Korrekturfaktoren (T_0, S_0, S_c) der Spannung sowie der Temperatur des Sensors T_{mess} berechnet. Diese werden in der Prüfstandsteuerung zur Regelung des thermischen Koppelsystems hinterlegt. Als Sensortemperatur wird die über die Thermoelemente erfasste Zellmanteltemperatur genutzt. Der Gesamtwärmestrom wird über die tatsächliche Kühlfläche A_{KS} des Zellmantels berechnet. Für die folgenden Schritte ist es notwendig, dass die Temperaturmesswerte der Thermoelemente bereits über Offsets kalibriert wurden.

2. Ermittlung temperaturabhängiger Offsetwerte x_{1of} und x_{0of} :

Wärmestrommessungen im thermisch stationären Zustand mit elektrisch lastfreien Batteriezellen haben gezeigt, dass die Sensoren temperaturabhängig einen Wärmestrom ungleich null messen. Es wird vermutet, dass strömungstechnische Vorgänge zu lokalen Wärmeströmen zwischen Fluid und Zellmantel führen, welche sich in Summe ausgleichen.

Zur Ermittlung dieser Offsets werden Wärmestrommessungen im stationären Zustand ohne Heizleistung der Batteriezellen bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt. Hierfür wird die Temperatur am Umlaufkühler von 10 °C in 10 K Schritten bis auf 50 °C erhöht. Auf dieser Datengrundlage wird für jede Zelle eine Regressionsgerade mit den Koeffizienten x_{1of} und x_{0of} für die Approximation des temperaturabhängigen Wärmestromoffsets für den jeweiligen Sensor abgeleitet.

3. Ermittlung des Korrekturfaktors k_{wsb} :

Die Korrektheit des gemessenen Wärmestroms, bei Wärmeströmen ungleich Null, wird über eine Wärmestrombilanz ermittelt. Ausgehend vom thermisch stationären Zustand aller Zellen wird die Vorlauf­temperatur im Umlaufkühler von 15 °C auf 45 °C eingestellt. Haben alle Zellen einen thermisch stationären Zustand erreicht und bereits für mehrere Minuten gehalten wird die Fluidtemperatur am Umlaufkühler wieder auf 15 °C eingestellt. Die Messung ist abgeschlossen, sobald die Zellen den ursprünglichen stationären Zustand erreicht haben.

Der gemessene Wärmestrom wird über die Zeit integriert, um die durch die jeweilige Zelle aufgenommene Wärmeenergie zu berechnen. Im thermisch stationären Zustand der Batteriezellen bei 45 °C Fluidtemperatur im Vorlauf des Umlaufkühlers wird die gemessene Wärmeenergie ermittelt. Dieser Wert wird mit dem theoretischen Anstieg der Wärmeenergie verglichen, welcher sich über die Wärmekapazität der Batteriezellen und dem gemessenen Temperaturhub der Batteriezellen zwischen den thermisch stationären Zuständen berechnet. Aus dem Quotienten der theoretischen und der messtechnisch erfassten Wärmeaufnahme wird für jede Batteriezelle ein Korrekturfaktor berechnet und in der Prüfstandsteuerung implementiert.

4. Verifikation der bestimmten Koeffizienten:

Zur Verifikation der beiden vorherigen Schritte wird die Messung aus dem 3. Schritt nach entleeren der Zellkammer mit anschließender Entlüftung des Systems wiederholt. Ein Indiz für die korrekte Ermittlung des zellspezifischen und temperaturabhängigen Offsets aus dem 2. Schritt 2 ist, dass das Integral des gemessenen Wärmestroms am Ende der Messung nahe Null ist. Der aus der Wärmestrombilanz ermittelte Korrekturfaktor wird wie im 3. Schritt über den Vergleich des theoretischen und der gemessenen Wärmemenge überprüft.

Das beschriebene Verfahren ist Teil der entwickelten Methode und in der Aktivität „Integration physischer Batteriezellen in die Koppelsysteme“ (vgl. Abbildung 6.8) verortet.

7.3.2 Aktoren des thermischen Koppelsystems

Das in Abbildung 6.12 aufgezeigte Prinzip des thermischen Koppelsystems wurde für den Einsatz von Hochenergiezellen des Formats 18650 wie in Abbildung 7.4 umgesetzt. Der Aktor-Teil des thermischen Koppelsystems wird in drei Teilsysteme

aufgeteilt: Umlaufkühler, Heizungen und Testkammern. Der Umlaufkühler steuert die Kühlmitteltemperatur des zentralen Vorlaufs. Die beiden Heizungen können das zentral zugeführte Kühlfluid vor Testkammer 2 bzw. vor Testkammer 3 erwärmen und die Kühlleistung an den jeweiligen Batteriezellen reduzieren. Die Testkammern fassen jeweils eine Batteriezelle und sorgen durch entsprechende Fluidführungen für einen möglichst homogenen Wärmeübergang am Zellmantel. Die Teilsysteme werden im Folgenden beschrieben.

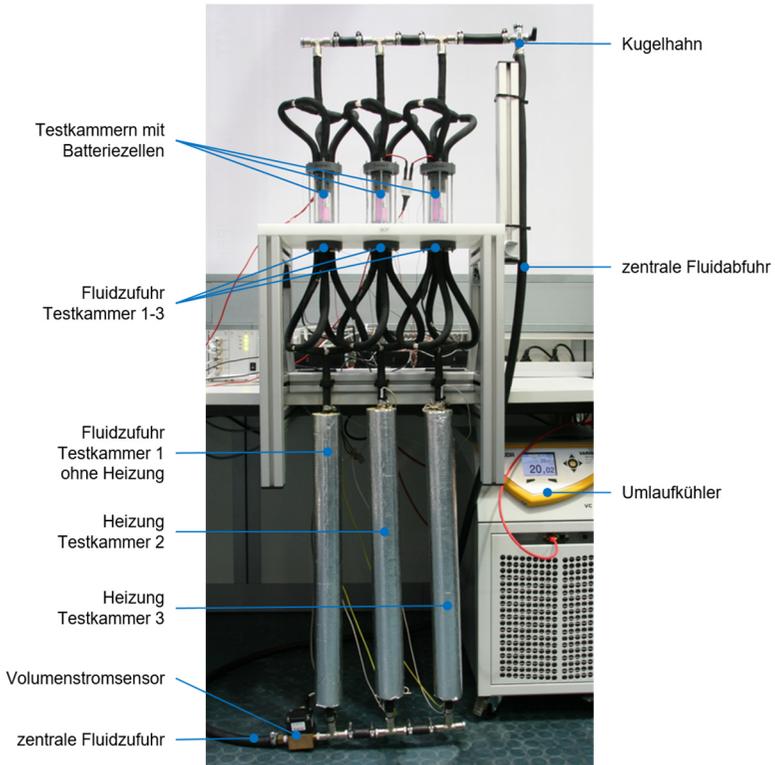


Abbildung 7.4: Prüfaufbau als physischer Teil des thermischen Koppelsystems, unterteilt in die drei thermischen Aktoren des Koppelsystems: Umlaufkühler, Heizungen und Testkammern

Der Umlaufkühlung Variocool 600VC der Fa. Lauda mit 600 W Kühlleistung wird mit einem Wasser-Glykol-Gemisch betrieben. Aufgabe des Umlaufkühlers ist die Rege-

lung der Fluidtemperatur, um den Wärmestrom am Mantel der Batteriezele in Testkammer 1 einzustellen. Zudem werden alle drei Testkammern mit dem aufgeteilten Volumenstrom des Umlaufkühlers versorgt. Über einen Kugelhahn auf der Rücklaufseite, nach den Testkammern, wird der zentrale Volumenstrom eingestellt. Versuche mit dem Ventil auf der Zulaufseite führten zu einer mit der Versuchsdauer ansteigenden Menge an Gasblasen im Fluid. Diese haften sich an den Zellmantel und führen zu einer Streuung der Wärmestrommessung (S. Li, 2019)². Als Ursache der Blasenbildung wird ein zu hoher Druckabfall am Rücklauf vermutet.

Das zentral zugeführte Fluid aus dem Umlaufkühler wird über zwei T- und ein L-Stück parallel auf die Testkammern verteilt. Die Heizungen vor den Testkammern 2 und 3 (siehe Abbildung 7.4) sind als Kupferrohre ausgeführt, die mit je einer elektrischen Heizkordel von 400 W Leistung umwickelt sind. Diese Heizung wird mit 230 V Wechselspannung betrieben. Kupferrohr und Heizkordel sind in einer thermischen Isolierung eingfasst. Da alle drei Kammern parallel mit Fluid des Umlaufkühlers versorgt werden, ist auch der Kammer 1 ein Kupferrohr vorgeschaltet, um den gleichen Druckabfall wie in den Kammern mit vorgeschalteter Heizung zu erreichen.

Nach jedem Kupferrohr teilt sich der Volumenstrom in vier Schläuche auf, welche im unteren Teil der Testkammer münden und die Batteriezele axial umströmen. In gleicher Form wird das Fluid am oberen Teil der Testkammer ausgeleitet, die Teilströme zusammengeführt und dem Behälter des Umlaufkühlers zurückgeführt.

Die Testkammer ist so aufgebaut, dass die Nickelbleche an den Zellpolen als auch die Sensorkabel (Thermoelement und Wärmestromsensor) axial aus der Kammer austreten. Durch den PVC-Schrumpfschlauch werden Fluid und Zellmantelfläche voneinander getrennt. Zur Abdichtung des Fluidraums nach innen werden Flachdichtungen auf den Schrumpfschlauch an den Polflächen der Zelle gelegt und die Zelle axial zwischen der Testkammerober- und -unterseite verspannt (Eisele, 2017). Das gleiche Dichtkonzept wird auch an den Stirnflächen der PMMA-Röhre angewandt.

Gemäß Formel 18 ergibt sich die Wärmestromdichte \dot{q} am Zellmantel aus dem Produkt aus Temperaturunterschied ΔT zwischen Fluid und Batteriezelemantel und dem Wärmeübergangskoeffizient α .

$$\dot{q} = \alpha * \Delta T \qquad 18$$

² Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Der Temperaturunterschied ΔT kann aktiv nur über die Fluidtemperatur, also über die Regelung des Umlaufkühlers und der Heizungen, beeinflusst werden. Damit die beiden Messgrößen, die Zellmanteltemperatur und die Wärmestromdichte, repräsentativ für die gesamte Zellmantelfläche sind, wurde ein homogener Wärmeübergangskoeffizient angestrebt.

Da die Zellgeometrie und die Stoffeigenschaften der Kühlflüssigkeit unveränderlich sind, kann der Wärmeübergangskoeffizient nur über die lokale Strömungsgeschwindigkeit an der Zellmantelfläche manipuliert werden. Eine turbulente Strömung an der Mantelfläche würde zwar den Wärmeübergangskoeffizienten erhöhen, ist aber wenig robust gegenüber Volumenstromänderungen oder temperaturbedingten Viskositätsänderungen des Fluides. Aus diesem Grund wurde ein mehrstufiger Strömungsgleichrichter im unteren Teil der Testkammer eingebaut. Dieser homogenisiert den Volumenstrom über den Umfang und sorgt für eine laminare Anströmung des Zellmantels in axialer Richtung.

Abbildung 7.5 zeigt den Aufbau des Strömungsgleichrichters. Das Fluid prallt über die vier Zuleitungen der Testkammer gegen eine Umlenkscheibe, welche mit unterschiedlich großen Bohrung versehen ist, um die mittlere Strömungsgeschwindigkeit zu homogenisieren. Darauf folgt ein Strömungsgleichrichter, bestehend aus mehreren Kunststoffröhren und einem vorgelagerten Netz. Hierdurch werden Geschwindigkeitsschwankungen senkrecht zur Hauptströmung unterdrückt und der Turbulenzgrad reduziert (Saldern, 2003, S. 56–57). Die Homogenität des Wärmeübergangskoeffizienten über den Zellumfang wird in Kapitel 7.4.1 verifiziert.

Der Volumenstrom des Fluides wurde auf 1,8 l/min eingestellt, womit sich bei gleichmäßiger Massestromverteilung je Testkammer ein Volumenstrom von 0,6 l/min ergibt. Dieser Fluiddurchsatz wurde gewählt, um einerseits einen möglichst hohen Wärmeübergangskoeffizienten am Zellmantel zu erhalten und andererseits, um mit je 400 W Heizleistung das Fluid in Kammer 2 und 3 um mindestens 5 K erhöhen zu können. Letztgenannter Grund kommt aus der Anforderung, einen Temperaturunterschied von bis zu 5 K zwischen den Batteriezellen im simulierten Modul abbilden zu können. Diese Anforderung konnte durch Messungen verifiziert werden, welche in Kapitel 7.4.3 beschrieben sind.

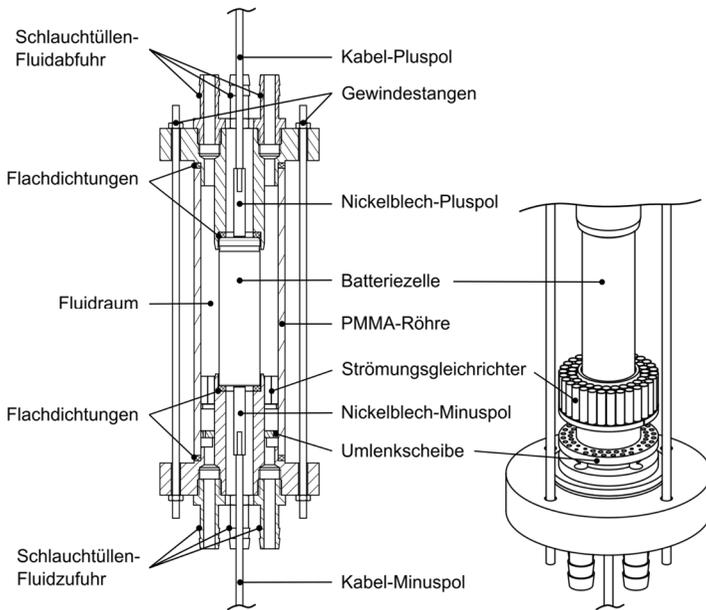


Abbildung 7.5: Schnittdarstellung einer einzelnen Testkammer mit Batteriezele (links); perspektivische Ansicht eines Testkammerausschnitts ohne PMMA-Röhre (rechts) (in Anlehnung an Kaeske, 2018, S. 36)

7.3.3 Regelung des thermischen Koppelsystems

Die Regelung des thermischen Koppelsystems erfolgt entsprechend der Anzahl physischer Batteriezellen über drei Regler. Einer davon ist für die Regelung der Solltemperatur des Umlaufkühlers zuständig, die beiden anderen regeln die Leistung der elektrischen Heizungen. Der Wärmestrom am jeweiligen Zellmantel ist die Messgröße bei allen Regelungssystemen. Die Wirkrichtungen der Regelungssysteme unterscheiden sich voneinander. Über die Temperaturregelung des Umlaufkühlers kann der Wärmestrom an der Zellmantelfläche sowohl erhöht als auch reduziert werden. Die Heizungen können durch die Fluiderwärmung die Kühlleistung lediglich reduzieren.

Der Wärmestrom an der ersten Batteriezele Phy 1 in Testkammer 1 wird allein über den Umlaufkühler geregelt. Diese Regelung beeinflusst auch die Kühlleistung der

beiden anderen Batteriezellen. Erzeugen die vorgeschalteten Heizungen keine Wärme, werden alle Zellen mit derselben Fluidtemperatur temperiert.

Jede der zwei Heizungen wird mit dem in Abbildung 7.6 skizzierte Regelkreis betrieben. Über den Prozessregler CN245 der Fa. OMEGA Engineering GmbH in Verbindung mit einem SSR (Solid State Relay) wird über eine Pulsweitenmodulation (PWM) die Leistung der Heizkordel eingestellt. Der im CN245 hinterlegte PI-Regler wandelt das Sollsignal intern in ein 12 V PWM Signal, welches am SSR auf die 230 V Spannungslage der Heizkordel übertragen wird. Wenn die Batteriezelle zu stark gekühlt wird, wird hierfür die Abweichung des Sollwärmestroms vom gemessenen Wärmestrom ($\dot{Q}_{soll\ Heiz} - \dot{Q}_{ist}$) mit dem im CN245 eingestellten Sollwert (Setpoint) addiert und dem Prozessregler als Input übergeben. Bei zu geringer Kühlung der Zelle wird der Wärmestromfehler verstärkt, um den integrierten Wärmestromfehler schneller abzubauen.

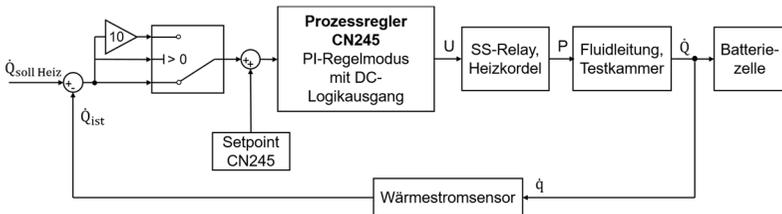


Abbildung 7.6: Regelung einer Heizung (Heizkordel), die einer Testkammer vorgeschaltet ist

7.4 Verifikation des thermischen Koppelsystems

In diesem Kapitel werden die Akteure des thermischen Koppelsystems hinsichtlich der Anforderungen des Zielsystems verifiziert. Dies ist ein notwendiger Schritt, um dem Entwickler die Validierungsumgebung als funktionsfähige Ressource zur Verfügung zu stellen, welche in Kapitel 8.2 im Entwicklungsbeispiel in E_3 der Methode Anwendung findet.

Der Einfluss des elektrischen Koppelsystems auf die Wechselwirkungen zwischen den parallel verschalteten physischen Batteriezellen wurde bereits in Kapitel 7.2.1

diskutiert. Das virtuell modellierte Batteriemodul als SiD sowie das zugehörige Restsystem sind entwicklungspezifisch zu implementieren und zu verifizieren (siehe Kapitel 8.2).

7.4.1 Homogene Temperierung um den Zellumfang

Durch Integration der gemessenen Wärmestromdichte über die Kühlfläche des Zellmantels im thermischen Koppelsystem wird die Kühlleistung an den physischen Batteriezellen berechnet. Abweichungen der Messgröße des Wärmestromsensors führen zu einer zu niedrigen oder zu hohen Kühlleistung unter den Randbedingungen der simulierten Batteriezellkühlung. Dies beeinflusst wiederum die Batteriezelltemperatur und die sich ergebende Temperaturspreizung im simulierten Batteriemodul. Beide Größen sind elementar für die Validierung von Kühlkonzepten in E₃.

Zur Sicherung einer über den Zellumfang homogenen und robusten Temperierung der physischen Zellen in den drei Testkammern wurden mehrere Untersuchungen durchgeführt. Durch den Einsatz von thermischen Batteriezellmodellen, wie sie in E₄ genutzt werden, konnte eine konstante Heizleistung von 6,5 W je Zelle erzeugt und Versuche im thermisch stationären Zustand durchgeführt werden. Dadurch wird gewährleistet, dass die erzeugte Wärmeleistung der abgeführten Kühlleistung entspricht. Diese Worstcase-Betrachtung sollte den maximal zu erwartenden Wärmestrom mit der entwickelten Validierungsumgebung abbilden.

Schwankungen der Wärmestromdichte über den Zellumfang

Um die Homogenität der Temperierung abzusichern und eine Sensorposition festzulegen, wurde untersucht wie stark die Wärmestromdichte über den Umfang in Testkammer 1 im relevanten Temperaturbereich von 15 °C – 45 °C schwankt.

Untersuchungsmethode:

Über das thermische Batteriezellmodell wird eine konstante Wärmeleistung von 6,5 W erzeugt und im stationären Zustand über 40 s die Wärmestromdichte auf mittlerer Zellhöhe über den Wärmestromsensor gemessen. Die folgenden Variablen wurden bei den Versuchen verändert.

Die Zelle inkl. des montierten Wärmestromsensors wurde in der Testkammer 1 über die Hochachse in fünf Positionen gedreht (siehe Abbildung 7.7). Vier Positionen des Wärmestromsensors befinden sich zwischen den vier Fluidzuführungen und eine ist direkt über einer Fluidzufuhr platziert. Die bereits vorgestellten Umlenkscheiben und

der Strömungsgleichrichter kommen bei diesen Versuchen ebenfalls zum Einsatz, sind in der Abbildung aber nicht eingezeichnet. Die Variation der Sensorposition wurde für jede der drei Sollfluidtemperaturen des Umlaufkühlers 15 °C, 30 °C und 45 °C zweimal wiederholt. Da bei diesen Versuchen nur Testkammer 1 mit Fluid durchströmt wurde, konnte ein konstanter Volumenstrom von 0,6 l/min eingestellt werden.

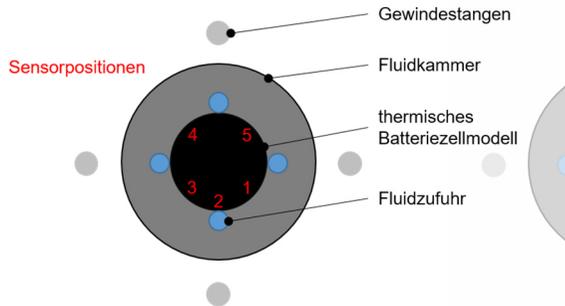


Abbildung 7.7: Untersuchte Positionen des Wärmestromsensors auf dem Zellmantel in der Testkammer 1 des thermischen Koppelsystems zur Evaluierung der homogenen Temperierung über den Zellmantelumfang

Ergebnis und Diskussion:

Zur Auswertung der Versuche wurde je Temperaturstufe ein Box-Plot über die Messsignale aller fünf Sensorpositionen und ein Box-Plot spezifisch für die Sensorposition 1 erstellt, welche in Abbildung 7.8 dargestellt sind. Der Median der Messungen über alle fünf Sensorpositionen liegt bei den drei Temperaturstufen bei ca. 1550 W/m². Bei einer Fluidtemperatur von 45 °C ist die Streuung der Messungen über den Zellumfang am größten und liegt gegenüber dem Median bei ± 5,1 %. Die Messungen bei 15 °C und 30 °C liegen innerhalb dieses Streubandes. Auffällig ist, dass trotz symmetrischer Sensorpositionierung am Zellumfang bei allen Temperaturstufen an Sensorposition 1 die größten Wärmestromdichten am Zellumfang gemessen wurden. Auch die als Ausreißer gekennzeichneten Messwerte, im Box-Plot über alle Sensorpositionen, sind den Messungen an Sensorposition 1 zuzuordnen. Das Streuband der Messwerte an Sensorposition 1 liegt relativ zu den Messwerten an allen Sensorpositionen in der oberen Hälfte bzw. bei 30 °C Fluidtemperatur in den oberen 75 % des Streubandes. Somit wurden an Sensorposition 1 gegenüber allen anderen Messstellen am Zellumfang tendenziell höhere Wärmestromdichten von - 0,1 % bis + 5,1 % relativ zum Median gemessen.

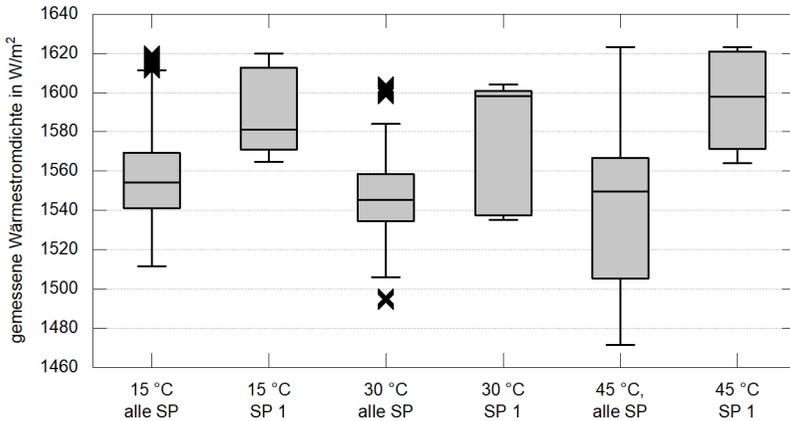


Abbildung 7.8: Box-Plots zur Messung der Wärmestromdichte an unterschiedlichen Sensorpositionen (SP) über den Zellumfang in Testkammer 1 des thermischen Koppelsystems für drei Vorlauftemperaturen des Umlaufkühlers (15 °C, 30 °C u. 45 °C)

Die ermittelte Streuung der Wärmestromdichten über den Umfang wurde als niedrig bewertet, so dass von einer homogenen Kühlung am Zellmantel ausgegangen werden kann. Die Messwerte an Sensorposition 1 zeigen ein robustes Verhalten gegenüber Änderungen der Fluidtemperatur. Zudem weisen die Messungen an dieser Position die höchsten Messwerte auf. Diese Sensorposition ist somit im Vergleich zu den anderen Positionen sensitiver hinsichtlich Wärmestromänderungen.

Zur besseren Vergleichbarkeit der Messwerte zwischen den Testkammern wurden in allen drei Testkammern die präparierten Batteriezellen bzw. thermischen Batteriezellmodelle identisch dem Wärmestromsensor in Position 1 ausgerichtet (vgl. Abbildung 7.7).

Einfluss von Fluidtemperatur und Volumenstrom auf die Wärmestrommessung

In der folgenden Untersuchung wurde die Robustheit der Sensorposition 1 hinsichtlich Änderungen des Volumenstroms bei unterschiedlichen Fluidtemperaturen abgesichert. Die Variation des Volumenstroms ist von Interesse, da diese in der Parallelschaltung der Testkammern nicht aktiv beeinflusst werden kann und die Einstellgenauigkeit des zentralen Volumenstroms begrenzt ist. Temperaturbedingte

Änderungen der Fluidviskosität führen trotz unveränderter Ventileinstellung zu Änderungen des zentralen Volumenstroms. Teilt sich der Sollvolumenstrom zwischen den Kammern gleichmäßig auf, fließt durch jede Kammer 0,6 l/min. Dieser Sollvolumenstrom wird im Folgenden variiert.

Untersuchungsmethode:

Über das thermische Batteriezellmodell wurde eine konstante Wärmeleistung von 6,5 W erzeugt und im stationären Zustand über 40 s die Wärmestromdichte auf mittlerer Zellhöhe an der Position 1 über den Wärmestromsensor gemessen. Zur konservativen Abschätzung des Einflusses eines ungleichmäßigen Volumenstroms zwischen den drei Testkammern wurde in Testkammer 1 der Volumenstrom variiert (75 %; 100 % und 125 % des Sollvolumenstroms) und bei den drei Vorlauftemperaturen des Umlaufkühlers von 15 °C, 30 °C und 45 °C getestet.

Ergebnis und Diskussion:

Aus den Messungen geht hervor, dass die Streubreite mit steigendem Volumenstrom unter Variation der Fluidtemperatur zunimmt (vgl. Abbildung 7.9).

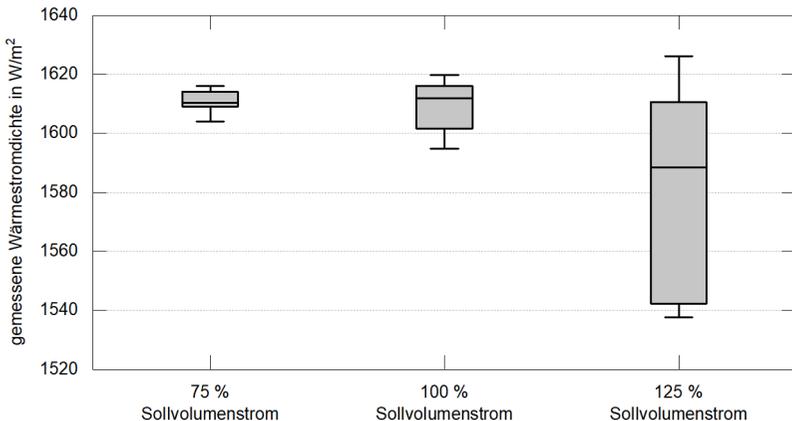


Abbildung 7.9: Box-Plots zur Messung der Wärmestromdichte an Sensorposition 1 in Testkammer 1 des thermischen Koppelsystems bei Variation der Vorlauf-temperatur des Umlaufkühlers (15 °C, 30 °C u. 45 °C) für drei Volumenstromstufen (75 %, 100 % u. 125 % des Sollvolumenstroms von 0,6 l/min)

Die Mediane der Messwerte beim Sollvolumenstrom und 75 % des Sollvolumenstroms liegen nahe beieinander. Bei 125 % des Sollvolumenstroms sinkt der Median um ca. 20 W/m² im Vergleich zum Median bei den niedrigeren Volumenstromstufen. Die Streubreite steigt vergleichsweise stark an und definiert die maximale Toleranz der gemessenen Wärmestromdichte unter Variation der Fluidtemperatur und des Volumenstroms. Relativ zum Median der Messungen bei einem Sollvolumenstrom von 0,6 l/min beträgt die Toleranz - 6,1 % bis 0,1 %.

Aufgrund der geringeren Sensitivität der Messwerte bei sinkendem Volumenstrom, kann festgehalten werden, dass bei der Einstellung des zentralen Volumenstroms ein Durchsatz von < 1,8 l/min förderlich für die Robustheit der Wärmestrommessung ist. Allgemein können die aufgetretenen Abweichungen der Messwerte aufgrund der hohen Volumenstromvariation als gering angesehen werden.

7.4.2 Gleiche Temperierbedingungen in den drei Testkammern

Die im vorherigen Kapitel beschriebenen Untersuchungen wurden in der Testkammer 1 durchgeführt. Dass sich die Temperierung zwischen den Testkammern an Sensorposition 1 nicht unterscheidet, wurde mit der folgenden Untersuchung abgesichert.

Untersuchungsmethode:

Um auszuschließen, dass Unterschiede zwischen Messungen in den Kammern auf das verwendete thermische Batteriezellmodell und den verbauten Sensor zurückzuführen sind, wurden Messungen in den drei Testkammern mit drei verschiedenen Sensoren respektive Batteriezellmodellen durchgeführt. Auch bei diesen Versuchen wurde eine konstante Leistung von 6,5 W erzeugt und im stationären Zustand die Wärmestromdichte auf mittlerer Zellhöhe an Position 1 (vgl. Abbildung 7.7) gemessen. Bei einer Vorlauftemperatur des Umlaufkühlers von 30 °C wurde der Volumenstrom je Sensor und Testkammer in drei Stufen variiert (75 %; 100 % und 125 % des Sollvolumenstroms). Diese Messungen über je 180 s Dauer im thermisch stationären Zustand wurden mit jedem Sensor/ jeder Ersatzbatteriezelle in jeder Testkammer durchgeführt.

Zudem wurde beispielhaft an Sensor B7, mit entsprechendem thermischen Batteriezellmodell, für alle drei Testkammern der Einfluss unterschiedlicher Vorlauftemperaturen des Umlaufkühlers von 15 °C, 30 °C und 45 °C auf die Wärmestrommessung untersucht.

Ergebnis und Diskussion:

In Abbildung 7.10 sind die Box-Plots der gemessenen Wärmestromdichten an den thermischen Batteriezellmodellen mit einer Heizleistung von 6,5 W bei einer Fluidtemperatur von 30 °C am Umlaufkühlervorlauf dargestellt. Jeder Plot zeigt die Streuung der Messgröße bei einer dreistufigen Variation des Sollvolumenstroms von 0,6 l/min für drei Batteriemodelle inkl. Sensoren in den drei Testkammern.

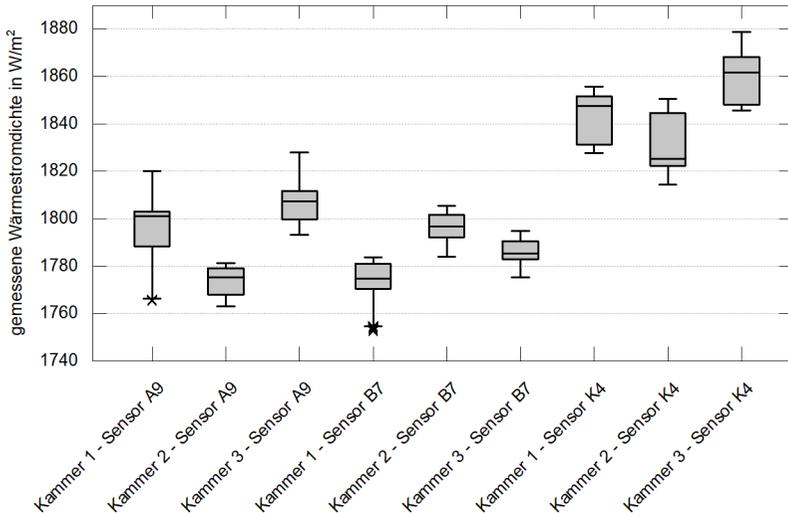


Abbildung 7.10: Box-Plots der gemessenen Wärmestromdichte an thermischen Batteriezellmodellen mit einer Heizleistung von 6,5 W. Jeder der drei Sensoren (A9, B7 und K4) wurde mit dem entsprechenden Batteriemodell in jeder der drei Testkammern bei einer Fluidsolltemperatur von 30 °C getestet. Jeder Plot zeigt die Streuung der Messgröße bei einer dreistufigen Variation des Sollvolumenstroms von 0,6 l/min (75 %, 100 % und 125 %)

Die Messungen zeigen, dass sowohl die Streubreite als auch der Messbereich bei jedem Wechsel der Testkammer unterschiedlich ausfallen. Messungen mit den Sensoren A9 und B7 liegen in einem ähnlichen Bereich, wohingegen die Messwerte mit dem Sensor K4 und dem dazugehörigen Batteriemodell höher ausfallen als bei allen andern Sensoren und Batteriezellmodellen. Auch die Streubreite zwischen dem unteren und oberen Quartil ist größer als bei allen andern Messungen. Der Median

des gemessenen Wärmestroms in Kammer 3 ist zwar stets bei Messungen mit demselben Sensor größer als bei Messungen in Kammer 1, jedoch ist dieser Unterschied nicht signifikant.

Es ist kein Zusammenhang zwischen der gemessenen Wärmestromdichte und den Testkammern zu erkennen. Vielmehr ist eine Abhängigkeit zwischen der Messgröße und den Sensoren respektive des verwendeten Batteriemodells zu erkennen. Die Messergebnisse mit dem Sensor K4 weichen deutlich von den Messungen mit den Sensoren A9 und B7 ab. Als Ursache werden Schwankungen durch die händische Sensorapplikation auf dem Zellmantel vermutet. Hierauf wurde bereits in Kapitel 7.3.1 genauer eingegangen und ein entsprechender Kalibrierprozess für die applizierten Sensoren entwickelt.

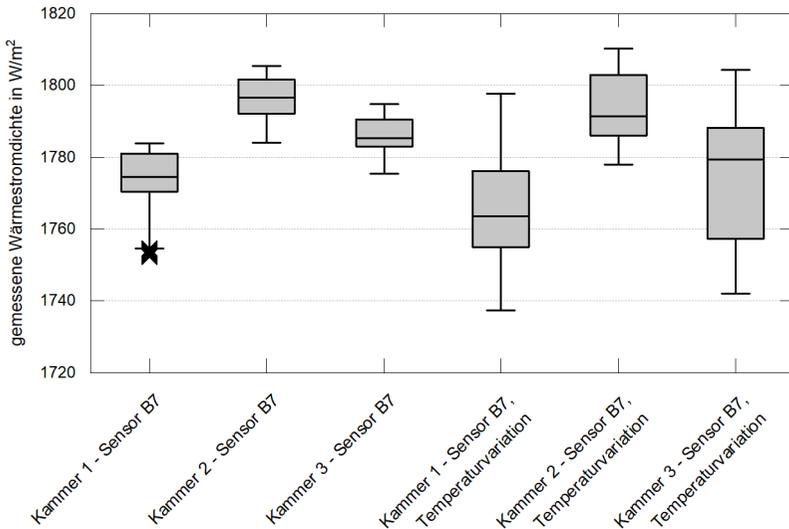


Abbildung 7.11: Box-Plots der gemessenen Wärmestromdichte an einem thermischen Batteriezellmodell mit dem Wärmestromsensor B7 mit einer Heizleistung von 6,5 W. Die drei linken Plots zeigen Messungen in den drei Testkammern, bei welchem der Volumenstrom in drei Stufen bzgl. des Sollwerts von 0,6 l/min variiert wurde (75 %, 100 % und 125 %). Bei den rechten drei Plots wurden die gleichen Messung durchgeführt und zudem die Fluidsolltemperatur in drei Stufen variiert (15 °C, 30 °C und 45 °C)

Der Einfluss der Temperaturvariation auf die Robustheit der Messgrößen zwischen den drei Kammern wurde beispielhaft mit dem Sensor B7 und dem zugehörigen Batteriezellmodell durchgeführt (vgl. Abbildung 7.11).

