

Diplomarbeit

PRÜFSTAND ZUR MESSUNG VON WÄRMESTRÖMEN AN LITHIUM-IONEN-ZELLEN

von

Benedikt Rabl

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur

Studienrichtung

Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau, Mechatronik

Eingereicht am Institut für Verbrennungskraftmaschinen
und Thermodynamik der Technischen Universität Graz

Betreuer:

Ao.Univ.-Prof. DI Dr.techn. Raimund Almbauer
DI Patrick Pertl

Externe Betreuer:

Mag.rer.nat. Dr.techn. Bernhard Lechner
DI Matthias Hütter

Graz, 2013



In Zusammenarbeit mit dem VIRTUAL VEHICLE Research Center



Danksagung

An dieser Stelle möchte ich gerne folgenden Personen danken:

Professor Almbauer und Dipl.-Ing. Pertl für die Übernahme der Betreuung der Diplomarbeit seitens der Technischen Universität Graz und für die spannenden Diskussionen, welche oftmals bei Themengebieten endeten, die nicht mehr unbedingt dem Umfang der Diplomarbeit zuzurechnen waren.

Doktor Lechner und Dipl.-Ing. Hütter für die Betreuung der Diplomarbeit am VIRTUAL VEHICLE Research Center, für die unzähligen Runden des Gedankenaustausches, für die Tipps und Handkniffe welche mir die Arbeit erleichterten und für die freundliche Aufnahme ins Team.

Meinen Studienkollegen Martin, Michael und Kurt für eine unvergessliche Studienzeit.

Meinen Eltern und meinen Geschwistern, sowie

Meiner Freundin Christiane für die immerwährende Unterstützung auf jede nur erdenkliche Art und Weise.

Kurzfassung

Die als Bausteine der Traktionsbatterien von Hybridelektrofahrzeugen verbauten Lithium-Ionen-Zellen sind üblicherweise hochstromfähige Zellen. Trotz deren sehr guten Gesamtwirkungsgrad spielt das Thermalmanagement der Batterie eine entscheidende Rolle, wenn es um die Frage der Haltbarkeit und der Langzeitleistungsfähigkeit des Energiespeichers geht. Dazu ist ein fundiertes Wissen darüber notwendig, wie sich die eingesetzte Einzelzelle unter einer Vielzahl von veränderlichen Randbedingungen, und letzten Endes unter realen Bedingungen verhält. Die Simulation ist auf die thermischen Kennwerte Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und Wärmeentwicklung der Zelle angewiesen. Nur wenn diese Kennwerte für alle möglichen Bedingungen vorliegen, lässt sich das thermische Verhalten der Zelle realitätsgetreu abbilden.

Besonders die Ermittlung der im aktiven Material der Zelle freigesetzten Wärme hält einige Hürden bereit. Im Gegensatz zur rechnerischen Ermittlung der einzelnen Wärmeströme im Inneren der Zelle können kalorimetrische Messmethoden nur den über die Zelloberfläche abgegebenen Wärmestrom erfassen. Nicht-invasive Prüfverfahren schränken den Output an Messdaten weiter ein.

Der in dieser Arbeit vorgestellte Prüfstand wurde im Rahmen des Projekts BST2 des VIRTUAL VEHICLE Research Center (ViF) erstellt und ist primär auf die Vermessung der thermischen Leistung von Zellen für Traktionsbatterien von Hybridelektrofahrzeugen ausgelegt. Es ist möglich, Einzelzellen in einem großen Leistungsbereich und bei definierten Randbedingungen zu vermessen, wobei transiente Verläufe mit hoher Genauigkeit wiedergegeben werden. Die Messdaten stellen den Ausgangspunkt für die Vervollständigung eines thermischen Zellmodells für die Simulation dar.

Es wird letztlich ein Vorschlag gebracht, wie, ausgehend von den Messungen, über die Simulation in das Innere der Zelle gerechnet werden kann, um eine Datenbasis für die im aktiven Material freigesetzte Wärme zu schaffen.

Abstract

Lithium-Ion Cells are to become the integral part of traction batteries for hybrid electric vehicles. Usually the cell design is aimed at high current applications. Despite the very good overall efficiency, the thermal management of the battery plays a crucial role when it comes to the question of durability and long term performance of the energy storage. In-depth knowledge on how the single cell behaves under a variety of alternating boundary conditions and ultimately under real operating conditions is needed. The simulation of the cell depends on its thermal characteristics, namely, heat capacity, thermal conductivity and heat production rate. Only if all of these parameters are known for all sorts of operating conditions the thermal behavior of the cell can be realistically simulated.

The determination of the heat production rate in the active material of the cell raises difficulties in particular. In contrast to the analytical determination of the individual heat production rates within the active material calorimetric measurement methods can only detect the heat dissipated at the surface of the cell. Non-invasive testing methods pose a further restriction the output of the measurement.

In this work and as a part of the project BST2 of the VIRTUAL VEHICLE Research Center (ViF) a test bed primarily designed to measure the heat release of cells for traction batteries for hybrid electric vehicles is presented. It is possible to measure transient thermal characteristics of single cells with high accuracy over a wide range of thermal losses and within defined boundary conditions. As output of the test bed the measured data represents the starting point for the completion of a thermal cell model for simulation.

Eventually a proposal is made about how to calculate the heat production rate inside the cell by combination of simulation and measurement.

INHALT

FORMELZEICHEN, INDIZES UND ABKÜRZUNGEN	XIII
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	XV
1 EINLEITUNG	1
1.1 AUFGABENSTELLUNG, ZIELSETZUNG	1
1.2 MOTIVATION	2
2 DIE LITHIUM-IONEN ZELLE	3
2.1 AUFBAU UND FUNKTIONSWEISE	3
2.2 THERMISCHE EIGENHEITEN VON LITHIUM-IONEN-ZELLEN	6
2.2.1 <i>Leistungsfähigkeit</i>	6
2.2.2 <i>Thermisches Durchgehen</i>	7
2.2.3 <i>Wärmeproduktion in der Zelle</i>	8
2.3 THERMISCHE KENNWERTE VON LITHIUM-IONEN-ZELLEN	9
2.3.1 <i>Wärmekapazität</i>	10
2.3.2 <i>Wärmeleitfähigkeit</i>	11
2.4 GÄNGIGE METHODEN ZUR BESTIMMUNG DER THERMISCHEN PARAMETER	12
2.4.1 <i>Ermittlung der Wärmeproduktion</i>	12
2.4.2 <i>Ermittlung der thermischen Kennwerte</i>	15
2.5 BATTERIESIMULATION AM VIF	18
3 DER PRÜFSTAND	19
3.1 ANFORDERUNGSPROFIL AN DEN PRÜFSTAND	19
3.2 PLANUNG	20
3.3 AUFBAU DES GESAMTSYSTEMS, PRÜFSTANDSKOMPONENTEN	29
3.3.1 <i>Prüfkammer</i>	30
3.3.2 <i>Klimakiste</i>	32
3.3.3 <i>Radiallüfter</i>	34
3.3.4 <i>Luftkonditionierungseinheit</i>	35
3.3.5 <i>Massenstromverstellung</i>	36
3.3.6 <i>Verrohrung</i>	36
3.3.7 <i>Messstellen für Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit</i>	37
3.3.8 <i>Kabelwärmetauscher</i>	40
3.4 FUNKTION DES GESAMTSYSTEMS	41
3.5 PHEV2-DUMMY	42
4 DIE MESSTECHNIK	45
4.1 SENSORIK	45
4.1.1 <i>Temperatur</i>	45
4.1.2 <i>Strömungsgeschwindigkeit</i>	47
4.2 DATENERFASSUNG	49
4.2.1 <i>cDAQ-9178</i>	49
4.2.2 <i>NI 9205 - Analogeingangsmodul für Spannungsmessung</i>	49
4.2.3 <i>NI 9213 - Thermoelement-Eingangsmodul</i>	50
4.2.4 <i>NI 9217 - Analogeingangsmodul für Platin-Widerstandsthermometer</i>	50
4.3 LABVIEW	50
5 FUNKTIONSNACHWEIS DES PRÜFSTANDES.....	53
5.1 PRÜFABLAUF	53
5.2 VALIDIERUNG DER LEISTUNGSMESSUNG	54
5.3 BEWERTUNG DES ANTWORTVERHALTEN DES PRÜFSTANDS	54
5.4 EVALUIERUNG DER FUNKTION DES KABELWÄRMETAUSCHER	56
5.5 STATISTISCHE BEHANDLUNG DER MESSERGEBNISSE	57
5.6 ERGEBNISSE	58
5.6.1 <i>Leistungsmessung</i>	59
5.6.2 <i>Antwortverhalten</i>	61
5.6.3 <i>Kabelwärmetauscher</i>	65
6 ÜBERGANG ZUR SIMULATION.....	69

7	ZUSAMMENFASSUNG	71
7.1	RESÜMEE.....	71
7.2	AUSBLICK.....	71
	LITERATUR	73
8	ANHANG	75
8.1	VERNACHLÄSSIGUNG DER WÄRMESTRAHLUNG	75
8.2	VERNACHLÄSSIGUNG DER LUFTFEUCHTIGKEIT	75
8.3	WÄRMEÜBERGANGSKOEFFIZIENT	76
8.4	KONDITIONIERUNGSLEISTUNG	77
8.4.1	<i>Offener Kreislauf</i>	78
8.4.2	<i>Geschlossener Kreislauf</i>	78
8.5	MAXIMALER WASSERDAMPFGEHALT IM PRÜFSTAND	79
8.6	WÄRMEKAPAZITÄT DER DUMMY-ZELLE	79

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1: Schematischer Aufbau einer LiCoO ₂ -Zelle [27].....	4
Abbildung 2-2: Ragone-Diagramm zum Vergleich unterschiedlicher Energiespeichertechnologien [5]	6
Abbildung 2-3: links: schematischer Aufbau einer Wiederholungseinheit [6], rechts: Innenleben einer Rundzelle bestehend aus vielen Wiederholungseinheiten	9
Abbildung 3-1: Thermische Wechselwirkung der Glovebox mit der Umgebung.....	23
Abbildung 3-2: Eliminierung der thermischen Wechselwirkung von Prüfkammer und Umgebung durch Zwischenschaltung einer Klimakammer	24
Abbildung 3-3: Der Prüfstand: 1) Klimakiste 2) Messstelle Temperatur 3) Messstelle Geschwindigkeit 4) Konditionierungseinheit 5) Lüfter 6) Massenstromverstellung 7) Zuleitung der Oberflächenthermoelemente 8) Messstelle Temperatur	30
Abbildung 3-4: Geöffneter Prüfstand mit eingesetzter Zelle	31
Abbildung 3-5: Räumliche Trennung von Ein- und Austritt der Klimakiste	32
Abbildung 3-6: TEs und deren Nummerierung; 1 und 12 sind unter der Prüfkammer platziert, bei Zu- und Abströmöffnung der Klimakiste	33
Abbildung 3-7: Temperaturverteilung in der Klimakiste mit und ohne eingebrachte Heizleistung in der Prüfkammer	34
Abbildung 3-8: Pt100 am Eintritt der Prüfkammer	37
Abbildung 3-9: links: Leitrad aus Blechzuschnitt; rechts: Leitrad in Rohr eingebaut	39
Abbildung 3-10: Schematische Darstellung der Querschnittsverengung vor der zweiten Temperaturmessstelle	39
Abbildung 3-11: Kabelwärmetauscher im Einsatz am PHEV2 Dummy	40
Abbildung 5-1: Ablauf der Überprüfungsmessungen	53
Abbildung 5-2: Verlauf der gemessenen und simulierten Oberflächentemperatur der Heizmatte während der Bestromung mit einem Rechtecksignal als Anregungsfunktion	58
Abbildung 5-3: Simulation von niederlastigen Betriebsbedingungen.....	60
Abbildung 5-4: Simulation von hochlastigen Betriebsbedingungen.....	60
Abbildung 5-5: Verlauf der Messergebnisse (rote und grüne Kurve) bei einer sprunghaften Änderung der elektrischen Leistung (blaue Kurve).....	61
Abbildung 5-6: Verlauf der Messergebnisse (rote und grüne Kurve) bei einer Änderung der thermischen Leistung (orange Kurve) von 105mW/s	63
Abbildung 5-7: Verlauf der Messergebnisse (rote und grüne Kurve) bei einer Änderung der thermischen Leistung (orange Kurve) von 5mW/s	63
Abbildung 5-8: Anstieg der gemessenen Leistung durch den Einfluss der Isolierung	64
Abbildung 5-9: Instationäre Messung am Dummy	65
Abbildung 5-10: Instationäre Messung am Dummy mit angeschlossenen Kabeln	66
Abbildung 5-11: Instationäre Messung am Dummy mit geschlossenem Kabelwärmetauscher	66
Abbildung 6-1: Für rein ohmsche Verluste liefert die Simulation die selben Ergebnisse wie die Messung	69
Abbildung 6-2: Differenz zwischen gemessener und simulierter ohmscher Wärme als Ausdruck der Vorgänge in der Chemie des aktiven Materials.....	70

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 3-1: Daten ausgesuchter Fluide bei 20°C und 1bar zur Verwendung als Prüfmedium	22
Tabelle 3-2: Auszug aus DIN Spec 91252	29
Tabelle 5-1: Zusammenfassung der Messmatrix zur Validierung der Leistungsmessung	54
Tabelle 5-2: Messmatrix zur Bestimmung des Antwortverhalten des Prüfstands. Variation der Heizleistung als Rampenfunktion	56

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Lateinische Formelzeichen

$a = \lambda/(\rho \cdot c_p)$	m^2/s	Temperaturleitfähigkeit
A	m^2	Fläche, Oberfläche, Querschnittsfläche
$c = dq_{\text{rev}}/dT$	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	spezifische Wärmekapazität
c_p	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	spezifische isobare
E	V	Zellspannung, elektrisches Potential
f	s^{-1}	Frequenz
h	J/kg	spezifische Enthalpie
H	J	Enthalpie
I	A	Stromstärke
k	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	Wärmedurchgangskoeffizient
l	m	Länge
m	kg oder mol	Masse
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
p	bar , Pa	Druck
P	$(\text{k})\text{W}$	Leistung
q	J/kg	spezifische Wärme(menge)
R	Ω	elektrischer Widerstand
s	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	spezifische Entropie
S	J/K	Entropie
T	$^{\circ}\text{C}$	Celsius-Temperatur
t	s	Zeit
u	J/kg	spezifische innere Energie
U	V	elektrische Spannung
U	J	innere Energie
v	m^3/kg	spezifisches Volumen
V	m^3	Volumen
x	m	Koordinate
y	m	Koordinate
z	m	Koordinate

Griechische Formelzeichen

α	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	Wärmeübergangskoeffizient
η	$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$	(dynamische) Viskosität
λ	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	Wärmeleitfähigkeit
$\nu = \eta/\rho$	m^2/s	kinematische Zähigkeit, Viskosität
ρ	kg/m^3	Dichte
$\varphi = p_d/p_d'$	–	relative Feuchte

Operatoren und Bezeichnungen

d	vollständiges Differential
∂	partiell Differential
Σ	Summe

Δ Differenz zweier Größen; Laplace-Operator
' zeitliche Ableitung

Weitere Indices und Abkürzungen

DIN Deutsches Institut für Normung
el elektrisch
engl englisch
EN Europäische Norm
EU Europäische Union
i Laufvariable (1, 2, ..., k), innere
ISO International Organization for Standardization
 $Nu = \alpha l / \lambda$ Nußelt-Zahl, Nu
 $Pr = \nu / a$ Prandtl-Zahl
 $Re = w l / \nu$ Reynolds-Zahl
sog. sogenannt

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz,

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung, Zielsetzung

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs ermöglicht die Reduzierung der Emissionen von Kraftfahrzeugen bei gleichzeitiger Steigerung der Effizienz. Fast alle großen Automobilhersteller führen derzeit (Anm.: 2013) Personenkraftwagen mit Hybridantrieb im Portfolio. Dem elektrischen Energiespeicher kommt bei der Hybridisierung eine Schlüsselrolle zu. Durch ihre hohe Energie- und Leistungsdichte liegen Lithium-Ionen-Zellen für die Übernahme dieser Aufgabe im Trend. Auf Forschungsebene tritt neben der Suche der optimalen Kombination der Elektrodenmaterialien vor allem die Thematik des Thermalmanagements in den Vordergrund. Die idealen Randbedingungen, bei denen die Elektrochemie eine hohe Leistungsfähigkeit, geringe Alterung sowie andere vorteilhafte Eigenschaften aufweist, sind nur in einem geringen Temperaturbereich gegeben. Sowohl zu hohe als auch zu niedrige Temperaturen beeinflussen das Verhalten der Batterie nicht nur negativ, sondern auch nachhaltig. Zur Abstimmung des Thermalmanagements ist daher ein fundiertes Wissen über die thermischen Charakteristiken der in einem Fahrzeug verbauten Batterie notwendig. Die Simulation ist auf akkurate Daten zur Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und Wärmeentwicklung des Lithium-Ionen-Akkumulators angewiesen. Verglichen mit den ersten beiden Kennwerten stellt die Ermittlung, der unter Belastung im Inneren der Zelle anfallenden Wärme eine gewisse Herausforderung dar, wenn deren Ursprungszustand erhalten bleiben soll.

Im Zuge dieser Arbeit wurde ein Prüfstand errichtet, der ein Grundgerüst für die Validierung der thermischen Simulation von Lithium-Zellen bereitstellen soll. Die von einer Zelle abgegebene Wärmeleistung während der Ladung oder der Entladung kann mit dem Prüfstand als transiente Größe durch Messung der Temperaturänderung eines Luftstroms erfasst werden. Die Messdaten sollen den Ausgangspunkt für die Simulation darstellen, von dem letzten Endes die Parametrierung eines Zellmodells bezüglich der oben genannten Kennwerte erfolgt.

Als Ziele dieser Arbeit lassen sich neben einer Recherche bezüglich der thermischen Eigenschaften von Lithium-Ionen-Zellen und den Möglichkeiten zu deren Bestimmung auch die Planung, Konstruktion und Inbetriebnahme eines Prüfstands zu Vermessung der thermischen Verluste von Zellen anführen. Die Funktion des Prüfstands wird durch Validierungsmessungen belegt.

1.2 Motivation

Die thermischen Verluste von Lithium-Zellen, die durch Vorgänge in der Chemie bewirkt werden, bewegen sich je nach Höhe der Belastung und in Abhängigkeit der Betriebsbedingungen in der Größenordnung der ohmschen Verluste. Durch eine elektrische Leistungsmessung an der Zelle kann in vielen Fällen nicht auf die thermische Leistung geschlossen werden.

Aktuelle messtechnische Ansätze sind entweder durch eine grobe Schätzung des Wärmedurchgangs ungenau, nicht geeignet um transiente Vorgänge abzubilden oder auf rechnerische Ansätze angewiesen.

Rechnerische Ansätze sind nur dann genau, wenn der Aufbau der Zelle bis ins kleinste Detail bekannt ist und dieser ebenso modelliert wird.

Der in dieser Arbeit konstruierte Prüfstand soll die Erfassung der veränderlichen Wärmeabgabe von Lithium-Zellen unter definierbaren Randbedingungen ermöglichen. Die Messung soll unabhängig von den auf die Zelle bezogenen geometrischen, thermischen und strömungstechnischen Parametern sein und die zu testende Zelle soll für die Messung nicht modifiziert werden müssen. Der zu betrachtende Bereich der thermischen Leistung für Einzelzellen liegt zwischen 10W und 100W und umfasst somit Batterien für Hybridelektrofahrzeuge (HEV) und Plug-In-Hybridelektrofahrzeuge (PHEV).

2 Die Lithium-Ionen Zelle

Bei den in dieser Arbeit zu untersuchenden elektrochemischen Zellen handelt es sich ausschließlich um sogenannte Sekundärzellen bzw. Akkumulatoren auf Lithium-Basis. Die Bezeichnung von Lithium-Akkumulatoren richtet sich im Allgemeinen nach deren Aufbau oder nach der verwendeten positiven Elektrode. Eine Ausnahme stellt der Lithium-Titanat-Akkumulator dar, dessen Bezeichnung die Zusammensetzung der negativen Elektrode ausweist. Die grundsätzliche Funktionsweise ist, wie im Folgenden erklärt unter allen Typen von Lithium-Akkumulatoren dieselbe. Durch die Wahl unterschiedlicher Elektrodenmaterialien und Elektrolyte können jedoch diverse Eigenschaften der Zelle gezielt verändert werden.

2.1 Aufbau und Funktionsweise

Wie in jeder galvanischen Zelle geschieht auch in Lithium-Batterien eine Umwandlung von chemischer Energie in elektrische bzw. umgekehrt. Batterien bezeichnen dabei eine Parallel- oder Serienschaltung mehrerer galvanischer Elemente. Werden zwei unterschiedliche Elektroden in einen Elektrolyten eingebracht und wird zwischen den Elektroden eine elektrische Verbindung hergestellt, so kommt es zu einem Elektronenfluss von der negativen Elektrode (Anode) zur positiven (Kathode), der als Gleichstrom zwischen den Elektroden messbar ist. Um den elektrischen Kreis zu schließen, stellen sich an den Elektroden im Elektrolyten Ausgleichsreaktionen ein. Bei diesen Redoxreaktionen kommt es durch einen Oxidationsvorgang an der Anode und durch einen Reduktionsvorgang an der Kathode zu einem Ionentransport von der Anode zur Kathode und somit zu einer stofflichen Veränderung in der Zelle. Diese ist bei Akkumulatoren bis zu einem gewissen Grad reversibel (Stichwort: Ladezyklen), was dazu führt, dass bei der Ladung der Batterie elektrische Energie in Form einer chemischen Stoffänderung gespeichert wird. Das Potential der Zelle wird durch die eingesetzten Elektroden bestimmt. „Jede Elektrode liefert einen charakteristischen Beitrag zur Standard-Zellspannung. Diese Beiträge sind nicht einzeln messbar, sondern nur als Differenz. Als Bezugspunkt wird die Standard-Wasserstoffelektrode gewählt.“ [17] Werte für die Standardpotentiale diverser Elektroden sind entsprechender Literatur zu entnehmen. Die Nennspannung von Lithium-Ionen-Zellen liegt in der Regel zwischen 3,2V (Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator) und 3,8V (Lithium-Mangan-Akkumulator). Sie kann als Klemmenspannung gemessen werden.

Als besonders unedles Metall mit einer Standard-Zellspannung der Halbzelle (Potential Lithium \rightarrow Wasserstoffelektrode) von $-3,05\text{V}$ eignet sich Lithium hervorragend als Elektrodenmaterial. Die niedrige Dichte von Lithium bedeutet eine hohe gravimetrische Energiedichte, was für eine Verwendung in mobilen Energiespeichern spricht.

Die positive Elektrode einer Lithium-Ionen-Zelle besteht im geladenen Zustand üblicherweise aus Lithium-Metalloxid während die negative Elektrode meistens aus einer Graphitstruktur aufgebaut ist. An der negativen Elektrode liegt das Lithium in atomarer Form vor, wo es im Graphit eingebettet wird. Das Graphit bildet Ebenen aus, in die sich die Lithium-Atome einlagern. Dieser Vorgang wird Interkalation (lat. von „einschieben“) genannt und ist ebenso an der positiven Elektrode, im Lithium-Metalloxid zu beobachten. Für den Ionentransport im Elektrolyten sind die namensgebenden Li^+ -Ionen verantwortlich.

Durch den Entladevorgang werden an der Anode Lithium-Atome oxidiert, welche jeweils ein Elektron an die Elektrode abgeben. Diese fließen über den externen Leiter zur positiven Elektrode (Kathode). Gleichzeitig wandern die nun an der Anode vorliegenden Li^+ -Ionen durch den Elektrolyten zur Kathode, wo sie sich zwischen dem Metalloxid verteilen. Dieses Metalloxid ist im geladenen Zustand der Zelle so stark ionisiert, dass es nun an Stelle der Li^+ -Ionen mit den an der Kathode eintreffenden Elektronen reduziert wird. Das Lithium liegt an der Kathode also in Ionen-Form vor. Das Metalloxid variiert je nach Typ des Akkumulators.

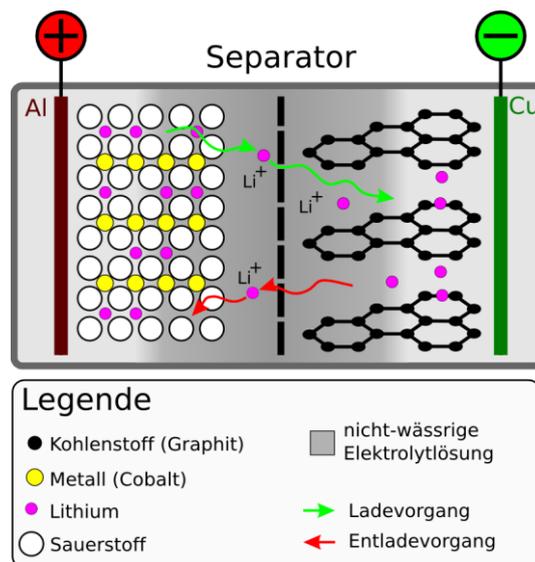
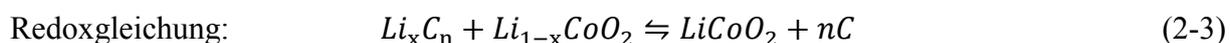
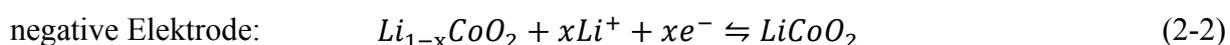
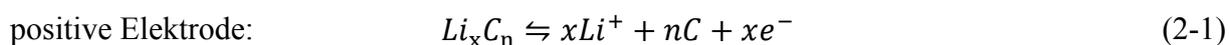


Abbildung 2-1: Schematischer Aufbau einer LiCoO_2 -Zelle [27]

Abbildung 2-1 veranschaulicht den Aufbau einer LiCoO₂-Zelle und gibt die Richtung des Li⁺-Ionen Transportes während der Ladung und Entladung der Zelle wieder. Während auf der Seite der positiven Elektrode die Übergangsmetallionen mit den dazwischen eingebetteten Li⁺-Ionen dargestellt sind, wird auf der Seite der negativen Elektrode die Interkalationsverbindung der Lithium-Atome mit dem Graphit verdeutlicht.

Für den Lade- und Entladevorgang ergeben sich in der LiCoO₂-Zelle folgende Reaktionsgleichungen, welche auf andere Elektrodenmaterialien analog angewendet werden können:



Durch die vielen unterschiedlichen Elektrodenmaterialien und deren Kombinationsmöglichkeiten ist es schwierig, allgemeine Eigenschaften von Lithium-Ionen-Batterien zu definieren. Nachfolgende Aufzählungen können, ohne im Detail darauf einzugehen, als grundsätzliche Gemeinsamkeiten aller Typen aufgefasst werden:

- Das Fehlen des Memory-Effektes
Auch nach häufiger Teilentladung kann dem Akku die Nennenergiemenge entnommen werden.
- Abhängigkeit der Lebensdauer vom Ladezustand
Durch Nichtausnutzung der vollen Ladung kann die Zyklenzahl des Akkus deutlich erhöht werden. Dies macht sich besonders im Einsatz in HEV bemerkbar, wo die Akkus innerhalb enger Ladezustandsbereiche betrieben werden.
- Ein hoher Gesamtwirkungsgrad
Der durch den Innenwiderstand und andere Phänomene verminderte mittlere Gesamtwirkungsgrad ist üblicherweise größer 90%, bei entsprechender Ladung und Entladung können bis zu 98% erreicht werden.
- Eine hohe gravimetrische Leistungs- und Energiedichte
Die Leistungsdichte liegt in einem Bereich von ca. 0,3-1,5kW/kg während die Energiedichte mit bis zu 200Wh/kg etwa doppelt so hoch ist, wie die eines NiMH-Akkus (siehe Abbildung 2-2).

- Große Temperaturabhängigkeit

Die Ablaufgeschwindigkeit chemischer Reaktionen hängt stark von der Temperatur ab, die somit auch die Leistungsfähigkeit des Akkus wesentlich beeinflusst. Bei zu niedriger Temperatur kann der Lithium-Akku einfrieren, was ihn unbrauchbar macht, eine zu hohe Temperatur kann zum thermischen Durchgehen und zur Alterung der Zelle führen.

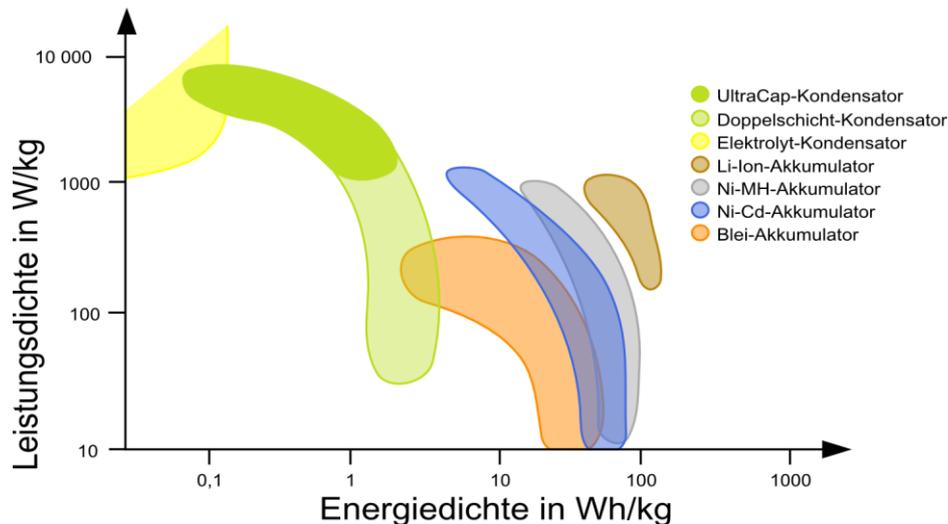


Abbildung 2-2: Ragone-Diagramm zum Vergleich unterschiedlicher Energiespeichertechnologien [5]

Speziell der letzte Punkt obiger Aufzählung ist für diese Arbeit von besonderer Bedeutung, weswegen auf die thermischen Eigenheiten von Lithium-Ionen-Zellen genauer eingegangen wird.

2.2 Thermische Eigenheiten von Lithium-Ionen-Zellen

Die Zelltemperatur bestimmt nicht nur die Leistungsfähigkeit des Akkumulators, sie wirkt sich auch auf die Lebensdauer der Zelle aus und stellt eine entscheidende Größe bei der Betrachtung der Sicherheitsaspekte während des Betriebs und der Lagerung dar.