Die Streuung des Wärmestroms steigt mit Variation der Fluidtemperatur. Bezogen auf den minimalen Messwert von ca. 1735 W/m^2 (Kammer 1, minimaler Messwert) beträgt die größte Abweichung 4,3 % (Kammer 2, größter Messwert). Als Ursache für die steigende Streubreite der Messwerte bei Variation der Fluidtemperatur wird eine Veränderung des Strömungszustandes am Zellmantel aufgrund von Viskositätsänderungen vermutet.

Aufgrund der geringen Streuung der Messwerte wird dieser Teil des thermischen Koppelsystems als robust gegenüber Temperaturänderungen und ungleichen Volumenstromverteilungen zwischen den Testkammern bewertet. Der untersuchte Temperaturbereich von $15 \text{ }^\circ\text{C}$ – $45 \text{ }^\circ\text{C}$ ist für die Validierung von Kühlkonzepten gemäß Zielsystem von Interesse, wohingegen sich die Volumenstromverteilung ohne aktive Steuerung konstruktionsbedingt ergibt.

7.4.3 Maximal abbildbarer Temperaturunterschied zwischen den physischen Batteriezellen

Mit der Validierungsumgebung soll ein maximaler Temperaturunterschied von 5 K zwischen den Batteriezellen eines simulierten Batteriemoduls abbildbar sein. Soll auf eine Extrapolation der Temperatur virtueller Zellen verzichtet werden, müssen die physischen Batteriezellen die maximale Temperaturspanne des Batteriemoduls abbilden.

Mit den folgenden Versuchen wurde abgesichert, dass bei einem zentralen Volumenstrom von $1,8 \text{ l/min}$ mit dem thermischen Koppelsystem ein Temperaturunterschied von 5 K zwischen den Zellen Phy 1 und Phy 2 respektive zwischen Phy 1 und Phy 3 aufgeprägt werden kann.

Untersuchungsmethode:

Für die Versuche wurden die drei Testkammern mit realen Batteriezellen (vgl. Abbildung 7.4) mit einem zentralen Volumenstrom von $1,8 \text{ l/min}$ und konstanter Fluidtemperatur von $15 \text{ }^\circ\text{C}$, $30 \text{ }^\circ\text{C}$ und $40 \text{ }^\circ\text{C}$ am Vorlauf des Umlaufkühlers durchströmt. Die Batteriezellen in Testkammer 2 und 3 wurden ohne elektrische Belastung ausschließlich über die maximale Leistung der vorgeschalteten Heizungen erwärmt. Hierfür wurde den PI-Reglern ein nicht erreichbarer Wärmestrom vorgegeben, so dass die Heizungen bei Versuchsbeginn mit maximaler Leistung betrieben wurden.

Der Versuchslauf wird beendet, sobald an den Zellen Phy 2 und Phy 3 eine um mindestens 5 K höhere Temperatur als an der Zelle Phy 1 gemessen wird.

Ergebnis und Diskussion:

Die Temperaturerhöhung durch die Fluidwärmerung in den Testkammern 2 und 3 für die Vorlauftemperaturen 15 °C, 30 °C und 40 °C ist in Abbildung 7.12 dargestellt.

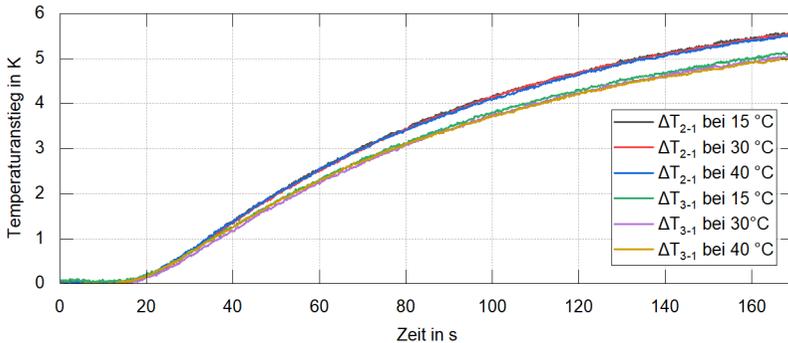


Abbildung 7.12: Relative Temperaturerhöhung der physischen Batteriezellen Phy 2 und Phy 3 gegenüber der konstant temperierten Batteriezelle Phy 1 in drei Versuchen mit unterschiedlicher Fluidtemperatur (15 °C; 30 °C, 40 °C).

Es ist kein nennenswerter Unterschied im Temperaturverhalten zwischen den Versuchen bei unterschiedlichen Fluidtemperaturen zu erkennen. Trotz gleicher Leistung der beiden Heizungen im Versuch erwärmen sich die Zellen in den Testkammern 2 und 3 unterschiedlich. Dies ist sowohl am Temperaturverlauf als auch am gemessenen Wärmestrom zu erkennen. Dabei erwärmt sich die Batteriezelle in Testkammer 2 stets schneller als in Testkammer 3. Phy 2 erreicht nach ca. 135 s und Phy 3 nach ca. 160-170 s den angestrebten Temperaturunterschied von 5 K. Die Reaktionszeit zwischen Vorgabe des Heizwerts und einem messbaren Temperaturanstieg am Zellmantel beträgt bei Phy 2 und Phy 3 ca. 15 s.

Aus den Versuchsergebnissen geht hervor, dass die Fluidtemperatur im untersuchten Temperaturfenster keinen messbaren Einfluss auf die Heizfunktion hat. Die maximal erzeugbare Temperaturdifferenz zwischen den Zellen Phy 1 und Phy 2 respektive Phy 3 ist damit robust gegenüber der Temperaturdifferenz zwischen Umgebungs- und Fluidtemperatur. Der schnellere Temperaturanstieg in Testkammern 2 im Vergleich zu Testkammer 3 könnte einer ungleichen Verteilung des Vo-

lumenstroms zwischen den Kammern geschuldet sein. Unterschiede in den Heizleistungen der Heizkordeln wurden ausgeschlossen, da die elektrischen Widerstände nahezu identisch sind (Abweichung $< 1\%$). Sollen die Zellen Phy 2 und Phy 3 im Testbetrieb dieselbe Temperatur aufweisen, muss der Unterschied durch die Prozessregler ausgeglichen werden. Die Dynamik eines synchronen Temperaturanstiegs von Phy 2 und Phy 3 wird durch die Geschwindigkeit in Testkammer 3 begrenzt.

7.4.4 Zwischenfazit zur Verifikation der Aktoren des thermischen Koppelsystems

Die Verifikation der Aktoren des thermischen Koppelsystems erfolgte hinsichtlich des Zielsystems an die Validierungsumgebung für die Untersuchung von Hochenergiezellen. Unter Berücksichtigung von Streuungen des Volumenstroms und im relevanten Temperaturbereich von $15 - 45\text{ °C}$ konnte eine hinreichend homogene Zellmanteltemperierung nachgewiesen werden. Diese ist erforderlich, um von der lokal gemessenen Wärmestromdichte sowie Zellmanteltemperatur auf den thermischen Zustand an der gesamten Zellmantelfläche zu schließen und damit die Wärmestromregelung zu befähigen.

Der maximal abbildbare Temperaturunterschied zwischen den Batteriezellen durch die Aktoren des thermischen Koppelsystems wurden ebenfalls nachgewiesen. Mit dem definierten Volumenstrom und der installierten Heizleistung können über die drei physischen Batteriezellen Temperaturunterschiede von über 5 K innerhalb eines simulierten Batteriemoduls abgebildet werden.

7.5 Fazit zur aufgebauten gemischt physisch-virtuellen Validierungsumgebung für E₃

Für die Validierungsumgebung, die in E₃ zur Abbildung des thermisch transienten Modulverhaltens zum Einsatz kommt, wurde aufgezeigt, wie drei physische Batteriezellen mit Temperatur- und Wärmestromsensoren präpariert werden. Hierbei wird die Genauigkeit der Messungen durch Kalibrierverfahren der Sensoren im montierten Zustand auf dem Zellmantel erhöht. Das entwickelte Kalibrierverfahren für die Wärmestrommessung als Teil der Methode konnte im zweiten Entwicklungsbeispiel verifiziert werden und ist in Kapitel 8.2 beschrieben.

Das thermische Koppelsystem wurde gemäß Kapitel 6.3.3 für das Zellformat 18650 umgesetzt und eine entsprechende Wärmestromregelung implementiert. Die Akteure des thermischen Koppelsystems zur Temperierung der drei Batteriezellen wurden hinsichtlich des definierten Zielsystems verifiziert.

Mit dem umgesetzten elektrischen Koppelsystem können, entsprechend des Zielsystems, Entladungen von Batteriemodulen aus Hochenergiezellen des Formats 18650 abgebildet werden. Die zusätzlichen elektrischen Widerstände durch die Verschaltung der Zellen mit den Stromsensoren im Prüfaufbau wurden vermessen. Deren Einfluss auf das elektrische Verhalten der beiden parallelgeschalteten Batteriezellen wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht quantifiziert.

Die für E₃ entwickelte Validierungsumgebung bildet die Grundlage das thermisch transiente Verhalten von gekühlten Batteriemodulen abzubilden. Diese kommt in Kapitel 8.2 in einem Entwicklungsbeispiel zum Einsatz, um die dritte Teilforschungsfrage zu beantworten:

Wie kann mittels gemischt physisch-virtueller Modellbildung gemäß des IPEK-XiL-Ansatzes das thermisch transiente Verhalten eines zellmantelgekühlten Batteriemoduls ohne ein parametrisiertes virtuelles Batteriezellmodell abgebildet werden?

8 Anwendung der Methode und der Validierungsumgebungen

Die in Kapitel 6 beschriebene Methode zur strukturierten Validierung von Entwicklungsgenerationen von Batteriezellkühlungen und die darin enthaltenen physisch-virtuell modellierten Validierungsumgebungen (vgl. Kapitel 7) werden auf zwei Entwicklungsbeispiele angewandt, um die drei Teilforschungsfragen und die übergeordnete Forschungsfrage zu beantworten. Beide Entwicklungsbeispiele haben gemein, dass es sich um Batteriemodule aus 96 zylindrischen Batteriezellen des Format 18650 in einer 48 V Verschaltung handelt, die mit Kühlflüssigkeit quерumströmt werden.

8.1 Entwicklungsbeispiel: Validierung hinsichtlich Schnellladefähigkeit

Die thermischen Anforderungen einer Batteriezellkühlung zur Gewährleistung der Schnellladefähigkeit von Batteriesystemen für Elektrofahrzeuge (EV) wurde in einem Entwicklungsvorhaben abgeleitet. Ziel war es, aus thermischer Sicht die Schnellladefähigkeit durch eine performante Batteriezellkühlung für ein 48 V Batteriemodul bestehend aus 96 zylindrischen Hochenergiezellen des Formats 18650 zu ermöglichen. Neben EV sollten auch Plugin-Hybride (PHEV) oder Hybridfahrzeuge (HEV) mit diesem Batteriemodul ausgerüstet werden können. Daraus ergab sich die Anforderung, das Modul mit integrierter Kühlung zellformatspezifisch zu entwickeln, um es sowohl mit Hochenergie- als auch mit Hochleistungszellen verschiedener Hersteller betreiben zu können. Primäres Ziel stellte allerdings die EV-Anwendung dar, an welcher die Schnellladefähigkeit demonstriert werden sollte. Um das Batteriemodul in unterschiedlichen Fahrzeugarchitekturen zu integrieren, sollte das Modul bauraumeffizient und variabel in der mechanischen Verschaltung und Anordnung im Fahrzeug sein. Auch das Gewicht des mechanischen Modulaufbaus und der Batteriezellkühlung sollte möglichst niedrig ausfallen. (Eisele et al., 2017)

Um Wärmeübergänge zu minimieren und die Kühlfläche zu maximieren wurde ein Kühlkonzept in Anlehnung an (Kreisel et al., 2015) entwickelt, bei dem die Batteriezellen mit Kühlflüssigkeit quерumströmt werden. Ausgangspunkt der Entwicklung stellten die fünf Konzepte zu den unterschiedlichen Zellanordnungen in Abbildung 8.1 dar. Aufgrund der besseren Bauraumausnutzung auf Modulebene

wurden nur hexagonale und keine kubischen Zellanordnungen in Betracht gezogen (Uerlich, Ambikakumari Sanalkumar, Bokelmann & Vietor, 2020). Bei den Konzepten 1 und 2 berühren sich die Zellen am Mantel und formen so einen Fluidkanal für die Kühlflüssigkeit in Einströmungsrichtung. Die Zellen in Konzept 3 und 4 weisen dahingegen einen äquidistanten Abstand zueinander auf. Bei Anordnung 5 ist der Zellabstand richtungsabhängig, die Zellen berühren sich allerdings nicht.

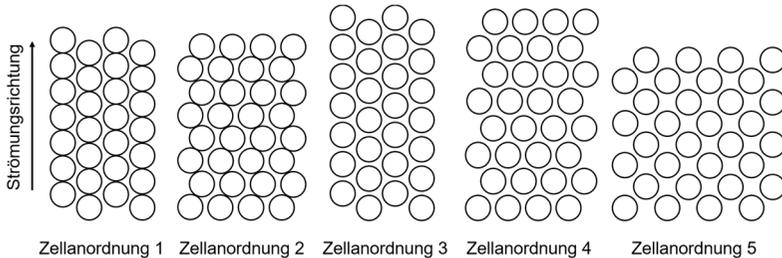


Abbildung 8.1: Initiale Varianten der Batteriezellanordnungen (Ausschnitt aus dem Batteriemodul) zur Kühlung durch querumströmen der Zellen mittels Flüssigkeit

Entsprechend der Anforderung an das Batteriemodul, durch die Kühlung eine Schnellladefähigkeit zu ermöglichen, wurde der folgende Testfall für die Validierung definiert. Da zu Projektbeginn keine schnellladefähigen Hochenergiezellen (max. 3 C Ladestrom) am Markt verfügbar waren¹, wurden folgende Annahmen für die Batteriezele getroffen:

- 30 mΩ Innenwiderstand der Batteriezele beim Ladevorgang im SoC-Bereich von 20 - 80 %
- 3 Ah Kapazität
- CC-Phase mit 3 C Ladestrom (= 9 A) unter Berücksichtigung der Temperaturgrenzen der Batteriezele sind prinzipiell möglich

Für die Validierung der Schnellladefähigkeit wurden hinsichtlich der Wärmeerzeugung in der CC-Phase folgende Annahmen getroffen. Bei hohen Stromraten ist die

¹ Zur Bewertung der Schnellladefähigkeit diente der maximale Ladestrom aus dem Herstellerdatenblatt der Batteriezele. Bei der Recherche wurden Batteriezele des Formats 18650 mit einer Kapazität ≥ 3 Ah in Betracht gezogen.

irreversible Wärmeenergieerzeugung dominant und der reversible Anteil kann zur Vereinfachung vernachlässigt werden (Jeon, 2014, S. 204; Ye et al., 2012, S. 237). Eine Besonderheit bieten Lithium-Cobalt-Oxid (LCO) Zellen, bei denen die reversible Wärme auch bei höheren Strömen einen dominanten Anteil hat (Jeon & Baek, 2011; Jeon, 2014; Viswanathan et al., 2010). Die irreversible Wärmeleistung wird wiederum durch die joulesche Wärmeleistung dominiert. Da der ohmsche Widerstand der Batteriezellen wenig mit dem SoC korreliert (Huria et al., 2012; Lin et al., 2014) kann dieser im für die CC-Ladephase relevanten SoC-Bereich als konstant angenommen werden (C. Park & Jaura, 2003).

Demzufolge können die thermischen Bedingungen im Testfall einer CC-Ladephase bei konstanter Zelltemperatur, also im stationären Zustand, mit einer konstanten Wärmeleistung approximiert werden (Cicconi et al., 2017, S. 169; C. Park & Jaura, 2003).

Eine konstante Wärmeleistung von 2,43 W wurde als repräsentativer Testfall für die entwicklungsbegleitende Validierung der Batteriezellkühlung definiert (Eisele et al., 2017). Als initiale Validierungsziele für die thermische Bewertung der Batteriezellkühlung wurden folgende festgelegt:

- Der maximale Temperaturunterschied auf Batteriesystemebene, jeweils an der gleichen Stelle der Zellen gemessen, soll 5 K nicht überschreiten (Kortbauer, 2013, S. 167). Um im Fahrzeug die Batteriezellkühlung von zwei bis drei Batteriemodulen thermisch seriell zu verschalten, darf die Temperaturspreizung der Batteriezellen innerhalb eines Moduls nicht größer als 1,7 – 2,5 K sein.
- Die maximal zulässige Temperatur der Zellmantelfläche ist 30 °C

Zur Konkretisierung des Kühldesigns und Absicherung der Zielsetzung ist eine entwicklungsbegleitende Validierung notwendig. Die eingesetzte Modellbildung muss auf den Reifegrad der Batteriezellkühlung und dem Validierungsziel der jeweiligen Entwicklungsgeneration (E_j) abgestimmt sein. Daraus ergibt sich ein Bedarf einer ganzheitlichen und entwicklungsbegleitenden Validierung zur Eigenschaftsabsicherung der Batteriezellkühlung unter thermisch konstanter Last im stationären Zustand.

Der in Kapitel 6 beschriebenen methodische Ansatz zur strukturierten Validierung von Batteriezellkühlungen in Entwicklungsgenerationen wurde auf das beschriebenen Entwicklungsbeispiel angewandt. Dieser wird in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

8.1.1 E₁: empirisches Berechnungsmodell querumströmter Rohrbündel

Die beschriebenen Konzepte sowie geometrische Grenzen unter Berücksichtigung des Zielsystems stellten den initialen Parameterraum für den ersten Validierungsschritt dar. Aufgrund des Konvergenzverhaltens der iterativen Berechnungsmethode konnte nur ein Ausschnitt des final zu entwickelnden Moduls abgebildet werden (Eisele et al., 2017). Aus dem gleichen Grund mussten einige Parameter und Parameterkombinationen außerhalb des initialen Parameterraums untersucht werden. Trotzdem war ein Identifizieren quantitativer Zusammenhänge möglich. Eine vollfaktorielle Parametervariation war bei dieser einfachen Modellbildung zeit- und ressourceneffizient durchführbar. Die folgenden Designparameter wurden nach Eisele et al. (2017) in einer DOE-Studie hinsichtlich des Effektes auf die Wärmeabfuhr für jede der fünf Zellanordnungen ausgewertet:

- Abstände zwischen den Zellen (2 Stufen)
- Längen-Breitenverhältnis des Batteriemoduls (2 Stufen)
- Kühlflüssigkeiten (3 Varianten)
- Temperatur der Kühlflüssigkeit vor dem Batteriemodul (2 Stufen)
- Volumenstrom der Kühlflüssigkeit (2 Stufen)

Bis auf die Kühlflüssigkeit sind alle Parameter zweistufig, so dass zwischen diesen ein linearer Zusammenhang angenommen wurde. Zwischen den drei Kühlflüssigkeiten ist diese Annahme nicht zulässig. Die Stoffeigenschaften wie Viskosität, Dichte, thermische Leitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität beeinflussen die Wärmeabfuhr von den Zellen (Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 2013, S. 819–823). Diese Eigenschaften variieren unabhängig voneinander in den drei Kühlflüssigkeiten. Aus diesem Grund wurden je Zellanordnung zwei Auswertungen durchgeführt, die sich in den Faktorstufen des Fluides unterscheiden (Fluid 1 / Fluid 2 und Fluid 2 / Fluid 3). Ergebnis dieses Validierungsschrittes sollte ein erhöhtes Systemverständnis und ein definierter Parameterraum für den folgenden Validierungsschritt sein.

Neben der Untersuchung der Wärmeabfuhr über das empirische Modell wurde der Einfluss der Parametervariationen auf nicht thermische Zielgrößen analysiert. Wie in Kapitel 8.1 beschrieben, sind Bauraum und Gewicht wichtige Zielgrößen für die Batteriemodulentwicklung. Gleiches gilt für konstruktive Problemstellungen, wie der Umsetzung des Dichtkonzepts, der mechanischen Anbindung des Moduls usw., die bei der Parameterkonkretisierung berücksichtigt wurden.

Parameter, die bei einer Variation im zulässigen, entwicklungsspezifischen Bereich einen eindeutigen Einfluss auf die Kühlung haben und auch mit nicht thermischen Zielgrößen vereinbar sind, wurden konkretisiert bzw. sich für eine Variante entschieden. Waren relevante Einflüsse erkennbar aber nicht eindeutig gegenüber anderen Effekten quantifizierbar, wurden diese im nachfolgenden Validierungsschritt mit höherer Modellgüte untersucht und dann konkretisiert. Der sich somit ergebende neue Parameterraum definierte einen Teil der Anforderungen an den nachfolgenden Validierungsschritt unter Verwendung von CFD-Modellen.

Validierungsergebnisse der E₁: empirisches Berechnungsmodell querumströmter Rohrbündel

Die Haupteffekte und deren Einfluss auf die Zielgröße Wärmeabfuhr sind für jede der fünf Zellanordnungen ermittelt worden. Beispielhaft ist die Effektanalyse für eine Zellanordnung in Abbildung 8.2 aufgeführt.

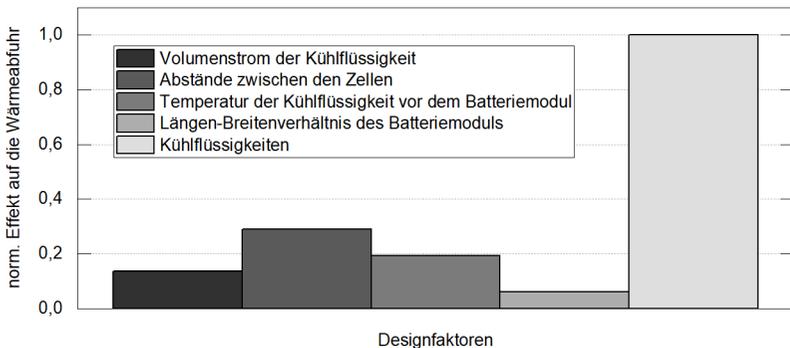


Abbildung 8.2: Einfluss der fünf untersuchten Haupteffekte auf die Zielgröße Wärmeabfuhr beispielhaft für eine Zellanordnung. Berechnungsgrundlage stellt das Modell des querumströmten Rohrbündels dar. (Eisele et al., 2017)

Aufgrund unterschiedlicher Dichten, Wärmekapazitäten, Wärmeleitfähigkeiten und Viskositäten hat das Ersetzen der Kühlflüssigkeit 2 durch die Kühlflüssigkeit 1 den größten Einfluss auf die Wärmeabfuhr (siehe Abbildung 8.2). Der Haupteffekt der Faktorstufe Kühlflüssigkeit 2 zu Kühlflüssigkeit 3 auf die Wärmeabfuhr war hingegen vernachlässigbar. Daher wurde die Kühlflüssigkeit 1, welche zu einer besseren Kühlleistung führt, für die nächste Entwicklungsgeneration ausgewählt. Die Variation des Abstandes zwischen den Zellen hat die zweitgrößte Auswirkung. Berechnungen ergaben, dass kleinere Abstände zu einer höheren Wärmeabfuhr führen.

Dieser Zusammenhang kann durch die Untersuchungen von (N. Yang et al., 2015) an luftgekühlten und durch S. Park und Jung (2013) an flüssiggekühlten zylindrischen Batteriezellen in unterschiedlichen Anordnungen bestätigt werden. Weshalb in den nachfolgenden CFD-Simulationen der Abstand zwischen den Zellen weiter reduziert wurde. Die temperaturabhängigen Stoffwerte der Kühlflüssigkeiten führten bei der unteren Temperaturstufe zu einer besseren Wärmeabfuhr. Um den Aufwand für die nachfolgenden Validierungsschritte mit den folgenden Entwicklungsgenerationen gering zu halten, wurde nur noch eine Fluidtemperatur am Moduleingang von 20 °C betrachtet. Der Vergleich der fünf Zellanordnungen zeigte Unterschiede in der Kühleffizienz und im Bauraum. Die Anordnung 5 schnitt in beiden Kriterien am schlechtesten ab und wurde deshalb in der nachfolgenden Entwicklungsgeneration nicht weiter berücksichtigt. (Eisele et al., 2017)

8.1.2 E₂: 2D-CFD-Modell der Batteriezellkühlung

Die im Parameterraum festgelegten Parameter wurden für die vier verbleibenden Zellanordnungen variiert:

- Abstände zwischen den Zellen (2 Stufen)
- Längen-Breitenverhältnis des Batteriemoduls (2 Stufen)
- Volumenstrom im betrachteten Ausschnitt des Zellverbundes (2 Stufen)

Der Abstand zwischen den Zellen wurde im Vergleich zur empirischen Berechnung aufgrund des positiven Einflusses auf die Wärmeabfuhr und den Bauraum weiter reduziert und zwei Varianten untersucht. (Eisele, Werner & Ott, 2018)

Die nachfolgend beschriebenen CFD-Simulationen wurden mit der Software ANSYS Fluent durchgeführt. Um die Rechenzeiten für Simulationen gering zu halten und mehrere Parametervarianten in angemessener Zeit simulieren zu können, wurde die Batteriezellkühlung in 2D modelliert. Aufgrund der niedrigen Reynoldszahlen im Rohrbündel ($Re < 300$), lag die Strömung im Übergangsbereich zwischen laminar und turbulent (Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 2013, S. 1238), wurden der Effekt dreidimensionaler Strömungen durch Turbulenzen als gering eingeschätzt. Auch Temperaturunterschiede in axialer Richtung der Batteriezelle waren aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit der Batteriezelle in dieser Richtung nicht zu erwarten. Eine 3D-Vorabsimulation eines Modulausschnittes bestätigte diese Annahmen. (Kohler, 2017, S. 33–34)² Für die Validierung der Batte-

² Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

riezellokühlung wurden die Batteriezellen als Wärmequellen mit homogener Wärme-flussdichte über den Zellquerschnitt modelliert. Temperaturabhängige Änderungen des Innenwiderstands der Batteriezellen, die zu einer inhomogenen Wärmeentwicklung im Batteriemodul führen würden, konnten aufgrund der geringen Temperaturunterschiede im Batteriemodul vernachlässigt werden (Eisele et al., 2017). Nach der Gleichung von Li et. al (2013) variiert der Innenwiderstand der Zelle im untersuchten Temperaturbereich von 2 K auf Modulebene um weniger als 3,5 %.

Für die Simulation eines Ausschnittes aus dem jeweiligen Zellverbund wurde die Wärmeleitfähigkeit der Batteriezellen, wie auch in den 2D-CFD-Simulationen von X. Li et al. (2013) isotrop modelliert. Gründe hierfür sind der reduzierte Rechen- und Modellierungsaufwand für die untersuchten Zellverbände aus je 32 Zellen. Zudem lagen zu diesem Zeitpunkt keine Informationen vor, inwiefern eine anisotrope Wärmeleitfähigkeit aus der Literatur mit denen der später eingesetzten Batteriezellen übereinstimmen würden. Die Wärmeerzeugung wurde homogen über die Zellfläche modelliert.

Um Komplexität und Rechenzeit für die Simulation des Zellverbundes zu reduzieren, wurden je Reihe ein bzw. zwei Zellen, abhängig der Zellanordnung, über die gesamte Modullänge modelliert (Eisele et al., 2017).

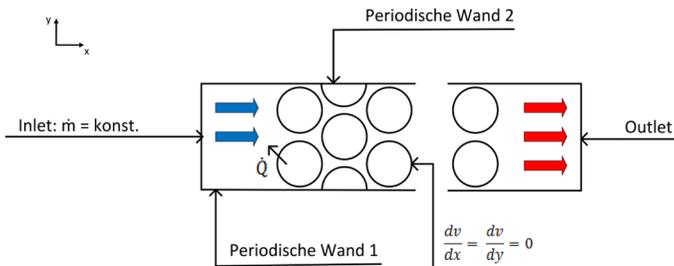


Abbildung 8.3: Modellbildung und Randbedingungen in der CFD-Simulation von querschnittsorientierten zylindrischen Batteriezellen (Kohler, 2017, S. 31)³

Die Modellierung des Zellverbundes mit den hinterlegten Randbedingungen lehnt sich an die Untersuchungen von Bauer und Brander (1993) an (vgl. Abbildung 8.3). Über die periodischen Randbedingungen senkrecht zur Strömungsrichtung wurde die Annahme getroffen, dass der Strömungsbereich von der Wand des Fluidraums

³ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

nicht beeinflusst wird. Das Design der Wandgeometrie sollte erst in der nachfolgenden Entwicklungsgeneration definiert werden. Gleiches gilt auch für Geometrien zur Strömungsführung am Ein- und Auslauf, weshalb in der CFD-Simulation eine homogene Anströmung des Zellverbunds modelliert wurde. (Kohler, 2017, S. 31–32)⁴

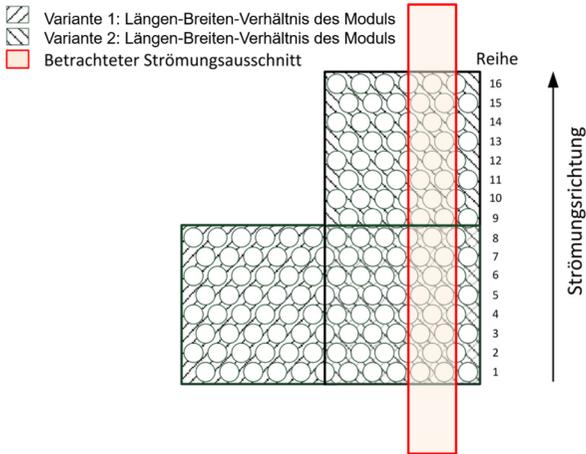


Abbildung 8.4: Am Beispiel einer Zellanordnung sind zwei Modulvarianten mit unterschiedlichem Längen-Breiten-Verhältnis übereinander gelegt. Im betrachteten Strömungsausschnitt können durch Variation des Volumenstroms beide Modulvarianten abgebildet werden. Hierfür sind die Temperaturen der entsprechenden Zellreihen (hier 1 – 8 bzw. 1 – 16) auszuwerten. (in Anlehnung an Kohler, 2017, S. 32)⁵

Wie Abbildung 8.4 zu entnehmen ist, stehen die Strömungslängen der beiden Varianten mit unterschiedlichen Anströmbreiten im Verhältnis 1:2 (8:16 Reihen). Da die Anzahl der Batteriezellen beider Varianten identisch ist, entspricht das Verhältnis der Modulbreiten (senkrecht zur Strömungsrichtung) umgekehrt dem Längenverhältnis 2:1. Entsprechend können durch den betrachteten Strömungsausschnitt (vgl. Abbildung 8.4) mit einer Simulation zwei Modulvarianten bei identischen Strömungsgeschwindigkeiten ausgewertet werden. Da bei der Modulvariante mit großer Anströmbreite, nur die Zellen von der ersten bis zur mittleren Reihe betrachtet werden, unterscheiden sich die Strömungsbedingungen an den jeweils letzten Reihen der

⁴ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

⁵ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Modulvarianten. Deshalb wurde im simulierten Strömungsausschnitt eine zusätzliche Reihe Batteriezellen modelliert, ohne deren Temperatur auszuwerten. Wird der simulierte Volumenstrom im betrachteten Modulausschnitt auf die jeweilige Anströmbreite der Modulvariante umgerechnet, unterscheiden sich die Volumenströme auf Modulebene. Da die simulierten Volumenströme im Strömungsausschnitt ebenfalls im Verhältnis 1:2 stehen ergibt sich entsprechend Tabelle 8.1 auf Modulebene folgender Zusammenhang (Kohler, 2017, S. 30–35):

Tabelle 8.1: Erwärmung der Kühlflüssigkeit beim Durchströmen des Moduls in Abhängigkeit von Modulbreite und Volumenstrom

	simulierter Volumenstrom \dot{V}_1 im Strömungsausschnitt	simulierter Volumenstrom $\dot{V}_2 = 2 * \dot{V}_1$ im Strömungsausschnitt
Modulbreite Variante 1: b_1	$2 * \dot{V}_{norm}; \Delta T_{Fluid} = 2 K$	$4 * \dot{V}_{norm}; \Delta T_{Fluid} = 1 K$
Modulbreite Variante 2: $b_2 = \frac{b_1}{2}$	$\dot{V}_{norm}; \Delta T_{Fluid} = 4 K$	$2 * \dot{V}_{norm}; \Delta T_{Fluid} = 2 K$

Somit ergibt sich durch die Simulation zweier Volumenströme (\dot{V}_1, \dot{V}_2) im Strömungsausschnitt ein Volumenstrom auf Modulebene der jeweiligen Variante mit einer Erwärmung der Kühlflüssigkeit zwischen Moduleingang und am Modulausgang um $\Delta T_{Fluid} = 2 K$ (vgl. Tabelle 8.1 hellgrau hinterlegt). Hierfür muss bei der Modulbreite Variante 2, der doppelte Volumenstrom durch das Modul fließen als bei der Modulbreite Variante 1. Unter der Annahme eines homogenen Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Fluid und Batteriezelle im Batteriemodul entlang der Strömung sollte auch die Temperaturspreizung zwischen den Zellen am Strömungseingang und -ausgang etwa 2 K betragen.

Die Parameter wurden hinsichtlich ihres Effekts auf die mittlere Zelltemperatur im Batteriemodul bewertet. Für eine Auswahl der Zellanordnungen wurden mögliche Parameterkombinationen anhand der Simulationsergebnisse hinsichtlich der folgenden Kriterien bewertet.

- maximaler Temperaturgradient zwischen den Zellen entlang der Strömungsrichtung
- maximale mittlere Zelltemperatur im Modul
- Robustheit der Temperaturverteilung bei Variation des Zellabstandes

Die vier Anordnungen wurden hinsichtlich des Bauraums als nicht thermische Zielgröße und hinsichtlich der genannten thermischen Ziele bewertet. Die zwei bestbewerteten Zellanordnungen wurden für die weiterführenden Untersuchungen in E₄ ausgewählt und dadurch der Parameterraum ausreichend konkretisiert. (Eisele et al., 2018)

Validierungsergebnisse der E₂: CFD-Modell

Abbildung 8.5 zeigt die linearisierten Verläufe der Zelltemperaturen entlang des Kühlstroms für verschiedene Zellanordnungen.

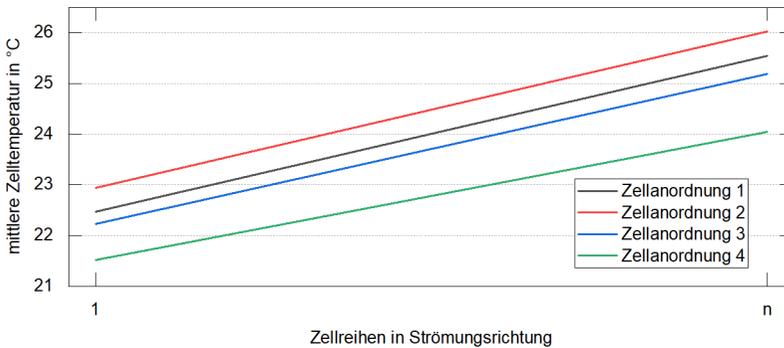


Abbildung 8.5: Linearisierter Temperaturanstieg der Batteriezellen in Strömungsrichtung für vier unterschiedliche Zellanordnungen (in Anlehnung an Kohler, 2017, S. 58)⁶

Die Zelltemperaturen wurden über die Parameterstufen des Volumenstroms und des Zellabstandes gemittelt und Ausgleichsgeraden berechnet. Alle Geraden haben die gleiche Steigung mit Ausnahme von Anordnung 4. Das lässt sich durch unterschiedliche Strömungsbedingungen in der Nähe der Einlaufzonen aufgrund der Zellanordnung erklären. Dadurch unterscheidet sich der Wärmeübergang in den ersten Zellenreihen von denen im restlichen Zellverbund. Dies geht auch aus den Temperaturverläufen in Abbildung 8.6 hervor. Zudem unterscheiden sich die Temperaturniveaus der Kurven. Daraus lässt sich schließen, dass die Anordnung 4 die

⁶ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

beste Kühlleistung aufweist, während das Temperaturniveau der Zellen in der Anordnung 2 um etwa 1,5 K höher ist. (Eisele et al., 2017)

Abbildung 8.6 zeigt die mittlere Zelltemperatur je Reihe in Strömungsrichtung in Anordnung 3 und 4 bei unterschiedlichen Volumenströmen und Zellabständen. Die Unterschiede in der Kühlleistung bei Variation des Volumenstroms gehen aus den unterschiedlichen Steigungen der Kurven hervor. Die Sensitivität des Zellabstandes auf die Zelltemperatur ist anhand des parallelen Versatzes der Temperaturkurven zu erkennen. (Eisele et al., 2018)

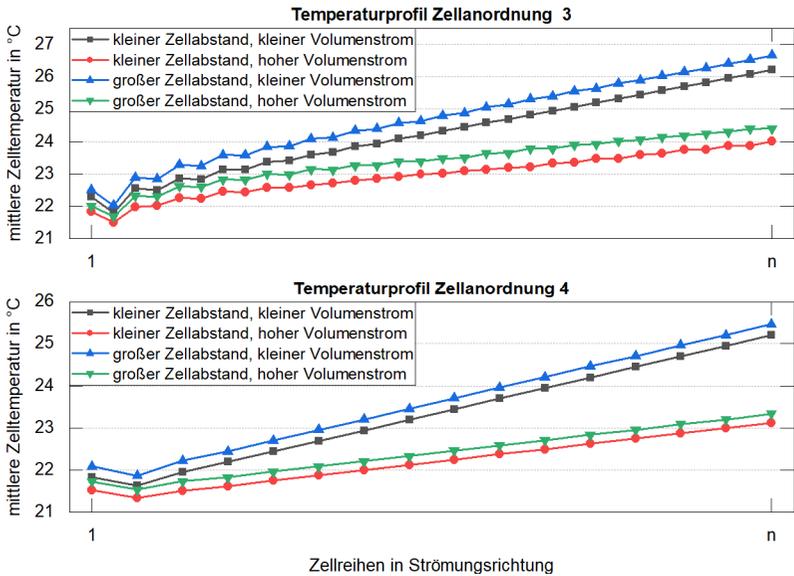


Abbildung 8.6: Temperaturprofile für unterschiedliche Abstände zwischen den Batteriezellen und unterschiedlichen Fluidströmen (in Anlehnung an Kohler, 2017, S. 56–57)⁷

Die Haupteffekte der Faktoren Volumenstrom und Zellabstand wurden für die vier Zellanordnungen in den beiden Konfigurationen der Anströmbreite berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8.2 aufgeführt. Die Variation des Zellabstands hat je nach Zellanordnungen einen unterschiedlich starken Einfluss auf die Zelltemperatur. Wohingegen der Effekt unabhängig von der Modulkonfiguration zu sein scheint. Die

⁷ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Anordnungen 3 und 4 sind weniger sensitiv auf die Änderung des Zellabstandes als Anordnung 1 und 2. Eine Reduktion des Abstandes wirkt sich aber in allen Fällen positiv auf die Reduktion der Zelltemperatur aus. Die Verdopplung des Massestroms wirkt sich bei allen Zellanordnungen positiv aus. Auffällig ist der Unterschied zwischen den Konfigurationen der Anströmbreite. Die Erhöhung des Volumenstroms wirkt sich bei kleiner Anströmbreite stärker auf die Temperaturreduktion der Zellen aus, als bei der breiten Konfiguration. (Kohler, 2017, S. 59)⁸

Tabelle 8.2: Effekte der Abstands- und Volumenstromänderung auf die mittlere Zelltemperatur für verschiedene Zellanordnungen (Kohler, 2017, S. 59)⁹

	Modul-konfiguration	Zellanordnung			
		1	2	3	4
Effekt: Zellabstandsänderung klein → groß	große Anströmbreite	0,59 K	0,71 K	0,39 K	0,23 K
	kleine Anströmbreite	0,65 K	0,79 K	0,43 K	0,23 K
Effekt: Volumenstromänderung klein → groß	große Anströmbreite	-0,77 K	-0,85 K	-0,79 K	-0,67 K
	kleine Anströmbreite	-1,25 K	-1,32 K	-1,28 K	-1,16 K

Der Vergleich der Modulkonfigurationen wurde bei gleichem Massestrom auf Modulebene durchgeführt. Die Effekte sind für alle Zellanordnungen ähnlich. Eine kleine Anströmbreite führt in allen Fällen zu einer niedrigeren Zelltemperatur. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8.3 dargestellt. (Kohler, 2017, S. 59)¹⁰

Tabelle 8.3: Effekt unterschiedlicher Modulkonfigurationen auf die mittlere Zelltemperatur (Kohler, 2017, S. 59)¹¹

	Zellanordnung			
	1	2	3	4
Effekt: Änderung der Anströmbreite klein → groß	0,18 K	0,21 K	0,24 K	0,18 K

⁸ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

⁹ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

¹⁰ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

¹¹ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Unter Berücksichtigung der im Kapitel 8.1 genannten Kriterien, sind die Anordnungen 3 und 4 am besten geeignet. In Kombination mit der Parameterstufe des geringen Zellabstands und der kleinen Anströmbreite wurden die beiden Anordnungen für Untersuchungen in der nächsten Entwicklungsgeneration E_4 ausgewählt (Eisele et al., 2017). Aufgrund des positiven Effekts des geringen Zellabstands wurde dieser im Prüfaufbau nochmals geringfügig reduziert.

8.1.3 E_4 : physisch-virtuelles Modell mit thermischen Batteriezellmodellen als Koppelsystem

Da in diesem Entwicklungsbeispiel das thermisch transiente Verhalten einer spezifischen Batteriezelle nicht auslegungsrelevant war, wurde die Entwicklungsgeneration E_3 übersprungen.

Im CFD-Modell (E_3) wurde eine unendliche Ausdehnung des Zellverbundes senkrecht zur Strömungsrichtung angenommen. Strömungsführende Elemente vor und nach dem Zellverbund wurden nicht berücksichtigt. Die Modellierung einer homogenen Anströmungsgeschwindigkeit über die Anströmfläche des Zellverbundes, wie im CFD-Modell, lässt sich in einem Prüfaufbau nicht abbilden. Gleiches gilt für die Breite des Zellverbundes senkrecht zur Strömungsrichtung. Deshalb mussten in dieser Entwicklungsgeneration E_4 die entsprechenden Designparameter berücksichtigt werden:

- Abstand der Zellen zur seitlichen Begrenzung des Fluidraums senkrecht zur Strömungsrichtung
- Anzahl, Position und Größe der Düsen zur Anströmung der Batteriezellen
- Anzahl, Position und Größe der Düsen zur Fluidabfuhr hinter der letzten Zellreihe

Dies galt gleichermaßen für beide zu untersuchenden Zellanordnungen. (Eisele et al., 2018)

Die zu entwickelnde Validierungsumgebung wird in dieser Entwicklungsgeneration für die Validierung des thermisch stationären Verhaltens des Batteriemoduls benötigt. Diese Validierungsumgebung zeichnet sich durch ein entwicklungspezifisches physisches Modell der Batteriezellkühlung durch einen Prüfaufbau und ein thermisches Batteriezellmodell als Koppelsysteme zwischen physischer und virtueller Domäne aus. Die Anforderungen an die Teilsysteme sind im Folgenden spezifiziert:

Das physische Modell der Batteriezellkühlung soll eine einfache Anpassung geometrischer Parameter ermöglichen, welche die Fluidführung im Batteriemodul beeinflussen. Diese beinhalten die Zellanordnung, den Abstand zwischen den Zellen und den Wänden, die Wandgeometrie sowie die Düsenanzahl und Düsenpositionen vor der ersten und hinter der letzten Zellreihe, um den Strömungszustand zu beeinflussen. Diese Anforderungen sind wie die abbildbaren Moduldimensionen und Anzahl an Batteriezellen entwicklungspezifisch gewählt. Die mechanische Einbindung der Batteriezellen sowie deren Abdichtung gegenüber der Kühlflüssigkeit im physischen Aufbau, soll dem des späteren Batteriemoduls in Form eines physischen Prototyps entsprechen. Sowohl reale Batteriezellen des Formats 18650 (E_5) als auch die thermischen Ersatzmodelle (E_4) der Batteriezellen sollen mit entsprechender Sensorintegration im physischen Prüfaufbau genutzt werden.

Die Batteriezellmodelle sollen eine definierte Wärmeleistung entsprechend des entwicklungspezifischen Zielsystems freigeben, in diesem Fall 2,5 W je Zelle. Zudem wird eine minimale Abweichung der Wärmeleistungen der 96 Batteriezellmodelle angestrebt. Die Wärmekapazität spielt eine untergeordnete Rolle, da mit den Batteriezellmodellen ausschließlich thermisch stationäre Zustände untersucht werden sollen. Der Kühlungs- und Strömungszustand an der Zellmantelfläche soll dem einer realen Batterie zelle bei Umströmung mit Kühlfluid entsprechen. Für einen einfachen Abgleich des thermischen Verhaltens mit realen Batterie zellen, soll die Zellmanteltemperatur erfasst werden, ohne die Fluidströmung zu beeinflussen.

In den nachfolgenden zwei Kapiteln wird die Umsetzung des thermischen Batterie zellmodells (gemischt physisch-virtuell) und des physischen Modells der Batterie zellkühlung in Form eines Prüfaufbaus beschrieben.

Thermisches Batterie zellmodell als Koppelsystem

Das umgesetzte thermische Batterie zellmodell mit steuerbarer Wärmeleistung lehnt sich an die Modellbildung von Hémerly et al. (2014) an und wird in (Eisele et al., 2017; Eisele et al., 2018) beschrieben. Das Konzept inkl. integriertem Thermoelement ist in Abbildung 8.7 dargestellt. Zwei seriell verschaltete elektrische Widerstände, je $0,1 \Omega$, sind über ein thermisch leitfähiges, aber elektrisch isolierendes Harz in ein Stahlrohr vergossen. Über entsprechende Anschlusskabel an den Widerständen können die Batterie zellmodelle im physischen Prüfaufbau miteinander elektrisch verschaltet und mit Strom versorgt werden.

Der Zellmantel ist mit einem PVC-Schrumpfschlauch überzogen, wie er auch bei den Zellen im späteren Batteriemodul eingesetzt werden soll (nicht in Abbildung 8.7

dargestellt). Dadurch liegt ein äquivalenter Wärmeübergang zwischen Fluid und Zellmantel wie beim Einsatz realer Batteriezellen vor.

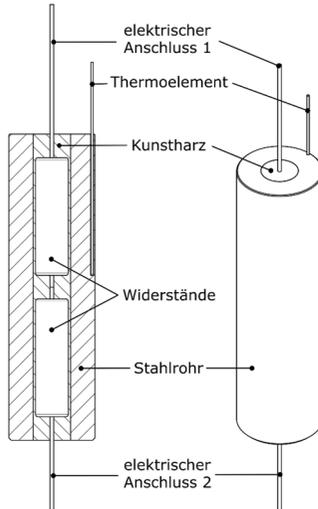


Abbildung 8.7: Thermisches Modell einer zylindrischen Batteriezelle des Formats 18650 mit einem Mantelthermoelement Typ J, $\varnothing = 0,5$ mm. Der Sensor befindet sich in einer erodierten Bohrung 0,6 mm von der Zellmanteloberfläche entfernt. (in Anlehnung an Prinz, 2017)¹²

Das Stahlrohr aus 42CrMo4 hat eine Wärmeleitfähigkeit von 42,6 W/m/K (bei 20 °C) (thyssenkrupp Materials Austria). Dies ist in einer ähnlichen Größenordnung wie die Wärmeleitfähigkeit zylindrischer Batteriezellen in axialer und tangentialer Richtung (20 – 50 W/m/K) (Drake et al., 2014; Korthauer, 2013, S. 185). Auch die Wärmeleitfähigkeit des Zellbeckens von 17 W/m/K (Jeon & Baek, 2011) mit einer Dicke von 0,2 - 0,3 mm (Jeon & Baek, 2011; Sahraei, Campbell & Wierzbicki, 2012; T. Wang et al., 2014) liegt in einem ähnlichen Bereich. Entsprechend herrschen unter der Mantelfläche des thermischen Batteriezellmodells ähnliche Konduktionsbedingungen in radialer und tangentialer Richtung wie unter der Mantelfläche realer Batteriezellen (Eisele et al., 2018).

Die oberflächennahe Position des 0,5 mm starken Mantelthermoelements (Bohrungsachse 0,6 mm unter der Zellmanteloberfläche) soll einen direkten Vergleich

¹² Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

der Temperaturmessungen mit realen Batteriezellen an der Zellmanteloberfläche erlauben. Hierfür sprechen die ähnlichen konduktiven Bedingungen nahe der Zellmantelfläche sowie der Einfluss des Wärmeübergangskoeffizienten auf die Oberflächentemperatur des Zellmantels. Letzteres lässt sich mit der Neumann-Randbedingung im Versuch begründen. Im stationären Zustand wird die erzeugte Wärme der Batteriezelle vollständig an die Umgebung abgegeben. Über die konstante Wärmestromdichte, die Fluidtemperatur und den Wärmeübergangskoeffizienten kann die Oberflächentemperatur des Zellmantels nach Formel 19 berechnet werden. Materialwerte der Batteriezelle gehen hierbei nicht in die Berechnung ein.

$$T_{Mantel} = T_{Fluid} - \frac{\dot{q}_{Zelle}}{\alpha} \quad 19$$

T_{Mantel}	<i>Oberflächentemperatur des Zellmantels</i>
T_{Fluid}	<i>Fluidtemperatur</i>
\dot{q}_{Zelle}	<i>konstante Wärmeflussdichte am Zellmantel</i>
α	<i>Wärmeübergangskoeffizient zwischen Fluid und Zellmantel</i>

Um den Prüfaufbau mit einer Spannung < 60 V zu betreiben, wurden die Batteriezellmodelle zu zwei seriellen Strängen elektrisch verschaltet und mit je einem Labornetzgerät verbunden. Die beiden Netzgeräte wurden in Stromregelung betrieben und gleiche Sollwerte eingestellt. Entsprechend Formel 20 konnte über den Strom I die Wärmeleistung pro Zelle \dot{Q}_{Zelle} eingestellt werden. (Eisele et al., 2018)

$$\dot{Q}_{Zelle} = 0,2 \Omega * I^2 \quad 20$$

Physisches Modell der Batteriezellkühlung

Das entwicklungspezifische physische Modell der Batteriezellkühlung wird im Folgenden erläutert. Da für die Konkretisierung des Kühldesigns mehrere Zellanordnungen mit unterschiedlichen Außenmaßen untersucht werden sollen, wurde die geometrische Begrenzung des Zellverbunds senkrecht zur Strömungsrichtung durch variable Seitenwände realisiert (siehe Abbildung 8.8). Diese sind wiederum

auf Einschüben fixiert die den Fluidraum abdichten. Durch elastische Abstandshalter zwischen den Einschüben und den Seitenwänden ist eine Feinjustierung des Abstandes zwischen Modulwand und Zellmantel möglich.

Auch die dazu senkrecht angeordneten Einschübe am Fluideinlass und -auslass besitzen variable Elemente, die entsprechend der Modullänge anpassbar sind. Die Kühlflüssigkeit wird zentral zugeführt und die Strömungsgeschwindigkeit in einem Ausgleichsraum vor dem Kunststoffblock zur variablen Anströmung verringert. Durch Austausch oder Adaption dieses Kunststoffblocks soll unter Variation der Düsenposition, -geometrie und -anzahl, die erste Zellreihe möglichst homogen gekühlt werden. Somit können geometrische Anpassungen einfach und ressourceneffizient erfolgen und hinsichtlich ihres Einflusses auf die Kühlung erprobt werden. Der gegenüberliegende Bereich zur Fluidabfuhr ist identisch aufgebaut.

Der Fluidraum zwischen den Batteriezellen wird in der Bildebene durch zwei Platten an den beiden Polseiten der Batteriezellen begrenzt. Zur Abdichtung des Fluidraums an den Batteriezellen wurde im Entwicklungsprojekt dasselbe Dichtkonzept verwendet, welches auch im späteren Batteriemodul zum Einsatz kam. Das Dichtkonzept ist in (Eisele, 2017) beschrieben.

Zur Bilanzierung der Kühlleistung wird die Temperatur der Kühlflüssigkeit über Thermoelemente des Typs J direkt vor dem zentralen Fluideinlass und direkt hinter dem zentralen Fluidauslass gemessen. 15 weitere Thermoelemente sind zur Temperaturerfassung in den Batteriezellmodellen eingesetzt, um die Temperaturverteilung im Zellverbund zu messen. Vor dem Thermoelement am Einlass und nach dem Thermoelement am Auslass ist je ein Drucksensor am Kühlkreislauf angeschlossen, um den Druckverlust über die Batteriezellkühlung abzuschätzen. Zudem wird der Volumenstrom über den Durchflusssensor erfasst.

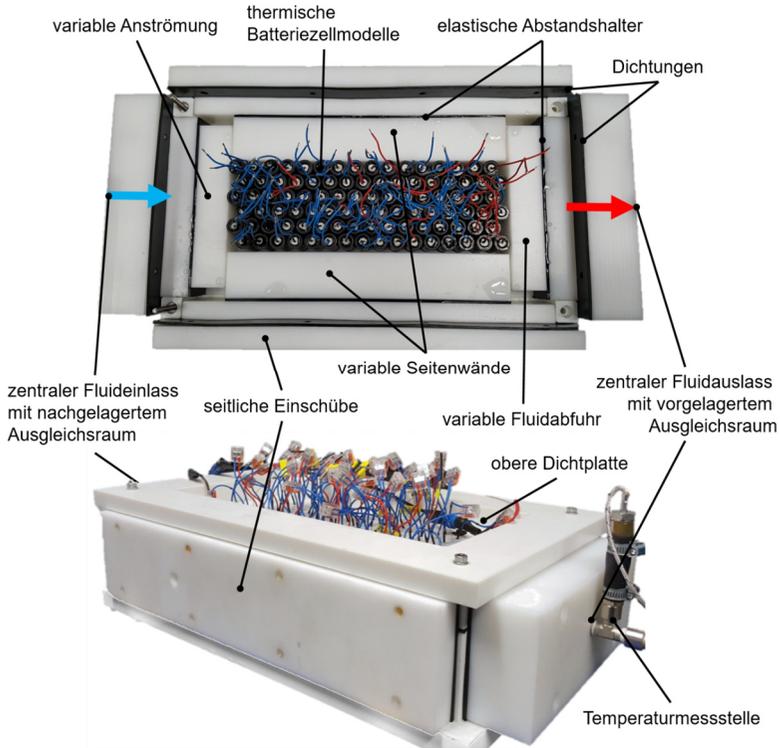


Abbildung 8.8: Modulares physisches Modell der Batteriezellkühlung querumströmter zylindrischer Batteriezellen unter konstanter Kühlleistung im stationären Zustand. Beispielhafte Zellanordnung mit thermischen Batteriezellmodellen in der unteren Hälfte des Aufbaus (oben), vollständiger Aufbau (unten)

Für die Datenerfassung und Ansteuerung des Durchlaufkühlers kam ein EtherCAT System der Fa. Beckhoff Automation GmbH & Co. KG mit einer Samplerate von 1 kHz zum Einsatz. Entsprechende Module lesen die Signale zur Datenaufzeichnung ein. Die für die Validierung der Batteriezellkühlung wichtigen Temperatursignale wurden mit einer Auflösung von 0,01 K ausgelesen.

Inbetriebnahme und Verifikation der Validierungskonfiguration im Entwicklungsprojekt

Um die Wärmeleistung im Zellkörper zu überprüfen, wurde der Widerstand der Batteriezellmodelle mittels Vierpunkt-Messverfahren überprüft. Die Widerstandswerte beziehen sich auf die Verluste im Inneren des Zellkörpers. Anschlusskabel wurden erst nach der Messung verlötet. Die Vermessung aller Zellmodelle ergab eine Abweichung des Gesamtwiderstandes (seriell verschaltet) und damit der freigesetzten Wärme auf Modulebene von maximal $\pm 5,3\%$ zum Sollwert. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchung galt diese Toleranz aufgrund der hohen Wärmekapazität des Fluides als hinreichend genau. In Tabelle 8.4 sind die Widerstände entsprechend ihrer Abweichungen kategorisiert.

Tabelle 8.4: Anzahl der Batteriezellmodelle, kategorisiert nach der Abweichung des Widerstandes zum Sollwert von $0,2\ \Omega$. Insgesamt wurden 96 Zellen verwendet.

Toleranzbereich $\pm 2,5\%$	Toleranzbereich $\pm 5\%$	Toleranzbereich $\pm 10\%$
33 Zellen	41 Zellen	22 Zellen

Die Batteriezellmodelle, welche Temperatursensoren integriert haben, wurden mit Widerständen im niedrigsten Toleranzbereich ausgestattet ($\pm 2,5\%$ maximale Abweichung). Entsprechend der Widerstandstoleranz wurden alle Batteriezellmodelle gekennzeichnet und gleichmäßig im Zellverbund verteilt. Speziell die 22 Zellen der höchsten Toleranzklasse wurden so platziert, dass sie in Strömungsrichtung nicht direkt vor Batteriezellmodellen mit Thermoelementen angeordnet sind.

Der relevante Temperaturbereich für die Messungen ergibt sich durch die minimale Fluidtemperatur von $20\ ^\circ\text{C}$ und der maximal zulässigen Manteltemperatur der Batteriezellen von $30\ ^\circ\text{C}$. Da die angestrebten Temperaturdifferenzen im Zellverbund kleiner $2,5\ \text{K}$ (vgl. Kapitel 8.1) sind, ist die Genauigkeit der Thermoelemente (Typ J Genauigkeitsklasse 1) von $\pm 1,5\ \text{K}$ in diesem Temperaturbereich nicht ausreichend (DIN IEC 584 Teil 2). Zur Erhöhung der Genauigkeit wird bei der Messdatenauswertung eine fiktive Kalibrierung durchgeführt. Da bei der Validierung der Temperaturunterschied zwischen den Batteriezellen von Interesse war und die absolute Temperatur eine untergeordnete Rolle spielte, wurde für die Vergleichskalibrierung (Bernhard, 2014, S. 496–497) auf eine fiktive Temperatur referenziert. Diese errechnet sich aus dem Durchschnittswert aller Thermoelemente in einem thermisch homogenen und stationären Zustand. Hierfür wurde der Prüfaufbau vor Versuchsbeginn mit Kühlfluid ($20\ ^\circ\text{C}$) durchströmt bis sich eine konstante Temperaturverteilung

eingestellt hat und anschließend die Temperaturen aller Thermoelemente für > 30 s aufgezeichnet. Aus diesen Messwerten wurde die Durchschnittstemperatur berechnet, um die einzelnen Messwerte für die Auswertung zu korrigieren.

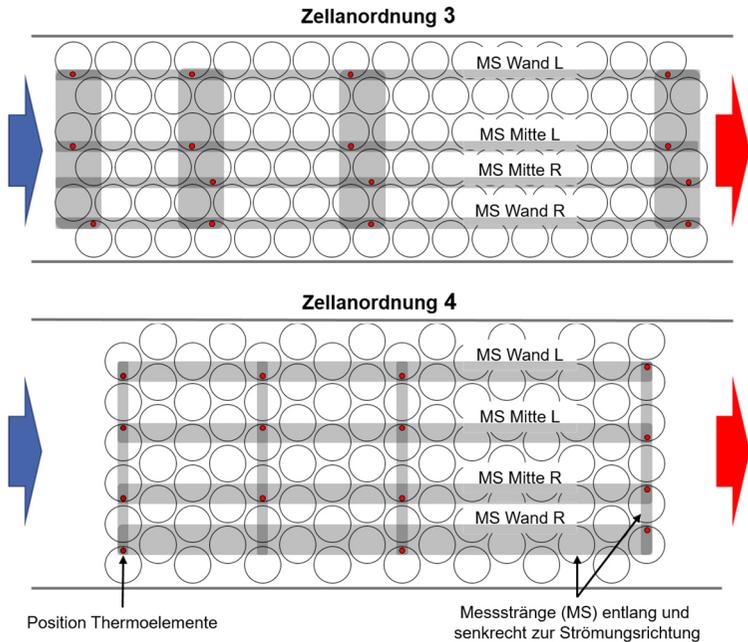


Abbildung 8.9: Temperaturmesspunkte im Prüfaufbau für zwei unterschiedliche Anordnungen der thermischen Batteriezellmodelle (Eisele et al., 2018)

In beiden Zellanordnungen wurden die Thermoelemente um 90° verdreht zur Strömungsrichtung am Zellmantel platziert. Um mit den verfügbaren Temperatursensoren möglichst gute Aussagen über die Temperaturverteilung im Zellverbund zu treffen, wurden die Thermoelemente entsprechend Abbildung 8.9 in den beiden Zellanordnungen verteilt. Vier bzw. drei Thermoelemente sind möglichst fluchtend in Strömungsrichtung angeordnet. Um auch den Temperaturverlauf senkrecht zur Strömungsrichtung zu beurteilen, wurden vier dieser Messstränge im Modul verteilt. Zwei davon wurden an Zellen mit minimalem Abstand zu den seitlich begrenzenden Modulwänden platziert. Symmetrisch zur Modulmitte wurden die beiden anderen Messstränge gelegt. Dadurch kann die Temperaturverteilung in je vier Ebenen entlang und senkrecht zur Strömung erfasst werden. Zur genaueren Auflösung der

Temperaturverteilung in Strömungsrichtung im Anströmungsbereich, oder bei Umkehr der Strömungsrichtung, in Nähe der Fluidabfuhr, wurden die Thermoelemente in Strömungsrichtung asymmetrisch platziert.

Versuche zur Erprobung und Optimierung des Kühldesigns im Entwicklungsprojekt

Der Versuchsablauf wurde bereits im Rahmen der Veröffentlichung von Eisele et al. (2018) beschrieben. Die Inhalte dieses Unterkapitels wurden der Veröffentlichung entnommen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird auf eine mehrfache Kennzeichnung der Quelle verzichtet.

Die Abstände zwischen den Zellen, wurden im Vergleich zur CFD-Simulation weiter reduziert, um den Bauraum zu minimieren. Der erste Prüfaufbau beinhaltet ebene Seitenwände senkrecht zur Strömungsrichtung. Durch Variation des Abstands zwischen Zelloberfläche und Seitenwand wurde eine möglichst homogene Temperaturverteilung senkrecht zur Strömungsrichtung eingestellt, um das Temperaturprofil entlang der Strömungsrichtung mit der CFD-Simulation zu vergleichen. Der laminaire Zufluss vor den Zellen in der Simulation wurde im Prüfaufbau durch Düsen ersetzt. Der homogene Zufluss wurde ohne Zellen unter Freistrahbedingungen optisch abgesichert. Der Volumenstrom der Kühlflüssigkeit wurde so eingestellt, dass die berechnete Wärmeleistung der Batteriezellmodelle die Fluidtemperatur über die Modullänge um 2 K erhöht (vgl. CFD-Simulation). Um mehrere Batteriemodule in Reihe zu schalten, ohne eine übermäßige Temperaturspreizung innerhalb des Batteriesystems zu verursachen, wurden auch Tests mit doppeltem Volumenstrom durchgeführt, um die Fluidtemperatur in diesem Fall um 1 K erhöhen.

Der initiale Prüfaufbau hatte folgende Konfiguration: Die seitlichen Modulwände waren eben. Ihr Abstand zu den Batteriezellen wurde wie oben beschrieben angepasst. Die erste Zellreihe der Validierungskonfiguration wurde durch mehrere Düsen angeströmt. Gleichmaßen wurde das Fluid nach der letzten Zellreihe aus dem Testraum abgeführt. Für die Bewertung der beiden Zellanordnungen im Prüfaufbau aus thermischer Sicht wurden folgende Kriterien gewählt:

- maximale Temperaturspreizung zwischen den Zellen
- Sensitivität der Temperaturverteilung auf Änderungen des Abstandes zwischen Seitenwand und Zellmantelfläche

Neben den genannten Kriterien wurden auch nicht thermische Zielgrößen bei der Auswahl einer Zellanordnung berücksichtigt. Beispielsweise wurden mechanische

Aspekte in die Überlegung einbezogen, die die Konstruktion des Prototyps beeinflussten. Entsprechend wurde sich für eine Zellanordnung (vgl. Abbildung 8.9) entschieden.

Nach dieser Einschränkung des Parameterraums auf eine Zellanordnung folgte im iterativen Verfahren die Anpassung und Validierung des Kühldesigns. So wurde die Anzahl der Düsen mehrfach adaptiert, um den konstruktiven Aufbau des Prototyps zu vereinfachen. Der Einfluss auf die Kühlleistung wurde durch den Vergleich der Temperaturverteilung im Zellverbund untersucht. Wie in Abbildung 8.9 zu erkennen, entstanden durch die ebene Modulwand große Lücken im Randbereich. Diese wurde durch eine angepasste Seitenwandgeometrie reduziert. Auch hier wurde der Abstand zu den Zellen variiert, um eine möglichst homogene Temperaturverteilung senkrecht zur Strömungsrichtung zu erreichen. Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, ist im Prüfaufbau ein variabler Flüssigkeitsverteiler am Einlass integriert. Dieser verteilt den Volumenstrom gleichmäßig über die Düsen. Die bis dahin verwendete Geometrie des Flüssigkeitsverteilers kann aufgrund des Bauraums nicht direkt auf den Prototyp des Moduls übertragen werden. So wurde in den folgenden Iterationsschritten platzsparende Zu- und Abflüsse im Prüfaufbau erprobt und optimiert. Auch die Düsengeometrie wurde so angepasst, dass eine gleichmäßige Verteilung des Volumenstroms senkrecht zur Strömungsrichtung erhalten bleibt. Auch diese Adaption wurde unter Freistrahlingbedingungen getestet, optisch abgesichert und die Temperaturverteilung im Prüfaufbau gemessen.

Mit dieser letzten Geometrievariation wurde die Strömungsgeometrie im Hinblick auf quasistationäre thermische Lasten validieren. Die validierte Geometrie der Flüssigkeitskammer im Prüfaufbau wurde in das CAD-Modell des Batteriemodulprototyps überführt. Zur Absicherung der entwickelten Strömungsgeometrie und der thermischen Batteriezellmodelle wurden in der folgenden Entwicklungsgeneration (E_5) im Prüfaufbau reale Batteriezellen eingesetzt und elektrisch belastet.

Validierungsergebnisse der E_4 : physisch-virtuelles Modell mit thermischen Batteriezellmodellen als Koppelsystem

Aufgrund des in der CFD-Simulation bestätigten positiven Effektes eines geringen Zellabstandes auf die Zelltemperatur wurde der Abstand im Vergleich zur ausgewählten Faktorstufe für die Untersuchungen im Prüfaufbau nochmals geringfügig reduziert. Der ausgewählte Volumenstrom wurde in einer zweiten Parameterstufe verdoppelt.

Für beide Zellanordnungen wurden initiale Düsenkonfigurationen am Fluideinlass und Auslass definiert sowie der seitliche Wandabstand eingestellt, um vergleichbare Zelltemperaturen senkrecht zur Strömung zu erhalten. Es stellte sich heraus, dass die Temperaturprofile in Strömungsrichtung stark abhängig von der Position und Anzahl der Düsen sind. Dies gilt insbesondere für steigende Volumenströme. Beispielhaft zeigt Abbildung 8.10 das Temperaturprofil der Zellanordnung 3 mit unterschiedlicher Anzahl an Düsen am Zu- und Abfluss bei der hohen Volumenstromstufe.

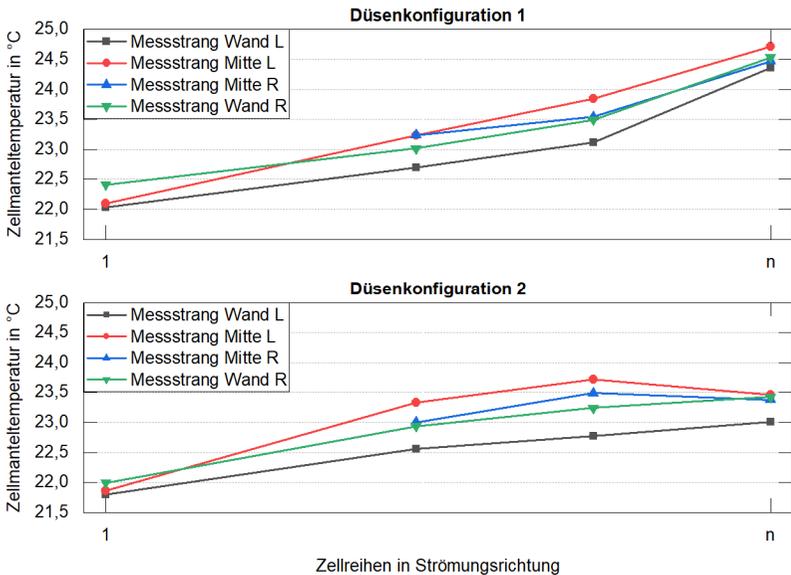


Abbildung 8.10: Temperaturverlauf der Zellen in Strömungsrichtung für Zellanordnung 3 für zwei unterschiedliche Düsenkonfigurationen zur Fluidzu- und -abfuhr (in Anlehnung an Eisele et al., 2018)

Bei Variation des Wandabstandes zeigen sich Unterschiede in den Sensitivitäten der Temperaturverteilung senkrecht zur Strömungsrichtung. Abbildung 8.11 stellt die hohe Empfindlichkeit der Anordnung 3 bei Variation des Seitenabstandes dar. Die Temperaturverläufe lassen darauf schließen, dass trotz des geringen Abstands der Zellen von der ebenen Wand diese besser gekühlt werden, als solche in der Mitte des Moduls. Darüber hinaus sinkt die Temperatur der Zellen in der Mitte vergleichsweise stark ab, wenn Wand und Zellen in Kontakt stehen. Fertigungstoleranzen oder ungünstige Verformungen der Modulwand können diese Schwankungen

verursachen. Daher ist eine geringe Sensitivität des Strömungsfeldes gegenüber Wandabstandsschwankungen von Vorteil. (Eisele et al., 2018)

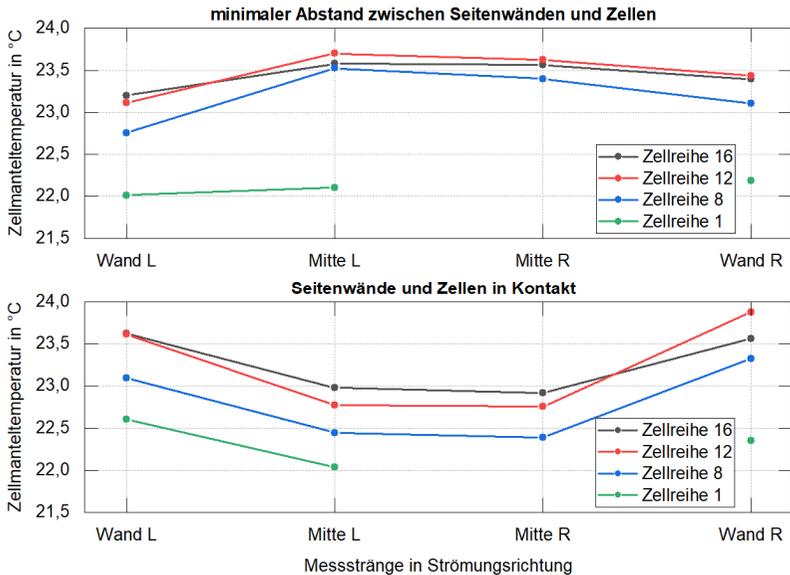


Abbildung 8.11: Einfluss des Abstandes der Seitenwände auf die Temperaturverteilung senkrecht zur Strömungsrichtung für Zellanordnung 3 (in Anlehnung an Eisele et al., 2018)

Vor der Entscheidung für eine der beiden Zellanordnungen, wurde neben dem Wandabstand auch die initiale Düsenkonfiguration angepasst, um die maximale Temperatur im Zellverbund zu reduzieren. Zum direkten Vergleich der beiden Zellanordnungen wurde dieselbe Düsenkonfiguration genutzt. (Eisele et al., 2018)

Allerdings war die Reproduzierbarkeit der Versuche mit Zellanordnung 3 nicht hinreichend genau, um den maximalen Temperaturunterschied zwischen den Zellen mit dem der Zellanordnung 4 zu vergleichen. Zellanordnung 4 hingegen lieferte eine bessere Reproduzierbarkeit der Versuche. So wichen die maximalen Temperaturunterschiede bei drei Versuchswiederholungen in der finalen Konfiguration, bei Zellanordnung 3 um bis zu 0,6 K und bei Zellanordnung 4 um bis zu 0,3 K voneinander ab. Diese Streuung ist auf Luftschlüsse im Zellzwischenraum zurückzuführen, welche scheinbar einen unterschiedlichen Einfluss auf das Strömungsverhalten und

damit auf die Kühlung haben. Trotz Entlüftung konnte nicht gewährleistet werden, dass der Fluidraum frei von Lufteinschlüssen war.