2.2.1 Leistungsfähigkeit

Diverse Arbeiten befassen sich eingehend mit den temperaturabhängigen reversiblen und irreversiblen Veränderungen in Lithium-Ionen-Zellen. Irreversible Veränderungen werden beispielsweise durch Alterungsmechanismen hervorgerufen. Dies sind Veränderungen in der Chemie der Zelle welche besonders durch hohe Temperaturen angekurbelt werden. Einige Studien zeigen, dass die Alterung bei Temperaturen über 50°C stark zunimmt. Bemerkbar

macht sich das durch negative Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit der Zelle. Es wird dabei unterschieden zwischen einer alterungsbedingten Reduktion der Kapazität und einer Reduktion der möglichen Abgabeleistung der Zelle. Die nutzbare Kapazität sinkt dadurch, dass aktives Material (Elektrodenmaterial) bei hohen Temperaturen inaktiviert wird und so weniger Ladungsträger übrig bleiben. Die Minderung der Abgabeleistung wird durch einen Anstieg des Innenwiderstandes (elektrische Impedanz) verursacht. Das bedeutet auch, dass der mögliche Entladestrom in einem gewissen Ausmaß verringert wird. [3]

Alterungsmechanismen wirken nicht nur unter Belastung der Batterie, sondern auch bei bloßer Lagerung. Ausschlaggebender Faktor ist dabei die Temperatur, was die Wichtigkeit von thermischen Managementsystemen für Batterien hervorhebt.

Auf der anderen Seite bewirken auch niedrige Temperaturen ähnliche Effekte. Es kommt unabhängig von der verwendeten Chemie zu einem reversiblen Kapazitäts- und Leistungsverlust beim Entladen. Kritischer hingegen - weil nicht umkehrbar - ist der Ladevorgang bei niedrigen Temperaturen. Durch zu hohe Ströme kommt es zur Ausbildung einer Lithium-Schicht auf der negativen Elektrode und damit einhergehend zu einem irreversiblen Kapazitätsverlust der Zelle. [3]

2.2.2 Thermisches Durchgehen

Thermisches Durchgehen (engl.: thermal runaway) eines Akkumulators kann das Ergebnis unterschiedlicher, stark exothermer Reaktionen im Aufbau der Batterie sein, die durch hohe Temperaturen ausgelöst werden. Im Allgemeinen kommt es dabei zu einer Freisetzung großer Wärmemengen in sehr kurzer Zeit, welche die Temperatur der Zelle ansteigen lassen und dadurch weitere wärmefreisetzende Nebenreaktionen ankurbeln. Auslöser ist das Überschreiten kritischer Temperaturen, die diese exothermen Vorgänge in der Zelle in Gang setzen. Die genaue Temperatur ist dabei abhängig von der eingesetzten Chemie.

Während des ersten Benutzungszyklus einer neuen Zelle bildet sich an der negativen Elektrode durch eine Zersetzungsreaktion mit dem Elektrolyten die sogenannte Solid-Electrolyte-Interphase aus, die eine Art passivierende Deckschicht über der Graphitstruktur darstellt. Sie verhindert eine weitere Zersetzung des Elektrolyten an der Elektrode und ist durch ihre ionische Leitfähigkeit für den Deinterkalationsvorgang von Bedeutung. Bei Temperaturen zwischen 90°C und 120°C beginnt sich diese Deckschicht zu zersetzen, wodurch es zu einer exothermen Reaktion des Elektrodenmaterials mit dem im Elektrolyten vorhandenen Lösungsmittel kommt. Die Temperatur während dieser Reaktion steigt auf bis zu 200°C an.

An der positiven Elektrode können ab ca. 180°C ebenfalls hoch exotherme Reaktionen des Lithium-Metalloxids mit dem Elektrolyten starten. Es reagieren entweder die beiden Partner direkt miteinander oder der Elektrolyt mit Sauerstoff, der durch die Zersetzung der positiven Elektrode frei wird.

Letztlich kann bei einer Temperatur zwischen 130°C und 190°C der Separator, der die positive von der negativen Elektrode trennt, schmelzen. Eine Beschädigung des Separators führt zu einem internen Kurzschluss der Zelle, was ebenso eine große Wärmeentwicklung zur Folge hat. [3]

Die drei erwähnten Mechanismen stellen jeweils einen Ausgangspunkt für ein thermisches Durchgehen dar. So kann auch durch eine mechanische Beschädigung des Separators (z.B. durch Fallenlassen der Zelle) die unbeabsichtigte Wärmeproduktion gestartet werden, die dann den Auslöser für weitere Reaktionen gibt. Weitaus wichtiger ist jedoch die Tatsache, dass diese Energie in Form von Wärme auch im Inneren der Zelle unter Belastung mit hohen Strömen entstehen kann. Dem Wissen über die Wärmeentwicklung in der Zelle durch elektrochemische Vorgänge kommt somit eine immense Bedeutung zu.

2.2.3 Wärmeproduktion in der Zelle

In einer Zelle laufen zeitgleich mehrere Prozesse ab, die eine Wärmeentwicklung zur Folge haben. Deren Ursachen können in wärmeerzeugende oder -aufnehmende chemische Vorgänge und joulesche Wärme unterschieden werden.

Zu den chemischen Vorgängen im aktiven Material zählen Reaktionen der einzelnen Phasen untereinander, Phasenänderungen und Mischungsvorgänge. Bestimmte Prozesse laufen dabei reversibel ab, was bedeutet, dass sie sowohl Wärme abgeben, als auch aufnehmen. Diese in der Literatur genannte entropische Wärme kann durch Bestimmung des entropischen Wärmekoeffizienten (siehe Abschnitt 2.4.1) dargestellt und berechnet werden und lässt sich als Funktion von Ladezustand der Zelle (engl.: state of charge, SOC) und Temperatur bestimmen. In ihrer Größenordnung entspricht sie ca. der irreversiblen jouleschen Wärmeentwicklung [13] und darf bei der Betrachtung der gesamten Wärmeentwicklung in der Zelle nicht vernachlässigt werden.

Die Reaktionsgeschwindigkeiten in den Phasen des aktiven Materials sind durch die Verwendung unterschiedlicher chemischer Zusammensetzungen von Phase zu Phase verschieden. Das begünstigt die Ausbildung von Konzentrationsgradienten im aktiven Material während der Ladung oder Entladung der Zelle. Diese Konzentrationsgradienten

gehen mit einer Wärmeaufnahme oder -abgabe einher. Nach Wegfall der Belastung stellt sich wieder ein Konzentrationsausgleich im aktiven Material ein, wobei die zuvor aufgenommene oder abgegebene Wärme ihr Vorzeichen ändert. Dieser Effekt ähnelt der entropischen Wärme, ist aber nicht mit dieser zu verwechseln.

Joulesche Wärme entsteht durch Verluste über dem Innenwiderstand der Zelle, der sich aus dem elektrischen Widerstand der Stromableiter zusammensetzt und aus dem Widerstand im aktiven Material, der sich dem Ladungsausgleich entgegenstellt. Dieser Anteil der Wärmeentwicklung wird in der Literatur meistens experimentell über das sogenannte Zellüberpotential (engl.: Overpotential) ermittelt. Es wird dabei so vorgegangen, dass die Ruhespannung der Zelle (engl.: open-circuit-potential, OCP) nach längerer Zeit der Nichtbenutzung, das sind in der Regel mehrere Stunden, gemessen wird. Sie lässt sich als Funktion von SOC und Temperatur angeben. Im Unterschied dazu kann unter Last an der Zelle nur die Klemmenspannung gemessen werden. Diese ist bei Entladung niedriger als die OCP, bei Ladung höher und abhängig vom zugeführten bzw. entnommenen Strom. Das Zellüberpotential ist die Differenz von Ruhespannung und Klemmenspannung.

2.3 Thermische Kennwerte von Lithium-Ionen-Zellen

Trotz ihrer geringen Abmaße halten Lithium-Ionen-Batterien bei der thermischen Simulation eine nicht zu unterschätzende Komplexität bereit, die sich bei realitätsgetreuer Modellierung der Zelle in einem hohen Rechenaufwand ausdrückt. Der Grund dafür liegt u.a. in den sogenannten Wiederholungseinheiten der Batterie, die wie in Abbildung 2-3 gezeigt, aus der Abfolge negative Elektrode-Separator-positive Elektrode-Separator bestehen. Jede der aufgezählten Schichten weist eine unterschiedliche Dicke und Materialzusammensetzung auf.

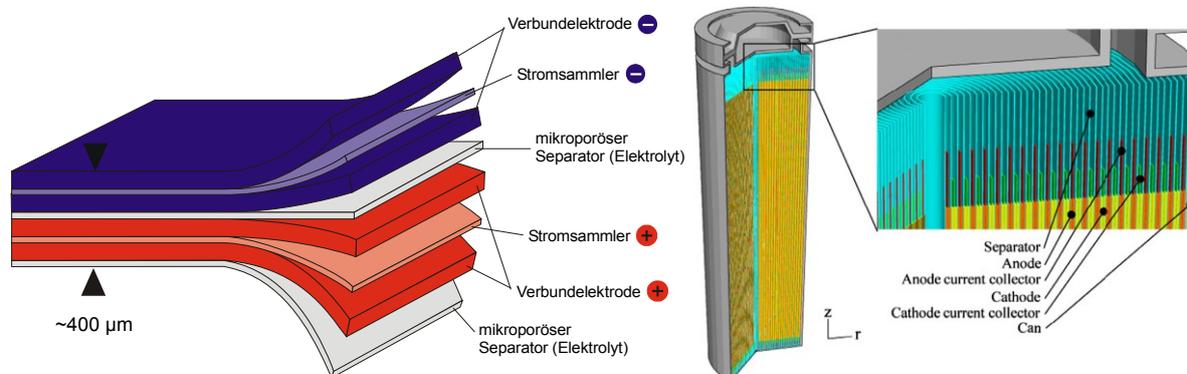


Abbildung 2-3: links: schematischer Aufbau einer Wiederholungseinheit [6], rechts: Innenleben einer Rundzelle bestehend aus vielen Wiederholungseinheiten [16]

Dazu kommt die Hintereinanderschaltung unzähliger Wiederholungseinheiten in der Batterie zu deren Leistungssteigerung.

Die entscheidenden Parameter für thermische Berechnungen (z.B. Lösung der Wärmeleitungsgleichung für die Batterie) sind die Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit. Diese Werte werden nicht nur für die Simulation im Labor benötigt, sondern sind ebenso wie das Wissen über die Wärmeentwicklung in der Zelle unabdingbar für die Erstellung von Regelalgorithmen wie z.B. für Thermomanagementregelkreise in Elektrofahrzeugen.

Um die Berechnungen zu vereinfachen und den Einsatz auf leistungsschwächeren Rechnern zu ermöglichen, wird die Zusammensetzung des aktiven Materials (und somit die Summe aller Wiederholungseinheiten) als durchgehend homogenes Material mit anisotropen thermischen Eigenschaften angesehen. Auch die Ermittlung der Kennwerte mit den unter Abschnitt 2.4 beschriebenen Methoden impliziert ein solches Verhalten.

2.3.1 Wärmekapazität

Die Wärmekapazität C nach Gleichung (2-4) beschreibt den Zusammenhang zwischen der von einer Stoffmenge aufgenommenen Wärmemenge ∂Q_{rev} und der dadurch verursachten Temperaturerhöhung ∂T .

$$c = \frac{C}{m} = \frac{1}{m} \cdot \frac{\partial Q_{\text{rev}}}{\partial T} \quad (2-4)$$

Durch Division mit der Masse m der Stoffmenge ergibt sich deren spezifische Wärmekapazität c . Die spezifische Wärmekapazität diverser Reinstoffe ist entsprechenden Tabellen zu entnehmen.

Für zusammengesetzte Stoffe lässt sie sich, bei Kenntnis der Zusammensetzung, nach Gleichung (2-5) berechnen.

$$c_{\text{zus}} = \frac{\sum_i (m_i \cdot c_i)}{\sum_i m_i} \quad (2-5)$$

Zur genauen Berechnung der Wärmekapazität einer Batterie ist die Kenntnis über die Masse, die spezifische Wärmekapazität und die Dicke jeder Schicht in der Wiederholungseinheit erforderlich. Außenstehenden bleiben solche Informationen vorenthalten, weswegen keine rechnerische Ermittlung nach Gleichung (2-5) erfolgen kann. In der Praxis wird daher mit den unter Abschnitt 2.4.2 beschriebenen Methoden die Wärmekapazität von Lithium-Ionen-Akkumulatoren experimentell ermittelt und entweder bezogen auf deren

Masse oder Dichte in der Literatur angeführt.

2.3.2 Wärmeleitfähigkeit

Der zweite wichtige Parameter bei der thermischen Betrachtung von Lithium-Ionen-Zellen ist die Wärmeleitfähigkeit des aktiven Materials. In dieser Arbeit mit λ bezeichnet, beschreibt sie nach Gleichung (2-6), besser bekannt als fouriersches Gesetz der Wärmeleitung, den Zusammenhang zwischen der in einem Material vorhandenen Wärmestromdichte \dot{q} und dem dafür verantwortlichen Temperaturgradienten.

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \text{grad}(T) \quad (2-6)$$

In Lithium-Ionen-Batterien weist die Wärmeleitfähigkeit, bedingt durch den oben genannten Aufbau der Wiederholungseinheiten, eine deutliche Ausprägung der Richtungsabhängigkeit auf. Bei einem Fluss des Wärmestroms in Schichtrichtung teilt sich dieser auf jede einzelne Schicht entsprechend deren Wärmeleitfähigkeit auf. Im Gegensatz dazu muss der Wärmestrom bei einem Fluss normal zur Schichtrichtung jede einzelne Schicht der Wiederholeinheit durchdringen, wodurch er bei gleicher treibender Temperaturdifferenz geringer ausfällt.

Analog dem elektrischen Widerstand, kann für die zusammengesetzte Wärmeleitfähigkeit des aktiven Materials für einen Wärmestrom parallel zu den Schichten der Wiederholungseinheit Gleichung (2-7) geschrieben werden, für einen Wärmestrom normal dazu Gleichung (2-8).

$$\lambda_{\parallel} = \frac{\sum_i (x_i \cdot \lambda_i)}{\sum_i x_i} \quad (2-7)$$

$$\lambda_{\perp} = \frac{\sum_i x_i}{\sum_i \left(\frac{x_i}{\lambda_i}\right)} \quad (2-8)$$

In obigen Gleichungen steht x_i für die jeweilige Schichtdicke. Ähnlich der Wärmekapazität erfolgt die Bestimmung dieser Werte i.A. experimentell, die gängigen Methoden dazu sind in Abschnitt 2.4.2 beschrieben.

2.4 Gängige Methoden zur Bestimmung der thermischen Parameter

2.4.1 Ermittlung der Wärmeproduktion

Die zur Zeit am weitesten verbreiteten Methoden zur Bestimmung der in der Batterie entwickelten Wärme lassen sich in zwei Gruppen teilen. Die rechnerischen Wege basieren auf den Grundsätzen der Energieerhaltung die auf die Zelle als Ganzes oder nur Teile davon angewendet werden, die experimentellen Wege fußen auf kalorimetrischen Messungen an den Zellen.

2.4.1.1 Rechnerische Ansätze

Bernardi et al. [5] haben einen Weg gefunden, die Wärmeentwicklung im aktiven Material der Zelle rechnerisch zu ermitteln. Durch Anwendung des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik auf das aktive Material einer Zelle als Kontrollvolumen beschreiben sie die energieumwandelnden Vorgänge durch die Interaktion der einzelnen chemischen Phasen untereinander. Aus der so abgeleiteten Gleichung können rechnerische Aussagen über die elektrische Leistungsfähigkeit der Zelle und der Wärmeentwicklung in deren Inneren gewonnen werden. Die am häufigsten zitierte Version dieser Gleichung zur Beschreibung der Wärmeentwicklung ist die, bei Vernachlässigung einiger Terme der Originalgleichung unter Gleichung (2-9) dargestellte.

$$q = I \cdot (U - V) - I \cdot \left(T \frac{dU}{dT} \right) \quad (2-9)$$

Der erste Term auf der rechten Seite bezeichnet darin die Wärmeentwicklung durch das sogenannte Überpotential der Zelle unter Betrachtung des fließenden Stroms I , der Ruhespannung U und der Klemmenspannung V . Der zweite Term auf der rechten Seite beschreibt die entropische Wärme, der Ausdruck in Klammer wird als entropischer Wärmekoeffizient bezeichnet. Während die Wärme durch Überpotential immer positiv ist, kann die entropische Wärme auch negative Werte annehmen, d.h. es kann zu einer Wärmeaufnahme im aktiven Material kommen und somit zu Kühlungseffekten. Für die Vernachlässigungen wird davon ausgegangen, dass pro Elektrode nur eine chemische Reaktion abläuft und dass es zu keiner Phasenänderung und zu keinen Mischungsvorgängen in der Zellchemie kommt. Lithium-Ionen-Zellen bringen diese Voraussetzungen, mit Ausnahme der Letztgenannten mit, wobei die Mischung bei niedrigen Strömen ebenso vernachlässigbar bleibt. Des Weiteren ist diese Gleichung nur für kleinere Zellen gültig, weil die joulesche Wärmeentwicklung in den Stromableitern unbeachtet bleibt.

Diese steigt jedoch mit zunehmender Baugröße der Zelle (und somit steigender Stromableitergröße) bedeutend an und darf gegenüber der im aktiven Material entwickelten Wärme nicht mehr vernachlässigt werden. Bei schlechter Integration der Stromabnehmer in das aktive Material kommt es in diesen zu einer räumlich variierenden Stromdichte. Orte mit höherem Stromfluss weisen eine stärkere Wärmeentwicklung auf. Diese Tatsache wird in Gleichung (2-9) nicht berücksichtigt.

Kim et al. [16] erweiterten die Gleichung von Bernardi et al. deshalb um weitere Terme zu

$$q''' = i''' \cdot \left(U - V - T \frac{dU}{dT} \right) + \sigma |\nabla\phi|_{\text{pos}}^2 + \sigma |\nabla\phi|_{\text{neg}}^2 \quad (2-10)$$

um sie für die Berechnung der Wärmeentwicklung von größeren Zellen einsetzen zu können.

Der erste Term auf der rechten Seite entspricht dabei Gleichung (2-9), die beiden restlichen Terme der rechten Seite geben die volumetrische Wärmeentwicklung durch die ohmschen Verluste an den Stromabnehmern der positiven bzw. negativen Elektrode wieder. [3]

Hat man alle notwendigen Daten zur Verfügung besteht der große Vorteil der rechnerischen Methoden darin, die lokale Wärmeentwicklung zu jedem Zeitpunkt exakt bestimmen zu können. Aufwendige Messapparaturen und -aufbauten sind nicht notwendig.

Von Nachteil ist die aufwendige Bestimmung des entropischen Wärmekoeffizienten. Der Grund liegt in der Ruhezeit nach Einstellen eines definierten Ladezustands, die der Zelle erlaubt werden muss, um ihre Ruhespannung messen zu können. Je nach Anzahl der erforderlichen Messpunkte können so mehrere Tage zur Ermittlung des entropischen Wärmekoeffizienten vergehen. [3] Weiters sind zur Auswertung von Gleichung (2-10) FE Simulationen und ein sehr genaues geometrisches Modell der Zelle erforderlich, um die Ungleichverteilung des Stroms in den Stromableitern ($\nabla\phi$) zu kalkulieren.

2.4.1.2 Experimentelle Ansätze

Die zur experimentellen Ermittlung am häufigsten verwendete Methode für die Bestimmung der Wärmeentwicklung in Lithium-Ionen-Batterien ist die Kalorimetrie. Es werden drei Untergruppen in den angewendeten Verfahren unterscheiden: Accelerated Rate Calorimetry (ARC), Isothermal Heat Conduction Calorimetry (IHC) und Radiation Calorimetry (RC).

ARC basiert auf der Wärmeabgabe der zu untersuchenden Batterie gegen ein Umgebungsmedium konstanter Temperatur, z.B. gegen ein Fluid, mit dem der Prüfling in Kontakt steht. Die Temperatur der Zelle darf bei dieser Art Messung in ihrer Größe variieren.

Eine Abschätzung der in der Zelle entstehenden Wärme geschieht nach Gleichung (2-11) wobei sowohl die Wärmekapazität C der Zelle, als auch die Kalorimeterkonstante αA im Vorhinein exakt bestimmt werden müssen.

$$\dot{Q} = C \frac{dT}{dt} + \alpha A \cdot (T_{\text{Oberfläche}} - T_{\text{Umgebung}}) \quad (2-11)$$

Der erste Term der rechten Seite der Energiegleichung beschreibt die in der Zelle gespeicherte Wärme, während der zweite Term dem von der Oberfläche der Zelle an die Umgebung übertragenen Wärmestrom entspricht.

Die Messung nach dem Prinzip der IHC läuft prinzipiell ähnlich der ARC-Messung ab, mit dem Unterschied, dass die Temperatur der Batterie über die Dauer der Messung konstant gehalten wird. Erreicht wird dies durch das direkte Anbringen einer Kühlvorrichtung an deren Oberfläche oder durch das Einbringen der Batterie in ein Kühlbad. Hochgenaue Temperatursensoren sind zur Erfassung minimalster Temperaturschwankungen notwendig, aus denen der Wärmestrom errechnet wird.

Für die Methode der RC wird die zu testende Batterie in eine Vakuumkammer eingebracht, deren Wandungen auf konstanter Temperatur gehalten werden. Die in der Batterie entstehende Wärme kann nur durch Strahlung über deren Oberfläche und durch Wärmeleitung in den Stromkabeln entweichen. Die Energiebilanz für diese Messmethode ist durch Gleichung (2-12) angegeben,

$$\begin{aligned} \dot{Q} = C \frac{dT}{dt} + \varepsilon \sigma_{\text{OB}} A \cdot (T_{\text{Oberfläche}}^4 - T_{\text{Wandung}}^4) \\ + \frac{\lambda_{\text{Kabel}} A_{\text{Kabel}}}{l_{\text{Kabel}}} \cdot (T_{\text{Oberfläche}} - T_{\text{Kabel}}) \end{aligned} \quad (2-12)$$

der erste Term der rechten Seite entspricht wiederum der von der Batterie aufgenommenen Wärme, der zweite Term entspricht dem Wärmestrom, der durch Strahlung abgegeben wird, wobei σ die Stefan-Boltzmann-Konstante und ε den Strahlungsaustauschgrad bezeichnet. Der letzte Term beschreibt den Wärmestrom, der die Batterie durch Wärmeleitung über den Querschnitt A der Stromkabel verlässt.

Alle oben genannten Methoden haben zum Nachteil, dass sie die Wärme erst bei Verlassen der Batterie messen können. Bedingt durch deren hohe Wärmekapazität entstehen große Zeitverzögerungen zwischen dem Entstehen und dem Erfassen der Wärme. Zudem kommt, dass die Ermittlung der Wärmekapazität im Vorhinein erfolgen muss.

2.4.2 Ermittlung der thermischen Kennwerte

Zur Bestimmung thermischer Kennwerte lassen sich viele Methoden aufzählen. Besonders interessant sind jedoch solche, die Werte zur Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit eines Systems in einem einzigen Vorgang liefern. Von diesen kombinierten Methoden stechen in der Literatur zur thermischen Charakterisierung von Lithium-Ionen-Akkumulatoren vor allem zwei heraus, welche nachfolgend beschrieben werden.

2.4.2.1 Xenon-Blitz Methode

Von der zur Verfügung stehenden Literatur ist die Xenon-Blitz Methode (engl.: Xenon-Flash-Method) die am häufigsten genannte zur Bestimmung der thermischen Parameter der einzelnen Komponenten einer Zelle. Sie wird vorwiegend zur Charakterisierung des aktiven Materials herangezogen und ist auch unter den Bezeichnungen Halogen-Flash Method, Laser-Flash Method oder einfach nur Flash-Methode bekannt. Ihr Prinzip beruht auf der unterschiedlichen Ausbreitung von Wärmeenergie in einer Probe in Abhängigkeit deren Temperaturleitfähigkeit. Die Temperaturleitfähigkeit a nach Gleichung (2-13) beinhaltet Informationen zur Wärmeleitfähigkeit λ und zur Wärmekapazität c eines Materials und ist im Allgemeinen abhängig von der Ortskoordinate \vec{r} und der Temperatur T .

$$a(\vec{r}, T) = \frac{\lambda(\vec{r}, T)}{\rho(\vec{r}, T) \cdot c(T)} \quad (2-13)$$

Die in eine Halterung eingespannte Probe wird einseitig mit einem Wärmeimpuls bekannter Größe beaufschlagt, der z.B. durch einen Lichtblitz generiert wird. Gleichzeitig wird die zeitliche Temperaturänderung auf der gegenüberliegenden Seite der Probe erfasst, die sich, in Abhängigkeit der Temperaturleitfähigkeit verzögert und gedämpft vollzieht. Die Temperaturleitfähigkeit kann allein aus dem Wissen über den Temperaturanstieg berechnet werden. In [11] sind dazu unterschiedliche Ansätze zu finden.

Die mit dieser Methode ermittelte anisotrope Temperaturleitfähigkeit kann in ein Modell der Zelle, welches auf der Wärmeleitungsgleichung nach Gleichung (2-14) aufbaut, für den ersten Term der rechten Seite eingesetzt werden. Der Nachteil dieser Methode besteht in der limitierten Energiemenge, die der Probe mit jedem Impuls zugeführt wird.

$$\frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} = \nabla \left[\frac{\lambda(\vec{r}, T)}{\rho(\vec{r}, T) \cdot c(T)} \cdot \nabla T(\vec{r}, t) \right] + \dot{q}(\vec{r}) \quad (2-14)$$

Die sich daraus ergebende begrenzte Dicke der Probe liegt in der Regel in der Größenordnung weniger Millimeter. Für zusammengesetzte, voluminöse Proben, wie es der Fall bei Lithium-Ionen-Akkumulatoren ist, bedeutet das deren Zerlegung und anschließende Vermessung der Einzelteile. Die Öffnung einer solchen Zelle ist, je nach verwendeter Chemie, nicht immer ungefährlich (siehe Abschnitt 2.2.2), dementsprechend sind besondere Vorsichtsmaßnahmen bei der Handhabung zu treffen. Weil das aktive Material bei Kontakt mit der Umgebungsluft auszutrocknen beginnt, verändern sich zudem seine Eigenschaften und dadurch seine thermischen Parameter. Die Einspannung der Probe in der Halterung wirkt sich insofern auf die thermischen Parameter aus, als dass durch den Druck der Einspannung die Schichten des aktiven Materials stärker aneinander gepresst werden und sich deren zusammengesetzte Wärmeleitfähigkeit (vgl. Gleichung (2-8)) durch erhöhten Materialkontakt verbessert. Die Situation entspricht daher nicht einer realen Einbaubedingung.

Für ein vollständiges Modell zur Simulation basierend auf Gleichung (2-14) fehlt bei vorhandener Temperaturleitfähigkeit immer noch der letzte Term auf der rechten Seite der Gleichung, der die innere Wärmequelle darstellt. Dieser muss mit einem der unter Abschnitt 2.4.1 erörterten Ansätze bestimmt werden.

2.4.2.2 Thermische Impedanzspektroskopie

Barsoukov et al. [4] waren die ersten, die die thermische Impedanzspektroskopie erfolgreich zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und der Wärmekapazität von Lithium-Ionen-Zellen einsetzen. Die Methode basiert auf der Untersuchung des Antwortverhaltens von Systemen, wonach die thermische Impedanz, analog zur elektrischen, als Relation der Ausgangsgröße y zur Eingangsgröße x des Systems zu verstehen ist. In ihrer Arbeit wird eine Rundzelle mit einem externen Wärmeimpuls in Form einer Sprungfunktion beaufschlagt. Die Temperatur der Zelle wird währenddessen kontinuierlich gemessen und erreicht nach einiger Zeit einen konstanten Wert. Während aus dem transienten Teil des Temperaturverlaufs Rückschlüsse über die Wärmekapazität der Zelle gezogen werden können, lässt der statische Teil Aussagen über die Wärmeleitfähigkeit zu. Die thermische Impedanz Z_{th} lässt sich nach Gleichung (2-15) (siehe [4]) im Spektralbereich als Verhältnis der Laplace-Transformierten der Temperatur T der Zelle zur Laplace-transformierten der Anregungsfunktion i darstellen. \mathcal{L} stellt dabei die Laplace-Transformation dar, durch welche die jeweilige Größe vom Zeitbereich in den

$$Z_{th} = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\mathcal{L}\{T(t)\}}{\mathcal{L}\{i(t)\}} \quad (2-15)$$

Spektralbereich überführt wird, s ist die komplexe Frequenz $j2\pi f$. Als Anregungsfunktion i wird vorzugsweise diejenige Eingangsgröße des Systems gewählt, die messtechnisch am exaktesten zu erfassen ist, in [4] ist es beispielsweise die Wärmeleistung.

Die berechnete Impedanzfunktion wird anschließend durch eine entsprechende Modellierung einer thermischen Ersatzschaltung der Batterie, bestehend aus Wärmekapazitäten und Wärmewiderständen, approximiert. Das so abgeleitete thermische Modell der Batterie weist einen minimalen Rechenaufwand gegenüber detaillierten und auch vereinfachten FE-Simulationen auf, kann aber dennoch mit hoher Genauigkeit [12],[13] die Temperaturentwicklung im Akkumulator darstellen. Bezüglich der thermischen Kennwerte müssen keine Annahmen im Vorhinein zur Parametrierung des Modells getroffen werden.

Die Laplace-Transformation kann umgangen werden, indem statt einer Sprungfunktion eine sinusförmige Anregung der Batterie geschieht. Die Antwort auf eine harmonische Eingangsfunktion ist nach Gleichung (2-16) (vgl. [23]) eine in der Amplitude veränderte und in der Phase verschobene Ausgangsfunktion, wobei der Bruch auf der rechten Seite der Gleichung die Amplitudenänderung, der Exponent die Phasenverschiebung angibt.

$$Z_{\text{th}}(f_i) = \frac{Y(f_i)}{X(f_i)} \cdot e^{j(\varphi_X(f_i) - \varphi_Y(f_i))} \quad (2-16)$$

Um die thermische Impedanzfunktion in ihrer Gesamtheit nach Gleichung (2-15) zu erfassen, müssen für verschiedene Amplituden und Frequenzen der Eingangsfunktion X Messwerte aufgezeichnet werden. Der geringere Rechenaufwand wird dabei mit einem höheren Messaufwand erkauft. Beide Methoden liefern jedoch die selben Ergebnisse [23].