Aufgrund der höheren Robustheit gegenüber Lufteinschlüssen im Fluidraum und der geringeren Empfindlichkeit gegenüber Wandabstandsänderungen sowie weiteren konstruktiven Gründen wurde Zellanordnung 4 für eine Optimierung in dieser Entwicklungsgeneration weiterverfolgt. (Eisele et al., 2018)

Die folgenden geometrischen Variationen wie die Anpassung der Wandgeometrie und die Konstruktion realistischer Zu- und Abflussbedingungen führten zu einem endgültigen Moduldesign. Bei Tests mit diesem Design bei maximalem Volumenstrom wurde eine Flüssigkeitserwärmung von 20 °C auf 20,9 °C, ein maximaler Temperaturgradient von 1,2 - 1,3 K zwischen den Zellen und eine maximale Temperatur von etwa 23,3 °C an den Ersatzbatteriezellen gemessen. (Eisele et al., 2018)

8.1.4 E₅: physisches Modell

Zur Absicherung von E₄ unter Verwendung der thermischen Batteriezellmodelle, wurden im Anschluss Versuche mit der finalisierten Strömungsgeometrie und realen Batteriezellen (E₅) durchgeführt. Die Batteriezellen wurden über ansteuerbare Schütze mit drei parallel verschalteten bidirektionalen Netzgeräten verbunden. Auf dem BMS zur Ansteuerung des Schütz waren die Batteriezelldaten gemäß Datenblatt hinterlegt. Die Zustandsüberwachung des BMS erfolgte über zusätzliche Temperaturmessungen an mehreren Zellpolen, sowie Spannungsabgriffe an jedem seriellen Strang des Zellverbundes. Bei den eingesetzten Batteriezellen handelte es sich um Samsung INR18650-35E3 mit einer Kapazität von 3450mAh (Yunwoong Kim, 2017). In Eisele et. al (2018) wird der verwendete Prüfaufbau und die Versuche wie folgt beschrieben. Die elektrische Verschaltung der Zellen entsprach der 48 V-Konfiguration des späteren Batteriemoduls. Um die Strömung des Kühlfluides so wenig wie möglich zu beeinflussen, wurden Thermoelemente auf der Zelloberfläche (siehe Abbildung 8.12) angebracht und im Zellverbund im Totwasserbereich positioniert.

Ziel der ersten Versuche war, die gleiche Wärme wie in den vorherigen Versuchen mit den Batteriezellmodellen (ca. 2,5 W je Zelle) zu erzeugen. Da der thermische Quellterm der eingesetzten Batteriezellen nicht bekannt war, wurde zunächst mit unterschiedlichen C-Raten entladen. Die Bilanzierung der Wärmeleistung über den Massestrom und die Fluidtemperatur Ein- und Ausgang des Prüfaufbaus ergab eine ähnliche Wärmeleistung der Batteriezellen bei einer Entladerate von 2 C. In einem abschließenden Test wurden die Batteriezellen mit 3 C entladen und geladen, um

die Eignung der Batteriezellkühlung für einen Schnellladeprozess mit den verwendeten Zellen unter Beweis zu stellen. Das Entladeverfahren startete bei einer Leerlaufspannung von 4,15 V auf Zellebene und wurde bei 2,8 V Zellspannung abgebrochen. Beim Laden mit 3 C wurde bei einer Leerlaufspannung von 2,97 V gestartet. Beim Erreichen einer Ladespannung von 4,2 V wurde die CV Phase begonnen. Da die Wärmeleistung der Batteriezellen beim Entladen mit konstantem Strom über den SoC leicht anstieg, stellte sich keine konstante Temperatur an der Oberfläche der Batteriezellen ein. Für den Abgleich mit den Batteriezellmodellen wurden die Temperaturen über einen Zeitraum gemittelt, in der die Fluidaustrittstemperatur um 0,1 K ansteigt. Dies entsprach abhängig des eingestellten Volumenstroms und der C-Rate einer Prüfdauer von ca. 6 s (3 C, niedriger Volumenstrom) bis 155 s (2 C, hoher Volumenstrom). Für das Ladeverfahren wurde dieses Auswerteverfahren nicht angewandt.

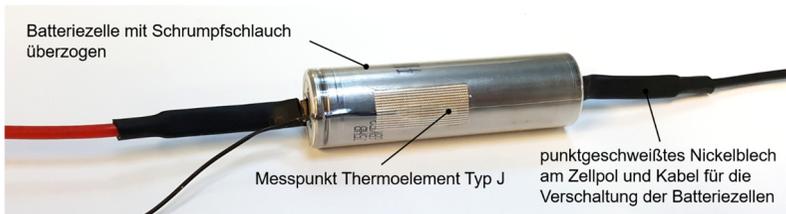


Abbildung 8.12: Präparierte Batteriezelle für den Einsatz in Es

Validierungsergebnisse der Es: physisches Modell

Das entwickelte Strömungsdesign unter Verwendung der Batteriezellmodelle wurden mit realen Batteriezellen getestet und die Temperaturverteilung analysiert.

Die Temperaturverteilung entlang der Strömungsrichtung stimmt bei einer 2 C Entladung hinreichend genau mit denen aus den Tests mit den Batteriezellmodellen überein, wohingegen sich die Temperaturen senkrecht zu Strömungsrichtung voneinander unterscheiden. Mögliche Ursachen ließen sich nicht klären. Wahrscheinlich ist allerdings, dass es an der Toleranz bei der Einstellung eines definierten Wandabstandes lag. (Eisele et al., 2018) Ein Indiz hierfür ist die bereits in Kapitel 8.1.3 diskutierte Sensitivität der Temperaturverteilung bei Variation des Abstandes.

Entsprechend wurde das Kühl-Design für den initial definierten Testfall (2,43 W Wärmeleistung je Zelle) unter stationären Bedingungen abgesichert.

Um die Eignung der Kühlung für den Betrieb der eingesetzten Zellen zu testen, wurden diese bei maximalem Volumenstrom mit 3 C entladen. Die Temperaturverteilung für den Zeitbereich mit der maximalen Zelloberflächentemperatur, vor Erreichen der unteren Spannungsgrenze nach 7 Minuten Entladezeit, wurde ausgewertet. Qualitativ ähnelt der Temperaturverlauf dem bei 2 C Entladestrom. Die maximale Temperaturdifferenz zwischen den Zellen betrug bei einer maximalen Zelltemperatur von 26 °C nur 2,3 K. Dies entspricht den Anforderungen des Zielsystems. (Eisele et al., 2018)

Beim abschließenden Versuch einer Schnellladung mit 3 C wurde kein thermisch quasi stationärer Zustand erreicht, da die CC-Phase nur 71 s dauerte. Die Temperaturspreizungen als auch die maximalen Temperaturen, die noch in der CV Phase erreicht wurden, lagen unterhalb der Werte aus den 3 C Entladetests. Somit ist dieser Test bei Einsatz der verwendeten Batteriezellen für die Auslegung der Kühlung unkritisch. Zudem ergaben die Untersuchungen, dass die verwendete Zelle für die im initialen Zielsystem adressierten Schnellladeverfahren mit 3 C nicht geeignet ist. Grund hierfür scheint der hohe Innenwiderstand zu sein, welcher zu einer so großen Spannungsüberhöhung beim Laden führt. Dadurch wird sehr schnell die obere Spannungsgrenze erreicht und der Ladestrom in der CV-Phase reduziert.

8.1.5 Evaluation der Modellbildung in den Entwicklungsgenerationen

In den folgenden Unterkapiteln wird die Modellbildung in den einzelnen Entwicklungsgenerationen an diesem Entwicklungsbeispiel evaluiert. Entsprechend der Zielsetzung einer einfachen Modellbildung zur effizienten Validierung und damit Konkretisierung des Designs der Batteriezellkühlung, wurden die Modelle anhand der beiden Kriterien bewertet:

- Eignung der Systemmodellierungen für das jeweilige Validierungsziel der Entwicklungsgeneration
- Plausibilität der gefällten Entscheidungen auf Basis der Validierungsergebnisse

Hierfür wurden die Systemmodelle und Ergebnisse von Simulationen und Messungen aufeinanderfolgender Entwicklungsgenerationen miteinander verglichen. (Eisele et al., 2018)

Evaluation der empirischen Berechnung (E_1) über die CFD-Simulationen (E_2)

Wie in Kapitel 8.1.1 erwähnt, konnten mit dem angewandten Berechnungsmodell nur Ausschnitte des Zellverbundes (reduzierte Zellanzahl) modelliert werden. Teilweise mussten auch Parameterstufen außerhalb des initial definierten Parameter-raums für die Berechnung verwendet werden, um eine Konvergenz der Ergebnisse zu gewährleisten. Die Effekte der Parametervariation auf die Kühlleistung wurden relativ zueinander bewertet. Entscheidungen, die zur Konkretisierung des Parameterraums führten, wurden auf Grundlage eindeutiger Parametereinflüsse gefällt. (Eisele et al., 2018) In diesem Fall wurde eine Kühlflüssigkeit ausgewählt und eine Zellanordnung für die CFD-Simulation in E_2 ausgeschlossen. Der Parameter der Kühlflüssigkeitstemperatur am Moduleingang wurde ebenfalls für E_2 eingeschränkt. Alle anderen Effekte auf die Wärmeabfuhr wurden qualitativ bewertet, um daraus eine Anpassung der Parameterstufen für die nachfolgende CFD-Simulation zu definieren.

Die positiven Effekte auf die Wärmeabfuhr bei reduzierten Zellabständen und bei Verwendung einer kleinen Anströmbreite (vgl. Abbildung 8.2) konnte durch die CFD-Simulation (vgl. Tabelle 8.2) bestätigt werden und entspricht auch den Ergebnissen von (S. Park & Jung, 2013). Beide Parameteranpassungen führen zu einer höheren Strömungsgeschwindigkeit im Zellverbund und damit zu steigenden Wärmeübertragungskoeffizienten. (Eisele et al., 2017)

Trotz der Vereinfachungen in diesem Berechnungsmodell konnten die wichtigsten Einflussfaktoren identifiziert und der Parameterraum reduziert sowie angepasst werden, um eine effiziente Nutzung der CFD-Modelle in der nächsten Entwicklungs-generation zu ermöglichen. (Eisele et al., 2017)

Die verwendete Modellbildung war somit für das in Kapitel 6.1 formulierte Validierungsziel, einer Abschätzung des Einflusses einzelner Parameter auf die Zielgröße Wärmeabfuhr, geeignet. Auch die Plausibilität der gefällten Entscheidungen auf Basis der Berechnungsergebnisse konnte über die CFD-Simulation nachgewiesen werden.

Evaluation der CFD-Simulationen (E_2) über das physisch-virtuelle Modell mit thermischen Batteriezellmodellen (E_4)

Bei den entwickelten 2D-CFD-Modellen mit periodischen Randbedingungen wurden Parameter wie die Wandgeometrie und strömungsführende Elemente vor und hinter

dem Zellverbund vernachlässigt (vgl. Kapitel 8.1.2). Diese Vereinfachungen der Modellbildung sind bei der physischen Modellierung der Strömungsgeometrie nicht sinnvoll bzw. wären mit einem großen konstruktiven Aufwand verbunden. Eine Erkenntnis der Validierungsaktivitäten am Prüfaufbau war der starke Einfluss strömungsführender Geometrien auf die Temperaturverteilung im Zellverbund. Besonders die Düsen vor der ersten und hinter der letzten Zellreihe zur Fluidverteilung bzw. Sammlung hatten einen starken Einfluss (vgl. Abbildung 8.10). Aufgrund dieser Unterschiede in der Modellierung der Strömungsgeometrie sind simulierte und gemessene Temperaturverteilungen von Zellanordnung 3 und 4 nicht direkt miteinander vergleichbar. (Eisele et al., 2018)

Gleichermaßen zeigt hierdurch der Vorteil einer kombinierten Validierung über CFD und physischer Modellierung der Batteriezellkühlung in zwei Entwicklungsgenerationen. Die CFD ermöglicht es, den Einfluss einzelner Parameter durch vereinfachte Modellannahmen zu untersuchen, wie es in der physischen Domäne nur mit großem Aufwand möglich wäre. Wohingegen über den modularen Prüfaufbau auch verschiedene dreidimensionale Fluidführungen mit hohen Geschwindigkeitsgradienten (Düsen am Fluid Ein- und Ausgang) mit moderatem Aufwand variiert werden können. Derartige Untersuchungen mit einem 3D-CFD Modell sind hingegen mit einem hohen Modellierungsaufwand und langen Rechenzeiten verbunden.

Bei Tests am Prüfaufbau mit den thermischen Batteriezellmodellen wurde der Abstand zwischen den Zellen nicht mehr verändert. Allerdings wurde zum Homogenisieren der Temperaturverteilung senkrecht zur Strömungsrichtung der Abstand zwischen Zellen und Seitenwänden entlang des Strömungsfeldes variiert. Der Einfluss der Abstandsvariation ist für die Zellanordnungen 3 und 4 in Abbildung 8.11 dargestellt. Die höhere Sensitivität von Zellanordnung 3 auf Abstandsänderungen konnte durch die Simulation unterschiedlicher Abstände zwischen den Zellen mittels CFD (vgl. Abbildung 8.6) bestätigt werden. (Eisele et al., 2018)

Mit der verwendeten Modellbildung konnte das in Kapitel 6.2 formulierte Validierungsziel, der Vergleich der Zelltemperaturen zwischen den Konzepten und Parametervariationen, um diese relativ zueinander zu bewerten, erreicht werden (Eisele et al., 2018). Auch die gefällten Entscheidungen auf Basis der Simulationsergebnisse scheinen plausibel. Über einen Vergleich der Temperaturverteilungen zwischen Messung und Simulation kann aus den genannten Gründen kein Beweis für die Plausibilität erbracht werden.

Evaluation des physisch-virtuelles Modell mit thermischen Batteriezellmodellen (E₄) über die Versuche am Prüfaufbau mit realen Batteriezellen (E₅)

Durch den Einsatz thermischer Batteriezellmodelle mit steuerbarer Wärmeleistung wurde das Kühl-Design am Prüfaufbau finalisiert. Sofern die Modellbildung der thermischen Batteriezellmodelle valide war, sollten die Temperaturprofile im Prüfaufbau unter Einsatz realer Batteriezellen die gleichen sein, wie bei den Tests mit den Zellmodellen.

Abbildung 8.13 zeigt den über den Strömungsquerschnitt gemittelten Temperaturanstieg entlang der Strömungsrichtung für das finale Kühl-Design im Prüfaufbau, gemessen an thermischen Batteriezellmodellen und realen Batteriezellen. Die y-Achse beschreibt den Temperaturanstieg relativ zur Kühlflüssigkeitstemperatur am Einlass. Im oberen Diagramm sind je zwei Versuche mit realen Batteriezellen und physischen Batteriezellmodellen bei maximalem Volumenstrom dargestellt. Beim unteren Diagramm wurde äquivalent je Zelltyp ein Kontrollversuch mit dem halben Volumenstrom durchgeführt.

Entsprechend des ersten Diagramms treten bei der Wiederholung des Versuchs bei beiden Zelltypen Abweichungen im mittleren Temperaturverlauf auf. Die Standardabweichungen innerhalb eines Versuchs sind bei Tests mit realen Batteriezellen niedriger als mit physischen Batteriezellmodellen. Die Varianz beinhaltet neben der Streuung einzelner Sensoren auch die Temperaturunterschiede innerhalb einzelner Zellreihen. Entsprechend wirken sich Strömungsunterschiede senkrecht zur Hauptströmungsrichtung auf den Vergleich der Zelltypen aus. Unabhängig vom Volumenstrom steigt die gemessene Temperatur von der ersten zur fünften Zellreihe bei beiden Zelltypen ähnlich stark an. In den nachfolgenden Reihen unterscheiden sich die Temperaturverläufe voneinander. Hierbei ist aber keine Abhängigkeit von Zelltyp zu erkennen, da sich die Temperaturen zwischen den Zellvarianten in der neunten Reihe bei hohem Volumenstrom annähern und bei reduziertem Volumenstrom auseinanderdriften. Auch eine generelle Tendenz zu niedrigeren Temperaturen eines Zelltyps kann nicht bestätigt werden. Bei hohem Volumenstrom sind tendenziell die gemessenen Temperaturen an den realen Batteriezellen höher und beim halben Volumenstrom niedriger als an den physischen Batteriezellmodellen.

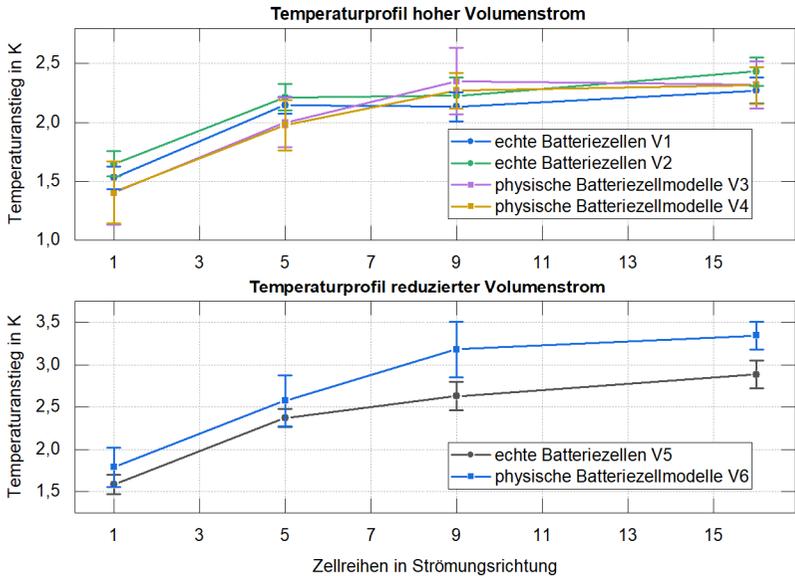


Abbildung 8.13: Gemittelte Temperaturprofile von realen Batteriezellen und thermischen Batteriezellmodellen bei gleichen Strömungsbedingungen im Vergleich (in Anlehnung an Eisele et al., 2018)

Es wird vermutet, dass der Temperaturverlauf maßgeblich durch zwei Faktoren beeinflusst wird:

1. Beim Umbau zwischen E_4 und E_5 wurde der Abstand zwischen Zelloberfläche und Modulwand geringfügig verändert. In den ersten Zellreihen herrscht hingegen durch die feste Düsenposition und -geometrie ein definierter Anströmungszustand, was den Einfluss der Seitenwandgeometrie reduziert. Die Sensitivität des Wandabstandes auf die Temperaturverteilung wurde bereits in Kapitel 8.1.3 aufgezeigt.
2. Luft im Fluidraum beeinflusst die Fluidführung und Kühlung der Zellen. Zwar begünstigen Entlüftungsschrauben die vollständige Füllung des Zellzwischenraums mit Fluid, allerdings konnte dies mangels optischer Zugänglichkeit nicht sichergestellt werden.

Unter Berücksichtigung der kühlkonzeptbedingten Strömungsschwankungen stimmen die Temperaturverläufe bei der Verwendung realer Batteriezellen und den physischen Batteriezellmodellen der Versuche hinreichend genau überein. (Eisele et al., 2018)

Entsprechend war die Modellierung der Batteriezelle und der Kühlung für das in Kapitel 6.4 formulierte Validierungsziel, das Kühldesign auf Basis des konkretisierten Parameterraums aus der CFD-Simulation zu finalisieren, geeignet. Hierfür sollen systematisch Vereinfachungen aus der CFD-Simulation (E_2) durch eine physisch modellierte Batteriezellkühlung, in Form eines Prüfaufbaus, ersetzt werden. Durch dessen modularen Aufbau war sowohl die Untersuchung unterschiedlicher Zellanordnungen als auch die iterative Anpassung strömungsführender Geometrien zeit- und ressourceneffizient möglich. Durch die thermischen Batteriezellmodelle waren keine Lade- bzw. Entladephasen zwischen den eigentlichen Validierungsversuchen notwendig. Auch die geringen Sicherheitsmaßnahmen im Vergleich zur Validierung in E_5 mit realen Batteriezellen, erleichterte Änderungen am Prüfaufbau zur Adaption des Kühldesigns.

Da über diese Entwicklungsgeneration (E_4) das Kühldesign finalisiert und durch Versuche mit E_5 abgesichert wurde, kann auch die Plausibilität der gefällten Entscheidungen unter Anwendung der thermischen Batteriezellmodelle im physischen Prüfaufbau nachgewiesen werden.

Somit war die Modellbildung in dieser Entwicklungsgeneration zur effizienten Validierung des thermisch stationären Verhaltens zielführend. Entsprechend konnte die zweite Teilforschungsfrage

Wie können mittels gemischt physisch-virtueller Modellbildung gemäß des IPEK-XiL-Ansatzes iterative Anpassungen eines Kühldesign für ein zellmantelgekühltes Batteriemodul hinsichtlich des thermisch stationären Verhaltens validiert werden, ohne verschiedene, eigenständige physische Prototypen mit Batteriezellen einzusetzen?

beantwortet werden.

Fazit

Die Evaluation der Modellbildung aller Entwicklungsgenerationen, die für die Validierung des thermisch stationären Verhaltens des Batteriemoduls beim Schnellladen genutzt wurden, erfolgte anhand der beiden Kriterien:

- Eignung der Systemmodellierungen für das jeweilige Validierungsziel
- Plausibilität der gefällten Entscheidungen auf Basis der Validierungsergebnisse

Die Modellbildung der vier Entwicklungsgenerationen und die darauf basierten Entscheidungen aus Validierungsaktivitäten wurden entsprechend positiv evaluiert. Die Modellgüte wurde in den aufeinanderfolgenden Entwicklungsgenerationen gesteigert. Um den Validierungsaufwand niedrig zu halten, wurde der Designraum für die Kühlung über einfache virtuelle Modelle in E_1 und E_2 ausreichend eingegrenzt, bevor die Batteriezellkühlung in E_4 physisch und die Batteriezellen als Koppelsysteme physisch-virtuell abgebildet wurden. Trotz des hohen physischen Modellanteils in E_4 konnte die Konkretisierung des Kühldesigns über den modularen Aufbau und den Verzicht auf reale Batteriezellen zeit- und ressourceneffizient erfolgen. Die Fertigung mehrerer eigenständiger physischer Prototypen zur Untersuchung verschiedener Designvarianten war deshalb nicht erforderlich. Final erfolgte die Validierung des konkretisierten Kühldesigns über ein rein physisch modelliertes Batteriemodul in E_5 unter Einsatz realer Zellen.

Über die Validierungsaktivitäten wurde der Parameterraum für die nachfolgende Entwicklungsgeneration und somit das Kühldesign sukzessive bis hin zum ersten physischen Prototyp konkretisiert. Durch die Anwendung der entwickelten Methode zur strukturierten Validierung von Batteriemodulen in Entwicklungsgenerationen, im beschriebenen Entwicklungsbeispiel und die positive Evaluation der Modellbildung konnte die erste Teilforschungsfrage

Wie können virtuelle, physische und gemischt physisch-virtuelle Modelle gemäß des IPEK-XiL-Ansatzes für die entwicklungsbegleitende Validierung von zellmantelgekühlten Batteriemodulen eingesetzt werden, um daraus das Design der nachfolgenden Entwicklungsgeneration abzuleiten?

beantwortet werden.

8.2 Entwicklungsbeispiel: Validierung hinsichtlich thermisch transientem Verhalten

Im Gegensatz zum vorherig beschriebenen Entwicklungsbeispiel, wurde in diesem Fall ein Anwendungsbeispiel konstruiert, bei welchem auch das thermisch transiente Entladeverhalten eines Batteriemoduls unter Verwendung einer spezifischen Hochenergiezelle für die Auslegung der Kühlung von Interesse ist. Das Kühlkonzept ist zum ersten Entwicklungsbeispiel identisch, lediglich die Modulabmessungen unterscheiden sich. Entsprechend werden für die Auslegung und Designkonkretisierung die Entwicklungsgenerationen E_1 (Empirisches Berechnungsmodell querumströmter Rohrbündel) sowie E_2 (2D-CFD-Modell der Batteriezellkühlung) gleichermaßen durchlaufen und zudem für die Modellbildung in E_3 benötigt.

Fokus dieses Kapitels stellt die Nutzung der optionalen Entwicklungsgeneration E_3 zur Validierung des thermisch transienten Verhaltens im Fall einer Batteriemodulentladung dar. Diese Entwicklungsgeneration kommt nach der stationären CFD-Simulation in E_2 zum Einsatz, um das daraus hervorgegangene Kühldesign, bzw. mehrere Varianten davon, unter Einsatz einer spezifischen Batteriezelle im thermisch transienten Betrieb zu bewerten und zu konkretisieren.

Für die thermische Bewertung der Batteriezellkühlung wurde folgende Zielsetzung festgelegt. Der maximale Temperaturunterschied der Zellmanteltemperaturen auf Batteriesystemebene, jeweils an der gleichen Stelle der Zellen gemessen, soll 5 K nicht überschreiten (Korthauer, 2013, S. 167). Im Fahrzeug ist die Kühlung von drei Batteriemodulen seriell zu verschalten, wodurch die Temperaturspreizung der Batteriezellen innerhalb eines Moduls nicht größer 1,7 K sein darf. (Eisele et al., eingereicht)

Die Anforderungserfüllung sollte in E_3 für unterschiedliche Ladezustände des Batteriemoduls und bei Kühlflüssigkeitstemperaturen von 15 °C bis 35 °C in einem Anwendungsfall überprüft werden, bei dem sich kein thermisch stationärer Zustand im Batteriemodul einstellt (Eisele et al., eingereicht). Dabei handelt es sich um eine Beschleunigungsfahrt auf Maximalgeschwindigkeit, die konstant gehalten wird. 200 s nach Start wird das Fahrzeug ohne Rekuperation bis zum Stillstand verzögert und das Batteriesystem bis auf Ausgangstemperatur abgekühlt. Zur Vereinfachung des für die Auslegung relevanten Testfalls, wurde eine konstante Stromentnahme während der Beschleunigungs- und Konstantfahrt angenommen. Skaliert auf ein einzelnes Batteriemodul, beträgt der Entladestrom während der Beschleunigungsfahrt 64 A. Diese Belastung wurde nach einer lastfreien Abkühlphase des Batteriemoduls auf Ausgangstemperatur dreimal wiederholt, um das SoC-abhängige

thermische Verhalten des Batteriemoduls zu zeigen. Die OCV zu Versuchsbeginn betrug bei Raumtemperatur 4,0 V.

Das Batteriemodul besteht aus 96 Batteriezellen des Fabrikats Samsung INR18650-35E3 (Yunwoong Kim, 2017) in einer 8P12S Verschaltung. Somit wird im Mittel jede Zelle im beschriebenen Testfall mit 8 A entladen, was der zulässigen Dauerlast der verwendeten Batteriezelle laut Datenblatt entspricht (Yunwoong Kim, 2017). Das über die vorgelagerten Entwicklungsgenerationen konkretisierte Kühldesign, welches in E_3 untersucht werden sollte, ist in Abbildung 8.14 dargestellt. Die Zellen sind versetzt angeordnet und weisen einen minimalen Abstand von 3 mm auf. (Eisele et al., eingereicht)

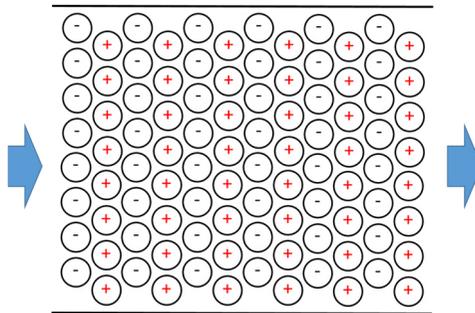


Abbildung 8.14: Draufsicht auf die betrachtete Zellanordnung (8P12S¹³). Seitliche Umströmung der Batteriezellen in einem eingegrenzten Fluidkanal. Je 8 Batteriezellen sind parallel verschaltet (Pole mit gleicher Ausrichtung) und diese wiederum seriell zu einem Modul von 96 Zellen verschaltet. (Eisele et al., eingereicht)

Über eine Zellhöhe von 50 mm werden die Zellen mittig durch Queranströmung über ein Wasser-Glykol-Gemisch (Mischungsverhältnis 65:35) unter konstantem Volumenstrom von 1,3 l/min gekühlt. Der Einfluss der seitlichen Wandgeometrie auf die Strömung und damit auf die Temperatur der dortigen Zellen wird in diesem Entwicklungsbeispiel nicht genauer betrachtet. Hierfür kommen wie schon beschrieben, Tests mit physisch modelliertem Kühlsystem wie in den nachfolgenden Entwicklungsgenerationen E_4 und E_5 zum Einsatz. Gleiches gilt für strömungsführende Geometrien vor der ersten und hinter der letzten Zellreihe. Es wird von einer eingelaufenen Anströmung mit homogener Fluidgeschwindigkeit und einer freien

¹³ 8P12S: je 8 Batteriezellen sind parallelverschaltet und in 12-facher Ausführung seriell miteinander verschaltet

Ausströmung am Modulende entsprechend der Modellbildung in E_1 (empirisches Modell querumströmter Rohrbündel) ausgegangen. Der Fluidraum wird seitlich durch zwei ebene Wände begrenzt und der Abstand zwischen Zellmantel und Wand an der engsten Stelle beträgt entsprechend des minimalen Zellabstandes 3 mm. Der Einfluss von Boden und Deckel an den Polseiten der Zellen auf die Fluidströmung wird vernachlässigt. Entsprechend kann die Kühlung im 2D-Raum beschrieben werden. (Eisele et al., eingereicht)

In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Aktivitäten zur Konkretisierung des Parameterraums in der Entwicklungsgeneration E_3 gemäß Kapitel 6.3 beschrieben. Der virtuelle Teil der Validierungskonfiguration in Form der Prüfstandsteuerung sowie des virtuellen Modells des Batteriemoduls inkl. Kühlung (SiD), wurde in Matlab Simulink implementiert.

8.2.1 Modellierung des virtuellen SiD

Der vereinfachte Aufbau des Simulink-Modells des Batteriemoduls ist in Abbildung 8.15 dargestellt. Die Modellerstellung erfolgt automatisiert über eine Modellbibliothek. In den folgenden zwei Kapiteln wird die Modellierung der Kühlung (blaue Elemente) und die Interpolation der elektrischen Zustände inkl. der Positionierung der physischen (orange) sowie der virtuellen Referenzzellen (grün) beschrieben (vgl. Abbildung 8.15). (Eisele et al., eingereicht)

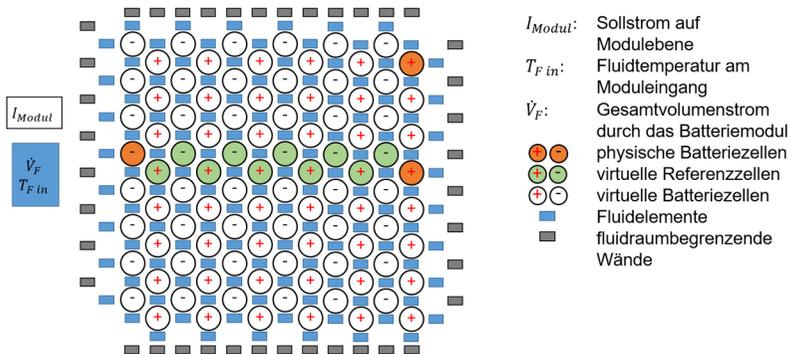


Abbildung 8.15: Vereinfachter Aufbau des virtuell modellierten Batteriemoduls aus 96 Batteriezellen in einer 8P12S Verschaltung und versetzter Anordnung. Querumströmung der Batteriezellen mittels Kühlfüssigkeit von links nach rechts. (Eisele et al., eingereicht)

Anwendungsspezifische Modellierung der Batteriezellkühlung

Die Modellierung der Kühlung durch Querumströmung zylindrischer Batteriezellen über Kühlflüssigkeit kann in zwei Problemstellungen unterteilt werden. Erstens gilt es, die ortsabhängigen mittleren Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Zellmantel und Kühlflüssigkeit zu ermitteln. Zweitens müssen strömungstechnische Vorgänge bei der Umströmung der Batteriezellen hinreichend genau modelliert werden. (Eisele et al., eingereicht)

Für die erste Problemstellung, der Modellierung der Wärmeübergangskoeffizienten, wurde das empirische Modell der querumströmten Rohrbündel angewandt (Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 2013, S. 819–823). Hierbei wird mit Hilfe der geometrischen Beschreibung der Zellanordnung, dem konstant vorgegebenen Kühlmittelvolumenstrom und den temperaturabhängigen Stoffwerten der Kühlflüssigkeit jeder Zellreihe ein Wärmeübergangskoeffizient zugewiesen. Ein Einfluss der fluidraumbegrenzenden Wände auf die Strömungsgeschwindigkeit und damit auf die Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten wird vernachlässigt. Die thermischen Randbedingungen an den fluidraumbegrenzenden Flächen werden als adiabat angenommen. Die Stoffwerte der Kühlflüssigkeit wurden für die Fluideingangstemperatur ermittelt und die Vereinfachung getroffen, dass die Stoffwerte im virtuellen Batteriemodul, unabhängig von dessen Erwärmung, im Versuch konstant bleiben. (Eisele et al., eingereicht)

Die zweite Problemstellung – die Abbildung der strömungstechnischen Vorgänge des Fluides in den Zwischenräumen der Batteriezellen – hat, bei inhomogener Wärmeerzeugung senkrecht zur Strömungsrichtung aufgrund unterschiedlicher Fluidtemperaturen, Einfluss auf die Temperaturverteilung im Modul. Das Modell wurde auf Grundlage der 2D-CFD-Simulation aus E₂ (siehe Kapitel 8.1.2) entwickelt und auch verifiziert. (Eisele et al., eingereicht) Die Modellbildung wird im Folgenden und dessen Verifizierung in Kapitel 8.2.5 beschrieben.

Oser (2019)¹⁴ entwickelte verschiedene Ansätze zur Abbildung der Wärmeströme zwischen Fluid und zylindrischen Zellen sowie der Aufteilung der Volumenströme zwischen den Batteriezellen in versetzter Anordnung. Die Ansätze haben gemein, dass das Fluidvolumen zwischen den Zellen in finite Elemente aufgeteilt ist. Die Fluidelemente sind am Wärmestromaustausch mit je einer Batterie zelle beteiligt. Zudem sind die Fluidelemente über einen spezifischen Volumenstrom miteinander verbunden. Aus unterschiedlichen Varianten wurde das in Abbildung 8.16 gezeigte

¹⁴ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

Konzept aufgrund guter Übereinstimmung mit der CFD-Simulation, für die Modellierung der Kühlung im SiD ausgewählt (Eisele et al., eingereicht). Das zellspezifische Fluidelement befindet sich stromaufwärts der jeweiligen Batteriezelle. Damit wird der Ansatz des bei niedrigen Reynolds-Zahlen, erhöhten Wärmeübergangs auf der strömungszugewandten Seite eines Zylinders gerecht (Oser, 2019, S. 34–36)¹⁵.

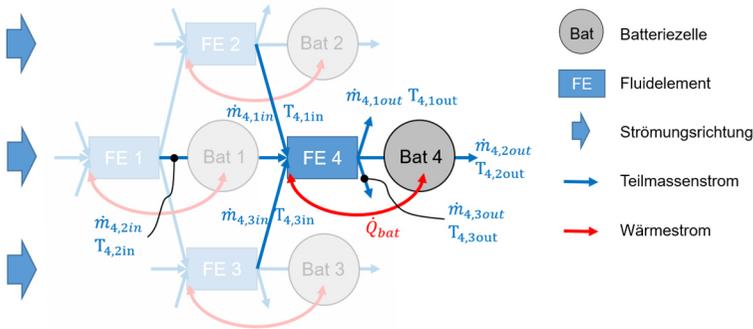


Abbildung 8.16: Ausgewählter Ansatz zur Abbildung strömungstechnischer Vorgänge bei der Querumströmung zylindrischer Batteriezellen mit Kühlflüssigkeit (Eisele et al., eingereicht)

Für die Berechnung des Wärmestroms am Zellmantel wird neben dem Wärmeübergangskoeffizienten die Temperatur $T_{x,M}$ des entsprechenden Fluidelements der Batteriezelle x benötigt (Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 2013, S. 819–823). Diese Fluidtemperatur $T_{x,M}$ ergibt sich nach der Richmann'schen Mischungsregel aus den drei Masseströmen der entgegen der Strömungsrichtung benachbarten Fluidelemente (Eisele et al., eingereicht).

$$T_{x,M} = \frac{\dot{m}_{x,1in} * T_{x,1in} + \dot{m}_{x,2in} * T_{x,2in} + \dot{m}_{x,3in} * T_{x,3in}}{\dot{m}_{x,1in} + \dot{m}_{x,2in} + \dot{m}_{x,3in}} \quad 21$$

$\dot{m}_{x,yin}$ *Massenströme aus den drei stromaufwärts benachbarten Fluidelementen in das Fluidelement x*

¹⁵ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

$T_{x,yin}$ *Ausgangstemperatur der drei stromaufwärts benachbarten
Fluidelemente in das Fluidelement x*

$T_{x,M}$ *Mischtemperatur des Kühlfluides zur Berechnung des
Wärmestroms am Zellmantel der Batteriezelle x*

Zur Berechnung der Temperaturerhöhung des Kühlfluides durch die abgegebene Wärme der Batteriezelle, wird die Wärmestrombilanz am jeweiligen Fluidelement aufgestellt. Hierfür wird die Fluidmenge in den Zwischenräumen des Moduls gleichmäßig auf alle 96 Batteriezellen aufgeteilt. Die sich ergebende Temperatur am Ausgang des Fluidelements bildet den Input für die drei stromabwärts benachbarten Fluidelemente. Wenn der Wärmestrom über den Zellmantel ungleich Null ist, gelten die folgenden Gleichungen (Eisele et al., eingereicht):

$$\dot{m}_{x,1in} = \dot{m}_{x,1out} ; T_{x,1in} \neq T_{x,1out} \quad 22$$

$$\dot{m}_{x,2in} = \dot{m}_{x,2out} ; T_{x,2in} \neq T_{x,2out} \quad 23$$

$$\dot{m}_{x,3in} = \dot{m}_{x,3out} ; T_{x,3in} \neq T_{x,3out} \quad 24$$

Unterschiedliche Aufteilungen der Teilmassenströme wurden in (Oser, 2019, S. 36–39)¹⁶ untersucht. Das Verhältnis ($m_1 : m_2 : m_3 / 0,25 : 0,5 : 0,25$) wurde als Lösung mit den geringsten Abweichungen des Temperaturverlaufes der Batteriezellen in Strömungsrichtung gegenüber den CFD-Simulationen aus E₂ identifiziert und im virtuellen Modell des SiD implementiert (Eisele et al., eingereicht).