Bei Barsoukov et al. erfolgt die Anregung der Batterie durch Einbringen eines definierten Wärmestroms durch ein externes Heizelement, welches auf der Oberfläche angebracht wird. Die Forschungsgruppen um Fleckstein, Forgez und Schmidt [12],[13],[23] gehen einen Schritt weiter, und bringen den Wärmestrom von innen, das heißt durch Bestromung der Batterie ein. Die dabei vorherrschende Problematik der Bestimmung der Wärmeentwicklung wurde bereits in Abschnitt 2.4.1 diskutiert, und ist auch diesen Gruppen bewusst. Allen ist gemeinsam, dass sie im Vorhinein das Spektrum der elektrischen Impedanz der Lithium-Ionen-Batterie bestimmen und dass die Anregung zur thermischen Impedanzspektroskopie mit Wechselstrom erfolgt um den Ladezustand des Akkumulators während dessen Vermessung konstant zu halten. Die Berechnung der Wärmeentwicklung erfolgt bei allen Gruppen nach Gleichung (2-9).

Die Gruppen um Fleckstein und Forgez nutzen symmetrische Stromimpulse bei einer Frequenz von 2Hz, weil laut deren Aussage damit Änderungen des SOC verhindert werden. Schmidt et al. halten dem entgegen, dass bei dieser Frequenz Wärmeeffekte anderer Art als joulsche Verluste auftreten und nutzen hingegen sinusförmigen Strom mit einer Frequenz von ca. 17kHz, da das Impedanzspektrum der Zelle an diesem Punkt rein ohmsche Verluste aufweist.

Thermische Impedanzspektroskopie zählt derzeit zu den State-of-the-art Methoden, um die thermischen Parameter von Lithium-Ionen-Akkumulatoren zu bestimmen. Die wesentlichen Vorteile liegen in der einfachen Durchführbarkeit mit Standard-Messequipment und einem stark reduzierten, aber dennoch genauen Modell der Batterie. Bei Verwendung mehrerer über die Oberfläche der Zelle verteilter Temperatursensoren lässt sich ein räumliches Modell ableiten, welches ohne Vorannahmen zur Wärmeleitfähigkeit und zur Wärmekapazität der Batterie aus dem thermischen Impedanzspektrum generiert wird.

Bei interner Anregung bleibt nach der Methode von Forgez und Fleckstein jedoch immer noch die Unsicherheit bezüglich der im aktiven Material entwickelten Wärme bestehen, die Methode nach Schmidt bedarf auf Grund der sehr hohen Zyklisierungsfrequenz eines Spezial equipments.

2.5 Batteriesimulation am ViF

In dieser Arbeit wird ein Ansatz vorgestellt, der die thermische Impedanzspektroskopie mit kalorimetrischer Wärmemessung kombiniert. Der Vorteil dieser Methode liegt in der Bestimmung der Verlustleistung, die über die von der Zelle nach außen hin abgegebene Wärme erfolgt. Eine unsichere Berechnung der entstehenden Wärme nach Abschnitt 2.4.1.1 wird unabhängig von der Größe der Zelle überflüssig und somit auch Überlegungen hinsichtlich der Bestromung, wie die in [12],[13],[23] getroffenen. Vielmehr ergeben sich durch diesen Ansatz Möglichkeiten, die Chemie und das allgemeine Verhalten der betrachteten Zelle unter verschiedenen Gesichtspunkten zu untersuchen und die Parameter des Modells an ein großes Repertoire an Umgebungsbedingungen anzupassen.

Zu diesem Zweck ist jedoch ein Apparat, ähnlich einem Kalorimeter erforderlich, in dem die thermischen Parameter von Lithium-Ionen-Zellen zerstörungsfrei und einer realen Einbausituation entsprechend ermittelt werden können. Die Planung und Konstruktion dieses Prüfstands wird im folgenden Kapitel beschrieben.

3 Der Prüfstand

Ein erster Grobentwurf des Prüfstands war vor Beginn dieser Arbeit bereits von Mitarbeitern der Batterie-Gruppe der Area E des ViF erarbeitet worden. In den Grundzügen war vorgesehen, den Prüfling in einer sog. Glovebox zu platzieren und diese von einem konditionierten Fluid durchströmen zu lassen. Die bei elektrischer Beanspruchung der Batterie anfallende Verlustwärme wird vom Fluid über deren Oberfläche abgeführt. Durch Messung des Massenstroms des Fluid und der dabei auftretenden Enthalpieerhöhung zwischen Ein- und Austritt der Glovebox lässt sich über den ersten Hauptsatz der Thermodynamik nach Gleichung (3-1) auf die thermische Verlustleistung der Zelle schließen.

$$\dot{Q}(T, t) = \dot{m}_{\text{Fluid}} \left(h_{\text{Fluid,aus}}(T, t) - h_{\text{Fluid,ein}}(T, t) \right) \quad (3-1)$$

Dies stellt den Ausgangspunkt dar, auf dem der im Folgenden beschriebene Prüfstand aufbaut. Es werden sowohl die Probleme aufgezeigt, die sich im Laufe der Arbeit ergeben haben, als auch die gewählten Ansätze zu deren Lösung.

3.1 Anforderungsprofil an den Prüfstand

Für den Prüfstand wurden mit der Projektleitung folgende Eckdaten vereinbart:

- Es sollen Zellen vermessen werden können, welche ihren Einsatz in Hybridfahrzeugen finden, unabhängig von deren Form und elektrischer Kontaktierung.
- Die thermische Verlustleistung soll in einem Bereich von 10-100W mit einer Abweichung unter 5% erfassbar sein.
- Die Zellen sollen auf eine definierte Temperatur im Bereich zwischen 5°C und 35°C gebracht werden können, um den Temperatureinfluss abbildbar zu machen.
- Dynamische Messungen müssen zur Erfassung zeitlich veränderlicher Vorgänge durchführbar und akkurat sein.
- Die Temperierung der Zelle sowie die Erfassung der Verlustleistung soll über ein Fluid erfolgen, wobei dessen Temperaturerhöhung durch die zugeführte Wärme bei vorher definierter Verlustleistung 5 Kelvin betragen soll, um eine ausreichende Auflösung der Messung durch die Temperatursensoren zu gewährleisten.

3.2 Planung

Nach der Festlegung der Anforderungen an den Prüfstand stellte sich die Frage nach dem zu verwendenden Fluid. Vernachlässigt man die Wärmestrahlung wie in Anhang 8.1 dargestellt, so geschieht der Wärmeabtransport aus der Zelle durch Konvektion und bei größeren Batterien auch durch Wärmeleitung über die Stromzuleitungen. Nach Gleichung (3-2) ist der konvektiv übertragbare Wärmestrom \dot{Q} bei gegebener Zellengeometrie proportional der Temperaturdifferenz ΔT von Zelloberflächentemperatur zu Fluidtemperatur.

$$\dot{Q} = \alpha A \cdot \Delta T \quad (3-2)$$

Der Proportionalitätsfaktor αA setzt sich aus der am Wärmeaustausch beteiligten Oberfläche A der Batterie und der Wärmeübergangszahl α zusammen. Letztere berechnet sich nach Gleichung (3-3) aus der charakteristischen Länge L und der Nusselt-Zahl Nu des vorliegenden Strömungsproblems und der Wärmeleitfähigkeit λ des Fluid.

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} \quad (3-3)$$

Das bedeutet, dass bei gegebener Temperaturdifferenz in Gleichung (3-2) der übertragbare Wärmestrom linear mit steigendem Wärmeübertragungskoeffizienten anwächst bzw., die für diese Arbeit wichtigere Aussage, dass bei gegebenem Wärmestrom die Temperaturdifferenz linear mit steigendem Wärmeübertragungskoeffizienten sinkt. In Hinblick auf Punkt Drei des Anforderungsprofils (Abschnitt 3.1) ist demnach ein hoher Wärmeübergangskoeffizient anzustreben. Damit einhergehend ist die Auswahl des Fluid so zu treffen, dass die in Punkt Fünf des Anforderungsprofils angesprochene Temperaturspreizung nicht zu sehr von den angestrebten 5K abweicht.

Diese beiden Forderungen stehen sich insofern gegenüber, als dass ein hoher Wärmeübergangskoeffizient durch hohe Werte von Strömungsgeschwindigkeit, Wärmekapazität und –leitfähigkeit und Dichte des Fluid bedingt wird. Diese hohen Werte sind aber auch dafür verantwortlich, dass die Temperaturspreizung des Messmediums abnimmt. Es gilt also einen Kompromiss zwischen Massenstrom und den thermischen Eigenschaften des Fluid einzugehen.

Dafür wurden jeweils zwei Flüssigkeiten und Gase untersucht, die in Tabelle 3-1 angeführt sind und welche während der Planung in die engere Auswahl genommen wurden. Zu jedem Fluid wird nachfolgend eine kurze Erklärung zu dessen Einsatzmöglichkeit gegeben.

Es ist naheliegend, dass die ersten Rechnungen mit Umgebungsluft als Medium durchgeführt wurden. In Anhang 8.3 wird eine Vorabbestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten durchgeführt. Der durchgerechnete Fall basiert auf der PHEV2 Zelle als Prüfling nach den Abmessungen aus Tabelle 3-2 für die zweite der angeführten prismatischen Zellen für PHEV und mit reiner Luft als Messmedium. Ausgegangen wird von einer Verlustleistung von 50W, einem Luftmassenstrom von 10g/s und einer Prüfstandtemperatur von 20°C. Es wird gezeigt, dass der Wärmeübergangskoeffizient α ca. 15W/(m²K) beträgt.

Nutzt man die gesamte Oberfläche der Batterie um die thermischen Verlust abzuführen, so ist dazu nach Gleichung (3-2) eine Temperaturdifferenz zu deren Umgebung von 84K notwendig. Die sicherheitsrelevante Thematik der Zelltemperatur wurde bereits unter Abschnitt 2.2.2 angesprochen. Die messtechnische Problematik ergibt sich aus der Forderung nach Abschnitt 3.1, die Zellparameter bei definierter Temperatur zu bestimmen.

Der niedrige Wärmeübergangskoeffizient von Luft lenkte die weiteren Betrachtungen in Richtung von Flüssigkeiten. Wasser weist im Gegensatz zu Luft eine über 20-fach höhere Wärmeleitfähigkeit auf. Das bedeutet nach den Gleichungen (3-2) und (3-3) bei identer Nusselt-Zahl beider Fluide nur mehr ein 20stel der vorher berechneten Temperaturdifferenz und somit, dass Wasser vom Standpunkt des Wärmeübergangs aus gesehen ein potentieller Kandidat für das Messmedium ist.

Den Stoffwerten in Tabelle 3-1 ist zu entnehmen, dass die volumetrische Wärmekapazität (in kJ/(m³K)) von Wasser ca. 3500 Mal größer ist als die der Luft. Daraus entsteht jedoch die Problematik, dass die Temperaturspreizung zwischen Ein- und Austritt der Prüfkammer durch die zugeführte Wärme der Batterie nicht mehr ausreichend groß ist, um von der Temperaturmessung mit ausreichender Genauigkeit aufgelöst werden zu können. Unter der Annahme einer üblichen Verlustleistung von 15W für Hybridfahrzeugbatterien würde man für eine Temperaturspreizung von 5K bei reiner Luft als Messmedium einen Massenstrom von etwa 3g/s benötigen, entsprechend ca. 2,52l/s. Unter Verwendung von Wasser wäre der erforderliche Volumenstrom bei gleichen Vorgaben ca. 0,72ml/s.

Die Bereitstellung dieses geringen Volumenstroms wäre zwar möglich, es wurden jedoch Probleme hinsichtlich einer einheitlichen Umströmung der Batterie gesehen. Diese ist bei hohen Volumenströmen viel eher gegeben und sichert einen auf die Oberfläche der Zelle bezogenen einheitlichen Abtransport der Abwärme.

Als weitere Flüssigkeiten wurden Thermoöle (Wärmeübertragerflüssigkeiten, letzte Spalte in Tabelle 3-1) auf ihren Einsatz im Prüfstand hin untersucht. Diese sind, ähnlich Reinstwasser,

elektrisch nicht leitend und weisen eine wesentlich höhere Wärmeleitfähigkeit als Luft auf. Die volumetrische Wärmekapazität beträgt etwa das 1200-Fache der von Luft. Es gelten ähnliche Überlegungen wie im vorherigen Absatz. Des Weiteren erschweren Flüssigkeiten die Handhabung des Prüfstands, vor allem den Tausch der Prüflinge.

	reine Luft	Stickstoff	Wasser	Therminol [®] VLT
c_p [kJ/(kgK)]	1,0068	1,041	4,1848	1,84
ρ [kg/m ³]	1,1894	1,1508	998,2055	771
λ [W/(mK)]	0,025684	0,025598	0,598460	0,1092

Tabelle 3-1: Daten ausgesuchter Fluide bei 20°C und 1bar zur Verwendung als Prüfmedium

Es wurde ein weiteres Mal Recherche bezüglich der Verwendung von Umgebungsluft als Prüfmedium betrieben. In der Literatur [4] konnten schließlich weitaus höhere Zahlenwerte für den Wärmeübergangskoeffizienten gefunden werden, als die angenommenen. Außerdem wurde in Erfahrung gebracht, dass der in Anhang 8.3 errechnete Koeffizient einen Mindestwert darstellt. Es wurde somit in Erwägung gezogen die Leistungsmessung dennoch mit Umgebungsluft als Prüfmedium durchzuführen.

Im Unterschied zu reiner Luft weist atmosphärische Umgebungsluft einen, je nach momentanen Bedingungen, variierenden Anteil an Wasserdampf auf. Diese Luftfeuchtigkeit muss für die exakte Berechnung der Enthalpieströme beachtet werden. Die Rechnung nach Anhang 8.2 zeigt jedoch, dass im Rahmen dieser Arbeit ohne weiteres mit den Stoffwerten für reine Luft gerechnet werden darf, da der daraus resultierende relative Fehler bei der Leistungsbestimmung vernachlässigbar bleibt (< 0,4%).

Eine Möglichkeit, die Luftfeuchtigkeit zu vermeiden, ist die Flutung des Prüfstands mit synthetischer Luft bzw. Stickstoff. Reine Luft besteht zu ca. 78% aus N₂, die Kenndaten nach Tabelle 3-1 sind denen von reiner Luft daher sehr ähnlich. Auf diese Option wurde jedoch aufgrund des Ergebnisses der Rechnung in Anhang 8.2 und aus Gründen der komplexeren Durchführung verzichtet.

Durch den Einsatz von Umgebungsluft als Testmedium konnte für die Konstruktion der Prüfkammer wieder die ursprüngliche Glovebox als Orientierungshilfe herangezogen werden. Gloveboxen dienen in erster Linie der Herstellung und Aufrechterhaltung einer definierten Atmosphäre in ihrem Inneren, die sich von der restlichen Umgebung durch ihre

Zusammensetzung, Temperatur, etc. unterscheidet, um darin Objekte zu manipulieren, welche nicht mit der Umgebungsatmosphäre in Kontakt treten dürfen.

Ein Nachteil der Glovebox besteht in der thermischen Wechselwirkung der Isolierung mit ihrer Umgebung. Nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik stellt sich bei unterschiedlichen Temperaturen auf der Innen- und Außenseite ein Wärmefluss ein, wie in Abbildung 3-1 dargestellt. Solange ein Wärmezufluss in die Prüfkammer besteht, das ist in der Regel der Fall, wenn die Umgebungstemperatur höher ist als die Temperatur in der Prüfkammer, lässt sich dieser in seiner Größe durch Messung der Ein- und Austrittstemperatur des Fluids in der Prüfkammer ermitteln. Der so ermittelte Wärmefluss stellt bei den nachfolgenden Messungen an der Zelle den „Messooffset“ dar.

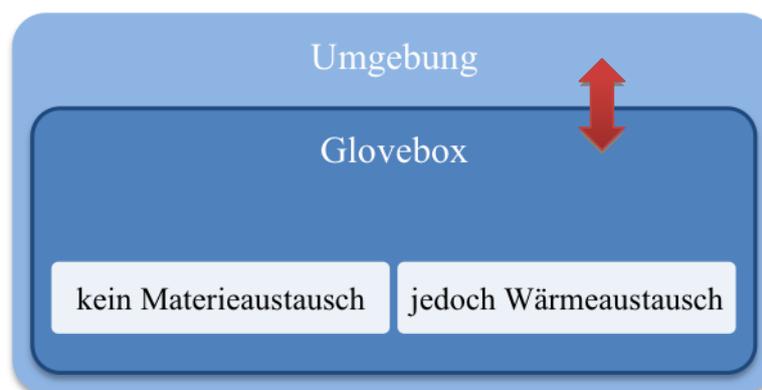


Abbildung 3-1: Thermische Wechselwirkung der Glovebox mit der Umgebung

Für den Fall, dass Wärme aus der Prüfkammer abfließt, wenn also die Temperatur in der Prüfkammer höher als die der Umgebung ist, besteht diese Möglichkeit nicht mehr. Zwar lässt sich im „Leerlauf“ ein Wert für die abfließende Wärme ermitteln, und dieser ist auch korrekt, es besteht jedoch beim Betrieb der Zelle keine Möglichkeit herauszufinden, wie groß der Anteil der Verlustwärme der Zelle ist, der ebenfalls durch die Wandungen in die Umgebung übergeht. Das Ziel ist daher, nichts von der Verlustwärme der Zelle auf dem Weg zur Temperaturmessstelle am Austritt der Prüfkammer zu verlieren.

Das kann erreicht werden, wenn beispielsweise die Wandungen der Prüfkammer doppelt ausgeführt werden und im so entstehenden Zwischenraum ein Vakuum erzeugt wird. Wärme kann dann nur mehr über sog. Wärmebrücken (z.B. Abstützung der inneren gegen die äußere Wandung) in die Umgebung abfließen. Diese gilt es zu vermeiden. Aufgrund der komplexen Voraussetzungen bei der Ausführung als Option zur Eigenkonstruktion wurde diese Idee der Isolierung der Prüfkammer wieder verworfen.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Umgebung der Prüfkammer zu jedem Zeitpunkt der Messung auf derselben Temperatur zu halten, wie sie in der Prüfkammer herrscht. Da zwischen zwei Körpern gleicher absoluter Temperatur kein Energieaustausch in Form eines Wärmestroms auftritt, fließt weder Wärme aus der Prüfkammer ab, noch in diese zu. Wenn man nun die Prüfapparatur in einer Klimakammer unterbringt, wie in Abbildung 3-2 illustriert, und deren Temperatur nach der Innentemperatur der Prüfkammer stellt, tritt genau dieser Fall ein.

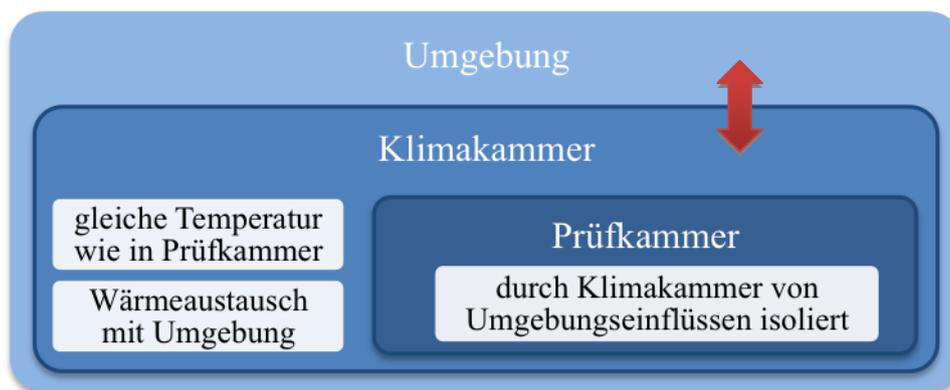


Abbildung 3-2: Eliminierung der thermischen Wechselwirkung von Prüfkammer und Umgebung durch Zwischenschaltung einer Klimakammer

Da dem ViF für diese Diplomarbeit keine eigene Klimakammer zur Verfügung stand und die Anmietung einer solchen mit Kosten und Zeitbeschränkung verbunden gewesen wäre, wurde kurzerhand entschlossen, eine eigene Klimakammer für die Prüfkammer zu konstruieren. Nachdem es lediglich die Außentemperatur der Prüfkammer einzustellen galt, konnte der konstruktive Mehraufwand in Grenzen gehalten werden.

Es wurde um die Prüfkammer herum eine weitere Kammer, die Klimakiste, aufgebaut, wobei zwischen beiden Kammern ein Hohlraum bestehen blieb. In diesen Hohlraum wird ein Teil der konditionierten Prüfluft abgezweigt, welcher in der Prüfkammer eine Umgebung mit selber Temperatur, wie sie in der Prüfkammer herrscht, einstellt. Die thermischen Wechselwirkungen verlagern sich dahingehend, dass es nur mehr einen Wärmefluss zwischen der Klimakiste und der Umgebung gibt.

Ein weiterer Vorteil der Konstruktion einer eigenen Klimakiste besteht darin, dass sie so klein ausgeführt werden kann, dass der gesamte Prüfstand mobil bleibt.

Energetisch betrachtet schlägt sich die Aufrechterhaltung der eingestellten Temperatur in der Klimakiste in einer höheren Konditionierungsleistung für den Luftmassenstrom nieder. Die

maximal erforderliche Leistung wird bei größter Temperaturdifferenz zwischen Umgebung und Prüfkammer berechnet. Wird die zu konditionierende Luft frisch aus der Umgebung angesaugt und am Austritt der Prüfkammer wieder in diese entlassen, ergibt sich nach Anhang 8.4.1 die berechnete Konditionierungsleistung zu 300W. Speziell für die Kühlung der Luft sind bei dieser Leistung Geräte erforderlich, die baulich größer ausfallen und den Aspekt der Mobilität des Prüfaufbaus infrage stellen.

Im nächsten Schritt wurde die Luftführung im Prüfstand als geschlossener Kreislauf ausgeführt, sodass die aus der Prüfkammer ausströmende Luft wieder der Konditionierungseinheit zugeführt wird. Es muss daher nur die Verlustwärme der Batterie sowie die über den Kreislauf zu- oder abfließende Wärme in der Rechnung der Konditionierungsleistung berücksichtigt werden. Für diesen Fall beträgt die maximal erforderliche Leistung nach Anhang 8.4.2 nur mehr 140W. Die Einsparungen in der benötigten Leistung bedeuten kleinere und günstigere Geräte.

Durch den geschlossenen Kreislauf ergibt sich außerdem ein weiterer Vorteil: Für den Fall, dass das Prüfmedium unter Umgebungstemperatur gekühlt werden muss, besteht die Möglichkeit, dass in der Konditionierungseinheit Kondenswasser ausfällt. Die maximale Menge ist aber stark beschränkt, nämlich auf die im Luftkreislauf vorhandene Wassermenge, die sich aus der relativen Feuchte der Umgebungsluft und dem Luftvolumen im Kreislauf ergibt. Anhang 8.5 weist die maximale Wasserdampfmenge, die bei Betrieb mit Umgebungsluft im Prüfstand vorhanden sein kann, mit 1,6g aus. Sie ist so gering, dass sie für die folgenden Betrachtungen unbeachtet bleibt.

Zur Bewegung der Luft im Prüfaufbau ist eine Luftförderungseinrichtung notwendig. Ursprünglich war geplant, die Luft mittels einer Venturi-Vakuumpumpe durch den Prüfstand saugen zu lassen, deren Vorteil in einem sehr guten Verhältnis von Vakuumdruck zu Volumenstrom liegt. Neben der Abhängigkeit von einer Druckluftquelle muss auch die Geräuschentwicklung dieser Pumpe durch die hindurchströmende Luft beachtet werden. Durch die Festlegung auf einen geschlossenen Kreislauf fällt die Verwendung einer solchen Vakuumpumpe jedoch weg. Es wurde ein Radialventilator ausgewählt. Dieser kann bei gleichem Volumenstrom einen höheren Gegendruck aufbauen als ein Axialventilator und das gewählte Modell lässt sich sehr einfach in den Prüfstand integrieren.

Um den Luftmassenstrom auf die geforderte Temperatur zu bringen, war noch die bereits mehrfach erwähnte Konditionierungseinheit zu planen. Sie soll den von der Zelle eingebrachten Wärmestrom nach außen hin abführen und den Nettowärmestrom zwischen

Umgebung und Klimakiste so kompensieren, dass das Prüfmedium am Eintritt zur Prüfkammer immer mit der eingestellten Temperatur vorliegt. Am ViF haben sich in der Vergangenheit für diese Aufgabe mehrfach Radiatoren aus dem PC-Tuningbereich bewährt. Sie stellen eine kostengünstige Alternative dar und lassen sich durch ihre relativ einheitlichen Abmessungen leicht an die vorliegende Aufgabe adaptieren. Im Luftkreislauf wurde so ein Lamellenwärmetauscher mit einer großen wärmeübertragenden Fläche verbaut. Der Radiator wird durch die Pumpe eines Kältethermostaten mit der temperierten Wärmetauscherflüssigkeit versorgt.

Nach der Festlegung der Ausführung der diversen Prüfstandsbestandteile wird der Blick nun noch auf ein Detail gerichtet, dessen Bedeutung erst im Laufe der Planung ins Gewicht fiel:

Die Verlustleistungsbestimmung an den Zellen soll durch deren Bestromung erfolgen. In den Anforderungen (Abschnitt 3.1) werden thermische Verlustleistungen von bis zu 100W erwartet. Wird von einem mittleren elektrischen Wirkungsgrad der Zelle von 90% ausgegangen stellen die verbleibenden 10% die thermischen Verluste dar, was bedeutet, dass Lade- bzw. Entladeleistungen von bis zu 1kW vorkommen können. Bei einer angenommenen Ladespannung für Lithium-Zellen von 4V bewegt sich der Strom somit in der Größenordnung von 250A. Um diesen Strom zwischen Zyklisierer und Zelle zu transportieren, sind die Stromkabel entsprechend zu dimensionieren. Der durch den ohmschen Widerstand verursachte Spannungsabfall über der Kabellänge soll vernachlässigbar sein und somit auch die Wärmeproduktion im Kabel. Hierfür ist ein großer Querschnitt notwendig. Dieser begünstigt jedoch die Wärmeleitung im Kabel, womit Wärme von der Batterie und dem Inneren der Prüfkammer in die Prüfstands Umgebung geleitet werden kann. Beide Phänomene führen zu einem Fehler in der thermischen Leistungsbestimmung und müssen so gut es geht vermieden werden.

Für einen Strom von 250A wird von Seiten diverser Kabelhersteller ein Kabelquerschnitt, bezogen auf das leitende Material, von ca. 50mm² empfohlen, was der in der Literatur ([14], DIN VDE 100) angeführten empfohlenen Stromdichte von Kupfer von 5-6A/mm² entspricht. In der ausgeführten Version des Prüfstands befinden sich je Pol der Zelle ca. 250mm Kabel mit 50mm² Querschnitt im Inneren der Prüfkammer. Der ohmsche Widerstand R der Kabel lässt sich nach Gleichung (3-4)

$$R = \frac{l \cdot A}{\sigma} \quad (3-4)$$

berechnen, wobei für die Leitfähigkeit σ von Kupfer ein Wert von $58 \cdot 10^5$ S/m angenommen

wird. Er beläuft sich zu $0,1724\text{m}\Omega$ und verursacht bei einem Strom von 250A eine joulesche Wärmeleistung von 11W . Bezogen auf die Verlustleistung der Zelle von 100W entspricht das 11% . Weil zwischen der im Kabel entstehenden Wärme und dem verursachenden elektrischen Strom ein quadratischer Zusammenhang besteht, beträgt die in den Kabeln anfallende Wärme bei halbem Strom nur noch ein Viertel. Bei kleineren Strömen ist der Fehler in der Messung vernachlässigbar. Bei größeren Strömen muss durch eine elektrische Leistungsmessung an den Kabeln das Ergebnis der thermischen Leistungsmessung korrigiert werden.

Betrachtet man eine Zelle wie in Abbildung 2-3, so ist zu erkennen, dass die Pole mit den Stromabnehmern, diese wiederum direkt mit dem aktiven Material der Zelle in Verbindung stehen. Da die Wärmeproduktion in einer Batterie zum überwiegenden Teil im aktiven Material geschieht, bestand die Vermutung, dass durch die Kontaktierung mit Kabeln großen Durchmessers Wärme aus der Zelle entlang der Kabel in die Umgebung abgeführt wird. Diese kann so nicht durch die thermische Leistungsmessung erfasst werden. In der Automobilindustrie wird gerade eine solche Polkühlung an Zellen erprobt.

Sieht man ein Kabel als entlang seiner Achse perfekt isoliert an, sodass eine Wärmeleitung bzw. -ableitung nur an den Enden geschehen kann, lässt sich nach Gleichung (2-6) der durch die Kabel übergehende Wärmestrom berechnen. Im vorliegenden Prüfstand sind zwischen der Zelle in der Prüfkammer und der Umgebung pro Pol ca. $1,5\text{m}$ Kabel von 50mm^2 Querschnitt verbaut. Bei einer maximalen Poltemperatur von 60°C und einer mittleren Umgebungstemperatur von 20°C ist es somit möglich, dass ein Wärmestrom von 1W aus der Zelle abgeführt und der Umgebung zugeführt wird, ohne dass dieser von der Messung im Prüfstand erfasst wird. Dieser ist von der Temperaturdifferenz zwischen Pol und Umgebung getrieben. Bei minimaler Verlustleistung nach Abschnitt 3.1 bedeutet dies bereits 10% Abweichung bei der Messung. Dieser Wert gilt für den stationären Fall, das heißt, dass sich der endgültige Temperaturgradient durch den Wärmefluss in den Stromkabeln eingestellt hat. Vor Beginn eines Tests sind diese Verhältnisse jedoch nicht gegeben, Batterie und Kabel befinden sich auf Temperatur des Prüfmediums und es liegen noch keine Temperaturgradienten vor. Die Zelle wird unter Belastung einen raschen Temperaturanstieg vollziehen, während sich der Temperaturgradient in den Stromkabeln nur nach und nach einstellt. In der Zeit bis zu dessen endgültiger Ausbildung kann dadurch ein bedeutend höherer Wärmestrom über die Kabel aus der Zelle abtransportiert werden, als es im stationären Zustand der Fall ist. Erhebliche Messfehler im Betrieb sind somit vorprogrammiert.

Um dem entgegenzuwirken wurde ein sog. Kabelwärmetauscher konstruiert, der in seiner Ausführung eine Doppelfunktion übernimmt. Dabei handelt es sich um einen Lamellenwärmetauscher, der einen Großteil der Stromkabel in der Prüfkammer ersetzt. Wie in Abbildung 3-11 ersichtlich, wird je ein Wärmetauscher pro Pol der Batterie in die Stromleitungen geschaltet. Die Doppelfunktion ergibt sich einerseits daraus, dass nun der Wärmetauscher die Stromleitung der ersetzten Kabelstücke übernimmt, andererseits daraus, dass die von den Polen über die Kabel abgeführte Wärme durch den Wärmetauscher wieder dem Prüfmedium zugeführt wird. Somit wird auch dieser Anteil der Verlustwärme der Zelle messbar gemacht. Ein weiterer Vorteil dieser Konstruktion steckt in der, wie in Abschnitt 5.6.3 bewiesen, besseren Dynamik der Messungen.

Die Größe des Prüfstands wurde nach den darin zu vermessenden Zellen ausgelegt. Wie in den Anforderungen festgelegt, handelt es sich um Zellen für den Automotive-Bereich, im Speziellen um solche Zellen für Hybrid- und Plug-In-Hybridfahrzeuge. Um einen Überblick über deren unterschiedliche Ausführungsformen, und dadurch einen Anhaltswert für die Größe der Prüfkammer zu bekommen, wurde Recherche im Internet und in der Literatur betrieben.

Einen sehr guten Anhaltspunkt liefert die vom Normenausschuss Automobiltechnik des VDA erarbeitete Vornorm DIN Spec 91252, "Elektrische Straßenfahrzeuge — Batteriesysteme — Abmessungen für Lithium-Ionen-Zellen". Darin werden Zellen mit einer Kapazität zwischen 5Ah und 20Ah als elektrische Energiespeicher für Hybridfahrzeuge (HEV) klassifiziert und solche mit einer Kapazität zwischen 20Ah und 40Ah als Energiespeicher für Plug-In-Hybridfahrzeuge (PHEV). Sie soll zu einer internationalen Spezifikation weiterentwickelt werden.

Tabelle 3-2 gibt einen auszugsweisen Überblick über die erarbeiteten Abmessungen nach DIN Spec 91252, nach denen die Innenabmessungen der Prüfkammer festgelegt wurden.

Um die Möglichkeit zu haben, alle Zellen in obiger Tabelle im Prüfstand vermessen zu können und dabei auch der Anschlussbelegung, sprich Orientierung der Pole der Zellen Rechnung zu tragen, ist ein Raum mit einer Größe von mindestens 243x173x38mm notwendig. Dazu muss noch ein gewisser Abstand zwischen Zelle und Wand der Prüfkammer gerechnet werden, damit auch bei der Zelle mit dem größten Querschnitt noch ein Spalt zu jeder Seite freibleibt, durch den das Prüfmedium strömen kann.

	HEV	PHEV
Folienzelle	243*121*xmm	227*165*xmm
Rundzelle	ø37,7*145mm	<i>nicht vorgesehen</i>
prismatische Zelle	85*120*12,5mm	85*173*21mm 91*148*26,5mm

Tabelle 3-2: Auszug aus DIN Spec 91252

Die Länge der Prüfkammer in Strömungsrichtung wird nicht nur von den Zellabmaßen bestimmt. Es müssen sowohl die Stromkabel in die Prüfkammer geführt werden, deren großer Biegeradius bei 50mm² Querschnitt Probleme bereitet, als auch Überlegungen zur Luftführung in der Prüfkammer miteinbezogen werden. Die zu untersuchenden Akkumulatoren soll möglichst gleichmäßig über deren gesamte Oberfläche angeströmt werden, um strömungsbedingte Temperaturgradienten zu verhindern. Dazu wird eine gewisse „Vorlaufstrecke“ für die Strömung benötigt, während der sie den Querschnitt der Prüfkammer bestmöglich ausfüllen soll.

Vorlaufbereich, der Abschnitt in dem die Zelle liegt und der Auslaufbereich der Prüfkammer, in dem die Stromkabel hereingeführt werden, sind in der aktuellen Ausführung zusammen in Summe in etwa drei Mal so lang wie die längste zu testende Zelle nach Tabelle 3-2.

Durch die allgemein gehaltene Konstruktion der Prüfkammer ist es möglich, auch andere Zellen als die in Tabelle 3-2 angeführten aufzunehmen und zu vermessen.

3.3 Aufbau des Gesamtsystems, Prüfstandskomponenten

Der Prüfstand wurde im Labor für Wasserversuche des Institut für Strömungslehre und Wärmeübertragung der Technischen Universität Graz nach obigen Überlegungen gebaut. Durch die relativ kompakten Abmessungen von 1500x680x1050mm über Alles war es möglich, die gesamte Konstruktion in einem fahrbaren Gestell unterzubringen.

Der Prüfstand gliedert sich grob in die Hauptbestandteile

- Prüfkammer
- Klimakiste
- Radiallüfter
- Luftkonditionierungseinheit

- Verrohrung
- Massenstromverstellung
- Messstellen für Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit
- Kabelwärmetauscher

welche nachfolgend in ihrer Funktion beschrieben sind. Abbildung 3-3 zeigt den fertig aufgebauten Prüfstand.

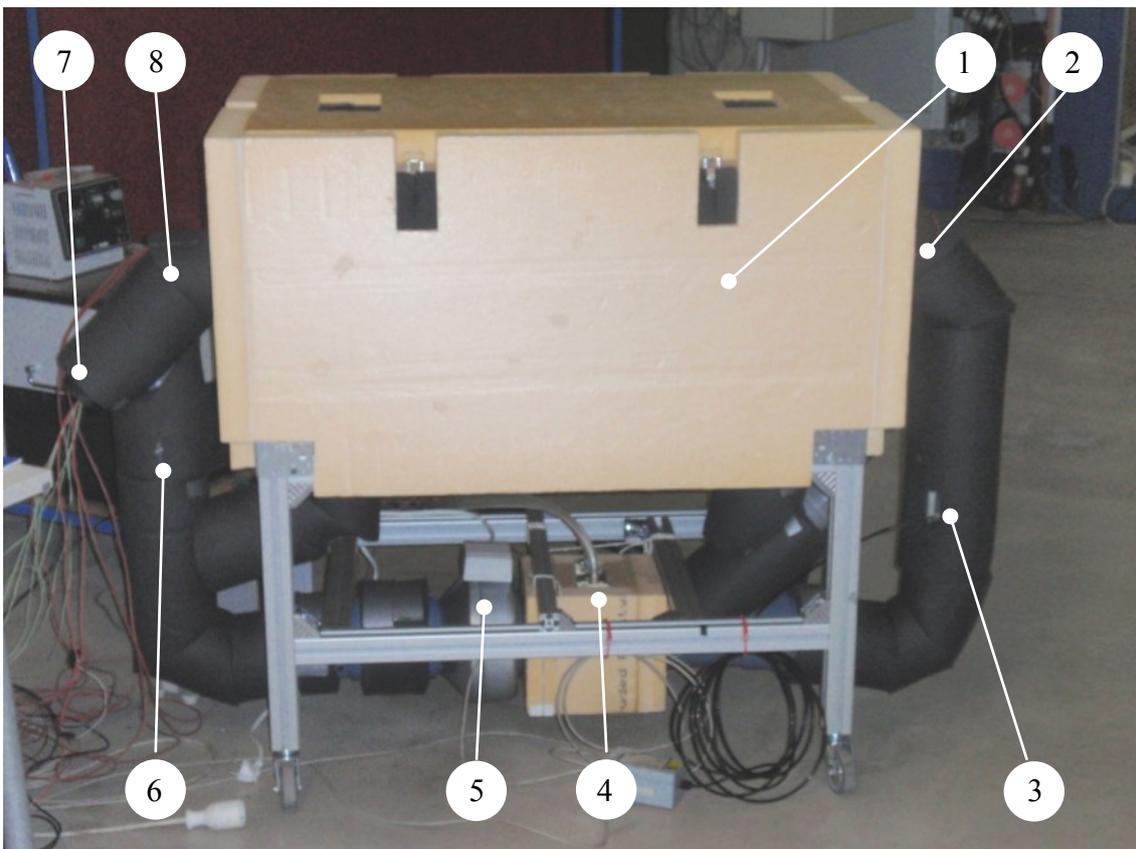


Abbildung 3-3: Der Prüfstand: 1) Klimakiste 2) Messstelle Temperatur 3) Messstelle Geschwindigkeit 4) Konditionierungseinheit 5) Lüfter 6) Massenstromverstellung 7) Zuleitung der Oberflächenthermoelemente 8) Messstelle Temperatur

3.3.1 Prüfkammer

In der inneren Kammer des Prüfstands werden die eigentlichen Versuche an den Lithium-Ionen-Zellen durchgeführt. Sie besteht im Grundgerüst aus 10mm dünnen MDF-Holzplatten und ist nach innen und außen isoliert. Als Dämmstoff kommt 50mm starkes, extrudiertes Polystyrol in Plattenform zum Einsatz. Die Innenabmessungen wurden mit 702x190x60mm so gewählt, dass alle Zellen nach DIN Spec 91252 für HEV und PHEV, wie sie in Tabelle 3-2 gelistet sind, vermessen werden können. Der Abstand von der

Oberfläche der eingelegten Batterie zur Wandung der Prüfkammer beträgt zu allen Seiten mindestens 5mm, um eine Umspülung mit dem Prüfmedium zu gewährleisten. Die Orientierung der Batterien in der Prüfkammer wurde so gewählt, dass die Stromanschlüsse von Folienzellen und von prismatischen Zellen parallel zur Strömungsrichtung liegen, die von Rundzellen normal dazu. Zusätzlich zu den Abmessungen der Batterien wurden aufgrund des Biegeradius der Stromkabel noch einmal 250mm für deren Zuleitung, sowie 210mm als Vorlaufstrecke für die Strömung eingerechnet. Durch die Länge der Kammer wird so auch Unterschieden in der Anschlussbelegung der zu untersuchenden Zelltypen mit ausreichend Platz für die Anschlussklemmen begegnet.

Der Zugriff in die Prüfkammer erfolgt über die Oberseite des Prüfstands. Es ist zuerst der Deckel der Klimakiste zu entfernen, dann jener der Prüfkammer. Abbildung 3-4 zeigt den geöffneten Prüfstand mit einer für einen Versuch eingepassten Zelle (PHEV2 Dummy). Der Luftmassenstrom zur Ermittlung der abgegebenen Wärme der Batterie würde den Prüfling dabei bei geschlossenem Prüfstand von links unten nach rechts oben überströmen.

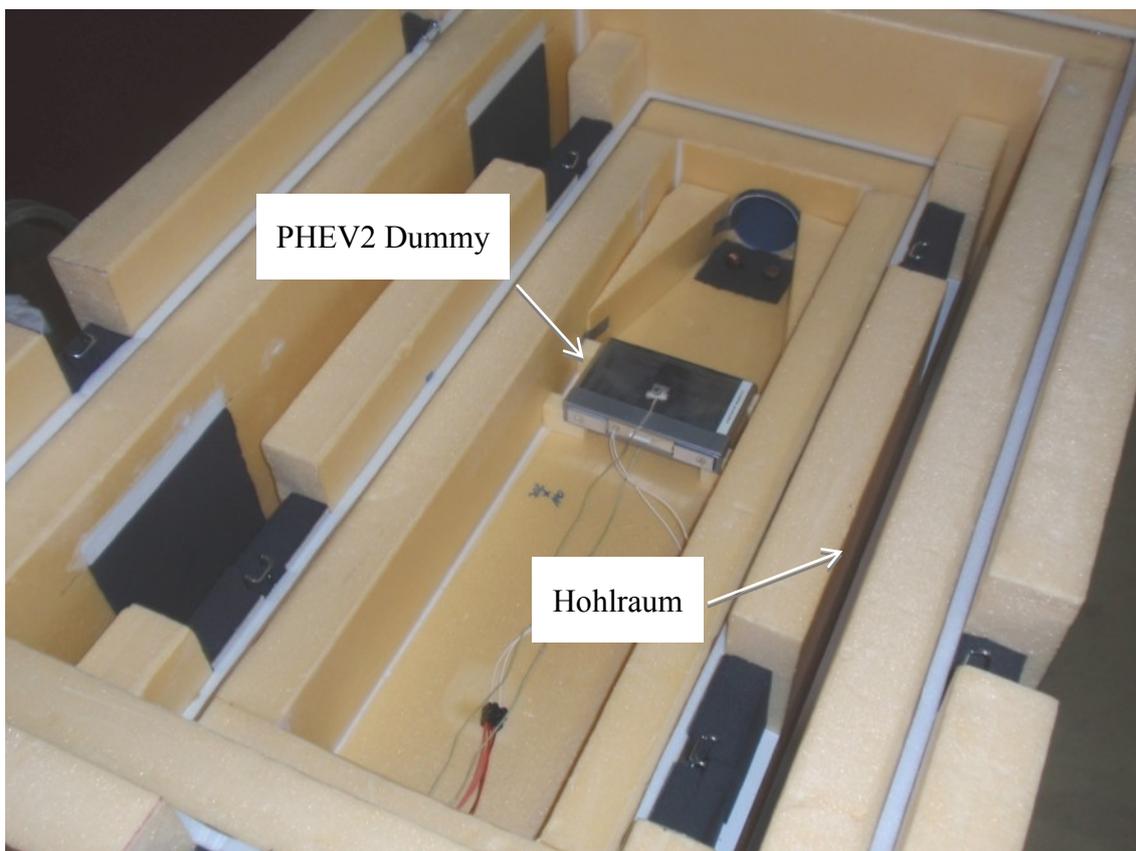


Abbildung 3-4: Geöffneter Prüfstand mit eingesetzter Zelle

Zu erkennen ist auch der für die Temperierung der Prüfkammer vorgesehene Hohlraum zwischen den beiden Kammern. Abstandshalter zum Einpassen der Prüflinge in die Kammer werden nach Bedarf aus Polystyrolplatten hergestellt. Das Gleiche gilt für Einbauten entlang der Strömungsstrecke (Erweiterung, Verengung, ...).

Die Anschlüsse der Oberflächentempersensoren für das Prüfobjekt werden über die Verrohrung zur Luftführung aus der Prüfkammer geführt. Leckagen lassen sich so wesentlich besser vermeiden als wenn die Zuleitung an anderer Stelle in die Kammer geschieht. Gleichzeitig bleibt die Flexibilität in Bezug auf Art, Menge und Platzierung der Sensoren erhalten.

Die Zuleitung der Stromkabel wird in ähnlicher Weise durchgeführt. Wegen deren großen Querschnitt werden sie aber nicht durch die Verrohrung in die Prüfkammer geleitet, um durch die so entstehende Verblockung den maximalen Massenstrom nicht zu beschränken. Stattdessen werden die Kabel in der aktuellen Ausführung durch den Boden der Prüfkammer in deren Innenraum eingebracht. Die Durchführung der Kabel ist dabei so gestaltet, dass es weder zu einem Austausch der Massenströme zwischen Prüfkammer und Klimakiste kommt, noch zu einem Wärmeaustausch.

3.3.2 Klimakiste

Konstruktiv ist die äußere Kiste analog der Prüfkammer aufgebaut. Sie umschließt diese zur Gänze, wobei zwischen den gegenüberliegenden Oberflächen beider Kammern ein Spalt von 25mm Weite je Seite bestehen bleibt. Durch eine räumliche Trennung von Zu- und Ablauf in dem so entstehenden Hohlraum zwischen den beiden Kammern wird die konditionierte Luft gezwungen, einmal um die Prüfkammer herum zu strömen.

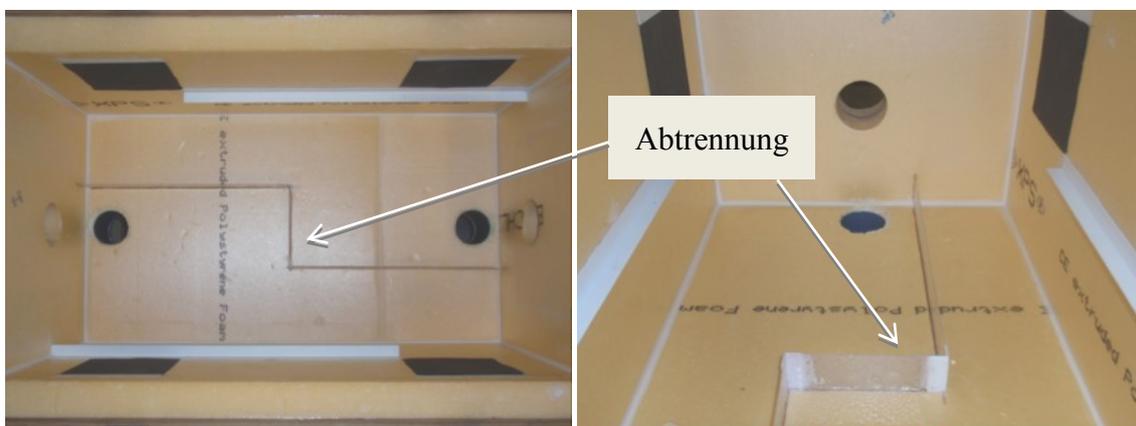


Abbildung 3-5: Räumliche Trennung von Ein- und Austritt der Klimakiste

Abbildung 3-5 zeigt die dafür vorgesehene Trennwand. Durch diese Maßnahme wird eine thermische Entkopplung der Prüfkammer von der Prüfstands Umgebung erreicht, der Prüfstand bringt quasi seine eigene Klimakammer mit.

Zur Belegung der Funktion wurden in der Klimakiste 12 Thermoelemente an definierten Positionen angebracht (siehe Abbildung 3-6) und die Entwicklung der Temperaturverteilung während mehrerer Validierungsmessungen aufgezeichnet. Die Temperatur des Luftmassenstroms wurde dabei je nach Messung auf den Minimal- bzw. Maximalwert eingestellt, der laut Anforderungsprofil möglich sein soll. Die so durchgeführten Messungen stellten Extremfälle im Betrieb dar, nämlich die maximalen Temperaturdifferenzen zwischen Prüfkammer und Umgebung.

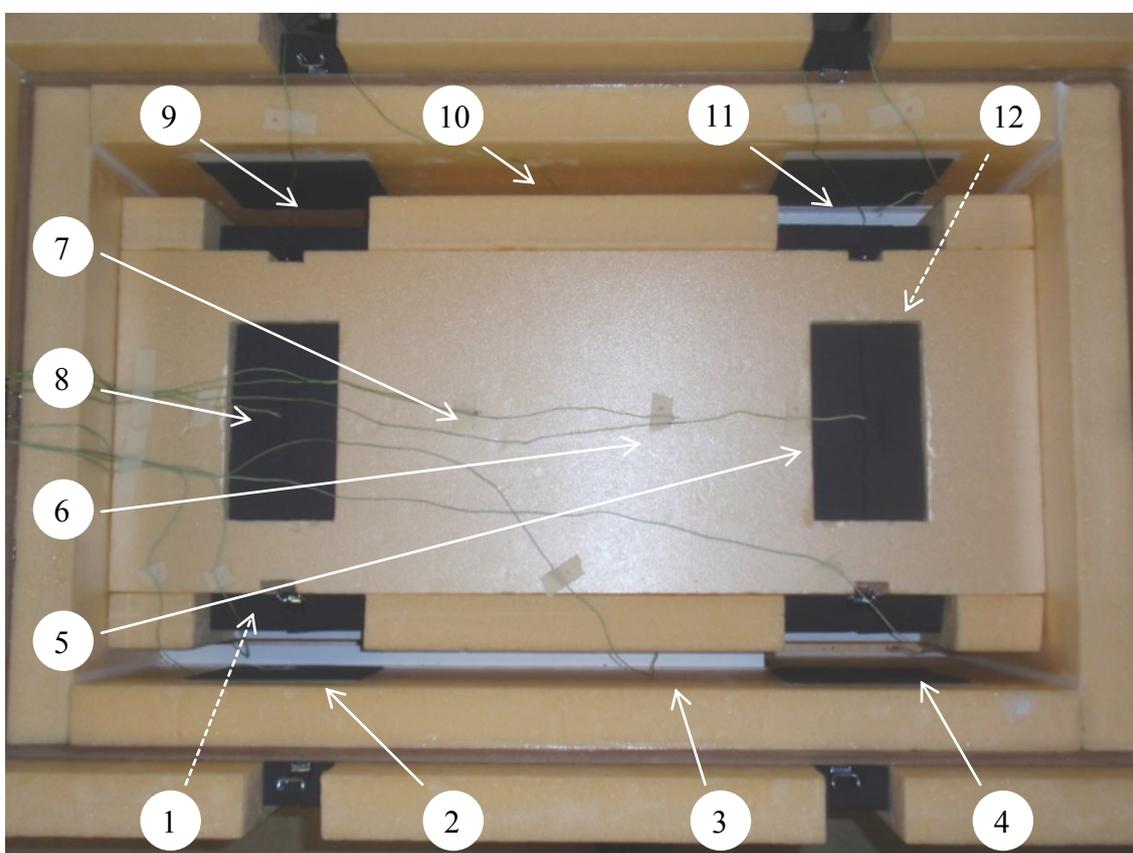


Abbildung 3-6: TEs und deren Nummerierung; 1 und 12 sind unter der Prüfkammer platziert, bei Zu- und Abströmöffnung der Klimakiste

Abbildung 3-7 gibt die Messungen wieder. Sie belegt eine annähernd homogene Temperaturverteilung im Hohlraum um die Prüfkammer sowohl ohne durch eine Wärmequelle eingebrachte Leistung in der Prüfkammer, als auch mit. Die größte Temperaturdifferenz in der Klimakiste beträgt 0,6K. Dieser Wert wird als sehr gut erachtet.

Um eine genaue Aussage darüber zu erhalten, welcher Wärmestrom zwischen Klimakiste und Prüfkammer ausgetauscht wird müsste ein weiterer Satz Sensoren zur Temperatur- und Massenstrommessung für die Klimakiste verbaut werden. Das wurde im Rahmen dieser Arbeit jedoch als nicht erforderlich angesehen, da die Funktion der Klimakiste unter allen Testfällen als zufriedenstellend angesehen wurde.

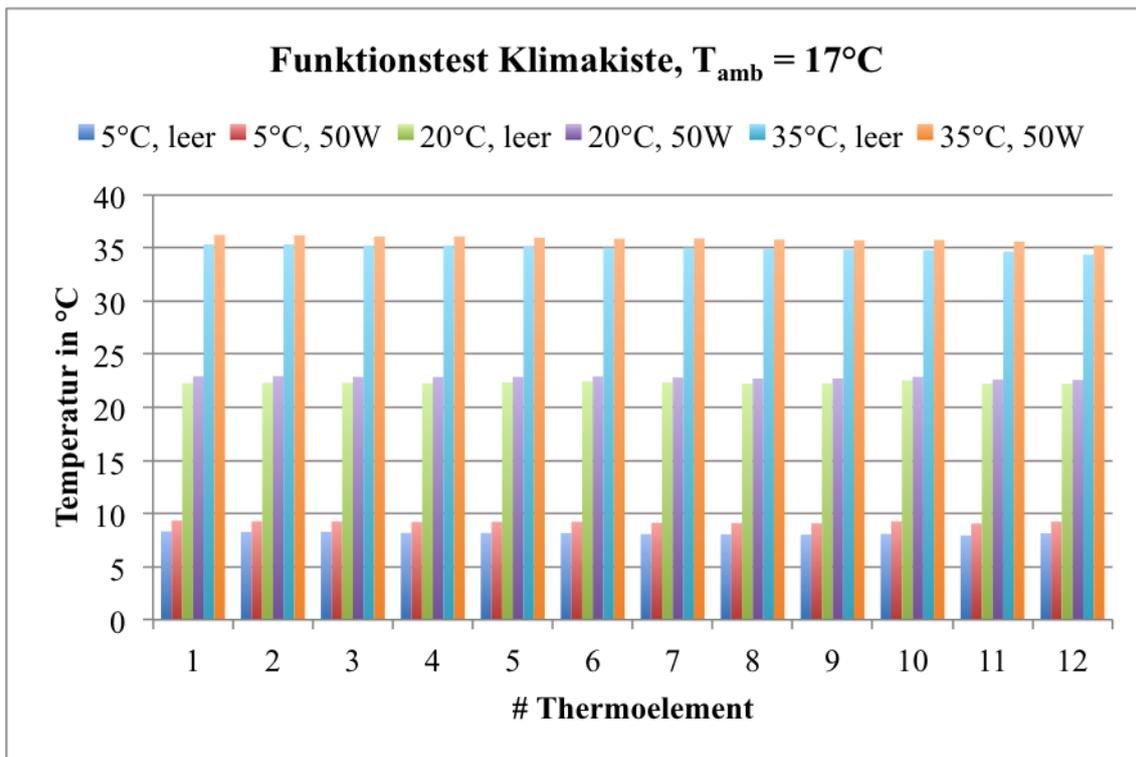


Abbildung 3-7: Temperaturverteilung in der Klimakiste mit und ohne eingebrachte Heizleistung in der Prüfkammer

3.3.3 Radiallüfter

Zur Erzeugung des notwendigen Luftmassenstroms kommt ein Radiallüfter des Typs RVM 125E2-L1 der Firma SystemAir zum Einsatz. Dieser hat eine elektrische Leistung von 62W und kann bei einem Gegendruck von 250Pa eine Fördermenge von 110m³/h aufbringen. Die Luft wird sowohl axial angesaugt, als auch wieder ausgeblasen, was die Integration in den Prüfstand erheblich vereinfachte. Der Lüfter ist auf Dauerbetrieb ausgelegt, was vor allem bei den langen Laufzeiten bis zum Startbetriebspunkt des Prüfstands bei hohen Temperaturunterschieden zur Umgebung ein wichtiges Kriterium darstellt. Er ist im Untergestell des Prüfstand untergebracht, wo er die Luft durch die Konditionierungseinheit saugt.

Im eingebauten Zustand bringt der Lüfter einen maximal möglichen Volumenstrom von ca.

65m³/h (entsprechend 21,5g/s bei 20°C) in der Prüfkammer. Durch den Einbau bestimmter Komponenten in den Luftkreislauf zur Erzielung einer höheren Messgenauigkeit der Temperatur am Austritt der Prüfkammer ist es zu einer geringfügigen Reduzierung des Volumenstroms gekommen.

Es besteht die Möglichkeit, den Lüfter mit einem Frequenzumwandler nachzurüsten, um so den Volumenstrom bei fixer Aufteilung zwischen Prüfkammer und Klimakiste aus der Datenerfassungssoftware heraus stufenlos und automatisiert anzusteuern. Um zu verhindern, dass sich bei sinkender Lüfterdrehzahl der Wärmeübergang in der Konditionierungseinheit verschlechtert, wird der Lüfter jedoch unregelt bei Nenndrehzahl betrieben und der Volumenstrom über die Stellung der Drosselklappe definiert.

3.3.4 Luftkonditionierungseinheit

Weil die Messungen an den Batterien bei unterschiedlicher Temperatur der Luft durchführbar sein sollen, muss diese einstellbar gemacht werden. Der Konditionierungseinheit kommt die Aufgabe zu, die Temperatur der Luftströme am Eintritt der beiden Kammern zu jedem Zeitpunkt auf der vorgegebenen Temperatur zu halten. Dazu muss die während den Messungen in der Prüfkammer anfallende Wärme aus dem System abgeführt, und die der Klimakiste zugeführte oder entzogene Wärme ausgeglichen werden.

Die Konditionierungseinheit besteht aus einem Kreuzstrom-Lamellenwärmeübertrager mit den Abmessungen 120*120*60mm der Firma AlphaCool, der wie der Lüfter im Untergestell des Prüfstands in den Luftkreislauf integriert ist und welcher von einem Kältethermostat der Firma Lauda auf Temperatur gebracht und gehalten wird. Als Temperierflüssigkeit wird ein Wasser-Glykol-Gemisch verwendet.

Dadurch dass der Lüfter die Luft durch den Radiator saugt wird eine sehr homogene Durchströmung des zur Verfügung stehenden Querschnittes erreicht, was sich einerseits in einer kleineren einzustellenden Temperaturdifferenz zwischen Kältethermostat und gewünschter Temperatur des Luftmassenstroms bemerkbar macht und andererseits dadurch, dass die Luft an Eintritt zur Prüfkammer faktisch keinen Temperaturgradienten über den Querschnitt der Zuströmung aufweist.

Der Kältethermostat bringt einen analogen Programmgeberabschluss mit, den man gegebenenfalls zur Ansteuerung der Temperatur aus der Datenerfassungssoftware heraus in das Gesamtsystem integrieren kann. Es können so gezielt Temperaturverläufe für den Prüfstand vorgegeben werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf diese Möglichkeit jedoch

verzichtet und der Kältethermostat manuell bedient.

Selbst bei niedrigster eingestellter Temperatur (-5°C) ist es in der Testphase nicht erforderlich gewesen, einen Kondenswasserabscheider zu installieren. Es konnte in keinem Fall festgestellt werden, dass sich auch nach längerem Betrieb Feuchtigkeit am Radiator, der Sensorik oder dem Prüfling niedergeschlagen hat. Sollte es dennoch erforderlich sein, dass die Luft im System eine sehr niedrige relative Feuchte aufweist, so kann ohne weiteres in der Prüfkammer Silicagel zur Entfeuchtung platziert werden.

3.3.5 Massenstromverstellung

Der auf Temperatur konditionierte Massenstrom wird nach dem Austritt aus dem Lüfter auf zwei Stränge aufgeteilt. Ein Teil strömt durch die Klimakiste, der andere durch die Prüfkammer. Jener Teil, der durch die Prüfkammer strömt ist in seiner Größe über die Massenstromverstellung einstellbar. Diese besteht aus einer Drosselklappe, welche in eine Rohrabzweigung verbaut wurde. Sie ermöglicht eine stufenlose Verstellung des Massenstroms bis zur maximalen Durchflussmenge in der Prüfkammer bei vollständiger Öffnung.

Zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit geschieht die Verstellung der Drosselklappe manuell über den Rundstab, der aus der Abzweigung herausragt und an dem die Klappe befestigt ist. Sollte zu einem späteren Zeitpunkt eine Automatisierung der Stellung der Drosselklappe gewünscht sein, so kann dies ohne weiteres durch Adaption einer z.B. elektromechanischen Aktuation an diesen Stab erfolgen.

3.3.6 Verrohrung

Der Luftkreislauf wird mit Rohren aus Polypropylen der Firma Polokal hergestellt. Aufgrund deren eigentlichen Verwendungszwecks als schalldämmende Abflussrohre bringen sie eine besonders hohe Stabilität mit. Die dennoch leichte Be- und Verarbeitbarkeit und das Vorhandensein vieler Sonderausführungen weisen ihnen eine besonders gute Eignung für den Einsatz im Prüfstand aus.