Positionierung der physischen Batteriezellen im virtuellen Batteriemodul

Wie in Kapitel 6.3.4 beschrieben, hängt die Positionierung der physischen Batteriezellen im virtuell modellierten Batteriemodul von der elektrischen Verschaltung der Zellen und der Kühlungsmodellierung ab, zudem sollen die Randbedingungen (a)

¹⁶ Co-betreute Abschlussarbeit (unveröffentlicht)

bis (c) berücksichtigt werden. Diese wurden für das Anwendungsbeispiel der Querumströmung umgesetzt. Sie werden im Folgenden beschrieben und sind der Abbildung 8.15 zu entnehmen.

- a) Eine physische Zelle ist an der wärmsten und eine Zelle an der kältesten Stelle des Moduls positioniert.

Aufgrund der einseitigen Anströmung des Moduls mit Kühlflüssigkeit wird abhängig vom Wärmeübergangskoeffizienten die kälteste Batteriezelle in den ersten Reihen erwartet. Vor diesem Hintergrund wurde die Batteriezelle Phy 1 in die erste Zellreihe positioniert. Dies hat den regelungstechnischen Vorteil, dass aufgrund der konstanten Fluideingangstemperatur geringe Anforderungen an die Dynamik der Wärmestromregelung der Zelle Phy 1 über den Umlaufkühler gestellt werden. Mit steigender Fluidtemperatur in Strömungsrichtung wurden in der letzten Reihe der Anströmung die Zellen Phy 2 und Phy 3 positioniert. Phy 1 und Phy 2 decken damit ein möglichst großes Temperaturfenster im simulierten Batteriemodul ab.

- b) Die beiden physisch parallel verschalteten Zellen Phy 2 und Phy 3 sind im virtuellen Parallelstrang mit dem größten Temperaturunterschied positioniert.

Senkrecht zur Strömungsrichtung entlang der Parallelschaltungen kann nur die seitliche Strömungsbegrenzung beeinflusst werden. Entsprechend wurde die Zelle Phy 3 an die Wand und Phy 2 in der Mitte der entsprechenden Parallelschaltung positioniert. Wie schon beschrieben, ist der Einfluss der Wandgeometrie auf die Temperaturverteilung mit dem hier implementierten empirischen Modell der querumströmten Rohrbündel nur bedingt abbildbar und liegt nicht im Fokus der Untersuchung.

- c) Eine Zelle aus der physischen Parallelschaltung und die verbleibende physische Zelle befinden sich im Modul an Positionen mit thermisch ähnlichen Randbedingungen, weisen aber nicht dieselbe Temperatur auf.

Zur Approximation der Zelltemperatur in Strömungsrichtung wurde Phy 1 und Phy 2 mittig in der Strömung platziert, um Einflüsse der seitlichen Modulwände auszuschließen. Die Wärmeübergangskoeffizienten an den gewählten Positionen unterscheiden sich allerdings voneinander. Hinsichtlich der Wärmeübergangskoeffizienten (siehe Abbildung 8.17) wäre eine Positionierung von Phy 1 in die zweite oder dritte Zellreihe ideal. Aus Gründen der geringen Dynamik der Wärmestromregelung des Umlaufkühlers wurde Phy 1 in die erste Reihe platziert.

Da Phy 2 und Phy 3 entsprechend der Parallelschaltung der Zellen sich in der gleichen Reihe mit identischem Wärmeübergangskoeffizient befinden, ist die Bedingung (c) erfüllt.

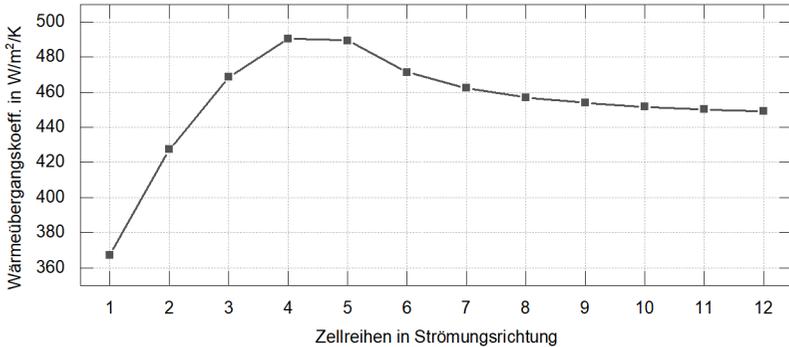


Abbildung 8.17: Verlauf der Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Batteriezellen und der Kühlfüssigkeit entlang der Strömung über die 12 Reihen des betrachteten Batteriemoduls bei einem Volumenstrom von 1,3 l/min bei 20°C Fluidtemperatur (35 %iges Glykol-Wassergemisch)

8.2.2 Modellierung der Connected Systems – virtuelle Umgebung

Für die Untersuchung des SoC- und temperaturabhängigen Verhaltens des Batteriemoduls wurde die Modellierung des Restsystems (Fahrzeug und Umwelt) auf ein Minimum reduziert. Thermische Wechselwirkungen des Batteriemoduls mit der Umgebung oder dem Restfahrzeug wurden nicht betrachtet. Entsprechend lagen an den fluidbegrenzenden Wänden adiabate Randbedingungen vor. Auch die elektrischen Wechselwirkungen mit dem Restsystem wurden vernachlässigt. (Eisele et al., eingereicht)

8.2.3 Verifikation des Kühlmodells im virtuellen SiD

Da die Berechnung der durchschnittlichen Wärmeübergangskoeffizienten am Zellmantel auf Basis eines empirischen Modells nach dem Stand der Technik erfolgte (Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 2013, S. 819–823),

wurde die Modellierung der strömungstechnischen Vorgänge des Fluides in den Zwischenräumen der Zellen (vgl. Abbildung 8.16) verifiziert.

Zielsetzung der Verifikation:

Ziel der Verifizierung des anwendungsspezifisch modellierten Batteriezellmodells ist zu überprüfen, ob die lokalen Wärmeströme zwischen Batteriezelle und Kühlfluid entlang der Strömungsrichtung bei verschiedenen Zellabständen und Volumenströmen hinreichend genau abgebildet werden. Die im Folgenden beschriebene Verifikation des Kühlmodells wurde bereits in der Veröffentlichung von Eisele et al. (eingereicht) beschrieben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird auf eine mehrfache Kennzeichnung der Quelle in diesem Unterkapitel verzichtet.

Untersuchungsmethode:

Als Referenz dienen die CFD-Simulationen, welche bereits ausführlich in Kapitel 8.1.2 beschrieben wurden. Diese bilden einen Ausschnitt des im Entwicklungsbeispiel zu untersuchenden Batteriemoduls (SiD) im thermisch stationären Zustand in E_2 ab. Über den Vergleich der Durchschnittstemperaturen der Batteriezellen in den beiden Modellen (CFD – virtuelles Batteriezellmodell) wird die Güte des Kühlungsmodells des SiD beschrieben.

Die Batteriezellen wurden hierfür, als thermische Massen und ideale Wärmestromquellen mit einer Leistung von je 2,43 W modelliert. Materialparameter und die Kühlfläche am Zellmantel entsprechen jener im CFD-Modell. Die Temperatur der Kühlflüssigkeit am Strömungseingang und die Stoffwerte des Fluides stimmen ebenfalls bei beiden Modellen überein. Die folgenden Parameter wurden im Rahmen der Verifikation variiert um die Robustheit des Kühlungsmodells für Parameterstudien im Entwicklungsbeispiel zu bewerten:

- Minimaler Zellabstand (3 mm und 2 mm)
- Anströmungsgeschwindigkeit des Fluides (0,0047 m/s auf 0,0023 m/s; entspricht einem Volumenstrom im untersuchten Batteriemodul von 2,6 l/min bzw. 1,3 l/min)

In vier Simulationen wurden alle Kombinationen der beiden Parameter untersucht. Die zellreihenspezifischen Wärmeübergangskoeffizienten für das virtuelle Batteriezellmodell wurden über das empirische Modell der querumströmten Rohrbündel (Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 2013, S. 819–823) berechnet.

Ergebnis und Diskussion:

Auffällig sind die vergleichsweise großen Temperaturabweichungen zwischen den Simulationsmodellen in den ersten beiden Zellreihen (vgl. Abbildung 8.18). Die Ursache liegt in den Wärmeübergangskoeffizienten, die sich in der CFD-Simulation geringfügig von denen unterscheidet, die mit dem empirischen Modell der querumströmten Rohrbündel berechnet werden.

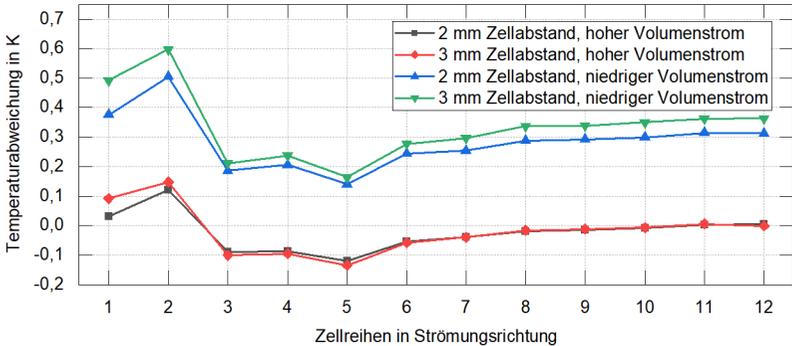


Abbildung 8.18: Abweichung der modellierten Batteriezellkühlung im Vergleich zur CFD-Simulation bei 2,43 W Wärmeleistung je Batteriezone bei Variation des Volumenstroms und des minimalen Zellabstandes im stationären Zustand (Eisele et al., eingereicht)

Aus Anwendungssicht ist diese Abweichung jedoch als unkritisch zu bewerten. Eine homogene, laminare Anströmung der ersten Zellreihen, wie in beiden Modellen abgebildet, ist bauraumbedingt im Modul nur schwer umsetzbar. Ein veränderter Wärmeübergang durch strömungsführende Elemente in den ersten Zellreihen ist wahrscheinlich (vgl. Kapitel 8.1.3), wird in dieser Entwicklungsgeneration noch nicht sondern erst in E₄ berücksichtigt.

Die Verkleinerung des Zellabstandes von 3 auf 2 mm hat bei der hohen Anströmungsgeschwindigkeit von 0,0047 m/s einen vergleichsweise geringen Einfluss auf den Temperaturfehler. Die Reduktion des Zellabstands führt zu einer besseren Übereinstimmung der berechneten Zelltemperaturen mit denen der CFD-Simulation. Die Abweichungen der Temperatur an den Zellreihen (3 - 12) liegen bei der hohen Volumenstromstufe und bei Variation des Zellabstandes zwischen - 0,14 K und 0 K (vgl. Abbildung 8.18 unten).

Die Halbierung des Volumenstroms und damit Verdopplung des Temperaturanstiegs des Fluides zwischen der ersten und letzten Zellreihe auf 3 K, hat einen wesentlich größeren Einfluss auf die Temperaturfehler (vgl. Abbildung 8.18 oben). Die

Zelltemperaturen werden mit dem entwickelten Batteriekühlmodell generell zu hoch berechnet. Auch hier führt der kleinere Zellabstand zu einem verringerten Fehler, sowohl absolut als auch zwischen den Zellreihen. Die Abweichungen der Temperatur an den Zellreihen (3 - 12) liegen bei der niedrigen Volumenstromstufe und bei Variation des Zellabstandes zwischen + 0,14 K und + 0,38 K (vgl. Abbildung 8.18 oben). Der relative Temperaturfehler zwischen den Zellreihen, ist im Vergleich zum absoluten Temperaturfehler, im Sinne eines Offsets, wesentlich relevanter für die Auslegung. Dieser beträgt nur 0,24 K. Der Anstieg des Temperaturfehlers in Strömungsrichtung zwischen Zellreihe 5 und 12, führt zu einer Überschätzung des Temperaturunterschiedes zwischen den Zellen in diesen Reihen. Dies ist im Sinne einer konservativeren Auslegung in der frühen Entwicklungsphase als positiv zu bewerten.

Unter Vernachlässigung der ersten zwei Zellreihen aus den genannten Gründen, sowie unter Berücksichtigung der einfachen Modellierung und der tendenziell konservativen Berechnung des Temperaturunterschiedes zwischen den Zellreihen, wird der Temperaturfehler als unkritisch angesehen. Relativ zum Temperaturhub des Kühlfluides über das Batteriemodul, liegt die genannte Temperaturabweichung unter 10 %. Das entwickelte Kühlungsmodell gilt somit für den betrachteten Anwendungsfall als verifiziert.

8.2.4 Verifikation der Temperaturinterpolation virtueller Batteriezellen

Zielsetzung der Verifikation:

Die Temperaturinterpolation gemäß der Rechenvorschrift aus Kapitel 6.3.4 soll hinsichtlich zu erwartender Fehler im Entwicklungsbeispiel untersucht werden. Da zur verwendeten Batteriezelle keine Daten zur elektrischen und thermischen Modellierung der Batteriezelle vorliegen, wird auf Literaturdaten zurückgegriffen. Eine Verifikation über ein physisches Modell des Anwendungsbeispiels wird ausgeschlossen. Die Annahme einer homogenen Anströmung der ersten Zellreihe mit Fluid kann physisch nur mit sehr hohem Aufwand abgebildet werden. Ziel ist es, auf Basis von Literaturdaten und mittels Simulation die zu erwartenden Temperaturfehler durch die Interpolation abzuschätzen. (Eisele et al., eingereicht)

Untersuchungsmethode:

Zur Verifikation der Temperaturinterpolation wurde die gesamte Validierungskonfiguration in vereinfachter Form virtuell modelliert. Die Koppelsysteme entfallen, da keine Signalwandlung zwischen virtueller und physischer Domäne notwendig ist.

Die drei physischen Batteriezellen wurden in vereinfachter Form thermisch eindimensional modelliert. Durch Lösung der 1D-Wärmeleitungsgleichung (partielle Differenzialgleichung) über den Batteriezellradius wird die Temperaturverteilung über den Zellwickel bis zum Zellmantel für jeden Zeitschritt berechnet. Die Heizleistung der Batteriezelle wird über eine Wärmestromdichte homogen über den Zellwickel aufgeprägt. (Eisele et al., eingereicht)

Es wurde vermutet, dass die verwendete Batteriezelle Samsung INR 35E (Yunwoong Kim, 2017) eine NMC Kathode (Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid) besitzt (vgl. Samsung INR 29E in (Cho et al., 2019))¹⁷. Zur realistischen Abbildung der später verwendeten Batteriezelle wurde auf Literaturdaten der gleichen Zellchemie (NMC) zurückgegriffen:

Zhang, Wu, Li und Huang (2013) geben für die NMC-Batteriezelle eine Wärmekapazität von 1.243 J/Kg/K an. Da eine geringe Wärmekapazität zu einer dynamischen Temperaturerhöhung führt, wurden die Batteriezellen mit einer radialen Wärmeleitfähigkeit von 0,48 W/m/K aus (Zhang et al., 2013) und der Wärmekapazität von 1.000 J/Kg/K gemäß (Loges et al., 2016) modelliert. Materialdaten für die Modellierung des Zellbeckers (Stahl) wurden der Veröffentlichung (Jeon, 2014) entnommen.

Die folgenden Inhalte dieses Unterkapitels zur Verifikation der Temperaturinterpolation virtueller Batteriezellen wurden bereits in der Veröffentlichung von Eisele et al. (eingereicht) beschrieben. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird auf eine mehrfache Kennzeichnung der Quelle verzichtet.

Die virtuell modellierte Validierungskonfiguration wurde in zwei Versionen verwendet und diese miteinander verglichen. Der virtualisierte Teil der Validierungskonfiguration (physische Batteriezellen und elektrische sowie thermische Kopplung) ist bei den Simulationsmodellen identisch. Das SiD unterscheidet sich in der thermischen Modellierung der Batteriezellen. Das zu testende Modell des Batteriemoduls entspricht vollständig dem Modell, wie es in der physisch-virtuell modellierten Validierungskonfiguration eingesetzt werden sollte. Das Referenzmodell hingegen verwendet keine Temperaturinterpolation und berechnet die Zellmanteltemperatur der jeweiligen Zelle für jeden Zeitschritt auf Basis der Wärmestrombilanz am Zellmantel. Hierfür wurde das thermische Modell der drei virtualisierten physischen Batteriezellen verwendet. Durch die genaue Abbildung der thermischen Vorgänge in der Batteriezelle und am Zellmantel wurden die Ergebnisse dieses Simulationsmodells als

¹⁷ Diese Vermutung konnte nach Abschluss der Untersuchungen durch Willenberg, Dechent, Fuchs, Sauer und Figgemeier (2020) widerlegt werden. Die verwendete Zelle besitzt eine NCA Kathode (Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid).

Referenz zur Bewertung der Modellgüte der Temperaturinterpolation herangezogen. Es wurden zwei Testfälle betrachtet.

Zur Verifikation der Temperaturinterpolation der virtuellen Referenzzellen wurde als erster Testfall ein Wärmestromsprung von 6,5 W je Zelle über 500 s mit anschließender Abkühlphase von 500 s vorgegeben. Die Wärmeleistung ergibt sich über den maximal abbildbaren Entladestrom je Zelle von 9 A (auf Basis der eingesetzten elektronischen Last des elektrischen Koppelsystems) und der Annahme, dass Zellen eines BEV mit einem durch Alterung erhöhten konstanten ohmschen Innenwiderstand von 0,08 Ω (Schuster, Brand, Berg, Gleissenberger & Jossen, 2015) getestet werden. Somit wurde für den Testfall die ungünstigste Konstellation abgebildet. Die Simulation wurde im stationären Zustand ohne elektrische Belastung bei einer Kühlfluidtemperatur im Batteriemodul von 20 °C gestartet.

Im zweiten Testfall sollte der Einfluss einer ungleichen Strombelastung innerhalb der Parallelschaltungen untersucht werden. Die Zellen an den seitlich fluidbegrenzenden Wänden werden modellbedingt besser gekühlt als die mittigen Batteriezellen. Dies wurde genutzt, um abzuschätzen, in wie fern dadurch eine ungleiche Strombelastung innerhalb einer Parallelschaltung hervorgerufen werden kann. Nach dem ohmschen Gesetz ergeben sich in den Zellen unterschiedliche Wärmeleistungen, wodurch sich die Temperaturen der Batteriezellen innerhalb einer Parallelschaltung unterscheiden. Dieser Fall wurde durch einen stark temperaturabhängigen ohmschen Innenwiderstand aller modellierter Batteriezellen abgebildet:

$$R_{ohm}(20\text{ }^{\circ}\text{C} + \Delta T) = R_0(20\text{ }^{\circ}\text{C}) * (1 + R_{Grad} * \Delta T) \quad 25$$

$$R_{ohm}(20\text{ }^{\circ}\text{C} + \Delta T) = 0,08\ \Omega * (1 - 0,05\ \text{K}^{-1} * \Delta T) \quad 26$$

$R_{ohm}(T)$ *ohmscher Innenwiderstand bei einer mittleren Zelltemperatur $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C} + \Delta T$*

$R_0(20\text{ }^{\circ}\text{C})$ *ohmscher Innenwiderstand bei einer mittleren Zelltemperatur von 20 °C*

R_{Grad} *temperaturabhängiger Gradient des ohmschen Widerstandes bezogen auf den Widerstand bei 20 °C*

Da die Temperaturunterschiede innerhalb der Parallelschaltungen zwischen den Zellen am Modulrand und den mittigen Zellen sehr klein sind (siehe Ergebnisse und Diskussion), wurde ein stark sensitiver Temperaturgradient von - 5 %/K wie er bei

Temperaturen weit unter 0 °C auftritt (Andre et al., 2011; Huria et al., 2012; Juang, Kollmeyer, Jahns & Lorenz, 2014) gemäß Formel 26 implementiert, um eine ungleichmäßige Strombelastung innerhalb der Parallelschaltungen hervorzurufen. Auch hier wurde die joulesche Wärmeleistung homogen über eine Wärmestromdichte auf den Zellwickel verteilt. Ausgehend vom stationären Zustand mit einer Fluidtemperatur von 20 °C wurde das Batteriemodul mit einem Stromsprung von 72 A (mittlerer Strom je Zelle 9 A) über 500 s mit anschließender Abkühlphase von 500 s ohne Strombelastung getestet.

Ergebnis und Diskussion:

In Abbildung 8.19 wird die Auswertung des ersten Testfalls mit konstantem Widerstand und einer Heizleistung von 6,5 W je Zelle gezeigt. Die Kurvenverläufe ergeben sich durch die minimale und maximale Differenz der Manteltemperaturen der Referenzzellen gleicher Position in der Referenzsimulation und der Simulation mit beschriebener Temperaturinterpolation. Die größten Abweichungen von 0,16 K treten ca. 140 s nach Versuchsstart und ca. 140 s nach Ende der Heizphase auf. Daraus kann geschlossen werden, dass bei schnellen Temperaturänderungen der Interpolationsfehler ansteigt und bei thermisch stationären Zuständen minimal wird (bei 500 s und 1.000 s). Die Abweichung bei der Abkühlung wirkt entgegengesetzt dem Fehler während der Heizphase.

Dieses entgegengesetzte Verhalten beim Heizen und Kühlen ist als positiv zu bewerten, da sich die Fehler bei aufeinanderfolgenden Heiz- und Kühlphase gegenseitig ausgleichen. Die Temperaturinterpolation für die Referenzzellen kann vor dem Hintergrund der hohen Heizleistung und einem maximalen Temperaturhub von 7,3 K sowie einer maximalen Temperaturdifferenz von 3,7 K im Modul nach 500 s als sehr genau angesehen werden. Relativ zur maximalen Temperaturdifferenz im Modul, liegt die Abweichung unter 5 %.

Im zweiten Testfall führte der temperaturabhängige ohmsche Innenwiderstand der Zellen zu einer nur geringfügig ungleichmäßigen Stromverteilung in den Parallelschaltungen. Bei einer mittleren Stromlast je Zelle von 9 A betrug die Abweichung während der gesamten Heizphase zwischen den virtualisierten physischen Batteriezellen Phy 2 und Phy 3 maximal 1 %. Dies ist auf den geringen Temperaturunterschied zwischen den parallelgeschalteten Zellen zurückzuführen (siehe Abbildung 8.20).

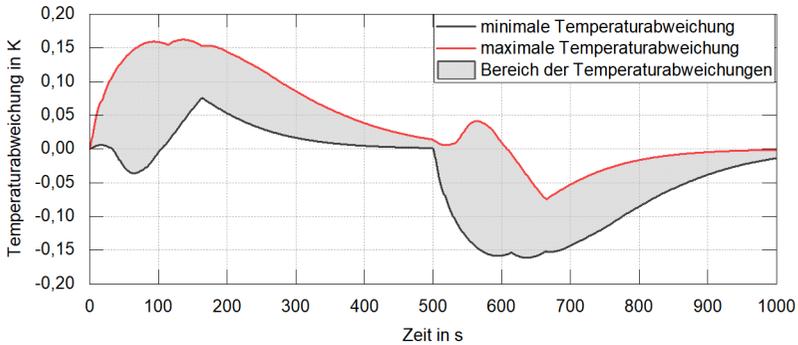


Abbildung 8.19: Interpolationsbedingte Abweichungen der Zellmanteltemperatur aller virtueller Referenzzellen des modellierten Batteriemoduls (SiD) entlang der Strömungsrichtung gegenüber der Referenzsimulation. Diese löst für jede Batteriezelle die 1D-Wärmeleitungsgleichung über den Zellradius. Alle Batteriezellen des Moduls erzeugen, ausgehend vom thermisch stationären Zustand, für 500 s eine konstante Wärmeleistung von 6,5 W und kühlen danach ohne Heizleistung für 500 s ab. (Eisele et al., eingereicht)

Somit kann der Temperatureinfluss auf eine ungleichmäßige Stromverteilung zwischen parallelgeschalteten Zellen in dem zu untersuchenden Testfall vernachlässigt werden.

Gemäß Abbildung 8.20 führt der Temperaturgradient des ohmschen Widerstandes entlang der Referenzzellen zu einer leichten Erhöhung des maximalen Interpolationsfehlers. Auch im thermisch quasi stationären Zustand (500 s) der Heizphase konvergieren die Temperaturfehler nicht gegen Null. Erst durch die Abkühlung auf Ausgangstemperatur konvergiert der Fehler gegen Null. Die Temperaturschätzung verschlechtert sich durch den temperaturabhängigen ohmschen Widerstand der Zelle im nicht stationären Zustand um ca. 0,01 K. Im quasi stationären Zustand steigt die Abweichung stärker um bis zu 0,12 K an.

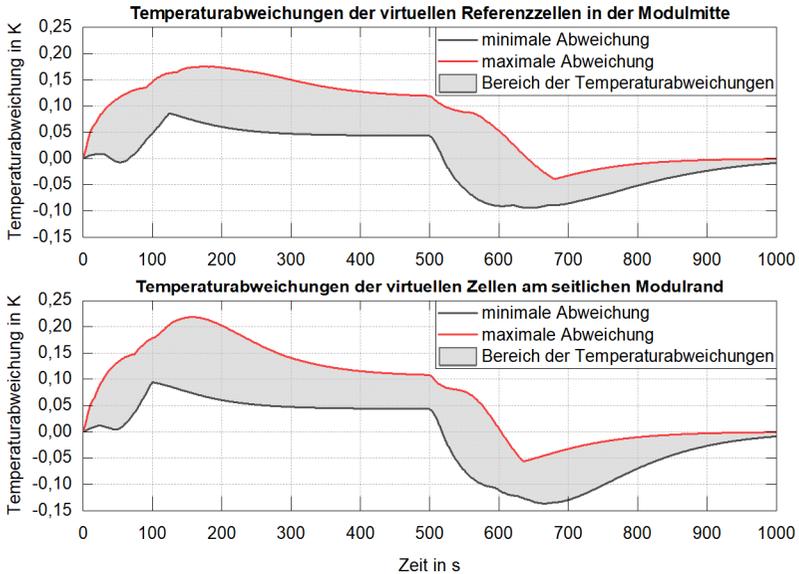


Abbildung 8.20: Interpolationsbedingte Abweichungen der Zellmanteltemperatur aller virtueller Referenzzellen (oben) und virtueller Batteriezellen am seitlichen Modulrand, die eine virtuelle Referenzzelle besitzen (unten), gegenüber der Referenzsimulation bei temperaturabhängigem ohmschen Innenwiderstand. Die Referenzsimulation löst für jede Batteriezelle die 1D-Wärmeleitungsgleichung über den Zellradius. Das Batteriemodul wird mit 72 A über 500 s belastet und anschließend für 500 s abgekühlt. (Eisele et al., eingereicht)

Der qualitative Verlauf der Fehler der Temperaturschätzung der Zellen am Modulrand entspricht denen mittig im Batteriemodul. Allerdings sind die größten Fehler bei 150 s nach Start der Heizphase und 150 s nach Start der Kühlphase lediglich um 0,04 K größer als an den Referenzzellen mittig im Modul.

Der Fehleranstieg im Vergleich zum konstanten ohmschen Innenwiderstand lässt sich durch die sinkende Wärmeleistung mit steigender Zelltemperatur erklären, die der Interpolationsannahme thermisch ähnlicher Zustände der Zellen entgegenwirkt. Die Temperaturinterpolation wird mit einer maximalen Temperaturabweichung von 0,22 K als hinreichend genau angenommen. Vor dem Hintergrund der starken Temperaturabhängigkeit des Innenwiderstandes wird und der geringfügigen Verschlechterung der Temperaturschätzung der virtuellen Referenzzellen um $< 0,15$ K ist die

Interpolationsmethode robust gegenüber temperaturabhängigen Wärmeleistungen der Batteriezellen.

Somit gilt die Temperaturinterpolation für das Entwicklungsbeispiel hinsichtlich der Qualität der Approximation als verifiziert.

8.2.5 Integration der physischen Batteriezellen in die Koppelsysteme

Nach der Sensorapplikation auf dem Zellmantel wurden die drei Batteriezellen in den Testkammern verbaut sowie Leistungs- und Sensorkabel angeschlossen. Anschließend wurden die Thermoelemente kalibriert und das Verfahren zur Kalibrierung der gemessenen Wärmestromdichte angewandt. Letzteres wird im Folgenden beschrieben.

Da im Rahmen dieser Arbeit keine kalorische Vermessung der verwendeten Batteriezellen (Yunwoong Kim, 2017) möglich war, wurde auf Literaturdaten zurückgegriffen und eine spezifische Wärmekapazität der Zellen von $0,94 \text{ J/g/K}$ angenommen (Loges et al., 2016). Das Gewicht je Zelle ohne Lötfläche von $47,8 \text{ g}$, konnte über die Messungen von 10 Batteriezellen ermittelt werden. Somit ergibt sich je Zelle eine Wärmekapazität von $44,9 \text{ J/K}$ welche für die Bestimmung der Koeffizienten zur Kalibrierung der gemessenen Wärmestromdichte verwendet wurde.

Das Verfahren zur Kalibrierung der Sensormessdaten wurde für die drei Sensoren (J1, I1, I3) durchgeführt, die für Messungen an realen Batteriezellen im Entwicklungsbeispiel zum Einsatz kamen. Zur Verifikation der ermittelten Koeffizienten wurde der Versuch gemäß Kalibrierungsschritt 4 viermal wiederholt, um eine hinreichende Wiederholbarkeit sicherzustellen. Diese sind in Abbildung 8.21 dargestellt.

Versuche mit einem schnelleren Anstieg der Temperatur führten auch zu einem schnelleren Anstieg der Wärmemenge. Bei allen drei Versuchen wurde ein Temperaturhub der Zellen von $28,9 \text{ K}$ erzeugt. Die gemessenen Wärmeströme weichen bei 1.400 s Versuchszeit um maximal $+ 8,6 \%$ und $- 4,2 \%$ vom Idealwert $- 1298 \text{ J}$ ab. Tendenziell wird also ein zu kleiner Wärmestrom gemessen. Die Offsets nach Versuchsende liegen im Bereich zwischen 0 bis $- 80 \text{ J}$. Auch die Streuung zwischen den Zellen im selben Versuch ist bei $1.400 \text{ s} \leq 80 \text{ J}$. Wird der Mittelwert über die Wärmeströme der drei Sensoren gebildet, zeigt sich, dass beim ersten Verifizierungsversuch die gemessene Wärmemenge dem Sollwert am nächsten ist. Die Mittelwerte der drei darauffolgenden Messungen liegen nahe beieinander, bilanzieren aber eine niedrigere Wärmeaufnahme.

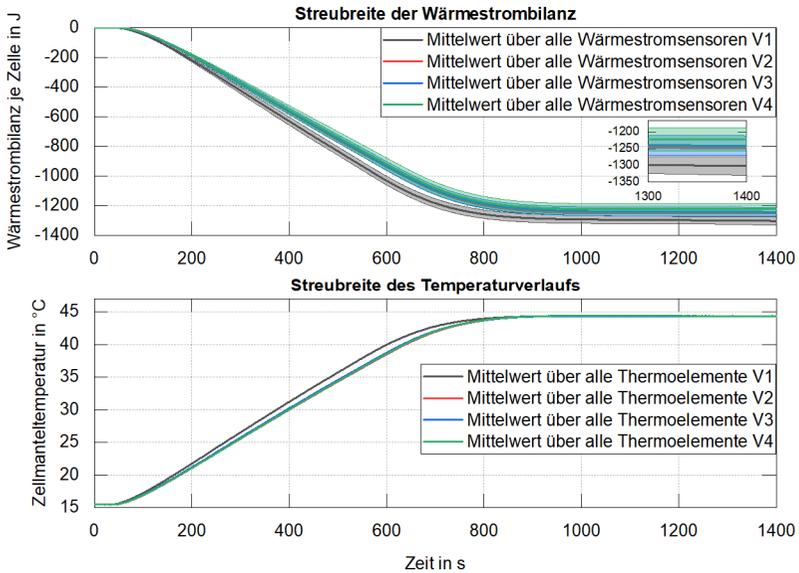


Abbildung 8.21: Streubreite der Wärmestrombilanz über die Wärmestromsensoren der drei Zellen in vier Versuchswiederholungen (V1 – V4) (oben). Streubreite der Zellmanteltemperatur der drei Zellen in den vier Versuchswiederholungen (unten)

Zur Bewertung des Einflusses der Wärmestromabweichung auf die Temperaturverteilung im Modul wurden Simulationen mit den in Kapitel 8.2.4 beschriebenen Modellen durchgeführt. Als Referenz wurde das Modell verwendet, in dem die radiale Temperaturverteilung der Zellen durch eine partielle Differenzialgleichung modelliert ist. Unter Annahme eines um 2,4 % zu niedrigen Messwerts an Phy 1 und eines um 8,6 % zu niedrigen Messwerts an Phy 2 und Phy 3 wird die schlechteste Konstellation mit den höchsten Messabweichungen betrachtet. Diese konstanten Messfehler wurden im Modell mit der entwickelten Temperaturinterpolation, wie sie am Prüfaufbau Anwendung findet, implementiert.

Durch die zu niedrigen Messwerte wird der Temperaturanstieg aller drei Zellen während der elektrischen Belastung erwartungsgemäß überschätzt. Relativ zum jeweiligen Temperaturhub der Zelle in dieser Phase, führen die Messfehler zu einem um ca. 2,5 % (Phy 1) bzw. ca. 7 % (Phy 2 und Phy 3) zu starken Temperaturanstieg. Dies wirkt sich auf den Temperaturunterschied zwischen den physischen Zellen aus, der statt 3,4 K mit 3,8 K um ca. 12 % überschätzt wird.

Da die letzten drei Verifikationsmessungen ähnliche Ergebnisse lieferten, könnte durch eine erneute Anpassung der Koeffizienten die tendenzielle Unterschätzung des Wärmestroms korrigiert werden. Auf diese Option wurde verzichtet und stattdessen bei der Auswertung der Versuche, die im folgenden Kapitel beschrieben sind, die Überschätzung der Temperaturspreizung und des Temperaturhubs berücksichtigt.

8.2.6 Bewertung des temperatur- und SoC-abhängigen thermischen Verhaltens

Die Versuche wurden bereits im Rahmen der Veröffentlichung von Eisele et al. (eingereicht) beschrieben. Inhalte dieses Unterkapitels wurden der Veröffentlichung entnommen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird auf eine mehrfache Kennzeichnung der Quelle verzichtet.

Für die Untersuchung des temperatur- und SoC-abhängigen thermischen Verhaltens des Batteriemoduls wurde wie in Kapitel 8.2 beschrieben der folgende Testfall angenommen: Das virtuell modellierte Batteriemodul wird über 200 s mit 64 A entladen. Dies entspricht im Mittel einem Entladestrom von 8 A je Zelle. Anschließend kühlen die Batteriezellen ohne zusätzliche Strombelastung bis auf Ausgangstemperatur (= simulierter Kühlfluidtemperatur) ab. Dieser Versuch wird innerhalb einer Versuchsreihe drei Mal wiederholt, bevor die drei physischen Batteriezellen parallel verschaltet und geladen werden, um anschließend die nächste Versuchsreihe zu starten. Die beschriebenen Versuche wurden für eine simulierte Fluidtemperatur von 15 °C, 30 °C und 35 °C durchgeführt.

Zur Bewertung der Temperaturspreizung innerhalb des Batteriemoduls wurden die gemessenen Zellmanteltemperaturen als auch die gemessenen Wärmeströme an den drei physischen Batteriezellen (Phy 1 – Phy 3) in der ersten und der letzten Zellreihe in Strömungsrichtung herangezogen.