Es sind Rohre unterschiedlicher Durchmesser verbaut. Im Bereich der Konditionierungseinheit und des Lüfters konnte mit einem Innendurchmesser von 117,2mm eine direkte Verbindung mit dem Rest des Kreislaufs hergestellt werden. Die Zu- und Ableitung der Massenströme in beide Kammern erfolgt durch Rohre mit einem Innendurchmesser von 69,8mm. Der geringste Durchmesser im System ist im Bereich der Geschwindigkeitsmessstrecke zu finden. Zur Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit für die

Messung ist die Hitzdrahtsonde in ein Rohr von 46mm Innendurchmesser eingebracht.

Aufgrund der relativ hohen Wärmeleitfähigkeit von Polypropylen, die ähnlich der von MDF ist, sind die Rohre zusätzlich mit einem geschlossenzelligen Isolierstoff von 50mm Dicke der Firma ArmaCell umhüllt worden. Dessen Wärmeleitfähigkeit beträgt $0,035\text{W}/(\text{mK})$ bei 20°C und verringert den Wärmeaustausch zwischen dem Luftmassenstrom in den Rohren und der Umgebung. Dadurch sinkt die erforderliche Konditionierungsleistung.

Die Berechnung des Wärmeaustauschs zwischen der Umgebung und der Luft im Rohrsystem wird in Anhang 8.4.2 abgehandelt.

3.3.7 Messstellen für Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit

Zur Berechnung des vom Prüfling abgegebenen Wärmestroms sind einige Messstellen im Prüfstand zu integrieren. Deren Messwerte stellen entweder direkt die benötigten Rechengrößen dar oder diese lassen sich daraus ableiten. Alle Messwerte werden entlang der Strömungstrecke der Prüfluft aufgezeichnet, da nur in der Prüfkammer relevante Vorgänge ablaufen.

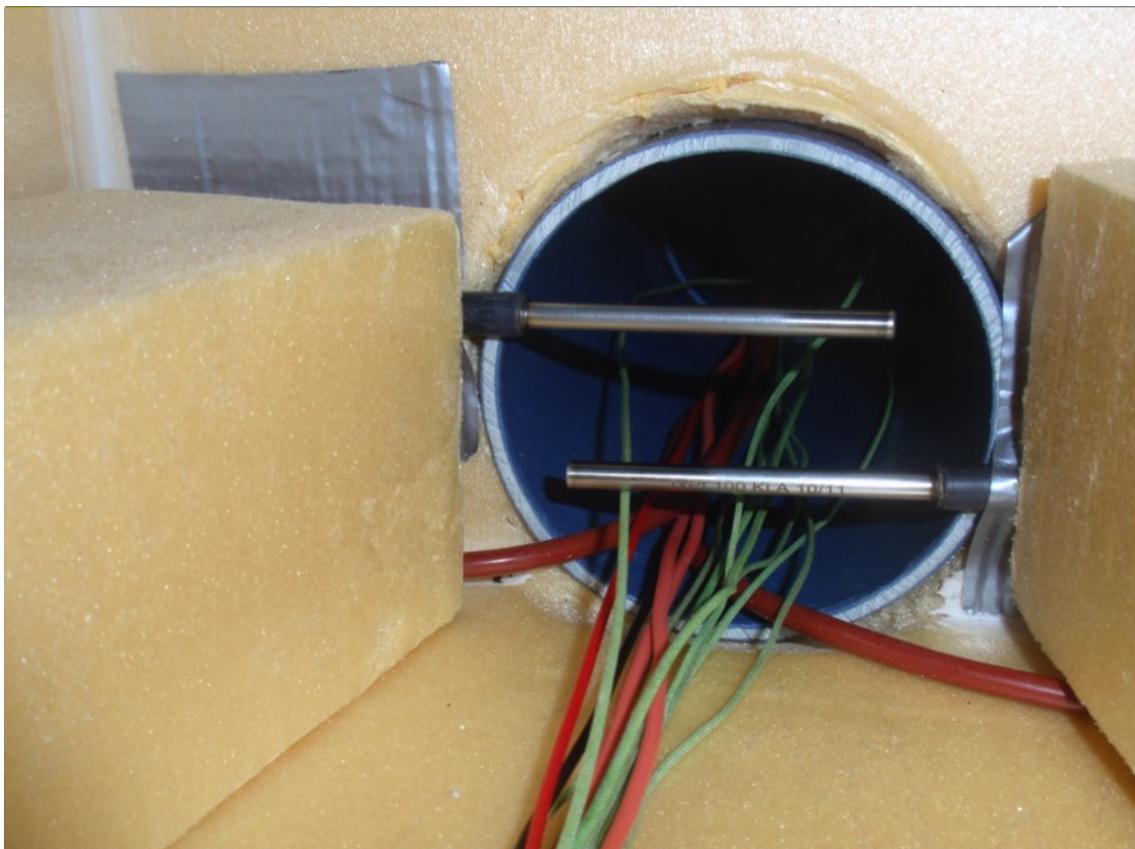


Abbildung 3-8: Pt100 am Eintritt der Prüfkammer

Am Eintritt zur Prüfkammer ist ein Paar Pt100 Temperatursensoren platziert, das die Temperatur der konditionierten Prüfluft erfasst. Die beiden Sensoren sind über die Höhe des Luftzustroms verteilt angebracht, wie in Abbildung 3-8 dargestellt ist. Durch punktuelle Messungen mit einem schnell reagierenden Thermoelement konnte gezeigt werden, dass die Positionierung der Widerstandsthermometer sowohl in der Höhe, als auch in der Breite bezogen auf den Rohrquerschnitt unkritisch ist.

Die gemessenen Temperaturdifferenzen lagen im Bereich der Auflösungsgrenze der Pt100 Messkette (ca. 0,06K). Das wird darauf zurückgeführt, dass durch den an der Konditionierungseinheit saugend angebrachten Lüfter eine sehr homogene Durchmischung der Luft erreicht wird und diese entlang des Strömungspfad bis zur ersten Temperaturmessstelle aufrecht bleibt.

Die zweite Temperaturmessstelle befindet sich ca. 250mm nach dem Austritt der Prüfkammer in der Verrohrung. Der Grund für diese Platzierung liegt in den großen Problemen, die diese Temperaturmessstelle während der Testläufe bereitete. Ursprünglich war geplant, die Pt100 ohne weitere Maßnahmen in den ersten, abwärts gerichteten Rohrbogen nach der Prüfkammer zu bauen. Die Sensoren würden so um 45° geneigt in die eintreffende Strömung blicken, eine in der Literatur häufig beschriebene Einbauvariante. Durch den Innendurchmesser des Rohres von fast 70mm an dieser Stelle ergab sich eine Vielzahl an Möglichkeiten, die Sensoren horizontal und vertikal zu platzieren. Genau daraus ergaben sich die im folgenden erklärten Probleme

Ist die Temperatur der austretenden Strömung über den Rohrquerschnitt einheitlich, so ist auch die Platzierung der Sensoren im Rohr, wie oben beschrieben, irrelevant. Geht man nun gedanklich einen Schritt zurück, zum Eintritt der Luft in die Prüfkammer, liegt dort eine homogene Temperatur vor. Trifft dieser Luftstrom im weiteren Ablauf auf die erwärmte Oberfläche des Prüflings, so bildet sich im Bereich der Oberfläche eine dünne Grenzschicht aus, welche an der Wärmeübertragung durch Konvektion beteiligt ist. Je weiter ein Stromfaden von der Oberfläche des Prüflings entfernt ist, desto weniger ist er in diesem Prozess involviert. Das bedeutet, dass der Großteil der Luft unverändert über den Prüfling strömt. In der Grenzschicht steigt die Temperatur über den mittleren Werte an, den man zur Berechnung der Verlustleistung in Gleichung (3-1) verwenden muss. Diese Temperaturschichtung konnte durch den Einsatz eines Thermoelementes in vertikaler Richtung der Prüfkammer nachgewiesen werden, wobei die maximale Differenz in der Schichtung über 1K betragen hat.

Das Ergebnis der Leistungsmessung hängt somit von der vertikalen Positionierung der Sensoren im Rohr ab. Es wurden diverse Lösungsansätze ausprobiert, um ohne große konstruktive Änderungen am Prüfstand durch eine Durchmischung eine einheitliche Lufttemperatur zu erreichen. Abbildung 3-9 zeigt ein Leitrad, das direkt in das Rohr am Austritt der Prüfkammer gesteckt wurde um eine Durchmischung durch einen Drall in der Strömung zu bewirken. Dieser Effekt wurde jedoch aufgrund der niedrigen Strömungsgeschwindigkeit nicht erzielt.

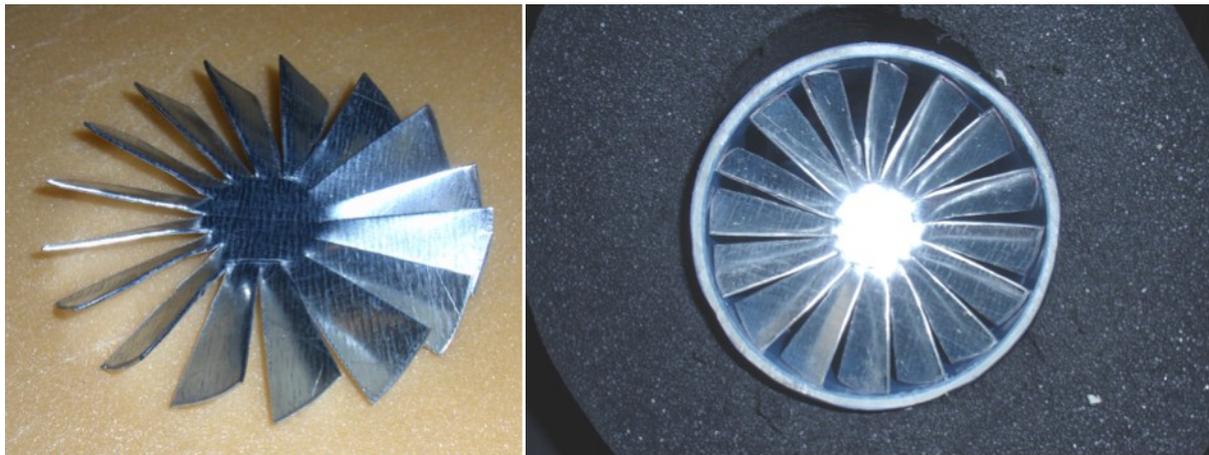


Abbildung 3-9: links: Leitrad aus Blechzuschnitt; rechts: Leitrad in Rohr eingebaut

Ein sehr gutes Ergebnis ließ sich letzten Endes durch einen besonders trivialen Ansatz erreichen. An Stelle einer Mischungseinrichtung verengt man die Strömung wie in Abbildung 3-10 so weit, dass die gesamte Luft an den Pt100 vorbeigewängt wird. Die wärmeren Grenzschichten werden dabei mit der restlichen Luft komprimiert und treffen gemeinsam auf die Sensoren, wo sich so der theoretische Mittelwert der Lufttemperatur von selbst einstellt. Diese Konstruktion ist im Rohrstück nach dem Austritt der Prüfkammer untergebracht.

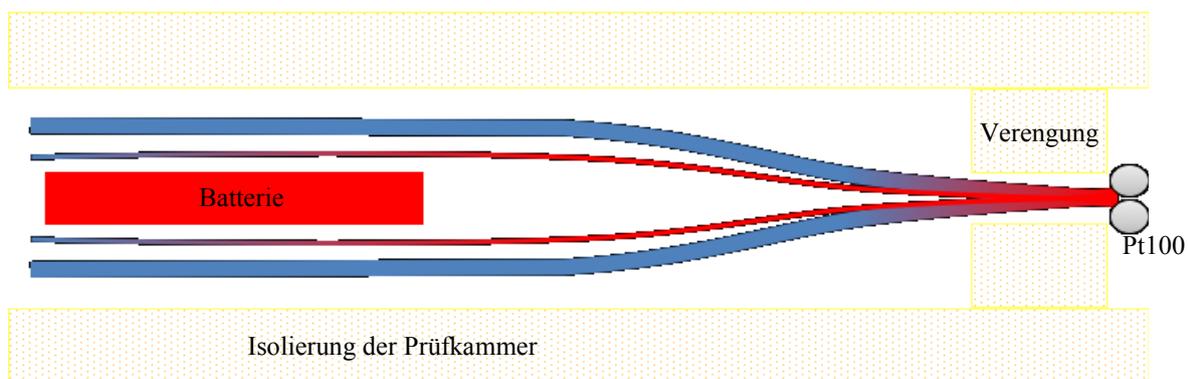


Abbildung 3-10: Schematische Darstellung der Querschnittsverengung vor der zweiten Temperaturmessstelle

Die dritte Messstelle im Luftkreislauf dient der Ermittlung des Massenstroms in der Prüfkammer. Gemessen wird die Strömungsgeschwindigkeit innerhalb einer Beruhigungsstrecke, wobei durch die in Abschnitt 4.1.2.2 beschriebene Kalibrierung auf die mittlere Geschwindigkeit im Rohr geschlossen wird. Unter Vernachlässigung der Temperaturänderung zwischen zweiter Temperaturmessstelle und Geschwindigkeitsmessstelle, wobei die ermittelte maximal gemessene Temperaturdifferenz weniger als 0,1K betragen hat, wird die Dichte an diesem Ort mit der Temperatur von Messstelle zwei berechnet. Der Massenstrom berechnet sich so aus der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in der Messstelle, dem Querschnitt der Messstelle und der Dichte. Der Druck wird als konstant angenommen. Trotz dieser Vernachlässigungen konnte mit den Validierungsmessungen in Abschnitt 5.2 gezeigt werden, dass das Gesamtergebnis nicht mehr als 5% vom realen Wert abweicht.

Nicht unerwähnt bleiben soll, auch wenn es sich um keine Messstelle des Prüfstands im eigentlichen Sinn handelt, dass der Prüfling in der aktuell vorliegenden Konfiguration der Datenerfassung mit bis zu 16 Oberflächenthermoelementen abgeklebt werden kann, um so auch lokale, räumliche Eigenheiten erfassen zu können.

3.3.8 Kabelwärmetauscher

Entstanden aus der Problematik, den über die Stromkabel abgeführten Teil der Verlustleistung für die Messung per Luftstrom zugänglich zu machen, der andererseits „verloren“ gewesen wäre, wurde die Idee des Kabelwärmetauschers geboren. Aus einem abgeschlossenen Projekt am ViF konnte ein Teil eines Kreuzstromlamellenwärmetauschers dankenswerterweise für diese Diplomarbeit wiederverwendet werden. In zwei Hälften geschnitten (eine für jeden Pol des Prüflings) kann er von der Luft nur mehr in einer Richtung durchströmt werden.

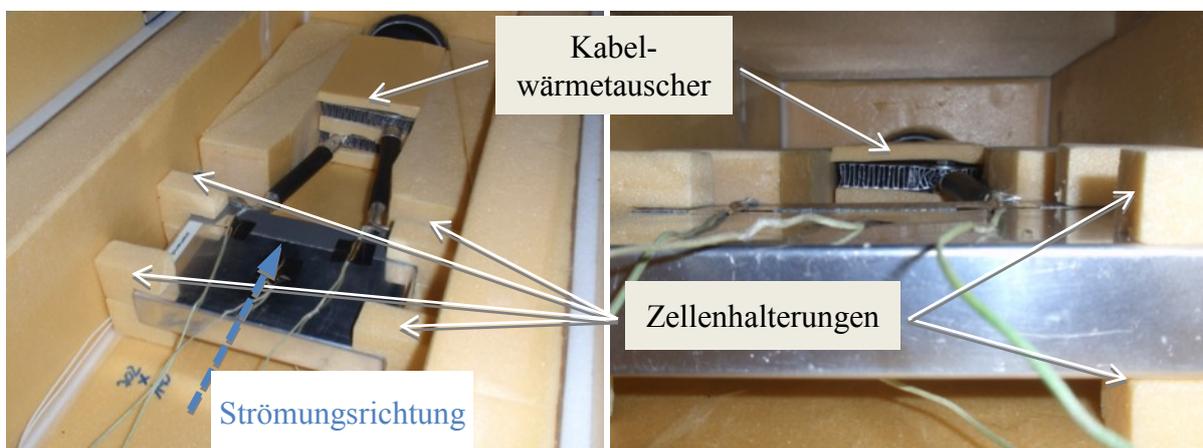


Abbildung 3-11: Kabelwärmetauscher im Einsatz am PHEV2 Dummy

Der Kabelwärmetauscher ersetzt im Bereich der Kabeldurchführung der Prüfkammer ungefähr 120mm Kupferkabel je Pol. Die Wärme, die der Prüfling unter Belastung über die Pole in die Stromkabel abgibt, muss schließlich auch den zwischengeschalteten Kabelwärmetauscher erreichen. Da der gesamte Luftstrom durch den Wärmetauscher gezwungen wird, kann dieser die thermische Energie aus dem Wärmetauscher abführen und dadurch der Messung zuführen. Ohne diese Konstruktion besteht die Möglichkeit, dass ein großer Anteil der Verlustwärme „ungesehen“ über die Kabel abfließt. Abbildung 3-11 zeigt den Kabelwärmetauscher zusammen mit dem Dummy.

Durch die Konstruktion aus Aluminium wird gegenüber der Konfiguration ohne Wärmetauscher in Summe eine Masse von 25g Material eingespart. Das wiederum führt zu einer in Abschnitt 5.6.3 bewiesenen höheren Dynamik der Messung. Die schlechtere elektrische Leitfähigkeit von Aluminium gegenüber der von Kupfer wird bei der elektrischen Kontaktierung durch die größere Querschnittsfläche im Vergleich zum Kupferkabel wieder wett gemacht.

3.4 Funktion des Gesamtsystems

Die auf Temperatur konditionierte Luft wird vom Radiallüfter durch die Konditionierungseinheit gesaugt und Richtung Massenstromverstellung befördert. Über die Stellung der Drosselklappe wird das Verhältnis der durch die Prüfkammer strömenden Luft zu der durch die Klimakiste strömenden eingestellt. Der Luftstrom in der Klimakiste dient dem Ausgleich des Nettowärmestroms zwischen Prüfstand und Umgebung und isoliert somit die Vorgänge in der Prüfkammer von der Prüfstands Umgebung.

Der Teil der konditionierten Luft, die als Prüfmedium fungiert, passiert nach der Drosselklappe die erste Temperaturmessstelle am Eintritt zur Prüfkammer. Danach durchströmt er die Prüfkammer in der sich auch der Prüfling befindet. Die unter Bestromung in der Batterie freiwerdende Wärme wird durch den Massenstrom über dessen Oberfläche abgeführt. Für große Batterien ist vorgesehen, den Kabelwärmetauscher zwischen Batteriepole und Stromkabel zu schalten. Wärme, die sonst ungemessen über die Stromleitungen in die Prüfstands Umgebung geleitet wird, kann so für die Messung zugänglich gemacht werden. Zum Austritt der Prüfkammer passiert der Luftstrom die zweite Temperaturmessstelle. Aus der Temperaturerhöhung der Luft zwischen Eintritt und Austritt wird auf die Enthalpieerhöhung des Massenstroms rückgerechnet. Zusammen mit der nachfolgenden Geschwindigkeitserfassung, welche der Ermittlung der Größe des Massenstroms in der Prüfkammer dient, wird die vom Prüfobjekt abgegebene thermische

Verlustleistung errechnet.

Nach der Geschwindigkeitsmessstelle vereinen sich die Luftströme aus Prüfkammer und Klimakiste wieder bevor beide erneut der Konditionierungseinheit zugeführt werden.

3.5 PHEV2-Dummy

Neben dem Bau des Prüfstands war es eine Aufgabe, eine Replik einer Zelle zu bauen, welche zu Demonstrationszwecken und für Validierungsmessungen im Prüfstand eingesetzt werden kann.

Zur weiteren Ausführung hatte man bereits den exakten Nachbau der Aluminiumhülle einer Batterie von SB LiMotive (entsprechend der prismatischen PHEV2-Zelle aus Tabelle 3-2) anfertigen lassen. Die Aufgabe bestand nun darin, ein Innenleben für diese Hülle in so einer Weise zu konstruieren, dass der fertige Dummy einerseits eine definierte Wärmeleistung in den Prüfstand einbringen kann, und dass andererseits die thermischen Parameter ungefähr mit denen des Vorbilds übereinstimmen.

Die Einbringung der Wärmeleistung wurde durch zwei elektrisch betriebene Heizmatten vorgesehen. Für eine realistische Dimensionierung der Heizleistung musste die ungefähre Kapazität der realen Zelle bekannt sein. Diese lies sich mit 24Ah festmachen, woraus nach überschlägiger Berechnung eine Verlustleistung von bis zu 50W zu erwarten ist. Die verbauten Heizmatten haben je eine Leistung von 7,5W bei 12V. Im Dummy sind sie in Serie geschaltet und bringen bei 48V eine Leistung von 60W, was als ausreichend erachtet wird.

Bedeutend schwieriger war die Einstellung einer passenden Wärmekapazität sowie Wärmeleitfähigkeit. Der Literatur [7],[20] nach liegt die spezifische Wärmekapazität von Lithium-Ionen-Zellen in einem Bereich von 0,7 bis 1kJ/(kgK), die Wärmeleitfähigkeit normal zur Oberfläche zwischen 0,5 und 5 W/(mK). Bei einem Gewicht des Vorbildes von rund 700g nimmt die Wärmekapazität so einen Wert zwischen 490 und 700J/K an.

Es wurde beschlossen, den verbleibenden Hohlraum zwischen Dummy-Hülle und Heizmatten mit Wärmeleitpaste aufzufüllen. In diesen Mengen war es besonders schwierig ein einigermaßen kostengünstiges Produkt ausfindig zu machen. Es konnte nur ein einziger Händler ermittelt werden, von dem dann ein Produkt mit einer Wärmeleitfähigkeit von 6W/(mK) bezogen wurde. Leider war es auch nach mehrmaliger Nachfrage unmöglich, genaue Spezifikationen zur Wärmekapazität der Paste zu erhalten. Mit dem Wissen über die ungefähre Zusammensetzung der Wärmeleitpaste wurde ein sehr grober Schätzwert für die Wärmekapazität des Dummy ermittelt, der sich auf ca. 700J/K beläuft. Die Schätzung ist in

Anhang 8.6 ersichtlich.

In einem nächsten Schritt wurden der Dummy durch Pole in Form von Schraubanschlüssen erweitert. Diese Gewindeanschlüsse stehen mit der Wärmeleitpaste im Inneren des Dummy in Kontakt. Es kann somit auch eine Wärmeleitung über die Pole bzw. die daran angeschlossenen Kabel dargestellt werden. Für diese Arbeit wurde der Dummy beim Funktionsnachweis für den Kabelwärmetauscher eingesetzt (siehe Abschnitt 5.6.3).

4 Die Messtechnik

4.1 Sensorik

4.1.1 Temperatur

Die größte Bedeutung kommt in dieser Arbeit den Temperaturmesswerten zu. Sie werden entweder direkt als Indikatoren herangezogen (z.B. Rückschluss auf die Innentemperatur der Zelle aus der Oberflächentemperatur) oder es werden wichtige Größen für die weiteren Berechnungen von ihnen abgeleitet.

Es liegt daher nahe, die Temperaturmessung mit größtmöglicher Genauigkeit durchzuführen. Dazu kommen zur Erfassung der Temperatur des Luftmassenstroms in der Prüfkammer vier Pt100 Widerstandsthermometer der Genauigkeitsklasse A nach DIN EN 60751 zum Einsatz. Im angestrebten Arbeitsbereich zwischen 5°C und 40°C liegt deren maximaler Fehler unkalibriert somit bei 0,22K. Jeder Pt100-Sensor ist mit einer Signalleitung für den Betrieb mit 4-Leiter-Schaltung ausgestattet.

Die Erfassung der Oberflächentemperaturen wird in Abhängigkeit der Anforderungen und der zu untersuchenden Zelle mit bis zu 16 Thermoelementen vom Typ K (NiCr/Ni) und der Toleranzklasse 1 durchgeführt. Diese weisen im Arbeitsbereich von 5°C bis 60°C und unkalibriert einen Fehler von bis zu 1,5K auf. Um eine elektrische Kontaktierung der Thermoelemente untereinander auf metallenen Batteriehüllen zu vermeiden, sind die geschweißten Spitzen zusätzlich beidseitig von einer Kaptonfolie überzogen.

4.1.1.1 Luftstrom, Pt100

Die Temperaturmessung mit Hilfe von Widerstandsthermometern basiert primär auf der ausgeprägten Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes von Metallen. Bei Kenntnis dieser Widerstandscharakteristik kann damit eine Temperaturmessung in die Messung des elektrischen Widerstandes überführt werden. Da eine elektrische Widerstandsmessung ohne größeren Aufwand mit hoher Präzision möglich ist, kann folglich auch die Temperatur sehr genau bestimmt werden. Allerdings ist bei Widerstandsthermometern prinzipiell zu berücksichtigen, dass der Sensor im Gegensatz zu einem Thermoelement kein aktiver Messwertgeber ist. Die Widerstandberechnung erfolgt durch Spannungsmessung bei definiertem Messstrom nach dem ohmschen Gesetz. Um zu vermeiden, dass dieser Strom zu einer messwertverfälschenden Temperaturerhöhung des Messwiderstandes selbst führt, muss er sehr klein gehalten werden.

Platin eignet sich sehr gut für einen Einsatz in Widerstandsthermometern, da die Widerstandszunahme mit steigender Temperatur nahezu linear verläuft. Darüber hinaus ist Platin bei hoher Reproduzierbarkeit in seinem spezifischen Widerstand sehr langzeitstabil und auch problemlos in verschiedenen Messmedien wie Luft, Wasser oder Ölen einsetzbar. Die Temperaturabhängigkeit des Widerstands R_T wird durch Gleichung (4-1) beschrieben, a , b und c sind die Temperaturkoeffizienten des Sensors, welche z.B. durch Mehrpunktmessung ermittelt werden können.

$$R_T = R_0[1 + aT - bT^2 - cT^3 \cdot (T - 100)] \quad (4-1)$$

Die in dieser Arbeit verbauten Sensoren entsprechen dem IEC751 Standard wonach sich nach Gleichung (4-2) ein Widerstandskoeffizient von 3850PPM/°C ergibt.

$$\text{Temperaturkoeffizient} = \frac{R_{100} - R_0}{R_0 \cdot 100} \cdot 10^6 \quad (4-2)$$

Dieser gibt die durchschnittliche Widerstandsänderung pro Grad Celsius im Temperaturbereich von 0°C bis 100°C an.

4.1.1.2 Zellenoberfläche, TC

Thermoelemente sind aktive Messwertgeber und basieren auf dem Seebeck-Effekt. Verbindet man zwei Metalldrähte an ihren Enden bilden sie einen geschlossenen Stromkreis. Sind diese Drähte darüber hinaus aus unterschiedlichen Materialien und sind die Verbindungsstellen auf unterschiedlichem Temperaturniveau, so stellt sich ein Stromfluss in den Metalldrähten ein. Ausschlaggebend für den Stromfluss ist eine Potentialdifferenz zwischen den Verbindungsstellen, die als Spannung U_T gemessen werden kann. Sie wird Thermospannung genannt und ist die eigentliche Messgröße, aus der auf die Temperatur geschlossen wird. Wird eine der beiden Verbindungsstellen auf bekannter Temperatur gehalten, kann die Temperatur der anderen Verbindungsstelle nach Gleichung (4-3) mit dem Thermospannungskoeffizient α bzw. im Fall stärkerer Nichtlinearitäten aus geeigneten Polynomansätzen berechnet werden.

$$T_1 = \alpha \cdot U_T + T_2 \quad (4-3)$$

Der Thermospannungskoeffizient ist abhängig von der Materialkombination (Typ des Thermoelements) des Sensors.

4.1.1.3 Kalibrierung

Die Kalibrierung der Messketten für die Pt100-Widerstandsthermometer und für die Thermoelemente erfolgte in einem regelbaren Wasserbecken des Typs RCS 20 der Firma Lauda. Dessen Temperatur wurde von anfangs 0°C in Schritten von jeweils 10K bis auf eine Temperatur von 60°C erhöht. Nach jeder Temperaturerhöhung wurde den Sensoren ausreichend Zeit gegeben, die eingestellte Temperatur anzunehmen. Es folgte eine simultane Aufzeichnung der Ausgabewerte aller Sensoren für eine Dauer von 30 Sekunden mit einer Messrate von 1Hz. Den Referenzwert lieferte ein Pt100-Präzisionsthermometer, Typ T955, der Firma Dostmann-Electronic, mit einer angegebenen Genauigkeit von 0,03K über den gesamten Messbereich und Werkszertifikat für die Messkette. Da es nicht möglich war, dieses Gerät in die Datenerfassung zu integrieren, wurden die Werte für jeden Messpunkt händisch notiert und nachträglich in das Messprotokoll der Temperatursensoren eingefügt. Nach der Erarbeitung der Kalibrierungskurve jedes einzelnen Sensors durch lineare Regression wurden zwei weitere Temperaturen innerhalb des angestrebten Arbeitsbereiches angefahren, um die Kalibrierung zu verifizieren. Es zeigte sich eine maximale Abweichung der Pt100-Widerstandsthermometer von 0,06K, und der Thermoelemente von 0,11K zur Referenz.

Die Kalibrierung der Temperaturmessketten wird somit als erfolgreich angesehen.

4.1.2 Strömungsgeschwindigkeit

Zur Berechnung der dem Luftstrom zugeführten Wärme ist unter anderem die Kenntnis über die Größe des Massenstromes der Luft notwendig. Für dessen Ermittlung kommt ein Hitzdrahtanemometer des Typs 8855 der Firma TSI zum Einsatz. Es wurde bereits mit der notwendigen elektronischen Beschaltung geliefert und gibt ein in Abhängigkeit von der Anströmungsgeschwindigkeit lineares Spannungssignal aus. Mit bekanntem Querschnitt des Rohres, in dem der Sensor eingebracht ist, errechnet man durch Multiplikation der mittleren Strömungsgeschwindigkeit den Volumenstrom. Unter Miteinbeziehung der Temperatur der Luft im Bereich des Sensors wird über die Gleichung für ideales Gas mit den Stoffwerten für reine Luft und bei einem Umgebungsdruck von 1bar auf die Dichte der Luft geschlossen, und damit in weiterer Folge der Massenstrom der Luft durch die Prüfkammer berechnet.

Die Entscheidung für ein Hitzdrahtanemometer und gegen eine günstigere und robustere Prandtlsonde begründet sich darin, dass der Hitzdraht keine Anforderungen bezüglich der Strömungsgeschwindigkeit stellt. Der Literatur ist zu entnehmen, dass Messungen mit Prandtlsonden erst ab Strömungsgeschwindigkeiten von ca. 10m/s sinnvoll durchführbar sind,

andere Quellen nennen ca. 4m/s als Untergrenze. Bei minimalem Massenstrom ergibt das bei letzterem Wert einen Rohrquerschnitt von ca $0,4e-3m^2$ bzw einen Rohrrinnendurchmesser von ca. 20mm. Will man nun den selben Rohrquerschnitt auch für maximalen Massenstrom verwenden, muss ein zusätzlicher Druckverlust von ca. 570Pa überwunden werden. Daraus resultiert eine unnötige Überdimensionierung des Lüfters.

Eine Lösung ist, für verschiedene Bereiche der Strömungsgeschwindigkeit Messstrecken mit unterschiedlichen Rohrdurchmessern zur Verfügung zu haben, was wiederum die Flexibilität des Prüfstandes einschränkt. Je nach eingestelltem Massenstrom muss der Prüfstand umgebaut werden. Spätestens bei einer Automatisierung der Massenstromverstellung funktioniert diese Variante nicht mehr.

Die Vorteile des Hitzdrahtes liegen klar auf der Hand. Durch die Unabhängigkeit vom Rohrdurchmesser genügt eine Messstrecke. Der Prüfstand muss für unterschiedliche Betriebsbereiche nicht umgebaut werden und der Druckabfall kann minimal gehalten werden.

4.1.2.1 Hitzdrahtanemometrie

Das Funktionsprinzip der Hitzdrahtanemometrie besteht darin, einen dünnen Metalldraht, der zwischen zwei Zinken der Hitzdrahtsonde gespannt ist, mit Hilfe einer elektrischen Brückenschaltung auf eine Temperatur aufzuheizen, die deutlich über der Strömungstemperatur liegt. Wird der Metalldraht in eine Strömung eingebracht, so wird ihm durch Konvektion Wärme entzogen. Um den Draht dennoch auf konstanter Temperatur zu halten, muss bei konstantem Stromfluss die Spannung nachgeregelt werden. Diese elektrische Heizspannung wird als Maß für die Geschwindigkeit verwendet.

4.1.2.2 Kalibrierung

Weil der Sensor für freie Strömung kalibriert ist, er im Prüfstand jedoch die Geschwindigkeit einer Rohrströmung misst und daher ein völlig anderes Strömungsprofil vorliegt, wurde jener Teil des Prüfstands, in dem die Geschwindigkeitsmessung erfolgt, separat kalibriert. Als Referenz diente dabei ein Balgengaszähler.

Der Sensor wurde so im Rohr platziert, dass bei konstanter Strömung der Maximalwert der Strömungsgeschwindigkeit gemessen wurde. Durch die Arbeitsweise des Balgengaszählers als Volumenmessgerät lässt sich auf eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit innerhalb der Geschwindigkeitsmessstrecke rückrechnen. Während der Messungen machte sich eine Temperaturabhängigkeit des Hitzdrahtes bemerkbar, die auch im Datenblatt vermerkt war. Für die Sonde ist ein Normarbeitstemperaturbereich von 20 – 26°C angegeben. Bei einer

Abweichung der Temperatur der zu messenden Strömung von diesem Bereich ist mit einer Abweichung im Messergebnis von 0,2% pro Kelvin zu rechnen. Für die Kalibrierung wurde daher auch die Temperatur der Luft herangezogen, die über einen Luft-Wasser-Wärmetauscher variiert wurde. Es war so möglich eine multilineare Ausgleichsgerade als Funktion zu definieren, welche aus der von der Sensorelektronik ausgegebenen Spannung U und der gemessenen Lufttemperatur T die mittlere Strömungsgeschwindigkeit v_{TSI} in m/s innerhalb der Strömungsmessstrecke wiedergibt.

$$v_{\text{TSI}} = 0,03097584035 \cdot T + 1,17049828 \cdot U - 0,5719658847 \quad (4-4)$$

Die Validierungsmessungen zeigten eine Messunsicherheit der Geschwindigkeitsmessstrecke von maximal 5% in einem Geschwindigkeitsbereich von 1m/s bis 10m/s. Dieser Bereich gibt den anfangs erwähnten erforderlichen Volumenstrombereich von 5,8m³/h bis 63m³/h fast zur Gänze wieder.

Die Kalibrierung der Geschwindigkeitsmessstrecke wird somit als erfolgreich angesehen.

4.2 Datenerfassung

4.2.1 cDAQ-9178

Das cDAQ-9178 von National Instruments ist ein USB-Chassis mit acht Steckplätzen, das sich für kompakte, portable Prüfsysteme mit gemischten Signalen eignet.

Für diese Arbeit werden Messmodule für Temperatur und Spannung eingesetzt. Die erfassten Signale werden dabei im Sekundentakt per USB-Verbindung zu einem Laptop übertragen, auf dem eine Software die simultane Verarbeitung und Darstellung dieser Daten übernimmt. Dem Benutzer werden Vorgänge im Prüfstand unmittelbar über die Benutzeroberfläche angezeigt.

4.2.2 NI 9205 - Analogeingangsmodul für Spannungsmessung

Das NI 9205 ist ein Spannungsmessmodul für bis zu 32 single-ended- bzw. 16 differenzielle Eingangssignale und verfügt über eine Auflösung von 16bit sowie eine maximale Abtastrate von 250kHz. Ausgabegröße des Moduls sind die Spannungen jedes eingelesenen Kanals.

Für diese Arbeit wurden 3 Kanäle im differenziellen Messmodus verwendet, bei einer Abtastrate von 1Hz pro Kanal. Eingelesen wurden das Spannungssignal des Hitzdrahtanemometers aus welchem die Strömungsgeschwindigkeit berechnet wird, die Spannung der Wärmequelle und das Spannungssignal des Strom-Spannungs-Wandlers zur elektrischen Leistungsermittlung.

4.2.3 NI 9213 - Thermoelement-Eingangsmodul

Beim NI 9213 handelt es sich um ein Thermoelementmodul mit integrierter Kaltstellenkompensation mit dem sich bis zu 16 Thermoelemente jeglicher Paarung zeitgleich mit bis zu 75Hz auslesen lassen. Ein 24bit-A/D-Wandler sorgt für eine Messempfindlichkeit von bis zu 0,02 °C. Das Modul gibt direkt die Temperatur jedes einzelnen Sensors aus.

Während der Messungen wurden für diese Arbeit die Oberflächentemperaturen mit einer unterschiedlichen Anzahl von Thermoelementen aufgezeichnet. Die Menge richtete sich dabei nach der Art der Wärmequelle und dem Zweck der Messung. Es wurden ausschließlich Thermoelemente des Typs K verwendet und bei einer Abtastrate von 1Hz pro Kanal ausgelesen.

4.2.4 NI 9217 - Analogeingangsmodul für Platin-Widerstandsthermometer

Das Modul NI 9217 von National Instruments ist ein Analogeingangsmodul für Platin-Widerstandsthermometer im Bereich von 100Ω mit vier Kanälen und einer Auflösung von 24bit. Es unterstützt 3- und 4-Draht-Messungen und erkennt automatisch, welcher RTD-Typ (3- oder 4-Draht) an den Kanal angeschlossen ist und kann für zwei verschiedene Abtastraten konfiguriert werden. Bei Konfiguration für hohe Abtastrate lässt sich jeder Kanal mit bis zu 100Hz abtasten, bei Konfiguration für hohe Auflösung mit bis zu 1,25Hz. Auch dieses Modul gibt direkt die Temperatur jedes einzelnen Sensors aus.

Die vier Pt-100 Widerstandsthermometer zur Bestimmung der Lufttemperatur in der Prüfkammer wurden für diese Arbeit per 4-Leiter-Schaltung an das Messmodul angeschlossen und im hochauflösenden Modus bei 1Hz pro Kanal abgetastet. Der Messstrom beträgt 1mA pro Kanal.

4.3 LabVIEW

In der grafischen Programmierumgebung LabVIEW von National Instruments wurde für den Prüfstand ein Programm geschrieben, dass sowohl die simultane Auslesung aller Messmodule vornimmt, als auch die Umrechnung der Messwerte in die erforderliche Größen, um das Messergebnis in Echtzeit darzustellen.

Die Konfiguration der einzelnen Messmodule geschieht im Voraus der Messung aus LabVIEW heraus. Es werden die einzulesenden Kanäle jedes Moduls, sensortypische Eigenschaften sowie Abtastrate und das Zeitintervall der Auslesung definiert. Als Zeitbasis dient die vom Betriebssystem bereitgestellte Uhrzeit.

Die eingelesenen Messwerte werden direkt in LabVIEW weiterverarbeitet. Die Signale von Modul 9217 werden durch sogenannte SubVIs in die Enthalpien der ein- und austretenden Luft in der Prüfkammer umgerechnet. Weiters wird die Austrittstemperatur in der Prüfkammer zur Berechnung der Dichte der Luft herangezogen. Aus den Messwerten von Modul 9205 werden die elektrisch eingebrachte Leistung berechnet und in Kombination mit der Lufttemperatur am Austritt der Prüfkammer (von Modul 9217) die Strömungsgeschwindigkeit der Luft. Auch hierfür stehen eigene SubVIs zur Verfügung. Die Messwerte der Oberflächentemperaturen von Modul 9213 werden direkt übernommen, es werden daraus keine abgeleiteten Größen gebildet.

Die relevanten, gemessenen Werte und berechneten Größen wie z.B. Oberflächentemperaturen, elektrische und thermische Leistung werden in LabVIEW grafisch ausgegeben und zusätzlich in einem Messprotokoll aufgezeichnet. Dieses ermöglicht eine Verarbeitung und Evaluierung der Messwerte in weiterer Software.

Die Online-Berechnung der Dichte und der Enthalpie der trockenen Luft erfolgt in LabVIEW durch die Auswertung von Funktionen, in welche die Temperatur als einzige Variable eingeht. Die Stützpunkte für die Generierung der Kurven wurden im Temperaturbereich von -30 bis $+75^{\circ}\text{C}$ in äquidistanten Schritten von 5K gesetzt. Zur Berechnung der Funktionswerte von Dichte und Enthalpie an jedem Stützpunkt stand in der Area B des ViF eine Stoffwertedatenbank zur Verfügung. Nach Bildung der Wertepaartupel Temperatur-Dichte und Temperatur-Enthalpie wurde je Tupel eine polynomiale Ausgleichskurve dritter Ordnung in Microsoft Excel berechnet und diese in separaten SubVIs hinterlegt. Sie lassen sich so ohne weiteres in neu geschriebene Programmsequenzen integrieren.

Auch die durch die Kalibrierung des Hitzdrahtanemometers herausgefahrene multilineare Ausgleichskurve ist in einem SubVI hinterlegt. Eingangswerte sind die Lufttemperatur am Austritt der Prüfkammer sowie die von der Elektronik der Sonde ausgegebene Spannung, als Ausgabewerte stehen sowohl die kalibrierte Strömungsgeschwindigkeit als auch der Volumenstrom bezogen auf die Geschwindigkeitsmessstrecke zur Verfügung.

5 Funktionsnachweis des Prüfstandes

Um den Nachweis zu erbringen, dass der Prüfstand den Anforderungen (Abschnitt 3.1) entsprechend funktioniert, wurden verschiedene Messungen vorgenommen. Besonderes Augenmerk lag auf der Leistungsmessung und der Fähigkeit, transiente Abläufe korrekt wiederzugeben.

5.1 Prüfablauf

Für jede Überprüfungsmessung wurde der selbe Ablauf eingehalten, der in Abbildung 5-1 dokumentiert ist. Zunächst erfolgte die Einstellung der gewünschten Prüfstandstemperatur über die Konditionierung und des erforderlichen Massenstroms. Im Anschluss daran wurde eine Offsetmessung vorgenommen.

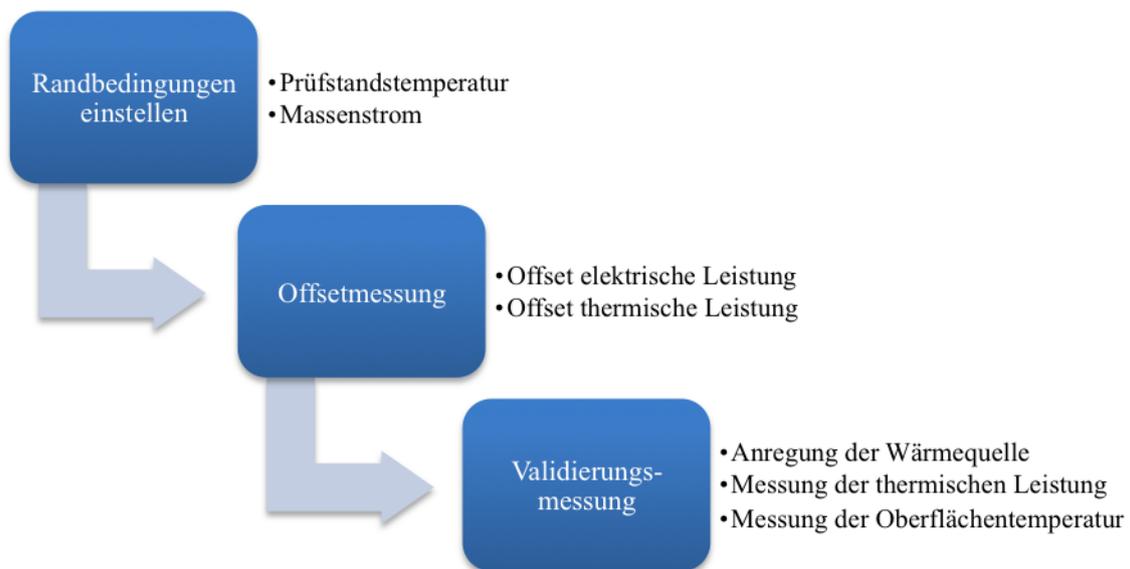


Abbildung 5-1: Ablauf der Überprüfungsmessungen

Vorhandene Konstanten in der elektrischen und thermischen Leistungsmessung können so eruiert und das Ergebnis von ihnen bereinigt werden. Nach der Ermittlung des Offsets wurde die Validierungsmessung gestartet. Zeitgleich mit der definierten Anregung einer Wärmequelle in der Prüfkammer, erfolgte die Datenerfassung und -aufzeichnung. Neben der Auswertung der thermischen Leistung wurde auch die Oberflächentemperatur der Wärmequelle im Messprotokoll aufgezeichnet, um Aussagen über den Wärmeübergang machen zu können.

5.2 Validierung der Leistungsmessung

Zur Ermittlung der Genauigkeit der Leistungsmessung stellte die Heizmatte die ideale Wärmequelle dar, weil der von ihr abgegebene joulesche Wärmestrom im stationären Fall der aufgenommenen elektrischen Leistung entspricht. Es genügt somit ein Vergleich der gemessenen Leistung mit der elektrisch eingebrachten, welche messtechnisch sehr einfach erfassbar war.

Die Messung der elektrischen Leistung erfolgte durch eine direkte Spannungsmessung mit dem NI 9205-Modul und einer indirekten Strommessung mit einem Strom-Spannungs-Wandler des Typs LTSR 6-NP der Firma LEM. Der Wandler basiert auf einem Halleffektsensor und gibt ein dem Strom proportionales Spannungssignal aus, welches wiederum direkt vom NI 9205 eingelesen wurde.

Als Anregungsfunktion für die Heizmatte wurde eine Sprungfunktion für deren Spannung gewählt. Die Messung erfolgte solange, bis die Oberflächentemperatur der Heizmatte und die Austrittstemperatur des Prüfmediums einen konstanten Wert angenommen hatten und ein stationärer Betriebs- und Messpunkt erreicht wurde. Die letzten Werte der gemessenen thermischen Leistung im Messprotokoll wurden denen der elektrischen Leistung gegenübergestellt und daraus die Abweichung der Leistungsmessung berechnet.

Diese Prozedur wurde für unterschiedliche elektrische Leistungen, Prüfstandstemperaturen und Massenströme wiederholt. Tabelle 5-1 stellt einen zusammenfassenden Überblick der Messmatrix dar, nach der die Validierung der Leistungsmessung durchgeführt wurde.

Lufttemperatur im Prüfstand	5°C – 35°C
Luftmassenstrom	5g/s – 15g/s
elektrische Heizleistung	10W – 65W
Art der Anregung	konstante Heizleistung über Messdauer

Tabelle 5-1: Zusammenfassung der Messmatrix zur Validierung der Leistungsmessung

5.3 Bewertung des Antwortverhalten des Prüfstands

Die Vorgehensweise zur Bestimmung des Antwortverhalten des Prüfstands erfolgt in ähnlicher Weise wie die Validierung der Leistungsmessung. Um vorhandene Zeitkonstanten und dämpfende Eigenschaften des Aufbaus sichtbar zu machen, die das Messergebnis bei der

Erfassung instationärer Vorgänge verfälschen können, wurden für die Anregung der Wärmequelle instationäre Signale verwendet. Als Wärmequelle diente wieder eine Heizmatte.

Die mit geschätzten Materialkennwerten errechnete Biot-Zahl der Heizmatte wurde auf einen Wert von ca. 0,2 bestimmt. Das bedeutet, dass die Heizmatte noch annähernd als thermisch „dünnere Körper“ angesehen, und so von einer homogenen Temperaturverteilung in der Matte, entsprechend ihrer Oberflächentemperatur, ausgegangen werden konnte. Mit dieser Voraussetzung wurde zur simulatorischen Bestimmung der Oberflächentemperatur ein Modell der Heizmatte in Matlab Simulink erstellt. Dieses wurde in einem weiteren Schritt mit Messwerten des Prüfstands befüllt, und der zeitliche Verlauf der Oberflächentemperatur der Heizmatte während der Messung nur aufgrund der in der Prüfkammer herrschenden Temperatur, der elektrischen Heizleistung und des konvektiven Wärmeübergangs berechnet. Die Qualität der simulierten Oberflächentemperatur wurde anhand der tatsächlich gemessenen bewertet. Durch die gute Übereinstimmung wurde aus den Simulationsdaten die Referenzkurve der zu messenden Leistung abgeleitet.

In einem ersten Schritt wurde die Heizmatte unter konstanter Leistung aufgewärmt bis sich ein stationärer Betriebspunkt einstellte. Im Anschluss daran wurde die elektrische Leistung so verändert, dass sie sich in einem definierten Zeitintervall von n Sekunden um einen ebenfalls definierten Betrag von y Watt änderte. Diese Änderung erfolgte linear, d.h. dass der Leistungszuwachs mit jedem Zeitschritt y/n W/s betrug – die elektrische Leistung folgte einer Rampenfunktion. Im Anschluss an die Rampenfunktion fiel die Leistung auf ihren ursprünglichen Wert zurück.

Durch Variation dieser Leistungsrampe sollte bestimmt werden, welche Leistungsänderungen (bezogen auf die thermische Leistung der Heizmatte) mit dem Prüfstand innerhalb der vorgegebenen Toleranzen erfasst werden können. Zwischen den Rampenfunktionen wurde der Heizmatte jeweils 600s „Erholungszeit“ gegeben, um annähernd ihre ursprüngliche Oberflächentemperatur anzunehmen.

Bei diesen Untersuchungen wurde entgegen Abschnitt 5.2 von den Randbedingungen nur der Massenstrom variiert, um zu erörtern welchen Einfluss ein verbesserter Wärmeübergang auf das Antwortverhalten des Prüfstands hat. Tabelle 5-2 fasst die Messmatrix für die Rampenmessungen zusammen.

Temperatur der Prüfluft	20°C
Luftmassenstrom	5g/s, 10g/s
ΔP_{el}	5W
$\Delta P_{el}/\Delta t$	5mW/s, 10mW/s, 25mW/s, 50mW/s, 100mW/s, 200mW/s
Art der Anregung	Rampe der Heizleistung über Zeitintervall

Tabelle 5-2: Messmatrix zur Bestimmung des Antwortverhalten des Prüfstands. Variation der Heizleistung als Rampenfunktion

In einem weiteren Versuch wurde als zweite Anregungsfunktion ein Rechtecksignal mit einer Periodendauer von 600s und konstanter Amplitude für die Spannung der Heizmatte vorgegeben. Es konnte das dynamische Verhalten beim Aufwärm- und Abkühlvorgang bewertet werden. Im Messprotokoll wurden sechs volle Perioden aufgezeichnet.

5.4 Evaluierung der Funktion des Kabelwärmetauscher

Der in Abschnitt 3.3.8 beschriebene Kabelwärmetauscher wurde ebenso einer Funktionsüberprüfung unterzogen. Da die Konstruktion spezifisch auf den Einsatz in Kombination mit realen Zellen gedacht ist, wurde nicht eine Heizmatte als Wärmequelle herangezogen, sondern der unter Abschnitt 3.5 beschriebene Zellen-Dummy. Zur Bildung einer Vergleichsbasis wurden drei Prüfzenarien geplant:

- Wärmeeinbringung mittels Dummy
- Wärmeeinbringung mittels Dummy und daran angeschlossenen Stromleitungen
- Wärmeeinbringung mittels Dummy und daran angeschlossenen Kabelwärmetauscher

Aus dem ersten Fall wurden Rückschlüsse über die maximale Temperatur der Oberfläche und der nicht kontaktierten Pole des Dummy gezogen. Der zweite Fall wurde genutzt, um die in Abschnitt 3.2 geschilderte Problematik der über die Stromkabel abgeführten Wärme zu erörtern. Der dritte Fall diente der Verdeutlichung der durch den Kabelwärmetauscher bewirkten Verbesserungen der Messdynamik.

In jedem Fall wurden im Messprotokoll zusätzlich zur Leistungsmessung die Oberflächentemperatur des Dummy sowie die Temperatur an dessen Polen aufgezeichnet. Unterschiede in diesen beiden Temperaturen zwischen den Prüffällen sollen Auskunft über die Funktionalität des Kabelwärmetauschers geben.

Für die Anregung des Dummy wurde eine Sinusfunktion konstanter Amplitude und Frequenz für die Spannung vorgegeben. Es kann neben der Änderung der mittleren Temperatur von Oberfläche und Polen direkt die Änderung im dynamischen Verhalten des Prüfstands bei Einsatz des Kabelwärmetauschers beobachtet werden.

5.5 Statistische Behandlung der Messergebnisse

Messwerte sind immer mit einem Fehler behaftet, der den einzelnen gemessenen Wert vom wahren, meist unbekanntem Wert abweichen lässt. Das macht sich bei mehrmaliger Messung ein und derselben Größe bemerkbar, indem die Messwerte voneinander abweichen. DIN 1319 definiert den Fehler eines Messwertes als Abweichungen, den Fehler eines Messergebnisses als Unsicherheit. Es können zwei Arten von Abweichungen unterschieden werden:

- Systematische Abweichungen, welche in Betrag und Vorzeichen konstant sind. Sie werden auch als fixe Abweichungen bezeichnet.
- Zufällige Abweichungen, die einer in Betrag und Vorzeichen zufälligen Streuung unterliegen und somit entgegen den systematischen Fehlern nicht kontrollierbar sind. Es gelten die Gesetzmäßigkeiten der mathematischen Statistik [8].

Der Sinn der Fehlerrechnung ist, bei gegebener Messprozedur die bestmögliche Schätzung für die Messgröße anzugeben und eine Aussage zu deren Genauigkeit zu liefern. Wird eine Messgröße mit nur einem einzigen Messwert x ermittelt, so ist die Abweichung zu schätzen. Zur Verbesserung der Qualität der Aussage über die Messgröße wird eine Messreihe mit n Messwerten aufgenommen. Die bestmögliche Schätzung ergibt sich durch Bildung des arithmetischen Mittelwertes \bar{x} nach Gleichung (5-1).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5-1)$$

Die Einzelmesswerte x liegen dann unterhalb oder oberhalb des Mittelwerts. Durch Bildung der Varianz s^2 nach Gleichung (5-2) erhält man den Mittelwert der quadratischen Abweichung der Einzelmesswerte von deren Mittelwert \bar{x} . Die Varianz hat die Einheit der Messgröße zum Quadrat. Um eine Aussage über die Abweichung in der Einheit der

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (5-2)$$

Messgröße zu erhalten, wird nach Gleichung (5-3) die Wurzel aus der Varianz s gezogen.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5-3)$$

Die neue Größe s heißt Standardabweichung. Durch die Streuung der Einzelmesswerte x_i ergibt sich bei der Aufzeichnung mehrerer Messreihen für eine Messgröße auch eine Streuung der einzelnen Mittelwerte \bar{x}_i der Messreihen. Die Standardabweichung des Mittelwertes \bar{x} kann nach Gleichung (5-4) angegeben werden.

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (5-4)$$

Die Fehlerangaben im folgenden Abschnitt beziehen sich immer auf das 95%-Konfidenzintervall ($2s_{\bar{x}}$), was bedeutet, dass 95% der Messwerte innerhalb eines Bereichs von $\pm 2s$ liegen.

5.6 Ergebnisse

Im Laufe des Validierungsprozesses wurden durch eine Modifikation am Prüfstand der zweiten Temperaturmessstelle am Austritt der Prüfkammer zusätzlich zu den

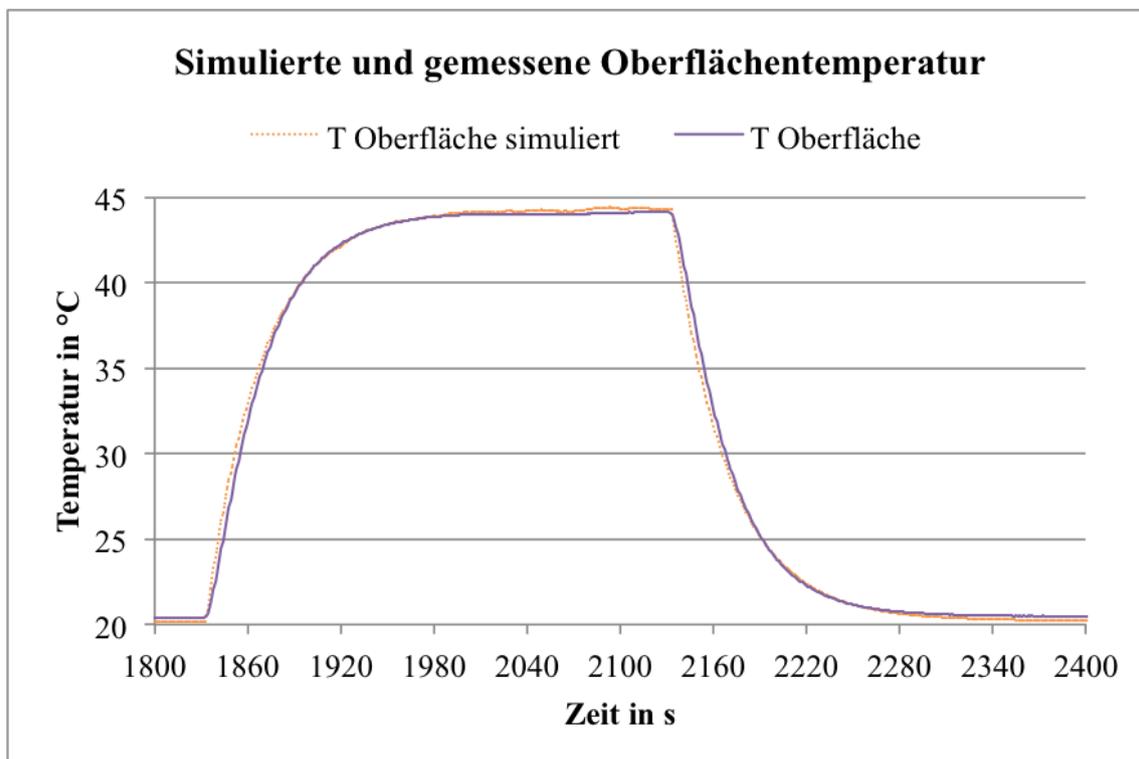


Abbildung 5-2: Verlauf der gemessenen und simulierten Oberflächentemperatur der Heizmatte während der Bestromung mit einem Rechtecksignal als Anregungsfunktion

Widerstandsthermometern noch vier Thermoelemente hinzugefügt. Einige der folgenden Abbildungen enthalten deswegen zwei Kurven der Leistungsmessung, die eine basierend auf den Messwerten der Pt100, die andere basierend auf denen der Thermoelemente. Die Bezeichnung der Kurven wurde dementsprechend angepasst.

Der in Matlab Simulink ermittelte Verlauf der Oberflächentemperatur stimmte sehr gut mit dem gemessenen überein (siehe Abbildung 5-2). Der Mittelwert der Abweichung beider Werte betrug maximal 0,25K, die Standardabweichung 0,4K. Daraus lässt sich schließen, dass sowohl der aus dem stationären Teil der Messungen abgeleitete Wärmeübergangskoeffizient αA , als auch die aufgrund der Materialzusammensetzung der Heizmatte ermittelte Wärmekapazität $m \cdot c_p$ sehr genau ermittelt wurden. Aufgrund dessen und auch wegen der guten Übereinstimmung beider Verläufe im transienten Teil wird der aus der simulierten Oberflächentemperatur der Heizmatte berechnete Wärmestrom als Vergleichsbasis für die weiteren Betrachtungen herangezogen.

5.6.1 Leistungsmessung

Die relative Abweichung der Leistungsmessung zeigte bei den stationären Messungen weder eine Abhängigkeit hinsichtlich der eingestellten Lufttemperatur im Prüfstand, noch in Bezug auf die vorgegebene Heizleistung. Unter allen vermessenen Leistungen und Temperaturen konnte für die relative Abweichung ein maximaler Wert von $\pm 4,9\%$ eruiert werden. Dieser Wert gilt, wenn durch die Vorgabe des Massenstroms eine Temperaturspreizung von ca. 5K gegeben ist.

Auffällig war, dass die gemessene Leistung auch nach mehrstündiger Messung immer eine einseitige Abweichung aufwies (vgl. Abbildung 5-3, Abbildung 5-4). Dieses Verhalten wurde letztlich darauf zurückgeführt, dass die in Abschnitt 3.3.7 beschriebene Durchmischung der Austrittsströmung noch immer nicht die wahre mittlere Temperatur der Luft bringt.