Die Wiederholbarkeit der Versuche bei gleichem SoC, wurde über die Streubreite der Zelltemperaturen untersucht. Hierfür wurden die letzten der drei aufeinanderfolgenden Entladungen bei einer simulierten Fluidtemperatur von 15 °C verwendet und der Versuch dreimal wiederholt. Dieser Versuch wurde aufgrund des maximalen Temperaturunterschiedes zwischen den Zellen und gegenüber der Fluidtemperatur am Moduleingang gewählt.

Ergebnis und Diskussion:

Im Folgenden werden die Ergebnisse der ersten Versuchsreihen der drei aufeinanderfolgenden Entladungen bei 15 °C Fluidtemperatur, wie in Abbildung 8.22 dargestellt, beschrieben.

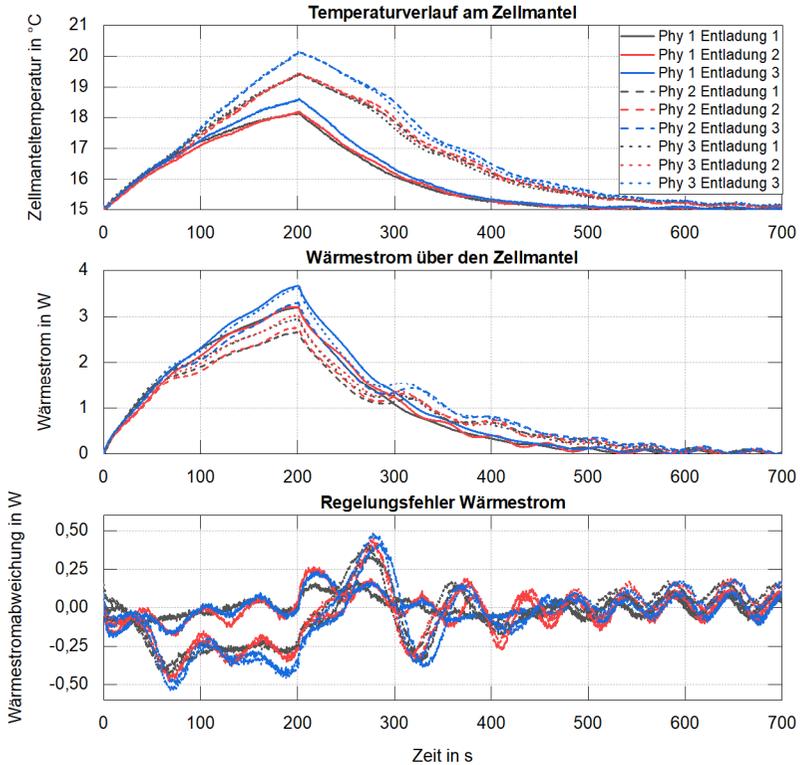


Abbildung 8.22: Zellmanteltemperaturen der drei physischen Batteriezellen bei einer Fluidtemperatur von 15 °C während einer 200 s andauernden Entladung mit konstantem Strom und anschließender Abkühlphase (oben). Die Entlade- und Abkühlphase wurde dreimal hintereinander wiederholt. Wärmestrom über den jeweiligen Zellmantel (mittig). Abweichung der Wärmestromregulation an den drei Batteriezellen (Sollwärmestrom – gemessener Wärmestrom) für die drei Entladungen (unten). Die Versuche wurden nacheinander durchgeführt ohne die Batteriezellen zwischen den Versuchen zu laden. Die initiale Zellspannung bei der ersten Entladung beträgt 4,0 V. (Eisele et al., eingereicht)

Die Temperaturverläufe der drei aufeinanderfolgenden Versuche ähneln sich. Die drei Zellen erwärmen sich zunächst gleichmäßig, bevor die Temperaturen von Phy 1 und Phy 2/Phy 3 nach ca. 70 s Versuchszeit auseinanderdriften. Die Temperaturen von Phy 2 und Phy 3 unterscheiden sich innerhalb eines Versuches nicht nennenswert voneinander. Unterschiede zwischen den Versuchen zeigen sich in den maximal erreichten Zellmanteltemperaturen nach 200 s Versuchszeit. Die beiden ersten Versuchswiederholungen sind im Verlauf nahezu identisch. Die maximalen Temperaturen sind am Zellmantel von Phy 1 18,15 °C bzw. 18,2 °C sowie an den Zellen Phy 2 und Phy 3 im ersten Versuch 19,4 °C bzw. 19,45 °C im zweiten Versuch. Beim dritten Versuch steigen die maximalen Temperaturen auf 18,6 °C (Phy 1) und 20,15 °C (Phy 2/Phy 3) an. Mit sinkender Temperatur baut sich bei allen drei Zellen eine sinusförmige Schwingung der Temperatur auf, die auch im stationären Zustand bei 15 °C Fluidtemperatur erhalten bleibt. Diese sind auch in den Abweichungen der Wärmestromregelung zu erkennen.

Die größten Abweichungen in der Regelung treten bei allen Versuchen an Phy 2/Phy 3 nach ca. 70 s Versuchszeit während der Entladung auf und sinken, nachdem die Temperatur der beiden Zellen Phy 2 und Phy 3 gegenüber der von Phy 1 abdriftet. Zwei weitere markante Abweichungen in Form einer abklingenden Schwingung sind bei 280 s und 330 s zu erkennen.

Die sinusförmigen Schwingungen werden durch die interne Regelung des Umlaufkühlers hervorgerufen. Die Fluidtemperatur im Vorlauf schwankt um den Sollwert. Diese Temperaturschwankungen wirken sich gleichermaßen auf den Wärmestrom zwischen Batteriezelle und Fluid der drei Testkammern aus. Die Abweichung des Wärmestroms in der Aufheizphase ist der thermischen Trägheit des Koppelsystems und der geringen Dynamik des Heizreglers zuzuschreiben. Dieser verursacht auch die abklingende Überschwingung nach Beendigung des 200 s andauernden Entladevorgangs.

Aus den Versuchsergebnissen lässt sich schließen, dass die Wärmeleistung des Batteriemoduls nichtlinear abhängig vom Ladezustand ist. Der Temperaturverlauf der am Zellmantel der physischen Zellen bei der ersten und der zweiten Entladung ist nahezu identisch (4,0 V und 3,87 V OCV bei Versuchsstart). Bei der dritten Entladung (3,73 V OCV bei Versuchsstart) ist eine gesteigerte Wärmeabgabe zu erkennen, die einerseits zu einer höheren Maximaltemperatur, als auch zu einer größeren Temperaturspreizung von ca. 1,6 K während der Entladung führt. Die erhöhte Wärmefreigabe von maximal 3,6 W je Zelle in der ersten Zellreihe führt gleichermaßen zu größeren Regelungsabweichungen, die aber wie auch die Maximaltemperatur im Batteriemodul als unkritisch bewertet werden.

Aufgrund der SoC-abhängigen Wärmeabgabe wurde im Folgenden nur der letzte Versuch der Versuchsreihe für die Bewertung der Temperatursteigerung innerhalb des Batteriemoduls in der jeweiligen Temperaturstufe des Kühlfluides herangezogen.

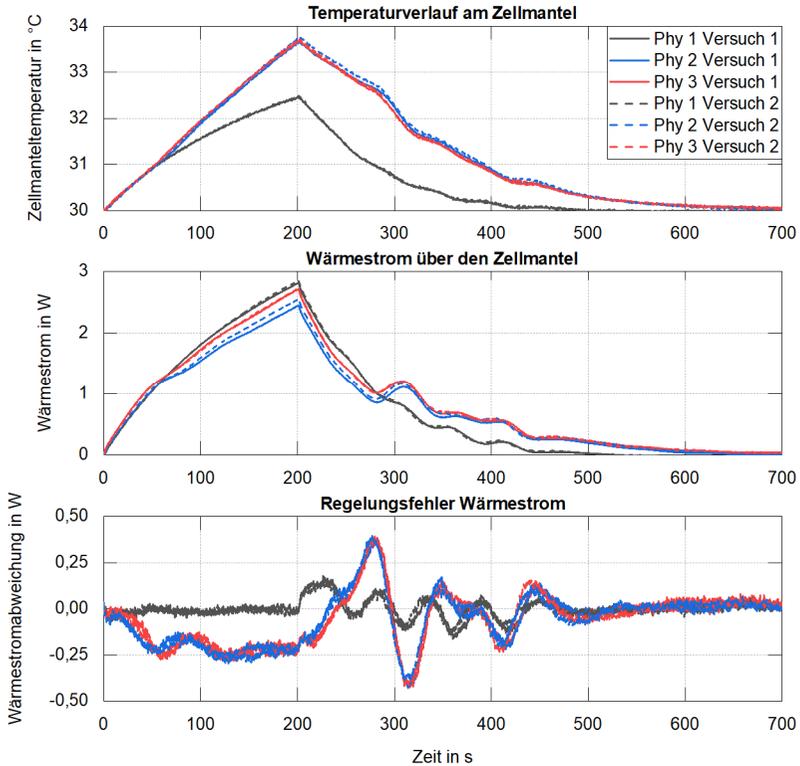


Abbildung 8.23: Zellmanteltemperaturen der drei physischen Batteriezellen bei einer Fluidtemperatur von 30 °C während einer 200 s andauernden Entladung mit konstantem Strom und anschließender Abkühlphase bei zwei Versuchswiederholungen (oben). Wärmestrom über den jeweiligen Zellmantel (mittig). Abweichung der Wärmestromreglung an den drei Batteriezellen (Sollwärmestrom – gemessener Wärmestrom) für die Entladung (unten). Die initiale Zellspannung bei der ersten Entladung beträgt 3,75 V. (Eisele et al., eingereicht)

Bei einer simulierten Fluidtemperatur von 30 °C erwärmen sich die Batteriezellen bei gleicher Strombelastung langsamer. Dies ist am reduzierten Temperaturhub und der geringeren Wärmeleistung im Vergleich zum Versuch bei 15 °C Fluidtemperatur zu erkennen (vgl. Abbildung 8.23).

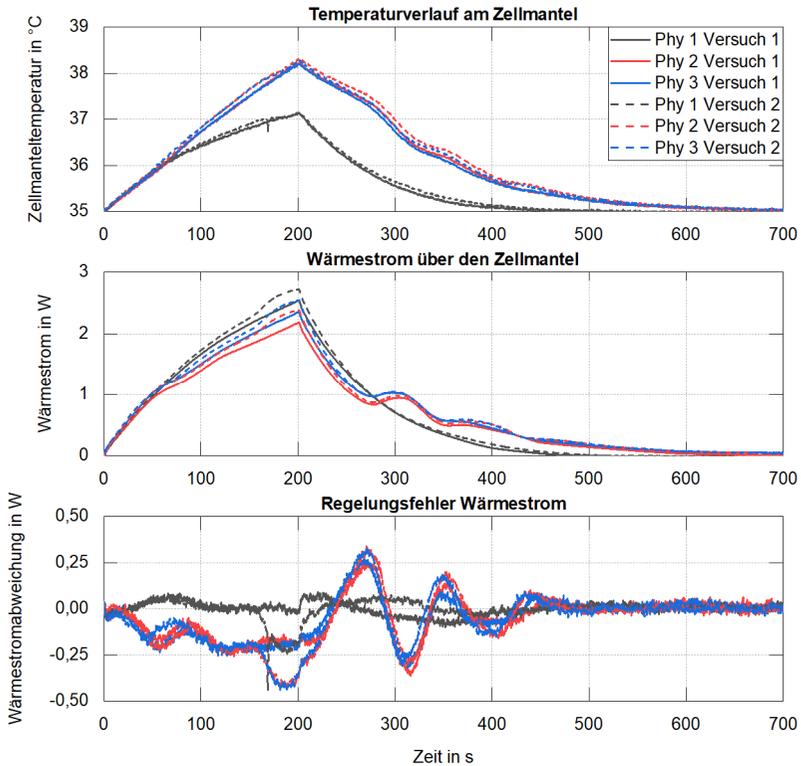


Abbildung 8.24: Zellmanteltemperaturen der drei physischen Batteriezellen bei einer Fluidtemperatur von 35 °C während einer 200 s andauernden Entladung mit konstantem Strom und anschließender Abkühlphase bei zwei Versuchswiederholungen (oben). Wärmestrom über den jeweiligen Zellmantel (mittig). Abweichung der Wärmestromreglung an den drei Batteriezellen (Sollwärmestrom – gemessener Wärmestrom) für die Entladung (unten). Die initiale Zellspannung bei der ersten Entladung beträgt 3,75 V. (Eisele et al., eingereicht)

Im Vergleich zu den Versuchen bei 15 °C Fluidtemperatur wurden bei gleicher elektrischer Belastung statt 3,6 W nur maximal 2,9 W je Zelle abgegeben. Die Temperaturspreizung im Batteriemodul ist mit ca. 1,3 K entsprechend niedriger. Die maximal erfassten Zellmanteltemperaturen werden für kurzzeitige Belastungen als unkritisch bewertet. Aus den Versuchsergebnissen kann geschlussfolgert werden, dass die Wärmeleistung der Batteriezellen temperaturabhängig ist.

In Abbildung 8.24 sind die Versuchsergebnisse bei einer Fluidtemperatur von 35 °C aus zwei Versuchswiederholungen dargestellt. Der Temperaturhub ist um 0,4 K niedriger als bei den Versuchen mit einer 5 K niedrigeren Fluidtemperatur. Allerdings sind zwischen den beiden Versuchswiederholungen Unterschiede im Wärmestrom und in den Regelungsfehlern ersichtlich. Beim zweiten Versuch (gestrichelte Linien) steigt nach 160 s Versuchszeit der Wärmestrom bzw. sinkt der Regelungsfehler aller drei Zellen weiter ins Negative, wodurch die Zellen zu stark gekühlt werden. Dieses Verhalten ist beim ersten (durchgezogene Linie) Versuch unter den gleichen Randbedingungen nicht zu erkennen.

Die Ergebnisse des ersten Versuchs zeigen, dass die Wärmeleistung im Vergleich zu den Versuchen bei 30 °C Fluidtemperatur weiter sinkt. Nach 200 s Entladung konnte eine maximale Kühlleistung von ca. 2,5 W gemessen werden. Auch die Temperaturspreizung zwischen den Batteriezellen ist während der Entladung auf max. 1,1 K gesunken. Bei dieser Fluidtemperatur werden aufgrund des Temperaturhubs von 3,2 K am Zellmantel Temperaturen von über 40 °C im Inneren der Batteriezellen erwartet. Die Temperaturen liegen nach Korthauer (2013) im Grenzbereich des empfohlenen Temperaturfensters (Korthauer, 2013, S. 166). Welchen Einfluss dies auf die Alterung der eingesetzten Batteriezellen hat, kann nicht bewertet werden, und erfordert spezifische Alterungstests.

Die übermäßige Kühlung der Batteriezellen im zweiten Versuch nach ca. 160 s konnte dem Start des Klimakompressors des Umlaufkühlers zugeschrieben werden. Beobachtungen haben gezeigt, dass der Klimakompressor bei den vorherigen Versuchsreihen durchgehend in Betrieb war. Bei erhöhter Fluidtemperatur gegenüber der Raumtemperatur ist die erforderliche Kühlleistung des Umlaufkühlers zu Versuchsbeginn sehr niedrig oder gleich null. Der Klimakompressor schaltet sich dann bei Erreichen eines thermisch stationären Zustandes vor Versuchsbeginn ab. Erst durch die zusätzliche thermische Leistung der beiden Heizungen während des Versuchs wird zur Einhaltung der Wärmestromvorgabe der Klimakompressor zugeschaltet, was zu einer kurzzeitig übermäßigen Reduktion der Fluidtemperatur führt.

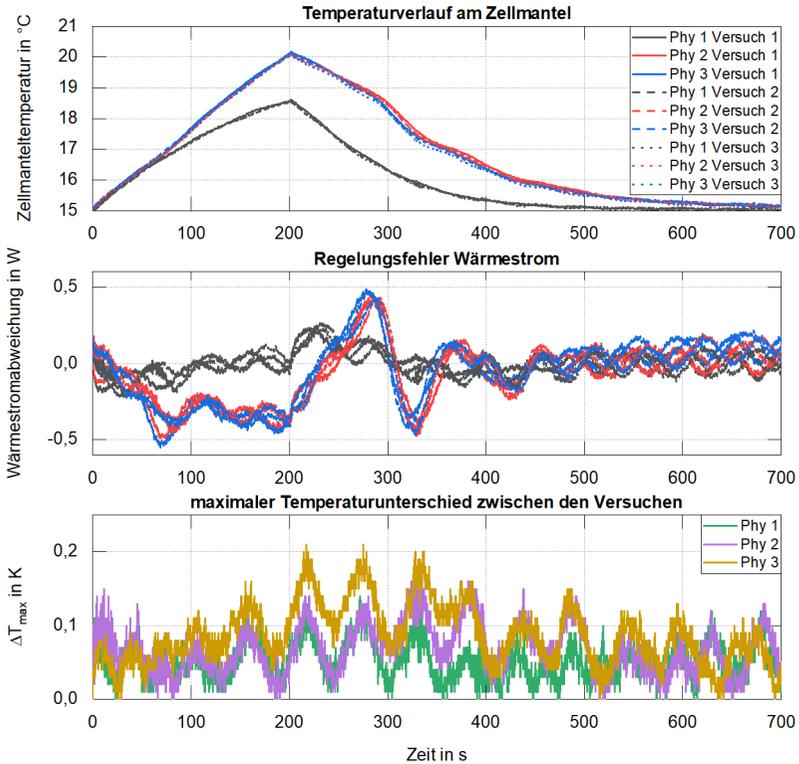


Abbildung 8.25: Streubreite der Zellmanteltemperatur und der Abweichung der Wärmestromregelung der drei physischen Batteriezellen bei einer Fluidtemperatur von 15 °C während einer Entladung mit 64 A auf Batteriemodulebene für 200 s und anschließender Abkühlung bei drei Versuchswiederholungen (oben). Regelungsabweichungen des Wärmestroms für jede Batteriezelle in den drei Versuchswiederholungen (mittig). Betrag der größten Abweichungen zwischen den drei Versuchswiederholungen für die drei Zellmanteltemperaturen (unten). Die initiale Batteriezell- und Fluidtemperatur beträgt 15 °C und die Ausgangsspannung aller drei Zellen liegt zwischen 3,73 V und 3,75 V. (Eisele et al., eingereicht)

Die Versuche bei unterschiedlichen Fluidtemperaturen haben gezeigt, dass der schnellste Temperaturanstieg bei einer Fluidtemperatur von 15 °C auftritt. An diesem Beispiel soll stellvertretend für den Temperaturbereich des Kühlfluides von 15 °C bis 35 °C die Wiederholgenauigkeit der Versuche bewertet werden, um die

Zuverlässigkeit der Versuchsergebnisse zu bewerten. Die Ergebnisse der drei Wiederholungen des letzten Versuchs der Versuchsreihe bei 15 °C Fluidtemperatur sind in Abbildung 8.25 dargestellt.

Während der Entladephase sind die Abweichungen der Zellmanteltemperaturen zwischen den Versuchen klein, schwingen aber über die gesamte Versuchszeit. In der Abkühlphase steigen die Abweichungen an allen Zellen minimal an. Die beschriebenen Grundsicherungen der Fluidtemperatur des Umlaufkühlers sind in den Regelungsfehlern der einzelnen Versuche zu erkennen. Teilweise ist ein Phasenversatz der Schwingungen des Wärmestroms zwischen den Versuchen zu erkennen.

Es wird vermutet, dass die Schwingungen der Temperaturunterschiede am Zellmantel zwischen den Versuchswiederholungen durch den Phasenversatz der Fluidtemperaturschwankung des Umlaufkühlers hervorgerufen werden. Trotz dieser Schwankungen ist die Wiederholgenauigkeit der Versuche mit einer maximalen Temperaturabweichung von 0,2 K sehr genau. Auch der maximale Regelungsfehler von 0,55 W in der Aufheizphase wird als hinreichend genau bewertet. Diese wirkt zudem der Überschätzung der Temperaturspreizung durch die Wärmestrommessung und der maximalen Temperaturen entgegen (vgl. Kapitel 8.2.5).

Fazit:

Im untersuchten Testfall wurde für den Temperaturbereich des simulierten Kühlfluides von 15 °C – 35 °C der Grenzwert von maximal 1,7 K zwischen den Batteriezellen des Moduls nicht überschritten. Die Versuchsergebnisse wurden aufgrund der guten Wiederholgenauigkeit und tolerierbaren Abweichungen in der Wärmestromregelung als vertrauenswürdig eingeschätzt. (Eisele et al., eingereicht)

Mit zunehmendem SoC konnte eine erhöhte Wärmeleistung der Batteriezellen gemessen werden, weshalb die dritte Entladung der Versuchsreihe mit einer OCV von 3,73 V - 3,75 V vor Versuchsstart, bei einer konstanten Fluidtemperatur von 15 °C als thermisch kritischster Zustand im Testfall identifiziert wurde. (Eisele et al., eingereicht)

Abhängig vom initial angenommenen Testfall in den vorgelagerten Entwicklungsgenerationen muss über die Relevanz des genannten Testfalls, oder Ausschnitte davon, für die Validierung in den folgenden beiden Entwicklungsgenerationen (E_4 und E_5) entschieden werden (Eisele et al., eingereicht). Dies wird im Rahmen dieses Entwicklungsbeispiels nicht erörtert. Sollte der Testfall, oder ein Teil davon, welcher

ein thermisch transientes Verhalten abbildet, kritischer als der initial festgelegte sein, würde die Heizleistung der thermischen Batteriezellmodelle in E_4 entsprechend der maximal gemessenen Kühlleistung im Testfall in E_3 eingestellt werden. Hierdurch wird der auslegungskritische, thermisch transiente Zustand in einen stationären Zustand für den Testfall in den nachfolgenden Entwicklungsgenerationen transformiert.

Die Validierung in E_4 zur Finalisierung des Kühldesigns als auch die abschließenden Untersuchungen mit realen Batteriezellen in E_5 erfolgen in gleicher Weise, wie bereits im ersten Entwicklungsbeispiel beschrieben, weshalb diese Schritte nicht wiederholend beschrieben werden.

8.2.7 Evaluation der Modellbildung in E_3

Es wurde eine Validierungsumgebung bestehend aus einem physischen Prüfaufbau und einer gekoppelten Echtzeitsimulation für Untersuchungen von Batteriemodulen aus mantelgekühlten Hochenergiezellen des Formats 18650 entwickelt. Die Validierungsumgebung wurde hinsichtlich den gestellten Anforderungen verifiziert (vgl. Kapitel 7.4) und die Modellgüte eines beispielhaft virtuell modellierten Batteriemoduls in einem Testfall mit thermisch transientem Verhalten untersucht. (Eisele et al., eingereicht)

Das Modell der Batteriezellkühlung und die Temperaturinterpolation über die physischen Batteriezellen zeigten für das beispielhaft betrachtete Batteriemodul unter den Randbedingungen des Testfalls eine hinreichende Genauigkeit zur Bestimmung der Batteriezelltemperaturen. (Eisele et al., eingereicht)

Einschränkungen ergeben sich bei der Abbildung elektrischer Wechselwirkungen zwischen parallelgeschalteten Batteriezellen im simulierten Batteriemodul. Diese werden durch die parallele Verschaltung von zwei der drei physisch vorliegenden Batteriezellen physisch modelliert. Durch die Integration von Shunts zur Strommessung in den parallelen Strängen ergeben sich zusätzliche ohmsche Widerstände. Diese schwächen eine temperaturbedingte ungleiche Stromverteilung zwischen parallelverschalteten Batteriezellen und damit die elektrischen Wechselwirkungen innerhalb des Batteriemoduls. Der beschriebene Zusammenhang wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht quantifiziert und muss testfallabhängig bewertet werden.

Im untersuchten Testfall konnte für eine simulierte Fluidtemperatur von $15\text{ °C} - 35\text{ °C}$ eine hinreichende Regelgenauigkeit des thermischen Koppelsystems und die Wiederholbarkeit der Versuche nachgewiesen werden. Ab einer Fluidtem-

peratur von 35 °C kam es zu unregelmäßigen Ab- und Zuschaltungen des Klimakompressors des Umlaufkühlers, was zu einer kurzzeitig übermäßigen Kühlung aller drei Batteriezellen führte. Die Durchführung von Versuchen wird aus genannten Gründen bei Fluidtemperaturen über 35 °C in der vorgestellten Konfiguration des thermischen Koppelsystems nicht empfohlen. Fehler in der Wärmestromregelung unabhängig vom Zu- bzw. Abschalten des Klimakompressors wurden quantifiziert und für den betrachteten Testfall als hinreichend bewertet. (Eisele et al., eingereicht)

Bei den Entladeversuchen traten unterschiedlich schnelle Temperaturänderungen, Wärmeströme und Temperaturdifferenzen zwischen den Batteriezellen des Batteriemoduls auf. Als Ursache wird aufgrund unterschiedlicher Spannungsverläufe der physischen Batteriezellen bei gleichem Entladestrom ein Temperatur- und SoC-abhängiger ohmscher Widerstand der Batteriezelle vermutet (Huria et al., 2012; Juang et al., 2014). Zudem wurden temperaturabhängige Eigenschaften des simulierten Kühlfluides insofern berücksichtigt, dass für jede untersuchte Temperaturstufe die Stoffwerte und die sich daraus ergebenden Wärmeübergangskoeffizienten an den Batteriezellen neu berechnet wurden. (Eisele et al., eingereicht)

Mit der entwickelten Validierungsumgebung ist es erstmalig möglich, durch gemischt physisch-virtuelle Modellbildung thermische Wechselwirkungen innerhalb eines Batteriemoduls zwischen den Zellen und der Kühlung abzubilden. Für die Kalibrierung der gemessenen Wärmestromdichte wird die Wärmekapazität der getesteten Batteriezelle benötigt, jedoch nicht für die Parametrisierung eines Batteriezellmodells. Im Rahmen dieser Arbeit wurde mangels Messdaten auf Literaturdaten zurückgegriffen. (Eisele et al., eingereicht)

Mit der entwickelten und erprobten Validierungskonfiguration kann die dritte Teilforschungsfrage

Wie kann mittels gemischt physisch-virtueller Modellbildung gemäß des IPEK-XiL-Ansatzes das thermisch transiente Verhalten eines zellmantelgekühlten Batteriemoduls ohne ein parametrisiertes virtuelles Batteriezellmodell abgebildet werden?
--

beantwortet werden.

8.3 Evaluation der Methode und der Validierungsumgebungen

In diesem Kapitel wird die Methode gegenüber der Zielsetzung zur Beantwortung der übergeordneten Forschungsfrage und gegenüber dem Stand der Forschung evaluiert. Hierfür werden die in Kapitel 5.1 erarbeiteten Kriterien zur Bewertung der Eignung hinsichtlich des Frontloadings angewandt. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden Handlungsempfehlungen für die Nutzung der Methode und den beiden umgesetzten physisch-virtuell modellierten Validierungsumgebungen beschrieben.

Im ersten Entwicklungsbeispiel konnte das thermische Verhalten einer Batteriezellkühlung für zylindrische Batteriezellen mit Hilfe der entwickelten Methode im thermisch quasistationären Zustand des Schnellladeprozesses über vier Entwicklungsgenerationen validiert werden. Aufgrund der formatspezifischen Entwicklung des Kühldesigns wurden keine Charakterisierungsmessungen an spezifischen Batteriezellen vorgenommen, sondern die Zellen basierend auf Literaturdaten modelliert (E_1 , E_2 , E_4).

Durch die einfachen virtuellen Modelle (empirisches Modell querumströmter Rohrbündel und CFD-Modell) in stationären Simulationen war der Modellierungs-/ Simulations- und Berechnungsaufwand in den beiden ersten Entwicklungsgenerationen überschaubar. Die vollfaktorielle Parametervariation in E_1 verdeutlicht den geringen Aufwand zur Untersuchung verschiedener Designparameterkombinationen. Der Aufwand der Variation geometrischer Parameter war bei der CFD-Simulation hingegen größer, da vollständig neue Modelle aufgebaut und entsprechende Netzstudien durchgeführt werden mussten. Trotzdem konnten in beiden Entwicklungsgenerationen durch die vergleichsweise einfache Modellierung frühzeitig Zielwerte für das Design der nachfolgenden Entwicklungsgeneration definiert, als auch Lösungsvarianten ausgeschlossen werden.

In E_4 wurde neben einem modularen Prüfaufbau zur physischen Abbildung der Batteriezellkühlung, ein thermisches Batteriezellmodell in Anlehnung an (Hémery et al., 2014) als Koppelsysteme mit integrierter Temperaturmessstelle entwickelt. Die virtuelle Modellbildung besteht hierbei lediglich in der Umrechnung des realen Ladestroms des Batteriemoduls in einen Sollstrom des thermischen Batteriezellmodells, welcher durch das Netzgerät bereitgestellt wird. Damit wird eine äquivalente Wärmeleistung zwischen realen Batteriezellen und den physischen Batteriezellmodellen ermöglicht. Durch einen Abgleich der Temperaturverteilung mit realen Batteriezellen konnte die Modellbildung des Koppelsystems für den thermisch stationären Fall validiert werden. (Eisele et al., 2018)

Nach initialem Aufwand für die Fertigung der thermischen Batteriezellmodelle und dem modularen Prüfaufbau zur Modellierung der Kühlung, verlief die Anpassung und Validierung unterschiedlicher Kühl designs effizient, da nur Teile des Prüfaufbaus adaptiert wurden. Die Modellbildung der Koppelsysteme musste aufgrund der Beschränkung auf einen Testfall nicht adaptiert werden. Der Ressourcen- und Sicherheitsaufwand mit dem Betrieb von zwei Netzgeräten bis 60 V und einem maximalen Strom von $< 3,6$ A war vergleichsweise niedrig gegenüber den anschließenden Versuchen mit realen Batteriezellen in E_5 .

Bei Versuchen mit dieser Entwicklungs generation konnte ein großer Erkenntnisgewinn verzeichnet werden. Neben dem Einfluss strömungsführender Geometrien auf die Temperaturverteilung im Zellverbund wurden Erkenntnisse gewonnen, die in die Konstruktion und mechanische Auslegung des Batteriemoduls einfließen. Letztgenannte Erkenntnisse können im Zuge einer rein thermischen Auslegung mit Simulationsmethoden, wie in der vorgelagerten Entwicklungs generation, nicht erlangt werden. Diese wurden aufgrund der Modellbildung explizit ausgeschlossen. Die frühzeitige physische Modellierung der Batteriezellkühlung ermöglichte es, unvorhergesehene Störgrößen auch außerhalb der thermischen Auslegung frühzeitig im Entwicklungs- und Validierungsprozess zu identifizieren und Gegenmaßnahmen einzuleiten (Eisele et al., 2018). In diesem Entwicklungsbeispiel wurden Dichtungsprobleme identifiziert und durch zusätzliche Validierungsaktivitäten gelöst, welche im Rahmen der Arbeit nicht näher beschrieben wurden¹⁸. Dadurch kam es aus Sicht der thermischen Auslegung des Batteriemoduls zu Verzögerungen. Gleichzeitig wird aus ganzheitlicher Sicht der Modulauslegung, die Lernkurve durch den frühen Wechsel in die physische Domäne gesteigert.

Erst zur finalen Absicherung des Kühl designs wurden die thermischen Modelle in E_5 durch reale Batteriezellen ersetzt. Hierbei ergab sich, auch aus Sicherheitsgründen, bedingt durch höherer Ströme (55 – 83 A) und der Kurzschlussgefahr beim Einsatz realer Zellen, ein gesteigerter Versuchsaufwand. Hinzu kamen eine reduzierte Versuchsgeschwindigkeit durch zwischengelagerte Lade- bzw. Entladungen der Batteriezellen auf Referenzzustand. Dies verdeutlicht die Effizienz der Validierungsaktivitäten, in der vorgelagerten Entwicklungs generation E_4 , mit gemischt physisch-virtueller Modellierung nach dem IPEK-XIL-Ansatz.

¹⁸ Diese Validierungsaktivitäten sind gemäß der entwickelten Methode den „Aktivitäten zur Abschätzung des Parametereinflusses auf nicht thermische Zielgrößen“ zuzuordnen.

Die Eignung der Modellbildung für eine kontinuierliche entwicklungsbegleitende Validierung durch aufeinander aufbauende Entwicklungsgenerationen und Validierungsumgebungen konnte durch die Beantwortung der ersten Teilforschungsfrage bereits in Kapitel 8.1.5 nachgewiesen werden.

Tabelle 8.5 fasst die beschriebene Kriterien Erfüllung der Modellbildung im ersten Entwicklungsbeispiel hinsichtlich der Unterstützung des Frontloadings zusammen.

Tabelle 8.5: Bewertung der Modellbildung im ersten Entwicklungsbeispiel zur Validierung des thermisch stationären Verhaltens eines Batteriemoduls hinsichtlich der Eignung zur Unterstützung des Frontloadings in der frühen Entwicklungsphase. Legende: grün – hohe; gelb – mittlere Eignung für das Frontloading in der frühen Entwicklungsphase; weiß – Kriterium aufgrund der Modellbildung nicht anwendbar

Modellierungsdomäne	Kriterien	E ₁	E ₂	E ₄	E ₅
physisch u. / o. virtuell	Eignung für kontinuierliche und iterative Validierung des Kühldesigns				
	Aufwand zur Modellparametrisierung				
virtuell	initialer Modellierungsaufwand				
	Simulations-/Berechnungszeiten				
	Aufwand für Parameteranpassungen zur iterativen Validierung				
	Zeit und Ressourcen zur Anpassung des Kühldesigns				
physisch	zeiteffiziente Versuchsdurchführung				
	Ressourcen- und Sicherheitsanforderungen zur zeitlich flexiblen Versuchsdurchführung				

Die Modellbildung im ersten Entwicklungsbeispiel konnte somit positiv im Sinne der Entwicklerunterstützung zum Frontloading bewertet werden.

Im zweiten Entwicklungsbeispiel wurde, aufbauend auf E_1 und E_2 des ersten Entwicklungsbeispiels, das thermisch transiente Verhalten eines Batteriemoduls beim Entladen über den SoC und bei verschiedenen Fluidtemperaturen untersucht. Ziel war es, thermisch transiente Zustände hinsichtlich der Relevanz für die thermische Auslegung des Batteriemoduls inklusive der Kühlung für eine spezifisch eingesetzte Batteriezelle zu bewerten. Diese müssen ggf. in stationäre, adäquate Bedingungen in einen Testfall für die Validierung in der folgenden Entwicklungsgeneration E_4 überführt werden.

Die Validierungsumgebung in E_4 wird, aufgrund abweichender Wärmeleitfähigkeiten und Wärmekapazität der thermischen Batteriezellmodelle von realen Batteriezellen und der hohen thermischen Masse des physischen Aufbaus nicht für thermisch transiente Versuche empfohlen (Eisele et al., 2018). Hémerly et al. (2014) nutzen hingegen die ähnlich modellierten thermischen Ersatzbatteriezellen für transiente Untersuchungen an Luft- und PCM-gekühlten Batteriemodulen. Allerdings ergeben sich schon beim Abgleich zwischen Ersatzmodellen und realen Batteriezellen bei passiver Kühlung unter konstantem Entladestrom von 2 C und 3 C, Temperaturunterschiede an der Mantelfläche von ca. 1,5 K (Hémerly et al., 2014). Dies lässt sich durch den großen Unterschied in der radialen Wärmeleitfähigkeit zwischen realen Zellen und den thermischen Modellen um den Faktor 100 erklären. Über den Stahlkörper wird im transienten Zustand die Wärme schneller in radiale Richtung abgeführt. In der realen Batteriezelle baut sich hingegen ein größerer Temperaturgradient in radialer Richtung auf, wodurch die mittlere Temperatur und die Enthalpie in der Zelle ungleich der des thermischen Modells sind. Dieser Temperaturunterschied im Zellwickel wird durch eine performante Flüssigkeitskühlung, wie sie im Entwicklungsbeispiel untersucht wurde, verstärkt.

Zur Untersuchung transienter Zustände wurde stattdessen die Validierungsumgebung der optionalen Entwicklungsgeneration E_3 angewandt. Für die virtuelle Modellbildung wurde, neben den Daten der Kühlflüssigkeit, nur die Wärmekapazität, das Gewicht sowie die äußeren geometrischen Abmessungen der verwendeten Batteriezelle benötigt. Der Aufwand für Charakterisierungsmessungen war entsprechend gering. Im Rahmen dieser Arbeit war eine Vermessung der Wärmekapazität nicht möglich, weshalb Literaturdaten verwendet wurden.

Statt eines parametrisierbaren Batteriezellmodells kommen drei physische Batteriezellen zum Einsatz, die thermisch und elektrisch in den Prüfaufbau integriert werden. Hierbei wurden im Gegensatz zu (Christen et al., 2017) bei der Wärmestromregelung nicht nur Wärmeströme zwischen der Batteriezellkühlung und einer (großformatigen) Zelle modelliert. Thermische Wechselwirkungen zwischen den

Batteriezellen über das Kühlmedium, die zu einem Temperaturgradienten im Batteriemodul führen, konnten über die selektive Wärmestromregelung an drei zylindrischen Batteriezellen abgebildet werden. Hierfür wurde eine Echtzeitsimulation der Batteriezellkühlung entsprechend des Entwicklungsbeispiels implementiert.