Durch die Erhöhung des Massenstroms bei gleichbleibender Heizleistung konnte beobachtet werden, dass ab einer Spreizung von ca. 2K abwärts die Abweichung der Leistungsmessung einen Anstieg vollzog und Werte von $\pm 10\%$ oder höher annahm. Der Grund hierfür ist in einem Zusammenwirken der Abweichungen in den Messungen der Strömungsgeschwindigkeit und der Temperaturen zu finden. Ignoriert man die oben beschriebene nicht-ideale Durchmischung der Luft, so ist die Grundungenauigkeit der Leistungsmessung in der Abweichung der Hitzdrahtmessung begründet. 5K Temperaturspreizung können von der Temperaturmessung ohne weiteres genauer $\pm 1,5\%$ aufgelöst werden. Durch Senkung der Spreizung erreicht die Temperaturmessung irgendwann

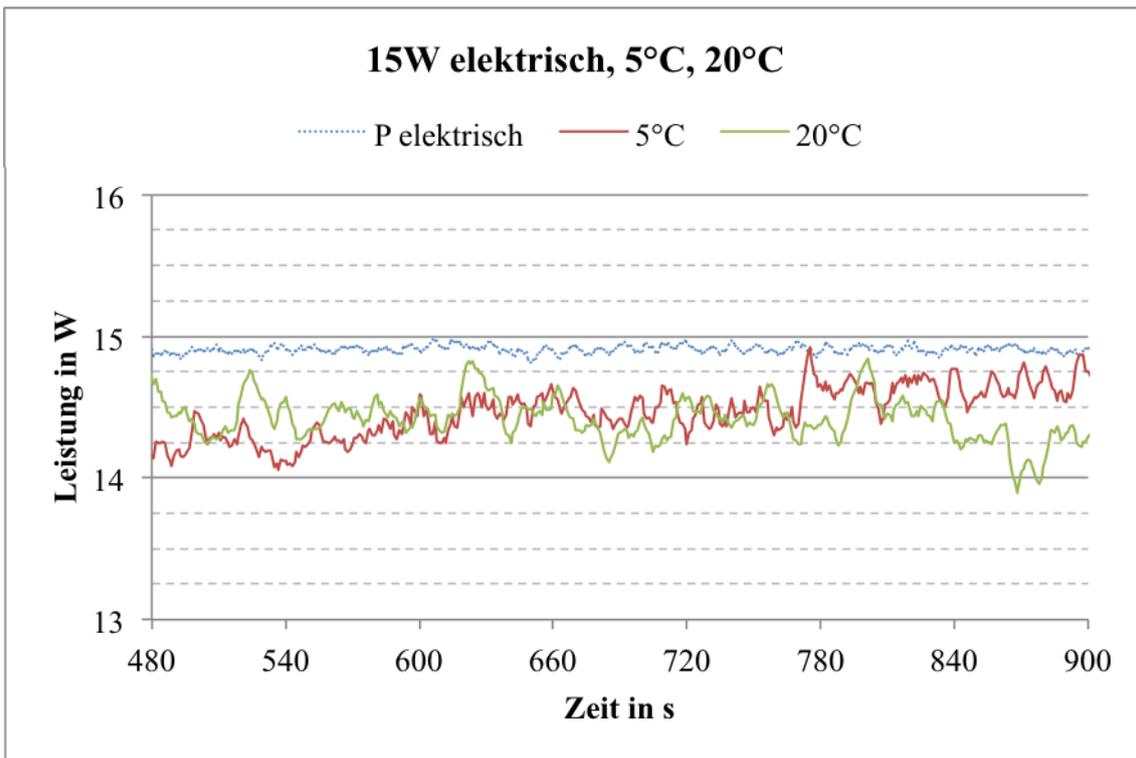


Abbildung 5-3: Simulation von niederlastigen Betriebsbedingungen

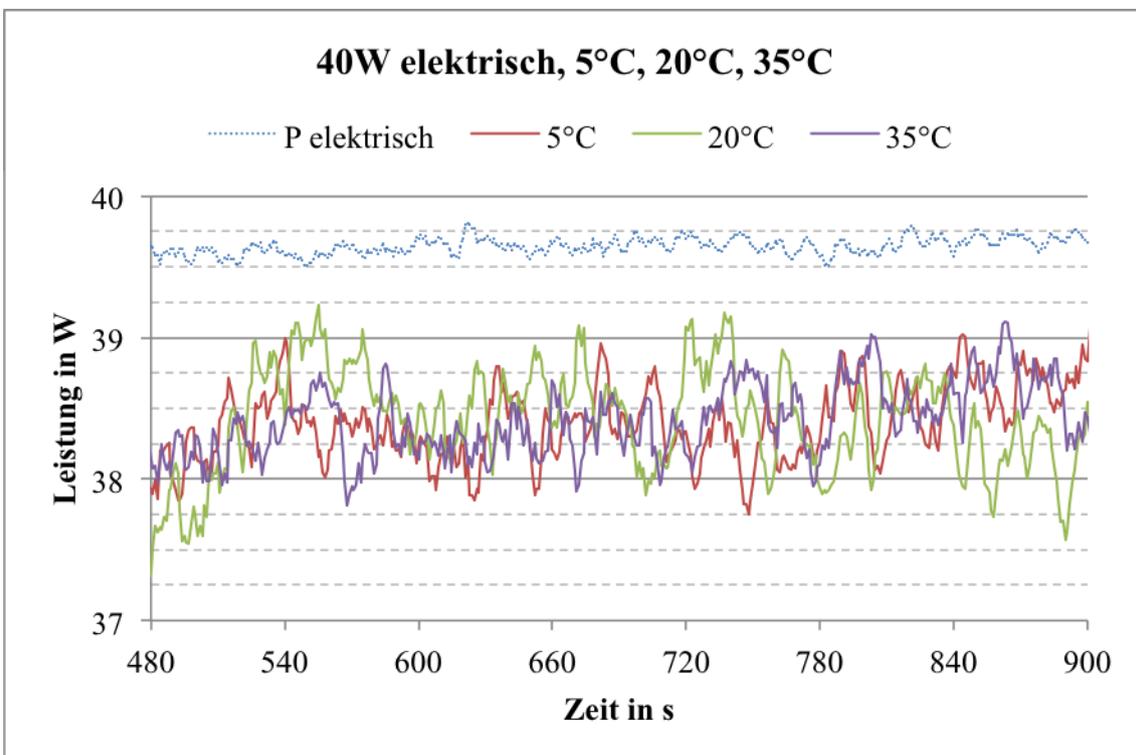


Abbildung 5-4: Simulation von hochlastigen Betriebsbedingungen

den Punkt, an dem die Abweichung größer als die der Hitzdrahtmessung ist. Das wird auch im Messergebnis durch einen Anstieg der Abweichung der Leistungsmessung sichtbar.

Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4 dokumentieren ausschnittsweise einige Messungen unter stationären Bedingungen. Die Diagramme fassen gleiche elektrische Leistungen bei unterschiedlichen Prüftemperaturen zusammen. Die beiden Leistungen wurden stellvertretend für unterschiedliche Betriebspunkte von Fahrzeugbatterien gewählt.

15W entsprechen der thermischen Verlustleistung einer Einzelzelle unter niederlastigen Betriebsbedingungen (z.B. Fahrt in der Ebene bei Geschwindigkeiten, wie sie im Stadtgebiet vorkommen).

Thermische Verluste in der Größe von 40W sind bei Hochstromanwendungen zu erwarten, z.B. Beschleunigungsvorgang oder Rekuperationsbremsung.

5.6.2 Antwortverhalten

Bei der Analyse transientser Verläufe von gemessener und simulierter Leistung stellte sich bald heraus, dass offensichtlich unberücksichtigte Kapazitäten Einfluss auf die Messergebnisse hatten. Dies machte sich besonders bei größeren Sprüngen in der Heizleistung dadurch bemerkbar, dass die mit den Pt100 ermittelte Leistung einen großen zeitlichen Versatz zum Anregungssignal aufwies. Abbildung 5-5 stellt den unter Abschnitt 5.3

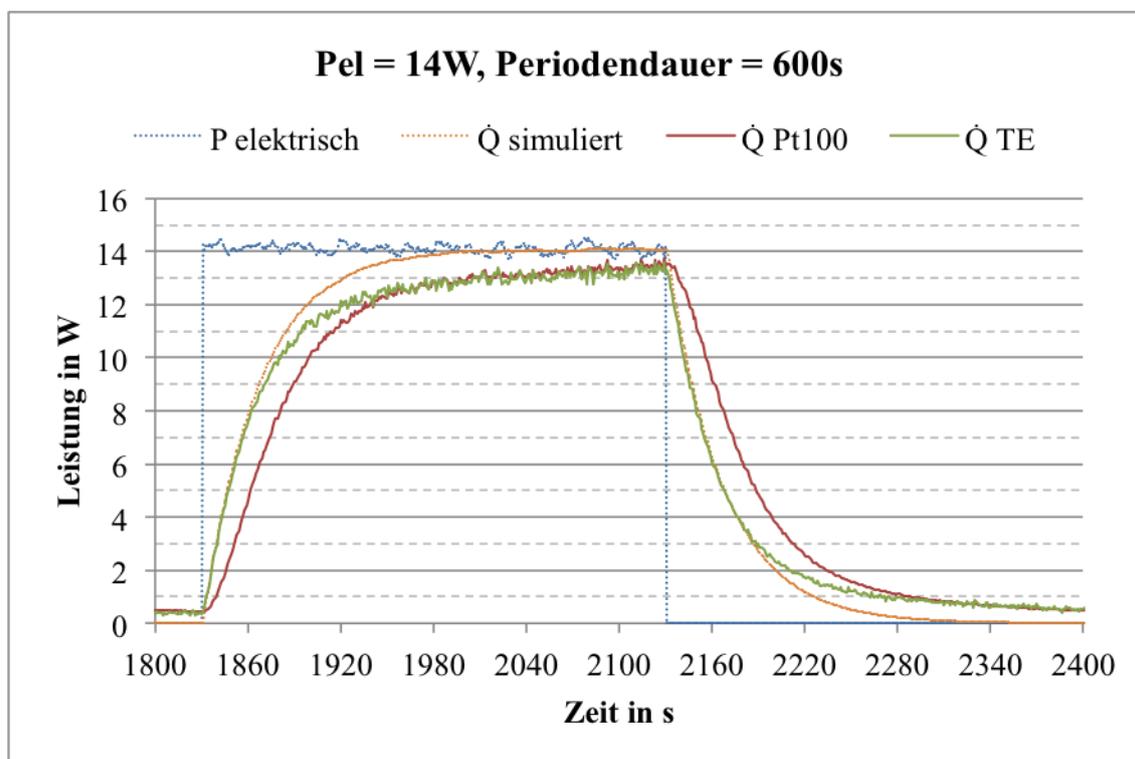


Abbildung 5-5: Verlauf der Messergebnisse (rote und grüne Kurve) bei einer sprunghaften Änderung der elektrischen Leistung (blaue Kurve)

erwähnten Aufwärmvorgang unter Anregung mit einem Rechtecksignal dar. Es ist sehr gut der Unterschied zwischen der simulierten und der mit den Pt100 gemessenen Kurve (rote Kurve, $Q_{\dot{,Pt100}}$) zu erkennen.

Als Grund für den Versatz konnte die Trägheit eingesetzten Widerstandsthermometer, deren Durchmesser mit 4mm deutlich zu groß für diese Aufgabe gewählt wurde, gefunden werden.

Aus diesem Grund wurden in einer Modifikation des Prüfstands zusätzlich die eingangs erwähnten Thermoelemente in der zweiten Temperaturmessstelle verbaut. Das Ergebnis dieser Bemühungen ist in der selben Abbildung ersichtlich (grüne Kurve, $Q_{\dot{,TE}}$). Das Ansprechverhalten hat sich im Vergleich zur Messung mit den Pt100-Sensoren erheblich verbessert. Die in Abschnitt 5.6.1 diskutierte verbleibende einseitige Abweichung in der Leistungsmessung ändert sich jedoch nicht.

Die Anregung der Heizmatte mit einem Rechtecksignal stellte unter den Testbedingungen einen Extremfall dar. Durch die im Vergleich zu Lithium-Batterien sehr geringe Wärmekapazität der Heizmatte waren Leistungsänderungen möglich, die bei der Vermessung von realen Zellen niemals vorkommen werden. In Abbildung 5-5 beträgt die zeitliche Änderung der simulierten thermischen Verlustleistung (orange Kurve, $Q_{\dot{,sim}}$) 325mW/s (Steigung der Tangente im Startpunkt der Leistungsänderung bei Sekunde 1830). Durch die modifizierte Messung mit Thermoelementen ist es möglich, diese Rate realitätsgetreu abzubilden woraus abgeleitet wird, dass auch die Erfassung transients Vorgänge an realen Zellen zeitrichtig geschieht.

Die Messungen unter rampenförmiger elektrischer Leistung ergaben, dass es mit den verbauten Pt100-Sensoren nahezu unmöglich gewesen wäre, transiente Leistungsverläufe zeitlich und in ihrer Größe korrekt abzubilden. Abbildung 5-6 zeigt die Verläufe der gemessenen Leistung für eine simulierte mittlere thermische Leistungsänderung von 105mW/s. Während die Messung mit Thermoelementen dem Verlauf ohne weiteres folgen konnte, machte sich bei der Messung mit den Pt100 eine starke Dämpfung bemerkbar. Erst bei der in Abbildung 5-7 dargestellten Leistungsänderung von ca. 5mW/s konnte auch die Messung basierend auf den Werten der Pt100 der simulierten Kurve folgen.

Neben der Trägheit der Widerstandsthermometer konnte durch die Simulation der abgegebenen Wärmeleistung der Heizmatte auch eine Eigenheit im Aufbau des Prüfstands sichtbar werden. Betrachtet man Abbildung 5-5 und Abbildung 5-7, so fallen zwei Dinge auf: In der erstgenannten Abbildung folgt die mit den Thermoelementen aufgenommene Kurve der simulierten Leistung im fallenden Teil (Sekunde 2130 bis 2400) ab einem gewissen Zeitpunkt

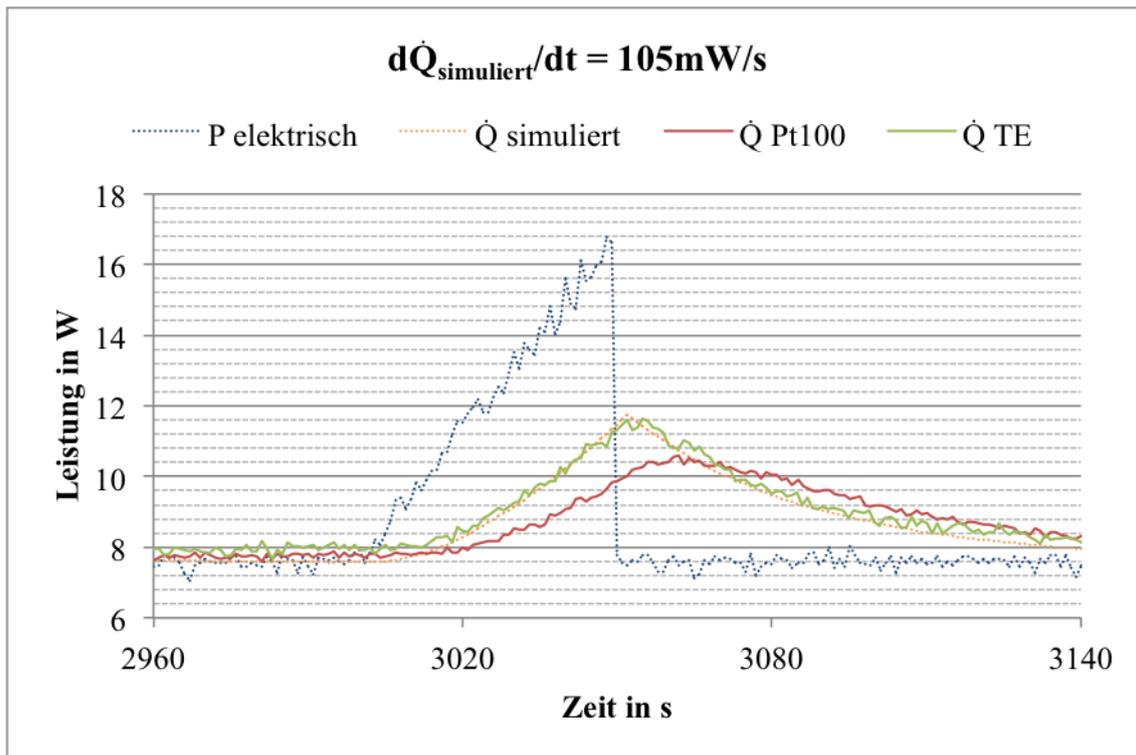


Abbildung 5-6: Verlauf der Messergebnisse (rote und grüne Kurve) bei einer Änderung der thermischen Leistung (orange Kurve) von 105mW/s

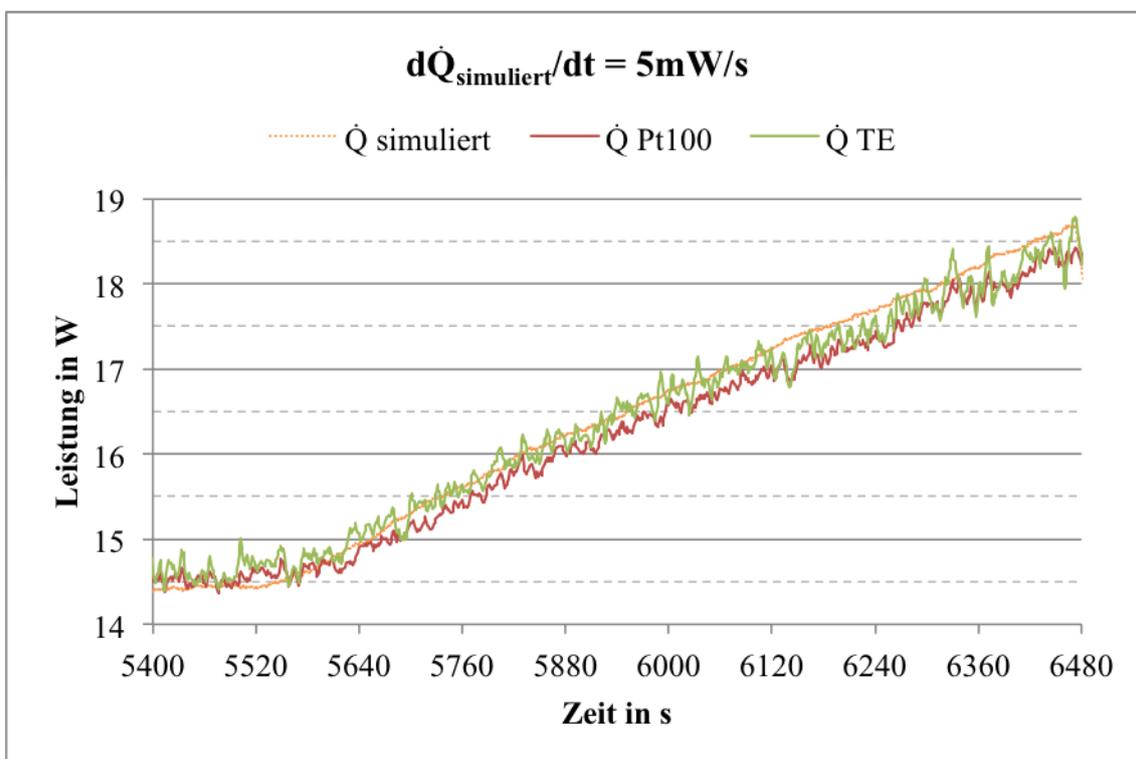


Abbildung 5-7: Verlauf der Messergebnisse (rote und grüne Kurve) bei einer Änderung der thermischen Leistung (orange Kurve) von 5mW/s

(ca. Sekunde 2190) nicht mehr. Stattdessen bleibt sie, wie der mit den Pt100 aufgenommene Verlauf, bis zum Ende des dargestellten Intervalls auf einem höheren Wert „hängen“. Der Messung wird also Wärme zugeführt, die nicht der Heizmatte entspringt. Diese Aussage lässt sich dadurch untermauern, indem man den gesamten Verlauf über alle 6 Perioden des Rechtecksignals heranzieht und die gemessene Leistung zu Beginn einer jeden Periode vergleicht. Es lässt sich, wie in Abbildung 5-8 dargestellt, ein Anstieg der thermischen Leistung feststellen, obwohl es keinen Eintrag über die Heizmatte gibt.

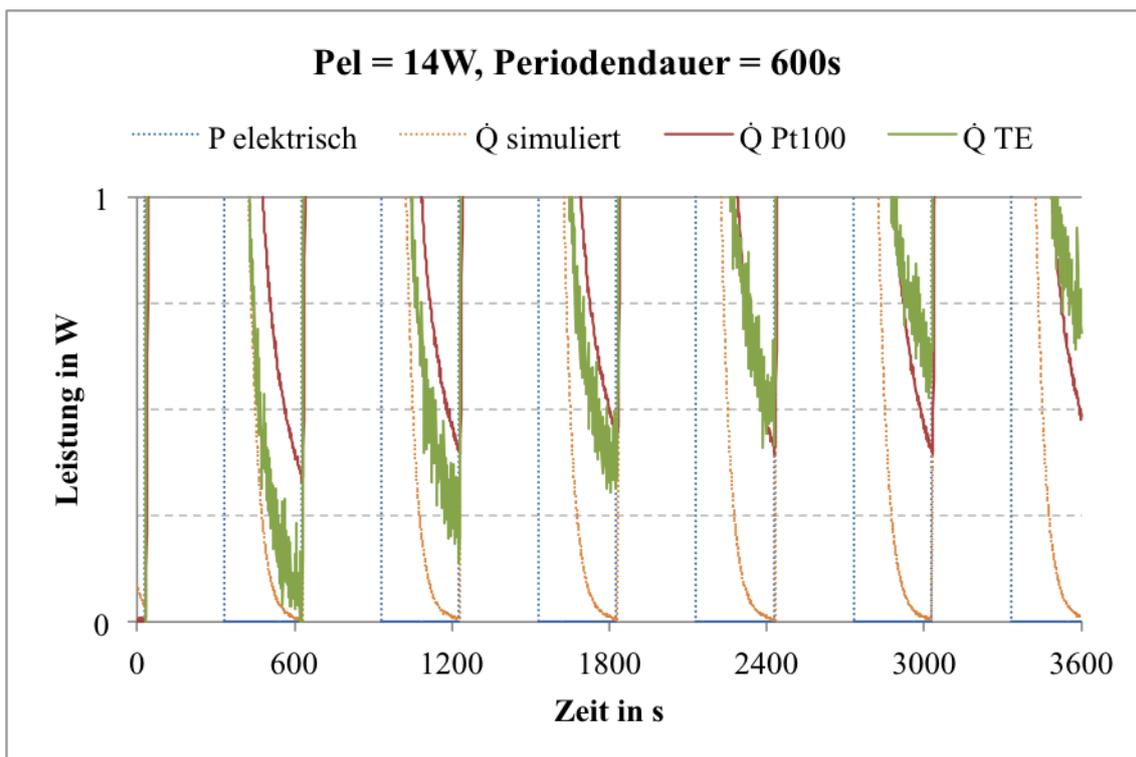


Abbildung 5-8: Anstieg der gemessenen Leistung durch den Einfluss der Isolierung

Die Vermutung liegt nahe, dass sich die reichlich verbaute Isolierung des Prüfstands im Bereich um und nach der Heizmatte durch die zugeführte Heizleistung sehr langsam aufwärmt. In den Phasen, wo der Heizmatte keine Leistung zugeführt wird, gibt die Isolierung einen Teil der aufgenommenen Wärme wieder ab. Dieser Teil ist messbar und stellt den Offset zur Simulation in den Zeitintervallen dar, in denen kein Wärmestrom gemessen werden sollte.

In Abbildung 5-7 ist der Wärmefluss in die Isolierung daran zu erkennen, dass die Verläufe der Messungen eine geringfügig kleinere Steigung aufweisen als der Verlauf der Simulation.

5.6.3 Kabelwärmetauscher

Vergleicht man Abbildung 5-9 mit Abbildung 5-10 so ist zu erkennen, dass für den Fall des nicht über die Stromzuleitungen kontaktierten Dummies die mittlere Temperatur der Pole höher liegt, als für den Fall mit angeschlossenen Kabeln. Daraus wurde geschlossen, dass im Fall der angeschlossenen Stromzuleitungen die Möglichkeit besteht, dass Wärme von der Zelle über die Pole und Kabel in die Umgebung abfließt, ohne von der Messung erfasst zu werden.

Der Vergleich mit Abbildung 5-11 legt nahe, dass genau das durch den Einsatz des Kabelwärmetauschers verhindert wird. Als Referenz wird die Differenz der Oberflächentemperatur zur Poltemperatur herangezogen. Wird bei gleichbleibendem konvektiven Wärmeübergang die Differenz der Temperaturen größer, so findet eine Wärmeleitung über die Pole in die Kabel statt.

Für den Fall des nicht angeschlossenen Dummies konnte eine Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Polen von 6K gemessen werden. Die mittlere gemessene Leistung betrug relativ zur mittleren elektrisch eingebrachten Leistung 93,6%. Bei angeschlossenen Kabeln stieg die Differenz der Temperaturen auf 11K an, die gemessene Leistung sank relativ zur elektrisch eingebrachten auf 92,7%.

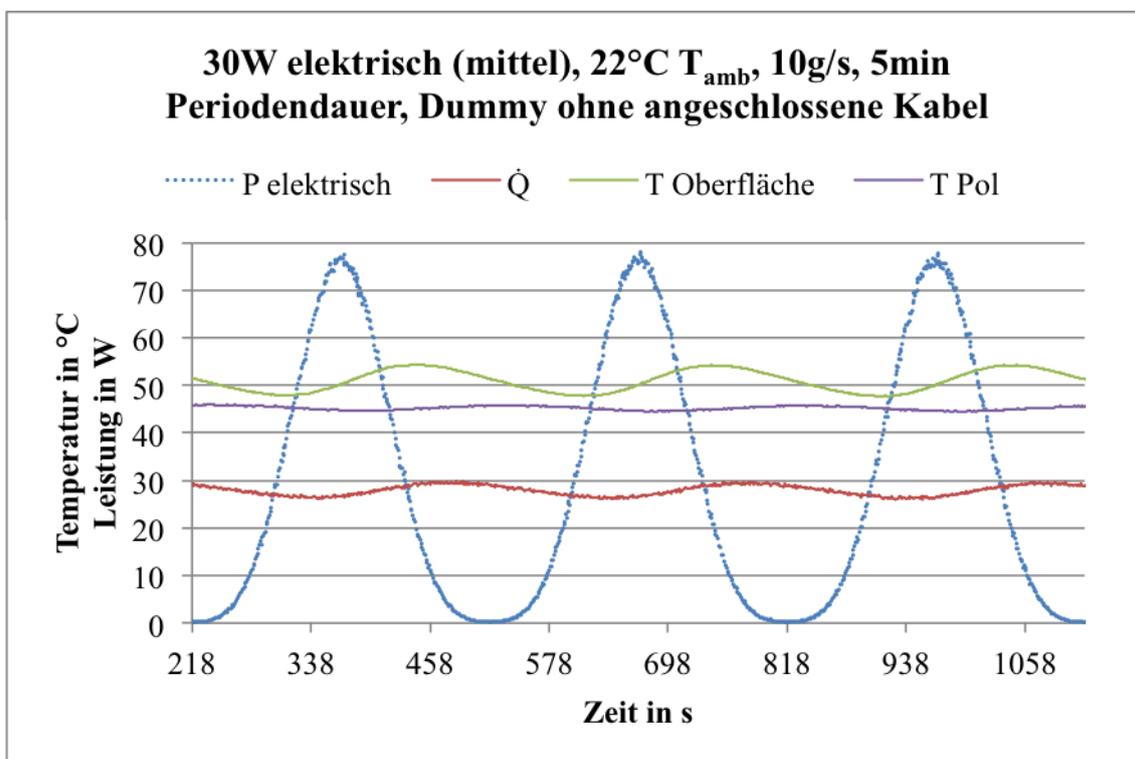


Abbildung 5-9: Instationäre Messung am Dummy

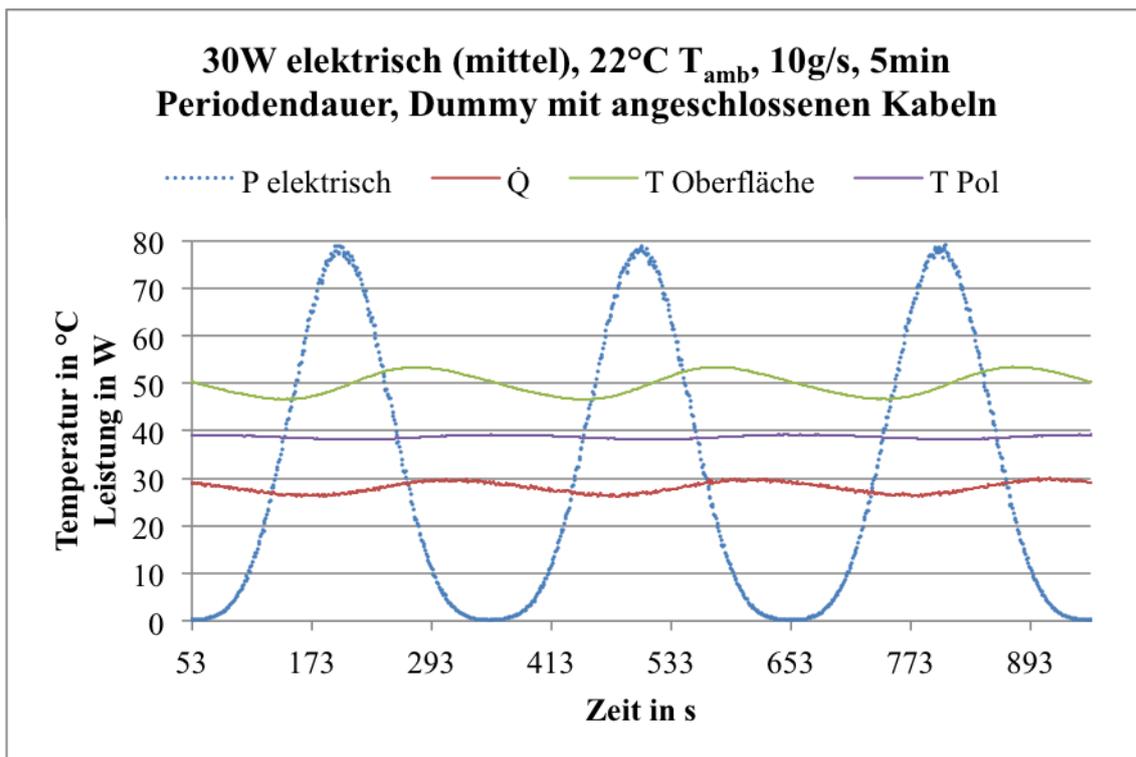


Abbildung 5-10: Instationäre Messung am Dummy mit angeschlossenen Kabeln

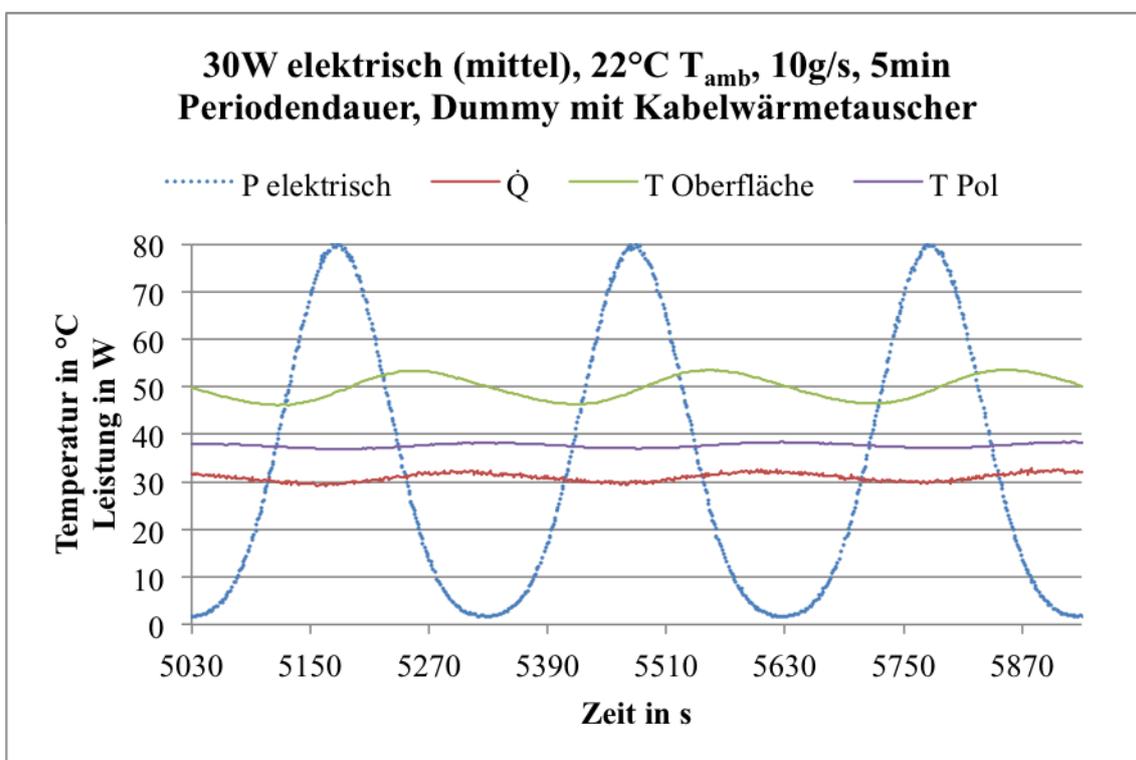


Abbildung 5-11: Instationäre Messung am Dummy mit angeschlossenem Kabelwärmetauscher

Nach Zwischenschalten des Kabelwärmetauschers konnte eine Temperaturdifferenz von 12K zwischen Oberfläche des Dummies und der Pole gemessen werden. Die mittlere gemessene Leistung betrug in Relation zur mittleren elektrisch eingebrachten 93,1%.