Zudem werden in Grenzen elektrische Wechselwirkungen zwischen den Zellen durch deren elektrische Verschaltung abgebildet. Die Validierungskonfiguration inkl. der entwicklungspezifischen Modellierung der Batteriezellkühlung wurde beispielhaft im Testfall eines Stromsprungs zur Entladung des Batteriemoduls angewandt und die Modellgüte mittels Simulationen bewertet.

Der Initiale Modellierungsaufwand der Batteriezellkühlung war aufgrund der Komplexität der Kühlung und den notwendigen Verifikationsschritten über weitere Simulation (CFD aus E_2) erhöht. Auf Grundlage der erstellten Modellbibliothek und der dazugehörigen automatisierten Modellerzeugung, ist bei der Wiederverwendung dieser Validierungsumgebung mit einem deutlich reduzierten Modellierungsaufwand zu rechnen. Parameteränderungen eines Batteriemodulmodells können schnell erfolgen. Anpassungen am physischen Aufbau sind, außer beim Austausch der Batteriezellen nicht erforderlich. Die Simulationszeit entspricht der realen Versuchsdauer, was zu schnellen Ergebnissen führt. Der Einsatz realer Batteriezellen bedingt allerdings zwischenzeitliche Lade- und Temperierphasen, um den elektrischen und thermischen Ausgangszustand vor einer Versuchswiederholung herzustellen, was eine zeiteffiziente Versuchsdurchführung etwas hemmt. Allerdings kommen im Vergleich zu E_5 nur drei einzelne Batteriezellen zum Einsatz, was aufgrund der niedrigen Ströme und Spannungen zu geringen Ressourcen- und Sicherheitsanforderungen führt. Hierdurch konnte ohne Aufbau eines vollständig physischen Prototyps eines Batteriemoduls das thermisch transiente Verhalten im Entladebetrieb, abhängig vom der Fluidtemperatur und dem SoC des Batteriemoduls, frühzeitig in der Entwicklung bewertet werden.

Die Verknüpfung der Validierungsumgebung aus E_4 mit den anderen Entwicklungsgenerationen, sowie der Einordnung in die Gesamtmethode, wurde bereits in Kapitel 8.2.6 beschrieben und positiv evaluiert. Tabelle 8.6 fasst die beschriebene Kriterienfüllung der Modellbildung in E_3 im zweiten Entwicklungsbeispiel hinsichtlich der Unterstützung des Frontloadings in der frühen Phase der Entwicklung nochmals zusammen.

Auch die Modellbildung in E_3 konnte somit über das zweite Entwicklungsbeispiel positiv im Sinne der Entwicklerunterstützung zum Frontloading bewertet werden.

In beiden Entwicklungsbeispielen wurde gezeigt, wie gemischt physisch-virtuelle Modellbildung nach dem IPEK-XiL-Ansatz im Entwicklungs- und Validierungsprozess eingesetzt werden kann. Die Validierungsaktivitäten wurden hierfür nicht ausschließlich zur Absicherung, sondern zur kontinuierlichen Wissensgenerierung genutzt. So wurde in E₃ Wissen über das temperatur- und SoC-abhängige thermische Verhalten des Batteriemoduls im Entladebetrieb zur Spezifizierung des Testfalls in E₄ generiert. Über die thermisch stationäre Validierung in E₄ wurde hingegen Wissen zur iterativen Konkretisierung und Finalisierung des Kühldesigns erzeugt.

Tabelle 8.6: Bewertung der Modellbildung in Entwicklungsgeneration E₃ im zweiten Entwicklungsbeispiel zur Validierung des thermisch transienten Verhaltens eines Batteriemoduls hinsichtlich der Eignung zur Unterstützung des Frontloadings in der frühen Entwicklungsphase. Legende: grün – hohe; gelb – mittlere Eignung für das Frontloading in der frühen Entwicklungsphase; weiß – Kriterium aufgrund der Modellbildung nicht anwendbar

Modellierungsdomäne	Kriterien	E ₃
physisch u. / o. virtuell	Eignung für kontinuierliche und iterative Validierung des Kühldesigns	grün
virtuell	Aufwand zur Modellparametrisierung	grün
	initialer Modellierungsaufwand	gelb
	Simulations-/Berechnungszeiten	grün
	Aufwand für Parameteranpassungen zur iterativen Validierung	grün
physisch	Zeit und Ressourcen zur Anpassung des Kühldesigns	weiß
	zeiteffiziente Versuchsdurchführung	gelb
	Ressourcen- und Sicherheitsanforderungen zur zeitlich flexiblen Versuchsdurchführung	grün

Zusammenfassend konnte in dieser Arbeit ein Beitrag zur frühzeitigen, entwicklungsbegleitenden, zeit- und ressourceneffizienten Validierung des thermischen

Verhaltens von Batteriemodulen durch entsprechende physische, virtuelle und gemischt physisch-virtuelle Modellbildung geleistet werden. Der unter Anwendung des IPEK-XiL-Ansatzes generierte Wissenszuwachs in der frühen Entwicklungsphase unterstützt das Frontloading, womit die übergeordnete Forschungsfrage

Wie kann die Validierung nach dem IPEK-XiL-Ansatz die Entwicklung von Batteriezellkühl designs für Batteriemodule aus kleinformatischen, zylindrischen Zellen mit konvektiver Mantelkühlung in der frühen Phase der Produktentwicklung das Frontloading unterstützen?

beantwortet werden konnte.

8.3.1 Handlungsempfehlung für die Methodenanwendung

In diesem Kapitel wird die Übertragbarkeit der Methode auf andere Mantelkühlungsarten für zylindrische Batteriezellen diskutiert. Hierfür werden Anwendungsgebiete und die notwendigen Ressourcen für die Methodennutzung definiert.

Die Validierung bezieht sich dabei mit Ausnahme von E_3 auf stationäre Zustände, in denen durch die Batteriezellen eine quasi konstante Wärmeleistung erzeugt wird. Im Folgenden werden die Randbedingungen einer homogenen Mantelkühlung aufgeführt und erläutert, um die Methode bei der entwicklungsbegleitenden Validierung einzusetzen:

- Die Methode ist für unterschiedliche zylindrische Batteriezellformate geeignet.
- Abbildbar sind durch erzwungene Konvektion, in erster Näherung, homogen am Mantel gekühlte Batteriezellen.
- Abbildbare Kühlungsform: Querumströmung von Batteriezellen
 - o Andere Anströmungsrichtungen erfordern Modellanpassungen.
- Nicht geeignet für die Validierung von partieller Zellmantelkühlung, die zu einer inhomogenen Zellmanteltemperatur führt.

Die entwickelte Methode ist für die entwicklungsbegleitende Validierung von Batteriezellkühlungen für zylindrische Batteriezellen unterschiedlicher Formate geeignet, die durch erzwungene Konvektion in erster Näherung homogen am Zellmantel gekühlt werden. Hierbei kann das Kühlfluid als Flüssigkeit oder als Gas verwendet werden. Bei letztgenannter Variante muss die Kompressibilität des Mediums be-

rücksichtigt werden. Da das Berechnungsmodell der E_1 nur quer- und schräggeströmte Rohrbündel abbilden kann (Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 2013, S. 820–823), ist die Richtung des Kühlstroms für die Validierungsmethode entsprechend eingeschränkt. Die Entwicklung eines schräg angeströmten Zellverbundes erfordert zudem in E_2 eine dreidimensionale Modellbildung in der CFD-Simulation. Für die Anströmung eines Zellverbundes in axiale Richtung müssten in E_1 andere Berechnungsmodelle wie z. B. „Strömung im Ringspalt“ (Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, 2013, S. 793–797) verwendet werden.

Eine partielle Kühlung des Zellmantels wie sie bspw. Zhao, Rao und Li (2015) untersucht hatten, kann über CFD-Simulationen validiert werden (E_2). Empirische Modelle mit konzentrierten Parametern können die Temperaturverläufe und inhomogenen Wärmeübergänge an einer Zelle nicht abbilden (E_1). Das temperatur- und SoC-abhängige thermische Verhalten unter Einsatz einer spezifischen Batteriezelle kann bei partieller Mantelkühlung mit E_3 nicht untersucht werden. Die Batteriezellen werden in den Testkammern der Validierungsumgebung homogen am Mantel temperiert, um über Messung der Wärmestromdichte den Wärmestrom über die Mantelfläche zu berechnen.

In E_4 müsste für die Validierung des thermisch stationären Verhaltens unter partieller Zellmantelkühlung die Modellierung der thermischen Batteriezellmodelle angepasst werden (vgl. Shah, McKee, Chalise & Jain, 2016). Die anisotropen Wärmeleitfähigkeiten in radialer und tangentialer Richtung des Zellwickels müssten physisch modelliert werden. Grund hierfür ist der tangentielle Anteil des Wärmestroms, der bei einer homogen am Umfang temperierten Zelle gegen Null geht und eine isotrope Modellierung der Zelle zulässt. Gleiches gilt für axial asymmetrisch temperierte Batteriezellen, bei denen ein Temperaturgradient in axialer Richtung zu erwarten ist (Zhao, Rao & Li, 2015, S. 163). In diesem Fall überlagern sich radiale mit axialen Wärmeströmen, die zu einer charakteristischen Temperaturverteilung in der Zelle führen. Auch hier ist eine anisotrope Modellierung der Wärmeleitfähigkeit im physischen Batteriezellmodell notwendig. Wie schon in Kapitel 6.4 erläutert, wird eine solche aufwendige physische Modellierung im Sinne einer zeit- und ressourceneffizienten Validierung aufgrund der Vielzahl an Zellen in einem Batteriemodul nicht empfohlen.

Entspricht die Batteriezellkühlung den formulierten Anforderungen und stehen die notwendigen Ressourcen zur Nutzung und Entwicklung der Validierungsumgebung zur Verfügung, kann die Methode angewendet werden.

8.3.2 Handlungsempfehlung für die gemischt physisch-virtuell modellierte Validierungsumgebung zur Abbildung thermisch transienter Zustände

Für Untersuchungen mit Hochenergiezellen des Formats 18650 und einer leistungsstarken Kühlung durch Quenumströmung der Batteriezellen mit Kühlflüssigkeit wurde nachgewiesen, dass die Validierungsumgebung den Anforderungen der Validierung in der frühen Entwicklungsphase genügt. In diesem Kapitel werden zunächst die Grenzen der Validierungsumgebung in der Anwendung genannt. Anschließend werden diese erläutert und mögliche Adaptionen zur Erweiterung des Anwendungsfeldes der Validierungsumgebung aufgezeigt:

- Die Abbildung anderer Kühlformen als der Quenumströmung zylindrischer Batteriezellen erfordern eine Anpassung der Modellbibliothek zur Modellierung des virtuellen Batteriemoduls.
- Geometrische Zellanordnungen und die elektrische Verschaltung der Zellen im virtuellen Batteriemodul sind fest gekoppelt.
- Eine testfallspezifische Überprüfung der Dynamik des thermischen Koppelsystems zur Abbildung von Temperaturänderungen wird empfohlen.
- Abkühlvorgänge im Batteriemodul durch dominant reversible Effekte beim Laden oder Entladen können nicht abgebildet werden.
- Die Abweichungen der linearen Temperaturinterpolation sowie Interpolation des elektrischen Zustandes der Batteriezellen im Batteriemodul gilt es testfallspezifisch zu evaluieren.
- Der Aufwand für die Adaption des elektrischen Koppelsystems zur Untersuchung anderer elektrischer Lastfälle als dem Entladen von Hochenergiezellen, wird als gering eingestuft.
- Der Aufwand für die Adaption des thermischen Koppelsystems für andere zylindrische Zellformate wird höher eingestuft.

Durch die rein virtuelle Modellierung des Batteriemoduls inkl. der Temperierung können Parameter wie Kühlvolumenstrom, geometrische Größen, Anzahl der Batteriezellen etc. effizient variiert und untersucht werden. Die Zellanordnung und elektrische Verschaltung der Batteriezellen zu einem Batteriemodul erfolgt automatisiert unter Verwendung einer Modellbibliothek. Dies ermöglicht eine einfache Adaption des zu untersuchenden Batteriemoduls zur Bewertung unterschiedlicher Modul- und Kühlkonfigurationen. Die maximal abbildbare Modulgröße und die Verschaltung der

Zellen ist durch das Skript auf eine 12P16S¹⁹ Verschaltung limitiert. Wird von der konvektiven Kühlung durch Querumströmung der Batteriezellen abgewichen, müssen die in der Modellbibliothek hinterlegten Fluidelemente entsprechend ersetzt und ggf. deren Verschaltung angepasst werden.

Die Korrelation zwischen geometrischer Anordnung und elektrischer Verschaltung der Batteriezellen (Batteriezellen senkrecht zur Strömungsrichtung = parallel geschaltete Batteriezellen) schränkt die abbildbaren Modulkonfigurationen bei Querumströmung der Batteriezellen ein. Eine Aufhebung dieser Korrelation erfordert eine Adaption des Algorithmus zur Bestimmung des elektrischen Zustandes der virtuellen Zellen.

Bei Untersuchungen mit reduzierter Kühlleistung und hoher Wärmeleistung der Zellen gilt testfallspezifisch zu überprüfen, ob die Dynamik der Wärmestromregelung des thermischen Koppelsystems hinreichend ist. So wird bspw. die Simulation einer Kühlung durch natürliche Konvektion in Kombination mit hohen Lade- oder Entladeraten, wie sie in beiden Entwicklungsbeispielen untersucht wurden, mit der umgesetzten Validierungsumgebung nicht empfohlen.

Auch bei der Abbildung von thermischen Quelltermen ergeben sich Grenzen für den Einsatz des thermischen Koppelsystems. Überwiegen beim Entladen oder Laden reversible Effekte wie bei der Zellchemie LCO, die zu einer Abkühlung der Batterie-zelle führen (Jeon & Baek, 2011; Jeon, 2014; Viswanathan et al., 2010), können sinkende Zelltemperaturen entlang der Strömung mit der entwickelten Validierungsumgebung nicht abgebildet werden.

Die Grenzen der Temperaturinterpolation als auch der Interpolation des elektrischen Zustands sind noch unbekannt. Mit zunehmender Größe des Batteriemoduls und steigender Zellanzahl sowie mit zunehmenden Temperaturunterschieden im Batteriemodul sinkt die Genauigkeit der Temperaturinterpolation. Auch hier gilt es testfallspezifisch zu überprüfen, ob die lineare Interpolation eine hinreichende Modellgüte liefert.

Für die Untersuchung von Hochleistungszellen gleichen Zellformats müssten lediglich die elektrischen Lasten durch Geräte der nächstgrößeren Leistungsklasse sowie Shunts mit höherer Stromtragfähigkeit verbaut werden. Die Simulation von Re-kuperations- und Ladevorgängen wären durch bidirektionale oder elektrisch

¹⁹ 12P16S: je 12 Batteriezellen sind parallelverschaltet und in 16-facher Ausführung seriell miteinander verschaltet

verschaltete Ladegeräte und elektronische Lasten möglich. Der Aufwand für die Anpassung des elektrischen Koppelsystems ist somit als relativ geringfügig anzusehen.

Untersuchungen mit anderen zylindrischen Zellformaten wären dahingegen mit einem höheren Konstruktions- und Verifikationsaufwand verbunden. In diesem Fall sind die Testkammern inkl. der Strömungsgleichrichter anzupassen und eine homogene Strömung am Zellumfang zu verifizieren.

8.3.3 Handlungsempfehlung für die gemischt physisch-virtuell modellierte Validierungsumgebung zur Abbildung thermisch stationärer Zustände

Im Vergleich zur Validierungsumgebung aus E₃ ist der Einsatzbereich dieser Validierungsumgebung eingeschränkter. Was sich durch den hohen Anteil an entwicklungspezifischer, physischer Modellbildung, besonders im Fall der Batteriezellkühlung erklären lässt. Die Einsatzmöglichkeiten der Validierungsumgebung und deren Teilsysteme thermischer Batteriezellmodelle und modularer Prüfaufbau zur Abbildung der Batteriezellkühlung werden im Folgenden genannt und anschließend beschrieben:

- Der modulare Prüfaufbau ist für die Validierung unterschiedlicher Modulgrößen und Anordnungen des Zellformats 18650 inkl. Fluidführung geeignet.
- Untersuchungen mit Zellen des Formats 21700 sind mit konstruktiven Anpassungen des Prüfaufbaus denkbar.
- Vereinfachte Abbildung thermisch stationärer Zustände in Batteriemodulen durch steuerbare Wärmeleistung der physischen Batteriezellmodelle.
- Keine Beeinflussung des Strömungsverhaltens am Zellmantel durch physische Batteriezellmodelle mit innenliegenden Temperatursensoren.

Der modulare Prüfaufbau kann für die entwicklungsbegleitende Validierung unterschiedlicher Modulgrößen und Anordnungen des Zellformats 18650 inkl. Fluidführung genutzt werden. Tests an luftgekühlten Zellverbänden, wie sie bspw. von Jilte et al. (2019) simulativ untersucht wurden, wären ebenso denkbar, wie der Einsatz anderer Kühlflüssigkeiten.

Der Einsatz von Zellen des Formats 21700 im Prüfaufbau wäre bei gleicher oder kleinerer Umströmungshöhe am Zellmantel denkbar. Die notwendigen konstruktiven Anpassungen gilt es abzusichern. Entsprechend wären hierfür neue thermische Batteriezellmodelle mit einem den Zellmaßen angepassten Stahlrohr notwendig.

Durch die steuerbare Wärmeleistung des Batteriezellmodells, kann die Verlustleistung unterschiedlicher Batteriezellen in verschiedenen thermisch stationären Zuständen vereinfacht abgebildet werden. Auch können thermische Bedingungen in Testfällen abgebildet werden, die mit aktuell am Markt verfügbaren Zellen nicht möglich sind, ohne diese zu schädigen. Durch Adaption eines Batteriezellmodells zur höheren Leistungsabgabe, könnte die Temperaturlausbreitung im Batteriemodul beim thermischen Durchgehen einer einzelnen Batteriezelle untersucht werden. Auch in diesem Fall sollte der thermisch transiente Prozess durch einen äquivalenten thermisch stationären Zustand für den Test im Prüfaufbau approximiert werden.

Abschließend ist die innenliegende Messstelle des thermischen Batteriezellmodells direkt unter der Mantelfläche zu erwähnen. Diese Messstelle hat im Vergleich zur Sensorik auf der Mantelfläche realer Batteriezellen keinen Einfluss auf den Wärmetransport an der Zelloberfläche. (Eisele et al., 2018) Entsprechend kann auch die Kühlung bei sehr geringen Zellabständen untersucht werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Dieses Kapitel fasst zunächst die wesentlichen Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammen und gibt im zweiten Teil einen Ausblick auf mögliche anknüpfende Forschungsarbeiten.

9.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei gemischt physisch-virtuell modellierte Validierungsumgebungen zur thermischen Analyse von Batteriemodulen mit querumströmten Zellen des Formats 18650 entwickelt. Entsprechend der übergeordneten Zielsetzung, das Frontloading in der frühen Phase der Entwicklung von Batteriezellkühlungen zu unterstützen, wurde der Einsatz der Validierungsumgebungen über Entwicklungsgenerationen des zu entwickelnden Batteriemoduls strukturiert. Neben der gemischt physisch-virtuellen Modellbildung kommen auch virtuelle und physische Modellansätze in den aufeinander aufbauenden Entwicklungsgenerationen zum Einsatz.

Die entwickelte Methode beinhaltet fünf Entwicklungsgenerationen (E_1 bis E_5) die sequenziell durchlaufen werden. Diese sieht auch vor, dass entwicklungspezifische Generationen übersprungen werden können. Ausgangspunkt der Methode bildet ein initialer auslegungsrelevanter Testfall des zu entwickelnden Batteriemoduls sowie ein initialer Parameterraum für das Design der Batteriezellkühlung.

In E_1 kommt ein konzentriertes Parametermodell nach dem Stand der Technik zum Einsatz, um den initialen Parameterraum der Kühlkonzepte durch Vergleich der Parametersensitivitäten hinsichtlich der Wärmeabfuhr einzuzugrenzen.

In E_2 werden mittels stationärer 2D-CFD-Simulationen, Zelltemperaturen und die Temperaturverteilung in einem Ausschnitt des Batteriemoduls unter Parametervariation verglichen, um den konkretisierten Parameterraum aus E_1 weiter einzuzugrenzen.

Die optionale Entwicklungsgeneration E_3 nutzt die gemischt physisch-virtuelle Modellbildung nach dem IPEK-XiL-Ansatz. Hierbei werden drei physische Batteriezellen thermisch und elektrisch mit einer Echtzeitsimulation des zu entwickelnden Batteriemoduls gekoppelt. Über das thermische und elektrische Verhalten der drei

Zellen wird mithilfe des Simulationsmodells, welches sowohl die Batteriezellkühlung als auch die elektrische Verschaltung der Batteriezellen abbildet, das thermische und elektrische Verhalten des Batteriemoduls approximiert. Dadurch können thermisch transiente Vorgänge untersucht werden, ohne ein virtuelles Batteriezellmodell zu parametrisieren. Ziel dieser Entwicklungsgeneration ist die Bewertung des temperatur- und SoC-abhängigen thermisch transienten Verhaltens des Batteriemoduls für eine spezifische Batteriezele in potenziell auslegungsrelevanten Testfällen. Neben dem konkretisierten Parameterraum können aus den Untersuchungen zusätzlich zum initialen Testfall auch ergänzende auslegungsrelevante Testfälle für die beiden nachfolgenden Entwicklungsgenerationen abgeleitet werden.

Der Prüfaufbau sowie dessen Regelung und Steuerung als Teil des thermischen und elektrischen Koppelsystems der Validierungsumgebung wurden im Rahmen dieser Arbeit für das Zellformat 18650 aufgebaut und hinsichtlich des definierten Zielsystems verifiziert. Zudem wurden Interpolationsvorschriften zur Approximation des thermischen und elektrischen Verhaltens des Batteriemoduls auf Basis der messtechnisch erfassten thermischen und elektrischen Zustände der drei physischen Zellen entwickelt.

Die zweite gemischt physisch-virtuell modellierte Validierungsumgebung ist der Entwicklungsgeneration E_4 zugeordnet. Diese nutzt im Gegensatz zu E_3 keine realen Batteriezele und auch kein Simulationsmodell der Batteriezellkühlung. Der Schwerpunkt liegt auf der physischen Modellbildung. Durch den Einsatz thermischer Ersatzbatteriezele mit steuerbarer Heizleistung kann die Wärmeleistung im virtuellen modelliert und variiert werden. Die Ersatzzele kommen in Kombination mit einem physischen Prüfaufbau, welcher die Batteriezellkühlung vollständig abbildet, für die iterative Designanpassung zum Einsatz. Der im Rahmen der Arbeit entwickelte Prüfaufbau ist modular, um geometrische Parameter der Batteriezellkühlung mit geringem Aufwand anzupassen (z. B. Zellanordnung, Zellabstand, strömungsführende Geometrien).

Unter Vergleich der Zelltemperaturen der thermischen Ersatzbatteriezele und der sich ergebenden Temperaturverteilung im Batteriemodul wird der Parameterraum weiter bis zum finalen Kühldeign konkretisiert. Zusätzlich zu den Parametern aus den vorherigen Entwicklungsgenerationen werden dabei weitere Parameter berücksichtigt, die aufgrund der Modellbildung in den vorangegangenen Entwicklungsgenerationen vernachlässigt wurden (z. B. strömungsführende Geometrien an den Modulrändern).

Abschließend wird das finale Kühl-Design in E_5 unter Einsatz realer Batteriezellen validiert. Der in E_4 genutzte Prüfaufbau wird hierfür mit realen Batteriezellen bestückt. Das Kühl-Design wird unter auslegungsrelevanten Testfällen hinsichtlich maximal zulässiger Zellmanteltemperaturen und Temperaturunterschieden zwischen den Zellen final abgesichert.

Die beschriebene Methode zur strukturieren Validierung wurde in dieser Arbeit an zwei Entwicklungsbeispielen mit demselben Kühlprinzip aber unterschiedlichen Zellanordnungen erprobt. In beiden Fällen wurde ein 48 V Batteriemodul aus 96 Zellen des Formats 18650, welche mit Kühlfüssigkeit quenumströmt werden, entwicklungsbegleitend validiert:

Im ersten Entwicklungsbeispiel sollte durch die Batteriezellkühlung aus thermischer Sicht die Schnellladefähigkeit des zu entwickelnden Batteriemoduls gewährleistet werden. Thermisch transiente Vorgänge und zellspezifische Temperatur- und SoC-Abhängigkeiten im thermischen Verhalten spielten bei dieser Entwicklung eine untergeordnete Rolle. Deshalb wurden alle Entwicklungsgenerationen bis auf E_3 durchlaufen. Ausgehend von fünf Zellanordnungen wurde die Batteriezellkühlung über vier Entwicklungsgenerationen hinweg bis zum finalen Kühl-Design des Batteriemoduls konkretisiert und final unter Einsatz realer Batteriezellen hinsichtlich der thermischen Anforderungen abgesichert.

Die Modellbildung und die gefällten Entscheidungen auf Basis der Validierungsergebnisse der jeweiligen Entwicklungsgeneration (E_1 , E_2 , E_4 und E_5) wurden positiv evaluiert.

Ausgehend von E_1 und E_2 aus dem ersten Entwicklungsbeispiel wurde im zweiten Anwendungsbeispiel die Validierung des thermisch transienten Verhaltens eines Batteriemoduls unter dem Einfluss von SoC und Fluidtemperatur im Entladebetrieb in E_3 untersucht. Es wurde ein konzentriertes Parametermodell der Batteriezellkühlung entwickelt und mittels der CFD-Simulationen aus E_2 verifiziert.

Unter den elektrischen Bedingungen eines konstanten Entladestroms wurde das thermische Verhalten des Batteriemoduls für eine Ausprägung der Batteriezellkühlung bei verschiedenen Ausgangs-SoC und Fluidtemperaturen untersucht. Die Zelltemperaturen und die Temperaturunterschiede zwischen den Zellen konnten im thermisch transienten Zustand quantifiziert und bewertet werden. Es wurde nachgewiesen, dass der im Entwicklungsbeispiel maximal definierte Temperaturunterschied zwischen den Zellen in keinem der untersuchten Testfälle überschritten wurde.

Die Modellbildung in den Entwicklungsgenerationen sowie deren Verknüpfung zur Unterstützung des Frontloadings in der frühen Entwicklungsphase wurde über die Methodenerprobung in den zwei Entwicklungsbeispielen positiv evaluiert. Die dafür herangezogenen Bewertungskriterien wurden im Rahmen dieser Arbeit auf Grundlage des Standes der Forschung erarbeitet. Damit wurde die übergeordnete Zielsetzung der Arbeit erreicht.

9.2 Ausblick

Handlungsempfehlungen für die entwickelte Methode und die physisch-virtuell modellierten Validierungsumgebungen wurden bereits in Kapitel 8.3 beschrieben. Mögliche Erweiterungen der Methode und deren Implikation auf die Validierungsumgebungen der Entwicklungsgenerationen wurden ebenfalls genannt.

Das Potenzial der gemischt physisch-virtuellen Modellbildung zur Validierung von Batteriezellkühlungen im Sinne des Frontloadings wurde im Rahmen dieser Arbeit am Beispiel der Querumströmung zylindrischer Zellen mittels Kühlfüssigkeit aufgezeigt. Um das Potenzial auch für andere Arten der homogenen Mantelkühlung zylindrischer Zellformate auszuschöpfen, werden folgende anknüpfende Forschungsarbeiten empfohlen:

- Anwendung der Validierungsmethode für Batteriemodule mit aktiver Luftkühlung
- Steigerung der Regelungsdynamik des thermischen Koppelsystems in E_3
- Reduktion der Streuung der Wärmestrommessung in E_3
- Abbildung temperatur- und SoC-abhängiger Wärmeleistungen bei der Nutzung der thermischen Ersatzbatteriezellen in E_4

Mit der Betrachtung der Luftkühlung könnten Problemstellungen durch die Nutzung kompressibler Kühlmedien in die Methodenevaluation einfließen, um die Methode diesbezüglich zu spezifizieren. Bedingt durch die niedrige Wärmekapazität von Luft sind im Vergleich zur Flüssigkeitskühlung höhere Volumenströme notwendig, um äquivalente Kühlleistungen zu erreichen. Dadurch kann es zur Ausbildung instationärer Strömungszustände (z. B. Karmansche Wirbelstraßen) beim Umströmen der Zellen kommen. Auswirkungen auf die CFD-Simulation in E_2 sind zu erwarten und müssen bei der Modellbildung im Sinne des Frontloadings berücksichtigt werden.

Aufgrund der geringen Kühlleistung der Luftkühlung ist zudem mit einem schnelleren Temperaturanstieg im Batteriemodul zu rechnen. Thermisch stationäre Zustände stellen sich, bedingt durch die niedrige Wärmekapazität der Luft, nur langsam ein. Dauert dieser Vorgang zu lang, kann sich der stationäre Zustand in der Anwendung nicht ausbilden, bevor die Batteriezellen vollständig geladen bzw. entladen sind. Die Untersuchung thermisch transienter Vorgänge bei hohen Lade- oder Entladeraten ist deshalb für die Auslegung von Batteriezellkühlungen mit niedriger Kühlleistung umso relevanter. Dies führt zu höheren Anforderungen an die Regelungsdynamik des thermischen Koppelsystems in E_3 . Ansätze zur Reduktion der thermischen Trägheit des Koppelsystems als auch neue Ansätze zur Optimierung der Wärmestromregelung sind denkbar, um die Regelungsfehler des Wärmestroms trotz schneller Temperaturänderungen zu reduzieren.

Weiteres Potenzial wird in der Reduktion der Streuung des gemessenen Wärmestroms auf dem Zellmantel gesehen. Hierfür werden Untersuchungen verschiedener Applikationen des Wärmestromsensors sowie die Erprobung formflexibler Sensoren empfohlen. Letztere wurden bei der Entwicklung des Koppelsystems aufgrund niedrigerer Sensitivität gegenüber den eingesetzten Sensoren ausgeschlossen. Allerdings könnte dieser Nachteil durch eine geringere Streuung des Messsignals und der größeren Kontaktfläche auf dem Zellmantel kompensiert werden. Bei einer entsprechend hohen Reproduzierbarkeit in der Sensorapplikation könnte auf die individuelle Kalibrierung der gemessenen Wärmestromdichte verzichtet werden, was die Effizienz der Versuchsdurchführung steigern würde.

Die Modellgüte des thermischen Koppelsystems in E_4 in Form der thermischen Ersatzbatteriezellen, welche mit einem steuerbaren Netzgerät verbunden sind, könnte durch die Abbildung temperatur- und SoC-abhängiger Wärmeleistungen gesteigert werden. Hierfür wird empfohlen, die Validierungsumgebung in E_3 für die Quantifizierung der SoC- und temperaturabhängigen Wärmeleistung einer entwicklungspezifisch eingesetzten Batteriezelle zu nutzen. Diese Zusammenhänge könnten in der virtuellen Domäne zur Steuerung des Netzteils implementiert werden, um die Wärmeleistung der Ersatzbatteriezellen zustandsabhängig zu regeln.

Literaturverzeichnis

- Abu-Sharkh, S. & Doerffel, D. (2004). Rapid test and non-linear model characterisation of solid-state lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 130, 266–274. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2003.12.001>
- Albers, A. (2010). Five Hypotheses about Engineering Processes and their Consequences. In *Proceedings of the TMCE 2010* (n. p.). Ancona, Italy: Organizing Committee of TMCE 2010.
- Albers, A., Behrendt, M., Klingler, S. & Matros, K. (2016). Verifikation und Validierung im Produktentstehungsprozess. In U. Lindemann (Hrsg.), *Handbuch Produktentwicklung* (S. 541–569). München: Hanser.
<https://doi.org/10.3139/9783446445819.019>
- Albers, A., Behrendt, M., Schroeter, J., Ott, S. & Klingler, S. (2013). X-in-the-Loop: A Framework for Supporting Central Engineering Activities and Contracting Complexity in Product Engineering Processes. In Y. S. Kim, U. Lindemann & S. Venkataraman (Hrsg.), *International Conference on Engineering Design. ICED13* (S. 379–389). Seoul, Korea: Design Society.
- Albers, A. & Braun, A. (2011). Der Prozess der Produktentstehung. In F. Henning & E. Moeller (Hrsg.), *Handbuch Leichtbau* (S. 3–30). München: Hanser.
- Albers, A., Bursac, N. & Wintergerst, E. (2015). Produktgenerationsentwicklung-Bedeutung und Herausforderungen aus einer entwicklungsmethodischen Perspektive. In *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SPP 2015* (o. S.). Stuttgart: Fraunhofer IAO.
- Albers, A. & Düser, T. (2010). Implementation of a Vehicle-in-the-Loop Development and Validation Platform. In *FISITA World Automotive Congress 2010* (F2010-C-177). Budapest, Hungary.
- Albers, A., Fahl, J., Hirschter, T., Endl, M., Erwert, R. & Rapp, S. (2020). Model of PGE – Product Generation Engineering by the Example of Autonomous Driving. In ScienceDirect (Hrsg.), *Procedia CIRP* (665-677). Amsterdam, Niederlande: Elsevier.

- Albers, A., Haug, F., Fahl, J., Hirschter, T., Reinemann, J. & Rapp, S. (2018). Customer-Oriented Product Development: Supporting the Development of the Complete Vehicle through the Systematic Use of Engineering Generations. In *4th IEEE International Symposium on Systems Engineering. 2018 symposium proceedings* (n. p.). Piscataway: IEEE.
- Albers, A., Haug, F., Heitger, N., Fahl, J. & Hirschter, T. (2019). Entwicklungsgenerationen zur Steuerung der PGE – Produktgenerationsentwicklung: Von der Bauteil- zur Funktionsorientierung in der Automobilentwicklung. In *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2019* (S. 253–262). Stuttgart: Fraunhofer IAO.
- Albers, A., Mandel, C., Yan, S. & Behrendt, M. (2018). SYSTEM OF SYSTEMS APPROACH FOR THE DESCRIPTION AND CHARACTERIZATION OF VALIDATION ENVIRONMENTS. In *DS92: Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference* (S. 2799–2810). Glasgow: The Design Society.
- Albers, A., Matros, K., Behrendt, M. & Jetzinger, H. (2015). Das Pull-Prinzip der Validierung - Ein Referenzmodell zur effizienten Integration von Validierungsaktivitäten in den Produktentstehungsprozess. *Konstruktion*, 67(6), 74–81.
- Albers, A., Ott, S., Behrendt, M., Merkel, P. & Geier, M. (2010). Validation as knowledgebase for future mobility systems. In *9. Internationales CTI Symposium. Innovative Fahrzeug-Getriebe, Hybrid- und Elektro-Antriebe* (n. p.). Berlin: CTI.
- Albers, A., Pinner, T., Yan, S., Hettel, R. & Behrendt, M. (2016). Koppelsystems. Obligatory Elements within Validation Setups. In *Proceedings of DESIGN 2016* (S. 109–118). Glasgow: The Design Society.
- Al-Hallaj, S. & Selman, J.R. (2002). Thermal modeling of secondary lithium batteries for electric vehicle/hybrid electric vehicle applications. *Journal of Power Sources*, 110(2), 341–348. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00196-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00196-9)
- Andre, D., Meiler, M., Steiner, K., Wimmer, C., Soczka-Guth, T. & Sauer, D. U. (2011). Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. I. Experimental investigation. *Journal of Power Sources*, 196(12), 5334–5341. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.12.102>

- Axeon (Hrsg.). (2012). *Our Guide to Batteries*. Zugriff am 28.07.2020. Verfügbar unter <http://www.jmbattery.com/JMBS/media/JMBS/Technology/Axeon-Guide-to-Batteries-2nd-edition.pdf>
- Bandhauer, T. M., Garimella, S. & Fuller, T. F. (2011). A Critical Review of Thermal Issues in Lithium-Ion Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 158(3), R1-R25. <https://doi.org/10.1149/1.3515880>
- Barsoukov, E., Jang, J. H. & Lee, H. (2002). Thermal impedance spectroscopy for Li-ion batteries using heat-pulse response analysis. *Journal of Power Sources*, 109(2), 313–320. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00080-0](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00080-0)
- Bernardi, D., Pawlikowski, E. & Newman, J. (1985). A Statistical Study of Sources of Variation in Primary Battery Testing. *Journal of The Electrochemical Society*, 132(1), 5–12. <https://doi.org/10.1149/1.2113763>
- Bernhard, F. (Hrsg.). (2014). *Handbuch der technischen Temperaturmessung* (VDI-Buch, 2. Auflage). Heidelberg: Springer Vieweg.
- Bertsche, B. & Lechner, G. (2004). *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau: Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten* (VDI-Buch). Berlin Heidelberg New York: Springer.
- Bier, M., Buch, D., Kluijn, M. & Beidl, C. (2012). Entwicklung und Optimierung von Hybridantrieben am X-in-the-Loop-Motorenprüfstand. *Motorentechnische Zeitschrift (MTZ)*, 73(Nr. 3), 240–247.
- Blessing, L. T.M. & Chakrabarti, A. (2009). *DRM, a Design Research Methodology*. London: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-587-1>
- Bolsinger, C. & Birke, K. P. (2019). Effect of different cooling configurations on thermal gradients inside cylindrical battery cells. *Journal of Energy Storage*, 21, 222–230.
- Bouvy, C., Ginsberg, S., Jeck, P., Hartmann, B., Baltzer, S. & Eckstein, L. (2012). Holistic Battery Pack Design. In *21st Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology* (S. 367–380). Aachen.
- Brendecke, T. (2001). *Virtuelle Echtzeitumgebung für Getriebebesteuengeräte mit Hardware-in-the-Loop* Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik TU Braunschweig Nr.1. Dissertation. TU Braunschweig, Aachen.

- Cho, I.-H., Lee, P.-Y. & Kim, J.-H. (2019). Analysis of the Effect of the Variable Charging Current Control Method on Cycle Life of Li-ion Batteries. *Energies*, 12(15), 4–11. <https://doi.org/10.3390/en12153023>
- Christen, R., Rizzo, G., Gadola, A. & Stöck, M. (2017). Test Method for Thermal Characterization of Li-Ion Cells and Verification of Cooling Concepts. *Batteries*, 3(3), 1–12. <https://doi.org/10.3390/batteries3010003>
- Cicconi, P., Germani, M., Landi, D. & Mengarelli, M. (2014). Virtual prototyping approach to evaluate the thermal management of Li-ion batteries. In IEEE (Hrsg.), *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)* (n. p.). Verfügbar unter <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7007146>
- Cicconi, P., Landi, D. & Germani, M. (2017). Thermal analysis and simulation of a Li-ion battery pack for a lightweight commercial EV. *Applied Energy*, 192, 159–177. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.008>
- DIN IEC, 584 Teil 2. *Thermopaare; Grenzabweichungen der Thermospannungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Dörnhöfer, A. (2019). *Betriebsfestigkeitsanalyse elektrifizierter Fahrzeuge. Multilevel-Ansätze zur Absicherung von HV-Batterien und elektrischen Steckkontakten* (1. Auflage 2019). Berlin: Springer Vieweg.
- Drake, S. J., Martin, M., Wetz, D. A., Ostanek, J. K., Miller, S. P., Heinzl, J. M. & Jain, A. (2015). Heat generation rate measurement in a Li-ion cell at large C-rates through temperature and heat flux measurements. *Journal of Power Sources*, 285, 266–273. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.03.008>
- Drake, S. J., Wetz, D. A., Ostanek, J. K., Miller, S. P., Heinzl, J. M. & Jain, A. (2014). Measurement of anisotropic thermophysical properties of cylindrical Li-ion cells. *Journal of Power Sources*, 252, 298–304. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.11.107>
- Ehrlenspiel, K. (2009). *Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. München: Carl Hanser.
- Eisele, M. (2017). Schaeffler Technologies AG & Co. KG (Anmelder), DE 10 2017 128 878 A1 (Patentnummer).
- Eisele, M., Kohler, K., Prinz, F. & Ott, S. (2017). Validation of a Cooling System for Temperature Conditioning of Cylindrical Battery Cells. In EVS (Hrsg.), *The 30th*

International Electric Vehicle Symposium & Exhibition - EVS30 (n. p.). Stuttgart, Germany.

- Eisele, M., Oser, J. & Albers, A. (eingereicht). A Validation Environment for Evaluation of the Thermal Management of Battery Modules Using the IPEK-X-in-the-Loop-Approach. *IEEE Access*.
- Eisele, M., Oser, J., Kaeske, J. & Albers, A. (2019). Modeling of thermal-electrical interactions in a battery module using the IPEK-X-in-the-Loop-Approach. In FVA - Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (Hrsg.), *E-MOTIVE 2019. 11th International Expert Forum on electric vehicle drives and e-mobility* (S. 107–114). Schweinfurt, Germany.
- Eisele, M., Werner, D. & Ott, S. (2018). Evaluation of a validation process for a battery cooling system. In Society of Automotive Engineers of Japan (Hrsg.), *The 31th International Electric Vehicle Symposium & Exhibition - EVS31* (n. p.). Kobe, Japan.
- Elektro-Automatik (Hrsg.). (2017). *Betriebsanleitung EL 9000 T. Elektronische DC-Last* (2 Aufl.). Zugriff am 04.08.2020.
- Energizer (Hrsg.). (2008). *Battery Cross Sectional Drawing. Cylindrical Lithium Iron Disulfide*. Zugriff am 28.07.2020. Verfügbar unter https://data.energizer.com/PDFs/lithiuml91l92_xsection.pdf
- Erhard, S. V. (2017). *Mehrdimensionale elektrochemisch-thermische Modellierung von Lithium-Ionen-Batterien*. Dissertation. Technische Universität München, München.
- Erhard, S. V., Osswald, P. J., Wilhelm, J., Rheinfeld, A., Kosch, S. & Jossen, A. (2015). Simulation and Measurement of Local Potentials of Modified Commercial Cylindrical Cells. II: Multi-Dimensional Modeling and Validation. *Journal of The Electrochemical Society*, 162(14), A2707-A2719. <https://doi.org/10.1149/2.0431514jes>
- European Commission Decision (Hrsg.). (2018). *Horizon 2020 - Work Programme 2018-2020. Cross-cutting activities* (20 Aufl.).
- Fleckenstein, M., Fischer, S., Bohlen, O. & Bäker, B. (2013). Thermal Impedance Spectroscopy - A method for the thermal characterization of high power battery cells. *Journal of Power Sources*, 223, 259–267. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.07.144>

- Forgez, C., Vinh Do, D., Friedrich, G., Morcrette, M. & Delacourt, C. (2010). Thermal modeling of a cylindrical LiFePO₄/graphite lithium-ion battery. *Journal of Power Sources*, 195(9), 2961–2968. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.10.105>
- Freudenmann, T. (2014). *Ontologien zur Validierung von Produkten basierend auf dem Contact & Channel – Ansatz (C&C²-Ansatz)*. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Geier, M., Stier, C., Düser, T., Behrendt, M., Ott, S. & Albers, A. (2009). Simulationsgestützte Methoden – IDE und XiL zur Entwicklung von Antriebsstrangkomponenten. *ATZ Extra*, 22(4), 48–53. <https://doi.org/10.1365/s35778-009-0305-4>
- VDI-Wärmeatlas. Mit 320 Tabellen.* (2013) (Springer Reference, 11., bearb. und erw. Aufl.). Berlin: Springer Vieweg.
- Grabowski, H. (Hrsg.). (1997). *Neue Wege zur Produktentwicklung. Raabe Innovationen*. Stuttgart: Raabe.
- Guangsheng Zhang, Lei Cao, Shanhai Ge, Chao-Yang Wang, Christian E. Shaffer & Christopher D. Rahn. (2014). In Situ Measurement of Radial Temperature Distributions in Cylindrical Li-Ion Cells. *Journal of The Electrochemical Society*, 161(10), A1499-A1507. <https://doi.org/10.1149/2.0051410jes>
- He, F., Li, X. & Ma, L. (2014). Combined experimental and numerical study of thermal management of battery module consisting of multiple Li-ion cells. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 72, 622–629. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.01.038>
- He, H., Xiong, R. & Fan, J. (2011). Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach. *Energies*, 4(4), 582–598. <https://doi.org/10.3390/en4040582>
- Hémery, C.-V., Pra, F., Robin, J.-F. & Marty, P. (2014). Experimental performances of a battery thermal management system using a phase change material. *Journal of Power Sources*, 270, 349–358. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.07.147>
- Hermann, W. A., Kohn, S. & Berdichevsky, G. (2007). Tesla Inc (Anmelder), US 2008/0311468 A1 (Patentnummer).

- Hettesheimer, T., Thielmann, A., Neef, C., Möller, K.-C., Wolter, M., Lorentz, V., Gepp, M., Wenger, M., Prill, T., Zausch, J. et al. (2017). *Entwicklungsperspektiven für Zellformate von Lithium-Ionen-Batterien in der Elektromobilität* (Fraunhofer-Allianz Batterien, Hrsg.). Pfnztal: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Verfügbar unter https://www.batterien.fraunhofer.de/content/dam/batterien/de/documents/Allianz_Batterie_Zellformate_Studie.pdf
- Hunt, G. L. (Oktober 2003). *FreedomCAR Battery Test Manual. For Power-Assist Hybrid Electric Vehicles* (3 Aufl.) (Idaho National Engineering & Environmental Laboratory (INEEL), Hrsg.).
- Huria, T., Ceraolo, M., Gazzarri, J. & Jackey, R. (2012). High fidelity electrical model with thermal dependence for characterization and simulation of high power lithium battery cells. In IEEE Staff (ed.), *2012 IEEE International Electric Vehicle Conference* (S. 1–8). Greenville, SC, USA: IEEE.
- Inkermann, D., Kleemann, S. & Vietor, T. (2017). Ein Potentialmodell für die Nutzung neuer Technologien in der Produktentwicklung. In *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung SSP 2017* (o. S.). Stuttgart. Verfügbar unter <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/13588265.2019.1632545?needAccess=true>
- IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (IPEK, Hrsg.). (2021, 26. Februar). *IPEK-Glossar*, IPEK - Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Zugriff am 06.03.2021.531Z. Verfügbar unter <http://www.ipek.kit.edu/mkl/index.php/Kategorie:Glossar>
- Jayaraman, S., Anderson, G., Kaushik, S. & Klaus, P. (2011). Modeling of Battery Pack Thermal System for a Plug-In Hybrid Electric Vehicle. In SAE International (Hrsg.), *SAE 2011 World Congress & Exhibition* (n. p.).
- Jeon, D. H. (2014). Numerical modeling of lithium ion battery for predicting thermal behavior in a cylindrical cell. *Current Applied Physics*, 14(2), 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2013.11.006>
- Jeon, D. H. & Baek, S. M. (2011). Thermal modeling of cylindrical lithium ion battery during discharge cycle. *Energy Conversion and Management*, 52(8–9), 2973–2981. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.04.013>

- Jilte, R. D., Kumar, R. & Ma, L. (2019). Thermal performance of a novel confined flow Li-ion battery module. *Applied Thermal Engineering*, 146, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.09.099>
- Jossen, A. & Weydanz, W. (2006). *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen. 36 Tabellen* (1. Aufl.). Neusäß: Ubooks.
- Juang, L. W., Kollmeyer, P. J., Jahns, T. M. & Lorenz, R. D. (2014). Improved modeling of lithium-based batteries using temperature-dependent resistance and overpotential. In *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2014. 15 - 18 June 2014, Adoba Hotel Dearborn/Detroit, Dearborn, Michigan, USA* (n. p.). Piscataway, NJ: IEEE.
- Kaeske, J. (2018). *Auslegung und Validierung des thermischen Sensor-Aktor-Systems für einen Batterieprüfstand als IPEK-XiL-Aufbau*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Keil, P. & Jossen, A. (2012). Aufbau und Parametrierung von Batteriemodellen. In *19. DESIGN&ELEKTRONIK-Entwicklerforum Batterien & Ladekonzepte*. München.
- KERAFOL - Keramische Folien GmbH (Hrsg.). (2008). *Keratherm - Softtherm. 86/300, 86/500, 86/600*. Datenblatt. Zugriff am 14.07.2020.
- Khateeb, S. A., Amiruddin, S., Farid, M., Selman, J. R. & Al-Hallaj, S. (2005). Thermal management of Li-ion battery with phase change material for electric scooters. Experimental validation. *Journal of Power Sources*, 142(1-2), 345–353. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.09.033>
- Khateeb, S. A., Farid, M. M., Selman, J.R. & Al-Hallaj, S. (2004). Design and simulation of a lithium-ion battery with a phase change material thermal management system for an electric scooter. *Journal of Power Sources*, 128(2), 292–307. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2003.09.070>
- Kim, G.-H. & Pesaran, A. A. (2007). Battery Thermal Management Design Modeling. *World Electric Vehicle Journal*, 1(1), 126–133. <https://doi.org/10.3390/wevj1010126>
- Kim, U. S., Yi, J., Shin, C. B., Han, T. & Park, S. (2011). Modelling the thermal behaviour of a lithium-ion battery during charge. *Journal of Power Sources*, 196(11), 5115–5121. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.01.103>

- Kizilel, R., Sabbah, R., Selman, J. R. & Al-Hallaj, S. (2009). An alternative cooling system to enhance the safety of Li-ion battery packs. *Journal of Power Sources*, 194(2), 1105–1112. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.06.074>
- Kohler, K. (2017). *Analyse einer Batteriekühlung mittels numerischer Strömungsmechanik*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Korthauer, R. (2013). *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-30653-2>
- Kreisel, P., Kreisel jr., J. & Kreisel, M. (2015). Kreisel Electric GmbH (Anmelder), DE 10 2015 013 377 A1 (Patentnummer).
- Kreuer, N. (2017). *Entwicklung eines XiL Prüfaufbaus zur Entwicklung eines XiL Prüfaufbaus zur Validierung des thermisch-elektrischen Verhaltens von Batteriemodulen*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Landi, D., Cicconi, P. & Germani, M. (2015). A Methodological Approach for Supporting the Thermal Design of Li-Ion Battery for Customized Electric Vehicles. In *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition - 2014. Presented at ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition; November 14 - 20, 2014, Montreal, Quebec, Canada* (V011T14A046). New York, NY: ASME.
- LAUDA DR. R. WOBSE GMBH & CO. KG (Hrsg.). (2012). *Betriebsanleitung. Variocool VC 600, VC 1200 (W), VC 2000 (W), VC 3000 (W), VC 600, VC 1200 (W), VC 2000 (W), VC 3000 (W), VC 5000 (W), VC 7000 (W), VC 10000 (W) Umlaufkühler*.
- Li, S. (2019). *Verifikation eines Prüfaufbaus zur Temperierung von Batteriezellen*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Li, X., He, F. & Ma, L. (2013). Thermal management of cylindrical batteries investigated using wind tunnel testing and computational fluid dynamics simulation. *Journal of Power Sources*, 238, 395–402. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.04.073>

- Lin, X., Perez, H. E., Mohan, S., Siegel, J. B., Stefanopoulou, A. G., Ding, Y. & Castanier, M. P. (2014). A lumped-parameter electro-thermal model for cylindrical batteries. *Journal of Power Sources*, 257, 1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.01.097>
- Lindemann, U. (2009). *Methodische Entwicklung technischer Produkte. Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden* (VDI-Buch, 3., korrigierte Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01423-9>
- Ling, Z., Wang, F., Fang, X., Gao, X. & Zhang, Z. (2015). A hybrid thermal management system for lithium ion batteries combining phase change materials with forced-air cooling. *Applied Energy*, 148, 403–409.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.080>
- Loges, A., Herberger, S., Seegert, P. & Wetzel, T. (2016). A study on specific heat capacities of Li-ion cell components and their influence on thermal management. *Journal of Power Sources*, 336, 341–350. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.10.049>
- Lu, Z., Meng, X. Z., Wei, L. C., Hu, W. Y., Zhang, L. Y. & Jin, L. W. (2016). Thermal Management of Densely-packed EV Battery with Forced Air Cooling Strategies. *Energy Procedia*, 88, 682–688.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.098>
- Lyu, Y., Siddique, A.R.M., Majid, S. H., Biglarbegian, M., Gadsden, S. A. & Mahmud, S. (2019). Electric vehicle battery thermal management system with thermoelectric cooling. *Energy Reports*, 5, 822–827.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.06.016>
- Mahamud, R. & Park, C. (2011). Reciprocating air flow for Li-ion battery thermal management to improve temperature uniformity. *Journal of Power Sources*, 196(13), 5685–5696. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.02.076>
- Maleki, H. (1999). Thermal Properties of Lithium-Ion Battery and Components. *Journal of The Electrochemical Society*, 146(3), 947.
<https://doi.org/10.1149/1.1391704>
- Motapon, S. N., Lupien-Bedard, A., Dessaint, L.-A., Fortin-Blanchette, H. & Al-Haddad, K. (2017). A Generic Electrothermal Li-ion Battery Model for Rapid

- Evaluation of Cell Temperature Temporal Evolution. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(2), 998–1008.
<https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2618363>
- Murashko, K. A., Mityakov, A. V., Pyrhönen, J., Mityakov, V. Y. & Sapozhnikov, S. (2014). Thermal parameters determination of battery cells by local heat flux measurements. *Journal of Power Sources*, 271, 48–54.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.07.117>
- Nageldinger, H. (2014). Dr. Ing. h.c. F. Porsche Aktiengesellschaft (Anmelder), DE 10 2014 112 628 A1 (Patentnummer).
- Nationale Plattform Elektromobilität (NPE). (2014). *Fortschrittsbericht 2014 – Bilanz der Marktvorbereitung* (Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO), Hrsg.). Berlin: Nationale Plattform Elektromobilität (NPE).
- Oh, K. S. & Kim, D. M. (LG Chem, Hrsg.). (2014). *PRODUCT SPECIFICATION INR18650 MJ1* (1 Aufl.). LRB-PS-CY3450_MJ1. Zugriff am 25.04.2021. Verfügbar unter https://enerpower.de/wp/wp-content/uploads/2016/03/Specification_INR18650MJ1.pdf
- Onda, K., Kameyama, H., Hanamoto, T. & Ito, K. (2003). Experimental Study on Heat Generation Behavior of Small Lithium-Ion Secondary Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 150(3), A285. <https://doi.org/10.1149/1.1543947>
- Onda, K., Ohshima, T., Nakayama, M., Fukuda, K. & Araki, T. (2006). Thermal behavior of small lithium-ion battery during rapid charge and discharge cycles. *Journal of Power Sources*, 158(1), 535–542. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.08.049>
- Oser, J. (2019). *Entwicklung eines thermisch-elektrischen Batteriemodells mit Matlab Simulink für eine XiL-Validierungsumgebung*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Osswald, P. J., Erhard, S. V., Wilhelm, J., Hoster, H. E. & Jossen, A. (2015). Simulation and Measurement of Local Potentials of Modified Commercial Cylindrical Cells. I. Cell Preparation and Measurements. *Journal of The Electrochemical Society*, 162(10), A2099-A2105. <https://doi.org/10.1149/2.0561510jes>

- Panasonic. (2012). *Lithium Ion UR18650Y* (SANYO Energy (U.S.A), Hrsg.) (VERSION 13.02R1). Zugriff am 28.07.2020. Verfügbar unter <https://datasheet-spfd.com/pdf-file/831735/PanasonicBattery/UR18650Y/1>
- Park, C. & Jaura, A. K. (2003). Dynamic Thermal Model of Li-Ion Battery for Predictive Behavior in Hybrid and Fuel Cell Vehicles. In *Future Transportation Technology Conference & Exposition* (SAE Technical Paper 2003-01-2286).
- Park, S. & Jung, D. (2013). Battery cell arrangement and heat transfer fluid effects on the parasitic power consumption and the cell temperature distribution in a hybrid electric vehicle. *Journal of Power Sources*, 227, 191–198. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.11.039>
- Paulweber, M. & Lebert, K. (2014). *Mess- und Prüfstandstechnik. Antriebsstrangentwicklung, Hybridisierung, Elektrifizierung* (Der Fahrzeugantrieb). Wiesbaden: Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-04453-4>
- Pesaran, A. A. (2002). Battery thermal models for hybrid vehicle simulations. *Journal of Power Sources*, 110(2), 377–382. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00200-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00200-8)
- Pesaran, A. A., Burch, S. & Keyser, M. (1999). *An Approach for Designing Thermal Management Systems for Electric and Hybrid Vehicle Battery Packs. Preprint* (National Renewable Energy Laborator (NREL), Hrsg.) (NREL/CP-540-25992).
- Pesaran, A. A. & Keyser, M. (2001, Januar). Thermal characteristics of selected EV and HEV batteries. In *2001 16th Annual Battery Conference on Applications and Advances* (S. 219–225). Piscataway: IEEE.
- Pinner, T. (2017). *Ein Beitrag zur Entwicklung von Koppelsystemen für die Validierung im Kontext des X-in-the-Loop-Frameworks am Beispiel eines Schaltroboters. Forschungsberichte des IPEK*. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Prinz, F. (2017). *Entwicklung eines Prüfaufbaus zur Validierung eines Kühlsystems für Lithium-Ionen-Batteriesysteme*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

- Rizzo, G., Christen, R. & Stöck, M. (2016). Prüfstand zur thermischen Charakterisierung von Batteriezellen und Validierung geplanter Kühlkonzepte. In *23. Design & Elektronik-Entwicklerforum - Batterien & Ladekonzepte* (o. S.). München: WEKA FACHMEDIEN.
- Ropohl, G. (1975). Einleitung in die Systemtechnik. In *Systemtechnik – Grundlagen und Anwendung* (S. 1–77). München Wien: Carl Hanser Verlag.
- Rothgang, S., Nordmann, H., Schaper, C. & Sauer, D. U. (2012). Challenges in battery pack design. In *Electrical systems for aircraft, railway and ship propulsion (ESARS), 2012. 16-18 Oct. 2012, Bologna, Italy ; [2nd International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion]* (S. 1–6). Piscataway, NJ: IEEE.
- Sahraei, E., Campbell, J. & Wierzbicki, T. (2012). Modeling and short circuit detection of 18650 Li-ion cells under mechanical abuse conditions. *Journal of Power Sources*, 220, 360–372. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.07.057>
- Saldern, J. v. (2003, 6. Juni). *Laserspektroskopische Untersuchungen laminarer Grenzschichten turbulenter Strömungen mit Hilfe molekularer Marker*. Dissertation. Rubrecht-Karls-Universität Heidelberg, Heidelberg. <https://doi.org/10.11588/heidok.00003703>
- SANYO Electric Co., L.. *Lithium Ion Battery Specification. NCR18650G-H0ANA* (BATTERIEN-MONTAGE-ZENTRUM GMBH, Hrsg.). Zugriff am 28.07.2020. Verfügbar unter https://www.hurt.com.pl/prods/bat/_li_ion/ncr18650ga.pdf
- Sarkar, D., Shah, K., Haji-Sheikh, A. & Jain, A. (2014). Analytical modeling of temperature distribution in an anisotropic cylinder with circumferentially-varying convective heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 79, 1027–1033. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.08.060>
- Saw, L. H., Ye, Y., Tay, A. A.O., Chong, W. T., Kuan, S. H. & Yew, M. C. (2016). Computational fluid dynamic and thermal analysis of Lithium-ion battery pack with air cooling. *Applied Energy*, 177, 783–792. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.122>
- Schmidt, J. P. (2013). *Verfahren zur Charakterisierung und Modellierung von Lithium-Ionen Zellen*. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

- Schroeder, T., Gwosch, T. & Matthiesen, S. (2020). Comparison of Parameterization Methods for Real-time Battery Simulation Used in Mechatronic Powertrain Test Benches. *IEEE Access*, 8, 1-13. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2989724>
- Schuster, S. F., Brand, M. J., Berg, P., Gleissenberger, M. & Jossen, A. (2015). Lithium-ion cell-to-cell variation during battery electric vehicle operation. *Journal of Power Sources*, 297, 242–251. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.08.001>
- Scrosati, B., Garche, J. & Tillmetz, W. (Eds.). (2015). *Advances in battery technologies for electric vehicles* (Woodhead Publishing series in energy, vol. 80, First edition). Cambridge, UK: Woodhead Publishing.
- Seegert, P., Herberger, S., Loges, A. & Wiebelt, A. (2020). Thermische Ersatzzellen zur Validierung von Lithium-Ionen-Batteriesystemen. *ATZelektronik*, 15(9), 54–58. <https://doi.org/10.1007/s35658-020-0240-0>
- Sefidan, A. M., Sojoudi, A. & Saha, S. C. (2017). Nanofluid-based cooling of cylindrical lithium-ion battery packs employing forced air flow. *International Journal of Thermal Sciences*, 117, 44–58. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.03.006>
- Shah, K., Drake, S. J., Wetz, D. A., Ostanek, J. K., Miller, S. P., Heinzel, J. M. & Jain, A. (2014a). An experimentally validated transient thermal model for cylindrical Li-ion cells. *Journal of Power Sources*, 271, 262–268. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.07.118>
- Shah, K., Drake, S. J., Wetz, D. A., Ostanek, J. K., Miller, S. P., Heinzel, J. M. & Jain, A. (2014b). Modeling of steady-state convective cooling of cylindrical Li-ion cells. *Journal of Power Sources*, 258, 374–381. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.01.115>
- Shah, K., McKee, C., Chalise, D. & Jain, A. (2016). Experimental and numerical investigation of core cooling of Li-ion cells using heat pipes. *Energy*, 113, 852–860. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.076>
- Shahid, S. & Agelin-Chaab, M. (2018). Experimental and numerical studies on air cooling and temperature uniformity in a battery pack. *International Journal of Energy Research*, 42(6), 2246–2262. <https://doi.org/10.1002/er.4018>

- Stier, C. (2015). *Ein Beitrag zur Validierung von Antriebssystemen mit Bezug auf kupplungs- und motorinduzierte Schwingungen*. Forschungsberichte des IPEK. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Thanagasundram, S., Arunachala, R., Makinejad, K., Teutsch, T. & Jossen, A. (2012). A Cell Level Model for Battery Simulation. In *European Electric Vehicle Congress - EEVC* (n. p.). Brussels, Belgium.
- Thomke, S. & Fujimoto, T. (2000). The effect of “front-loading” problem-solving on product development performance. *Journal of Product Innovation Management*, 17(2), 128–142. [https://doi.org/10.1016/S0737-6782\(99\)00031-4](https://doi.org/10.1016/S0737-6782(99)00031-4)
- Thyssenkrupp Materials Austria (Hrsg.). *TK 7225 / TK 7227 - Werkstoffdatenblatt - Vergütungsstahl*. Zugriff am 06.04.2019. Verfügbar unter http://www.thyssenkrupp.at/files/bs/TK_7225_7227.pdf
- Troxler, Y., Wu, B., Marinescu, M., Yufit, V., Patel, Y., Marquis, A. J., Brandon, N. P. & Offer, G. J. (2014). The effect of thermal gradients on the performance of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 247, 1018–1025. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.06.084>
- Tschöke, H. (2015). *Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Basiswissen* (ATZ/MTZ-Fachbuch). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Uerlich, R., Ambikakumari Sanalkumar, K., Bokelmann, T. & Vietor, T. (2020). Finite element analysis considering packaging efficiency of innovative battery pack designs. *International Journal of Crashworthiness*, 25(6), 664–679. <https://doi.org/10.1080/13588265.2019.1632545>
- Utting, M., Pretschner, A. & Legeard, B. (2006). *A Taxonomy of Model-Based Testing* (Department of Computer Science, The University of Waikato, Hrsg.) (Workin Paper Series). Hamilton, New Zealand. Zugriff am 28.07.2020. Verfügbar unter <https://pdfs.semanticscholar.org/61b3/def6e04886266bb12eb420739f66d605e332.pdf>
- VDI, 2206 (Juni 2004). *VDI 2206 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Viswanathan, V. V., Choi, D., Wang, D., Xu, W., Towne, S., Williford, R. E., Zhang, J.-G., Liu, J. & Yang, Z. (2010). Effect of entropy change of lithium intercalation in cathodes and anodes on Li-ion battery thermal management. *Journal of*

- Power Sources*, 195(11), 3720–3729. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2009.11.103>
- Waheed, A. (2016, 30. Mai). *Modellierung, Echtzeitsimulation und genaue Prognose der Lebensdauer und Kosten einer LFP-Batterie am Beispiel eines A- und C-Segment E-Autos*. Dissertation. Universität Duisburg-Essen, Duisburg.
- Wang, Q., Jiang, B., Li, B. & Yan, Y. (2016). A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 106–128. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.033>
- Wang, T., Tseng, K. J., Zhao, J. & Wei, Z. (2014). Thermal investigation of lithium-ion battery module with different cell arrangement structures and forced air-cooling strategies. *Applied Energy*, 134, 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.013>
- Wang, Y.-W., Jiang, J.-M., Chung, Y.-H., Chen, W.-C. & Shu, C.-M. (2019). Forced-air cooling system for large-scale lithium-ion battery modules during charge and discharge processes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 135(5), 2891–2901. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7646-4>
- Warner, J. (2015). *The handbook of lithium-ion battery pack design. Chemistry components types and terminology* (Chemical engineering). Amsterdam: Elsevier.
- Werner, D., Loges, A., Becker, D. J. & Wetzel, T. (2017). Thermal conductivity of Li-ion batteries and their electrode configurations – A novel combination of modelling and experimental approach. *Journal of Power Sources*, 364, 72–83. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.07.105>
- Wiebelt, A., Isermeyer, T., Siebrecht, T. & Heckenberger, T. (2009). Thermomanagement von Lithium-Ionen-Batterien. *ATZ*, 111, 500–504.
- Willenberg, L. K., Dechent, P., Fuchs, G., Sauer, D. U. & Figgemeier, E. (2020). High-Precision Monitoring of Volume Change of Commercial Lithium-Ion Batteries by Using Strain Gauges. *Sustainability*, 12(2), 557. <https://doi.org/10.3390/su12020557>
- Xia, G., Cao, L. & Bi, G. (2017). A review on battery thermal management in electric vehicle application. *Journal of Power Sources*, 367, 90–105. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.09.046>

- Yang, N., Zhang, X., Li, G. & Hua, D. (2015). Assessment of the forced air-cooling performance for cylindrical lithium-ion battery packs. A comparative analysis between aligned and staggered cell arrangements. *Applied Thermal Engineering*, *80*, 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.01.049>
- Yang, T., Yang, N., Zhang, X. & Li, G. (2016). Investigation of the thermal performance of axial-flow air cooling for the lithium-ion battery pack. *International Journal of Thermal Sciences*, *108*, 132–144. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.05.009>
- Ye, Y., Saw, L. H., Shi, Y., Somasundaram, K. & Tay, A. A.O. (2014). Effect of thermal contact resistances on fast charging of large format lithium ion batteries. *Electrochimica Acta*, *134*, 327–337. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.04.134>
- Ye, Y., Shi, Y., Cai, N., Lee, J. & He, X. (2012). Electro-thermal modeling and experimental validation for lithium ion battery. *Journal of Power Sources*, *199*, 227–238. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.10.027>
- Yunwoong Kim. (2017, 23. März). *Specification of Product. INR18650-35E3* (Version 1.0) (SAMSUNG SDI Co., L., Hrsg.).
- Zhang, J., Wu, B., Li, Z. & Huang, J. (2013). Simultaneous Estimation of Multiple Thermal Parameters of Large-Format Laminated Lithium-Ion Batteries. In *2013 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)* (S. 305–309). Beijing, China: IEEE.
- Zhao, J., Rao, Z., Huo, Y., Liu, X. & Li, Y. (2015). Thermal management of cylindrical power battery module for extending the life of new energy electric vehicles. *Applied Thermal Engineering*, *85*, 33–43. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.012>
- Zhao, J., Rao, Z. & Li, Y. (2015). Thermal performance of mini-channel liquid cooled cylinder based battery thermal management for cylindrical lithium-ion power battery. *Energy Conversion and Management*, *103*, 157–165. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.056>

**Studentische Abschlussarbeiten die im Kontext dieser
Dissertation am IPEK – Institut für Produktentwicklung am
Karlsruher Institut für Technologie (KIT) vom Autor co-
betreut wurden:**

- Kaeske, J. (2018). *Auslegung und Validierung des thermischen Sensor-Aktor-Systems für einen Batterieprüfstand als IPEK-XiL-Aufbau*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Kohler, K. (2017). *Analyse einer Batteriekühlung mittels numerischer Strömungsmechanik*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Kreuer, N. (2017). *Entwicklung eines XiL Prüfaufbaus zur Entwicklung eines XiL Prüfaufbaus zur Validierung des thermisch-elektrischen Verhaltens von Batteriemodulen*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Li, S. (2019). *Verifikation eines Prüfaufbaus zur Temperierung von Batteriezellen*. Unveröffentlichte Masterarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Oser, J. (2019). *Entwicklung eines thermisch-elektrischen Batteriemodells mit Matlab Simulink für eine XiL-Validierungsumgebung*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Prinz, F. (2017). *Entwicklung eines Prüfaufbaus zur Validierung eines Kühlsystems für Lithium-Ionen-Batteriesysteme*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.

Glossar

- Batteriezellkühlung** Die Batteriezellkühlung stellt einen Teil des Thermomanagements zur aktiven Kühlung von Batteriezellen auf Modul- oder Batteriesystemebene dar. Sie umfasst aber nicht die Batteriezellen selbst und schließt Elemente zur Fluidkonditionierung (Temperierung, Filterung etc.) und Fluidförderung (Pumpen, Lüfter) auf Batteriesystemebene aus. (Definition des Autors)
- Frühe Phase** Die frühe Phase eines Produktentwicklungsprozesses ist dadurch charakterisiert, dass die Anzahl, Härte und Reife von lösungsbestimmenden Anforderungen noch gering ausgeprägt und noch wenige Eigenschaften der letztendlichen Lösung festgelegt sind. „Es gilt das Paradox der Konstruktion: Früh kann man viel bewegen, aber man kennt die Auswirkungen kaum. Später kann man leicht beurteilen, aber kaum mehr ändern.“(Grabowski, 1997, S. 37; IPEK, 2021)
- Koppelsystem** Das Koppelsystem ist das System, das die gewünschte Koppelfunktion beinhaltet, bzw. die gewünschte Koppelfunktion hauptsächlich realisiert (Pinner, 2017, S. 102).
- Testfall** Der Testfall ist ein repräsentatives Modell eines Kollektivs von Anwendungsfällen. Er definiert den Input-Verlauf eines Systems und die Start- und Randbedingungen sowie das erwartete Verhalten des Systems. (Albers et al., 2016, S. 554; IPEK, 2021)
- Validierungskonfiguration** Eine Validierungsumgebung besteht aus mindestens einer Validierungskonfiguration, d.h. einer spezifischen Kombination von Methoden, Testfällen und Ressourcen und einer aus der Validierungsumgebung abgeleiteten Parametrisierung (Albers, Mandel, Yan & Behrendt, 2018).
- Validierungssystem** Das Validierungssystem (VS) umfasst alle entwickelten Elemente (Systeme, Methoden und Prozesse), die die Validierung des Produkts ermöglichen (Albers, Mandel et al., 2018).

Validierungsumgebung

Validierungsumgebung nach dem IPEK-XiL-Ansatz stellt die Voraussetzungen zur Durchführung von Validierungsaktivitäten, bei denen ein (Sub-) System im Kontext seiner Super-Systeme und interagierenden Systeme validiert wird, bereit. Damit ist eine Validierungsumgebung die konkrete Ausprägung eines Handlungssystems zur Validierung einschließlich Methoden und Ressourcensystem für mindestens eine Kombination von Produkt und Validierungsziel an einem spezifischen Punkt im Produktlebenszyklus. Dabei ist das Ressourcensystem der Validierungsumgebung ein Sub-Set des verfügbaren Validierungssystems. (Albers, Mandel et al., 2018; IPEK, 2021)

Anhang A

Reglereinstellungen in der Validierungsumgebung von E₃

Thermisches Koppelsystem

Interner Temperaturregler (PID) des Umlaufkühlers Variocool 600VC der Fa. Lauda (Werksteinstellung):

- X_p – Proportionalbereich: 10.0 K
- T_n – Nachstellzeit: 30 s
- T_v – Vorhaltezeit: 24 s
- T_d – Dämpfungszeit: 4 s

Dem Temperaturregler des Umlaufkühlers vorgeschalteter PI – Wärmestromregler:

- P – Anteil: $K_p = 0,4$
- I – Anteil: $T_i = 30$

Einstellungen des Prozessreglers CN245 zur Regelung des Wärmestroms an Phy 2 und Phy 3 durch Steuerung der Leistung der jeweiligen Heizkordel (beide verwendeten Regler wurden mit den identischen Einstellungen betrieben):

- Setpoint: 6
- P.b. – Proportionalband: 5 K
- t.i. – Integrationszeit: 50 s
- t.d. – Vorhaltezeit: 0 s

Alle nicht aufgeführten Parameter wurden auf Werkseinstellung belassen.

Elektrisches Koppelsystem

Parameter des Stromreglers (PI) zur Entladung der parallelgeschalteten Batteriezellen Phy 2 und Phy 3 über eine elektronische Last:

- P – Anteil: $K_p = 0,001$
- I – Anteil: $T_i = 0,5$
- Vorsteuerung mit dem zweifachen Sollstrom einer einzelnen Zelle