Änderungen im Ansprechverhalten der Messung lassen sich durch die sinusförmige Anregung am besten als Phasenverschiebung zwischen Oberflächentemperatur des Dummy und der gemessenen Leistung angeben, da die vom Dummy abgegebene Wärme eine Funktion der Oberflächentemperatur ist.

Wie in Abbildung 5-9 erkenntlich, ist bereits bei nicht angeschlossenem Dummy eine Phasenverschiebung zwischen den Verläufen von Oberflächentemperatur und gemessener Leistung von 34s vorhanden. Diese ist auf die oben erwähnte Trägheit der Pt100-Fühler zurückzuführen. Zum Zeitpunkt dieser Messungen waren noch keine Thermolemente in der zweiten Temperaturmessstelle verbaut. Die im Folgenden getätigten Aussagen sind dennoch von allgemeiner Gültigkeit.

Vergleicht man Abbildung 5-9 mit Abbildung 5-10 so ist durch das Anschließen der Kabel am Dummy ein Anstieg der Phasenverschiebung um 14s zu messen. Begründet wird dieser Anstieg durch die thermische Trägheit der Kupferkabel, die wie ein „Speicher“ zwischen Batterie und Messstelle wirken.

Ersetzt man die Kabel durch den Kabelwärmetauscher, so kann der Anstieg der Phasenverschiebung auf 4s reduziert werden.

6 Übergang zur Simulation

Die Vermessung realer Fahrzeugzellen mit dem Prüfstand allein bringt in erster Linie noch keinen weiteren Einblick in die thermischen Abläufe in deren Inneren. Die Idee dieses Projekts war, als Unterscheidungsmerkmal zu den unter Abschnitt 2.4 genannten Methoden, die Kopplung der Messung mit der Simulation.

Die dahinter stehende Grundidee ist in Abbildung 6-1 und Abbildung 6-2 illustriert: Wären die Verluste in der Batterie nur ohmscher Natur, dann müsste eine auf den Messdaten basierende Simulation, unter der Voraussetzung, dass Wärmekapazität und –leitfähigkeit der Zelle bekannt sind, die selben Resultate liefern.

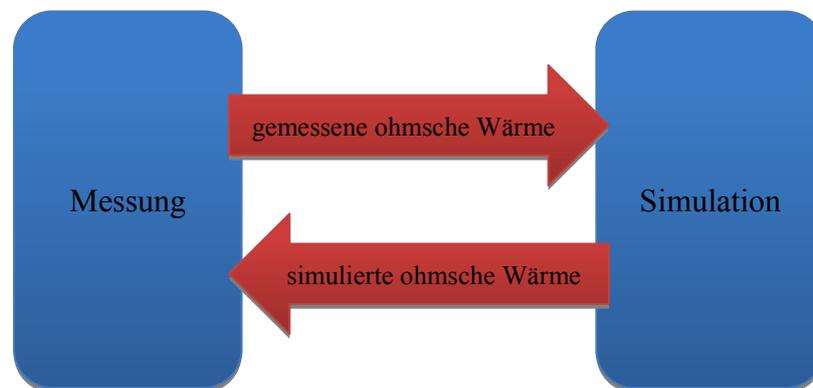


Abbildung 6-1: Für rein ohmsche Verluste liefert die Simulation die selben Ergebnisse wie die Messung

Weil aber auch andere Faktoren in der Chemie der Zelle zu Verlusten führen, wird es zu Abweichungen der Simulation von den gemessenen Daten kommen. Diese Abweichungen versucht man nun in der Simulation nachzubilden. Die Terme nach den in Abschnitt 2.4.1.1 angeführten Gleichungen werden so angepasst, dass die im aktiven Material freigesetzte Wärme der über die Oberfläche abgegebenen und vom Prüfstand erfassten entspricht. Das Batteriemodell kann so theoretisch vollständig parametrisiert werden.

Die Bestimmung der beiden vorausgesetzten Parameter kann auf folgende Weise geschehen: Für die Wärmekapazität wird die Zelle gewogen und anschließend so lange aufgewärmt, bis sie mit Sicherheit eine einheitliche Temperatur angenommen hat, die z.B. 10K über Raumtemperatur liegt. Sie wird dann unverzüglich in ein Fluid (z.B. Öl) mit bekannter Masse und Wärmekapazität, und welches sich auf Raumtemperatur befindet, eingebracht. Nach einiger Zeit stellt sich ein thermodynamisches Gleichgewicht ein. Durch Messung der Temperatur beider Körper vor und nach diesem Vorgang lässt sich die Wärmekapazität der

Zelle berechnen.

Die Wärmeleitfähigkeit lässt sich im Prüfstand bestimmen. Dazu wird die Batterie innerhalb eines sehr eng begrenzten Ladezustandsbereichs zyklisch geladen und entladen. Misst man den dabei abgegebenen Wärmestrom über einen längeren Zeitraum, so kann man davon ausgehen, dass nach der Aufwärmphase der Zelle der mittlere gemessene Wärmestrom dem im Inneren freigesetzten entspricht. Bei bekannter Wärmekapazität kann die Wärmeleitung aus Gleichung (2-14) abgeleitet werden.

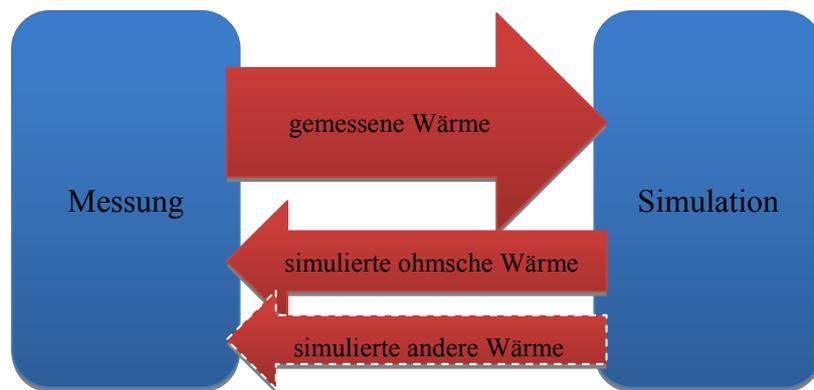


Abbildung 6-2: Differenz zwischen gemessener und simulierter ohmscher Wärme als Ausdruck der Vorgänge in der Chemie des aktiven Materials

7 Zusammenfassung

7.1 Resümee

In dieser Arbeit wurde die Problematik der Erfassung der im Inneren einer Lithium-Ionen-Fahrzeugbatterie zu einem bestimmten Zeitpunkt und unter gegebenen Randbedingungen freiwerdenden Wärme erläutert. Aktuelle rechnerische Methoden sind aufgrund begrenzter Informationstiefe bezüglich Aufbau und Zusammensetzung der Zellen eher ungenau in Bezug auf die Größe des Wärmestroms, messtechnische Methoden erfassen nur den über die Oberfläche abgegebenen Wärmestrom, welcher nicht dem im Inneren der Zelle freiwerdenden entspricht.

Der vorgestellte Prüfstand ermöglicht die Erfassung der von einer Einzelzelle über deren Oberfläche abgegebenen thermischen Verlustleistung zeitaufgelöst durch die Bestimmung der Enthalpieänderung eines Luftmassenstroms. Im angestrebten Messbereich der thermischen Verluste von 10W bis 100W kann eine Messungenauigkeit von unter 5% angegeben werden. Es können die thermischen Randbedingungen Prüftemperatur und Luftmassenstrom und damit die Temperaturerhöhung der Zelle vorgegeben werden.

Die mit dem Prüfstand generierte Datenbasis soll ein Grundgerüst für die Thermalsimulation von Batterien bieten, aus der heraus die Parametrierung des Zellmodells erfolgt. Wärmeentwicklung, Wärmekapazität und –leitfähigkeit der Zelle sollen für ein Repertoire an Betriebsbedingungen erfassbar gemacht werden. Die Vorgehensweisen dazu sind vielfältig, eine weniger komplexe wurde in dieser Arbeit genannt.

7.2 Ausblick

Durch die Überprüfungs-messungen konnte festgestellt werden, dass an der Temperaturmessstelle am Austritt der Prüfkammer trotz vielfältiger Bemühungen noch keine optimale Durchmischung der Prüfluft vorhanden ist. Als Resultat weisen die Messergebnisse beinahe eine konstante einseitige relative Abweichung vom Sollwert auf, hin zu kleineren Werten. Bei optimaler Durchmischung würde die Abweichung der Messung wesentlich geringer ausfallen. Hier ist definitiv ein Ansatzpunkt für eine weitere Optimierung gegeben, welche aber auf Grund der fortgeschrittenen Zeit nicht mehr durchgeführt wurde.

Desweiteren konnte ein Einfluss der Wärmekapazität der Prüfstandsisolierung auf das Messergebnis nachgewiesen werden. Zu dessen Minimierung bzw. Vermeidung sind konstruktive Änderungen am Prüfstand notwendig, die ebenfalls auf Grund der fortgeschrittenen Zeit nicht mehr realisiert wurden.

Literatur

- [1] Baehr, H.D.; Kabelac, S.: Thermodynamik. Grundlagen und technische Anwendungen, 15. Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-642-24160-4, 2012
- [2] Baehr, H.D.; Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung. 7. Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-642-05500-3, 2010
- [3] Bandhauer, T.; Garimella, S.; Fuller, T.: A Critical Review of Thermal Issues in Lithium-Ion Batteries. Journal of The Electrochemical Society 158 (3) R1-R25, DOI 10.1149/1.3515880, 2011
- [4] Barsoukov, E. et al.: Thermal impedance spectroscopy for Li-ion batteries using heat-pulse response analysis. Journal of Power Sources 109, S.313-320, 2002
- [5] Bernardi, D. et al.: A General Energy Balance for Battery Systems. Journal of The Electrochemical Society 132, S.5-12, 1985
- [6] Bottke, P.: Primäre und wiederaufladbare Lithium-Ionen-Batterien. Skriptum zum Laborversuch „Lithium-Ionen-Batterien“, Technische Universität Graz, 2013
- [7] Chen, S.C. et al.: Thermal analysis of lithium-ion batteries. Journal of Power Sources 140, S.111-124, 2005
- [8] Eden, K.; Gebhard, H.: Dokumentation in der Mess- und Prüftechnik. 1. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag Wiesbaden, ISBN 978-3-8348-1600-9, 2011
- [9] Eichlseder, H.; Klell, M.: Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik, Erzeugung, Speicherung und Anwendung. 2. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag Wiesbaden, ISBN 9783834810274, 2010
- [10] Eichlseder, H.: Thermodynamik. Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2009
- [11] Flash Method for the Thermal Diffusivity Measurement. Thermophysical Properties Laboratory, http://www.tpl.fpv.ukf.sk/engl_vers/flash.htm, abgerufen am 28.02.2013
- [12] Fleckenstein, M. et al.: Thermal Impedance Spectroscopy - A method for the thermal characterization of high power battery cells. Journal of Power Sources 223, S.259-267, 2013
- [13] Forgez C. et al.: Thermal modeling of a cylindrical LiFePO₄/graphite lithium-ion battery. Journal of Power Sources 195, S.2961-2968, 2010
- [14] Grote, K.H. (Hrsg); Feldhusen, J. (Hrsg): Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau, 23. Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-642-17305-9, 2012
- [15] Jeon, D.H.; Baek, S.M.: Thermal modeling of cylindrical lithium ion battery during discharge cycle. Energy Conversion and Management 52, S.2973-2981, 2011

- [16] Kim, U.S. et al.: Effect of electrode configuration on the thermal behavior of a lithium-polymer battery. *Journal of Power Sources* 180, S.909–916, 2008
- [17] Klell, M.: Höhere Thermodynamik. Vorlesungsskriptum, Technische Universität Graz, 2011
- [18] Lin, X.; Perez, H.; Siegel, J.; et al.: Online Parameterization of Lumped Thermal Dynamics in Cylindrical Lithium Ion Batteries for Core Temperature Estimation and Health Monitoring. *IEEE Transactions on Control System Technology* PP99, 2012
- [19] Maleki, H.; Shamsuri, A.K.: Thermal analysis and modeling of a notebook computer battery. *Journal of Power Sources* 115, S.131-136, 2003
- [20] Maleki, H. et al.: Thermal Properties of Lithium-Ion Battery and Components. *Journal of The Electrochemical Society*, 146 (3), S.947-954, 1999
- [21] Nitsche, W.; Brunn, A.: Strömungsmesstechnik. 2. Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-20990-4, 2006
- [22] Pesaran, A.; Keyser, M.: Thermal Characteristics of Selected EV and HEV Batteries. *Annual Battery Conference: Advances and Applications*, January 2001
- [23] Schmidt, J.P. et al.: Investigation of the thermal properties of a Li-ion pouch-cell by electrothermal impedance spectroscopy. *Journal of Power Sources* 196, S.8140–8146, 2011
- [24] Vaidyanathan, H et al.: Heat dissipation in a lithium ion cell. *Journal of Power Sources* 93, S.112-122, 2001
- [25] Verein Deutscher Ingenieure VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC): VDI-Wärmeatlas. 10. Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-25504-8, 2006
- [26] Ye, Y. et al.: Electro-thermal modeling and experimental validation for lithium ion battery. *Journal of Power Sources* 199, S.227-238, 2012
- [27] Benutzer Cepheiden, Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle, Wikimedia Commons, [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Li-Ion-Zelle_\(CoO2-Carbon,_Schema\).svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Li-Ion-Zelle_(CoO2-Carbon,_Schema).svg), abgerufen am 09.05.13
- [28] Benutzer MovGP0, Vergleich der Leistungs- und Energiedichten einiger Energiespeicher, Wikimedia Commons, <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Energiespeicher2.svg>, abgerufen am 09.05.13

8 Anhang

8.1 Vernachlässigung der Wärmestrahlung

Der Wärmeaustausch zweier Körper über deren parallele Oberflächen wird nach Gleichung (8-1) berechnet. Es folgt eine grobe Abschätzung des Strahlungswärmeaustauschs zwischen einer sich in der Prüfkammer befindlichen Zelle und der sie umgebenden Isolierung des Prüfstands. Angaben zu den Emissions- und Absorptionsgraden variieren je nach Literatur stark, daher werden eher höhere Werte angesetzt. Der Emissionsgrad von Aluminium ε_{Al} (Oberfläche der Zelle) wird mit 0,6 festgesetzt, der von Polystyrol mit 0,1. Die an der Übertragung beteiligte Oberfläche von Zelle und Prüfstandsisolierung soll je $0,04\text{m}^2$ betragen. Der Austauschgrad E in Gleichung (8-1) berechnet sich mit den Emissionsgraden nach Gleichung (8-2). Die Berechnung erfolgt bei höchster Prüfstandstemperatur von 35°C , wobei die Temperaturdifferenz zur Zelle 20K beträgt.

$$\dot{Q} = \sigma EA \cdot (T_{\text{Zelle}}^4 - T_{\text{Prüfstand}}^4) \quad (8-1)$$

$$E = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{Al}} + \frac{1}{\varepsilon_{PS}} - 1} \quad (8-2)$$

Es ergibt sich eine durch Wärmestrahlung abgegebene Leistung von $0,54\text{W}$.

8.2 Vernachlässigung der Luftfeuchtigkeit

Die bei der Leistungsmessung von der Luftfeuchtigkeit beeinflussten Stoffwerte sind einerseits die Dichte und andererseits die Enthalpie der Luft in der Prüfkammer. Ähnlich Gleichung (3-1) erfolgt die Vernachlässigungsrechnung durch Multiplikation der Dichte mit der Enthalpiedifferenz. Als Ausgangspunkt dient Luft bei 20°C mit einer relativen Feuchte von 0 und 100%. Daraus lässt sich der Massengehalt des Wasserdampfes berechnen, der im Weiteren benötigt wird.

Es wird nun angenommen, dass einmal trockene Luft und einmal feuchte Luft mit obigem Wasserdampfgehalt im Prüfstand zirkulieren und die Eintrittstemperatur in die Prüfkammer $17,5^\circ\text{C}$ beträgt, die Austrittstemperatur $22,5^\circ\text{C}$. Nach untenstehender Tabelle stellen sich dabei die Ein- und Austrittsenthalpien h_{ein} und h_{aus} ein und die auf die Austrittstemperatur bezogene Dichte ρ .

	feuchte Luft ($\varphi=1$)	trockene Luft ($\varphi=0$)
ρ [kg/m ³]	1,16829	1,17871
h_{ein} [kJ/(kgK)]	54,54186	17,61590
h_{aus} [kJ/(kgK)]	59,64328	22,65300
$\rho \cdot (h_{\text{aus}} - h_{\text{ein}})$ [kJ/(m ³ K)]	5,95997	5,93728

Die Berechnung der Dichte und der Enthalpie der feuchten Luft richtet sich nach den in [25] angegebenen Formeln. Der letzten Zeile obiger Tabelle ist zu entnehmen, dass die Abweichung der Leistungsberechnung unter Vernachlässigung der Luftfeuchte in Bezug zur Rechnung mit feuchter Luft 0,38% beträgt.

8.3 Wärmeübergangskoeffizient

Der Wärmeübergangskoeffizient α soll für eine in den Prüfstand eingebaute Zelle der Firma SBLimotive berechnet werden, die eine thermische Leistung von 50W abgibt. Die Abmessungen entsprechen denen der zweiten prismatischen Zelle für PHEV nach Tabelle 3-2. Der Massenstrom der Luft wird auf ungefähr 10g/s eingestellt.

Der anzuwendende Fall bei der Berechnung entspricht dem für die Durchströmung eines Rechteckspaltes. Der hydraulische Durchmesser d_h wird über die Querschnitte von Zelle und Prüfkammer nach Gleichung (8-3) definiert, A beschreibt den durchströmten Querschnitt.

$$d_h = \frac{4 \cdot A}{U} = \frac{4 \cdot (0,19\text{m} \cdot 0,06\text{m} - 0,148\text{m} \cdot 0,0265\text{m})}{2 \cdot (0,19 + 0,06 + 0,148 + 0,0265)} \approx 0,035\text{m} \quad (8-3)$$

Die Strömungsgeschwindigkeit v erhält man nach Division des Massenstroms mit der Dichte der Luft bei 20°C und dem Querschnitt A .

$$v = \frac{0,01 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{1,1894 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,0075\text{m}^2} \approx 1,12 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (8-4)$$

Die Reynolds-Zahl ergibt sich mit der kinematischen Viskosität $\nu = 15,36 \cdot 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ von Luft bei 20°C zu

$$Re = \frac{v \cdot d_h}{\nu} \approx 2580 \quad (8-5)$$

Die mittlere Nusselt-Zahl wird nach Gleichung (8-6) berechnet, wobei die Prandtl-Zahl Pr mit

0,715 eingesetzt wird, h entspricht der Länge der Zelle in Strömungsrichtung mit 0,091m und der Rohrreibungswert ξ berechnet sich nach Gleichung (8-7).

$$\overline{Nu} = \frac{\frac{\xi}{8} \cdot Re \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot (Pr^{\frac{2}{3}} - 1) \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}}} \left[1 + \left(\frac{d_h}{h} \right)^{\frac{2}{3}} \right] = 21 \quad (8-6)$$

$$\xi = (0,79 \cdot \ln(Re) - 1,64)^{-2} = 0,048 \quad (8-7)$$

Nach Gleichung (3-3) ist der Wärmeübertragungskoeffizient α für diese Situation gleich 15W/(m²K).

8.4 Konditionierungsleistung

Löst man Gleichung (2-6) für den Fall eines temperaturgetriebenen Wärmestroms durch eine ebene Wand der Dicke l und des mittleren Querschnittes \bar{A} , nimmt sie die Form von Gleichung (8-8) an. Der mittlere Querschnitt berechnet sich nach Gleichung (8-9), A_1 und A_2 bezeichnen dabei die beiden gegenüberliegenden Seiten der betrachteten Wand.

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{l} \bar{A} \cdot \Delta T \quad (8-8)$$

$$\bar{A} = \frac{A_1 + A_2}{2} \quad (8-9)$$

Die mittlere Querschnittsfläche der innenliegenden Isolierung der Klimakammer beträgt 1,95m², die der außenliegenden Isolierung beträgt 2,89m², der Wärmeleitwert der Polystyrolplatten beträgt 0,035W/(mK).

Die mittlere Querschnittsfläche des Holzkorpus der Klimakiste beträgt 2,38m², der Wärmeleitwert von MDF wird mit 0,15W/(mK) angesetzt.

Die Wärmedurchgangszahl k setzt sich aus den einzelnen Wärmeleitwerten, Querschnitten und Dicken nach Gleichung (8-10) zusammen. Der erste und letzte Term unter dem Bruchstrich berücksichtigen die konvektiven Effekte an der Außenseite und der Innenseite der Klimakammer. Sie sind im Vergleich zu den restlichen Termen sehr klein und können bei der Berechnung vernachlässigt werden.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{innen}} \cdot A_{\text{innen}}} + \frac{l_{\text{PS,innen}}}{\lambda_{\text{PS,innen}} \cdot A_{\text{PS,innen}}} + \frac{l_{\text{MDF}}}{\lambda_{\text{MDF}} \cdot A_{\text{MDF}}} + \frac{l_{\text{PS,außen}}}{\lambda_{\text{PS,außen}} \cdot A_{\text{PS,außen}}} + \frac{1}{\lambda_{\text{außen}} \cdot A_{\text{außen}}}} \quad (8-10)$$

Bei einem maximalen Temperaturunterschied ΔT zwischen der Umgebung des Prüfstands und der eingestellten Prüfstandstemperatur von 20K ergibt sich nach Gleichung (8-11) ein Wärmestrom \dot{Q} von

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{k} = 25W \quad (8-11)$$

welcher in der Realität aber geringer ausfallen wird. Zur Vereinfachung der Berechnung wurde die Tatsache außer Acht gelassen, dass an den Stirnseiten der Klimakammer keine Wärme aus der Umgebung in der Hohlraum zufließen kann, die zur Wärmeleitung angenommene Querschnittsfläche ist demnach größer angenommen als es in Wirklichkeit der Fall ist.

8.4.1 Offener Kreislauf

55% relative Feuchte der angesaugten Luft angenommen, Temperatur der Umgebungsluft $T_u = 20^\circ\text{C}$. Zu erwartende Verlustleistung der Zelle $P_{ab} = 100W$, Prüfstandstemperatur $T_{ein} = 5^\circ\text{C}$. Nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik ergibt sich bei einer Temperaturerhöhung von 5K und der Enthalpieberechnung nach [25] der Massenstrom zu ca. 19,73g/s. Die Konditionierung von Umgebungstemperatur auf 5°C bedarf einer Leistung von ca. 300W, wobei die zusätzliche über die Rohre zufließende Wärme nicht beachtet wurde.

8.4.2 Geschlossener Kreislauf

Wird die Luft nach der Zelle wieder der Konditionierungseinheit zugeführt anstatt neue Luft aus der Umgebung anzusaugen, verringert sich die erforderliche Konditionierungsleistung drastisch. Neben der Verlustleistung der Zelle muss der nach Gleichung (8-11) über die Kisten zufließende Wärmestrom, als auch der über die Verrohrung übergehende Wärmestrom berücksichtigt werden.

Der Wärmeeintrag über die isolierte Verrohrung ist analog den Gleichungen (8-8)-(8-11) zu berechnen und wird hier nicht ausgeführt. In seiner Größe beträgt der ca. 20W.

Zusammen mit der maximal zu erwartenden Verlustleistung der Zelle beträgt die Konditionierungsleistung bei geschlossenem Kreislauf nur noch ca. 140W, also der Hälfte der unter Abschnitt 8.4.1 angeführten Leistung.

8.5 Maximaler Wasserdampfgehalt im Prüfstand

Für den unrealistischen Fall, dass die Luft der Prüfstands Umgebung, die auch als Prüfluft verwendet wird, eine relative Luftfeuchtigkeit φ von 1 aufweist berechnet sich die im Prüfstand eingeschlossene Wasserdampfmenge wie folgt:

Das Volumen V_{Klima} des Hohlraum in der Klimakiste beträgt

$$V_{\text{Klima}} = 0,822\text{m} \cdot (0,46\text{m} \cdot 0,33\text{m} - 0,41\text{m} \cdot 0,28\text{m}) \approx 0,03\text{m}^3 \quad (8-12)$$

Das Volumen $V_{\text{Prüf}}$ des Prüfraums in der Prüfkammer beträgt

$$V_{\text{Prüf}} = 0,702\text{m} \cdot 0,19\text{m} \cdot 0,06\text{m} \approx 0,008\text{m}^3 \quad (8-13)$$

Für das verbleibende Volumen V_{Rohr} in der Verrohrung des Prüfstands wird überschlagsmäßig mit einem allgemeinen Rohrrinnendurchmesser von 100mm und einer verbauten Gesamtrohrlänge von 4m gerechnet.

$$V_{\text{Rohr}} = 4\text{m} \cdot \frac{(0,1\text{m})^2 \pi}{4} \approx 0,03\text{m}^3 \quad (8-14)$$

Somit beläuft sich das Gesamtvolumen V_{gesamt} des Prüfstands zu ungefähr $0,07\text{m}^3$.

Die Berechnung des Wasserdampfgehaltes erfolgt nach Gleichung (8-15), der Sättigungsdampfdruck p' beträgt bei einer Umgebungstemperatur von 25°C $0,031697\text{bar}$, die Gaskonstante $R_{\text{Wasser}} = 461,52\text{J}/(\text{kgK})$.

$$m_{\text{Wasserdampf}} = V_{\text{gesamt}} \cdot \frac{p' \varphi}{R_{\text{Wasser}} \cdot T} \approx 1,6\text{g} \quad (8-15)$$

Dieser Wert stellt einen Extremfall dar und wird im realen Betriebsablauf niemals eintreten.

8.6 Wärmekapazität der Dummy-Zelle

Bezieht man die Heizmatten bei der Berechnung der Wärmekapazität des Dummy nicht mit ein, so bleiben die aus Aluminium bestehende Hülle sowie die Wärmeleitpaste zum Auffüllen des Innenlebens übrig.

Bei einem Gewicht von 145g ergibt sich für die Hülle eine Wärmekapazität von ungefähr 130J/K .

Schwieriger gestaltete sich die Ermittlung der Wärmekapazität der Wärmeleitpaste. Außer

deren Dichte von $2,2\text{g/cm}^3$ konnten die Hauptbestandteile der Zusammensetzung als Aluminiumoxid und Silikonöl definiert werden. Setzt man die Dichte von Aluminiumoxid mit $3,85\text{g/cm}^3$ an, die von Silikonöl mit $0,92\text{g/cm}^3$ errechnet sich die auf die Masse bezogene Zusammensetzung zu 43,7% Aluminiumoxid und zu 56,3% Silikonöl. Für die Wärmekapazitäten wurde für Aluminiumoxid ein Wert von $950\text{J}/(\text{kgK})$ angesetzt und für Silikonöl ein Wert von $1500\text{J}/(\text{kgK})$. Nach den prozentualen Anteilen berechnet sich die spezifische Wärmekapazität der Paste zu $1260\text{J}/(\text{kgK})$, was bei der im Dummy verbauten Menge von ca. 450g auf eine Wärmekapazität von 567J/K führt.

Die Wärmekapazität des Dummy beträgt somit 697J/K , die spezifische Wärmekapazität $1,17\text{kJ}/(\text{kgK})$.

Der Autor dankt dem "COMET K2 Forschungsförderungs-Programm" des Österreichischen Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), des Österreichischen Bundesministeriums für Wirtschaft, Familie und Jugend (BMWFJ), der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG), des Landes Steiermark sowie der Steirischen Wirtschaftsförderung (SFG) für die finanzielle Unterstützung.

Ebenfalls danke ich der Technischen Universität Graz.